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.v21i1.8464

Efeito do tempo de moagem e do teor de dregs na cinética de hidratação de pastas de cimento Portland

Influence of Grinding Time and Dregs Content on the Hydration Kinetics of Portland Cement Pastes

Thamires Carvalho Matos
UFSB |Teixeira de Freitas | Brasil | carvalhot081@gmail.com
Hêmily de Carvalho Dias
UFSB |Teixeira de Freitas | Brasil | hemilycarvalhoeng@gmail.com
Roberta de Souza da Paixão
Universidade Federal da Bahia | Salvador | Brasil | robertapaixao200@gmail.com
Jardel Pereira Gonçalves
Universidade Federal da Bahia | Salvador | Brasil | jardelpg@gmail.com
Samile Raiza Carvalho Matos
UFSB |Teixeira de Freitas | Brasil | samile.matos@ufsb.edu.br

Resumo

O presente estudo avaliou o potencial de uso do *dregs*, resíduo da indústria de papel e celulose, como substituição parcial do cimento Portland CP V em matrizes cimentícias, por meio da análise de sua influência na cinética de hidratação. O material foi beneficiado por secagem e moagem, sendo caracterizado por massa específica e difração de raios X qualitativa, que indicou predominância de fases carbonáticas. Na primeira etapa, investigou-se a influência do tempo de moagem por calorimetria isotérmica, sendo definida a condição ótima de beneficiamento. Na segunda etapa, essa condição foi aplicada em misturas com 8%, 12% e 16% de substituição de cimento por dregs. Os resultados indicaram que o resíduo modificou a cinética das reações de hidratação das pastas, evidenciando efeitos fíler, nucleação e possível interação química com fases aluminato, sendo observada uma relação direta entre o teor incorporado e o fluxo de calor nas primeiras idades.

Palavras-chave: *Dregs*. Cimento Portland. Resíduos Industriais. MCS. Calcário

Abstract

This study evaluated the potential use of dregs, a residue from the pulp and paper industry, as a partial replacement of Portland cement CP V through the analysis of its influence on hydration kinetics. The material was processed by drying and grinding and characterized by density and qualitative X-ray diffraction, which indicated the predominance of carbonate phases. In the first stage, the influence of grinding time was investigated by isothermal calorimetry, and the optimum processing condition was defined. In the second stage, this condition was applied in cement pastes with 8%, 12%, and 16% cement replacement by dregs. The results indicated that the residue modified the hydration kinetics of the pastes, evidencing filler effects, nucleation, and possible chemical interaction with aluminate phases, with a direct relationship observed between replacement level and heat flow at early ages.

Keywords: Dregs. Portland Cement. Industrial Waste. SCM. Limestone

MATOS, T. C.; DIAS, H. C.; PAIXÃO, R. S.; GONÇALVES, J. P.; MATOS, S. R. C. Efeito do tempo de moagem e do teor de dregs na cinética de hidratação de pastas de cimento Portland. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado no mundo para a construção de edificações e infraestrutura[1]. Entretanto, a produção de cimento Portland(CP) está entre as atividades industriais de maior impacto ambiental, sendo responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2), em razão da etapa de clinquerização e do elevado consumo energético do processo produtivo[2]. Apesar desses impactos, o CP permanece amplamente empregado devido ao elevado desempenho mecânico, à durabilidade e à consolidação tecnológica de sua cadeia produtiva[3]. Nesse contexto, a substituição parcial do cimento por adições minerais, também denominadas materiais cimentícios suplementares (MCS), destaca-se como uma das estratégias mais promissoras para reduzir o teor de clínquer e, consequentemente, os impactos ambientais associados [4].

Entre os materiais com potencial de aproveitamento, destacam-se resíduos provenientes da indústria de papel e celulose. No processo Kraft, na etapa de recuperação química, o licor verde é submetido à clarificação, processo no qual impurezas insolúveis são removidas, originando o resíduo denominado dregs[4]. Em seu estado natural, o dregs apresenta coloração escura e composição predominantemente carbonática, sendo rico em calcita ($CaCO_3$) [3,5]. Além disso, pode conter Na, Mg, Si, Fe, Al e Mn em menores teores, cuja composição varia conforme a espécie de madeira utilizada e as condições operacionais do processo Kraft [3,5,7–9]. Tais características indicam potencial para sua aplicação em materiais de construção, especialmente como substituição parcial do cimento Portland ou componente de aglomerantes álcali ativados[6].

A geração de dregs varia entre 11,34 e 54,32 kg por tonelada de celulose produzida [3]. Apesar desse volume, a maior parte do resíduo gerado ainda é destinada a aterros industriais, sendo apenas uma pequena fração reaproveitada[5,7]. Em ensaios de solubilização, o dregs pode apresentar concentrações de Al, Na, Cr e Ba superiores aos limites normativos, sendo classificado como resíduo Classe II-A (não perigoso e não inerte)[3]. Essa classificação exige sua disposição em aterros industriais controlados, aumentando a demanda por áreas destinadas à disposição final [5,7]. Nesse contexto, a valorização do dregs representa uma alternativa alinhada aos princípios da economia circular, promovendo sua reinserção como matéria-prima em novas cadeias produtivas e reduzindo a dependência da disposição em aterros [8,9].

Estudos indicam que o beneficiamento físico do dregs, especialmente por moagem, pode ser determinante para sua aplicação em matrizes cimentícias, uma vez que o aumento da finura tende a elevar sua reatividade e a favorecer sua compatibilidade com o cimento Portland[6]. O controle da finura também é relevante para reduzir a demanda de água e para a otimização do empacotamento granulométrico da mistura[4].

No entanto, a aplicação do dregs em matrizes cimentícias, principalmente considerando a influência do tempo de moagem associada a diferentes teores de substituição, ainda é pouco explorada na literatura. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da granulometria do dregs e de diferentes teores de substituição na cinética de hidratação de pastas cimentícias.

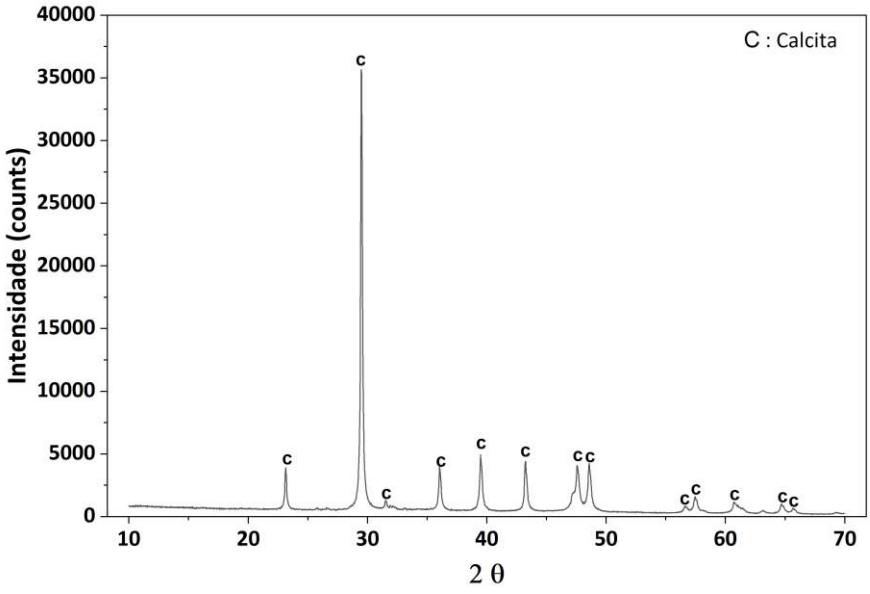
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8464

METODOLOGIA

MATERIAIS

Os materiais utilizados foram o cimento Portland CP V-ARI e o resíduo dregs, proveniente da indústria de papel e celulose. O dregs foi coletado conforme NBR 8952[10]. O material foi armazenado em condições controladas, a fim de minimizar alterações em suas propriedades e possíveis contaminações. A massa específica do dregs foi determinada por picnometria a gás hélio (2,64 g/cm³). A composição mineralógica foi avaliada por difração de raios X (DRX) (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), sendo a calcita ($CaCO_3$) identificada como fase mineralógica majoritária, corroborando estudos prévios[2][5]. A análise foi realizada no difratômetro D8 Advance (Bruker AXS), utilizando radiação Cu Kα (λ = 0,154 nm), 40 kV e 40 mA, no intervalo de 10° a 70° (2θ), com passo de 0,02°/s. A indetificação qualitativa foi realizada com o software QUALX[11], a partir das bases de dados ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) e COD (*Crystallography Open Database*).

Figura 1. Difratograma de Raio X do *dregs* moído por 10 min. C: calcita.



METÓDOS

BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO

Após a coleta, o dregs foi submetido à secagem, determinação do teor de umidade, análise granulométrica, (ABNT NBR NM 248:2003[12]), moagem e homogeneização, seguindo adaptação proposto por Oliveira[5]. Possibilitando a sua caracterização e posterior utilização nos ensaios experimentais.

Inicialmente, o resíduo *in natura* foi desaglomerado e submetido à secagem em estufa, a 100 °C por 24 h. Posteriormente, realizou-se a moagem em moinho planetário de bolas, modelo PM 100 (Retsch). Para cada ensaio, foram utilizados 75 mL de material

e aproximadamente 2000 esferas de aço inoxidável com diâmetro de 5 mm, sob rotação de 350 rpm, nos tempos de 5, 10 e 15 min. Foi adicionado propilenoglicol como agente dispersante, 0,4% da massa de amostra. Ao final de cada ciclo de moagem, as esferas foram esterilizadas para evitar contaminação entre amostras e garantir a repetibilidade.

GRANULOMETRIA A LASER

A granulometria das amostras foi determinada por difração a laser, utilizando o equipamento Mastersize 3000 (Malvern Instruments), com faixa de medição entre 0,01 e 3500 µm. A dispersão das partículas foi realizada por meio do acessório AeroS acoplado ao equipamento. Os resultados correspondem à média de 6 medições, com variação inferior a 1% entre elas.

DOSAGEM DAS PASTAS

A dosagem das pastas cimentícias foi definida com base na massa específica do cimento Portland CP V-ARI (3,14 g/cm³) e do dregs, adotando-se equivalência volumétrica entre os sólidos e a relação água/sólidos constante. Foram realizadas duas campanhas experimentais, com quatro formulações em cada etapa, conforme Tabela 1.

Na primeira etapa, utilizou-se 10% de substituição do cimento Portland por dregs, variando-se o tempo de moagem do resíduo (5, 10 e 15 min), além da inclusão da mistura de referência, para avaliar a cinética de hidratação. Na segunda etapa, selecionou-se o tempo de moagem de 15 min, em função do melhor desempenho, sendo então avaliados teores de substituição de 8%, 12% e 16%, a fim de investigar a influência do teor incorporado na cinética de hidratação. As pastas cimentícias foram preparadas utilizando água deionizada. As composições das misturas estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Dosagem das pastas. Etapa 1: Estudo da influência da moagem. Etapa 2: Estudo da influência do teor de dregs.

Mistura	Etapa	Moagem (min)	Teor de dregs (% vol)	Teor de CP V (% vol)	Água/sólidos
REF DREGS	1	-	0	100	0,5
D5	1	5	10	90	0,5
D10	1	10	10	90	0,5
D15	1	15	10	90	0,5
REF DREGS	2	-	0	100	0,5
D8	2	15	8	92	0,5
D12	2	15	12	88	0,5
D16	2	15	16	85	0,5

Fonte: o autor.

CALORIMETRIA ISOTÉRMICA

A calorimetria isotérmica foi empregada para avaliar a cinética de hidratação das pastas. Os materiais sólidos foram homogeneizados com água e submetidos à mistura em misturador automático (Vich Lab), por 2 min, a 580rpm. Foi utilizado pó de quartzo como amostra de referência. Os ensaios foram conduzidos por 72 h em calorímetro TAM Air, à 25 °C, conforme a ASTM C1679[13]. A partir da derivada da curva de fluxo de calor (dq/dt), determinaram-se os tempos de início e fim de pega e o instante de depleção de sulfato[14].

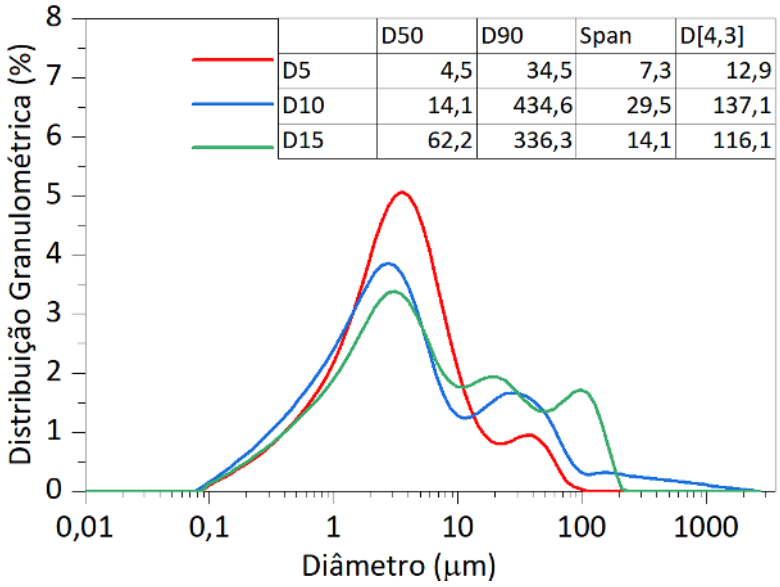
RESULTADOS

GRANULOMETRIA A LASER DO dregs COM DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM

A análise conjunta do diâmetro mediano (D50), diâmetro médio volumétrico (D[4,3]) e das curvas granulométricas evidencia alterações com o aumento do tempo de moagem (Figura 2). Observa-se incremento do D50 de 4,5µm (D5) para 14,1µm (D10) e 62,2µm (D15), indicando deslocamento para diâmetros maiores. De forma consistente, o D[4,3] aumenta de 12,9µm em D5 para 137,1µm em D10, com leve redução em D15 (116,1µm), permanecendo elevado e evidenciando a forte influência de partículas de grande volume, associadas à formação de aglomerados. As curvas corroboram esses resultados, mostrando alargamento da distribuição, desenvolvimento de cauda para maiores diâmetros e comportamento multimodal na amostra D15. Em conjunto, esses resultados indicam que a fragmentação das partículas é acompanhada por reaglomeração, especialmente nas amostras com maior tempo de moagem.

Mesmo com o uso de propilenoglicol, a formação de aglomerados indica dispersão insuficiente para impedir as interações entre partículas finas. Em materiais de elevada finura, forças intermoleculares, cargas eletrostáticas e umidade residual favorecem a reaglomeração[15]. Dessa forma, embora a moagem promova a fragmentação das partículas, parte desse efeito é compensada pela formação de aglomerados, resultando maiores diâmetros equivalentes e evidenciando a atuação simultânea dos mecanismos de cominuição e reaglomeração[16].

Figura 2. Curvas e parâmetros granulométricos do dregs em diferentes tempos de moagem (5, 10 e 15 minutos).



	D50	D90	Span	D[4,3]
D5	4,5	34,5	7,3	12,9
D10	14,1	434,6	29,5	137,1
D15	62,2	336,3	14,1	116,1

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MOAGEM DO DREGS NA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO

A Figura 3 evidencia que o tempo de moagem do dregs influenciou a cinética de hidratação. Considerando que o resíduo é majoritariamente composto por calcita, seu comportamento pode ser associado tanto ao efeito fíler quanto à atuação como superfície de nucleação para os produtos hidratados, além de possíveis interações com as fases aluminadas do cimento[17].

No fluxo de calor (Figura 3a), todas as misturas apresentaram comportamento característico de sistemas à base de cimento Portland, com estágio inicial de dissolução, período de indução e pico principal relacionado à hidratação dos silicatos e formação de C-S-H e portlandita, seguido pela depleção de sulfatos e hidratação dos aluminatos remanescentes[18]. As misturas contendo dregs moído por 5 minutos (2,44 mW/$g_{cimento}$) e 10 minutos (2,50 mW/$g_{cimento}$) apresentaram menor intensidade do pico principal em relação à referência (2,80 mW/$g_{cimento}$), indicando redução da taxa de hidratação inicial, podendo ser atribuído ao efeito de diluição e à menor eficiência física do resíduo[19]. Em contrapartida, a amostra D15 (2,82 mW/$g_{cimento}$) apresentou pico máximo equivalente ao da pasta REF (Figura 3), evidenciando a contribuição da calcita presente no dregs, favorecendo a nucleação heterogênea e o desenvolvimento das reações iniciais[19]. Observa-se a antecipação da depleção de sulfatos com o aumento do tempo de moagem, principalmente para D15 (10,74 h), associado a presença de calcita, que pode interagir com as fases de aluminatos do cimento e favorecer a formação de carboaluminatos hidratados[19].

Figura 3: Calorimetria isotérmica das pastas cimentícias. (a) Fluxo de calor; e (b) Calor acumulado ao longo de 72 h de hidratação.

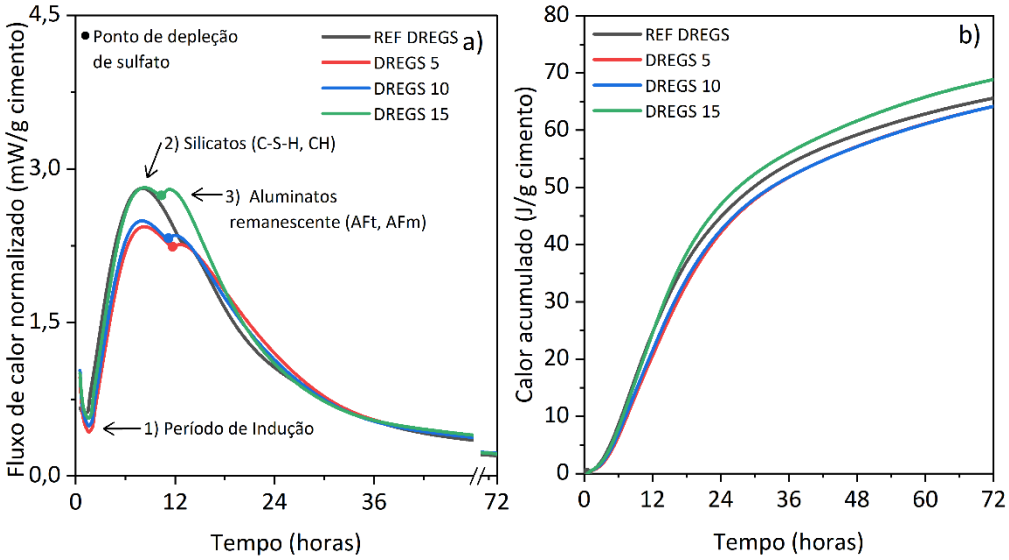


Tabela 2: Parâmetros de hidratação obtidos por calorimetria isotérmica das pastas contendo 10% de dregs em diferentes tempos de moagem (5, 10 e 15 minutos).

Parâmetros	REF	D5	D10	D15
Início de pega* (h)	4,26	5,79	5,58	5,15
Fim de pega* (h)	8,06	8,21	7,97	8,29
Tempo de pega* (h)	3,80	2,42	2,39	3,14
Depleção de sulfatos (h)	13,17	12,08	11,52	10,74
Fluxo máximo de calor (mW g^{-1} $_{cimento}$)	2,81	2,44	2,50	2,82
Calor acumulado em 24 h (J g^{-1} $_{cimento}$)	44,84	42,08	42,52	46,98
Calor acumulado em 48 h (J g^{-1} $_{cimento}$)	59,21	57,17	57,13	61,63
Calor acumulado em 72 h (J g^{-1} $_{cimento}$)	65,61	64,19	64,18	68,88

No calor acumulado (Figura 3b), a amostra D15 apresentou os maiores valores, superando a referência a partir de 24 h e atingindo 68,88 J/$g_{cimento}$ em 72 h, em comparação a 65,61 J/$g_{cimento}$ da amostra REF. As amostras D5 e D10 permaneceram inferiores, indicando menor avanço da hidratação nas primeiras idades (Tabela 2).

Embora a análise granulométrica indique maior tamanho aparente para D15, sua maior liberação de calor sugere que esse parâmetro não representa isoladamente o comportamento em meio aquoso, uma vez que aglomerados podem se dispersar durante a mistura, expondo superfícies finas e intensificando o efeito de nucleação da calcita[19]. A Tabela 2 confirma essas tendências, evidenciando aumento do início de pega para todas as misturas com dregs, com menor retardo para D15 (5,15 h), indicando maior reatividade associada ao maior tempo de moagem (15 min). O resultado indica influência moderada da finura no balanço sulfato-aluminato, associada à maior área superficial da calcita[20].

Os resultados demonstram que o beneficiamento mecânico alterou significativamente o desempenho do dregs em pastas cimentícias. A moagem por 15 minutos

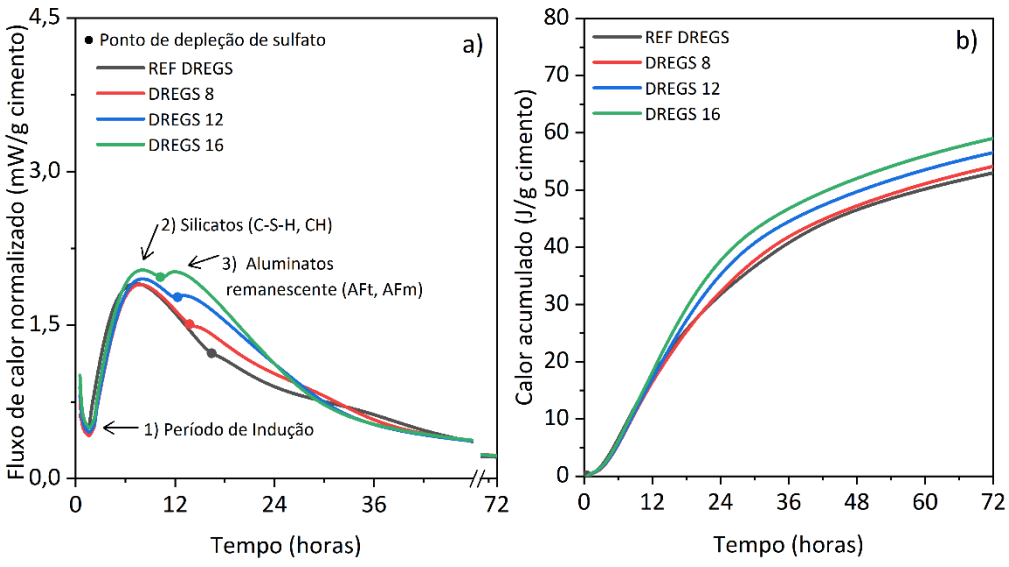
proporcionou maior reatividade inicial e calor liberado, indicando que o refinamento do resíduo ampliou o potencial de atuação como MCS.

INFLUÊNCIA DO TEOR NA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO

A Figura 4a apresenta as curvas de fluxo de calor ao longo de 72 h de hidratação para diferentes teores de substituição por dregs. Todas as misturas exibem comportamento típico de sistemas cimentícios, com período inicial, período de indução e posterior aceleração. O aumento do teor de dregs não altera significativamente a indução, indicando pouca influência na fase inicial da hidratação. Contudo, à medida que o teor de substituição aumenta, verifica-se modificação nos picos associado à formação de C-S-H e CH, sugerindo maior taxa de reação e prolongamento de hidratação[19]. Para o teor mais elevado (16%), observa-se um aumento do pico principal e leve antecipação do processo. Além disso, nota-se uma modificação no pico associado às reações dos aluminatos (Aft/Afm) e nos pontos de depleção, indicando que o teor adicionado pode interferir nas reações que envolvem sulfatos e que a substituição afeta a cinética das reações envolvendo C_3A[17].

Na Figura 4b, observa-se que todas as misturas com dregs apresentaram valores superiores à referência ao longo do período analisado, sendo esse efeito mais evidente com o aumento do teor de substituição. Esse comportamento pode ser atribuído à maior finura do material e ao efeito filler, que aumentam a área de reação e favorecem a hidratação do cimento[17].

Figura 4: Calorimetria isotérmica das pastas das pastas com diferentes teores de dregs (8, 12 e 16%) (a) fluxo de calor normalizado; (b) calor acumulado em 72 h



Os parâmetros de calorimetria reforçam as tendências observadas nas curvas de fluxo de calor e calor acumulado, evidenciando a influência do teor de dregs na cinética de hidratação (Tabela 3). O fluxo máximo de calor aumenta com o teor de substituição, atingindo 2,04 $mW/g_{cimento}$ para 16% de dregs, sugerindo intensificação das reações iniciais de hidratação, podendo ser atribuído à maior área superficial e ao efeito de nucleação das partículas finas. Os valores de calor acumulado obtiveram um aumento

contínuo com o teor de dregs em todas as idades analisadas (24, 48 e 72 h). O tempo de depleção de sulfatos é significativamente antecipado com o aumento do teor de dregs, passando de 16,76 h (referência) para 10,99 h (16%). Esse comportamento indica aceleração das reações envolvendo aluminatos, possivelmente associada à presença de carbonatos, que modificam o equilíbrio das fases AFt e AFm[19].

Tabela 3: Parâmetros de hidratação obtidos por Calorimetria Isotérmica das pastas com diferentes teores de dregs (8, 12 e 16%) moído por 15 minutos

Parâmetros	REF	D8	D12	D16
Início de pega* (h)	5,10	6,12	5,84	5,40
Fim de pega* (h)	7,28	7,75	8,07	8,08
Tempo de pega* (h)	2,17	1,63	2,23	2,68
Depleção de sulfatos (h)	16,76	14,45	12,48	10,99
Fluxo máximo de calor (mW g^{-1} $_{cimento}$)	1,91	1,90	1,95	2,04
Calor acumulado em 24 h (J g^{-1} $_{cimento}$)	31,74	32,23	35,20	37,66
Calor acumulado em 48 h (J g^{-1} $_{cimento}$)	46,55	47,25	49,71	52,05
Calor acumulado em 72 h (J g^{-1} $_{cimento}$)	53,01	54,16	56,56	59,04

A antecipação da depleção de sulfatos nas misturas com dregs está associada principalmente à elevada presença de calcita, capaz de modificar as reações das fases aluminadas e o balanço sulfato-aluminato do sistema. Adicionalmente, a aceleração da hidratação inicial e a maior formação de C-S-H podem contribuir secundariamente para esse comportamento, uma vez que as superfícies do C-S-H apresentam capacidade de adsorção de íons sulfato, reduzindo sua concentração na solução dos poros[18][21].

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, destacam-se as seguintes conclusões:

- O aumento do tempo de moagem do dregs não promoveu redução progressiva do tamanho de partícula, sendo observada formação de aglomerados, especialmente nas amostras com maiores tempos de moagem, 10 e 15 minutos.
- No sistema contendo 10% de *dregs*, a moagem influenciou a cinética de hidratação, promovendo antecipação moderada da depleção de sulfatos. Entre as condições avaliadas, o tempo de 15 min apresentou o melhor desempenho, com fluxo máximo de calor equivalente ao da referência e maior calor acumulado em 72 h;
- O aumento do teor de *dregs* (8–16%) nas pastas elevou o fluxo máximo de calor, o calor acumulado e antecipou a depleção de sulfatos, demonstrando efeito mais pronunciado da quantidade incorporada em comparação à finura do resíduo;

- Para as condições investigadas, os resultados indicam potencial do *dregs*, resíduo rico em calcita, como material cimentício suplementar em matrizes à base de cimento, principalmente após beneficiamento por moagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFSB e à UFBA, em especial ao Laboratório de Cimentação (LABCIM), pelo suporte técnico e científico. Agradecem, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de iniciação científica e de produtividade em pesquisa ao autor J.P.G.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, a primeira e a segunda autoras utilizaram o ChatGPT-5.5 e o Gemini 2.5 Flash para revisão textual. Após a utilização dessas ferramentas, todos os autores revisaram e editaram o conteúdo e assumem total responsabilidade pelo artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, e E. M. Gartner, “Sustainable development and climate change initiatives”, *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 2, p. 115–127, fev. 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008.

[2] C. M. M. E. Torres, C. M. Silva, L. G. Pedroti, W. E. H. Fernandes, F. C. Ballotin, e A. J. V. Zanuncio, “Dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to Portland cement clinker”, *J Mater Cycles Waste Manag*, v. 22, n. 3, p. 851–861, maio 2020, doi: 10.1007/s10163-020-00983-x.

[3] J. Falcão, R. Melo, A. Masuero, e D. Dal Molin, “Influence of Dregs Waste on the Alkali–Silica Reaction: A Comparative Analysis among Different Types of Cement”, *Sustainability*, v. 16, n. 19, p. 8610, out. 2024, doi: 10.3390/su16198610.

[4] Y. Oliveira, “Uso dos resíduos do processo kraft de celulose – dregs e grits – como adição mineral na produção de matrizes cimentícias.”, Universidade Federal de Uberlândia, 2022. doi: 10.14393/ufu.di.2022.477.

[5] Y. S. D. Oliveira, E. B. C. Costa, e L. A. D. C. Motta, “Uso de dregs e grits em substituição parcial ao cimento: caracterização e resistência mecânica”, *Ambient. constr.*, v. 24, p. e126044, dez. 2024, doi: 10.1590/s1678-86212024000100720.

[6] R. V. Eleutério, L. Simão, P. Lemes, e D. Hotza, “Evaluation of As-Received Green Liquor Dregs and Biomass Ash Residues from a Pulp and Paper Industry as Raw Materials for Geopolymers”, *Minerals*, v. 13, n. 9, p. 1158, ago. 2023, doi: 10.3390/min13091158.

[7] E. Mache, M. Rajczakowska, e A. Cwirzen, “Process Residues in Cement Clinker Production: A Review”, *Waste Management Bulletin*, v. 3, n. 3, p. 100205, set. 2025, doi: 10.1016/j.wmb.2025.100205.

[8] M. J. Quina e C. T. Pinheiro, “Inorganic Waste Generated in Kraft Pulp Mills: The Transition from Landfill to Industrial Applications”, *Applied Sciences*, v. 10, n. 7, p. 2317, mar. 2020, doi: 10.3390/app10072317.

[9] J. Rasmus, E. Adesanya, H. S. Santos, K. Kilpimaa, e M. Illikainen, "Effects of thermal treatment on the characteristics of pulp mill residue", *Journal of Environmental Management*, v. 351, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119793.

[10] ABNT, "NBR 8952 - Coleta e preparação de amostras de materiais pozolânicos". 1992.

[11] A. Altomare, C. Cuocci, C. Giacovazzo, A. Moliterni, e R. Rizzi, "*QUALX* : a computer program for qualitative analysis using powder diffraction data", *J Appl Crystallogr*, v. 41, n. 4, p. 815–817, ago. 2008, doi: 10.1107/S0021889808016956.

[12] "nbr_nm248_2003".

[13] C09 Committee, *Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry*. doi: 10.1520/C1679-17.

[14] J. Hu, Z. Ge, e K. Wang, "Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times", *Construction and Building Materials*, v. 50, p. 657–663, jan. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.011.

[15] P. L. Guzzo, A. A. A. Tino, e J. B. Santos, "The onset of particle agglomeration during the dry ultrafine grinding of limestone in a planetary ball mill", *Powder Technology*, v. 284, p. 122–129, nov. 2015, doi: 10.1016/j.powtec.2015.06.050.

[16] I. Tole, K. Habermehl-Cwirzen, e A. Cwirzen, "Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders – review", *Miner Petrol*, v. 113, n. 4, p. 449–462, ago. 2019, doi: 10.1007/s00710-019-00666-y.

[17] L. G. Py, J. S. A. Neto, M. A. Longhi, e A. P. Kirchheim, "Evaluation of ultrafine calcined clays on LC3 cements on the sulfate requirement, water demand and strength development", *Mater Struct*, v. 57, n. 1, p. 13, fev. 2024, doi: 10.1617/s11527-023-02288-5.

[18] J. D. S. Andrade Neto, A. G. De La Torre, e A. P. Kirchheim, "Effects of sulfates on the hydration of Portland cement – A review", *Construction and Building Materials*, v. 279, p. 122428, abr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122428.

[19] J. Sun, F. Zunino, e K. Scrivener, "Hydration and phase assemblage of limestone calcined clay cements (LC3) with clinker content below 50 %", *Cement and Concrete Research*, v. 177, p. 107417, mar. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2023.107417.

[20] A. Morales-Cantero *et al.*, "Enhancing fluidity and mechanical properties in Limestone Calcined Clay cements with one-third Portland clinker content", *Journal of Building Engineering*, v. 95, p. 110334, out. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.110334.

[21] M. H. G. De Medeiros, S. R. C. Matos, A. Zini, T. Y. Dessuy, E. D. Rodriguez, e A. P. Kirchheim, "Otimização do teor de sulfato em cimento LC^3 produzido com caulim flint", apresentado em XIX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Canela-RS, Brasil, nov. 2022, p. 1–14. doi: 10.46421/entac.v19i1.2191.