Pré-tratamentos do resíduo da lavagem do caminhão betoneira para uso como material cimentício suplementar

Pre-treatment of concrete slurry waste for use as a supplementary cementitious material

Roberta Layra Faragó Jardim
Universidade de São Paulo | São Paulo, São Paulo | roberta.farago@lme.pcc.usp.br

Sérgio Cirelli Angulo
Universidade de São Paulo | São Paulo, São Paulo | sergio.angulo@lme.pcc.usp.br

Vanderley Moacyr John
Universidade de São Paulo | São Paulo, São Paulo | vmjohn@usp.br

Resumo

O resíduo da lavagem do caminhão betoneira (CSW) tem o potencial de ser reutilizado como material cimentício suplementar (SCM), contribuindo para a circularidade da indústria. Embora os estudos recentes sejam suficientes para indicar sua viabilidade, as formas de tratamento e as propriedades físico-químicas avaliadas ainda são restritas. Neste trabalho, o efeito da termoativação, precedido ou não de peneiramento, foi investigado. A fração volumétrica de substituição do resíduo foi mantida a 15%, para 85% do cimento referência CPV. Em todos os CSW's tratados, o calor de hidratação apresentou aceleração da hidratação de até 38%; porém, redução do calor acumulado em 72 hrs com relação à referência. Apesar da alta área específica do CSW tratado, houve maior perda de resistência à compressão para amostras não calcinadas em relação à referência. As SCM's ficaram acima da lei de diluição e indicam alguma contribuição na reatividade do material com adição cimentícia suplementar no cimento Portland. Isto sugere futuros estudos de demanda d'água e de teores de substituição ótimos para viabilidade econômica e ambiental.

Palavras-chave: Resíduo do caminhão betoneira; Lastro; Teor de substituição; Propriedades físicas; Impacto ambiental

ABSTRACT

Concrete slurry waste (CSW) shows potential for reuse as supplementary cementitious material (SCM), supporting circularity in the construction industry. While recent studies demonstrate its feasibility, research on treatment methods and physicochemical properties remains limited. This study explored the effects of thermoactivation, with and without prior sieving, on CSW's performance as an SCM. A substitution rate of 15% CSW to 85% of reference CPV cement was used. All treated CSW samples showed a slight acceleration in hydration of up to 38%; however, total heat release over 72 hours was lower compared to the reference cement. Despite the high specific surface area of the treated CSW, there was a greater loss of compressive strength for non-calcined samples. The SCMs performed above the dilution law, indicating some contribution to the reactivity of the material with supplementary cementitious addition to Portland cement. Further studies on water demand and optimal substitution rates are needed to fully assess the economic and environmental viability of using CSW as an SCM.

Keywords: Concrete slurry waste; Substitution content; Physical properties; Environmental impact.

1. INTRODUÇÃO

A produção de concreto nas centrais dosadoras gera resíduos, entre eles o resíduo da lavagem do caminhão betoneira (CSW - *concrete slurry waste),* que representa de 1 a 4% do volume total do concreto produzido (He *et al*., 2020). O CSW é geralmente composto por resíduo de pasta de cimento e agregados miúdos, contendo um elevado teor de água da lavagem, que não endurece, quando seco, e raramente é reciclado. A reciclagem do CSW fração areia é de pouco interesse, devido ao limitado volume gerado e ausência de estratégias claras de circularidade no setor de concreto. No entanto, existe um potencial, por hora subestimado, para uso como material cimentício suplementar (SCM) nos concretos produzidos nas próprias centrais, o que tem sido recentemente explorado na literatura.

Estudos como os de Liu *et al*. (2024), Martins *et al.* (2021), Ren *et al*. (2022), Keppert *et al*. (2021), Strnadel *et al.* (2021) e He *et al.* (2020), avaliaram o uso de teores de CSW como SCM em pastas e argamassas,

empregando tratamentos como peneiramento e/ou moagem. Os autores avaliaram propriedades físicas (trabalhabilidade, porosidade e resistência à compressão) e cinética de hidratação, indicando que substituições de até 15% alteram pouco as propriedades físicas, enquanto moagem em moinho de bolas pode melhorá-las. Um comportamento observado nos ensaios de calorimetria é a aceleração da hidratação e a redução dos tempos de indução, cujas intensidades variam conforme teor de substituição e tratamento empregado. Alguns destes estudos (HE *et al*., 2020, REN *et al.*, 2022) apontam para redução de custos e das emissões de CO_2, ainda que a moagem em alta energia demande mais recursos. Apesar das contribuições que as pesquisas sobre o tema têm fornecido, o estudo da termoativação do CSW é ainda inexistente na literatura. Diante do exposto, a proposta deste estudo foi avaliar como tratamentos do CSW, especificamente o peneiramento e a calcinação, podem impactar nas propriedades da pasta de cimento, fixados parâmetros de moagem como tratamento comum, volume de resíduo substituído, a/s constante e granulometria mínima.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo da lavagem do caminhão betoneira advindo de concreteira foi devidamente amostrado (dezenas de coletas, 300 kg ao longo de 1 mês). Uma alíquota de 1 kg quarteada, seca em estufa ventilada a 40℃ e destorroada com auxílio de pistilo e almofariz de ágata, foi separada em duas alíquotas de 500 g. Uma alíquota foi peneirada abaixo de 150 µm. Ambas as alíquotas foram, em seguida, moídas, em moinho de bolas planetário Fritsch Pulverisette 6 classic, jarro de tungstênio, por 20 min a 300 rpm, e 5 min a 400 rpm, resultando em massa passante na peneira #200 (75 µm). Em seguida, alíquotas de 250 g de cada amostra foram tomadas e calcinadas a 520 ± 20℃ por 2 h, resfriadas lentamente na mufla e transferidas ao dessecador a vácuo quando a temperatura atingiu 150℃. Foram obtidas as seguintes amostras para caracterização: resíduo bruto moído (CSW), resíduo bruto moído e calcinado (CSW-C), resíduo moído e peneirado passante na #200 (CSW-P) e resíduo moído, peneirado passante na #200 e calcinado (CSW-P+C).

O efeito do peneiramento na composição da amostra foi verificado pelo ensaio de termogravimetria (TGA), usando uma termobalança STA 409 PG Luxx, marca NETZSCH, à taxa de aquecimento de 20℃/min até 1000℃, e pela difração de raios-X (XRD), por meio de um difratômetro Empyrean Panalytical, operando a 40 kV e 40 mA, com radiação CuKα, coleta 5-75℃, passo 0.02 graus e 300 s, duração 55min. Ambos os ensaios foram realizados com granulometria passante na peneira #325 (45 µm). Além disso, foram realizados ensaios de granulometria por difração a laser, modelo HELOS KR – Sympatec; área superficial específica (SSA) pelo método BET, realizado no equipamento Belsorp Max - Bel Japan, preparação a 40℃ por 16 h; análise química por Fluorescência de Raios X (FRX); densidade real por picnometria de gás hélio, equipamento AccuPyc II 1340. As medidas de TGA foram replicadas.

Os resíduos tratados foram, em seguida, substituídos em volume na proporção de 15% de CSW e 85% de cimento referência CPV (REF CPV), teor ótimo comumente indicado pela literatura apresentada, comparando o efeito dos diferentes tratamentos na pasta de cimento Portland com essas adições. A cinética de reação das pastas foi avaliada por meio de calorimetria de condução isotérmica, no calorímetro I-Cal HPC da CALMETRIX, à temperatura constante de 25±2℃, por 72 h. Pastas de cimento foram moldadas para relação água/sólidos = 0.5 e 7 dias de cura. Ensaios de TGA foram realizados nas pastas moldadas para avaliar a água combinada (AC) em cada mistura e estimar a porosidade segundo *Powers*, adaptada a equação para substituição do cimento pelo resíduo. A paralisação da hidratação das amostras foi realizada conforme metodologia indicada pela RILEM TC 238 (SNELLINGS *et al.*, 2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O refinamento por Rietveld (QXRD) para CSW e CSW-P apresentou, respectivamente, os seguintes resultados para as principais fases: quartzo (COD 96-900-9667): 22% e 12.2%, etringita (COD 96-901-5085): 0.4 e 1.8%, Calcita (COD 96-702-0140): 20.3 e 24.8%, amorfos: 17.5 e 34.5%; para RWP: 10.689 e 11.113 e GoF: 4.705 e 4.765. Dados de FRX apontaram para teores dos principais óxidos: SiO_2 - 25.72%, CaO - 37.21%, Al_2O_3 - 5.46%, MgO - 3.62%, Fe_2O_3 - 4.34%. Os resultados de TGA estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantificação da água combinada (AC), portlandita (CH), CO_2 e massa residual obtidos dos resultados de TG, para resíduos tratados e pastas com 15% de substituição

	CSW	CSW-C	CSW-P	CSW-P+C	REF CPV	15% CSW	15% CSW-C	15% CSW-P	15% CSW-P+C
AC (g/g)	0.086	0.012	0.159	0.018	0.225	0.228	0.215	0.222	0.214
CH (%)	4.65	0	5.76	0	4.12	3.77	3.8	4.05	3.79

CO_2 (%)	13.46	13.61	14.82	15.75	7.71	7.55	8.46	8.26	8.99
Fração residual (%)	79.35	85.27	72.59	82.62	73.82	73.87	73.75	73.45	73.28

A água combinada (50-550℃) da amostra CSW-P aumentou 1.85 vezes em relação à CSW, enquanto o teor de quartzo da amostra CSW-P reduziu à metade (QXRD). Isto indica que o peneiramento removeu parte da areia presente no resíduo. Adicionalmente, a calcinação removeu a água combinada das amostras CSW-C e CSW-P+C, evitando decomposição dos carbonatos.

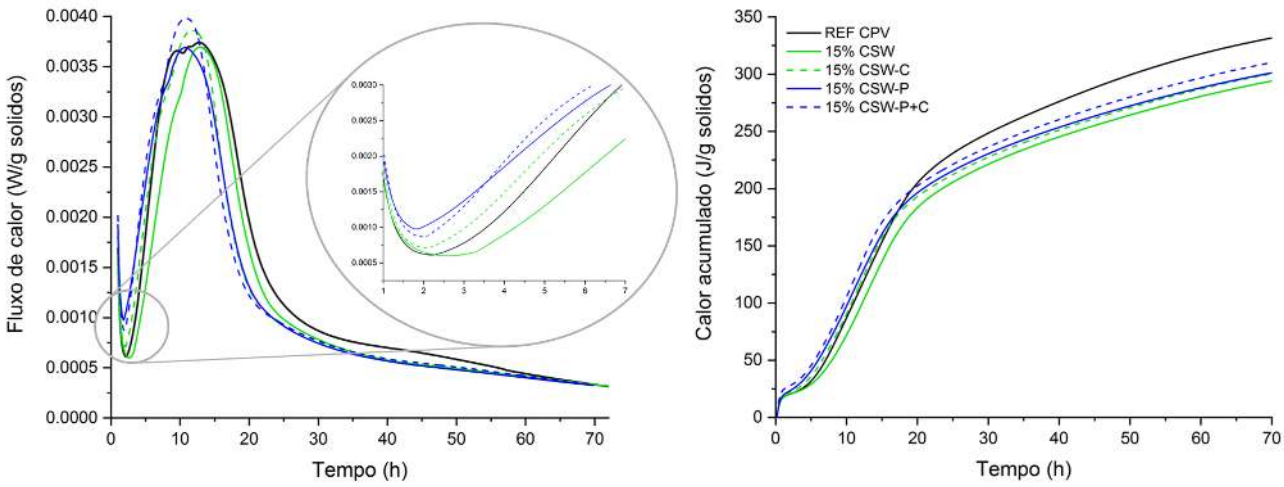
As distribuições granulométricas foram semelhantes, principalmente entre as amostras não calcinadas e a referência. Observa-se ligeira redução no diâmetro de partículas d90 (Tabela 2) para CSW-P e CSW-P+C, em razão do aumento no teor de finos após peneiramento, e um aumento no teor de hidratados com peneiramento que justifica as SSA's mais elevadas. A calcinação até 550℃ reduz a SSA. A redução de porosidade pode ocorrer com a desidratação de fases hidratadas do cimento (Zanovello *et al*., 2024).

Tabela 2 – DIâmetro das partículas, dados de SSA e densidade dos resíduos tratados

	D10 (µm)	**D50 (µm)**	**D90 (µm)**	**SSA (m^2/g)**	**Densidade (g/cm^3)**
CSW	2.7	14.4	56.6	13.70	2.616
CSW-C	3.1	17.0	64.0	11.89	2.700
CSW-P	3.2	14.3	54.1	40.98	2.525
CSW P+C	3.5	14.4	51.2	22.50	2.740

As substituições dos CSW's (Figura 1) reduzem o período de indução das pastas CSW-C, CSW-P e CSW-P+C, com aceleração de até 38% para o peneirado. Este comportamento é observado nas curvas de calor acumulado nas primeiras 12 h e na AC aos 7 dias (Tabela 1). Após 72 h, todas as composições com resíduos apresentaram menor calor acumulado, como esperado na desaceleração, por efeito de aceleradores de hidratação. Compreende-se que o resíduo de cimento contém C-S-H, fase que tem SSA elevada e cria pontos de nucleação, sobretudo no material peneirado em que existe um aumento no teor de produtos de hidratação do cimento e SSA. Por outro lado, a substituição por CSW reduz a disponibilidade de cimento (lei de diluição), com consequente redução do total de calor acumulado de hidratação observado, por meio do efeito dominante da reação do clinquer (HE *et al.*, 2020; THOMAS *et al.*, 2009).

Figura 1 – Fluxo de calor e calor acumulado das composições de pasta com resíduo da lavagem do caminhão betoneira e da pasta de cimento referência

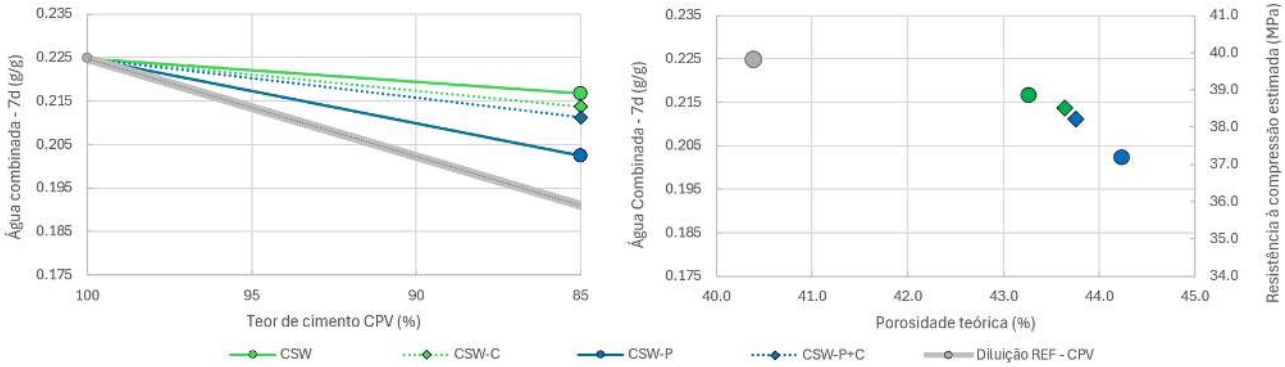


	REF - CPV	15% CSW	15% CSW-C	15% CSW-P	15% CSW-P+C
Início da indução (h)	0.65	0.68	0.68	0.65	0.62
Fim da indução (h)	2.90	3.35	2.48	2.05	2.12
Período de indução (h)	2.25	2.67	1.80	1.40	1.50
Calor acumulado após 12 horas (J/g)	113.4	97.1	118.0	123.9	133.6
Calor acumulado após 72 horas (J/g)	334.0	296.6	303.0	303.7	312.6

A reta de diluição descreve a evolução da água combinada em função do teor de um produto hipotético que não interfere na reação de hidratação, ou seja, permite quantificar a contribuição de qualquer adição. Adições pouco reativas se aproximam da reta de diluição e, com a mesma água combinada do cimento, produzem retas paralelas ao eixo x. A subtração das equações da reta de diluição das curvas que descrevem a água combinada em função do teor da adição permite estimar a contribuição desta para a AC na idade de interesse. A Figura 2 apresenta a água combinada aos 7 dias de cura das formulações estudadas, em comparação com

a reta de diluição. Uma maior AC em comparação ao REF CPV é observada em todas as adições, com contribuições de 13% para CSW, 12% para CSW-C, 11% para CSW-P+C e 6% para CSW-P. Estes ensaios foram repetidos e evidenciam que as adições, calcinadas ou não, têm capacidade de reação/reidratação, mesmo que inferiores à do clinquer. Relacionando a AC à porosidade teórica e à resistência à compressão estimada conforme equação proposta por Abrao *et al.* (2023), para pasta com CPV e relação a/c = 0.48, observa-se relação inversa entre elas, dependendo exclusivamente da água combinada, como esperado. Houve perda de resistência à compressão menor que 13% para amostras não calcinadas e apenas 8% para as calcinadas. A porosidade calculada para 15% CSW-P se dista mais da referência, certamente em função da maior SSA.

Figura 2 – Curva de diluição do CPV e dos resíduos substituídos, sob diferentes tratamentos (a) e AC em função da porosidade teórica (b). A resistência à compressão é linear com AC, com coeficientes angular de 230.11 MPa e linear de -11.54 MPa.



4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou os efeitos do peneiramento e calcinação do CSW e seu uso como SCM na pasta de cimento. A calcinação resultou numa aceleração discreta da reação de hidratação e pouco aumento da evolução cumulativa do calor. Entretanto, todas as pastas com CSW apresentam menor calor acumulado em 72hrs, em relação à referência, principalmente entre a REF-CPV e a 15%CSW. Confrontadas as curvas de diluição, conclui-se que existe contribuição na reatividade dos materiais como SCM. Com relação à resistência e à porosidade calculadas, obtém-se desempenho próximo ao do cimento puro, com pouca variação entre as pastas com CSW. Os efeitos do calor de hidratação avaliados neste estudo tiveram como base apenas um teor de substituição e uma idade de hidratação. Compreende-se que o efeito de diluição pode sobrepor-se ao efeito da nucleação ao serem modificados os teores de substituição. Deste modo, é importante avaliar resistência e AC em diferentes idades e teores de mistura (ZANOVELLO *et al.*, 2024), além da demanda d'água do concreto reciclado dada a elevada SSA, uma vez que tais fatores podem implicar na decisão do melhor tratamento adotado.

REFERÊNCIAS

MARTINS, Juliana Vieira et al. Influence of replacing Portland cement with three different concrete sludge wastes. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124519, 2021.

REN, Jun et al. Pre-treatment of reclaimed concrete slurry waste for substituting cementitious materials: Effect of treatment approach and substitution content. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p. 134987, 2022.

HE, Xingyang et al. New treatment technology: The use of wet-milling concrete slurry waste to substitute cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118347, 2020.

STRNADEL, Bohumír et al. A comparative study on concrete slurry waste: performance optimization from the wet-milling process. **Materials and Structures**, v. 54, n. 5, p. 184, 2021.

KEPPERT, Martin et al. Recycling of fresh concrete slurry waste as supplementary cementing material: Characterization, application and leaching of selected elements. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124061, 2021.

LIU, Guishan et al. Effect of Wet Grinding Concrete Slurry Waste on Hydration and Hardening Properties of Cement: Micro-Nano-Scale Modification. **Materials**, v. 17, n. 12, p. 3010, 2024.

SILVA, Daniel OF et al. Reuse of fines from ready-mix concrete washing slurries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104653, 2020.

ABRAO, Pedro Cesar Rodrigues Alves et al. Avaliação do desempenho de cimentos para a era digital: Métodos tradicionais x alternativos. **Simpósio Brasileiro de Ciência do Cimento**, v. 1, p. 1-7, 2023.

SNELLINGS, Ruben et al. Report of TC 238-SCM: hydration stoppage methods for phase assemblage studies of blended cements—results of a round robin test. **Materials and structures**, v. 51, p. 1-12, 2018.

THOMAS, Jeffrey J.; JENNINGS, Hamlin M.; CHEN, Jeffrey J. Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 113, n. 11, p. 4327-4334, 2009.

ZANOVELLO, Mateus et al. Engineered Blended Thermoactivated Recycled Cement: A Study on Reactivity, Water Demand, Strength-Porosity, and CO2 Emissions. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, 2024.