AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS E MECÂNICAS EM PASTAS COM USO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Evaluation of rheological and mechanical properties in pastes using red ceramic waste as a supplementary cementitious material

Caio Siebra Alcântara
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | caiosiebra93@alu.ufc.br

Ana Jéssica Farias da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | jessicafarias@alu.ufc.br

Thayná da Silva Neri Ripardo
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | thaynaneri@alu.ufc.br

Ana Dara Uchoa Ribeiro
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | anadararibeiro@alu.ufc.br

Heloina Nogueira da Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | heloina@ufc.br

Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | eduardo.cabral@ufc.br

Resumo

A produção de clínquer pela indústria cimenteira é uma das principais responsáveis pelas emissões de CO_2, tornando urgente a busca por alternativas mais sustentáveis. O uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma estratégia eficaz para reduzir o teor de clínquer no cimento Portland. O resíduo de cerâmica vermelha (RCV) é um promissor MCS, mas os estudos com seu uso ainda são incipientes e focados nas propriedades mecânicas de concretos e argamassas. Este estudo visa analisar o efeito da substituição de cimento Portland por RCV nas propriedades reológicas e mecânicas de pastas cimentícias. O RCV foi submetido à cominuição em britador de mandíbulas e moinho de bolas, garantindo que a fração retida na peneira com abertura de malha de 45 µm fosse inferior a 10%, para posterior aplicação em teores de substituição de 5%, 10%, 15% e 20% nas pastas de cimento. Os percentuais de RCV de 5% e 10% mantiveram, aproximadamente, as características de tensão de cisalhamento, viscosidade, abatimento e resistência à compressão, enquanto os percentuais de substituições de 15% e 20% resultaram em depreciações significativas, mais de 20%, nas propriedades do estado fresco e endurecido das pastas.

Palavras-chave: Resíduo; Cerâmica vermelha; Material cimentício suplementar; Pozolana.

ABSTRACT

The production of clinker by the cement industry is one of the main contributors to CO2 emissions, making the search for more sustainable alternatives an urgent priority. The use of supplementary cementitious materials (SCMs) is an effective strategy to reduce the clinker content in Portland cement. Red ceramic waste (RCW) is a promising SCM, but studies on its use are still incipient and primarily focused on the mechanical properties of concrete and mortars. This study aims to analyze the effect of replacing Portland cement with RCW on the rheological and mechanical properties of cementitious pastes. The RCW was subjected to comminution using a jaw crusher and a ball mill, ensuring that the fraction retained on a 45 µm mesh sieve was less than 10%, for subsequent application at replacement levels of 5%, 10%, 15%, and 20% in cement pastes. RCW replacement levels of 5% and 10% approximately maintained the shear stress, viscosity, slump, and compressive strength characteristics, while replacement levels of 15% and 20% resulted in significant reductions, exceeding 20%, in the fresh and hardened state properties of the pastes.

Keywords: Waste; Red ceramic; Supplementary cementitious material; Pozzolan.

1 INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira busca alternativas para reduzir os impactos ambientais dos seus processos, tendo em vista a elevada emissão de CO_2 e a contribuição para o esgotamento dos recursos naturais (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017). Uma das alternativas seria a redução do consumo de clínquer com a utilização de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS). Dessa forma, surgem os Resíduos de Cerâmicas Vermelha (RCV) que possui potencial pozolânico e representa cerca de 30% dos materiais da indústria cerâmica desperdiçados, normalmente destinado a acumular em aterros (CHERENE *et al*., 2023). Nesse contexto, estudos com uso de RCV como MCS ainda são incipientes e focados nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de concretos e argamassas (SALLI BIDECI; BIDECI; ASHOUR, 2024). A reologia é um método científico para avaliar o fluxo e a deformação de materiais sob tensão de cisalhamento, sendo mais preciso e objetivo para otimizar a trabalhabilidade do concreto que os testes tradicionais, como o teste de mesa de fluxo (PENG; UNLUER, 2023). Portanto, o presente trabalho pretende analisar o comportamento de pastas com substituição do cimento Portland por RCV em seu estado fresco e endurecido, analisando o comportamento reológico e mecânico das misturas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados na formulação das pastas são RCV provenientes do Arranjo Produtivo Local (APL) de cerâmica vermelha do Baixo Jaguaribe, localizado no estado do Ceará, e cimento Portland CP II-32-F, composto com material carbonático.

2.1 BENEFICIAMENTO DO RCV

O RCV foi inicialmente britado em britador de mandíbula para a redução parcial de sua granulometria. Em seguida, encaminhado para moagem em moinho de jarro rotativo, modelo SL-34. Após a moagem, o material resultante foi peneirado na malha de 45 µm para, posteriormente, ser utilizado na confecção das pastas com substituição parcial do cimento. Na moagem, foram aplicados os parâmetros 50% do volume do jarro (7,5L), velocidade do jarro de 25,6 rpm, razão de enchimento 7:1 (Massa total das esferas de moagem : Massa do RCV), diâmetro das bolas 37 mm e uma hora de moagem.

2.2 ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO, MISTURA E ENSAIOS DE PASTA NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

A caracterização do RCV foi realizada por meio de análise por fluorescência de raios-x (FRX), buscando sua composição química, além do ensaio de Perda ao Fogo (PF), conforme a NBR 17086-6 (ABNT, 2023). Também foi efetuada a massa específica (γ) conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017) e a granulometria a laser, feita em granulômetro Helos KR (Sympatec). Foi utilizado uma argamassadeira planetária de 5L para mistura. Para caracterização no estado fresco utilizou-se o ensaio de *mini-slump* com o diâmetro de espalhamento das pastas sendo determinado pela média de três medidas diferentes (KANTRO, 1980). Este teste foi realizado cinco minutos após a conclusão da mistura para as cinco pastas. O comportamento reológico das pastas foi investigado por meio da varredura de fluxo, a 25°C, utilizando reômetro AR2000 da TA Instruments, com geometria de placa-placa de 40mm de diâmetro e intervalo de 1mm. Para análise no estado endurecido, moldou-se CP's cúbicos (40x40x40mm), adaptado da NBR 16738 (ABNT, 2018), que foram desmoldados após 24 horas e armazenados em cura úmida (solução saturada com 1% de hidróxido de cálcio a (23 ± 2)°C até a idade de análise). As nomenclaturas das pastas são baseadas no seguinte modelo: "T[%RCV]", onde T refere-se ao traço e entre colchetes a porcentagem de RCV utilizada na amostra (TR, T5, T10, T15 e T20).

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABATIMENTO

Foi possível observar pela FRX que o RCV atinge pré-requisitos pozolânicos em sua composição química para aplicação como MCS, onde o percentual de SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 foi 82,49% (maior que 70%) e menos de 20% dos grãos maiores que 45 µm (ABNT NBR 12653, 2018). Além disso, a área específica do RCV foi obtida pelo método Blaine, segundo a NBR 16372 (ABNT, 2015), apresentando 4973 cm²/g, enquanto para o cimento utilizado, CP II-F-32, foi 4771cm²/g. Os resultados estão compilados na Tabela 1.

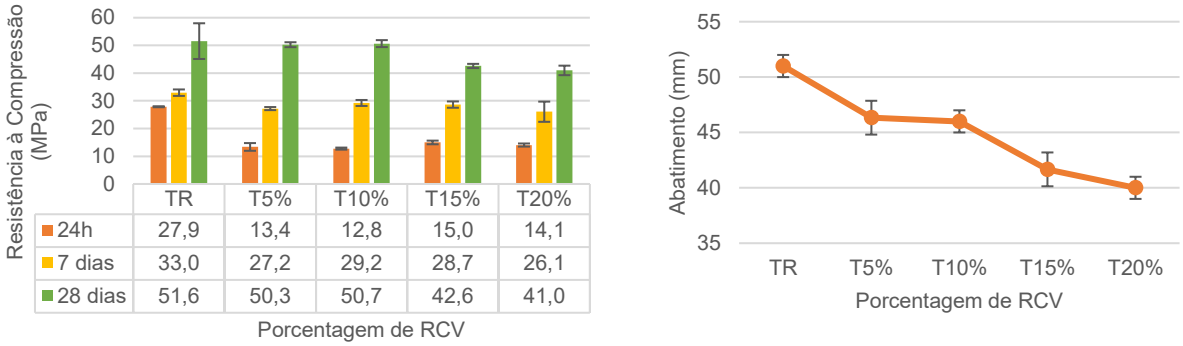
Tabela 1: Caracterização física e química.

Composição Química (%)	RCV	Propriedades Físicas (µm)	RCV
SiO_2	58,65	D_{10}	3,34
Al_2O_3	17,26	D_{50}	23,48
Fe_2O_3	6,58	D_{90}	51,48
CaO	0,98	Tamanho médio das partículas	26,10
MgO	1,18	Blaine (cm²/g)	4973
K_2O	3,01	γ (g/cm³)	2,76
SO_3	-	**CP II F 32**	
Na_2O	1,58	Blaine (cm²/g)	4771,00
PF	0,72	γ (g/cm³)	3,01

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 1 apresenta as medidas de resistência à compressão nas idades de 24h, 7 dias e 28 dias e o *mini-slump* dos traços.

Figura 1: Resultados de resistência à compressão e mini-slump das pastas com RCV.



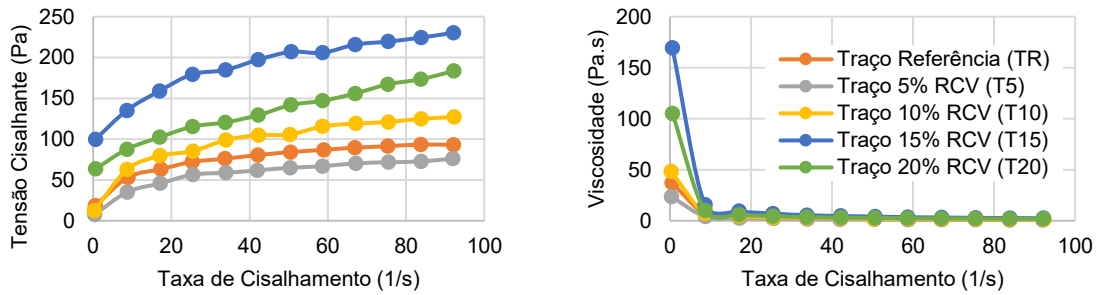
Fonte: Elaborado pelos autores

Na idade de 24h, as amostras classificadas T15 e T20 apresentaram 15,0 MPa e 14,1 MPa, respectivamente, superiores à amostra T5 (13,4 MPa) e T10 (12,8 MPa). Nas idades de 7 e 28 dias, T5 e T10 tiveram ganho de resistência maior, aproximando do TR (51,6 MPa), com variação de 1,7 a 2,5%. Segundo Hoppe Filho *et al*. (2021), em torno de 28 dias, ocorre maior consumo de $Ca(OH)_2$ nas reações químicas secundárias com partículas de RCV, ou seja, com o decorrer do tempo, o RCV passa a contribuir via reações pozolânicas nas propriedades mecânicas do concreto. Em relação à trabalhabilidade, essa foi reduzida com o aumento de RCV, conforme o diâmetro de espalhamento no *mini-slump*, reduzindo até 22% e indicando uma maior absorção de água mediante o aumento de materiais finos.

3.2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO

O ensaio de varredura de fluxo produziu curvas reológicas dinâmicas das pastas com substituição de RCV. Na Figura 2, percebe-se o aumento de tensão cisalhante e a redução da viscosidade aparente até sua estabilidade com o aumento da taxa de cisalhamento, comportamento de fluidos não-newtonianos, ou seja, a resistência ao escoamento não é constante (SILVESTRO *et al.*, 2024).

Figura 2: Resultados tensão cisalhante e viscosidade versus taxa de cisalhamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base na Figura 2, foi possível observar o aumento de tensões cisalhantes e viscosidade aparente inicial com a adição do RCV, com exceção da pasta T5, que apresentou redução nos dois parâmetros. Tal comportamento de aumento de tensões é semelhante à pesquisa de Qin et al. (2023), que descreveu o

fenômeno com o aumento das forças entre partículas devido à resistência ao movimento entre elas através do preenchimento dos poros. Esse comportamento indica uma maior resistência ao escoamento, o que pode impactar diretamente a trabalhabilidade, tornando necessário o ajuste da dosagem para garantir a fluidez adequada.

4 CONCLUSÃO

Este estudo proporcionou uma análise sobre a viabilidade do uso de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) como material cimentício suplementar em pastas. As principais contribuições são que no estado fresco foi possível observar redução do abatimento, o aumento de tensões de cisalhamento e viscosidade com a adição do RCV com exceção da mistura T5%. Em relação ao estado endurecido, observam-se dois grupos de substituições. Os percentuais de RCV de 5% e 10% mantiveram aproximadamente as características físicas das pastas de cimento, enquanto os percentuais de 15% e 20% apresentaram maior depreciação dos parâmetros de referência. Nesse contexto, o estudo contribui para uma análise efetiva da utilização deste tipo de resíduo pela indústria da construção na busca por alternativas mais sustentáveis e eficientes.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto CNPq n° 409236/2022-5 (Melhoramento e valorização de produtos cerâmicos do APL Cerâmica Vermelha do Baixo Jaguaribe/CE) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16738**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-6**: Cimento Portland - Análise química Parte 6: Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2023.

CHERENE, M. G. P. et al. Technological and microstructural perspective of the use of ceramic waste in cement-based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130256, 2023.

HOPPE FILHO, Juarez et al. Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 296, p. 123653, 2021.

KANTRO, D. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, v. 16, n. 7, p. 698–699, 2017.

PENG, Yiming; UNLUER, Cise. Avanços na medição reológica e caracterização de pastas de cimento fresco. **Powder Technology** , v. 429, p. 118903, 2023.

QIN, Q.; MENG, Q.; YI, P.; WU, K.; WANG, C. Investigation on the rheology, self-shrinkage, pore structure, and fractal dimension of coral powder-cement slurry. **Journal of Building Engineering**, v. 77, p. 107517, 2023.

SALLI BIDECI, O.; BIDECI, A.; ASHOUR, A. Utilization of Recycled Brick Powder as Supplementary Cementitious Materials—A Comprehensive Review. **Materials**, v. 17, n. 3, p. 637, 2024.

SILVESTRO, Laura et al. Rotational rheometry test of Portland cement-based materials–A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, v. 432, p. 136667, 2024.