Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil:
Construção e Infraestrutura

Jessica de Gasperi

Reologia e microestrutura de cimentos supersulfatados: efeitos do tipo e teor de sulfato de cálcio e da incorporação de hidropotássio (MPM)

Porto Alegre
2026

JESSICA DE GASPERI

REOLOGIA E MICROESTRUTURA DE CIMENTOS SUPERSULFATADOS: EFEITOS DO TIPO E TEOR DE SULFATO DE CÁLCIO E DA INCORPORAÇÃO DE HIDROPOTÁSSIO (MPM)

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil

Prof. Ana Paula Kirchheim
Dra, UFRGS, Brasil
Orientadora

Prof. Laura Silvestro
Dra, UTFPR, Brasil
Coorientadora

Porto Alegre
2026

JESSICA DE GASPERI

REOLOGIA E MICROESTRUTURA DE CIMENTOS SUPERSULFATADOS: EFEITOS DO TIPO E TEOR DE SULFATO DE CÁLCIO E DA INCORPORAÇÃO DE HIDROPOTÁSSIO (MPM)

Esta Tese de Doutorado foi julgada como parte dos requisitos para obtenção do título de DOUTORA EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Materiais de Construção, e aprovada em sua forma final pela Professora Orientadora e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de março de 2026.

Prof. Ana Paula Kirchheim
Dra., UFRGS, Brasil
Orientadora

Prof. Laura Silvestro
Dra, UTFPR, Brasil
Coorientadora

Prof. Prof. Ana Carolina Badalotti Passuello
Coordenador PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Paulo Ricardo de Matos
Dr., UDESC, Brasil

Prof. Caroline Angulski da Luz
Dra., UTFPR, Brasil

Prof. Vanessa Fátima Pasa Dutra
Dra., UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo esforço e abdicação que me proporcionaram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente e sobretudo, a Deus, pela vida e por Seu infinito amor. Suas bênçãos me alcançam mesmo quando não as mereço e, principalmente, quando mais preciso.

Aos meus pais, Jurandir e Jovita, pelo constante apoio e amor incondicional. Ao abrirem mão de seus sonhos para que eu pudesse viver os meus, tornaram-se meus maiores exemplos de generosidade.

À minha amada avó Celina, sinônimo de amor e fé. Suas orações e perseverança foram fundamentais para que, mesmo hoje, com sua ausência física, mantenham acesa em mim a esperança e coragem para dar o primeiro passo, na certeza de que o caminho depois se mostrará.

À minha dinda, Elenita, por todo amor e pelo grande exemplo de força. Estar cercada de mulheres assim, admiráveis, é profundamente inspirador.

Às minhas orientadoras, Ana Paula e Laura, pela transferência de conhecimento, pelo suporte e, principalmente, pelo encorajamento. Vocês são grandes referências, como pesquisadoras de alto nível, mas, sobretudo, como pessoas generosas e acolhedoras, verdadeiras fontes de inspiração.

À Fundação Proamb, aos meus colegas, e, especialmente, meu diretor Gustavo e presidente Neri, pelo apoio e pela compreensão diante da minha ausência em diversos momentos, e mesmo assim, por depositarem em mim uma dose altíssima de confiança e encorajamento. Com esse ambiente que estimula o desenvolvimento e potencializa o crescimento, tenho a mais absoluta certeza que a nobre missão e visão da Fundação serão cumpridas.

Aos meus amigos, que além de compreender minha ausência também sempre ofertaram uma escuta ativa e genuína. Essa rede de apoio garante que eu continue acreditando que sozinha pode ser possível chegar mais rápido, mas com vocês posso ir muito mais longe.

Aos meus queridos colegas do LINCE, companheiros dessa longa jornada. Além de pesquisadores incríveis, vocês são pessoas extraordinárias, cujos laços desejo manter para muito além do âmbito acadêmico.

À banca examinadora pelas contribuições valiosas, ajudando na construção deste documento.

À POTASH pelo apoio técnico e financeiro que permitiu custear essa pesquisa.

Ao LINCE e toda sua rede de parceiros que permitiram executar este trabalho.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram ou torceram para que mais essa etapa fosse alcançada.

“Somos aquilo que fazemos repetidamente. A excelência,
então, não é um ato, mas um hábito”

(Aristóteles)

RESUMO

De Gasperi, Jessica. **Reologia e microestrutura de cimentos supersulfatados: efeitos do tipo e teor de sulfato de cálcio e da incorporação de hidropotássio (MPM)**. 2026. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2026.

Cimentos com baixo teor ou isentos de clínquer, como os cimentos supersulfatados (CSS), despontam como alternativas promissoras diante do elevado impacto ambiental da indústria cimenteira, responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO_2. Apesar do potencial, ainda persistem lacunas relevantes na compreensão da cinética de hidratação e o comportamento reológico do CSS, especialmente quanto aos efeitos de tipo e teor de sulfatos ou na incorporação de materiais alternativos. Nesse contexto, o hidropotássio (MPM) apresenta característica favoráveis – composição química, pH e elevada capacidade de retenção de água- que o tornam candidato à aplicação em CSS. Este trabalho investiga primeiramente a influência do tipo (gipsita e anidrita) e teor de sulfato de cálcio (10, 15 e 20%) e posteriormente a incorporação de MPM no comportamento reológico e na cinética de hidratação de uma das formulações de CSS anteriores, produzida a partir de escória (80%), anidrita (15%) e clínquer (5%). O MPM foi incorporado como substituinte parcial do clínquer (50%), da escória (10 e 20%) ou de ambos. A pesquisa foi conduzida em pastas, que foram avaliadas por reometria rotacional (curvas de fluxo para obtenção de tensão de escoamento dinâmica, τ_0, e viscosidade equivalente, μ_{eq}) e reometria oscilatória (varredura de amplitude para módulos G' e G'' e limite elástico); calorimetria isotérmica, termogravimetria, FTIR e por resistência à compressão aos 28 dias. Os resultados evidenciaram que o tipo e o teor de sulfato de cálcio afetam de forma expressiva a reologia e hidratação em idades iniciais com tendências distintas: formulações contendo anidrita apresentaram maior liberação de calor e formação de produtos hidratados, além de maior trabalhabilidade comparado às formulações com gipsita. Esse comportamento é atribuído ao fornecimento mais gradual de íons SO_4^{2-} e Ca2+ pela anidrita. Para o MPM, os resultados mostraram impacto direto na reologia das pastas, promovendo suspensões mais estáveis e com dispersão mais uniforme (predomínio de G" sobre G' em faixas mais altas de deformação). O teor máximo estudado (22,5%) elevou a τ_0 dinâmica em 26 vezes e a μ_{eq} em aproximadamente 5 vezes frente ao sistema de referência. Na hidratação, o MPM promoveu dissolução contínua, favorecendo nucleação e crescimento de hidratos. As formulações contendo MPM apresentaram ganhos significativos de resistência à compressão em relação ao traço de referência, especialmente quando substituíram o clínquer (2,5% C) ou o clínquer e a escória (12,5% CE), resultando em um aumento de aproximadamente 59 e 31%, respectivamente. Esses resultados indicam que a incorporação controlada de MPM em sistemas com clínquer e escória favorece a cinética de hidratação e o desenvolvimento da resistência, demonstrando o potencial do MPM como substituinte parcial para aprimorar o desempenho de CSS.

Palavras-chave: Hidropotássio. Cimento Supersulfatado. Reologia. Reometria. Hidratação

ABSTRACT

De Gasperi, Jessica. **Rheology and microstructure of supersulfated cements: effects of the type and content of calcium sulfate and the incorporation of hydropotassium (MPM)**. 2026. Thesis (Doctoral in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2026.

Low-clinker or clinker-free binders, such as super sulfated cements (SSC), have emerged as promising alternatives in view of the high environmental impact of the cement industry, which is responsible for approximately 8% of global CO_2 emissions. Despite this potential, significant knowledge gaps remain regarding the hydration kinetics and rheological behavior of SSC, particularly concerning the effects of the type and content of sulfate sources and the incorporation of alternative materials. In this context, hydropotassium (MPM) presents favorable characteristics—chemical composition, pH, and high water-retention capacity—that make it a potential candidate for application in SSC systems. This work first investigates the influence of the type (gypsum and anhydrite) and content of calcium sulfate (10, 15, and 20 wt.%) and subsequently the incorporation of MPM on the rheological behavior and hydration kinetics of one of the previously defined SSC formulations, produced from slag (80%), anhydrite (15%), and clinker (5%). MPM was incorporated as a partial replacement for clinker (50%), slag (10 and 20%), or both. The study was conducted on paste systems, which were evaluated through rotational rheometry (flow curves to determine dynamic yield stress, τ_0, and equivalent viscosity, μ_eq) and oscillatory rheometry (amplitude sweep to obtain the storage and loss moduli, G' and G'', and the yield limit), as well as by isothermal calorimetry, thermogravimetry, FTIR, and compressive strength at 28 days. The results showed that the type and content of calcium sulfate significantly affect rheology and early-age hydration, exhibiting distinct trends. Formulations containing anhydrite presented higher heat release and greater formation of hydration products, as well as improved workability compared with gypsum-based formulations. This behavior is attributed to the more gradual supply of SO_4^{2-} and Ca^{2+} ions provided by anhydrite. Regarding MPM incorporation, the results demonstrated a direct impact on the rheology of the pastes, promoting more stable suspensions with a more uniform particle dispersion (with G'' prevailing over G' at higher strain ranges). The highest studied content (22.5 wt.%) increased the dynamic τ_0 by 26 times and μ_eq by approximately 5 times relative to the reference system. In terms of hydration, MPM promoted continuous dissolution, favoring the nucleation and growth of hydrates. Formulations containing MPM exhibited significant gains in compressive strength compared with the reference mix, particularly when replacing clinker (2.5% C) or both clinker and slag (12.5% CE), resulting in increases of approximately 59% and 31%, respectively. These results indicate that the controlled incorporation of MPM in clinker–slag systems enhance hydration kinetics and strength development, demonstrating the potential of MPM as a partial substitute to improve the performance of SSC.

Keywords: Hidropotassium. Supersulfated Cement. Rheology. Rheometry. Hydration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Procedimento adotado para execução da revisão sistemática da literatura.....18
Figura 2: Quantidade de artigos (em inglês) publicados em periódicos.....18
Figura 3: Mapa bibliográfico gerado no Vosviewer® a partir de todos os artigos listados na base Scopus, utilizando para a busca as palavras as palavras chave “super sulfate cement” ou “supersulfated cement”.....19
Figura 4: Processo de desidratação e reidratação de diferentes sulfatos de cálcio.....31
Figura 5:Solubilidade da anidrita (tipo II e III), gesso e hemidrato (α e β) em função da temperatura.....32
Figura 6: Processo de hidratação do sulfato de cálcio hemi-hidratado caracterizado pelo método da condutividade.....33
Figura 7: Corte transversal de um grão de cimento.....36
Figura 8: Diagrama esquemático que ilustra a natureza das cadeias lineares de aluminossilicato em C-S-H. Os triângulos vazios representam tetraedros Si—O e o triângulo sombreado representa um tetraedro Al—O. Q^2 = Q2P; Q^2 pode ser escrito como Q^2 (0Al) para indicar a falta de Al em um dos dois sítios tetraédricos adjacentes. v = sítio tetraédrico vago 38
Figura 9: Calor de hidratação típico de cimento supersulfatados (CSS: linha contínua) e cimento Portland tradicional (OPC: linha pontilhada).....39
Figura 10: Mecanismo de hidratação do CSS ao longo das primeiras 48h de reação.....40
Figura 11: Comportamento hidrodinâmico do CSS durante o primeiro ciclo de hidratação ...41
Figura 12: Modelo estrutural para a ruptura induzida por cisalhamento em sistemas cimentícios.....45
Figura 13: Variação da oscilação e deformação ao longo do tempo no teste de varredura de amplitude.....46
Figura 14: Módulos elástico (G’) e viscoso (G”) em (a), e tan δ (b), em relação à deformação (γ). 47
Figura 15: Modelo físico do comportamento da tensão de escoamento tixotrópica de materiais cimentícios.....50
Figura 16: Ciclos de histerese de tensão de cisalhamento (eixo y) versus taxa de cisalhamento (eixo x).....51
Figura 17: Fluxograma da rota de processamento laboratorial para síntese do material hidrotérmico no estudo de Ciceri et. al. 2017.....56
Figura 18: Composição mineralógica, através de Difração de raios X em pó (XRD), da matéria-prima (a) e material hidrotérmico (b). Composição em peso %. 57
Figura 19: Organograma do plano experimental.....60
Figura 20: Demonstração do tamanho dos grãos ao longo do processo de cominuição 61
Figura 21:Resultado de difração de Raios X para as matérias primas gipsita, anidrita, escória e MPM, onde: Q: Quartzo, A:Anidrita, G: Gipsita, T: Tobermorita, M: Microclina e F: K-Feldspato.....64
Figura 22: Condutividade das fontes de sulfato, sob diferentes concentrações, ao longo de uma hora 66

Figura 23: Resultados da Termogravimetria (TG) e a derivada da curva (DTG) para os Clínquer (linha preta) e Escória (linha rosa) em (A) e Anidrita (linha vermelha), Gipsita (linha azul) e MPM (linha verde) em (B) 68
Figura 24: Tensão de escoamento dinâmica (a) e viscosidade equivalente (b) de pastas de CSS com diferentes fontes e teores de sulfato de cálcio 75
Figura 25: Fluxo de calor medido através de curvas de calorimetria isotérmica (A) e DTG para misturas com fonte de sulfato a 15% (SS15 G e SS 15A) às 3, 5 e 8 h (B, C, D), respectivamente. 78
Figura 26: Exemplo de simulação termodinâmica de um sistema composto por 80% de GGBFS, 15% de anidrita e 5% de clínquer Portland. ..... **Erro! Indicador não definido.**
Figura 27: DTG das amostras em 20 e 40 horas. 80
Figura 28 : Conteúdo de água ligada para (a) grupo CSS G e (b) grupo CSS A às 20 e 40 h de hidratação. Nota: As barras de erro representam ±2 desvios padrão, estimados a partir de Scrivener et al. (REF), assumindo uma incerteza relativa de medição para água ligada de ±5–10%. 81
Figura 29: Calor acumulado das amostras até 72 horas de hidratação 82
Figura 30: Difração de raios-X das amostras aos 4 dias (esquerda) e 28 dias (direita)..... 83
Figura 31: Quantificação de fases de pastas de cimento pelo método Rietveld (a) Escória, (b) C-S-H, (c) Etringita e (d) Gipsita 84
Figura 32: Espectroscopia por Transformada de Fourier aos 4 dias (A e B) e aos 28dias (C e D) 86
Figura 33: Curva de fluxo e calor acumulado das misturas, com indicação dos percentuais de incorporação do MPM em substituição ao clínquer (identificados com a letra C), Escória (indicados pela letra E), ou a ambos (indicados pelas letras CE) 89
Figura 34: Tensão de escoamento dinâmica (A) e Viscosidade equivalente (B), com indicação dos percentuais de incorporação do MPM em substituição ao clínquer (identificados com a letra C), à escória (indicados pela letra E), ou a ambos (indicados pelas letras CE)..... 93
Figura 35: Curvas de G' (linha sólida) e G" (linha pontilhada) das misturas testadas, com indicação dos percentuais de incorporação do MPM em substituição ao clínquer (identificados com a letra C), à escória (indicados pela letra E), ou a ambos (indicados pelas letras CE) 94
Figura 36: Curvas de de perda de massa dos CSS, com indicação dos percentuais de incorporação do MPM em substituição ao clínquer (identificados com a letra C), Escória (indicados pela letra E), ou de ambos (indicados pelas letras CE) 96
Figura 37: Derivada da perda de massa, indicando percentuais de incorporação do MPM em substituição ao clínquer (identificados com a letra C), Escória (indicados pela letra E), ou de ambos (indicados pelas letras C E) 98
Figura 38: Água quimicamente ligada calculada a partir da TG 100
Figura 39: DRX das amostras, onde E: Etringita, G:gipsita, M: microclina, T: Tobermorita 102
Figura 40: Espectroscopia por Transformada de Fourier aos 4 e 28dias 104
Figura 41: Resistência à compressão obtida em 28 dias 106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estudos que avaliaram as propriedades de estado fresco de cimentos supersulfatados 21
Tabela 2: Composição das escórias utilizadas em estudos recentes 28
Tabela 3: Principais componentes e teores do clínquer Portland 35
Tabela 4: Comparação do CSS em relação ao cimento Portland 43
Tabela 5: Ensaios de caracterização realizados nas matérias-primas 62
Tabela 6: Formulações de CSS (percentual em massa) estudadas na fase 02 69
Tabela 7: Teores definidos na fase 03, percentual em massa 70
Tabela 8: Características físicas e a composição química das matérias primas 63
Tabela 9: Resultados de análise de fase quantitativa por Rietveld (RQPA) 64
Tabela 10: Resultados da análise de potencial zeta dos materiais, realizado em triplicata **Erro! Indicador não definido.**
Tabela 11: Resultados obtidos a partir da ANOVA 106
Tabela 12: Resultados do teste de Tukey, onde S: Significativo e NS: Não significativo 107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EE: Escola de Engenharia

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Construção

PPGCI: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

CP: Cimento Portland

C-S-H: Silicato de Cálcio Hidratado

C-(A)-S-H: Aluminosilicato de Cálcio Hidratado

CSS: Cimento Super Sulfatado

MPM: Hidropotássio

LVE: Intervalo viscoelástico linear

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
τ	Tensão de cisalhamento	Pa
τ_0	Tensão de escoamento dinâmica	Pa
τ_γ	Tensão de cisalhamento no ponto de escoamento	Pa
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento	s^{-1}
$\dot{\gamma}_{max}$	Taxa de cisalhamento máxima aplicada	s^{-1}
μeq	Viscosidade plástica equivalente	Pa·s
K	Parâmetro de consistência (modelo Herschel-Bulkley)	$Pa \cdot s^n$
n	Índice de fluidez (modelo Herschel-Bulkley)	—
G'	Módulo elástico (energia armazenada)	Pa
G''	Módulo viscoso (energia dissipada)	Pa
G*	Módulo complexo de cisalhamento	Pa
tan δ	Fator de perda (razão G''/G')	—
γ	Deformação aplicada	%
γ_L	Deformação no limite viscoelástico linear	%
γ_YP	Deformação no ponto de escoamento	%
G'_YP	Módulo elástico no ponto de escoamento	Pa
G''_YP	Módulo viscoso no ponto de escoamento	Pa
z	Integral z (área sob a curva de tan δ até γ_YP)	—
AQL	Água quimicamente ligada	—
AQL_TA	Perda de massa entre 40°C e 550°C	%
mC	Massa de cimento perdida	%
R	Raio da placa do reômetro	mm
H	Espessura do gap da amostra	mm
Dv,10	Diâmetro correspondente a 10% do volume acumulado	µm
Dv,50	Diâmetro mediano volumétrico	µm
Dv,90	Diâmetro correspondente a 90% do volume acumulado	µm
Dv,m	Diâmetro médio volumétrico	µm
a/l	Relação água/ligante	—

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO 13

1.2 JUSTIFICATIVA 17

1.3 QUESTÕES DA PESQUISA 21

1.4 HIPÓTESES DA PESQUISA 22

1.5 ORIGINALIDADE 22

1.6 OBJETIVOS DA PESQUISA 23

1.7 DELIMITAÇÕES 24

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO 24

2 REFERENCIAL TEÓRICO 25

2.1 CIMENTOS SUPERSULFATADOS 25

a) Escória 25

b) Sulfato de Cálcio 30

c) Clínquer Portland 34

2.1.1 Cinética de hidratação de CSS 37

2.2 REOMETRIA 44

2.2.1 Teste Oscilatório: Varredura de Amplitude 46

2.2.2 Teste Rotacional 49

2.2.3 Reometria em CSS 52

2.3 MATERIAL MULTIFÁSICO À BASE DE FELDSPATO (MPM) 54

2.3.1 Potencial do MPM em sistemas cimentícios 58

2.3.2 Lacunas e perspectivas 59

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 60

3.1 ESTUDOS EM PASTA FRESCA 70

3.1.1 Calorimetria por condução isotérmica 70

3.1.2 Reometria Oscilatória e Rotacional 71

3.2 ESTUDOS EM PASTA ENDURECIDA 72

3.2.1 Termogravimetria (TG) 72

3.2.2 Difração de Raios- X (DRX) 73

3.2.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)..... 74
3.2.4 Resistência à Compressão..... 74
4 RESULTADOS..... 75
4.1 CARACTERIZAÇÃO ..... **Erro! Indicador não definido.**
4.2 FASE 02: EFEITO DO TIPO E TEOR DE SULFATO DE CÁLCIO .. 75
4.2.1 Propriedades Reológicas..... 75
4.2.2 Análises térmicas..... 78
4.2.3 Análises mineralógicas..... 82
4.2.4 Espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR) 85
4.2.5 Considerações da FASE 02..... 87
4.3 FASE 03: EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DO MPM 89
4.3.1 Calorimetria..... 89
4.3.2 Reometria Rotacional..... 92
4.3.3 Reometria Oscilatória 94
4.3.4 Análises térmicas e mineralógicas..... 95
4.3.5 Espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR) 103
4.3.6 Resistência à compressão..... 105
4.3.7 Considerações da FASE 03..... 108
5 CONCLUSÕES..... 111
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 111
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 112
6. REFERÊNCIAS..... 113

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O processo de clinquerização (transformação do calcário e da argila em clínquer - matéria prima fundamental do cimento) é responsável por cerca de 60% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) atribuídas à indústria cimenteira (Scrivener, 2014). Um panorama da indústria cimenteira indica que as emissões associadas à produção do cimento Portland (CP) representam 8% do total de emissões globais de CO_2 (Reis *et al.*, 2021). Com isso, cimentos supersulfatados (CSS) se apresentam como uma alternativa promissora de ligantes, pois incorporam quantidades reduzidas, ou mesmo inexistentes, de clínquer na sua composição. Sua formulação consiste em teores entre 70-90% de escória, 10-20% de sulfato de cálcio e até 5% de ativador alcalino (Erdem; Ölmez, 1993; Matschei; Bellmann; Stark, 2005; Singh; Garg, 2002). Os ativadores alcalinos comumente empregados são clínquer (Cai et al., 2023; Erdem; Ölmez, 1993; Singh; Garg, 2002) e cimento Portland (Gutsalenko et al., 2022; Masoudi; Hooton, 2019; Matschei; Bellmann; Stark, 2005; Xing et al., 2023; Zhou et al., 2021).

Contudo, também é possível encontrar estudos utilizando ativadores alternativos, como hidróxido de potássio (KOH) (Gracioli et al., 2020; Gruskovnjak et al., 2008, 2011), óxido de cálcio (CaO) (Cabrera-Luna et al., 2021; Park et al., 2016) e até cimento sulfoaluminato de cálcio (Sun et al., 2022). Como resultado, tem-se um material com baixo calor de hidratação (Bazaldúa-Medellín et al., 2015; Gruskovnjak et al., 2008; Matschei; Bellmann; Stark, 2005; Wu; Xue; Yu, 2021a; Zhou et al., 2021) e resistência à compressão equiparável ao CP comum aos 28 dias (Juenger et al., 2011). Além disso, os CSS também apresentam aspectos de durabilidade favoráveis para aplicações em ambientes agressivos, dados pela menor porosidade (Wu; Xue; Yu, 2021b) e boa resistência ao ataque por sulfatos e cloretos (Gruskovnjak et al., 2008; Pinto et al., 2020a, 2020b; Zhou et al., 2021).

Paralelamente, os CSS são caracterizados por um menor impacto ambiental em comparação ao CP, com emissões de CO_2 na ordem de 72 kg CO_2/t (Sun *et al.*, 2022) e 159-281 kgCO_2-eq/t (Cabrera-Luna *et al.*, 2021) frente a valores próximos a 892 kg CO_2-eq/t para o CPI (clínquer e sulfato de cálcio) (Votorantim Cimentos, 2016).[1] Sob a perspectiva ambiental, a utilização da

[1] O cálculo realizado pela empresa é anterior à Normativa NBR 16697:2018, que permite adição de até 5% de material pozolânico no CPI.

escória em maior percentual é positiva, pois trata-se de um subproduto da fabricação de ferro-gusa.

No entanto, a literatura reporta que a disponibilidade desses materiais cimentícios suplementares, como a escória, é baixa quando comparada à crescente demanda por cimento (Scrivener *et al.*, 2018; Scrivener, 2014). Os autores comentam que a quantidade mundial disponível de escória representa apenas 5% em relação a quantidade de clínquer produzida. Isso reforça a importância de compreender como as variações de matéria-prima e formulações afetam o desempenho do CSS.

As características químicas da escória para uso em cimento Portland, no qual é empregada como adição mineral, são diferentes das necessárias na produção de CSS, constituindo matéria-prima predominante, principalmente no que tange ao teor de Al_2O_3 (alumina). No CSS, a escória reage com o sulfato para formar os compostos principais: silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita ($C_6A\bar{S}_3\,H_{32}$) (Da Luz; Hooton, 2015; Gruskovnjak *et al.*, 2011; Liu; Han; Li, 2017; Pimenta; Angulski da Luz; Pelisser, 2023). Assim, a composição química da escória influencia diretamente na dissolução, no volume de escória hidratada e na quantidade de hidratos formados (Da Luz; Hooton, 2015; Gruskovnjak *et al.*, 2011). Por isso, são preferidas escórias com teores mais elevados de alumina (Masoudi; Hooton, 2019; Pimenta; Angulski da Luz; Pelisser, 2023). O teor mínimo de Al_2O_3 recomendado é na ordem de 13% (Juenger *et al.*, 2011).

Como uma alternativa para esse cenário complexo, Pimenta et al. (2023) propuseram a utilização de metacaulim como fonte adicional de Al_2O_3, buscando melhorar o desempenho dos CSS produzidos a partir de escórias com baixo teor de alumina (8,9%). O resultado deste estudo mostrou que pequenos percentuais de substituição de escória por metacaulim (5%) já foram eficientes, promovendo maior formação de etringita e, consequentemente, redução da porosidade e maior resistência à compressão. Isto posto, verifica-se o potencial de incorporação de materiais com um maior teor de Al_2O_3 para melhorar a reatividade de escórias em CSS.

Além dos aspectos de composição e reatividade, o comportamento reológico também é um ponto decisivo. Isso ocorre porque a aplicação prática desses elementos está diretamente condicionada ao seu comportamento em estado fresco, impactando nas atividades de mistura, transporte e moldagem.

Em cimentos tradicionais, estudos como os conduzidos por Jakob *et al* (2019) e Kißling *et al* (2023) indicaram que a formação de etringita exerce uma influência expressiva na reologia e na hidratação das pastas de cimento comum. A quantidade e morfologia de etringita formada apresentaram relação direta com a tensão de escoamento, a viscosidade plástica e a viscosidade dinâmica medidas, e seu efeito exponencial nas propriedades reológicas destaca a importância de investigações como essa.

Entretanto, ainda que o CSS apresente uma composição com quantidades expressivamente superiores de sulfato de cálcio e, por conseguinte, maior formação de etringita em estágios iniciais, uma abordagem em reologia de modo geral, ainda é limitada nesses cimentos.

A literatura sobre CSS tem se concentrado majoritariamente na influência de escória e dos ativadores alcalinos sobre a cinética de hidratação, resistência mecânica e desempenho ambiental. Entretanto, observa-se que a influência do tipo e do teor de sulfato de cálcio permanece menos sistematizada, sobretudo no que se refere à cinética em idades iniciais e ao comportamento reológico no estado fresco. Essa lacuna é particularmente relevante, considerando o papel central da disponibilidade de sulfatos na formação de AFt/AFm e em parâmetros como tensão de escoamento, viscosidade e resistência mecânica (De Weerdt *et al.*, 2011; He *et al.*, 2020; Mohammed; Safiullah, 2018; Schöler *et al.*, 2015). Assim, o sulfato de cálcio evidencia-se como uma variável de formulação com potencial de alterar simultaneamente a hidratação inicial e a resposta reológica do sistema, configurando uma lacuna específica que demanda investigação sistemática.

A maioria dos autores busca solucionar as questões de trabalhabilidade das misturas (pasta ou argamassa) através do uso de aditivos (Bijen; Niël, 1981; Cai *et al.*, 2023; Jain; Garg, 2015), e avaliam geralmente, apenas a influência do aditivo em relação ao tempo de pega e resistência mecânica. Pinto et al. (2020b), por exemplo, investigaram o espalhamento (*slump*), resistência à carbonatação e à penetração de cloretos de concretos supersulfatados produzidos com fosfogesso, destacando a elevada sensibilidade desses cimentos à relação água/cimento no estado fresco, embora sem aprofundar essa discussão. Já Sonebi et al., (2020) analisaram os efeitos de dosagens e relação água/ligante sobre parâmetros reológicos, físicos e mecânicos de CSS, aplicando também modelos estatísticos e curvas de isorresposta. Os resultados mostraram que a relação água/ligante teve efeitos mais pronunciados na reologia, comparada à dosagem de escória ou anidrita. O aumento do teor de escória elevou a tensão de escoamento e a

viscosidade, reduzindo a fluidez, efeito atribuído à maior finura das partículas. Em contrapartida, a anidrita promoveu maior fluidez associada à defloculação das partículas no estado fresco.

Apesar destas contribuições, a maioria dos estudos anteriores sobre o tema basearam-se em ensaios simplificados, comumente chamados de monoponto (Cardoso; John; Pileggi, 2009) para avaliação do comportamento no estado fresco de CSS. Nesse contexto, a aplicação de reometria rotacional e oscilatória representa um avanço metodológico, permitindo uma caracterização mais abrangente e precisa da reologia dos CSS. A reologia, aliada à composição química das matérias-primas e à disponibilidade de sulfatos, emerge como fator determinante tanto para o desempenho no estado fresco quanto para a cinética de hidratação inicial.

Diante deste cenário, torna-se pertinente avaliar também a incorporação de novos materiais capazes de interagir com o sistema sob essa ótica. Um exemplo promissor é o hidropotássio (HydroPotash, em inglês, ou MPM (Multi Phase Material)[2], desenvolvido a partir de rochas K-feldspáticas. Originalmente utilizado como fertilizante, esse material apresenta alta capacidade de troca de cátions e adsorção. Esse produto é obtido a partir do tratamento de feldspatos potássicos com $Ca(OH)_2$ e posterior alteração hidrotérmica (Ciceri; De Oliveira; Allanore, 2017a). O MPM é um material multifásico que contém minerais como hydrogrossular ($Ca_3Al_2(SiO_4)3\text{-}x(OH)_4X$), K-tobermorita ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O$), silicato dicálcico hidratado α (α-$Ca_2SiO_4 \cdot xH_2O$) além de silicatos amorfos e outras fases acessórias (Ciceri; De Oliveira; Allanore, 2017a). Além disso, também é adsorvente e conta com alta capacidade de troca catiônica (CEC) (Ciceri; De Oliveira; Allanore, 2017a; Ribeiro *et al.*, 2021).

A inserção do MPM em CSS ainda não foi abordada na literatura e pode ser favorável tanto em substituição ao ativador alcalino (dado pela presença de KOH), como fonte de alumina presente em sua composição. Sua capacidade adsorvente pode aumentar a viscosidade e a tensão de cisalhamento, afetando a reologia da mistura. Por outro lado, isso também pém ser benéfico para a cinética de hidratação do CSS, pois pode garantir água suficiente para a formação dos produtos de hidratação fundamentais.

[2] https://www.ipqwery.com/ipowner/en/owner/ip/35190-advanced-potash-technologies-ltd.html

Desta forma, destaca-se a lacuna de conhecimento no âmbito do CSS associado ao estudo da interação com o tipo de sulfato e o emprego do MPM como material componente, avaliando a influência dessas interações na reologia de pastas

1.2 JUSTIFICATIVA

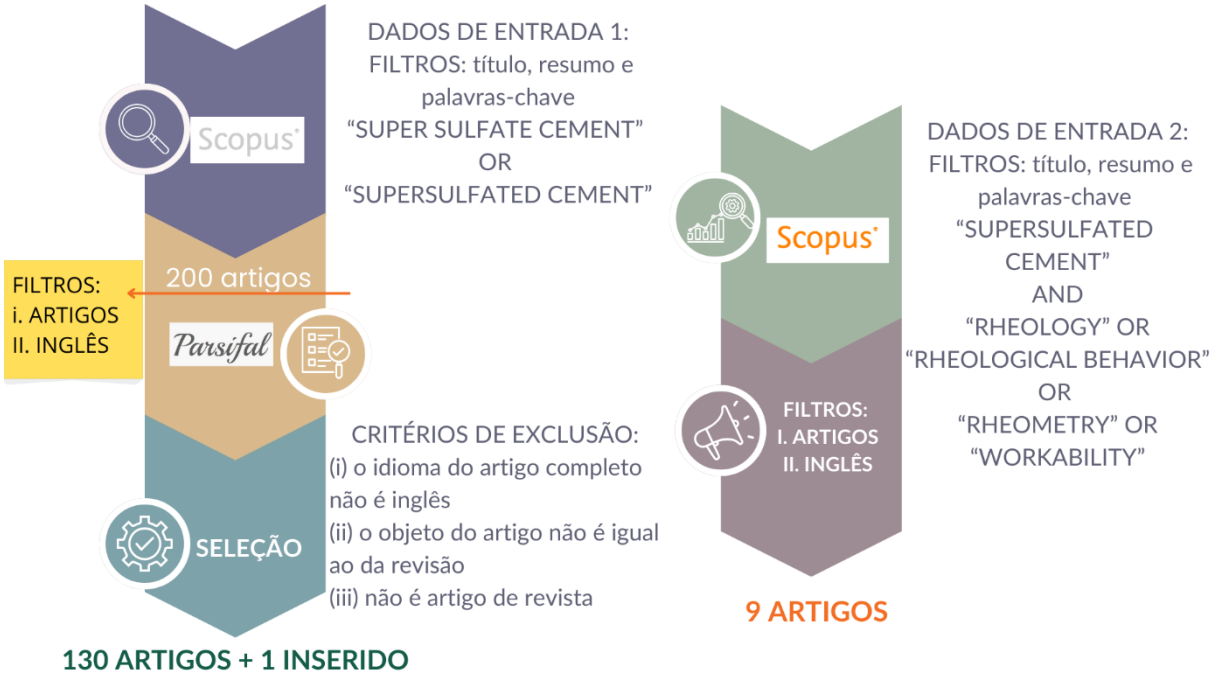
O CSS foi patenteado em 1908 por Hans Kühl. Em 1959 e 1974, Alemanha e Reino Unido já tinham normativas publicadas para esse cimento, a DIN 4210 e a BS 4248, respectivamente. Atualmente, a normativa em vigor, que revogou ambas, é a norma britânica (BS) EN 15743:2010, revisada pela última vez em 2015.

Do ponto de vista tecnológico, esse tipo de cimento vem mostrando um bom desempenho frente ao ataque por sulfatos (Pinto *et al.*, 2020a; Trentin; et. al, 2022; Wang *et al.*, 2024). Isso significa que ele pode ser especificado para ambientes agressivos, como estações de tratamento de esgoto, zonas costeiras e elementos subterrâneos, expostos à álcalis e sulfatos. Tais motivos têm alavancado também a comercialização desse produto. A exemplo disso, tem-se o ligante à base de cimento supersulfatado, da empresa austríaca (Wopfinger Building Materials Group), sob o nome comercial Slagstar®[3]. Ainda assim, apesar desse amadurecimento normativo e do potencial de aplicação, a exploração do tema pela comunidade científica permanece relativamente limitada.

A exploração do tema cimento supersulfatado pela comunidade científica ainda é relativamente limitada. Uma busca nas plataformas de pesquisa, em 07/2025, utilizando as palavras-chave “super sulfate cement” ou “supersulfated cement” na SCOPUS, revela apenas 200 artigos (ver Figura 1). Com auxílio do software “Parsifal” foram selecionados os documentos, aplicando os critérios de exclusão (idioma, meio de publicação e objeto principal). Como resultado, foram selecionados 130 artigos, com um volume de publicações significativamente mais expressivo apenas nos últimos cinco anos (ver Figura 2). Dentre essas publicações recentes, destacam-se especialmente as ocorrências a partir de 2023, que somaram, até o momento da busca, 77 documentos (quase 40% do volume total). Esses dados reforçam que o tema tem ganhado destaque recentemente, mas com concentração em tópicos específicos.

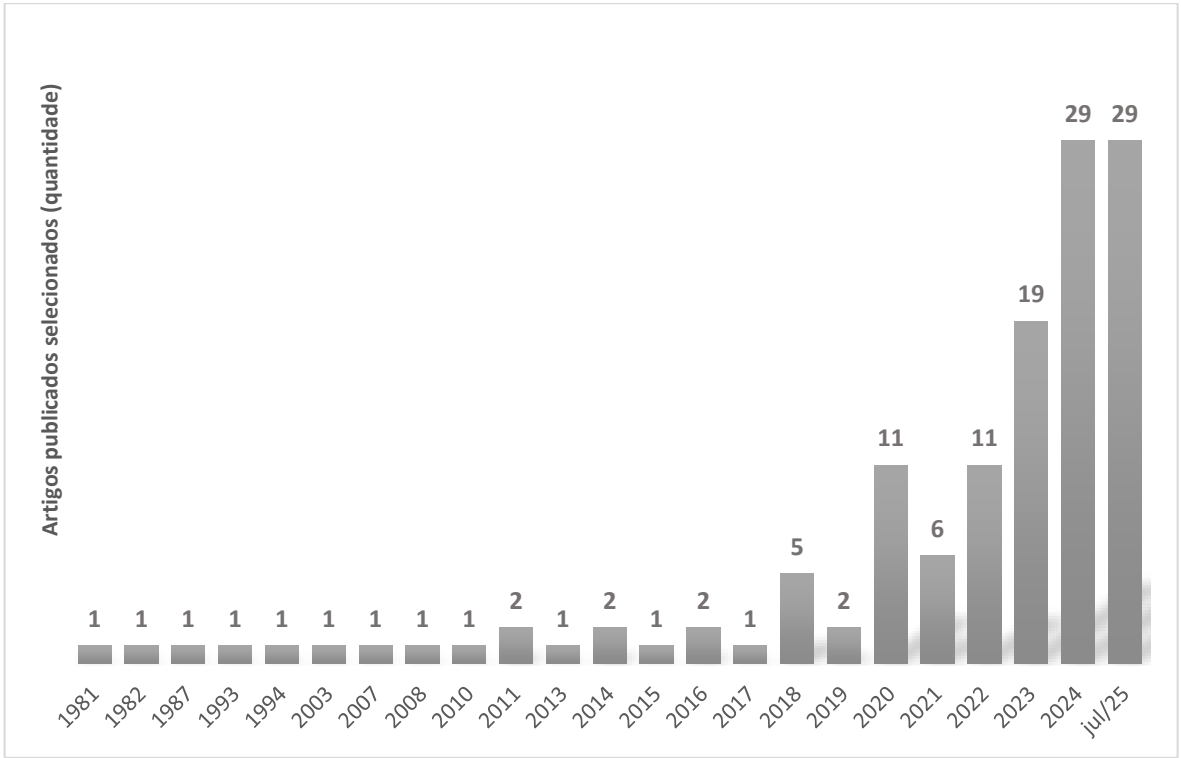
[3] http://slagstarindustry.com/

Figura 1: Procedimento adotado para execução da revisão sistemática da literatura



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 2: Quantidade de artigos (em inglês) publicados em periódicos

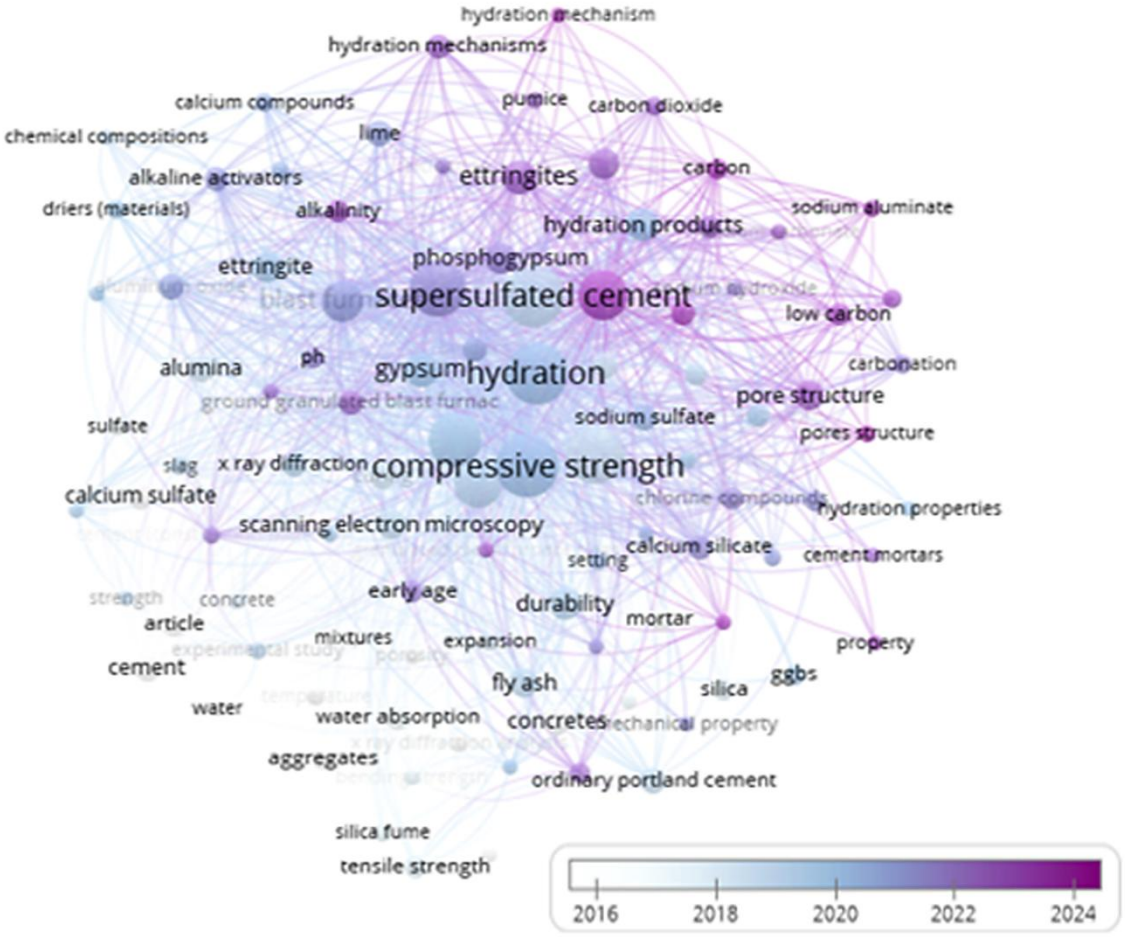


Fonte: elaborado pela autora.

Um dos principais fatores que pode estar impulsionando esse crescente interesse (Figura 2) é a característica desse cimento de utilizar pouco ou nenhum clínquer, o que se alinha com a tendência atual de buscar alternativas mais sustentáveis. Na Figura 1, pode ser observado a quantidade de artigos (em inglês) publicados em periódicos, consoante a base SCOPUS, com exclusão dos documentos que não tratavam do tema.

A base de dados da plataforma Scopus (Figura 1) também foi exportada para o software Vosviewer® a fim de entender as conexões entre as publicações e os temas mais abordados. Para identificar lacunas temáticas na geração do mapa bibliográfico (Figura 3), foi determinado o número mínimo de 5 co-ocorrências e selecionadas todas as palavras-chave dos artigos.

Figura 3: Mapa bibliográfico gerado no Vosviewer® a partir de todos os artigos listados na base Scopus, utilizando para a busca as palavras as palavras chave “super sulfate cement” ou “supersulfated cement”



Fonte: elaborado pela autora.

Baseado na Figura 3, é possível observar que as publicações mais recentes têm explorado os mecanismos de hidratação (somando 99 ocorrências da palavra em algumas variações) desses cimentos, além dos produtos formados, principalmente a etringita (40 ocorrências). No entanto, avaliação de propriedades mecânicas como resistência à compressão, ainda são de maior destaque, sendo a palavra mais mencionada entre as 100, com 70 menções. Por outro lado, a palavra reologia não apareceu nenhuma vez utilizando essa quantidade mínima de 5 ocorrências. Esse resultado indica que, embora haja volume crescente de estudos, temas associados ao comportamento no estado fresco permanecem pouco evidenciados no mapeamento.

No que se refere às propriedades reológicas do CSS, observa-se uma lacuna expressiva, considerando que, em toda a base SCOPUS, apenas 9 documentos aparecem quando se aplicam os filtros associados ao comportamento reológico do material. Os documentos que tratam dessas características são apresentados de maneira resumida na Tabela 1. Adicionalmente, observa-se que a discussão de variáveis de formulação diretamente associadas ao sulfato (por exemplo, tipo e teor) também é pouco recorrente nesse recorte, reforçando a relevância do tema.

Em última análise, percebe-se que a utilização de equipamentos como reômetros só apareceu duas vezes, através dessa base de dados (SCOPUS), mas nenhum estudo avaliou reometria oscilatória, apenas rotacional. Destaca-se que aspectos como a trabalhabilidade são fundamentais, com efeito estendido aos estágios posteriores, ocasionando influência sobre a cinética de hidratação e resistência mecânica, por exemplo. Essa lacuna pode ser fundamental para o entendimento do comportamento reológico e da cinética de hidratação do CSS. Diante disso, a investigação em maior detalhe sobre a reologia é fundamental para a compreensão das propriedades desses cimentos, especialmente a partir de abordagens mais abrangentes, como reometria rotacional e oscilatória.

Tabela 1: Estudos que avaliaram as propriedades de estado fresco de cimentos supersulfatados

Autores, Ano	Principal Objetivo	Testes/ Metódos
(El-Didamony; Amer; Mohammed, 2014)	O comportamento em termos de pega de misturas frescas contendo cimento Portland comum (CP), lodo de tratamento de água potável (DWTS) e anidrita foi estudado	Não aplicado
(Sonebi *et al.*, 2020)	Examinar a influência do teor de escória, dosagem de anidrita e relação água/cimento (A/C) nas propriedades frescas e nos parâmetros reológicos	Viscometro
(Peng *et al.*, 2022)	Avaliar o impacto das diferentes concentrações de lactato de sódio no CSS na fluidez das pastas de cimento	Fluidez (GB/T 8077-2012)
(Feng *et al.*, 2023b)	Examinar o efeito de diferentes proporções de substituição de cinzas volantes (15%, 30% e 50%) na trabalhabilidade do concreto de cimento supersulfatado	Slump
(Zhou *et al.*, 2023)	Investigar o efeito do ácido lático na trabalhabilidade do cimento supersulfatado elaborado com gipsita hemi-hidratada	Fluidez (GB/T 8077-2012)
(Shao *et al.*, 2024)	Efeitos de **diferentes tipos de sulfato de cálcio (gesso dessulfurizado, fosfogesso, gipsita di-hidratada)** e escória de carbeto de cálcio sobre o desempenho e hidratação de cimentos supersulfatados	Fluidez (GB/T 8077–2000)
(Wang *et al.*, 2025)	Avaliar a **substituição de gipsita por gesso de dessulfurização** e cinza de dessulfurização à base de sódio como fonte de sulfatos alternativos em CSS.	Fluidez (GB/T 2419–2005) Consistência (GB/T 1346–2011)
(Kich De Ré *et al.*, 2024)	Investigar o impacto de diferentes fontes e formas de sulfato de cálcio (**anidrita e fosfogesso**) na reologia, hidratação e propriedades mecânicas do CSS	Reometria Rotacional / Reômetro
(Wei *et al.*, 2025a)	Investigar a influência de areia de rio finamente moída no comportamento reológico de cimentos supersulfatados, substituindo o ligante.	Rêometria rotacional / Reômetro
(Miao *et al.*, 2025)	Explorar a viabilidade de produção de CSS à base de Escória de Lítio e sistematicamente o efeito do tipo de fosfogesso (hemidrato e diidrato) sobre a hidratação do CSS.	Fluidez (GB/T 8076)

Fonte: Elaborado pela autora

1.3 QUESTÕES DA PESQUISA

As questões de pesquisa que orientam este trabalho são:

- De que forma o tipo e o teor de sulfato de cálcio influenciam o comportamento reológico (parâmetros de fluxo e/ou viscoelasticidade) e a cinética de hidratação de pastas de CSS?

- Como a incorporação do hidropotássio (MPM) altera a reologia e a cinética de hidratação de pastas de CSS?

- Em que medida as alterações reológicas promovidas pelo MPM se relacionam com a cinética de hidratação e com os produtos formados, e como esses aspectos se refletem nas propriedades no estado endurecido (por exemplo, resistência à compressão)?

1.4 HIPÓTESES DA PESQUISA

As hipóteses que justificam o tema da pesquisa são:

- O hidropotássio (MPM), com sua presença de Al_2O_3, sua alta capacidade de troca catiônica e presença de KOH, pode substituir parcialmente a escória e o clínquer em CSS.

- A adição de MPM influencia a viscosidade, a tensão de cisalhamento, modifica o balanço viscoelástico (G'/G") no estado fresco e beneficia a hidratação tardia.

- A reometria rotacional e oscilatória são mais adequadas para caracterizar as propriedades reológicas dos CSS quando comparadas à ensaios monoponto.

1.5 ORIGINALIDADE

A originalidade deste trabalho reside, primeiramente, na investigação sistemática da influência do tipo e do teor de sulfato de cálcio em cimentos supersulfatados, considerando simultaneamente a cinética de hidratação e o comportamento reológico no estado fresco. Em seguida, introduz-se um novo material, denominado MPM, que ainda não foi investigado no contexto da formulação de cimentos supersulfatados como substituto parcial de clínquer e escória. Este estudo não só explora essa substituição inovadora, mas também aborda aspectos pouco explorados na literatura, como a reologia desses ligantes – eixo central nos dois pontos avaliados.

Particularmente, a pesquisa se destaca ao empregar técnicas avançadas de reometria (oscilatória e rotacional) para investigar o comportamento reológico, especialmente o viscoelástico, um aspecto raramente abordado em estudos anteriores. Esses métodos oferecem uma precisão

superior e uma confiabilidade elevada, permitindo uma análise detalhada da reologia do material sob diferentes taxas de cisalhamento. Até o momento, a maioria dos trabalhos na área avaliou a reologia de cimentos supersulfatados por meio de ensaios monoponto, como o mini-slump.

A inserção do MPM e a análise dos efeitos dessa substituição na cinética de hidratação e no comportamento viscoelástico do cimento têm o potencial de fornecer informações científicas valiosas e inéditas. Assim, este trabalho contribuirá significativamente para a compreensão e desenvolvimento de cimentos supersulfatados, oferecendo novos *insights* para a comunidade científica que atualmente investiga este tema, ao integrar o efeito de variáveis de formulação pouco explorados (tipo/teor de sulfato e incorporação de MPM) com comportamento reológico e a cinética de hidratação.

1.6 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral dessa pesquisa é investigar os efeitos do tipo e do teor de sulfatos e da substituição de clínquer e escória por material multifásico à base de feldspato na reologia e na cinética de hidratação de pastas de cimentos supersulfatados.

Os objetivos específicos, por sua vez, são:

a. Investigar os efeitos do tipo e teor de sulfato de cálcio na reologia e cinética de hidratação das pastas de CSS;

b. Avaliar os efeitos da incorporação do MPM no comportamento reológico das pastas de CSS no estado fresco, abrangendo os parâmetros de fluxo (curvas de fluxo, tensão de escoamento e viscosidade equivalente) obtidos por reometria rotacional e as propriedades viscoelásticas (módulos elástico G' e viscoso G") obtidas por reometria oscilatória;

c. Analisar a cinética de hidratação e correlacionar os produtos formados com as propriedades no estado fresco e endurecido.

1.7 DELIMITAÇÕES

As delimitações do trabalho são apresentadas na sequência:

a. Não serão utilizados aditivos químicos;

b. O hidropotássio (MPM) será utilizado na forma físico-química disponibilizada pelo fabricante;

c. Será utilizada apenas uma escória doada por empresa siderúrgica nacional, nas características entregues à cimenteira, sem a realização de procedimentos de beneficiamento adicionais;

d. Será utilizado apenas um clínquer e uma gipsita doada por indústria cimenteira nacional, com beneficiamento realizado nesta pesquisa.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em 5 capítulos[4]:

O capítulo 1 apresenta a introdução ao tema proposto com a justificativa e problemática envolvida no estudo e os objetivos a serem respondidos;

O capítulo 2 aborda uma revisão da bibliografia no que se refere aos elementos necessários para discussão e compreensão dos temas. Assim, está dividido em três partes. Na primeira, aborda-se o conteúdo sobre cimentos supersulfatados, seguido dos conceitos da reologia e reometria e, por fim, apresenta-se o material que será utilizado na pesquisa (hidropotássio – MPM)

O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo;

O capítulo 4 discute os resultados alcançados em cada uma das 3 fases da pesquisa. Cada fase do trabalho apresenta a discussão dos resultados obtidos e sua respectiva conclusão.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas no trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

[4] Ferramentas de inteligência artificial generativa foram utilizadas durante a preparação deste trabalho para auxiliar na melhoria da linguagem, organização e revisão textual. Todos os conteúdos gerados foram avaliados criticamente e revisados.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese investigou, de forma integrada, a reologia e a cinética de hidratação de cimentos supersulfatados (CSS) sob dois pontos: (i) efeito do tipo/teor de sulfato de cálcio (FASE 02) e (ii) efeitos da incorporação de MPM substituindo clínquer, escória ou ambos (FASE 03).

Como resultado, foi demonstrado que a fonte de sulfato é determinante na resposta dos CSS: sistemas com anidrita apresentaram maior liberação de calor, maior formação de produtos hidratados e melhor trabalhabilidade (τ_0 e μ_{eq} menores) que aqueles com gipsita, justificando a escolha da formulação-base (5% clínquer, 15% anidrita e 80% escória) para a etapa seguinte (FASE 03). O efeito foi atribuído ao fornecimento mais gradual de SO_4^{2-}/Ca^{2+} pela anidrita, que sustenta a hidratação da escória, ao passo que a gipsita eleva rapidamente a concentração iônica e penaliza fluxo e continuidade reacional.

Ao incorporar MPM (2,5–22,5%) substituindo clínquer, escória ou ambos, houve necessidade de elevar a relação água/ligante para 0,55 e observou-se um aumento não linear de τ_0 e μ_{eq} (até ~26× e ~5× no caso 22,5%CE), com G′ dominante, LVE mais amplo e ponto de escoamento em maiores deformações, evidenciando rede particulada mais rígida já no estado fresco; esse enrijecimento decorre do aprisionamento de água pelo MPM e de maior contato friccional entre grãos (filme aquoso afinado), sobretudo quando a escória é parcialmente substituída. Na cinética de hidratação, observou-se prolongamento do período de indução e redução da liberação de calor nas etapas iniciais, enquanto teores moderados de MPM (10%E e 12,5%CE) apresentaram intensificação relativa da hidratação em tempos intermediários. Por outro lado, dosagens mais elevadas resultaram em picos de hidratação mais tardios e menos intensos, indicando um processo reacional mais gradual no sistema. As análises dos produtos formados confirmaram maior volume de hidratos aos 28 dias nas pastas com MPM, e a resistência à compressão acompanhou essa tendência até certa medida na substituição de clínquer ou clínquer e escória (2,5%C e 12,5%CE), enquanto a troca isolada de escória (10–20%) não alterou significativamente o desempenho mecânico. Em síntese, o MPM atua como modulador físico-químico: melhora a hidratação em janelas de teor moderado, mas prejudica a trabalhabilidade e o desempenho mecânico em dosagens altas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos através desta investigação, algumas perspectivas de continuidade da pesquisa podem ser sugeridas como temas futuros a serem explorados:

- Durabilidade: avaliar o desempenho de cimentos supersulfatados contendo MPM frente a diferentes agentes agressivos (sulfatos, cloretos, carbonatação), de modo a estabelecer sua viabilidade em aplicações em ambientes agressivos.

- Reologia: investigar a interação do CSS produzido com MPM com aditivos, ou os impactos decorrentes de melhoria no empacotamento dos grãos.

- Cinética de hidratação: aprofundar a investigação dos mecanismos associados à incorporação do MPM, por meio de técnicas avançadas de caracterização (como NMR, por exemplo) e modelagem cinética.

- Impacto ambiental: Tendo em vista que rochas feldspáticas são abundantes na crosta terrestre e o CSS se destaca pelo menor impacto ambiental relacionado à redução de clínquer incorporado, sugere-se a realização de estudos como análise de ciclo de vida (ACV) e quantificação da redução de emissões proporcionada pela substituição parcial de clínquer e escória, consolidando os potenciais benefícios sustentáveis do uso do MPM.

6. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 16697:2018. **NBR_16697_Cimento_Portland_Requisitos**. RIO DE JANEIRO: [*s. d.*], 2018.

ALMEIDA, Gyselle Maciel. **UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA PRODUZIDA EM ALTO-FORNO A CARVÃO VEGETAL COMO AGREGADO GRAÚDO E MIÚDO PARA CONCRETO**. 2014. Dissertação de Mestrado - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Belém, 2014.

ANDRADE NETO, José S. *et al.* Hydration of C3S and Al-doped C3S in the presence of gypsum. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 152, 2022a.

ANDRADE NETO, José S. *et al.* The role of sodium and sulfate sources on the rheology and hydration of C3A polymorphs. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 151, 2022b.

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**, [*s. l.*], vol. 187, 2025.

ANDRADE NETO, José da Silva; DE LA TORRE, Angeles G.; KIRCHHEIM, Ana Paula. Effects of sulfates on the hydration of Portland cement – A review. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 279, 2021.

ANM. **SUMÁRIO MINERAL**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2017. Disponível em: www.anm.gov.br. .

ASTM. **ASTM C1679- Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry**. West Conshohocken : [*s. d.*], 2017.

BANFILL, P.F.G. The rheology of fresh cement and concrete - a review. 2003a, Durban. **International Cement Chemistry Congress**. Durban: [*s. d.*], 2003.

BANFILL, P.F.G. The rheology of fresh cement and concrete - a review. 2003b, Durban. **11th International Cement Chemistry Congress**. Durban: [*s. d.*], 2003. p. 910–918.

BANFILL, P F G. **Use of the ViscoCorder to study the rheology of fresh mortar**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 1990.

BAZALDÚA-MEDELLÍN, M. E. *et al.* Early and late hydration of supersulphated cements of blast furnace slag with fluorgypsum. **Materiales de Construccion**, [*s. l.*], vol. 65, nº 317, p. e043, 2015.

BETIOLI, Andrea Murillo *et al.* Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares (Rheological characterization of cement paste: association of complementary techniques). **Ambiente Construído**, [*s. l.*], p. 37–48, 2009.

BEUTLER, Cheila Sirlene; LUZ, Caroline Angulski da; BONINI, Janaina Sartori. Comportamento do cimento supersulfatado (CSS) obtido a partir de escórias de alto forno geradas a carvão vegetal e mineral e sujeito à cura térmica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [*s. l.*], vol. 25, nº 1, 2020.

BIJEN, J.; NIËL, E. Supersulphated cement from blastfurnace slag and chemical gypsum available in the Netherlands and neighbouring countries. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 11, nº 3, p. 307–322, 1981.

BISHOP, Maximilienne; BOTT, Simon G.; BARRON, Andrew R. A new mechanism for cement hydration inhibition: Solid-state chemistry of calcium nitrilotris(methylene)triphosphonate. **Chemistry of Materials**, [*s. l.*], vol. 15, nº 16, p. 3074–3088, 2003.

BOUVET, Adrien; GHORBEL, Elhem; BENNACER, Rachid. The mini-conical slump flow test : Analysis and numerical study. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 40, nº 10, p. 1517–1523, 2010. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.06.005.

CABRERA-LUNA, K. *et al.* Supersulfated cements based on pumice with quicklime, anhydrite and hemihydrate: Characterization and environmental impact. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 124, nº August, p. 104236, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104236.

CABRERA-LUNA, K.; PEREZ-CORTES, P.; ESCALANTE GARCIA, J. I. Influence of quicklime and Portland cement, as alkaline activators, on the reaction products of supersulfated cements based on pumice. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 146, 2024.

CAI, Tongzhou *et al.* Effects of nanosilica on supersulfated cements of different clinker-activation degree. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 365, nº December 2022, p. 130118, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130118.

CANUT, Mariana Moreira Cavalcanti *et al.* Microstructural analyses of phosphogypsum generated by Brazilian fertilizer industries. **Materials Characterization**, [*s. l.*], vol. 59, nº 4, p. 365–373, 2008.

CARDOSO, Fábio A.; JOHN, Vanderley M.; PILEGGI, Rafael G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 39, nº 9, p. 748–753, 2009.

CARVALHO, Ivo C. *et al.* Investigation of the hydrothermally altered K-feldspar use in slag-based alkali-activated binders. **Case Studies in Construction Materials**, [*s. l.*], vol. 22, 2025.

CHANG, Shuo *et al.* Deterioration mechanism of supersulfated cement paste exposed to sulfate attack and combined acid-sulfate attack. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 414, 2024.

CHEN, Meijuan *et al.* **Review on K-Feldspar Mineral Processing for Extracting Metallic Potassium as a Fertilizer Resource**. [*S. l.*]: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024.

CHEN, Heng *et al.* Toward performance improvement of supersulfated cement by nano silica: Asynchronous regulation on the hydration kinetics of silicate and aluminate. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 167, 2023.

CICERI, Davide *et al.* Characterization of potassium agrominerals: Correlations between petrographic features, comminution and leaching of ultrapotassic syenites. **Minerals Engineering**, [*s. l.*], vol. 102, p. 42–57, 2017.

CICERI, Davide *et al.* Fertilizing Properties of Potassium Feldspar Altered Hydrothermally. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [*s. l.*], vol. 50, nº 4, p. 482–491, 2019.

CICERI, Davide; DE OLIVEIRA, Marcelo; ALLANORE, Antoine. Potassium fertilizer: Via hydrothermal alteration of K-feldspar ore. **Green Chemistry**, [*s. l.*], vol. 19, nº 21, p. 5187–5202, 2017a.

CICERI, Davide; DE OLIVEIRA, Marcelo; ALLANORE, Antoine. Potassium fertilizer: Via hydrothermal alteration of K-feldspar ore. **Green Chemistry**, [*s. l.*], vol. 19, nº 21, p. 5187–5202, 2017b.

COUSSOT, Philippe. RHEOMETRY OF PASTES, SUSPENSIONS, AND GRANULAR MATERIALS: Applications in Industry and Environment. *In*: RHEOMETRY OF PASTES, SUSPENSIONS, AND GRANULAR MATERIALS. [*S. l.*]: Wiley, 2005.

CUADRI, A. A. *et al.* Valorization of phosphogypsum waste as asphaltic bitumen modifier. **Journal of Hazardous Materials**, [*s. l.*], vol. 279, p. 11–16, 2014.

DA LUZ, C. Angulski; HOOTON, R. D. Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 77, p. 69–75, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.07.002.

DA LUZ, C. Angulski; HOOTON, R. D. Influence of Supersulfated Cement Composition on Hydration Process. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [*s. l.*], vol. 31, nº 6, 2019.

DA SILVA ANDRADE, Daniel *et al.* Investigation of C-S-H in ternary cement pastes containing nanosilica and highly-reactive supplementary cementitious materials (SCMs): Microstructure and strength. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 198, p. 445–455, 2019.

DE GASPERI, Jessica *et al.* Temporal dynamics of rheological properties of metakaolin-based geopolymers: Effects of synthesis parameters. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 289, p. 123145, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123145.

DE MATOS, Paulo R. *et al.* Polymorph and minor phase quantification in Portland clinker by X-ray powder diffraction analysis: Addressing challenges and foreign ion effects. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 190, 2025.

DE MATOS, P. R. *et al.* Strategies for XRD quantitative phase analysis of ordinary and blended Portland cements. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 131, 2022.

DE WEERDT, K. *et al.* Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 41, nº 3, p. 279–291, 2011.

DODSON, V.; HAYDEN, T. Another Look at the Portland Cement/Chemical Admixture Incompatibility Problem. **ASTM International. Cement, Concrete & Aggregates**, [*s. l.*], vol. 11, nº 1, p. 52–56, 1989.

DONG, Quanwen *et al.* Mechanical properties of modified supersulfated cement mortar. **Ceramics - Silikaty**, [*s. l.*], vol. 65, nº 3, p. 255–262, 2021.

ELAKNESWARAN, Yogarajah *et al.* Characteristics of ferrite-rich portland cement: Comparison with ordinary portland cement. **Frontiers in Materials**, [*s. l.*], vol. 6, 2019.

EL-DIDAMONY, Hamdy; AMER, Ahmed A.; MOHAMMED, Mona S. Hydration and mechanical properties of cement/sludge/ anhydrite gypsum system. **Advances in Cement Research**, [*s. l.*], vol. 26, nº 5, p. 248–255, 2014.

ERDEM, Emin; ÖLMEZ, Halis. The Mechanical Properties of Supersulphated. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 23, nº 7, p. 115–121, 1993.

EUROPEAN STANDARD. **EN_15743_Supersulfated_cement _Composition, specifications_and_conformity_criteria**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2015.

FANG, Zhenzhen *et al.* Effect of polyaspartic acid on the setting time and mechanical properties of α-hemihydrate gypsum. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 373, 2023.

FENG, Zhizhuo *et al.* Effect of fly ash on early-age properties and viscoelastic behaviors of supersulfated cement concrete under different degrees of restraint. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 401, 2023a.

FENG, Zhizhuo *et al.* Experimental study on cracking potential and viscoelastic behaviors of supersulfated cement concrete with different compositions. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], vol. 75, 2023b.

FEYS, Dimitri *et al.* Measuring rheological properties of cement pastes: most common techniques, procedures and challenges. **RILEM Technical Letters**, [*s. l.*], vol. 2, p. 129–135, 2017.

GAO, Jinglong; FOURIE, Andy. Spread is better: An investigation of the mini-slump test. **Minerals Engineering**, [*s. l.*], vol. 71, p. 120–132, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.001.

GARCÍA-MATÉ, Marta *et al.* Effect of calcium sulfate source on the hydration of calcium sulfoaluminate eco-cement. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 55, p. 53–61, 2015.

GARTNER, Ellis M.; MACPHEE, Donald E. **A physico-chemical basis for novel cementitious binders**. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2011.

GIJBELS, Katrijn *et al.* Effect of NaOH content on hydration, mineralogy, porosity and strength in alkali/sulfate-activated binders from ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 132, 2020.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Os compostos de clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. 2003. Dissertação de mestrado - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SÃO PAULO, 2003.

GRACIOLI, B. *et al.* Influence of the calcination temperature of phosphogypsum on the performance of supersulfated cements. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 262, p. 119961, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119961.

GROUNDS, T.; NOWELL, D. V.; WILBURN, F. W. The influence of temperature and different storage conditions on the stability of supersulphated cement. **Journal of Thermal Analysis**, [*s. l.*], vol. 45, nº 3, p. 385–394, 1995.

GRUSKOVNJAK, A. *et al.* Hydration mechanisms of super sulphated slag cement. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 38, nº 7, p. 983–992, 2008.

GRUSKOVNJAK, Astrid *et al.* Quantification of hydration phases in supersulfated cements: Review and new approaches. **Advances in Cement Research**, [*s. l.*], vol. 23, nº 6, p. 265–275, 2011.

GUTSALENKO, Tetiana *et al.* Impact of trace metals Zn, Cu, Cd and Ni on the reactivity of OPC and GGBS-based hydraulic binders at early age for sediment stabilization. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 346, nº June, 2022.

HE, Yan *et al.* Effects of PCEs with various carboxylic densities and functional groups on the fluidity and hydration performances of cement paste. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 202, p. 656–668, 2019.

HE, Yan *et al.* Impacts of sulphates on rheological property and hydration performance of cement paste in the function of polycarboxylate superplasticizer. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 256, 2020.

HOLTHUSEN, Dörthe; PETH, Stephan; HORN, Rainer. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters. **Soil and Tillage**

Research, [*s. l.*], vol. 111, nº 1, p. 75–85, 2010. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.08.002.

HONG, Hanlie ~ *et al.* **Effect of Calcined Temperature on the Solubility of Trace Elements from ManifanshiJournal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2006.

HUANG, Jiyun *et al.* Hydration mechanism of a sodium-doped phosphogypsum-based hemihydrate whisker (omongwaite) in supersulfated cement system. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 427, 2024.

HUGHES, Trevor L *et al.* **Determining Cement Composition by Fourier Transform Infrared Spectroscopy**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 1995.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Mercado Brasileiro do Aço 2023**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2023.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **RELATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2020.

JAIN, Neeraj; GARG, Mridul. Formulation of Sulphate Resistant Super Sulphated Cement Using Fluorogypsum and Granulated Blast Furnace Slag. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering Ver. II**, [*s. l.*], vol. 12, nº 3, p. 2320–334, 2015. Disponível em: www.iosrjournals.org.

JAKOB, Cordula *et al.* Relating ettringite formation and rheological changes during the initial cement hydration: A comparative study applying XRD analysis, rheological measurements and modeling. **Materials**, [*s. l.*], vol. 12, nº 18, 2019a.

JAKOB, Cordula *et al.* Relating ettringite formation and rheological changes during the initial cement hydration: A comparative study applying XRD analysis, rheological measurements and modeling. **Materials**, [*s. l.*], vol. 12, nº 18, 2019b.

JAMSHEER, Abdullah F. *et al.* Analysis of engineered cement paste using silica nanoparticles and metakaolin using 29Si NMR, water adsorption and synchrotron X-ray Diffraction. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 180, p. 698–709, 2018.

JARNY, S. *et al.* Rheological behavior of cement pastes from MRI velocimetry. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 35, nº 10, p. 1873–1881, 2005.

JIANG, Shan *et al.* Rheological properties of cementitious composites with nano/fiber fillers. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 158, p. 786–800, 2018.

JOHNSON, Stephen B *et al.* **Surface chemistry-rheology relationships in concentrated mineral suspensionsInt. J. Miner. Process**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2000. Disponível em: www.elsevier.nlrlocaterijminpro. .

JUENGER, M. C.G. *et al.* Advances in alternative cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 41, nº 12, p. 1232–1243, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012.

JUN, Wang; BAOYING, Yu; YUXIN, Gao. Hydration Characteristics of Super Sulphated Cement with Different Fineness. **International Conference on Material and Environmental Engineering**, [*s. l.*], p. 131–134, 2014.

JÚNIOR, Dilermando Salvador de Souza. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO A CARVÃO VEGETAL PRODUZIDAS A PARTIR DE ATIVAÇÃO À QUENTE**. 2007. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais , Minas Gerais, 2007.

KASHANI, Alireza; PROVIS, John L; DEVENTER, Jannie S J Van. Effect of ground granulated blast furnace slag particle size distribution on paste rheology : A preliminary model. **TY Journal**, [*s. l.*], vol. 1542, p. 5, 2013.

KAZANSKAYA, Liliya F. *et al.* Supersulfated cement applied to produce lightweight concrete. **Materials**, [*s. l.*], vol. 14, nº 2, p. 1–14, 2021.

KHIARA, Y *et al.* A microscopia do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos. **Anais do Congresso Brasileiro de Cimento**, [*s. l.*], p. 241–264, 1990.

KICH DE RÉ, Julia *et al.* Exploring the role of calcium sulfate in supersulfated cement: A study of rheological, mechanical, and microstructural properties. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 450, 2024.

KIRCHHEIM, Ana Paula *et al.* Effect of gypsum on the early hydration of cubic and Na-doped orthorhombic tricalcium aluminate. **Materials**, [*s. l.*], vol. 11, nº 4, 2018.

KISSLING, Patrick A. *et al.* Influence of in situ ettringite formation on the rheological properties of quartz suspensions. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 408, 2023.

KURDOWSKI, Wiesław. **Cement and concrete chemistry**. [*S. l.*]: Springer Netherlands, 2014. vol. 9789400779457

LI, Keshuang *et al.* Investigation into the roles of camellia seed residue powder as a natural foaming agent and a green retarder for α-hemihydrate gypsum. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 478, 2025.

LIAO, Yishun *et al.* Hydration behavior and strength development of supersulfated cement prepared by calcined phosphogypsum and slaked lime. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], vol. 80, 2023.

LIU, Shuhua *et al.* Comparing study on hydration properties of various cementitious systems. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [*s. l.*], vol. 118, nº 3, p. 1483–1492, 2014.

LIU, Shuhua *et al.* Immobilisation mechanism for nuclear waste containing aluminium by supersulfated cement containing phosphogypsum. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 139, 2023.

LIU, Shuhua *et al.* Influence of fineness on hydration kinetics of supersulfated cement. **Thermochimica Acta**, [*s. l.*], vol. 605, p. 37–42, 2015.

LIU, Juanhong; AN, Shuhao; ZHANG, Yueyue. Mechanism of regulating the mechanical properties and paste structure of supersulfated cement through ultrafine iron tailings powder. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 140, 2023.

LIU, Shuhua; HAN, Weiwei; LI, Qiaoling. Hydration properties of ground granulated blast-furnace slag (GGBS) under different hydration environments. **Medziagotyra**, [*s. l.*], vol. 23, nº 1, p. 70–77, 2017.

LIU, Shuhua; WANG, Lu; YU, Baoying. Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the phosphogypsum-based supersulfated cement. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 214, p. 9–16, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.052.

MAGALHÃES BALTAR, Carlos Adolpho; DE FREITAS BASTOS, Flavia; BENVINDO DA LUZ, Adão. CAPÍTULO 23_Gipsita. *In*: ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2008. vol. 2 edição, p. 505–526.

MANNING, David A.C. **Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2010a.

MANNING, David A.C. **Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2010b.

MARKGRAF, Wibke *et al.* Influence of organic matter on rheological properties of soil. **Applied Clay Science**, [*s. l.*], vol. 64, p. 25–33, 2012. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.009.

MARKGRAF, W.; HORN, R. Rheological Investigations on Soil Micro Mechanics: Measuring Stiffness Degradation and Structural Stability on a Particle Scale. **Progress in Management Engineering**, [*s. l.*], nº June 2009, p. 237–278, 2009.

MARKGRAF, Wibke; HORN, Rainer; PETH, Stephan. An approach to rheometry in soil mechanics-Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. **Soil and Tillage Research**, [*s. l.*], vol. 91, nº 1–2, p. 1–14, 2006.

MASOUDI, R.; HOOTON, R. D. Examining the hydration mechanism of supersulfated cements made with high and low-alumina slags. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 103, nº May, p. 193–203, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.001.

MASSUCATO, Carlos José. **UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO À CARVÃO VEGETAL COMO ADIÇÃO NO CONCRETO**. 2005. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MATSCHEI, T.; BELLMANN, F.; STARK, J. Hydration behaviour of sulphate-activated slag cements. **Advances in Cement Research**, [*s. l.*], vol. 17, nº 4, p. 167–178, 2005.

MEZGER, Thomas G. **THE RHEOLOGY HANDBOOK**. 4. ed. Hanover: [*s. d.*], 2014-. ISSN 17410401.vol. 59

MIAO, Wenjuan *et al.* Effect of gypsum type on the hydration of lithium slag based supersulfated cement. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 467, 2025.

MOHAMMED, Siline; SAFIULLAH, Omary. Optimization of the SO3 content of an Algerian Portland cement: Study on the effect of various amounts of gypsum on cement properties. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 164, p. 362–370, 2018.

MOLLAH, M Y A *et al.* **A Fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonateCement and Concrete Research**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2000.

MUN, K. J. *et al.* Basic properties of non-sintering cement using phosphogypsum and waste lime as activator. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 21, nº 6, p. 1342–1350, 2007.

NASCIMENTO, Marisa; LOUREIRO, Francisco E. Lapido. **Fertilizantes e Sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas**. CETEM/MCTed. Rio de Janeiro: [*s. d.*], 2004.

NEVILLE, A.M; BROOKS, J.J. **Concrete_Technology**. 2. ed. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2010.

NGUYEN, Hoang Anh *et al.* Utilizations of preheated flue gas desulfurization gypsum and sulfate compositions to modify performances of super-sulfated cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [*s. l.*], vol. 148, nº 24, p. 13761–13773, 2023.

PARK, Hyeoneun *et al.* Strength enhancement and pore-size refinement in clinker-free CaO-activated GGBFS systems through substitution with gypsum. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 68, p. 57–65, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.008.

PENG, Zechuan *et al.* The impediment and promotion effects and mechanisms of lactates on the hydration of supersulfated cements - Aiming at a performance enhancement. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], vol. 341, 2022.

PIERRE, Alexandre; LANOS, Christophe; ESTELLÉ, Patrice. Extension of spread-slump formulae for yield stress evaluation. **Applied Rheology**, [*s. l.*], vol. 23, nº 6, 2013.

PIMENTA, S.2023; ANGULSKI DA LUZ, C.; PELISSER, F. The use of metakaolin as a source of alumina in supersulfated in cements order to increase the formation of ettringite.

Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, [*s. l.*], vol. 148, nº 9, p. 3301–3309, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10973-023-12005-7.

PINTO, Sabrina R. *et al.* Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 136, nº March, p. 106172, 2020a. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106172.

PINTO, Sabrina R. *et al.* Resistance of phosphogypsum-based supersulfated cement to carbonation and chloride ingress. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 263, p. 120640, 2020b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120640.

POGGERE PINTO, Leticia; ANGULSKI DA LUZ, Caroline; HOOTON, R. Douglas. Ettringite instability in supersulfated cement: Investigation under different curing regimes. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [*s. l.*], vol. 57, nº 4, 2024.

QI, Huahui *et al.* Influence of fluoride ion on the performance of PCE in hemihydrate gypsum pastes. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], vol. 46, 2022.

QIAN, Ye *et al.* Effect of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE) on dynamic yield stress, thixotropy and flocculation state of fresh cement pastes in consideration of the Critical Micelle Concentration (CMC). **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 107, p. 75–84, 2018.

REIS, Daniel Costa *et al.* Potential CO2 reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050. **Journal of Industrial Ecology**, [*s. l.*], vol. 25, nº 2, p. 344–358, 2021.

RIBEIRO, Paula Godinho *et al.* Combined effects of hydrothermally-altered feldspar and water regime on cadmium minimization in rice. **Environmental Research**, [*s. l.*], vol. 215, 2022a.

RIBEIRO, Paula Godinho *et al.* Hydrothermally-altered feldspar as an environmentally-friendly technology to promote heavy metals immobilization: Batch studies and application in smelting-affected soils. **Journal of Environmental Management**, [*s. l.*], vol. 291, 2021.

RIBEIRO, Paula Godinho *et al.* Hydrothermally-altered feldspar reduces metal toxicity and promotes plant growth in highly metal-contaminated soils. **Chemosphere**, [*s. l.*], vol. 286, 2022b.

RICHARDSON, Ian G. Model structures for C-(A)-S-H(I). **Acta Crystallographica Section B: Structural Science, Crystal Engineering and Materials**, [*s. l.*], vol. 70, nº 6, p. 903–923, 2014.

ROUSSEL, Nicolas. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 36, nº 10, p. 1797–1806, 2006.

ROUSSEL, Nicolas. **Understanding the Rheology of Concrete**. [*S. l.*]: Woodhead Publishing Limited, 2012. vol. 1

ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: From slump to spreading flow. **Journal of Rheology**, [*s. l.*], vol. 49, nº 3, p. 705–718, 2005.

RUBERT, S. *et al.* Hydration mechanisms of supersulfated cement: The role of alkali activator and calcium sulfate content. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [*s. l.*], vol. 134, nº 2, p. 971–980, 2018.

SAAK, Aaron W.; JENNINGS, Hamlin M.; SHAH, Surendra P. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 34, nº 3, p. 363–371, 2004.

SCHAEFER, Cecília Ogliari. **VALORIZAÇÃO DE FONTE ALTERNATIVA DE SULFATO DE CÁLCIO PARA A PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES**. 2013. 1–387 f. - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SCHARAMM, Gebhard. **A PRATICAL APPROACH TO RHEOLOGY AND RHEOMETRY**. 2. ed. [*S. l.*]: [*s. d.*], 1998.

SCHÖLER, Axel *et al.* Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 55, p. 374–382, 2015.

SCRIVENER, Karen *et al.* Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 114, nº March 2017, p. 49–56, 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017.

SCRIVENER, Karen L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, [*s. l.*], vol. 88, nº 7, p. 11–21, 2014.

SCRIVENER, Karen.; SNELLINGS, Ruben.; LOTHENBACH, Barbara. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. [*S. l.*]: CRC Press, 2016.

SEGEMAR, Servicio Geológico Minero Argentino; UNSAM, Universidad Nacional de General San Martín. Feldespato y Mica. *In*: Buenos Aires: nº 5, 2000.

SHAO, Changzhi *et al.* Recycling waste gypsum and calcium carbide slag for the production of all-solid-waste supersulfated cement. **Physics of Fluids**, [*s. l.*], vol. 36, nº 12, 2024.

SILVESTRO, Laura *et al.* Rotational rheometry test of Portland cement-based materials – A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 432, 2024.

SINGH, Manjit; GARG, Mridul. Calcium sulfate hemihydrate activated low heat sulfate resistant cement. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 16, nº 3, p. 181–186, 2002.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. **Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2007.

SONEBI, M. *et al.* Optimisation of rheological parameters, induced bleeding, permeability and mechanical properties of supersulfated cement grouts. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 262, p. 120078, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120078.

SUN, Zhengning *et al.* Hydration mechanism of calcium sulfoaluminate-activated supersulfated cement. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], vol. 333, nº July 2021, 2022.

SUN, Huaqiang *et al.* Optimization of gypsum and slag contents in blended cement containing slag. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 112, nº November 2019, p. 103674, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103674.

TAN, Hongbo *et al.* Effect of borax and sodium tripolyphosphate on fluidity of gypsum paste plasticized by polycarboxylate superplasticizer. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 176, p. 394–402, 2018.

TAN, Zhijun; BERNAL, Susan A; PROVIS, John L. Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. **Materials and Structures**, [*s. l.*], vol. 50, p. 1–12, 2017.

TAYLOR, H.F.W. Cement chemistry. **Cement chemistry**, [*s. l.*], 1997.

TEIXEIRA, Aline Maria Dos Santos *et al.* Estudo do comportamento térmico da rocha fonolito com fins à produção de fertilizantes. **HOLOS**, [*s. l.*], vol. 5, p. 52–64, 2015.

TRENTIN, Priscila O *et al.* Influence of Content and Source of Calcium Sulfate on Supersulfated Cement Exposed to Sodium and Magnesium Sulfate Attack at Later Ages. [*s. l.*], 2023. Disponível em: https://orcid.org/0000-0003.

TRENTIN, P.O; ET. AL. Influence of Content and Source of Calcium Sulfate on Supersulfated Cement Exposed to Sodium and Magnesium Sulfate Attack at Later Ages. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [*s. l.*], vol. 35, nº 1, 2022.

TRENTIN, Priscila O.; PERARDT, Mariana; MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A. Ettringite instability analysis in the hydration process of the supersulfated cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [*s. l.*], vol. 147, nº 12, p. 6631–6642, 2022.

TÜRK, Tülay *et al.* Extraction of potassium from feldspar by roasting with CaCl2 obtained from the acidic leaching of wollastonite-calcite ore. **Minerals**, [*s. l.*], vol. 11, nº 12, 2021.

VARELA, Mawell Vinicius Favero *et al.* Study of gypsum and phosphogypsum as a source of calcium sulfate in supersulfated cement (Ssc) against sulfate attack. **Revista Materia**, [*s. l.*], vol. 26, nº 3, 2021.

VOTORANTIM CIMENTOS. EPD: Cements CP II E 40, CP III-40 RS and CP V-ARI by Votorantim Cimentos. [*s. l.*], p. 1–15, 2016.

WALLEVIK, Olafur H. *et al.* **Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials**. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2015.

WANG, Lu *et al.* Comparing study on the evolution characteristics of performance and microstructure between Portland slag cement and supersulfated cement under chemical attacks. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 425, 2024.

WANG, Shenyu *et al.* Re−utilization of Ca−based and Na−based desulfurization by−product as alternative sulfate activator in supersulfated cement system: Mineral transformation and reaction mechanism. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 472, 2025.

WANG, Lu *et al.* The evolution characteristics of water absorption, hydration products and microstructure of supersulfated cement containing phosphogypsum by microbial induced carbonate precipitation. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], vol. 409, 2023.

WEI, Shihong *et al.* Effect of superfine river sand on the rheological and mechanical properties of supersulfated cement. **Journal of the Indian Chemical Society**, [*s. l.*], vol. 102, nº 2, 2025a.

WEI, Shihong *et al.* The influence of lithium slag with a high content of alkali, sulfate and fluoride on the performance of supersulfated cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [*s. l.*], 2025b.

WESSELSKY, A.; JENSEN, O. M. Synthesis of pure Portland cement phases. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 39, nº 11, p. 973–980, 2009.

WINNEFELD, Frank; LOTHENBACH, Barbara. Hydration of calcium sulfoaluminate cements - Experimental findings and thermodynamic modelling. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 40, nº 8, p. 1239–1247, 2010.

WU, Qingyong; XUE, Qingzong; YU, Zhuqing. Research status of super sulfate cement. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], vol. 294, nº 30, p. 126228, 2021a. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126228.

WU, Qingyong; XUE, Qingzong; YU, Zhuqing. Research status of super sulfate cement. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], vol. 294, nº 30, p. 126228, 2021b.

XING, JiaruiJia *et al.* The influence of different kinds of weak acid salts on the macro-performance, micro-structure, and hydration mechanism of the supersulfated cement. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], vol. 66, nº January, p. 105937, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105937.

YAHIA, Ammar *et al.* Viscoelastic properties of fresh cement paste: measuring procedures and influencing parameters. **RILEM Technical Letters**, [*s. l.*], vol. 8, p. 23–30, 2023.

YAHYAEE NOJOUKAMBARI, Tohid; SADRMOMTAZI, Ali; KOHANI KHOSHKBIJARI, Reza. Influence of Feldspar and Ground Granulated Blast-furnace slag as a partial cement replacement on mechanical properties and thermal durability and environmental impacts of cement mortars. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], vol. 398, nº October 2022, p. 136074, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136074.

YE, Longpo *et al.* CO2 mineralization of activated K-feldspar + CaCl2 slag to fix carbon and produce soluble potash salt. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [*s. l.*], vol. 53, nº 26, p. 10557–10565, 2014.

YLMÉN, Rikard *et al.* Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 39, nº 5, p. 433–439, 2009.

YU, Baoying *et al.* Carbonation of supersulfated cement concrete after 8 years of natural exposure. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 142, 2023.

YU, Ping *et al.* Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-Infrared Spectroscopy. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s. l.*], p. 742–748, 1999.

ZEA-GARCIA, Jesus D. *et al.* Processing and characterisation of standard and doped alite-belite-ye'elimite ecocement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], vol. 127, 2020.

ZHI, Zhenzhen *et al.* Effect of alkali metal sulfates on hydration properties of alpha-calcium sulfate hemihydrate for 3D printing. **Materials Today Communications**, [*s. l.*], vol. 41, 2024.

ZHOU, Yang *et al.* Double-sided tuning effects of lactic acid on the hydration, microstructure and strength of supersulfated cement. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, [*s. l.*], vol. 12, nº 2, p. 170–183, 2023.

ZHOU, Runduo *et al.* Study on Sustainable Application of Low-Carbon Supersulfated Cement with Alkanolamines. **Sustainability (Switzerland)** , [*s. l.*], vol. 16, nº 7, 2024a.

ZHOU, Runduo *et al.* Study on Sustainable Application of Low-Carbon Supersulfated Cement with Alkanolamines. **Sustainability (Switzerland)** , [*s. l.*], vol. 16, nº 7, 2024b.

ZHOU, Yang *et al.* The influence of two types of alkali activators on the microstructure and performance of supersulfated cement concrete： mitigating the strength and carbonation resistance. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], vol. 118, nº January, 2021.

ZHU, Gengjie; QI, Zhaojun; KOU, Yunpeng. Kinetic study on the hydration of supersulfated cements. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [*s. l.*], vol. 149, nº 11, p. 5285–5297, 2024.