XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8791

Cimento supersulfatado com hidropotássio feldspático (MPM): avaliação do estado fresco e da resistência à compressão

Supersulfated cement with feldspathic hydropotassium (MPM): assessment of fresh state and compressive strength

Jessica de Gasperi
UFRGS | Porto Alegre | Brasil | jessica_degasperi@hotmail.com
Marlova Piva Kulakowski
UFRGS | Porto Alegre | Brasil | marlova@ufrgs.br
Laura Silvestro
UFTPR | Guarapuava | Brasil | laurasilvestro@utfpr.edu.br
Ana Paula Kirchheim
UFRGS | Porto Alegre | Brasil | anapaula.k@gmail.com

Resumo
Dentre as alternativas para a redução das emissões de CO_2, devido à produção de cimento Portland, têm-se os cimentos supersulfatados (CSS), compostos por clínquer em baixos teores, gesso e, geralmente, escória granulada de alto-forno (EGAF). Materiais ricos em SiO_2 e Al_2O_3 vêm sendo investigados para substituir a escória em razão de sua disponibilidade restrita. O hidropotássio feldspático (MPM) é obtido a partir de rochas feldspáticas por processo hidrotérmico e foi proposto como substituto parcial da EGAF na produção de CSS. Avaliaram-se a hidratação, a reologia e a resistência à compressão aos 28 dias dos cimentos com substituição de 10% e 20% da EGAF por MPM. O emprego de MPM melhorou a hidratação em teor moderado, mas prejudicou a trabalhabilidade. Em relação ao CSS de referência, a resistência à compressão apresentou queda de 9,5% com o emprego de 10% de MPM e aumento de 8% com o emprego de 20% de MPM.

Palavras-chave: Cimento supersulfatado. Hidropotássio feldspático. Calorimetria. Reometria. Resistência à compressão.

Abstract
Among the alternatives for reducing CO_2 emissions due to Portland cement production are supersulfated cements (SSC), which are composed of low contents of clinker, gypsum, and generally granulated blast-furnace slag (GBFS). Materials rich in SiO_2 and Al_2O_3 have been investigated to replace slag due to its limited availability. Hydro-potassium feldspar (MPM) is obtained from feldspathic rocks through a hydrothermal process and was proposed as a partial replacement for GBFS in SSC production. The hydration, rheology, and compressive strength at 28 days of the cements were evaluated with 10% and 20% replacement of GBFS by MPM. The use of MPM improved hydration at a moderate content but impaired workability. Compared to the reference SSC, the compressive strength showed a 9.5% decrease with the use of 10% MPM and an 8% increase with the use of 20% MPM.

Keywords: Supersulfated cement. Feldspathic hydropotassium. Calorimetry. Rheometry. Compressive strength.

Como citar:

GASPERI, J. et al. Cimento supersulfatado com hidropotássio feldspático (MPM): avaliação do estado fresco e da resistência à compressão. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8791

INTRODUÇÃO

Na produção de clínquer de cimento Portland são emitidas cerca de 60% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) atribuídas à indústria cimenteira [1,2]. Um panorama desta indústria indica que as emissões associadas à produção do cimento Portland (CP) representam 8% do total de emissões globais de CO_2 [3]. Entre os cimentos de reduzido teor de clínquer, destacam-se os cimentos supersulfatados (CSS), uma alternativa promissora de ligantes, pois incorporam quantidades reduzidas ou mesmo inexistentes de clínquer. Formulações típicas de CSS empregam 70 a 90% de escória granulada de alto forno (EGAF), 10 a 20% de sulfato de cálcio, e até 5% de ativador alcalino [4-7], normalmente clínquer [4-6] e cimento Portland [7-11]. Os CSS caracterizam-se por apresentar menor impacto ambiental em comparação ao CP, com emissões de CO_2 na ordem de 72 kg CO_2/t [12] e 159-281 kg CO_2-eq/t [13], frente à média mundial de 598 kg CO_2-eq/t para CP [14]. Os benefícios ambientais do CSS estão associados ao emprego de elevados teores de EGAF, coproduto do ferro-gusa, e ao teor reduzido de clínquer.

Scrivener et al. [15] alertam que a EGAF tem disponibilidade limitada diante da crescente demanda por cimento. Em escala mundial, a disponibilidade de EGAF corresponde a aproximadamente 5% da quantidade de clínquer produzida [15]. Assim, para a produção de CSS, é importante compreender como as variações nas formulações e nas matérias-primas afetam o desempenho do material.

O teor de alumina (Al_2O_3) da EGAF usada como adição mineral em CP é diferente daquele requerido para CSS, uma vez que a alumina reage com o sulfato, formando principalmente silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita (AFt, $C_6A\bar{S}_3H_{32}$) [12,16]. A composição química da EGAF influencia diretamente a dissolução da escória, a fração de escória hidratada e a quantidade de hidratos formados [17]. Desta forma, EGAF com teores mais elevados de alumina são preferíveis na produção de CSS [9,16], sendo recomendado um teor mínimo de Al_2O_3 de aproximadamente 13% [18].

Pode-se empregar materiais alternativos à EGAF como fonte de Al_2O_3, conforme demostrado por Pimenta et al. [16], cuja EGAF empregada no CSS continha baixo teor de alumina (8,9%). Os autores observaram que uma substituição de 5% da EGAF por metacaulim foi suficiente para promover maior formação de AFt, redução da porosidade e maior resistência. Assim, verifica-se o potencial de incorporação de materiais que contenham Al_2O_3 para melhorar a reatividade dos CSS.

Entre as alternativas para substituir a EGAF, encontram-se os produtos derivados de rochas feldspáticas. Os feldspatos pertencem ao grupo mineral dos aluminossilicatos de potássio, sódio e cálcio, e constituem aproximadamente 60% da crosta terrestre [19]. O hidropotássio, comercialmente conhecido como MPM (material multifásico), é obtido a partir da alteração hidrotérmica de rochas ricas em potássio [20]. Este processo promove alterações estruturais e químicas no feldspato, dando origem ao MPM, que contém minerais como K-feldspato ($KAlSi_3O_8$), tobermorita ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2{\cdot}4H_2O$), hidrogrossular ($Ca_3Al_2(SiO_4)_{3-x}(OH)_{4x}$), α-silicato dicálcico hidratado ($Ca_2SiO_3(OH)_2$), além de silicatos amorfos e outras fases acessórias. Os principais estudos com o MPM foram desenvolvidos no âmbito do tratamento de solos

[21,22], mas, com base em suas características químicas e mineralógicas, pode-se inferir que o MPM apresenta potencial para aplicação no desenvolvimento de CSS.

Em cimento Portland, estudos indicaram que a formação de etringita exerce uma influência expressiva na reologia e na hidratação das pastas de cimento [23,24]. A quantidade e a morfologia de etringita apresentaram relação direta com a tensão de escoamento, a viscosidade plástica e a viscosidade dinâmica. Entretanto, considerando a maior formação de etringita nos estágios iniciais de hidratação do CSS, os estudos acerca do comportamento reológico desses cimentos ainda são limitados.

Na busca por ligantes mais ecoeficientes, o objetivo deste trabalho é avaliar a hidratação, a reologia e a resistência à compressão de pastas de cimentos supersulfatados empregando MPM em substituição à EGAF.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Os materiais empregados foram EGAF, anidrita, clínquer e MPM. A EGAF foi obtida já com granulometria adequada. O MPM foi fornecido pela Advanced Potash Technologies Ltd, detentora da patente. Um moinho de discos (100 cc, Dialmática), foi empregado para cominuir o clínquer, com tempo de moagem de 30 minutos para cada porção de 100 g. A anidrita foi obtida a partir da calcinação de gipsita moída, em mufla, à temperatura de 650°C, durante uma hora [25,26].

A caracterização granulométrica (Tabela 1) foi realizada em granulômetro a laser (PSA 1090L, Anton-Paar), por via líquida, utilizando álcool isopropílico. A caracterização química (Tabela 2) foi conduzida por fluorescência de raios X (Epsilon 1, Malvern Panalytical).

Tabela 1: Caracterização granulométrica

Parâmetro	Clínquer	Anidrita	Escória	MPM
$D_{v,10}$ (µm)	2,60	3,62	2,07	11,95
$D_{v,50}$ (µm)	14,50	18,44	9,81	18,51
$D_{v,90}$ (µm)	41,80	58,44	27,63	29,64
$D_{v,m}$ (µm)	19,50	26,51	13,05	20,51

Fonte: os autores.

Tabela 2: Caracterização química

Óxido (%)	Clínquer	Anidrita	Escória	MPM
SiO_2	20,38	1,51	33,37	44,06
Al_2O_3	5,25	0,25	11,76	10,65
CaO	65,18	40,36	45,82	23,01
Fe_2O_3	3,11	0,25	0,56	3,73
K_2O	1,08	-	0,37	9,75
Na_2O	0,39	-	-	1,27
MgO	3,01	0,62	4,24	0,74
SO_3	1,33	54,93	2,05	-
BaO	-	-	0,05	0,58
P_2O_5	-	-	-	0,13
TiO_2	-	-	0,60	0,08
MnO	-	-	0,33	0,07
ZnO	-	-	-	-
SrO	0,16	-	0,13	-
Cl	-	-	0,13	0,02
Perda ao Fogo	0,14	2,08	0,59	5,91

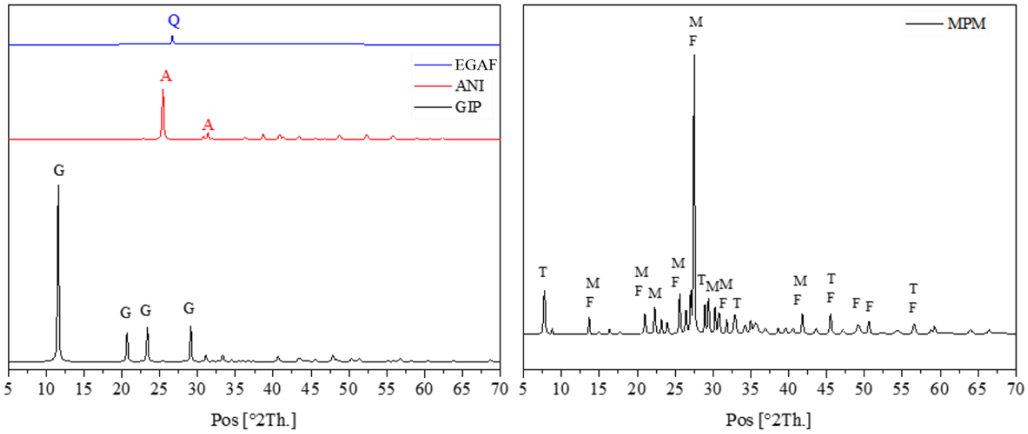
Fonte: os autores.

A dimensão de partícula d50 dos materiais variou de 9,81 µm (EGAF) a 18,51 µm (MPM) (Tabela 1). Na Tabela 2, observa-se que a EGAF apresenta teor de alumina de 11,76%, considerado baixo [8]; relação $(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2$ de 1,85, atendendo à NBR 16697; relação $(CaO+MgO)/SiO_2$ de 1,50, atendendo à EN 15743; e relação Ca/SiO_2 de 1,37, que atende ao critério de ambas as normas. O MPM caracteriza-se por: teor de Al_2O_3 de 10,65%, muito próximo ao da escória; e teor de álcalis, pelo equivalente em Na_2O (Na_2O_{eq}) de 7,70% significativamente superior a 1,10% do clínquer, o que pode contribuir para a ativação alcalina.

A difração de raios X (DRX) foi empregada para identificar as fases mineralógicas, e foi conduzida em difratômetro Rigaku Miniflex 600, na UTFPR (Kα do Cu λ=0,154 nm; 600 W/ 40kV). Os difratogramas dos materiais empregados são apresentados na Figura 1.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8791

Figura 1: Difração de Raios X dos materiais



Q=Quartzo, A=Anidrita, G: Gipsita, T=Tobermorita, M=Microclina e F=k-Feldspato

Fonte: os autores.

Os difratogramas da gipsita e da anidrita apresentam os picos característicos dessas fases minerais, o que indica indicando a completa conversão da primeira na segunda. Na análise da EGAF identificou-se apenas um pico cristalino de quartzo. No MPM foram identificados principalmente tobermorita ($Ca_5(OH)_2Si_6O_{16}{\cdot}4H_2O$), microclina ($KAlSi_3O_8$); e K-feldspato ($K(AlSi_3O_8)$), conforme a literatura [20].

A análise quantitativa das fases do clínquer por DRX e Rietveld (RQPA) foi realizada por Matos et al. [27] (Tabela 3).

Tabela 3: Quantificação das fases do clínquer

Fases / elementos	Teor (%)
Total C_3S (M1+M3)	69,2
Total C_2S (β+ α'_H)	7,0
Total C_3A (cúbico + ortorrômbico)	3,5
C_4AF	10,3
Periclásio	6,6
Portlandita	1,6
Aftitalita	1,4

Fonte: Matos et al. [27].

COMPOSIÇÃO E PRODUÇÃO DAS PASTAS

Definiu-se os teores de substituição da EGAF pelo MPM (10 e 20%), e a relação água/ligante (0,55), em estudo piloto. O teor de 15% de anidrita foi determinado em estudo prévio de CSS [28], empregando os mesmos materiais do presente trabalho. A Tabela 4 apresenta as 3 formulações de CSS.

Tabela 4: Composições do CSS

Formulação	Clínquer (%)	Anidrita (%)	Escória (%)	MPM (%)
Referência (REF)	5	15	80	0
10% de EGAF (10%E)	5	15	70	10
20% de EGAF (20%E)	5	15	60	20

Fonte: os autores.

A produção das pastas foi realizada manualmente e com auxílio de um misturador de alta rotação composto por motor, suporte, recipiente metálico e hélice do tipo “cowles”, com velocidade de rotação de 10.000 rpm. Os materiais permaneceram em ambiente climatizado, pelo mínimo de 24 horas, garantindo a estabilização da temperatura em 22°C. A mistura ocorreu em 3 intervalos de tempo:

- 0 a 30’ - mistura manual dos materiais com água, no recipiente metálico;
- 30 a 50’ - ajuste do recipiente metálico ao suporte do misturador;
- 50’ a 2” - mistura em 10.000 rpm no misturador.

MÉTODOS

Calorimetria por Condução Isotérmica

Empregou-se calorimetria para analisar a cinética de hidratação das pastas, seguindo as recomendações da ASTM C1679-2017. Imediatamente após a mistura, 4,5±0,5 gramas de pasta foram introduzidas na ampola do equipamento (TAM Air). Conduziu-se o ensaio em temperatura de 22°C por 72 horas.

Reometria Oscilatória e Rotacional

A reometria foi conduzida em um reômetro compacto Haake MARS 40 (Reoterm). Os parâmetros adotados para o ensaio oscilatório foram: placas rugosas e paralelas; gap de 1 mm; faixa de deformação de 0,01 a 100%; e frequência de 1 Hz. Obteve-se 40 pontos em 12 minutos de ensaio. A configuração do teste rotacional empregou: placas paralelas hachuradas (diâmetro 35 mm); gap de 1 mm; relação R (raio da placa)/H (gap da amostra) de 35 [29]. Foi aplicado um cisalhamento prévio de 100 s^{-1} por 30 s. Imediatamente após esse período, foram determinadas as curvas de fluxo das amostras de CSS, utilizando uma rotina de rampa. Para as curvas ascendentes empregou-se a taxa de cisalhamento de 0,1 a 100 s^{-1}. Em seguida, a taxa diminuiu de 100 para 0,1 s^{-1} determinando-se as curvas descendentes. Cada trecho foi composto pela coleta de dados de 100 pontos.

Resistência à Compressão

Empregou-se 9 corpos de prova cúbicos, com 20 mm de aresta, para cada formulação. Após 24 horas da moldagem, as amostras foram submersas em água saturada com cal, em temperatura de 23±2°C, permanecendo até 28 dias. Foi empregada uma prensa universal (EMIC), com célula de carga de 20kN e velocidade de carregamento de 0,5 mm/min.

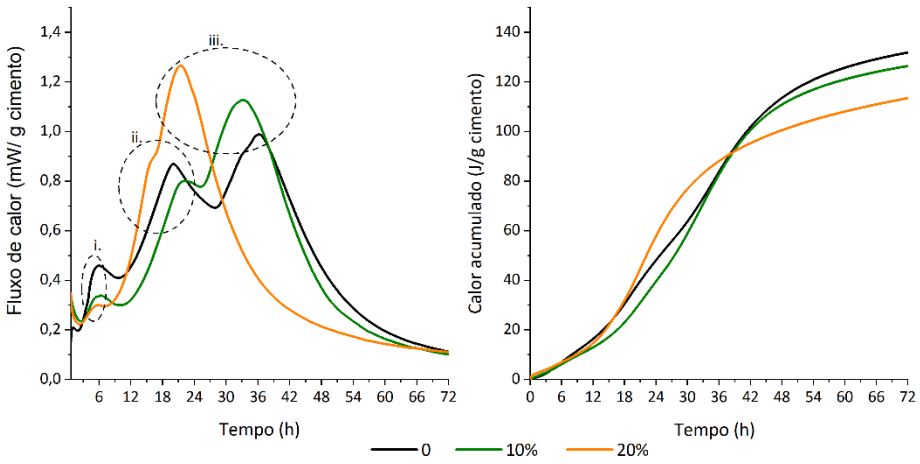
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8791

RESULTADOS

CALORIMETRIA POR CONDUÇÃO ISOTÉRMICA

As curvas de liberação de calor dos CSS avaliados são apresentadas na Figura 2.

Figura 2: (a) Curva de fluxo e (b) calor acumulado dos CSS estudados



Fonte: os autores.

A análise das curvas calorimétricas indica que a substituição de EGAF por MPM modifica o comportamento do CSS no estado fresco, exercendo uma influência complexa sobre a cinética de hidratação. As curvas da Figura 2(a) apresentaram três picos principais de liberação de calor, localizados aproximadamente em 6 horas, entre 16 e 22 horas e entre 21 e 36 horas, denominados picos i, ii e iii, respectivamente. O pico i é atribuído principalmente à formação de AFt, o pico ii está associado à intensificação da formação de AFt, e o pico iii está relacionado à sobreposição entre a precipitação de C–S–H e a evolução de AFt. Antes do pico i, observa-se uma liberação inicial de calor relacionada à molhagem das partículas. Nas misturas contendo MPM, a taxa de decaimento desse pico inicial foi mais lenta, e pode estar relacionado ao aprisionamento de água pelo MPM e ao aumento da área superficial do sistema.

O aumento da substituição alterou de forma expressiva o comportamento global das curvas. Para 10% de substituição, os dois primeiros picos apresentaram menor intensidade que a referência, mas o terceiro pico (~36 h) mostrou maior liberação de calor (~1,25 mW/g). Já com 20% de substituição, observou-se redução acentuada do calor liberado nas primeiras horas (~6 h) e o surgimento de um ombro prolongado no segundo pico (~24 h), indicando que, embora o teor de Al_2O_3 do MPM seja semelhante ao da EGAF. A presença do MPM modifica o comportamento global da cinética, sobretudo com 20% de MPM, cujos picos ii e iii são significativamente antecipados em relação às demais formulações. Esse comportamento pode ser resultante de um rápido consumo de sulfatos a medida que se aumenta o teor de MPM.

Diferentemente da aceleração das reações observada ao substituir EGAF por metacaulim [16], que aporta alumina ao sistema, neste estudo não se verificou tal

efeito. A ação do MPM como fonte adicional de alumínio é limitada, pois o teor de Al_2O_3 do MPM (10,65%) é muito próximo ao teor da EGAF (11,75%).

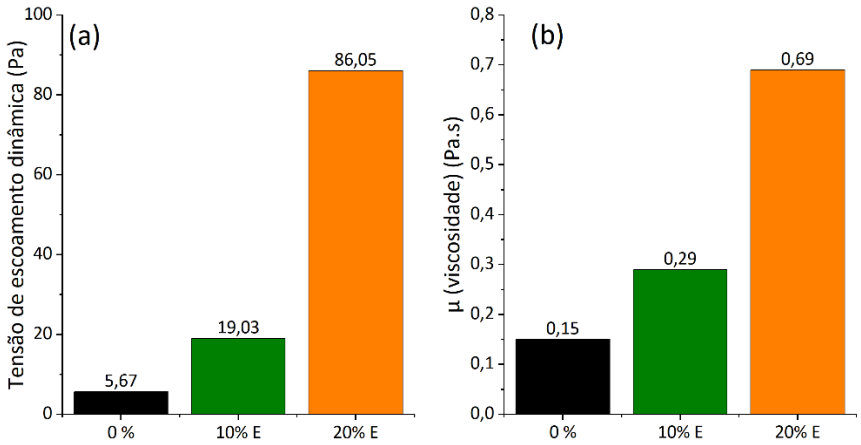
De forma geral, a incorporação de MPM resultou em menor reatividade inicial e redução do calor acumulado até 18 horas (Figura 2b), refletindo a formação de menor quantidade de produtos hidratados nesse intervalo. Entretanto, para o teor 10% e tempos de hidratação mais longos (≥24 h), o MPM demonstrou efeito positivo sobre a continuidade das reações, promovendo a liberação de calor e a formação de produtos em magnitude muito próxima à referência.

Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da alcalinidade. O Na_2O_{eq} dos CSS é de 0,25%, 0,99% e 1,74%, respectivamente para REF, 10%E e 20%. Esses dados indicam um aumento de quase 4 e 7 vezes quando se compara o teor de 10 e 20% de escória, respectivamente, com o referência. Esse aumento reflete-se no aumento da força iônica da solução devido à liberação de K^+ pelo MPM, o que favorece a dissolução contínua da EGAF e a nucleação de produtos hidratados. Fenômeno semelhante foi relatado por outros autores [30,31] em sistemas contendo nanosílica, nos quais a otimização da concentração de íons Ca^{2+} favoreceu a reação da EGAF, inibiu o crescimento excessivo de AFt e estimulou a formação de C–(A)–S–H.

REOMETRIA ROTACIONAL

A partir do modelo H-B, todas as amostras apresentaram valores de n inferiores a 1, indicando um comportamento pseudoplástico, conforme Figura 3(a) e 3(b).

Figura 3: Resultados de reometria rotacional: (a) Tensão de escoamento dinâmica e (b) Viscosidade equivalente



Fonte: os autores.

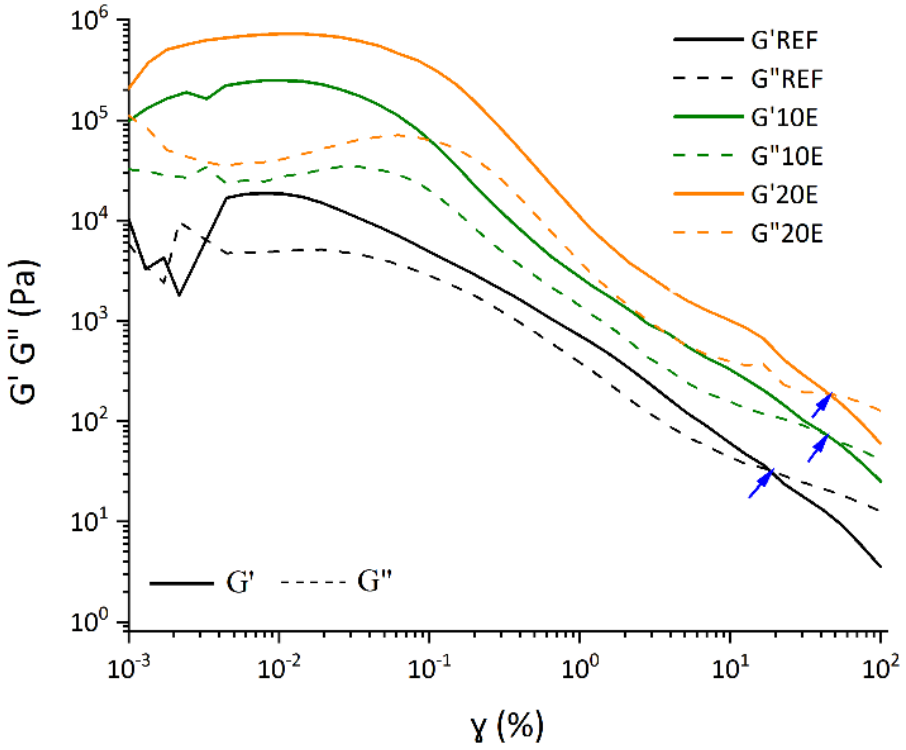
Conforme os resultados apresentados na Figura 3(a) e 3(b) é possível identificar que a inserção de MPM incrementou notadamente a tensão das pastas. No entanto, os incrementos observados não são lineares em relação ao teor adicionado. O uso de 10 e 20% de MPM incrementa em aproximadamente 3 e 5 vezes, respectivamente, a tensão e 2 e 5 vezes no caso da viscosidade. Uma possível explicação para esse comportamento reside na retenção de água pelo MPM que, ao reduzir a água livre do sistema, torna a rede particulada mais coesa. Esta condição eleva a tensão de

escoamento – condição limiar para o início do fluxo – e a viscosidade – a oposição ao movimento após o início.

REOMETRIA OSCILATÓRIA

Todas as amostras apresentaram um comportamento viscoelástico (Figura 4), com dominância do comportamento elástico (G') sobre o comportamento viscoso (G").

Figura 4: Curvas de G' e G" dos CSS com e sem MPM em substituição à EGAF



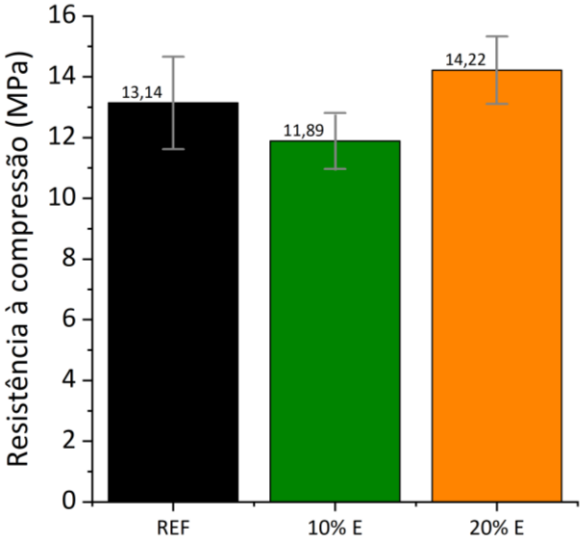
Fonte: os autores.

Para a pasta referência, mais fluída, o aumento no ruído para a deformação (ɣ), inferior à 0,004%, é compatível com o piso do torque do modelo do reômetro (~10nNm). A adição de MPM tende a deslocar o limite elástico das amostras, dado pela estabilidade da linha G', e o ponto de escoamento, dado por G" é igual a G'(setas na Figura 4), para a direita, em direção às maiores deformações. Este comportamento indica que o material pode suportar tensões significativas antes de começar a fluir. Isto sugere que o MPM nesses cimentos pode levar à uma estrutura mais estável, pois o G'' supera o G' em uma região de deformação mais alta. Por outro lado, o mecanismo de diminuição da água livre disponível, e consequente aumento do atrito e colisão entre as partículas, indicado pelos resultados da Figura 3, também corroboram para o incremento de G'.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 5 mostra a média da resistência à compressão obtida aos 28 dias, juntamente com os respectivos desvios padrão.

Figura 5: Resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: os autores.

Aplicou-se o teste de Tukey aos resultados de resistência para avaliar quais pares de misturas apresentavam diferenças estatisticamente significativas entre si. De acordo com o teste, os CSS com MPM apresentam diferenças significativas em relação ao referência. Ao analisar o CSS com 10% de MPM obteve-se uma redução de 9,5% da resistência. De forma diversa, o emprego de 20% de MPM levou ao aumento de 8,2%, da resistência. O elevado teor de clínquer da formulação de referência (5%) parece ter prejudicado a dissolução contínua da EGAF e, consequentemente, a formação de produtos. Isso se deve ao fato de que altas concentrações de ativadores elevam o pH (>13) e afetam a formação precoce de AFt [32].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da substituição de escória granulada de alto forno (EGAF) por hidropotássio (MPM) na produção de cimentos supersulfatados foi conduzida no estado fresco e endurecido.

Nos ensaios de calorimetria, em torno de 6 horas, observou-se maior liberação de calor atribuída a formação inicial de AFt para os CSS com MPM. No entanto, ao longo da hidratação, observou-se comportamentos distintos entre 10 e 20% de MPM. Entre 16 e 38 horas o CSS com 20% de MPM apresentou o maior calor acumulado. Após esse período o CSS referência e o CSS com 10% MPM apresentaram o maior valor acumulado até o final do ensaio, com valores totais muito próximos. Atribui-se esses comportamentos ao aumento da força iônica da solução em função do maior Na_2O_{eq} atribuído pelo MPM.

Ao incorporar MPM substituindo EGAF obteve-se um aumento não linear de τ_o e μ_{eq}, com G' dominante, LVE mais amplo e ponto de escoamento em maiores deformações. Tal comportamento evidencia rede particulada mais rígida já no estado fresco, decorrente do aprisionamento de água pelo MPM e de maior contato friccional entre

grãos (filme aquoso afinado). O emprego de MPM alterou significativamente o desempenho mecânico do CSS.

Em síntese, o MPM atua como modulador físico-químico: melhora a hidratação em teor de 10%, no entanto, há uma diminuição da resistência média aos 28 dias em relação ao CSS de referência. Em teor de 20% o comportamento global de hidratação é inferior ao 10%, mas apresenta um aumento da resistência à compressão. Em relação às propriedades vinculadas à trabalhabilidade o MPM age de forma negativa, proporcionalmente ao aumento do teor. Mais estudos seriam necessários para esclarecer essas tendências de comportamento, investigando o desenvolvimento da resistência à compressão ao longo das idades.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a: FAPERGS-Processo-90786.861.15413.12112024; CNPq-INCT-Processo-408791/2024-1; Potash Advanced Technologies Ltd.

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] SCRIVENER, K.L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, v. 88, n. 7, p. 11–21, 2014.

[2] BARCELO, L. et al. Cement and carbon emissions. **Materials and Structures**, v. 47, n. 6, p. 1055-1065, 2014.

[3] BODEN, T. A. et al. Global, regional, and national fossil-fuel CO2 emissions (1751–2014). In: Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem; **Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC)**. 2017. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2017.

[4] YU, B. et al. Carbonation of supersulfated cement concrete after 8 years of natural exposure. **Cement and Concrete Composites**, v. 142, n. 9, p. 105165, 2023.

[5] SUN, Z. et al. Mechanistic insights into hydration kinetics and strength enhancement of supersulfated cement co-activated by carbide slag and ferroaluminate–silicate Synergy. **Construction and Building Materials**, v. 520, n. 4, p.146008, 2026.

[6] DE RÉ, J. K. et al. Understanding the hydration process and the environmental impact of low alumina slag-based supersulfated cement. **Journal of Building Engineering**, v. 123, n. 4, p. 115840, 2026.

[7] ERDEM, E.; ÖLMEZ, H. The Mechanical Properties of Supersulphated. **Cement and Concrete Research,** v. 23, n. 7, p. 115–121, 1993.

[8] GUTSALENKO, T. 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**, v. 346, n.6, p. 128406, 2022.

[9] MASOUDI, R.; HOOTON, R. D. Examining the hydration mechanism of supersulfated cements made with high and low-alumina slags. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, n.5, p. 193–203, 2019.

[10] XING, J. 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**, v. 66, n.1, p. 105937, 2023.

[11] ZHOU, Y. et al. Double-sided tuning effects of lactic acid on the hydration, microstructure and strength of supersulfated cement. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 12, n. 2, p. 170–183, 2023.

[12] SUN, Z. et al. Hydration mechanism of calcium sulfoaluminate-activated supersulfated cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 333, p. 130094, 2022.

[13] CABRERA-LUNA, K. et al. Supersulfated cements based on pumice with quicklime, anhydrite and hemihydrate: Characterization and environmental impact. **Cement and Concrete Composites**, v. 124, p. 104236, 2021.

[14] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2024**. SNIC: São Paulo, 2025.

[15] SCRIVENER, K. et al. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 49–56, 2018.

[16] PIMENTA et al. 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**, v. 148, n. 9, p. 3301–3309, 2023.

[17] ANGULSKI DA LUZ, C.; HOOTON, R. D. Influence of Supersulfated Cement Composition on Hydration Process. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 6, p. 04019090-1 a 6, 2019.

[18] YANG, X. et al. The effect of modified phosphogypsum on physical properties and hydration behavior of supersulfated cement containing high-alumina slag. **Construction and Building Materials**, v. 520, n. 145987, 2026.

[19] TEIXEIRA, A. M. S. et al. Estudo do comportamento térmico da rocha fonolito. **HOLOS**, v. 5, p. 52–64, 2015.

[20] CICERI, D. et al. Potassium fertilizer: Via hydrothermal alteration of K-feldspar ore. **Green Chemistry**, v. 19, n. 21, p. 5187–5202, 2017.

[21] CHEN, M. et al. Review on K-Feldspar Mineral Processing for Extracting Metallic Potassium as a Fertilizer Resource. **Minerals**, v. 14, n. 2, p. 168-1 a 14, 2024.

[22] TÜRK, T. et al. Extraction of potassium from feldspar by roasting with CaCl2 obtained from the acidic leaching of wollastonite-calcite ore. **Minerals**, [s. l.], v. 11, n. 12, p. 1369-1 a 13, 2021.

[23] JAKOB, C. et al. Relating ettringite formation and rheological changes during the initial cement hydration: A comparative study applying XRD analysis, rheological measurements and modeling. **Materials**, v. 12, p. 2957, 2019.

[24] KISSLING, Patrick A. *et al.* Influence of in situ ettringite formation on the rheological properties of quartz suspensions. **Construction and Building Materials**, v. 408, p. 133678, 2023.

[25] ANGULSKI DA LUZ, C.; HOOTON, R. D. Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age. **Cement and Concrete Research**, v. 77, p. 69–75, 2015.

[26] RUBERT, S. et al. Hydration mechanisms of supersulfated cement: The role of alkali activator and calcium sulfate content. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 134, n. 2, p. 971–980, 2018.

[27] MATOS, P. 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**, v. 190, p. 107801, 2025.

[28] GASPERI, J. et al. Effect of calcium sulfate source and dosage on the rheology and early-age hydration of supersulfated cement. **Materials and Structures**, v. 59, art.n. 289, 2026.

[29] MEZGER, Thomas G. **The Rheology Handbook**. 4. ed. Hanover: Vincentz Network, 2014. 434 p.

[30] CAI, T. *et al.* Effects of nanosilica on supersulfated cements of different clinker-activation degree. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130118, 2023.

[31] 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**, v. 167, 2023.

[32] MUN, K. J. *et al.* Basic properties of non-sintering cement using phosphogypsum and waste lime as activator. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 6, p. 1342–1350, 2007.