



INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND PRODUZIDAS COM FÍLER DE CASCAS DE OVOS

Tema: Tecnologia dos Materiais.

Grupo: 1

ARTUR SPAT RUVIARO¹, LAURA SILVESTRO², HENRIQUE ALMEIDA SANTANA³, GEANNINA
TEREZINHA DOS SANTOS LIMA⁴, FERNANDO PELISSER⁵

¹Doutorando, Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC, arturspatruviaro@gmail.com

²Profa. Dra, Universidade Tecnológica Federal do Paraná/UTFPR, laurasilvestro@utfpr.edu.br

³Doutorando, Universidade Federal da Bahia/UFBA, almeidahen@gmail.com

⁴Doutoranda, Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC, geanninasantos@hotmail.com

⁵Prof. Dr, Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC, pelisser@hotmail.com

RESUMO

Resíduos industriais e agrícolas têm sido explorados para incorporação em matrizes cimentícias, para redução do fator clínquer. Dessa forma, foi produzido fíler a partir de resíduos de casca de ovos (FCO) para substituir parcialmente (0-15%) o cimento Portland (CP) para produção de pastas. De maneira geral, a viscosidade, as tensões de escoamento estática e dinâmica aumentaram, em contrapartida, o calor total acumulado e a resistência à compressão reduziram, com o aumento dos teores de substituição. As emissões equivalentes totais reduziram em até 13% com 15% de FCO contribuindo para produção de cimentos eco eficientes.

Palavras-chave: reologia, cinética de hidratação, resíduo agroindustrial, análise ambiental.

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT PASTE PRODUCED WITH EGGSHELL FILLER

ABSTRACT

To reduce the clinker factor, industrial and agricultural waste have been explored for incorporation in cement matrices. In this way, filler was produced from eggshell waste (ESF) to partially replace (0-15%) Portland cement (PC) to produce pastes. In general, the viscosity and static and dynamic yield stress increased; on the other hand, the total heat accumulated, and the compressive strength reduced with the increase of substitution contents. Total equivalent emissions were reduced by up to 13%, with 15% ESF contributing to the production of eco-efficient cements.

Key-words: rheology, hydration kinetics, agro-industrial waste, environmental analysis.



1. INTRODUÇÃO

Versáteis, baixo custo e consumo de energia, materiais à base de cimento Portland, como concretos e argamassas, são de fácil manuseio e permitem a construção de formas complexas e obras arrojadas. Nos últimos 65 anos, a quantidade de cimento produzida aumentou cerca de 34 vezes, enquanto a população aumentou menos de 3 vezes⁽¹⁾. A indústria cimenteira é altamente emissora de CO₂, sendo responsável por aproximadamente 25% das emissões industriais globais⁽²⁾.

Nas últimas décadas, muitos materiais cimentícios suplementares tem sido utilizado para redução do teor de clínquer, como por exemplo, escória de alto forno e cinza volante, porém representam apenas 20% da produção mundial de cimento e os mais adequados para incorporação em matrizes cimentícias já estão sendo utilizados⁽¹⁾. Dessa forma, resíduos industriais e agrícolas têm sido explorados para incorporação em matrizes cimentícias, reduzindo o fator clínquer, que é a alternativa mais promissora para redução dos gases de efeito estufa, a curto prazo, atrelados a produção do cimento.

Segundo Yang *et al.*⁽³⁾, os resíduos de casca de ovo estão entre os resíduos agrícolas abundantes descartados pelas indústrias de processamento de alimentos. Apesar das propriedades excepcionais e das diversas aplicações, a casca do ovo é descartada em grande quantidade sem qualquer uso posterior, resultando em sérios problemas ambientais e de saúde humana⁽⁴⁾. Estimativas indicam que até 2030 serão produzidas 10 milhões de toneladas de ovos⁽⁵⁾, suficientes para viabilizar o uso industrial. Estudos anteriores relataram que cascas de ovo podem ser efetivamente incorporadas em matrizes de cimento como um substituto parcial para cimento Portland^(6–9), devido ao alto teor de CaCO₃.

Assim, este trabalho investigou a viabilidade técnica e ambiental de produzir pastas de cimento com teores de substituição de cimento Portland por casca de ovo (0 - 15% em



massa). Foram avaliadas a cinética de hidratação, propriedades reológicas, resistência à compressão, microestrutura e emissões equivalentes de CO₂.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

As composições das pastas produzidas são detalhadas na Tabela 1. As substituições de cimento Portland por fíler produzido a partir de cascas de ovos, foram de 5, 10 e 15%, em massa. O programa experimental é apresentado na Figura 1 (CP: cimento Portland e FCO: fíler de cascas de ovos). O mini *slump*⁽¹⁰⁾ foi fixado em 95 ± 5 mm, variando o teor de aditivo superplastificante (MC-PowerFlow4000) mantendo a trabalhabilidade semelhante a REF.

Tabela 1 – Composições avaliadas, percentual de SP e resultados do ensaio de mini slump.

| | Cimento | FCO | Água/MCS | % SP | Mini slump (mm) |
|-----|---------|------|----------|-------|-----------------|
| REF | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,025 | 95 |
| F5 | 0,95 | 0,05 | 0,50 | 0,025 | 94 |
| F10 | 0,90 | 0,10 | 0,50 | 0,025 | 93 |
| F15 | 0,85 | 0,15 | 0,50 | 0,040 | 95 |

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

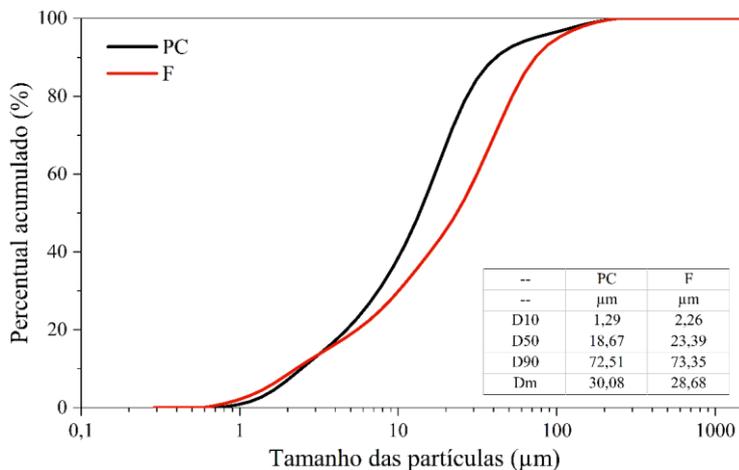
A caracterização química e física dos materiais anidros utilizados é apresentada na Tabela 2. O cimento utilizado foi um CPV-ARI, em conformidade com a NBR 16697⁽¹¹⁾. Para produção do fíler, inicialmente as cascas de ovos foram lavadas, secas em estufa por 24 horas (105 ± 5 °C) e posteriormente moída em moinho de bolas por 2 horas em lotes de 9 kg. A granulometria a laser, via seca, é apresentada na Figura 1.



Tabela 3– Composição química e física dos materiais.

| | PC | FCO |
|--------------------------------------------|-------|-------|
| Composição química (%) | | |
| Al ₂ O ₃ | 4,40 | - |
| SiO ₂ | 18,62 | - |
| Fe ₂ O ₃ | 3,00 | 0,05 |
| CaO | 61,24 | 52,50 |
| MgO | 3,80 | - |
| SO ₃ | 3,08 | 0,44 |
| K ₂ O | - | 0,13 |
| MnO | - | - |
| TiO ₂ | - | - |
| P ₂ O ₅ | - | - |
| CuO | - | 0,04 |
| NiO | - | 0,02 |
| SrO | - | 0,33 |
| Perda ao fogo | | |
| Cal livre | 3,41 | 46,5 |
| Resíduo insolúvel | 0,84 | - |
| Propriedades físicas | | |
| Massa específica (g/cm ³) | 0,97 | - |
| Área superficial - BET (m ² /g) | 2,08 | 2,48 |

Figura 1 – Granulometria do cimento e do filer produzido.



Fonte: Autores.



3.2. Métodos

A cinética de hidratação foi avaliada por calorimetria isotérmica (calorímetro TAM Air, TA Instruments). Após o preparo da amostra, cerca de 10 g de pasta foram colocados no recipiente do calorímetro. A temperatura foi mantida a 23 °C e as medições foram registradas por 50 horas. Os dados foram normalizados pela massa de materiais anidros (CP+FCO).

Os ensaios de reometria rotacional foram realizados em amostras com 25 ml a 23 °C em um reômetro *Haake MARS III (Thermo Fisher Scientific)* usando uma geometria do tipo *vane*. A rotina para obtenção das curvas de fluxo e as equações para determinação da viscosidade equivalente e da tensão de escoamento dinâmico podem ser verificadas em Ruviano *et al.*⁽¹²⁾. A tensão de escoamento dinâmico foi calculada ajustando a curva de fluxo descendente, através do modelo de *Herschel-Bulkley*. Por fim, foi calculado o índice de tixotropia (IT) de acordo com Muzenda *et al.*⁽¹³⁾.

As análises termogravimétricas foram realizadas no equipamento SDT Q600 (TA Instruments), com taxa de aquecimento de 20 °C/min e fluxo de nitrogênio de 100 ml/min ensaiados nas idades de 1, 7, 28 e 91 dias. Para interromper os processos de hidratação, as amostras foram imersas em nitrogênio líquido e colocadas no liofilizador para remover a água livre⁽¹⁴⁾.

Para determinação da resistência à compressão das pastas, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos (\varnothing 24 mm x h 28 mm) de acordo com ASTM C1231⁽¹⁵⁾ ensaiados nas idades de 1, 3, 7, 28, 91 e 730 dias de hidratação. Desmoldados 24h após a moldagem, os corpos de prova permaneceram submersos em água até a idade de ensaio.

As emissões equivalentes de CO₂ (ECO_{2-eq}) por metro cúbico de pasta produzida foram estimadas. Para tanto, foram consideradas as ECO_{2-eq} por kg de cada material utilizado por



metro cúbico de pasta. Os dados utilizados, devidamente referenciados, são apresentados na Tabela 4. Para o aditivo superplastificante é de 0,0052 CO_{2-eq}/L⁽¹⁶⁾. Considerando a densidade do aditivo utilizado (1,12 g/cm³), as emissões são de 0,0058 CO_{2-eq}/kg. Também foi calculado o índice de intensidade de CO₂ (CI), que corresponde à razão entre a emissão de CO_{2-eq} do material e sua resistência à compressão em uma determinada idade⁽¹⁷⁾.

Tabela 4 – Banco de dados utilizados para análise das ECO_{2-eq}.

| | Cimento | Fíler | Água | SP |
|---------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Cimento | 0,892 ⁽¹⁸⁾ | 0,122 ⁽¹⁹⁾ | 0,0008 ⁽²⁰⁾ | 0,0058 ⁽¹⁶⁾ |

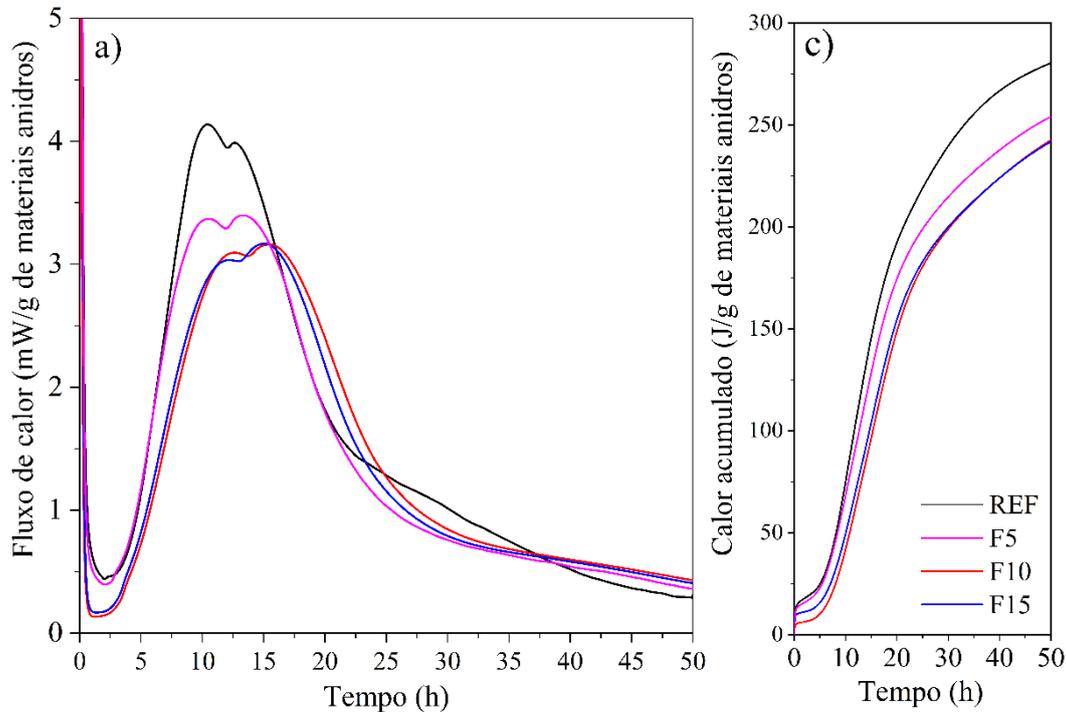
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Calorimetria

Na Figura 2, são apresentados os resultados do ensaio de calorimetria isotérmica. Os valores foram normalizados para a massa de materiais anidros. Analisando os resultados, com o aumento da substituição do CP por FCO, há redução no fluxo de calor e no calor total acumulado. Tal comportamento, está relacionado a granulometria do FCO que é ligeiramente superior em relação ao CP (Figura 1). A substituição do cimento por qualquer nível de FCO reduziu significativamente o período de indução, o que pode ser explicado pelo efeito fíler, ou seja, a superfície adicional fornecida pelo material residual para a nucleação e crescimento de produtos hidratados. Os resultados de calor total acumulado, corroboram com os resultados de resistência a compressão. Quanto menor o calor total acumulado, menor os resultados de resistência a compressão.



Figura 2 – Calorimetria isotérmica: fluxo de calor (a) e calor total acumulado (b).



Fonte: Autores.

4.2. Reologia

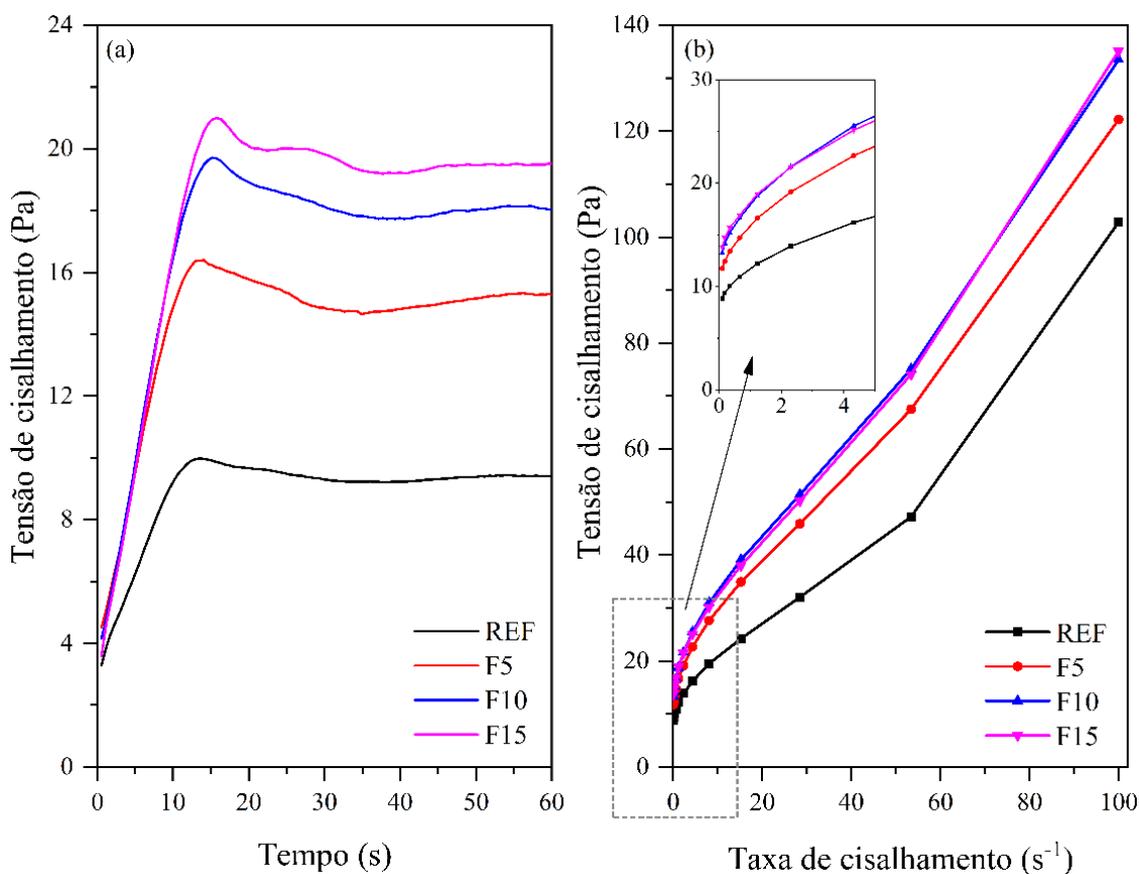
A Figura 3-a mostra a tensão de cisalhamento *versus* tempo para determinação da tensão de escoamento estática, enquanto a Figura 3-b mostra o comportamento das curvas de tensão de cisalhamento descendente *versus* taxa de cisalhamento usadas no ajuste de *Herschel-Bulkley*.

Mesmo o *mini slump* sendo mantido constante (Figura 4-b), as propriedades físicas e químicas dos FCO causaram variações na tensão de escoamento e na viscosidade das pastas de cimento. Os valores de tensão de escoamento estática (Figura 4-a), tensão de escoamento dinâmica (Figura 4-c) e viscosidade (Figura 4-d), aumentam com o aumento do teor de substituição de FCO. Como a densidade FCO é menor que a do PC, a substituição em



massa resulta em maior concentração de sólidos em volume, aumentando progressivamente os parâmetros reológicos das pastas de cimento com o aumento do teor de substituição do CP por materiais cimentícios suplementares⁽²¹⁾.

Figura 3 – Curvas tensão de cisalhamento x tempo (a) e tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento (b) das pastas.



Fonte: Autores.

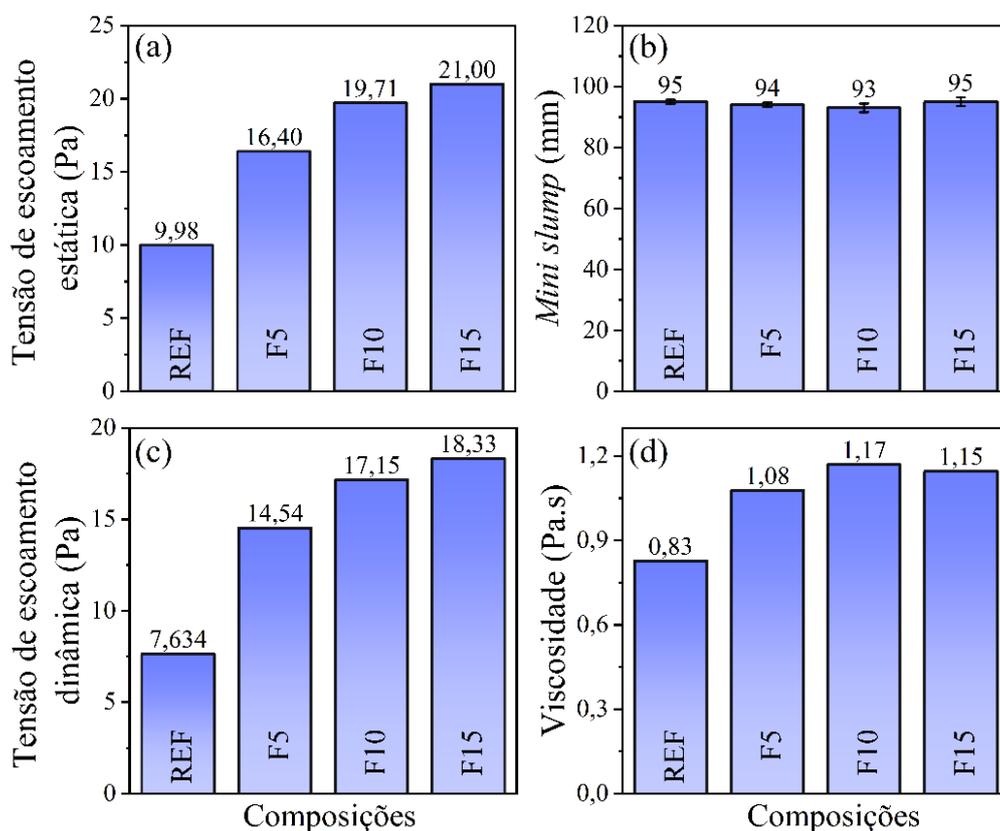
A Tabela 5 apresenta os resultados do índice de tixotropia (IT). Muzenda *et al.*⁽¹³⁾ relataram, quanto maior o índice de tixotropia, maior o grau de tixotropia, de quebra estrutural e de recuperação do material. Os resultados da Tabela 5 mostram o crescimento da tixotropia com o aumento dos percentuais de FCO.



Tabela 5 – Resultados dos índices de tixotropia (TI).

| Composições | Índice de tixotropia (adimensional) |
|-------------|-------------------------------------|
| REF | 8,98 |
| F5 | 15,40 |
| F10 | 18,71 |
| F15 | 20,0 |

Figura 4 – Propriedades reológicas das pastas. Tensão de escoamento estática (a), mini slump (b), tensão de escoamento dinâmica (c) e viscosidade (d).



Fonte: Autores.



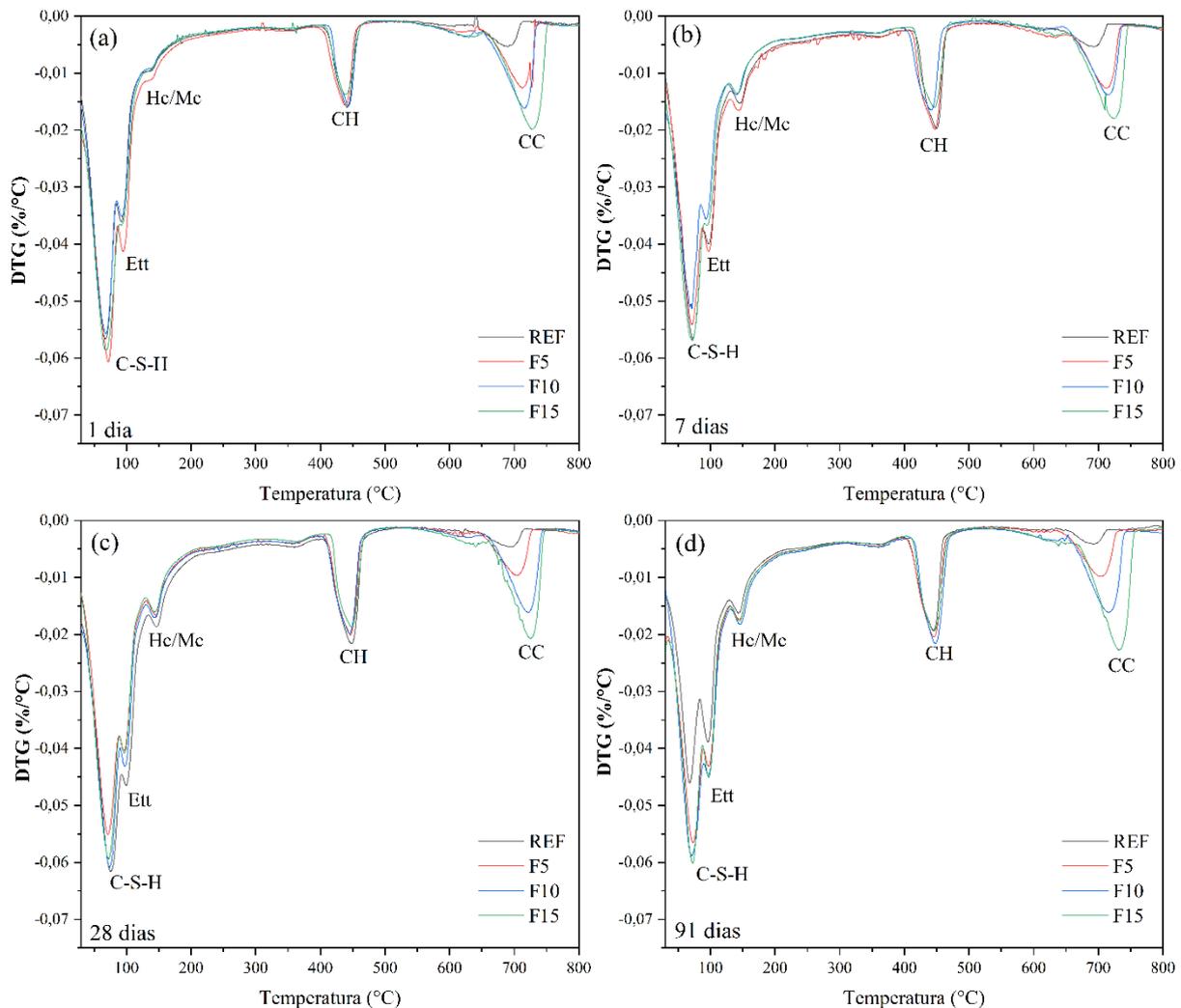
4.3. Análise termogravimétrica

Na Figura 5, são apresentados os resultados dos ensaios de termogravimétricos. Com relação aos percentuais de C-S-H e E_{tt}, não há muita variação entre as composições e em diferentes idades. Quando comparados à REF, são ligeiramente inferiores pois parte do cimento foi substituído por fíler, reduzindo a quantidade de C-S-H e E_{tt} formados. Como as substituições foram de no máximo 15%, pequenas foram as reduções. Quanto aos percentuais de H_c/M_c, na idade de 1 dia, não ocorreram todas as reações de formação desses componentes. A partir de 7 dias, há uma estabilização, pois os H_c/M_c formados são referentes a hidratação do cimento. Por exemplo, em cimentos a base de argila calcinada e fíler calcário, os percentuais de H_c/M_c são maiores em relação ao REF pois o calcário reage com a argila calcinada formando expressivas quantidades de H_c/M_c⁽²²⁾.

Quanto as quantidades de CH, há uma pequena redução para as composições com FCO, pois a quantidade de cimento foi reduzida, conseqüentemente, a quantidade de CH também. Destaca-se que o fíler não possui atividade pozolânica, pois com o avanço da hidratação o teor de CH permanece constante. Diferentemente, em materiais pozolânicos, que o CH é consumido, formando C-S-H adicional⁽²³⁾. Por fim, considerando que o FCO é composto por, aproximadamente, 95% de carbonato de cálcio, quando o CP é substituído por fíler, maiores serão os percentuais de CC nas composições.



Figura 5 – Resultados dos ensaios termogravimétricos para as idades de 1, 7, 28 e 91 dias. CH: portlandita, CC: carbonato de cálcio, Hc: hemicarbonato de cálcio, Mc: monocarbonato de cálcio, Ett: Etringita, C-S-H: silicato de cálcio hidratado.



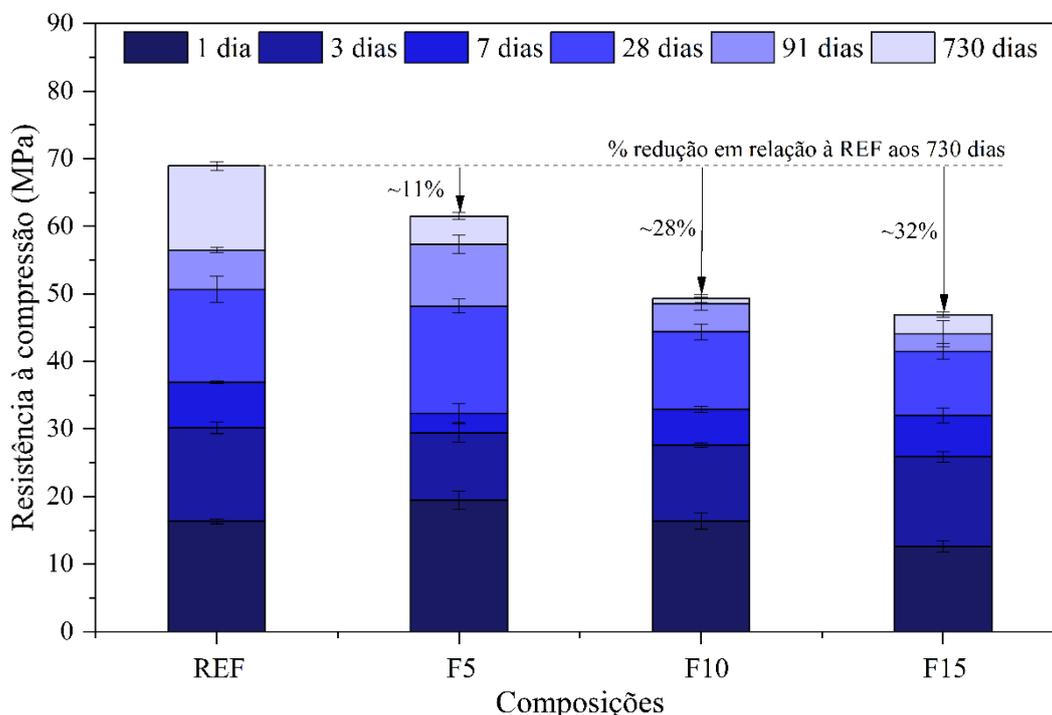
Fonte: Autores.

4.4. Resistência à compressão

Na Figura 6, são apresentados os resultados de resistência a compressão. De maneira geral, com o aumento do percentual de substituição, menores foram as resistências mecânicas. Corroborando com os resultados de calorimetria, como o FCO apresenta partículas maiores

em relação ao CP, não ocorreu o efeito fíler, reduzindo a quantidade de produtos hidratados, consequentemente, o desempenho mecânico. Destaque para o desenvolvimento da resistência a compressão entre as idades de 91 e 730 dias. Enquanto a mistura REF, cresceu 12,4 MPa a F10 menos que 1MPa no mesmo período. Possivelmente, quanto maiores os percentuais de substituição, menores as quantidades de CP para reagirem em idades posteriores. Nota-se que a diferença entre F5 e F10 é muito maior em relação a F10 e F15 que apresentaram comportamento muito semelhante na calorimetria, reologia, análise termogravimétrica e agora na resistência à compressão. Segundo Pliya e Cree⁽²⁴⁾, a variabilidade da morfologia das partículas de FCO e distribuição granulométrica é uma das razões para a redução da resistência dos materiais cimentícios associada à substituição do cimento por FCO, que é dependente do processo de produção.

Figura 6 – Desenvolvimento da resistência a compressão com a evolução da hidratação.



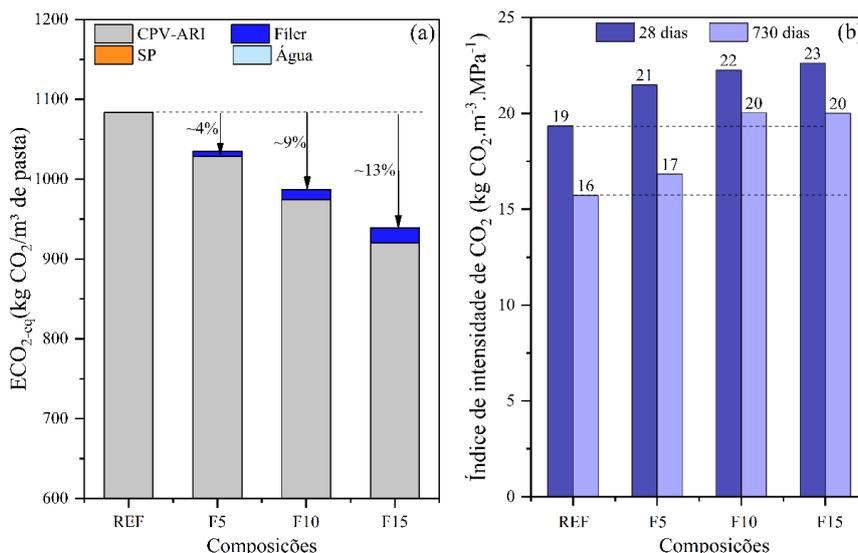
Fonte: Autores.



4.5. Emissões equivalentes de CO₂

Na Figura 7-a são apresentados os resultados de emissões equivalentes de CO₂/m³ de pasta e na Figura 7-b os índices de intensidade de CO₂ (IIC) que permite comparar, por exemplo, diferentes composições, percentuais de substituição, materiais e matrizes cimentícias. As reduções das emissões equivalentes totais por m³ de pasta foram de 4%, 9% e 13%, respectivamente, para F5, F10 e F15, em relação a REF. Essas reduções foram possíveis devido ao simples processo de beneficiamento para produção do FCO, e reduzido gasto energético para produção, quando comparado ao CP que necessita de tratamento térmico (calcinação) para produção com elevado gasto energético. Analisando os IICs, para idade de 730 dias para as composições F10 e F15, foram superiores em 4 kg.CO₂.m⁻³.MPa⁻¹, em relação a REF devido ao melhor desempenho mecânico da composição REF. Mesmo assim, deve-se levar em consideração que quando as cascas de ovos são deixadas em aterros por longos períodos de tempo sem tratamento adequado, causam danos graves ao ecossistema circundante e desencadeiam alergias específicas⁽⁴⁾.

Figura 7 – Resultados: emissões equivalentes totais de CO₂ (a) e índices de intensidade de CO₂ (b).



Fonte: Autores.



5. CONCLUSÕES

Este estudo investigou a influência da substituição parcial do cimento Portland por filer de casca de ovo na produção de pastas de cimento. As principais conclusões são:

- Quanto as propriedades de um modo geral, em relação a REF, ocorreram pequenas variações para percentuais de até 5% de substituição, e foram mais acentuadas para percentuais entre 10-15%. Ainda, as variações foram pequenas quando comparadas as composições com 10 e 15% de substituição.
- Quanto as propriedades no estado fresco, o *mini slump* foi mantido constante variando o percentual de aditivo superplastificante, mesmo assim ocorreram aumentos na tensão de escoamento estática e dinâmica, viscosidade e dos índices tixotrópicos com aumento dos percentuais de substituição, devido a menor densidade específica do FCO em relação ao CP.
- A resistência a compressão foi afeta pelo tamanho e formato das partículas de FCO. As reduções para 5, 10 e 15% de FCO foram de 11, 28 e 32%.
- Através da análise termogravimétrica, foi possível acompanhar a formação dos produtos hidratados, bem como verificar a ausência de atividade pozolânica do FCO.
- Com relação as emissões equivalentes totais de CO₂, as reduções foram máximas, iguais a 13%, para composição com 15% de FCO.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradeceram às agências brasileiras de pesquisa (CNPq, CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC). Adicionalmente, a senhora Marinês Spat Ruviano pelo fornecimento das cascas de ovos para o desenvolvimento do trabalho.



7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 114, p. 2–26, 2018. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.015.
2. CHEN, Cuihong; XU, Ruochong; TONG, Dan; QIN, Xinying; CHENG, Jing; LIU, Jun; ZHENG, Bo; YAN, Liu; ZHANG, Qiang. A striking growth of CO₂ emissions from the global cement industry driven by new facilities in emerging countries. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 17, n. 4, p. 044007, 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/AC48B5. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac48b5>. Acesso em: 16 fev. 2023.
3. NGAYAKAMO, Blasius; ONWUALU, Azikiwe Peter. Recent advances in green processing technologies for valorisation of eggshell waste for sustainable construction materials. **Heliyon**, [S. l.], v. 8, n. 6, p. e09649, 2022. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09649. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09649>.
4. YANG, Dawei; ZHAO, Jiahui; AHMAD, Waqas; NASIR AMIN, Muhammad; ASLAM, Fahid; KHAN, Kaffayatullah; AHMAD, Ayaz. Potential use of waste eggshells in cement-based materials: A bibliographic analysis and review of the material properties. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 344, p. 128143, 2022. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128143.
5. GRZESZCZYK, Stefania; KUPKA, Teobald; KAŁAMARZ, Andrzej; SUDOŁ, Adam; JUROWSKI, Krystian; MAKIEIEVA, Natalina; OLEKSOWICZ, Krzysztof; WRZALIK, Roman. Characterization of eggshell as limestone replacement and its influence on properties of modified cement. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 319, p. 126006, 2022. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.126006.
6. ZAIN, Mohd Raizamzamani; OH, Chai Lian; LEE, Siong Wee. Investigations on



- rheological and mechanical properties of self-compacting concrete (SCC) containing 0.6 μm eggshell as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 303, n. September 2020, p. 124539, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124539.
7. OFUYATAN, Olatokunbo M.; ADENIYI, Adewale George; IJIE, David; IGHALO, Joshua O.; OLUWAFEMI, John. Development of high-performance self compacting concrete using eggshell powder and blast furnace slag as partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 256, p. 119403, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119403.
 8. TEARA, Ashraf; SHU ING, Doh. Mechanical properties of high strength concrete that replace cement partly by using fly ash and eggshell powder. **Physics and Chemistry of the Earth**, [S. l.], v. 120, n. October, p. 102942, 2020. DOI: 10.1016/j.pce.2020.102942.
 9. JABER, Hussein Alaa; MAHDI, Rawnaq Salahuddin; HASSAN, Ayad K. Influence of eggshell powder on the Portland cement mortar properties. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 20, p. 391–396, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.153.
 10. KANTRO, DL. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 95–102, 1980. DOI: 10.1520/CCA10190J. Disponível em: http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/CEMENT/PAGES/CCA10190J.htm. Acesso em: 21 set. 2021.
 11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. 2018.
 12. RUVIARO, Artur Spat; SILVESTRO, Laura; SCOLARO, Taylana Piccinini; DE MATOS, Paulo Ricardo; PELISSER, Fernando. Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 327, p. 129484, 2021. a. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129484.

-
13. MUZENDA, Tafadzwa Ronald; HOU, Pengkun; KAWASHIMA, Shiho; SUI, Tongbo; CHENG, Xin. The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 107, p. 103516, 2020. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103516.
14. SCRIVENER, Karen; SNELLINGS, Ruben; LOTHENBACH, Barbara. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1201/b19074.
15. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1231/C1231M: Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Cylindrical Concrete Specimens. [S. l.], 2015.
16. FLOWER, David J. M.; SANJAYAN, Jay G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. **The International Journal of Life Cycle Assessment** 2007 12:5, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 282–288, 2007. DOI: 10.1065/LCA2007.05.327. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2007.05.327>. Acesso em: 15 jul. 2021.
17. DAMINELI, Bruno L.; KEMEID, Fernanda M.; AGUIAR, Patricia S.; JOHN, Vanderley M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 32, n. 8, p. 555–562, 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009.
18. VOTORANTIM CIMENTOS. **EPD – Environmental Product Declaration: CP II E 40, CP III-40 RS and CP V-ARI**. [s.l: s.n.].
19. JHATIAL, Ashfaque Ahmed; GOH, Wan Inn; MASTOI, Aamir Khan; RAHMAN, Amirul Faiz; KAMARUDDIN, Sufian. Thermo-mechanical properties and sustainability analysis of newly developed eco-friendly structural foamed concrete by reusing palm oil fuel ash and eggshell powder as supplementary cementitious materials. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 28, n. 29, p. 38947–38968, 2021. DOI: 10.1007/S11356-021-13435-2/FIGURES/15. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-13435-2>. Acesso em: 8 dez. 2022.
20. LONG, Wu Jian; WU, Zhuorui; KHAYAT, Kamal H.; WEI, Jingjie; DONG, Biqin; XING,
-



-
- Feng; ZHANG, Jinrui. Design, dynamic performance and ecological efficiency of fiber-reinforced mortars with different binder systems: Ordinary Portland cement, limestone calcined clay cement and alkali-activated slag. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 337, p. 130478, 2022. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.130478.
21. RUVIARO, Artur Spat; LIMA, Geannina Terezinha Dos Santos; TABORDA-BARRAZA, Madeleine; SILVESTRO, Laura; ROCHA, Janaíde Cavalcante; DE BRITO, Jorge; GLEIZE, Philippe Jean Paul; PELISSER, Fernando. Characterization and investigation of the use of oat husk ash as supplementary cementitious material as partial replacement of Portland cement: Analysis of fresh and hardened properties and environmental assessment. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 363, n. November 2022, p. (In press), 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129762. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129762>.
22. ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 42, n. 12, p. 1579–1589, 2012. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2012.09.006.
23. RUVIARO, Artur Spat; SILVESTRO, Laura; SCOLARO, Taylana Piccinini; DE MATOS, Paulo Ricardo; PELISSER, Fernando. Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 327, p. 129484, 2021. a. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129484.
24. PLIYA, P.; CREE, D. Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 95, p. 1–9, 2015. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.07.103.