DESEMPENHO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUO DE TIJOLO PRODUZIDO EM DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM

Performance of concretes with partial replacement of cement by brick waste produced in different grinding times

Robson Arruda dos Santos
Instituto Federal da Paraíba | Cajazeiras, PB | robson.santos@ifpb.edu.br

Marina Cartaxo Braga Morais de Oliveira
Instituto Federal da Paraíba | Cajazeiras, PB | marina.cartaxo@academico.ifpb.edu.br

Vitória Karoline Silva de Morais
Instituto Federal da Paraíba | Cajazeiras, PB | karoline.vitoria@academico.ifpb.edu.br

Moacir Braz da Silva Neto
Instituto Federal da Paraíba | Cajazeiras, PB | moacirbraz51@gmail.com

Resumo

Os produtos a base de cimento Portland possuem um grande potencial de receberem aplicação de resíduos industriais. Este trabalho tem como objetivo investigar o desempenho de concretos com a substituição parcial do cimento por Resíduo de Tijolo Moído (RTM). Avaliou-se a atividade pozolânica à cal de dois resíduos cerâmicos, com tempos de moagem distintos, 3000 e 20000 rotações. A análise foi complementada pelo ensaio de DRX de pastas de cimento com o resíduo, 30, 40 e 50% de substituição, para verificar o consumo de Portlandita. O desempenho dos concretos foi verificado através da resistência mecânica e ensaio de migração de cloretos. O resultado da atividade pozolânica à cal mostra que o material não pode ser considerado pozolânico. Contudo, a análise do DRX das pastas de cimento com RTM mostram a diminuição da Portlandita em todas as pastas. Os concretos apresentaram bom desempenho mecânico e elevada resistência à penetração de cloretos, superior ao concreto de referência.

Palavras-chave: Resíduo cerâmico; Pozolanicidade; Cimento; Concrete; Cloretos.

ABSTRACT

Portland cement-based products have a great potential to be used with industrial waste. This work aims to investigate the performance of concrete with the partial replacement of cement by ground brick waste (GBW). The pozzolanic activity of lime from two ceramic residues was evaluated, with different grinding times, 3000 and 20000 rotations. The analysis was complemented by the XRD test of cement pastes with the waste, 30, 40 and 50% of replacement, to verify the consumption of Portlandite. The performance of the concretes was verified through mechanical strength and chloride migration test. The result of pozzolanic activity to lime shows that the material cannot be considered pozzolanic. However, XRD analysis of cement pastes with GBW show a decrease in Portlandite in all pastes. The concretes showed good mechanical performance and high resistance to chloride penetration, superior to the reference concrete.

Keywords: Ceramic waste; Pozzolanicity; Cement Portland; Concrete; Chlorides.

1 INTRODUÇÃO

Para Belato (2013), o cimento é uma das principais commodities mundiais, sendo um material de construção essencial, pois sua importância se dá pelo fato de suas diversas propriedades, como moldabilidade, hidraulicidade e elevada resistência, como também pelo papel fundamental em uma grande revolução na construção civil, além de ser conquistado com facilidade na natureza através de matérias-primas.

No entanto, Rebmann (2011) afirma que as consequências das estimativas que apontam para a elevação do consumo de cimento se refletem no aumento do consumo de energia e emissão de CO_2, oriundo principalmente da decomposição em óxidos dos carbonatos presentes no calcário durante a produção do cimento. À vista disso, a confecção de concretos que utilizam Resíduos da Construção Civil (RCC) vem sendo estudada desde o fim da Segunda Guerra Mundial, justificadas pela conservação de matérias-primas finitas, e redução do consumo de energia (OLORUNSOGO; PADAYACHEE, 2002).

A inclusão de materiais pozolânicos na mistura do concreto reduz a demanda de cimento, além de reduzir o tamanho dos poros, permeabilidade, retração e fluência, podendo melhorar significativamente propriedades como: resistência à compressão, tração e flexão e o módulo de elasticidade do concreto de acordo com o nível de substituição pelo material (KAVITHA *et al.*, 2015). Ao reduzir a demanda de cimento, o concreto pode fica mais barato, por se tratar do componente mais caro de sua mistura.

Um exemplo de resíduo da indústria da construção que vem sendo estudado como adição pozolânica é o resíduo de cerâmica vermelha (VEJMELKOVÁ *et al.*, 2012, SANTOS *et al.,* 2021). O resíduo pode ter origem na própria produção, visto as peças quebradas que não retornam ao ciclo produtivo, como no canteiro de obras. Os resíduos podem ser inseridos no concreto por substituição dos agregados ou substituição parcial do cimento. No entanto, a quantidade de pesquisas que avaliam a substituição de cimento por resíduos cerâmicos no concreto são poucas. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho (resistência mecânica e penetração de cloretos) dos concretos dosados com resíduos de tijolos cerâmicos moídos (RTM) em substituição parcial do cimento Portland.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisadas duas granulometrias de resíduo de tijolo moído, o RTM obtido com 3000 rotações (RTM-3K) e outro com 20000 rotações (RTM-20K), com o objetivo de verificar se atendem os critérios de pozolanicidade, estratégia para reduzir os custos de produção.

O estudo dividiu-se nas seguintes etapas:

- Avaliação da atividade pozolânica (NBR 5751, 2012) e ensaios de DRX de pastas de cimento e resíduo. Nesta fase foram avaliadas as substituições de 30, 40 e 50% do cimento por RTM.

- Moldagem de concretos em duas matrizes distintas de agregados empacotados, uma com 100% de RTM-3K, e a outra com uma mistura de RTM-3K e RTM-20K (1:1).

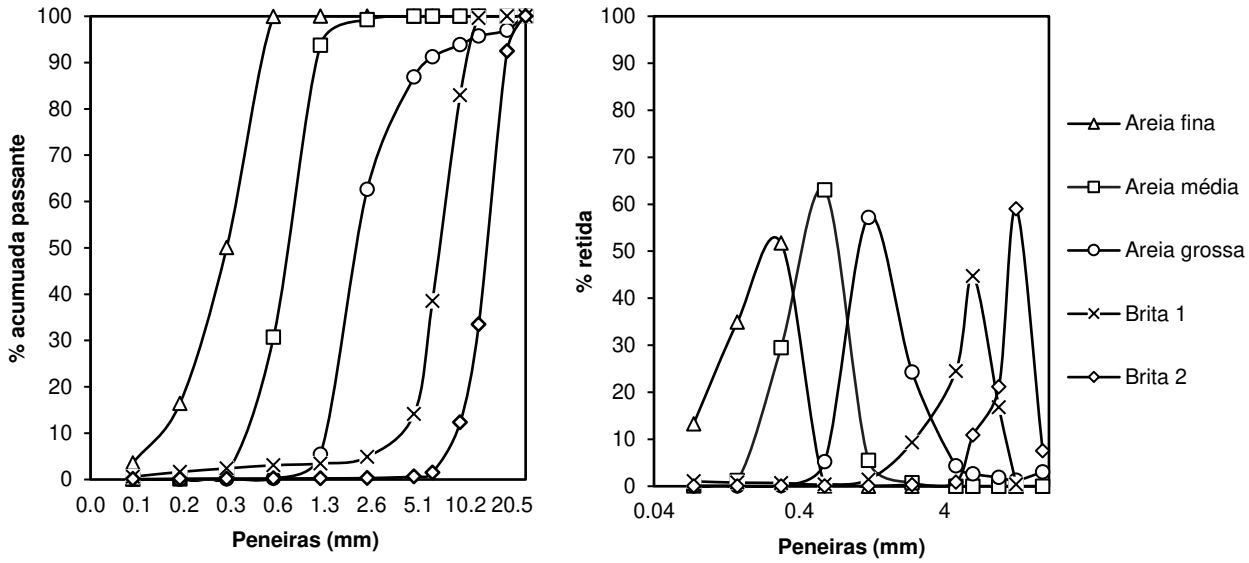
Atendendo ao disposto na NBR 5751 (2012), a argamassa deve conter uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio e mais uma quantidade de material pozolânico, que corresponda ao dobro do volume do hidróxido de cálcio. Neste trabalho foi utilizado resíduo de tijolo cerâmico moído (RTM). Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, utilizando as quantidades, recomendadas pela NBR5751 (2012).

As análises de difração de Raios-x para o resíduo foram realizadas com o objetivo de auxiliar na identificação das fases cristalinas desse material, complementando a análise da pozolanicidade. Foi utilizado um difratômetro da Shimadzu (XRD–6000), com varredura angular de 5 a 70° com incremento de 0,02° e tempo de passo de 2s.

Foram dosados dois concretos, com o objetivo de avaliar o efeito físico e químico do RTM nas duas granulometrias. O concreto C-RTM-3K possui apenas o RTM-3K e o C-RTM-3-20K possui quantidades iguais das duas granulometrias de RTM. Foi utilizado cimento CPV ARI em todos os concretos. Para conseguir um

bom empacotamento dos agregados foram utilizadas três areias (fina, média e grossa) e duas britas (12,5 e 19mm). A Figura 1 mostra as curvas cumulativas e discretas dos agregados.

Figura 1: Curvas granulométricas dos agregados.



Este ensaio foi realizado seguindo as recomendações da norma NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999), que descreve um procedimento de teste acelerado para migração de cloretos, em estado não estacionário. As amostras foram preparadas usando espécimes cilíndricos de 100x200mm, que foram cortados em amostras de 50mm de altura.

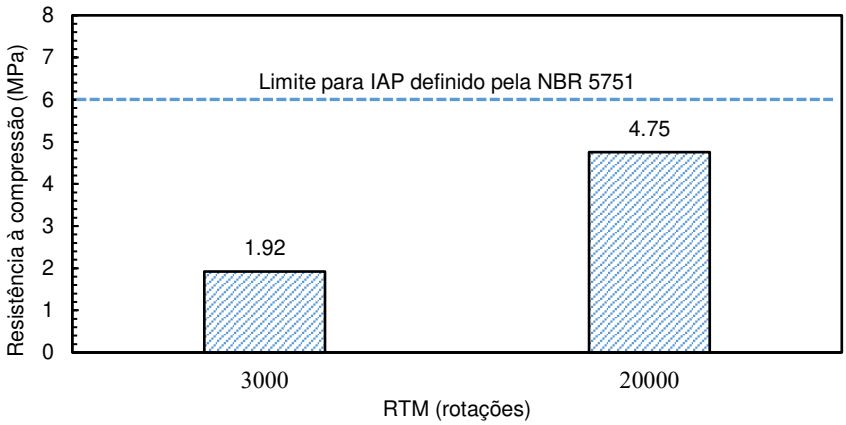
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização quanto à atividade pozolânica foi realizada através do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal – NBR 5751 (ABNT, 2012), complementando-se com a análise por difratometria de raios-X (DRX), para identificação do consumo de Portlandita nas pastas e espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), para identificação das porcentagens de óxidos.

Foram avaliados alguns dos requisitos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para verificação da atividade pozolânica dos materiais, que foram: a soma dos óxidos de silício, alumínio e ferro (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) deve ser maior que 70%; teor de óxido de enxofre (SO_3) menor que 5% e atividade pozolânica com cal aos sete dias maior que 6 MPa.

As argamassas com os resíduos cerâmicos não atingiram a resistência mínima de 6 MPa, como visto na Figura 2. Assim, por este critério o material não seria classificado como pozolânico, contudo, identifica-se que este apresenta atividade, apenas menor que o estabelecido pela NBR 5751 (ABNT, 2012).

Figura 2: Resistência à compressão aos 7 dias dos RTM (moagem teste).



Segundo os critérios de teores mínimos de óxidos da NBR 12653 (ABNT, 2014), obtidos por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), os resíduos avaliados estão todos além do limite recomendado, apresentados na Tabela 1.

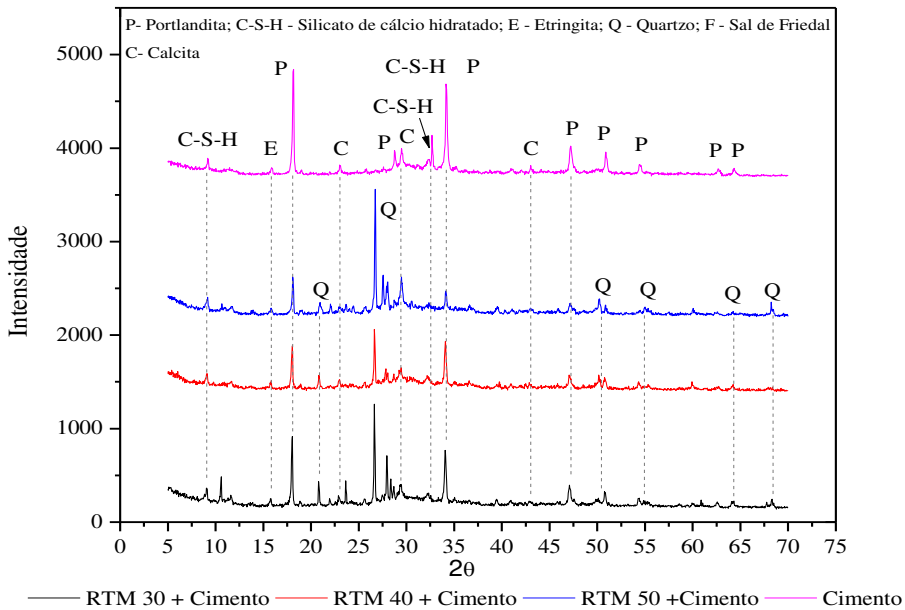
Tabela 1: Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) dos RTM e massa cerâmica.

Óxidos	RTM	
	3.000 Rotações	20.000 Rotações
SiO_2	62,0522	64,2377
Al_2O_3	19,6776	18,2497
Fe_2O_3	10,3154	9,6811
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	**92,0452**	**92,1685**
MgO	1,9449	1,8238
K_2O	1,4758	1,6477
Na_2O	1,4306	1,4013
TiO_2	1,3856	1,1049
CaO	0,7981	0,8632
BaO	0,2052	0,2758
P_2O_5	0,1976	0,1924
SO_3	0,1519	0,1495
MnO	0,1385	0,1399
ZrO_2	0,0742	0,0867
Cr_2O_3	0,0668	0,0650
SrO	0,0652	0,0608
Rb_2O	0,0201	0,0205

Berenguer *et al.* (2021), ao analisar diferentes pozolanas, constaram que além das concentrações de SiO_2 e Al_2O_3, deve-se analisar a presença em grande proporção dos óxidos CaO, MgO, K_2O e Na_2O, visto que estes podem realizar reações de hidratação competitivas. A soma desses óxidos nos RTM (3000 rotações) e RTM (20000 rotações) ultrapassam 5%, valores também encontrados pelos referidos autores, em que indicaram como possível causa de interferência na atividade dos materiais analisados.

Visto o baixo desempenho do RTM-3K no ensaio de resistência à compressão, para a etapa de verificação da análise do consumo de Portlandita através do DRX, optou-se por fazer uma mistura em partes iguais das duas granulometrias de RTM, buscando obter um material com menor gasto energético e que ainda possua atividade nos concretos e argamassas. A Figura 3 mostra as análises de DRX das pastas com 30, 40 e 50% de RTM aos 110 dias. O quartzo, Portlandita, e etringita são as principais fases cristalinas das pastas. O pico de difração de quartzo só aparece nas pastas com RTM, proveniente do resíduo. Os picos de difração da etringita nos produtos de hidratação pode ser explicado pela utilização do gesso como ativador no cimento. As fases identificadas foram suficientes para constatar a diminuição dos picos de Portlandita nas pastas com RTM.

Figura 3: DRX das pastas de cimento e RTM aos 110 dias.



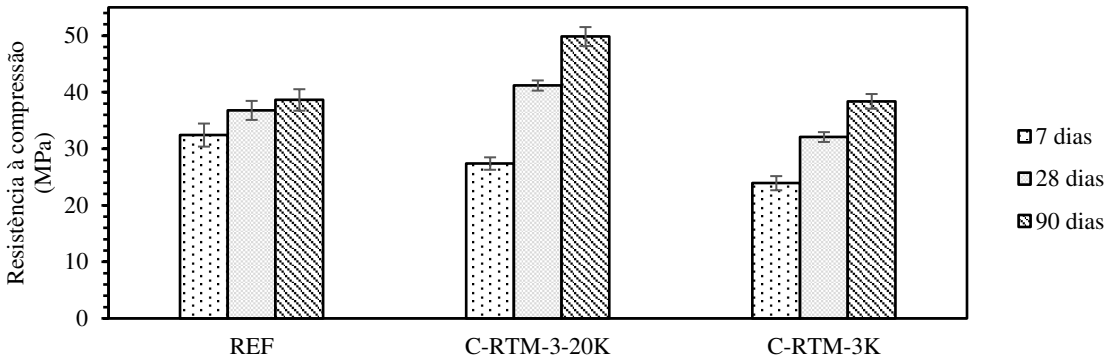
A Tabela 2 apresenta a composição dos concretos estudados. Para avaliar o potencial do RTM-3K, o concreto C-RTM-3K foi dosado em uma matriz de agregados com menor empacotamento, conservando o mesmo consumo de cimento.

Tabela 2: Composição dos concretos.

Concretos	Consumos (kg/m^3)								
	Cimento	RTM-3k	RTM-20k	Areia			Brita 1	Brita 2	Água
				Fina	Média	Grossa			
C-RTM-3-20K	258	86	86	431,4	114,6	422,4	464	313,7	193,5
C-RTM-3K	258	172	-	482,6	-	506,4	454,4	303,1	193,5
REF	430	-	-	-	798,8	-	-	966,3	193,5

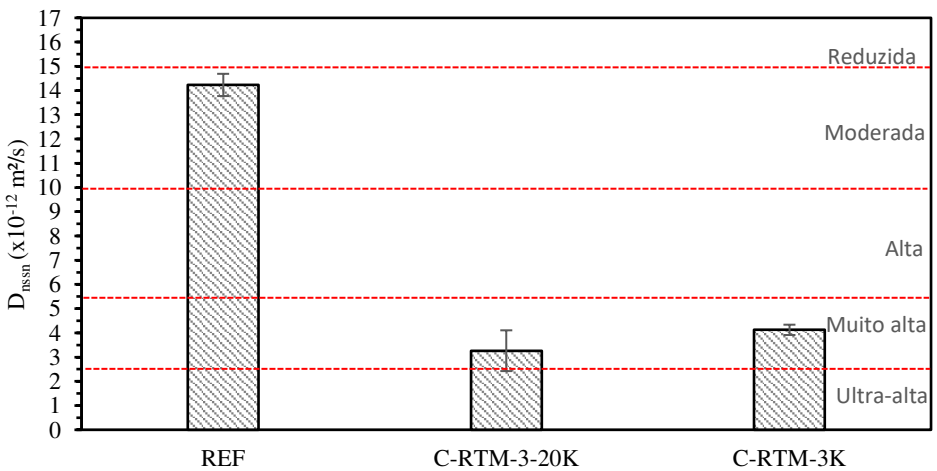
A Figura 4 apresenta os resultados de resistência à compressão dos concretos, onde pode ser observado um aumento maior aos 91 dias nos concretos com RTM. Esse comportamento pode ser explicado pela reação pozolânica (em menor escala) desse material, também identificada em estudos anteriores (MOINI *et al.*, 2015; LOPES *et al.,* 2020). Considerando a variabilidade da temperatura de queima dos fornos de tijolos, a composição da massa cerâmica e a finura apresentada pelo RTM, este trabalho destaca o efeito filer das partículas destes finos, visto o bom desempenho do concreto C-RTM-3K, com substituição de 40% do cimento por RTM-3K, que apresentou o menor IAP.

Figura 4: Resistencia à compressão dos concretos aos 7, 27 e 90 dias.



Os resultados da migração de cloretos no estado não estacionário, segundo a NT BUILD 492 (1999), são apresentados na Figura 5. A classificação de Nilsson; Ngo; Gjørv (1998) para a resistência do concreto à penetração de íons cloreto está marcada no gráfico: reduzida, moderada, alta, muito alta e ultra-alta. Quanto maior o coeficiente de difusão, menor a resistência do concreto à penetração de cloretos.

Figura 5: Resultado do ensaio de migração de cloretos.



A substituição do cimento por RTM, nas duas granulometrias, foi significativa na redução do transporte de íons cloreto nos concretos, devido ao refinamento dos poros e a quantidade de alumina presente do resíduo. Esse efeito já foi amplamente discutido na literatura. Shi *et al.* (2012); Andrade; Buják (2013); Yue *et al.* (2018); Ribeiro et al. (2021) argumentam que o teor de aluminato tem forte correlação com o retardo na difusão de cloretos, devido à formação de cloroaluminatos na microestrutura do concreto, principalmente o sal de Friedel ($C_3A{\cdot}CaCl_2{\cdot}10H_2O$).

4 CONCLUSÕES

Após a discussão dos resultados, pode-se destacar os principais pontos sobre o resíduo estudado:

- O RTM pode ser utilizado como adição mineral, nas duas granulometrias estudadas. Visto a variabilidade de condições de produção, principalmente a temperatura de queima do material cerâmico, não se pode definir um padrão de pozolanicidade para todos os resíduos. Assim, para o caso do resíduo com menor custo de produção, o RTM-3K, este pode ser utilizado como fíler, e a atividade constatada, mesmo que abaixo do limite normatizado, será um efeito secundário, como visto no concreto C-RTM-3K.

- O RTM-20K apresenta maior atividade, devido o ganho na área superficial em relação ao RTM-3K. Contudo, para reduzir o custo, avaliou-se a mistura com 50% de cada material para obtenção de um resíduo com granulometria bem graduada e menor custo de produção. A mistura dos resíduos apresentou bom resultado na avaliação das fases cristalinas das pastas de cimento com RTM, em que foi constatado consumo da portlandita em todos os níveis de substituição estudados.

- Os concretos com baixo consumo de cimento (258 kg/m^3) mostraram excelente resultado de resistência mecânica, em que o concreto C-RTM-3-20K apresentou valores superiores ao concreto de referência (430 kg/m^3). O concreto C-RTM-3K, mesmo com uma matriz de agregados com menor empacotamento e resíduo com menor tempo de moagem, obteve resultado equivalente ao concreto de referência aos 90 dias.

- Os concretos com RTM apresentaram desempenho superior ao concreto de referência no ensaio de migração de cloretos. Com a dosagem por empacotamento dos agregados, que otimizou a quantidade de pasta do concreto, somada aos efeitos químicos e físicos do RTM, foi possível obter concretos com bom desempenho mecânico e resistência muito elevada à penetração de cloretos.

Assim, o RTM possui um grande potencial para substituir parte do cimento em concretos e argamassas, promovendo a redução das emissões de CO_2 inerentes à produção do cimento Portland.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, C.; BUJÁK, R. **Cement and Concrete Research Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion.** Cement and Concrete Research, v. 53, p. 59–67, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 –** Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23 –** Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

BELATO, M. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2013.

BENHELAL, E.; RASHID, M. I.; HOLT, C.; RAYSON, M. S.; BRENT, G.; HOOK, J. M.; STOCKENHUBER, M.; KENNEDY, E. M. The utilisation of feed and byproducts of mineral carbonation processes as pozzolanic cement replacements. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 499–513, 2018.

BENOSMAN, A. S.; MOULI, M.; TAIBI, H.; BELBACHIR, M.; SENHADJI, Y.; BEHLOULI, I.; HOUIVET, D. Mineralogical Study of Polymer-Mortar Composites with PET Polymer by Means of Spectroscopic Analyses. **Materials Sciences and Applications**, v. 03, n. 03, p. 139–150, 2012.

BERENGUER, R.; LIMA, N.; PINTO, L.; MONTEIRO, E.; POVOAS, Y.; OLIVEIRA, R.; LIMA, N. B. D. Cement-based materials: Pozzolanic activities of mineral additions are compromised by the presence of reactive oxides. **Journal of Building Engineering**, v. 41, n. February, p. 102358, 2021.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica,** v. 61, n. 358, p. 251–258, 2015.

HOPPE FILHO, J.; PIRES, C. A. O.; LEITE, O. D.; GARCEZ, M. R.; MEDEIROS, M. H. F**.** Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 296, 2021.

JERÔNIMO, V. L. **Estudo da durabilidade de concretos com adição de resíduos da indústria de cerâmica vermelha com foco na corrosão de armaduras.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

KANNAN, D. M.; ABOUBAKR, S. H.; EL-DIEB, A. S.; REDA TAHA, M. M. High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 35–41, 2017.

KAVITHA, O.; SHANTHI, V.; ARULRAJ, G.; SIVAKUMAR, P. Fresh, micro- and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete. **Applied Clay Science,** v. 114, p. 370-374, 2015.

KAZMIERCZAK, C. S.; ROSA, M.; ARNOLD, D. C. M. Influência da adição de filer de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 7–19, 2016.

KULOVANÁ, T.; VEJMELKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; ROVNANÍKOVÁ, P.; KERŠNER, Z.; ČERNÝ, R. Mechanical, durability and hygrothermal properties of concrete produced using Portland cement-ceramic powder blends. **Structural Concrete**, v. 17, n. 1, p. 105–115, 2016.

L. NILSSON, M. H. NGO, AND O. E. GJØRV. High-performance repair materials for concrete structure in the port of Gothenburg, in Concrete under severe conditions 2: Environment and loading. **Proceedings of the Second International Conference on Concrete Under Severe Conditions**, vol. 2, 1998, p. 1193–1198.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. Considerations on the efficiency of Portland cement concrete mixtures based on the particle packing concept. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

MEDEIROS, M. H. F. Resíduo de cerâmica vermelha e fíler calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-sílica. **Matéria** (Rio J.), Rio de Janeiro, 2016.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; JERÔNIMO, V. L.; CARNEIRO, A. M. P. Comportamento de concreto armado com adição de resíduos de tijolo cerâmico moído frente à corrosão por cloretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 33-52, 2014.

MO, KIM HUNG; ALENGARAM, U. JOHNSON; JUMAAT, MOHD ZAMIN; YAP, SOON POH; LEE, SIEW CHENG. Green concrete partially comprised of farming waste residues: A review. **Journal of Cleaner Production**, 2016.

MOINI, MOHAMADREZA; FLORES-VIVIAN, ISMAEL; AMIRJANOV, ADIL; SOBOLEV, KONSTANTIN. The optimization of aggregate blends for sustainable low cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 627–634, 2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NT BUILD 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. **Measurement**, p. 1–8, 1999.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 2, p. 179-185, 2002.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete. **Materials and Structures**, v. 44, p. 155–167, 2011.

PITARCH, A. M.; REIG, L.; TOMÁS, A. E.; LÓPEZ, F. J. Effect of Tiles, Bricks and Ceramic Sanitary-Ware Recycled Aggregates on Structural Concrete Properties. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, n. 6, p. 1779–1793, 2019.

RAY, Sourav; HAQUE, Mohaiminul; SOUMIC, Sakib Ahmed; MITA, Ayesha Ferdous; RAHMAN, MD Masnun; TANMOY, Bibhas B. Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review. **Journal of Building Engineering** Elsevier Ltd, 2021.

REBMANN, M. S., Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

REIG, L.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Alkaline activation of ceramic waste materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 4, n. 4, p. 729–736, 2013.

RIBEIRO, D. V.; PINTO, S. A.; AMORIM JÚNIOR, N. S.; ANDRADE NETO, J. S.; SANTOS, I. H. L.; MARQUES, S. L.; FRANÇA, M. J. S. Effects of binders characteristics and concrete dosing parameters on the chloride diffusion coefficient. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, n. July 2020, 2021.

SANTOS, R. A. dos; MEIRA, G. R.; BEZERRA, W. V. D. de C. BRAGA, F. A. V.; PONTES, D. L. de. Use of numerical method for optimization of granulometric curves in eco-efficient concrete. **Matéria** Rio de Janeiro, v. 26, 2021.

SHI, X. XIE, N.; FORTUNE, K.; GONG, J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 30, p. 125–138, 2012.

TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B.; FAIRBAIRN, E. M. R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1357–1365, 2007.

VEJMELKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; ROVNANÍKOVÁ, P.; ONDRÁČEK, M.; KERŠNER, Z.; ČERNÝ, R. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. **Cement and concrete composites**, v. 34, n. 1, p. 55-61, 2012.

YUE, Y.; WANG, J. J.; BASHEER, P. A. M.; BAI, Y. Raman spectroscopic investigation of Friedel's salt. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 306–314, 2018.

ZHAO, Y.; GAO, J.; LIU, C.; CHEN, X.; XU, Z. The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118521, 2020.