

APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO DE CERÂMICA
VERMELHA BENEFICIADO EM MATRIZ DE CIMENTO*Use of processed red ceramic construction waste in cement-based materials*Evelin Warmeling¹, Maryane Gislayne Cordeiro de Queiroz ²,
Abrahão Bernardo Rohden³**Resumo**

A busca por cimentos sustentáveis motivou o desenvolvimento de materiais cimentícios suplementares, devido à disponibilidade limitada de subprodutos industriais. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o resíduo da construção de cerâmica vermelha (RCCV) como substituição parcial do cimento Portland em argamassas. Os materiais utilizados foram cimento Portland CP II-F-32, areia de rio padronizada e RCCV. O resíduo foi coletado, separado de impurezas, moído em moinho de bolas e peneirado para obter a granulometria adequada. Os métodos adotados seguiram os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014). A caracterização do RCCV incluiu análises físicas, químicas e de atividade pozzolânica. Para avaliar o desempenho mecânico das argamassas, foram realizados testes de resistência à compressão e análise estatística (ANOVA e teste de Tukey) para verificar diferenças significativas entre as amostras. Os resultados mostraram que o RCCV apresentou características compatíveis com os requisitos normativos, podendo ser utilizado em misturas cimentícias. As argamassas com RCCV exibiram melhora na resistência à compressão em comparação com as amostras sem o resíduo, indicando o potencial do material como substituto parcial do cimento. No entanto, ajustes no processo de beneficiamento do RCCV podem aumentar ainda mais seu desempenho. Conclui-se que a incorporação de RCCV em argamassas é uma estratégia viável para reduzir resíduos e promover práticas de construção mais sustentáveis, contribuindo para a economia e desempenho da construção civil.

Abstract

The growing demand for sustainable materials in civil construction drives the use of industrial and construction waste as substitutes for Portland cement. This study evaluated the performance of ground red ceramic construction waste (RCCW) as a partial replacement for cement in mortars. The characterization included chemical, physical, mineralogical, and pozzolanic analyses, following standards such as NBR 12653 (ABNT, 2014). RCCW exhibited a chemical composition compatible with pozzolanic materials but low pozzolanic activity. Compression strength tests showed increases of 16.8% and 20% at 7 and 28 days, respectively. Although RCCW is not intrinsically pozzolanic, its incorporation enhanced the mechanical strength of the mortars. The feasibility of using ground RCCW without the need for complex beneficiation processes reinforces its potential as an addition to cementitious matrices, promoting environmental and economic benefits.

Palavras Chaves:

RCCV; Beneficiamento de resíduos; Atividade pozzolânica; Resistência à compressão.

Keywords:

RCCW; Waste processing; Pozzolanic activity; Compressive strength.

¹ Fundação Universidade Regional De Blumenau (FURB). Rua São Paulo, 3250 - Itoupava Seca, Blumenau, Santa Catarina, CEP 89030-000. ewarmeling@furb.br.

² Fundação Universidade Regional De Blumenau (FURB). Rua São Paulo, 3250 - Itoupava Seca, Blumenau, Santa Catarina, CEP 89030-000. mgcqueiroz@furb.br. <https://orcid.org/0000-0001-7331-8042>.

³ Fundação Universidade Regional De Blumenau (FURB). Rua São Paulo, 3250 - Itoupava Seca, Blumenau, Santa Catarina, CEP 89030-000. arohden@furb.br. <https://orcid.org/0000-0002-8652-5064>

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da indústria do cimento é um reflexo direto da expansão acelerada da construção civil global. De acordo com um estudo de Zhang *et al.* (2021), a demanda por cimento tem crescido a um ritmo exponencial devido ao aumento contínuo das atividades de construção e urbanização, especialmente em países em desenvolvimento. Este crescimento é impulsionado pela necessidade de infraestrutura robusta e pela expansão urbana em resposta ao crescimento populacional e à modernização das cidades.

No entanto, a fabricação do cimento tem gerado impacto ambiental, principalmente durante a queima das matérias primas, no processo de formação do clínquer ocorre a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), responsável por grande quantidade de CO_2 emitida na atmosfera, além disso, ocorre a combustão dos combustíveis fósseis. Neste cenário, o setor da indústria de cimento, é o terceiro maior consumidor de energia no mundo, e o segundo maior emissor de CO_2 , responsável por aproximadamente 7% da energia utilizada e 7% das emissões globais (Pavesi, 2020).

Em busca de minimizar estes impactos ambientais causados pela indústria do cimento, as últimas décadas foram palco de várias pesquisas sobre materiais alternativos aos convencionais para concretagem. Os novos materiais são normalmente elencados por sua abundância ou, no caso dos resíduos, por resultarem em prejuízos ambientais. (Oliveira *et al.*, 2019).

Um material alternativo que vem ganhando espaço entre as pesquisas é o resíduo de cerâmica vermelha (RCV), já que, estudos recentes indicam que quando beneficiados (moagem, peneiramento e/ou calcinação), possuem atividade pozolânica, sendo promissores para produção de concretos com reduzido impacto ambiental negativo (Motta, Fantin e Hentges, 2024). Além do mais, a NBR 12.653 (ABNT, 2015) afirma que argilas calcinadas e que atendam aos requisitos desta norma, podem ser classificadas como pozolanas.

Grande destes resíduos gerados são oriundos do descarte de peças fabricadas fora das especificações técnicas de comercialização (RCV), bem como, da construção e demolição (RCCV) (Souza, Barbosa e Anjo, 2022). Anualmente a indústria cerâmica gera grandes quantidades de resíduos, que por se enquadrarem na Classe II-B com base na NBR 10.004 (ABNT, 2004), são destinados, em sua maioria, aos aterros sanitários. Substituir o cimento por esses materiais pode promover uma enorme economia de energia e redução de custos. Incluem-se nesses resíduos os de cerâmica vermelha, gerados pelas indústrias de cerâmica estrutural, como tijolos, blocos e telhas. (Oliveira *et al.*, 2019). Paralelamente a geração de resíduo da construção e demolição, especialmente contendo resíduos de tijolos e cerâmica (45% da geração total dos resíduos da construção e demolição), está acelerando globalmente devido às atividades de renovação e reconstrução de edifícios mais antigos (Hwang *et al.* 2019).

O RCCV descartado nas caçambas estacionárias locados nos canteiros de obras junto com outros resíduos da construção, tais como, argamassa é coletado por empresas responsáveis por sua destinação, que podem destinar para aterros ou reciclar para outros fins, como por exemplo, é comum que resíduos da construção de cerâmica vermelha sejam britados em granulometrias diferentes, brita 2 (19mm a 25mm), brita 1 (9,5mm a 19mm) e brita 0 (4,8mm a 9,5mm), acontece através da comercialização por um custo mais acessível, cerca de 30% menor comparado com o material virgem da pedreira, podendo ser utilizado novamente na construção civil de diversas formas, como exemplo na fabricação de artefatos de concreto (meio-fio, paver, lajota), como bica corrida em estradas, etc. (ABRECON, 2019).

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos propondo aplicações do resíduo de cerâmica vermelha, no entanto, grande parte destes, utiliza o resíduo oriundo de peças defeituosas, uma vez, que a utilização cuja origem é material de demolição pode requerer mais etapas de beneficiamento, já que na triagem é possível identificar argamassas e outros materiais aderidos ao material cerâmico (Ledesma *et al.* 2015).

Dentre os trabalhos encontrados que relataram especificamente sobre o RCCV, destacam-se diferentes estudos. O resíduo como substituto de agregado foi tema de estudo de Ledesma *et al.* (2015) analisaram a taxa máxima de substituição viável de areia natural por areia reciclada de resíduos de alvenaria para produção de argamassa. Concluíram que substituições de até 50% são viáveis para uso interno, com desempenho adequado em resistência mecânica e retração controlada. Basta, Lotfy e Shafik (2024) investigaram resíduos de tijolos reciclados como agregados para argamassas leves. Identificaram que, quando combinados com fibras de palha de arroz tratadas, as argamassas apresentaram resistência à compressão de 6,2 MPa e resistência à flexão de 4,4 MPa, indicando viabilidade técnica para essa aplicação. Ainda se tratando da substituição de agregado mudo por resíduo da construção de cerâmica vermelha, Horňáková e Lehner (2020) analisaram a resistividade superficial e volumétrica em concretos com agregados cerâmicos vermelhos reforçados com fibras, demonstrando que esses resíduos podem substituir agregados convencionais, com propriedades como resistividade elétrica diretamente relacionadas à durabilidade estrutural.

Se tratando RCCV como substituto parcial do Cimento, Zegardlo *et al.* (2018) investigaram resíduos cerâmicos decorrentes do processo de regeneração urbana, avaliando sua substituição ao cimento em concreto e argamassa. Identificaram que o pó cerâmico triturado apresentou um índice de atividade pozzolânica significativo, com aumento de 60,9% após 28 dias e 72% após 90 dias, demonstrando reatividade adequada para aplicações em argamassas e concretos não estruturais. Pavesi (2020) confirmou a viabilidade do uso de RCCV em substituição parcial do cimento Portland em concreto convencional, ressaltando benefícios ambientais como a redução do volume em aterros e a diminuição de emissões de CO₂.

Macioski *et al.* (2021) avaliaram o teor de hidróxido de cálcio (portlandita) fixado na reação de ativação alcalina e a microestrutura de resíduos de argila vermelha provenientes de RCD misturados a cal hidratada, variando a razão atômica silício/cálcio. Os resultados indicaram que maior disponibilidade de cal estava associada ao aumento de compostos hidratados e à porosidade. O aumento da razão silício/cálcio resultou em redução de 40% no teor de cal disponível e aumento de 7% no volume de microporos.

Neste contexto, o presente trabalho objetivou avaliar o desempenho físico-químico do RCCV moído como substituição parcial do cimento Portland e sua influência na resistência à compressão em argamassa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Utilizou-se Cimento Portland CP II-F-32 (Tabela I), amplamente empregado em obras pela relação custo-benefício e pela presença de adições minerais (fíler calcário ou pozolana), que favorecem a reação com materiais ricos em sílica e alumina, areia de rio lavada e dividida em 4 frações peneiradas com as seguintes granulometrias: 600µm, 300µm, 150µm e 1,18mm, água, resíduo da construção de cerâmica vermelha coletado em empresa parceira e superplastificante Tecflow 8000 (Grace) utilizado na amostra B.

Tabela 1 – Propriedades do CP-II-F.

Ensaio mecânico				
Idade		Resistência a Compressão		
1 dia	MPa	16,85	-	
3 dias	MPa	26,12	≥10	
7 dias	MPa	29,87	≥20	
28 dias	MPa	35,21	≥32	
Ensaio físico				
Tempo de pega (min)	Início	233,27	≥ 60	
	Fim	298,73	≤ 600	
Água na pasta normal (%)	27,55	-		
Análise química				
Perda ao fogo	%	-	11,59	≤ 12,5
Resíduo insolúvel	%	-	5,18	≤ 7,5
Óxido de Silício	%	SiO ₂	17,36	-
Óxido de Alumínio	%	Al ₂ O ₃	4,44	-
Óxido de Ferro	%	Fe ₂ O ₃	2,96	-
Óxido de Cálcio	%	CaO	55,83	-
Óxido de Magnésio	%	MgO	5,31	-
Sulfatos	%	SO ₃	2,15	≤ 4,5
Óxido de Potássio	%	K ₂ O	0,91	-
Óxido de Sódio	%	Na ₂ O	0,14	-
Cloretos	%	Cl	0,01	-
Anidrido Carbônico	%	CO ₂	9,97	≤ 11,5
Cal Livre	%	-	1,2	-
Fator de Saturação da Cal	100,26	-		
Módulo de Sílica	2,35	-		
Módulo de Alumina	1,5	-		

Fonte: Supremo Secil Cimentos (2021).

2.2 MÉTODOS

O planejamento experimental deste trabalho teve como base as recomendações da NBR 12653 (ABNT, 2014), ademais, foram incluídas análises complementares (Figura 1), dentre essas, o ensaio para determinar a massa específica do resíduo e do cimento CP II-F-32, utilizando o frasco de Le Chatelier seguindo a NM23 (ABNT 2000).

Figura 1 – Procedimentos metodológicos.



Com o intuito de visualizar a morfologia do resíduo, as imagens do MEV foram realizadas em equipamento da Tescan, utilizando uma voltagem de 10 Kv. Para identificar os óxidos presentes no resíduo, espectros de EDS foram obtidos através de um acessório da Oxford acoplado ao MEV. Foram registrados espectros pontuais, com distância de trabalho de 15 mm, tempo de aquisição de 180 segundos e intervalo de energia de 20 keV.

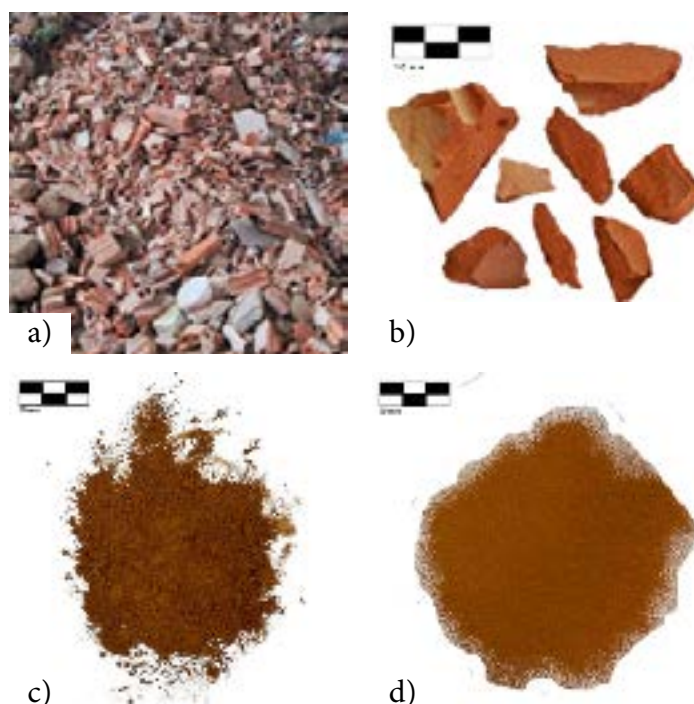
A FTIR foi empregada para a caracterização qualitativa dos grupos funcionais presentes nas partículas, com base na análise das bandas de absorção, que identificam as diferentes ligações químicas na estrutura das amostras (PAVIA *et al.*, 2015). Os espectros de absorção no infravermelho foram adquiridos por meio da técnica de reflexão total atenuada (ATR), acoplada ao sistema FTIR, utilizando um espectrofotômetro Bruker, modelo Vertex 70, operando em uma faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} .

A atividade pozolânica determinada por condutividade elétrica pelo método proposto por Luxán, Madruga e Saavedra (1989). O método consiste na utilização de 200 ml de solução supersaturada de hidróxido de cálcio mantida à temperatura de $40 \pm 1^\circ\text{C}$ sob agitação. Decorridos 60 s, mede-se a condutividade para a solução. Na sequência inseriu-se 5,0 g de argila calcinada e, após 120 s, mediu-se a condutividade para a nova solução com condutivímetro.

2.2.1 Beneficiamento do resíduo da construção de cerâmica vermelha

O RCCV foi coletado no pátio da empresa, sendo necessária a retirada de argamassa e outros materiais aderidos aos tijolos e quebra antes do beneficiamento. Na sequência foi seco em estufa por vinte e quatro horas em temperatura de 105°C, moído em moinho de bolas para ensaio de Abrasão Los Angeles, com relação 1:5 entre a massa da amostra a ser moída e a massa de esferas a serem colocadas no equipamento e o tempo de moagem foi de seis horas e 30 minutos por amostra. Na sequência, o RCCV foi peneirado na peneira 0,6 mm, processo que pode ser observado na (Figura 2). Não foi submetido a beneficiamento térmico, pois buscou-se minimizar gastos energéticos no tratamento e se considerou a calcinação da própria produção dos tijolos cerâmicos.

Figura 2 – Resíduo: a) Material coletado; b) Quebra do material; c) Antes de ser peneirado; d) Após peneiramento.



2.2.2 Preparação das argamassas

Foram preparados dois tipos de argamassas, conforme NBR 12653 (ABNT, 2014), sendo a argamassa A composta por cimento CP II-F-32 e a argamassa B composta por cimento CP II-F-32 com uma substituição de 25% do cimento por RCCV (Tabela II).

Tabela 2 – Traços para as amostras A e B.

MATERIAL	MASSA (g)	
	ARGAMASSA A	ARGAMASSA B
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Material Pozolânico	-	156 ± 0,2
Areia Normal	1872	1872
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo superplastificante	-	0,06

Foram moldados 6 corpos de prova por idade para cada tipo de argamassa, submetidos à cura úmida por 7 e 28 dias, o processo de preparação na argamassadeira foi igual para as duas amostras, sendo adicionado cimento e água misturados por 30 segundos em velocidade baixa, após, foi acrescentado o agregado miúdo durante o tempo de 30 segundos, em velocidade alta por mais 30 segundos, em seguida desligado o aparelho por 1min e 30 segundos e por fim em velocidade alta por mais um minuto. A moldagem contou com 4 camadas no cone de ensaio sendo de 30 golpes cada, feitas pela mesma operadora durante todo o processo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

3.1.1 Caracterização física

Os resultados encontrados do RCCV beneficiado estão dispostos na Tabela III de forma comparativa com outros trabalhos que utilizaram resíduos de cerâmica vermelha oriundos da construção e demolição, mesmo que para outras finalidades, mas apresentam similaridade no beneficiamento por moagem e peneiramento.

Tabela 3 – Características físicas do RCCV.

Propriedades	Resultados	Comparação com outros trabalhos			
		Pavesi (2020)	Zegardlo <i>et al.</i> (2018)	Tsioulou <i>et al.</i> (2020)	Macioski <i>et al.</i> (2021)
Massa específica (g/cm³)	2,66	2,65 - 2,67	-	-	-
Granulometria	d ₁₀ - 1,049 µm d ₅₀ - 9,502 µm d ₉₀ - 52,667 µm	d ₅₀ - 25,4 - 32,56 µm	Grãos de 0 a 4 mm	11% das partículas maiores que 1 mm, 44% das partículas entre 1 e 0,1 mm e 45% das partículas inferiores a 0,1 mm	Passante na peneira de 75µm
Módulo de finura	2,68	-	-	-	-

A massa específica do resíduo de cerâmica vermelha obtida neste estudo, de 2,66 g/cm³, em comparação com a faixa de 2,65 a 2,67 g/cm³ encontrada na literatura Pavesi (2020), sugere que o comportamento do material, especialmente em propriedades relacionadas à densidade, deve ser similar entre os estudos. Além disso, a proximidade dos valores indica uma baixa porosidade intrínseca, típica de materiais cerâmicos moídos, o que pode influenciar positivamente sua reatividade e sua aplicação como material de preenchimento ou substituição em compósitos cimentícios.

O RCCV apresentou a granulometria mais fina entre os trabalhos analisados, caracterizando-se pelos menores valores de d₁₀, d₅₀ e d₉₀, com uma distribuição granulométrica predominantemente

composta por partículas de dimensões reduzidas. Embora o estudo de Tsioulou *et al.* (2020) tenha identificado uma fração de partículas finas (<0,1 mm), a presença de grãos maiores (com tamanhos de até 4 mm, sendo 11% superiores a 1 mm) resultou em uma granulometria globalmente mais grossa.

3.1.2 Teor de óxidos, umidade e perda ao fogo

A caracterização química do RCCV está disposta na Tabela IV. O resíduo atendeu aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014), sendo estes, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$, $\text{SO}_3 \leq 5$, teor de umidade ≤ 3 e perda ao fogo ≤ 6 .

Tabela 4 – Caracterização química do RCCV.

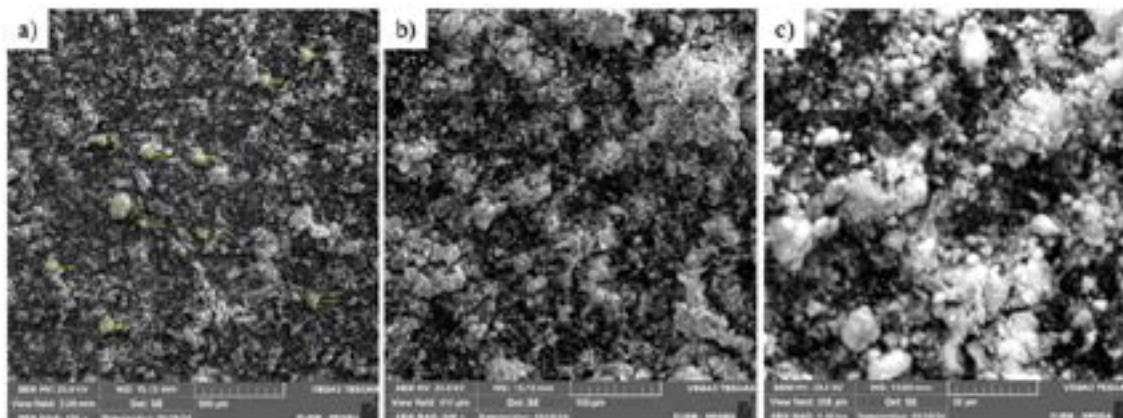
Teor de óxido (%)	Si	Al	Fe	K	Mg	Ti
	55,3	29,6	10,5	2,1	1,4	1,1
Umidade	0,110					
Perda ao fogo	4,10					

Por mais que atenda aos requisitos normativos, apresentou perda ao fogo superior a Pavesi (2020), este resultado pode indicar que o RCCV deste estudo poderia conter água livre ou água ligada (hidratada) que evapora com o aquecimento, compostos orgânicos que queimam e se decompõem, ou carbonatos, por exemplo, carbonato de cálcio (CaCO_3) que se decompõe em CO_2 quando aquecido. O que corrobora com o teor de umidade do resíduo que foi de 0,22%, enquanto em Pavesi (2020) foi de 1,81%. Quanto aos teores de óxidos, apresentou similaridade com o estudo de Tsioulou *et al.* (2020) que encontrou 40-50% de Si, 5-10% e 5-10% Fe, exceto o Al, que neste caso, apresentou teores inferiores entre 5-10%.

A elevada presença de sílica e alumina nos resíduos de cerâmica vermelha, derivada da calcinação durante o processo de fabricação de tijolos, confere ao material características que o tornam adequado como pozolana. Uma vez que a reatividade pozolânica desses materiais ocorre principalmente devido à interação entre os compostos de silicato e aluminossilicato com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) liberado durante a hidratação do cimento, promovendo a formação adicional de hidratos de silicato de cálcio (C-S-H), fundamentais para o aumento da resistência mecânica dos materiais cimentícios (De Weerd *et al.*, 2011; Lapeyre; Kumar, 2018; Meng *et al.*, 2016).

3.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia do resíduo está disposta nas imagens de MEV, nas magnificações 100x (Figura 3a), 500x (Figura 3b) e 1000x (3c). A morfologia das partículas influencia diretamente a disposição do sistema, quando as partículas apresentam formas mais esféricas, a densidade de empacotamento tende a ser maior, formas mais irregulares reduzem a eficiência do empacotamento, devido à fricção gerada pelo contato entre as superfícies irregulares das partículas, assim como às questões geométricas envolvidas. Além disso, a forma das partículas impacta a porosidade do material, já que grãos de forma irregular exigem maior quantidade de água devido à maior absorção de líquido nos espaços intersticiais entre os poros (Castro e Pandofelli, 2009).

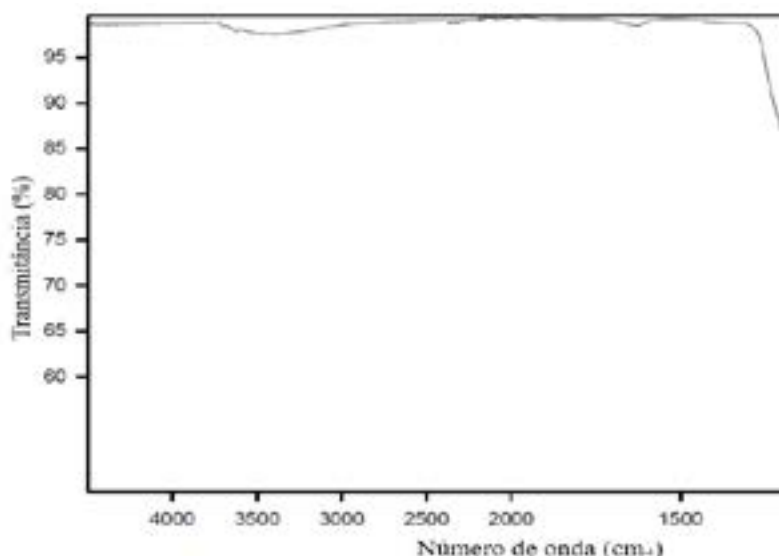
Figura 3 – Morfologia do RCCV.

As partículas de RCCV (Figura 3) apresentaram partículas não uniformes, alguns grãos são mais circulares outros mais alongados, corroborando com Pavesi (2020). Essa não uniformidade pode estar ligada ao processo de moagem promovido (Azevedo, Strecker e Lombardi, 2018). Embora partículas arredondadas tendam a proporcionar um empacotamento mais eficiente em comparação com as formas irregulares, o fato de que as partículas de RCCV são, de maneira geral, não totalmente esféricas, mas variáveis em formas, pode ainda gerar algum nível de ineficiência no preenchimento dos poros. Isso ocorre porque a presença de grãos mais alongados e irregulares, mesmo em um conjunto de partículas predominantemente arredondadas, pode impedir uma compactação ideal, aumentando a porosidade e a necessidade de mais água para preencher os espaços intersticiais. Portanto, mesmo que parte das partículas sejam arredondadas, a heterogeneidade morfológica ainda pode afetar negativamente o preenchimento dos poros, em comparação a um material com partículas completamente esféricas e uniformemente distribuída.

3.1.4 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

O RCCV por ser basicamente um silicato de alumínio hidratado, composto de óxido de alumínio, sílica e água, dependendo da região da jazida de argila para fabricação dos blocos, ou até mesmo o local de coleta do resíduo, podem ser encontrados outros compostos (Rocha, Junior e Lando, 2017) como identificado na caracterização química (Tabela IV). O espectro de FTIR do resíduo está disposto na Figura 4, sendo possível observar diferenças entre suas estruturas organizacionais.

Figura 4 – FTIR do RCCV.



A banda sutil em torno de 3500 cm^{-1} pode ser associada ao estiramento das moléculas de H_2O , geralmente relacionado às vibrações das ligações O-H, indicando a presença de água livre ou ligada à superfície do material (Azevedo, Strecker e Lombardi, 2018). Complementarmente, Rocha, Junior e Lando (2017) identificaram, em cerâmica vermelha, que a banda em 3618 cm^{-1} pode ser atribuída mais especificamente ao estiramento $\text{Al}_2\text{-OH}$. Além disso, o pico em 3425 cm^{-1} foi atribuído ao estiramento Fe-Al-OH, embora este último ainda não esteja bem definido na literatura (Mariani, Villalba e Anaissi, 2013).

No espectro de infravermelho, o pico característico em 1043 cm^{-1} foi associado ao estiramento de Si-O (Azevedo, Strecker e Lombardi, 2018; Rocha, Junior e Lando, 2017). Bandas correspondentes ao SiO_2 foram observadas em números de onda próximos de 778 e 798 cm^{-1} , corroborando as observações de Azevedo, Strecker e Lombardi (2018) e Kaya e Soyer-Uzun (2015). A banda em 580 cm^{-1} foi atribuída às vibrações do grupo Fe-O, presente na goethita, enquanto a banda em 693 cm^{-1} foi relacionada à presença de grupos Al-O.

Adicionalmente, em concordância com Rocha, Junior e Lando (2017), Mariani, Villalba e Anaissi (2013) e Pecharsky e Zavalij (2009), a banda em 910 cm^{-1} foi atribuída à deformação angular Al_2OH . Apesar de sua baixa intensidade, essa banda bem definida indicou a presença de Fe^{3+} e Mg^{2+} . Já a banda em 793 cm^{-1} foi associada a uma interação Al-Mg-OH, podendo também ser atribuída à mistura de minerais como illita e bentonita, cujas bandas são observadas entre 750 e 960 cm^{-1} .

Assim, os resultados evidenciaram que o resíduo de cerâmica vermelha apresenta uma composição mineralógica complexa, composta predominantemente por minerais argilosos, silicatos e óxidos metálicos, características que lhe conferem significativo potencial para aplicação em matrizes cimentícias, argamassas e como aditivo em materiais de construção. A identificação de minerais hidratados e de grupos funcionais específicos, como $\text{Al}_2\text{-OH}$ e Fe-Al-OH, sugere uma reatividade pozolânica intrínseca, o que reforça sua aptidão para participar de reações químicas no contexto de sistemas cimentícios.

3.1.5 Atividade Pozolânica

A variação na condutividade de acordo com o método proposto foi de $0,26\text{ mS/cm}$, o que indica não pozolânico por ser menor que $0,4$ (Tabela V). O método de Luxan para determinação da atividade pozolânica por condutividade elétrica é mais diretamente relacionado à quantidade de íons solúveis

liberados durante a reação entre o material pozolânico e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Esses íons influenciam a condutividade da solução. Embora a superfície específica de um material tenha um impacto na sua reatividade (maior área superficial pode aumentar a taxa de reação), o método de Luxan foca na medida da atividade química do material, ou seja, na quantidade de íons que ele pode liberar em solução. Isso está mais ligado à reatividade química do material do que à sua superfície específica.

Tabela 5 – Avaliação da atividade pozolânica por medição de condutividade.

Classificação do material	Variação na condutividade de acordo com o método proposto (mS/cm)
Não pozolânico	Menor que 0,4
Médio pozolânico	Entre 0,4 e 1,2
Boa pozolanidade	Maior que 1,2

Fonte: Luxán, Madruga e Saavedra (1989).

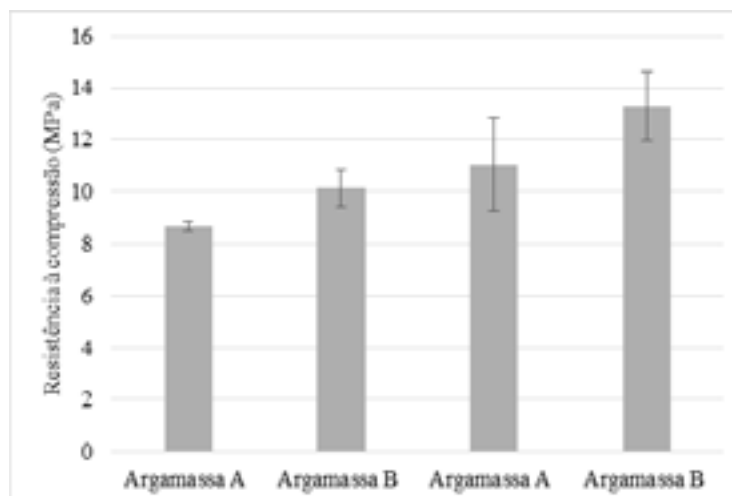
Pavesi (2020) investigou o mesmo tipo de resíduo utilizado neste estudo, realizando moagem em tempos similares. Seus resultados (obtidos por meio do ensaio de análise da pozolanidade com cimento, conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014), e a avaliação do desempenho como pozolana de alta reatividade, de acordo com a NBR 15.894-2 (ABNT, 2010). Diferentemente do método de Luxán, que mede a pozolanidade com base na capacidade de fixação de Ca^{2+} em solução, os métodos normativos empregados por Pavesi (2020) avaliam a atividade pozolânica indiretamente por meio da resistência à compressão do concreto curado, ensaios mecânicos captam efeitos acumulados ao longo do tempo, inclusive de reações lentas ou sinérgicas com o cimento, refletindo a habilidade do material em reagir com o Ca(OH)_2 e formar produtos cimentícios adicionais.

A literatura evidencia que a atividade pozolânica de materiais suplementares, como cinzas de bagaço de cana-de-açúcar moídas, está intimamente relacionada à finura das partículas (Cordeiro et al., 2009). A reação pozolânica depende da interação do material com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, promovendo a formação de hidratos de silicato de cálcio (CSH), principal responsável pelo aumento da resistência do concreto. Neste contexto, Ahmed et al. (2019) destacam que a superfície específica dos materiais é um fator determinante, influenciando diretamente a cinética de hidratação e a resistência à compressão. Assim, para o resíduo de cerâmica vermelha (RCCV), a atividade pozolânica pode ser aprimorada por ajustes no beneficiamento físico, como maior tempo de moagem, ou químico, por processos de calcinação ou outros tratamentos.

3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA

A Figura 5 apresenta o resultado de resistência à compressão das argamassas obtido por meio da NBR 7215 (ABNT, 2019). Os resultados foram analisados estatisticamente por meio da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para comparações e agrupamentos de médias múltiplas, ambos com probabilidade de 5%.

Figura 5 – Resistência à compressão.



Como observado, em todas as idades a resistência à compressão da argamassa com RCCV foi maior, 16,8% aos 7 dias e 20% aos 28 dias. Quanto aos resultados da ANOVA, aos 7 dias a diferença foi significativa (p -valor=0,03) e aos 28 dias não houve diferença significativa (p -valor=0,16). No entanto, mesmo não havendo diferença significativa, a resistência foi maior com o RCCV. O desempenho das argamassas A e B pode ser comparado na Tabela VI

Tabela 6 – Avaliação da Argamassas A (sem RCCV) e B (com RCCV).

Critério	Argamassa A	Argamassa B	Diferença / Observação
Resistência à compressão - 7 dias	25 MPa	29,2 MPa	+16,8% – diferença significativa ($p = 0,03$)
Resistência à compressão - 28 dias	35 MPa	42 MPa	+20% – diferença não significativa ($p = 0,16$)
Efeito fíler (preenchimento)	Ausente	Presente	Redução da porosidade e melhora da microestrutura
Reação química (SiO_2 , Al_2O_3)	Limitado	Presente	Reações secundárias com $\text{Ca}(\text{OH})_2$
Finura do material	$\approx 3.000 \text{ cm}^2/\text{g}$	$\approx 3.100 - 3.300 \text{ cm}^2/\text{g}$	RCCV com finura próxima ao cimento, pode favorecer reação e empacotamento
Pozolanicidade direta	—	Baixa/ausente	Predominância de efeitos mecânicos (fíler + nucleação)

A presença do resíduo de cerâmica vermelha (RCCV) nos sistemas cimentícios, mesmo sem apresentar propriedades pozolânicas isoladamente (detectadas pelo método de Lúxan), contribuiu para o aumento da resistência à compressão, a interação entre o RCCV, água e cimento pode ter gerado melhorias nas propriedades mecânicas, principalmente por dois efeitos principais: o efeito fíler e potenciais contribuições químicas.

Primeiramente, o efeito fíler, relacionado ao preenchimento proporcionado pelas partículas finas do resíduo, desempenha um papel crucial na microestrutura da matriz cimentícia. Conforme destacado por Wang et al. (2018), partículas finas podem refinar a microestrutura e reduzir a porosidade, atuando como um material de enchimento que otimiza a densidade do compósito. Esse efeito é amplificado pelo

alto teor de óxidos como SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que no RCCV somam mais de 70% (Vieira, 2005), contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas, mesmo que de forma indireta.

A composição química do RCCV, especialmente pela presença de óxidos como SiO_2 e Al_2O_3 , pode participar de reações químicas secundárias, promovendo o aparecimento de produtos cimentícios adicionais. Esses óxidos, embora não reativos em sua totalidade, podem interagir com o Ca(OH)_2 em idades mais avançadas, resultando na formação de fases hidratadas com menor porosidade. No entanto, para que ocorra atividade pozolânica significativa, seria necessário um tratamento térmico que promovesse a desidroxilação completa e aumentasse a desordem estrutural, como observado em argilas calcinadas (Mohammed, 2017).

Adicionalmente, a finura do RCCV, que deve ser próxima ou equivalente à do cimento Portland, influencia a eficiência de seus mecanismos no compósito cimentício. Apesar da ausência de pozzolanidade direta, a sinergia entre os efeitos de preenchimento, nucleação e diluição contribui para a melhoria da resistência à compressão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou o desempenho físico-químico do resíduo de cerâmica vermelha moído como substituição parcial do cimento Portland e sua influência na resistência à compressão de argamassas, buscando responder aos objetivos propostos. Os resultados indicaram que, embora o RCCV não tenha apresentado atividade pozolânica efetiva segundo os critérios normativos, sua incorporação mostrou benefícios notáveis nas propriedades mecânicas das misturas cimentícias.

A análise química e granulométrica revelou que o RCCV atende aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014), confirmando a presença de óxidos de silício, alumínio e ferro (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) em teores superiores a 70%, compatíveis com materiais de potencial pozolânico. Contudo, a ausência de reação pozolânica efetiva pode ser atribuída a limitações no beneficiamento físico, como a insuficiente moagem, que reduz a área superficial reativa, e à falta de tratamentos térmicos, como a calcinação, que poderiam promover maior desordem estrutural e reatividade.

Apesar dessas limitações, o RCCV contribuiu para o aumento da resistência à compressão das argamassas, mesmo sem apresentar reatividade pozolânica significativa. Esse comportamento pode ser explicado por mecanismos como o efeito fíler, em que as partículas finas do resíduo atuam no preenchimento dos poros da matriz cimentícia, reduzindo a porosidade e refinando a microestrutura, além de possíveis interações químicas limitadas entre os componentes do resíduo e a matriz cimentícia.

A possibilidade de utilização do RCCV moído sem a necessidade de processos complexos de beneficiamento reforça seu potencial como adição em matrizes cimentícias, promovendo benefícios ambientais e econômicos. Sua aplicação pode contribuir para a redução de resíduos sólidos gerados pela indústria cerâmica, além de possibilitar a economia de energia e recursos naturais, alinhando-se às práticas de construção sustentável.

No entanto, para maximizar seu desempenho, futuros estudos devem explorar ajustes no beneficiamento do RCCV, incluindo tratamentos térmicos e aprimoramento da moagem, além de investigar combinações com outras adições minerais e variáveis de processo. Tais avanços podem ampliar suas aplicações na construção civil e consolidar o RCCV como um material sustentável e eficiente.

Assim, os achados deste trabalho demonstram o potencial do RCCV como um recurso alternativo e sustentável na construção civil, desde que suas limitações sejam devidamente abordadas por meio de investigações complementares e aprimoramento das técnicas de processamento.

5. REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.894-2**:
Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2:
Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 24**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2002.
- ABRECON. Associação Brasileira para reciclagem de RCD. **Reciclagem de entulho: fator vital para a construção sustentável**, 2016. Disponível em: <https://abrecon.org.br/reciclagem-de-entulho-fator-vital-para-construcao-sustentavel/>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- AHMED, M. B.; JOHIR, M. A.; ZHOU, J. L.; NGO, H. H.; NGHIEM, L. D.; RICHARDSON, C.; BRYANT, M. R. Activated carbon preparation from biomass feedstock: clean production and carbon dioxide adsorption. **Journal of Cleaner Production**, v. 225, p. 405-413, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.342>.
- ALUJAS, A.; FERNÁNDEZ, R.; QUINTANA, R.; SCRIVENER, K. L.; MARTIRENA, F. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. **Applied Clay Science**, v. 108, p. 94-101, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>
- AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 64, 2018. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712420>
- BASTA, A.H.; LOTFY, V.F.; SHAFIK, E.S. Synergistic valorization of rice straw and red brick demolition in development performance of lightweight cement mortars. **Journal of Building Engineering**, v. 92, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109769>
- CASTRO, A. L. PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>

- CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic + admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39 (2), p. 110-115, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>
- DE WEERDT, K. et al. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 279–291, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>
- HORŇÁKOVÁ, M.; LEHNER, P. Relationship of Surface and Bulk Resistivity in the Case of Mechanically Damaged Fibre Reinforced Red Ceramic Waste Aggregate Concrete. **Materials**, v.13, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13235501>
- HWANG, C.; YEHUALAW, M.D.; VO, D.; HUYNH, T. Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 519-529, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.143>
- KAYA, K.; SOYER-UZUN, S. **Ceramics International**. 42, p. 7406, 2015.
- LAPEYRE, J.; KUMAR, A. Influence of pozzolanic additives on hydration mechanisms of tricalcium silicate. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 101, p. 3557–3574, 2018. <https://doi.org/10.1111/jace.15518>
- LEDESMA, E.F.; JIMÉNEZ, J.R.; AYUSO, J.; FERNÁNDEZ, J.M.; et al. Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production – Part-I: ceramic masonry waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 692-706, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.084>
- LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v. 19, p. 63-68, 1989. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90066-5)
- MACIOSKI, G.; SOTO, N.T.A.; MEDEIROS, M.H.F.; FILHO, J.H.; et al. Portlandite consumption by red ceramic waste due to alkali activation reaction. **Ambiente Construído**, v. 21, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100490>
- MARIANI, F.Q.; VILLALBA, J.C.; ANAISSI, F.J. **Orbital**. 5, n. 4, p. 249, 2013.
- MENG, W. et al. Influence of silica fume and polycarboxylate ether dispersant on hydration mechanisms of cement. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 120, p. 2681426823, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b08121>
- MOHAMMED, S. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. **Construction and Building Materials**, v. 140, p.10-19, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.078>
- MOTTA, E. A. M.; FANTIN, T. V. L.; HENTGES, T. I. Avaliação técnica e ambiental de concretos contendo resíduo de cerâmica vermelha como substituição combinada de cimento e agregado miúdo. **Revista Tecnológica**, v. 29 (2), 2024. <https://doi.org/10.4025/revtecnol.v29i2.51780>.
- NEVES, L.; PAIVA, F. F. G.; BACARIN, G. B.; CABRERA, F. C.; et al. Clay brick waste: new filler to natural rubber composite. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v.15, p.3-9, 2021. <https://doi.org/10.4090/juee.2020.v15n1.003009>
- OLIVEIRA, E. M.; et al. Análise da resistência à compressão e tração de argamassa com adição de resíduo de cerâmica vermelha. **Revista Matéria**, ISSN 1517-7076, 2019.
- PAVESI, T. B. **Emprego de resíduos da construção civil de cerâmica vermelha (RCCCV) em substituição parcial do cimento Portland no concreto convencional**. 2020. 203 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Centro de Ciências Tecnológicas, Blumenau, 2020.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. **Introdução à espectroscopia**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

PECHARSKY, V.K.; ZAVALIJ, P.Y. **Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials**. 2. ed. New York: Springer, 2009. p. 741.

ROCHA, R. D. C.; JÚNIOR, H. E. Z.; LANDO, T. Utilização de planejamento experimental no estudo para imobilização de lodo galvânico em cerâmica vermelha para minimização de impactos ambientais. **Cerâmica**, v. 63, 2017. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633651964>

SOUZA, M.M.; BARBOSA, N.P.; ANJOS, M.A.S. Characteristics and utilization prospects of red ceramic waste in lightweight aggregates: a systematic review. **Cerâmica**, v. 68, 2022. <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683883330>

SUPREMO SECIL CIMENTOS. **Laudo Técnico CP-II-F-32. 2021**. Disponível em: < <https://www.supremocimento.com.br/wp-content/uploads/2021/08/Laudo-Tecnico-Supremo-Cimento-CP-II-F-32-ABR-21.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2023.

TSIOULOU, O.; LAMPROPOULOS, A.; NEOCLEOUS, K.; KYRIAKIDES, N.; et al. (2021). Development of an innovative one-part green concrete. **IABSE Congress Report**, p. 874-880. <https://doi.org/10.2749/christchurch.2021.0874>.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

WANG, D. et al. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 659–672, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075>

ZEGARŁO, B.; DRZYMAŁA, T.; ANDRZEJUK, W.; TOKARSKI, D.; et al. Ceramic wastes arising in the process of urban regeneration – possibility of using them as cement substitute for concrete and mortar. **Scientific Review Engineering and Environmental Sciences**, v. 27, p. 452-462, 2018. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2018.27.4.43>

ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; LI, H.; LI, Y.; SHEN, L. Demanda global por cimento: Uma revisão das tendências e dos fatores impulsionadores. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 173, p. 105701, 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105701.