

ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES AGENTES POROGÊNICOS EM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA SUSTENTÁVEL

Jhonatan Leopoldino Gonçalves¹
Cleudson da Rosa Alves²

Resumo

A busca por materiais alternativos de baixo peso e com propriedades adaptáveis vem sendo foco de diversos trabalhos atualmente. A influência da adição de pó de alumínio (PA) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como agentes de expansão em argamassas geopoliméricas com adição de resíduo de polimento de porcelanato foi investigada experimentalmente por meio de ensaios de caracterização física e mecânica. A porosidade total das argamassas com pó de alumínio variou de 38,49% a 57,21%, atingindo mínimos e máximos em concentrações de 0,1% e 0,3% de PA, respectivamente, enquanto a resistência à compressão diminuiu de 13,61MPa a 6,47MPa nesse intervalo. Para as argamassas com peróxido de hidrogênio, a porosidade total variou de 45,32% a 61,72%, atingindo extremos em concentrações de 0,4% e 1,2% de H_2O_2 , com uma correspondente redução na resistência à compressão de 12,60MPa a 3,80MPa. O índice de consistência das argamassas verificou uma melhora em todas as formulações com adição de agentes porogênicos, alcançando maior índice em 1,2% H_2O_2 . De maneira geral, os resultados indicam que a incorporação destes dois agentes porogênicos se mostram eficientes para promover uma boa aeração na matriz geopolimérica, sendo que o resíduo utilizado não demonstrou incompatibilidade na formação de bolhas para o geopolímero.

Palavras-Chave: Geopolímero poroso; Pó de alumínio; Peróxido de hidrogênio; Surfactante; Geopolímeros leves.

COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT POROGENIC AGENTS IN SUSTAINABLE GEOPOLYMER MORTAR

Abstract

The search for alternative low-weight materials with adapted properties has currently been the focus of several works. The influence of adding aluminum powder (PA) and hydrogen peroxide (H_2O_2) as blowing agents in geopolymetric mortars with the addition of porcelain polishing residue was experimentally investigated through physical and mechanical characterization tests. The total porosity of mortars with aluminum powder varied from 38.49% to 57.21%, reaching minimums and maximums at concentrations of 0.1% and 0.3% of PA, respectively, while the compression resistance decreased from 13.61MPa to 6.47MPa in this range. For mortars with hydrogen peroxide, the total porosity varied from 45.32% to 61.72%, reaching extremes at concentrations of 0.4%

¹¹ Acadêmico do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Criciúma. E-mail: jhonatan.l@aluno.ifsc.edu.br

²² Engenheiro civil, mestre, docente do Núcleo de Construção Civil do IFSC Campus Criciúma. E-mail: cleudson.alves@ifsc.edu.br

and 1.2% of H₂O₂, with a corresponding reduction in compression resistance of 12.60MPa to 3.80MPa. The mortar consistency index showed an improvement in all formulations with the addition of porogenic agents, reaching a higher index of 1.2% H₂O₂. In general, the results indicate that the incorporation of these two porogenic agents are efficient in promoting good aeration in the geopolymer matrix, and the residue used did not demonstrate incompatibility in the formation of bubbles for the geopolymer.

Keywords: Porous geopolymer; Aluminum powder; Hydrogen peroxide; Surfactant; Lightweight geopolymers.

1. INTRODUÇÃO

A busca por materiais de construção sustentáveis e eficientes tem sido a preocupação central na indústria da construção civil nas últimas décadas. A pesquisa por soluções ecoeficientes levou à criação e utilização de vários materiais alternativos, um deles o geopolímero, um material patenteado em 1978, mas que apenas nas últimas décadas entrou no radar mundial.

Geopolímeros são materiais inorgânicos não metálicos altamente promissores devido ao seu baixo custo, baixas emissões de CO₂ na produção, facilidade de síntese, além de sua versatilidade em aplicações como revestimentos, adesivos, materiais tamponantes de pH e cimentos alternativos para a construção (ZHANG *et al.*, 2021).

Para que haja entendimento, geopolímeros são caracterizados por sua composição química distinta, que utiliza aluminossilicatos e ativadores alcalinos, resultando em um material com propriedades notáveis, como elevada resistência, baixa permeabilidade e durabilidade excepcional (DAVIDOVITS, 1991).

Geopolímeros de metacaulim são frequentemente usados como um "sistema modelo" devido a sua composição química e mineralógica que fornece os aspectos e relações molares ideais para a geopolimerização (PROVIS, DEVENTER e VAN, 2007).

Ramos *et al.* (2018) obtiveram em suas pesquisas geopolímeros com resistência a compressão de até 72MPa utilizando resíduo de polimento de porcelanato como substituto parcial ao metacaulim, demonstrando o potencial de utilização desse resíduo.

Além disso, Bai e Colombo (2018) destacam a capacidade de desenvolver geopolímeros leves com uma notável porosidade de até 70%. Essa porosidade é particularmente vantajosa, uma vez que materiais leves são altamente desejáveis em setores como construção, aeroespacial e para isolamento térmico. Os geopolímeros leves, devido à sua porosidade controlada, oferecem propriedades únicas, tornando-os uma alternativa atraente a outros materiais convencionais.

Embora estudos recentes tenham revelado o potencial dos geopolímeros leves e de alta resistência (ALVES *et al.*, 2023; SENFF *et al.*, 2020), é crucial reconhecer que há uma necessidade contínua de pesquisa e exploração para abrir novas portas para esse material inovador.

Diversos agentes formadores de poros em geopolímeros foram estudados recentemente (BAI e COLOMBO, 2018; NOVAIS, PULLAR e LABRINCHA, 2020; ZHANG *et al.*, 2021), porém dentre os diversos agentes, o efeito do H₂O₂ como agente de expansão em geopolímeros leves à base de perlita, cinza volante, ou compósitos

diversos mostrou-se eficiente e de custo baixo (ABDOLLAHNEJAD et al., 2015; FENG et al., 2015).

No mesmo contexto, em um trabalho similar, Senff *et al.* (2020) produziram argamassas à base de cinza volante e metacaulim, com pó de alumínio como agente formador de poros, os autores produziram argamassas com densidade aparente de 1000 kg/m^3 que apresentaram resistência à compressão em torno de 5 MPa.

Este trabalho concentra-se em avaliar o desempenho de diferentes agentes porogênicos em argamassas geopoliméricas com a adição de resíduo de polimento de porcelanato, um subproduto da indústria cerâmica. O objetivo é identificar as formulações mais promissoras para aplicações na construção civil e com viés na sustentabilidade, considerando propriedades cruciais, como resistência mecânica, consistência, densidade e porosidade.

A importância deste estudo reside na contribuição para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis na construção civil, reduzindo a dependência do cimento Portland e promovendo a reutilização de resíduos industriais. Além disso, a pesquisa visa fornecer subsídios para a indústria da construção civil na escolha de formulações de argamassas geopoliméricas mais eficazes e ecologicamente conscientes.

A análise do desempenho de diferentes agentes torna-se, portanto, um campo de pesquisa crítico para a compreensão de como esses materiais inovadores podem ser adaptados e aprimorados para atender às demandas da construção civil por materiais de baixo peso e adaptáveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

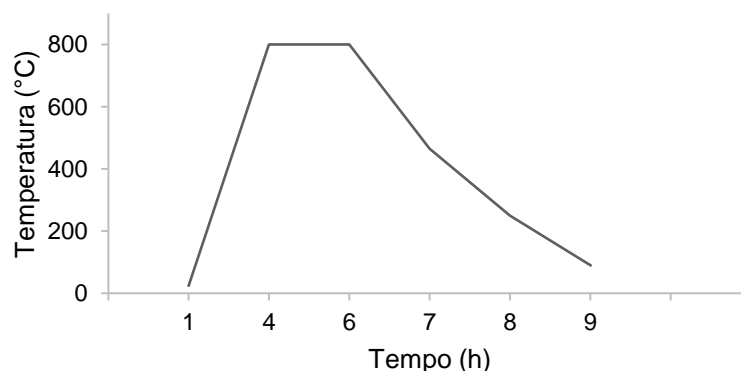
2.1 MATERIAIS

2.1.1 Precursor

O metacaulim empregado como fonte precursora foi obtido por meio da calcinação de caulim fornecido por uma empresa de insumos para cerâmica situada na região de Içara/SC.

O caulim foi calcinado por 120 minutos a temperatura de 800°C com uma taxa de aquecimento de $6^\circ\text{C}/\text{min}$. Após a calcinação o processo de resfriamento do metacaulim deu-se naturalmente. O processo seguiu o modelo proposto por Rashad (2013), conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Curva de calcinação utilizada



Fonte: Adaptado de Rashad (2013)

2.1.2 Resíduo de polimento de porcelanato

O resíduo de polimento de porcelanato foi utilizado nesta pesquisa como fonte adicional de sílica e alumina, tendo sido cedido por uma empresa produtora de cerâmica de Cocal do Sul/SC. Ramos *et al.* (2020) estudaram o comportamento desse mesmo resíduo e descrevem na Tabela 1 a composição química do RPP estudado.

Tabela 1 - Composição química do RPP

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	ZrO ₂	PF
67,7	21,0	1,8	0,7	2,6	1,1	2,3	1,8	0,3	0,8

Fonte: RAMOS *et al.* (2020) – Adaptado pelo autor.

Sendo PF a perda ao fogo da amostra.

Para tornar esse resíduo utilizável foi realizado sua secagem até massa constante a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Posteriormente, o RPP foi destorroado e moído por 5 minutos em um moinho de bolas da marca Servitech a 400rpm para desaglutinação dos grãos.

2.1.3 Ativadores alcalinos

Foram utilizados dois ativadores neste estudo, sendo eles o silicato de sódio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$) e o hidróxido de sódio (NaOH). O silicato de sódio foi disponibilizado pela empresa Manchester Química do Brasil e sua composição química é descrita na Tabela 2. Visualmente apresenta-se como um líquido incolor espesso com densidade de $1,4 \text{ g/cm}^3$. Além disso, ambos aceleram a solvatação do caulim, favorecendo a formação de hidratos estáveis.

Tabela 2 - Composição química do silicato de sódio

Elemento	Teor (%)
SiO ₂	29
Na ₂ O	8,5
H ₂ O	62,5

Fonte: MQB (2023)

O hidróxido de sódio foi obtido junto à empresa Neon Comercial LTDA, possui pureza de 97%, é apresentado no estado sólido e em formato de micro pérolas, possui densidade de $2,13 \text{ g/cm}^3$ e peso molecular de 40 g/mol . Além disso, o hidróxido de sódio apresenta comportamento instável, higroscópico e dissociando-se completamente em água.

2.1.4 Agentes porogênicos

Foram utilizados dois agentes porogênicos distintos nesta pesquisa, sendo eles o peróxido de hidrogênio e o pó de alumínio. O primeiro sendo comercializado pela empresa Êxodo Científica com concentração de 35% e 130 volumes PA, apresenta-se como um líquido pouco viscoso com coloração transparente. O pó de alumínio de mesma marca possui pureza de 97% e visualmente é um pó opaco de coloração cinzenta.

Como agente surfactante foi utilizado dodecil sulfato de sódio (SDS) da marca Sigma-Aldrich. Sua fórmula química é $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$ e seu peso molecular

288,38 g/mol. Para ser utilizado solubilizou-se o SDS em água destilada utilizando um agitador mecânico por um período de 12 horas. O teor da solução resultante foi 2%.

A utilização do surfactante em conjunto com o agente incorporador de ar se faz necessário para evitar fenômenos como a coalescência e a drenagem dos poros (KLIMA et al., 2022).

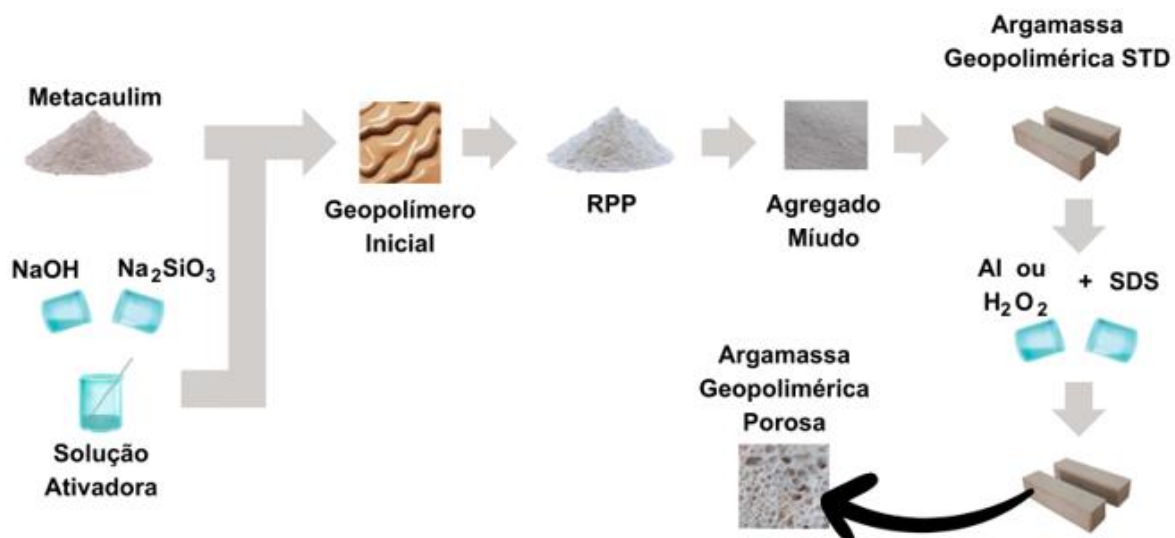
2.1.5 Agregado Miúdo

Como agregado miúdo utilizou-se uma mistura de areia normal brasileira fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas com 96% de sílica, conforme a NBR 7214/2015. Com o intuito de garantir um bom empacotamento dos grãos foram utilizadas 3 frações de areia, sendo elas, #30 ($\varnothing_m 1,2 - 0,6$ mm), #50 ($\varnothing_m 0,6 - 0,3$ mm) e #100 ($\varnothing_m 0,3 - 0,15$ mm).

2.2 SÍNTESE DOS GEOPOLÍMEROS

O fluxograma da Figura 2 ilustra as etapas seguidas durante o procedimento experimental desenvolvido neste estudo. O método de dosagem está descrito em sequência.

Figura 2 - Etapas do processo experimental



Fonte: Autor (2023)

2.2.1 Dosagem

Visando analisar o comportamento dos agentes porogênicos, delineou-se um arranjo experimental com 6 formulações distintas e um traço de referência. O modelo desenvolvido possui dois fatores e três subníveis: pó de alumínio, variando 0,1%, 0,2% e 0,3% do material precursor (MK + RPP) e peróxido de hidrogênio, variando 0,4%, 0,8% e 1,2% da pasta geopolimérica. O delineamento experimental pode ser observado na Tabela 3.

O teor dos agentes porogênicos adicionados foram determinados seguindo padrões já definidos pela literatura, como em Hartmann (2016) e Alves et al. (2023).

O aditivo surfactante SDS foi adicionado em todos os traços junto com o agente porogênico. Definiu-se o percentual de SDS a ser utilizado em 0,8% conforme já proposto por anteriormente por Yan *et al.* (2020).

Tabela 3 - Planejamento experimental

Amostra	Agente Porogênico	% Precursor	% Pasta Geopolimérica
REF	-	-	-
PA01	PA	0,1%	-
PA02	PA	0,2%	-
PA03	PA	0,3%	-
PH04	PH	-	0,4%
PH08	PH	-	0,8%
PH12	PH	-	1,2%

Fonte: Autor (2023)

2.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A Tabela 4 demonstra o teor em massa (g) dos materiais utilizados durante a execução do processo experimental proposto.

Tabela 4 - Teor em massa (g) dos materiais utilizados nas amostras

Amostra	MK	RPP	Na ₂ SiO ₃	NaOH	H ₂ O ₂	PA	Areia	SDS
REF	315,00	135,00	480,00	70,00	-	-	1000,00	-
PA01	315,00	135,00	480,00	70,00	-	0,45	1000,00	8,00
PA02	315,00	135,00	480,00	70,00	-	0,90	1000,00	8,00
PA03	315,00	135,00	480,00	70,00	-	1,35	1000,00	8,00
PH04	315,00	135,00	480,00	70,00	4,00		1000,00	8,00
PH08	315,00	135,00	480,00	70,00	8,00		1000,00	8,00
PH12	315,00	135,00	480,00	70,00	12,00		1000,00	8,00

Fonte: Autor (2023)

Os procedimentos a seguir apresentam os passos utilizados para produzir os corpos de prova analisados neste estudo.

1. Inicialmente pesou-se em capela todos os materiais utilizados em uma balança com sensibilidade de 0,01g.
2. Misturou-se manualmente por 3 minutos o silicato de sódio e o hidróxido de sódio, obtendo-se uma solução homogênea, quase transparente com aspecto viscoso. Após homogeneizada deixou-se a mistura separada até atingir a temperatura ambiente (25 ± 2 °C), visto que a reação desses materiais é exotérmica liberando calor. Com termômetro digital verificou-se a temperatura da solução alcalina até pronta para uso.
3. Em um agitador mecânico, com velocidade aproximada de 300rpm, misturou-se o metacaulim com a solução ativadora por 3 minutos. Ao final desse procedimento formou-se uma pasta geopolimérica pura.

4. Em sequência adicionou-se o RPP ao geopolímero, misturando-os em mesma velocidade por mais 3 minutos.
5. A seguir misturou-se agregado miúdo à pasta por 3 minutos na mesma velocidade. Ao final desta etapa obteve-se a argamassa geopolimérica padrão utilizada neste estudo.
6. Em seguida para os demais traços, adicionou-se os teores do agente porogênico (PA ou H₂O₂) e surfactante. Ambos foram incorporados simultaneamente por 1 minuto a 300 RPM. Nesse ponto obtém-se uma argamassa geopolimérica porosa.
7. A argamassa resultante é utilizada para o ensaio de consistência, enquanto que o restante é moldado em corpos de prova prismáticos, envelopadas em plástico filme e secados em estufa com temperatura de 24°C por 48h.
8. Finalmente os corpos de prova são desmoldados e isolados em plástico filme novamente até completar 28 dias em temperatura ambiente.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO PRECURSOR

2.4.1 Fluorescência de raios X (FRX)

A análise da composição química do metacaulim foi realizada através da espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX) utilizando um equipamento Shimadzu EDX 7000, no laboratório LACAMI da SATC. O método aplicado foi a análise quantitativa de óxidos para amostras sólidas. Antes da análise, as amostras foram preparadas conforme a norma ASTM D 7348 (2021), com a inclusão do teste de perda ao fogo.

2.4.2 Análise microestrutural do metacaulim (DRX)

A identificação das fases cristalinas contidas no metacaulim foi efetuada por meio da técnica de difração de raios X (DRX). Para esse propósito, recorreu-se a um difratômetro de raios X do modelo LabX XRD-6100, fabricado pela empresa Shimadzu. A determinação das fases foi obtida através da comparação dos resultados com os difratogramas contidos no banco de dados Crystallography Open Database (COD 2018), empregando o software Match!3. A análise abrangeu um intervalo de ângulos 2θ que se estendeu de 2 a 80 graus. A aquisição dos dados deu-se a uma taxa de leitura correspondente a 2 graus por minuto, com uma configuração de aceleração de 30 kV e 30 mA e fazendo uso de um comprimento de onda de Cu K α 1 com $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$. O resultado final é obtido a partir do difratograma de raios X com as fases identificadas, com tratativa de dados no software Origin 2019 Professional.

2.4.3 Distribuição granulométrica

A determinação do tamanho médio e da distribuição das partículas nas amostras de metacaulim e RPP foram realizadas por meio de um analisador de partículas utilizando difração a laser em ambiente úmido, com álcool etílico como solvente. O equipamento empregado, o modelo CILAS 1064, está disponível no laboratório de caracterização do Instituto de Engenharia e Tecnologia da UNESC e cobre uma faixa analítica ampla, abrangendo tamanhos de partículas que variam de 0,04 a 500 μm , divididos em 100 classes distintas para análise.

2.5 ENSAIOS

2.5.1 Ensaio de consistência

A consistência das argamassas deu-se através do ensaio “Flow Table” regido pela NBR 13276/2016. Esse ensaio foi realizado logo após a produção das amostras.

O procedimento descrito na NBR 13276/2016 consiste em inserir a argamassa em um tronco de cone. Em seguida, o cone é removido, deixando a amostra sobre uma mesa. Posteriormente, uma alavanca lateral é girada, aplicando 30 golpes em 30 segundos que dispersam a amostra uniformemente sobre a superfície da mesa conforme Figura 3. Finalmente, as dimensões finais da amostra são medidas em dois pontos distintos, e a média aritmética é calculada. Os valores de espalhamento aceitáveis para uso são entre 230 e 260mm.

Figura 3 - Argamassa geopolimérica após ensaio “flow table”



Fonte: Autor (2023)

2.5.2 Ensaio de Resistência à Compressão

Realizou-se o ensaio de resistência à compressão das argamassas geopoliméricas conforme ASTM C270/2019 em um equipamento EMIC DL30000N. Este ensaio consiste em comprimir os corpos de prova com 40x40x40 mm a uma taxa constante de 500 N/s até que ocorra o rompimento do mesmo. Para cada traço de argamassa, seis corpos de prova foram ensaiados.

2.5.3 Ensaio de Resistência à Tração por Flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão seguiu os preceitos da ASTM C348/2021 que fornece os procedimentos para a execução desse ensaio, sendo um procedimento fundamental para avaliar a capacidade de uma argamassa de suportar cargas de tração. Utilizou-se um equipamento EMIC DL30000N para a realização do ensaio que consiste em flexionar corpos de prova com 40x40x160 mm a uma taxa constante de 50 N/s até que ocorra a fissura do mesmo por esforço de tração na parte inferior. Foram ensaiados três corpos de prova para cada formulação.

2.6 PROPRIEDADES FÍSICAS

A caracterização física das amostras deu-se com 28 dias de cura visando

encontrar correlações com os dados obtidos nos ensaios mecânicos. O ensaio seguiu o princípio de Arquimedes, já tendo sido utilizado por Maccarini (2015) e consiste em:

1. Secar as amostras até massa constante em estufa a 105 ± 5 °C. Após isso, pesa-las em balança com 0,01g de precisão. Os valores obtidos representam a massa seca (ms) das amostras.
2. Manter as amostras imersas em água à temperatura ambiente (25 ± 2 °C) por 72h, seguindo de pesagem hidrostática (mi) que consiste na pesagem da amostra submersa seguindo o princípio de Arquimedes.
3. Retirar as amostras da água, secar sua superfície com pano úmido e pesa-las. O resultado obtido é a massa saturada com superfície seca (mss) das amostras.

Após coletar o resultado das amostras, utilizou-se as equações a seguir para determinar os valores da absorção de água, porosidade aberta e densidade aparente.

$$\text{Eq 1. Absorção de água} = \frac{mss - ms}{ms} \times 100 ; \quad (\%)$$

$$\text{Eq 2. Densidade aparente} = \frac{ms}{mss - mi} ; \quad (\text{g/cm}^3)$$

A densidade real dos grupos analisados foi determinada conforme NBR 9776/2003. Através da densidade real foi determinado a porosidade das amostras conforme equação abaixo de Landi et al. (2013).

$$\text{Eq 3. Porosidade total} = \left[1 - \left(\frac{\text{Densidade aparente}}{\text{Densidade real}} \right) \right] \times 100 ; \quad (\%)$$

No grupo com PA a densidade real foi de $2,15 \text{ g/cm}^3$ e no grupo com H_2O_2 foi de $2,19 \text{ g/cm}^3$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANALISE QUÍMICA DO PRECURSOR

3.1.1 Fluorescência de raios-x

Os dados do metacaulim utilizado neste estudo encontram-se dispostos na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Composição química do metacaulim

Óxidos	Teor (%)
SiO ₂	56,29
Al ₂ O ₃	40,56
K ₂ O	0,67
Fe ₂ O ₃	0,66
Outros < 0,015	0,07
Perda ao Fogo	1,75

Fonte: Autor (2023)

O metacaulim resultante da calcinação apresenta um elevado teor de

aluminossilicatos, sendo 56,29% de sílica e 40,56% de alumina, enquadrando-o como material pozolânico segundo a NBR 12653/2014. Além disso, a soma desses teores totaliza 96,85% demonstrando o elevado teor de pureza do material.

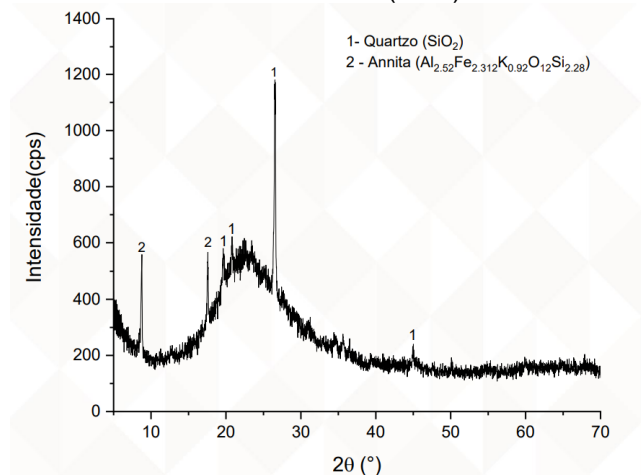
A razão entre $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ é de 1,39, resultado que segundo Davidovits (2002) o torna utilizável na produção de geopolímeros. A perda ao fogo de 1,75% demonstra que a calcinação realizada foi de excelente qualidade, visto que a perda ao fogo teórica do caulim é de 13,60%. Esse valor pode ser confirmado através da estequiometria da caulinita que possui fórmula química $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$.

3.1.2 Difração de raios-x

A análise da amostra de metacaulim revela a presença de traços de quartzo e annita, fases cristalinas típicas em metacaulins, apresentando índice de cristalinidade de 21%, como evidenciado na Figura 4. Entretanto, destaca-se a presença notável de extensas áreas amorfas na faixa de 30° a 60° , sugerindo um indício de alta reatividade do material precursor.

Esses resultados reforçam a perspectiva de que o metacaulim, apesar de conter algumas fases cristalinas, possui um potencial considerável para atuar como um precursor altamente reativo.

Figura 4 - Resultado do ensaio Difratoimetria de raios-X (DRX)



Fonte: Autor (2023)

3.1.3 Granulometria

3.1.3.1 Distribuição granulométrica do metacaulim

A Tabela 6 traz um resumo da análise granulométrica do metacaulim. A amostra ensaiada apresentou diâmetro médio de $10,43\mu\text{m}$, conferindo-lhe uma adequação particular para ser utilizado como fonte precursora em argamassas geopoliméricas.

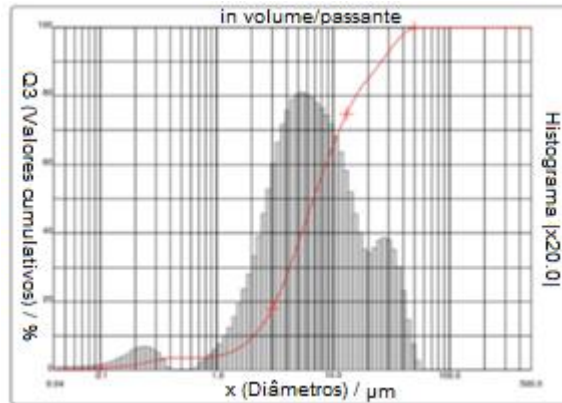
Tabela 6 - Resumo da curva granulométrica do metacaulim

Propriedades	Diâmetro (μm)
Diâmetro Médio	10,43
Diâmetro a 10%	2,08
Diâmetro a 50%	6,8
Diâmetro a 90%	26,08

Fonte: Autor (2023)

Com 90% da amostra menor que 26,08 μm esse material precursor pode ser definido como material pozolânico pela ABNT NBR 12653/2014 no quesito tamanho de partícula.

Figura 5 - Curva granulométrica do metacaulim



Fonte: Autor (2023)

3.1.3.2 Distribuição granulométrica do RPP

A Tabela 7 apresenta os tamanhos de partícula do resíduo de polimento de porcelanato (RPP), fornecendo uma visão detalhada da distribuição granulométrica do material utilizado.

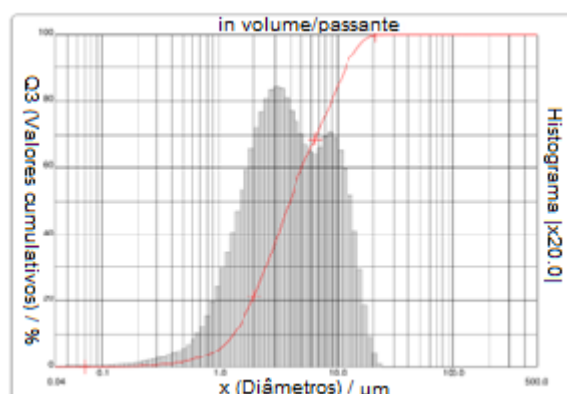
Tabela 7 - Resumo da curva granulométrica do RPP

Propriedades	Diâmetro(μm)
Diâmetro Médio	5,38
Diâmetro a 10%	1,34
Diâmetro a 50%	3,94
Diâmetro a 90%	12,90

Fonte: Autor (2023)

A distribuição apresentada na figura 6 mostra que todo o material é passante na #45 μm , classificando esse resíduo como material pozolânico no quesito granulometria conforme a ABNT NBR 12653/2014.

Figura 6 - Curva granulométrica do RPP



Fonte: Autor (2023)

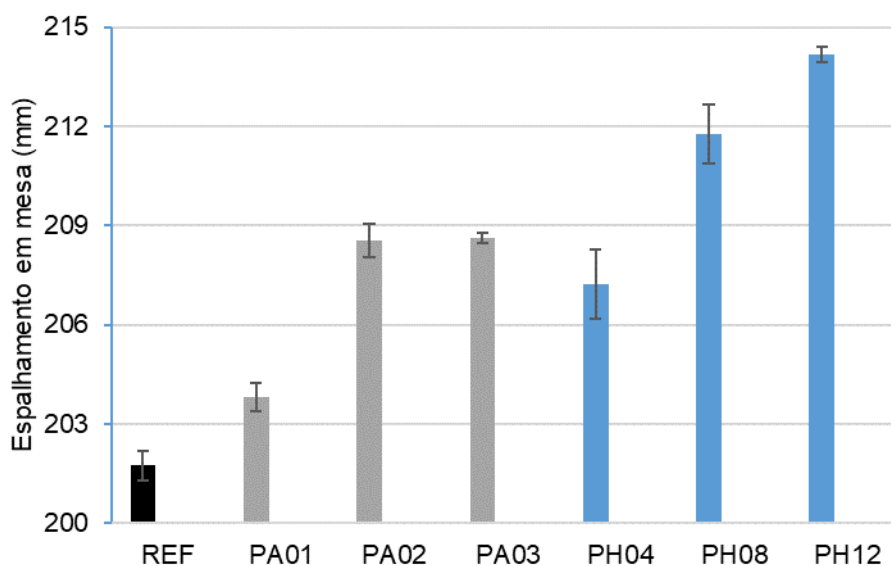
O tamanho médio de partícula é 5,38 μm , sendo fundamental para aumentar a

reatividade das formulações, em contrapartida, tamanhos de partículas muito pequenos possuem grande área superficial e tendem a se aglomerar devido ao efeito filler dificultando a trabalhabilidade. Além disso, ao possuir uma granulometria mais fina que o metacaulim, o RPP auxilia a sanar o problema das faixas granulométricas faltantes no MK.

3.2 CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS

A Figura 7 resume os resultados do ensaio de consistência de argamassa, destacando as propriedades e características observadas durante os ensaios.

Figura 7 - Índice de consistência das argamassas



Fonte: Autor (2023)

No ensaio de consistência das argamassas todas as amostras apresentaram aumento no espalhamento em relação a argamassa REF.

O processo de geração de bolhas utilizando pó de alumínio consiste na liberação de gás hidrogênio ao reagir com a água da mistura (ELICHE-QUESADA *et al.*, 2020). As formulações contendo pó de alumínio apresentaram um aumento máximo de 3,42%. Tal resultado é esperado visto que o processo de geração de bolhas do PA é instantâneo, diminuindo o contato entre as partículas sólidas e por consequência a viscosidade (Novais *et al.*, 2016). Após 0,2% os traços com PA mostraram sinais de estabilidade, compactuando com os valores centrais para uso desse agente já estabelecido pela literatura. O que indica também que após 0,2% de adição de PA ocorre o travamento da mistura pelo aumento no teor de finos na mistura.

As argamassas com peróxido de hidrogênio apresentaram um aumento no índice de consistência de até 6,16%. Isso é esperado visto que em meio básico o H_2O_2 se decompõe em água e gás oxigênio liberando bolhas e formando poros (PETLITCKAIA; POULESQUEN, 2019). Apesar das amostras com H_2O_2 não apresentarem formação de bolha imediata, ocorreu um aumento ainda maior que no pó de alumínio. O motivo mais provável é devido ao estado físico do peróxido de hidrogênio e a quantidade adicionada na mistura, fazendo-o ter um papel de lubrificante e facilitando dispersão das partículas sólidas.

Apesar do incremento na trabalhabilidade de todas as amostras, ainda são

necessários ajustes para obter valores aceitáveis, visto que não foi atingido o mínimo de 230mm.

3.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

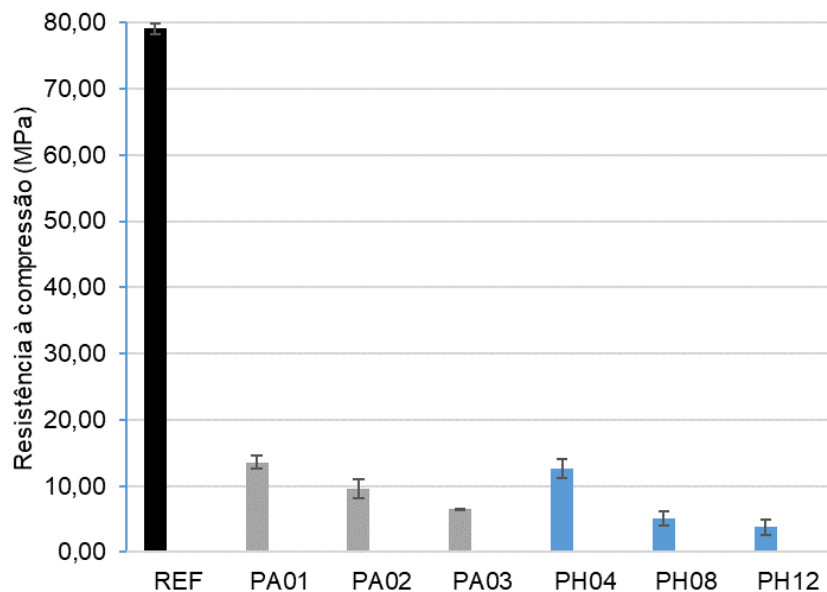
Os resultados das amostras ensaiadas à compressão indicam que há uma redução significativa da resistência à compressão com o incremento do agente porogênico, essa diminuição é esperada visto que com o aumento da porosidade os elos de fragilidade são formados. A Figura 8 apresenta a resistência à compressão das argamassas em função dos teores adicionados dos respectivos agentes porogênicos.

As amostras PA01, PA02 e PA03 com pó de alumínio sofreram redução de 82,79%, 87,82% e 91,82% em suas resistências à compressão quando comparadas à amostra REF. O resultado demonstra uma linearidade na redução da resistência à compressão em função do aumento do teor de PA.

Entre as amostras com adição de peróxido de hidrogênio a maior variação ocorreu entre 0,4% e 0,8% do agente porogênico caindo de 12,60MPa para 5,11MPa. Já entre 0,8% e 1,2% de PH ocorreu pequena variação visto que o último obteve resultado de 3,80MPa.

O maior resultado encontrado foi para argamassa com 0,1% PA com 13,61MPa e o menor valor foi com 1,2% PH com 3,80MPa. Para efeito comparativo, Alves (2018) produziu argamassas com adição de H₂O₂ com resistência à compressão entre 17,35MPa e 3,80MPa em um intervalo de 0,2% a 1% de H₂O₂.

Figura 8 - Resistência à compressão das argamassas

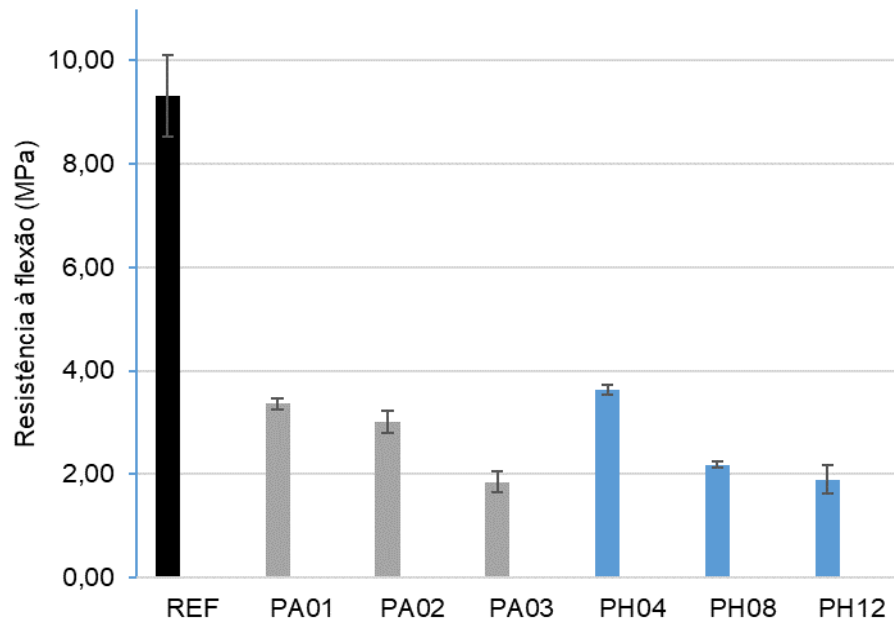


Fonte: Autor (2023)

3.5 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A Figura 9 mostra os valores de resistência à flexão nas amostras, o comportamento é similar ao ocorrido no ensaio de compressão, apresentando acentuada queda com o aumento da porosidade.

Figura 9 - Valores de resistência à flexão das argamassas



Fonte: Autor (2023)

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão em argamassas mostram que a amostra REF apresentou comportamento muito superior às outras argamassas ensaiadas (9,32MPa) e que ocorreu grande queda na resistência quando comparada a todas as amostras com agente porogênico. Como explicado no tópico anterior, esse comportamento é esperado.

A adição de PA em concentrações de 0,1%, 0,2% e 0,3% resultou em resistências de 3,36MPa, 3,02MPa e 1,85MPa, respectivamente, sugerindo possíveis problemas de coalescência ou excesso de agente formador de poros na amostra com 0,3% PA. Amostras com 0,1% e 0,2% PA apresentaram variação de cerca de 10% entre elas, demonstrando um bom desempenho.

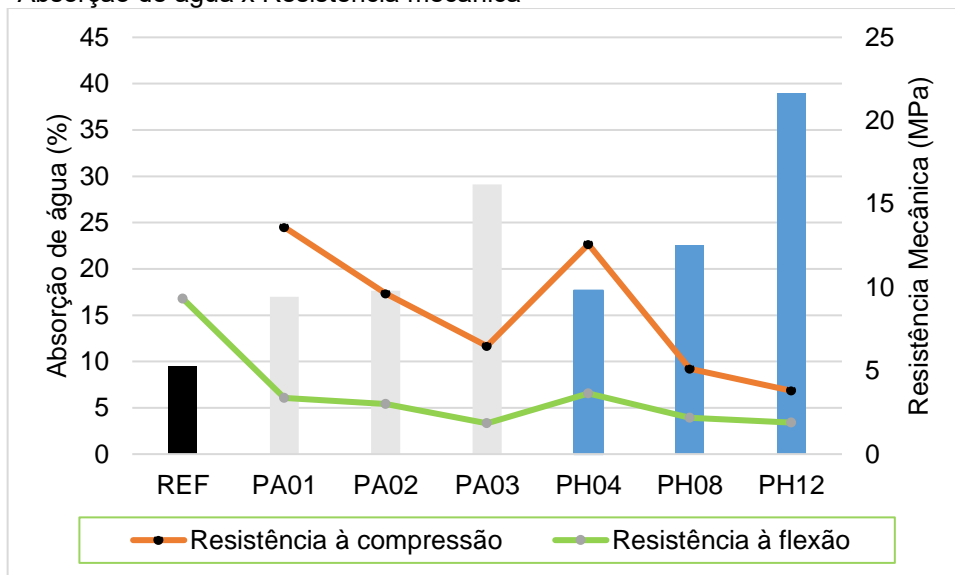
Argamassas contendo H₂O₂ mostraram redução significativa na resistência, com o maior resultado (3,64MPa) obtido com 0,4% PH e o menor (1,90MPa) com 1,2% PH. No entanto, as amostras com 0,8% e 1,2% de peróxido de hidrogênio demonstraram uma variação de apenas 12,84%, indicando estabilidade nesses traços.

3.6 PROPRIEDADES FÍSICAS

3.6.1 Absorção de água

A Figura 10 ilustra o comportamento das amostras durante o ensaio de absorção de água, buscando estabelecer uma correlação entre os valores obtidos para a absorção de água e aqueles provenientes dos ensaios mecânicos.

Figura 10 - Absorção de água x Resistencia mecânica



Fonte: Autor (2023)

Inicialmente é possível notar a relação concisa entre aumento da absorção de água e diminuição da resistência mecânica em todos os casos. Além disso é perceptível que quanto maior o teor de agente porogênico mais exageradas são essas relações.

A amostra REF destaca-se por apresentar o menor percentual de absorção de água (9,49%), simultaneamente exibindo o comportamento mecânico mais robusto. No caso das argamassas com PA, foi observado uma estabilidade na absorção de água para as amostras com 0,1% PA (17%) e 0,2% PA (17,65%). Entretanto, nessa faixa, ocorre uma queda significativa na resistência à compressão, de 13,61 MPa para 9,63 MPa, representando uma redução na resistência de 29,33%.

A amostra com 0,3% PA demonstra uma considerável elevação na absorção de água (29,14%), apresentando o resultado mais alto para esse agente porogênico.

Os resultados para as amostras com PH revelam uma variação expressiva em 0,4% PH, com um aumento de 86,31% em relação à amostra REF, enquanto que as resistências à compressão e flexão diminuem em 84,05% e 60,75%, respectivamente.

Para os teores de 0,8% PH e 1,2% PH, mesmo com o contínuo aumento da absorção de água (38,98%), ocorre a estabilização do comportamento mecânico.

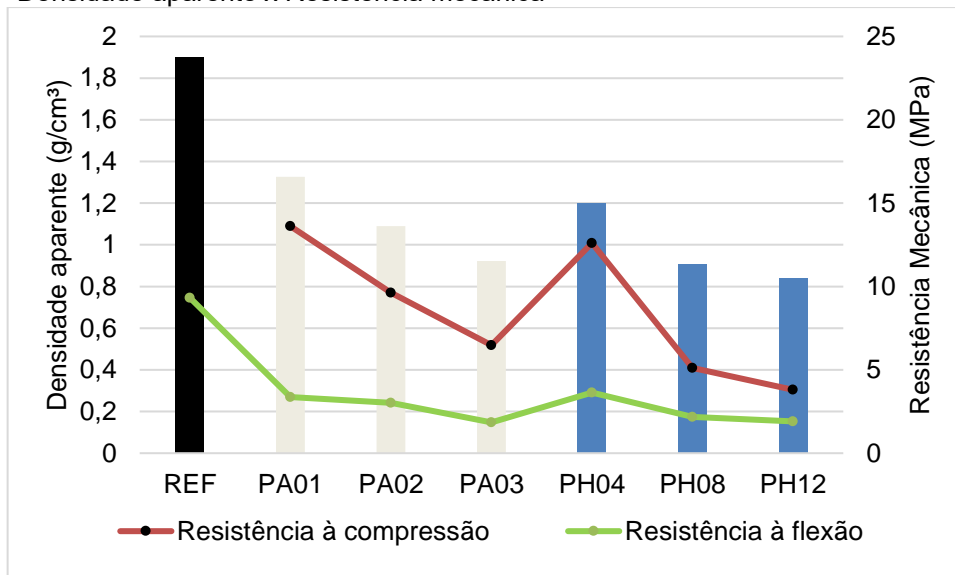
A variação máxima na absorção de água entre as amostras ocorre entre a argamassa REF e a amostra com 1,2% PH, resultando em um aumento de 310,85%. Essa argamassa apresenta os maiores resultados para absorção de água e os menores para resistência mecânica em todo o espectro analisado, isto é esperado e desejado para materiais porosos.

Os resultados encontrados condizem com os de Shi et al. (2020), visto que os mesmos produziram geopolímeros com resistência à compressão variando entre 3,5 MPa e 5,5 MPa, enquanto observavam a absorção de água na faixa de 32% a 16%, mediante o uso de peróxido de hidrogênio.

3.6.2 Densidade aparente

A Figura 11 ilustra a relação entre a densidade aparente e o comportamento mecânico das argamassas com diferentes teores de pó de alumínio e peróxido de hidrogênio.

Figura 11 - Densidade aparente x Resistência mecânica



Fonte: Autor (2023)

As argamassas com a adição de pó de alumínio exibem um comportamento proporcionalmente linear ao serem analisadas em termos de densidade aparente versus resistência mecânica. Essa relação resulta em uma diminuição constante da resistência mecânica com o aumento do teor adicionado, evidenciada por uma variação percentual notável.

Comparando os valores de densidade aparente para diferentes concentrações de PA, observa-se uma diminuição de 30,53% entre 1,33 g/cm³ e 0,92 g/cm³. O comportamento mecânico segue o mesmo padrão, apresentando uma queda significativa na resistência à compressão e à flexão. A resistência à compressão, por exemplo, diminui em 52,43% ao passar de 13,61MPa para 6,47MPa, considerando a adição de 0,1% para 0,3% de PA.

Em contraste, as argamassas com a adição de peróxido de hidrogênio demonstram a maior queda percentual entre 0,4% e 0,8% de adição, indicando uma sensibilidade a essa faixa específica. A densidade aparente, nesse intervalo, apresenta uma diminuição de 29,41%, passando de 1,20 g/cm³ para 0,84 g/cm³. No entanto, é crucial notar que essa queda significativa na densidade aparente não é acompanhada por uma redução proporcionalmente tão marcante na resistência mecânica.

As amostras com 1,2% de PH mostram uma tendência à estabilidade quando comparadas a 0,8% PH, com uma variação percentual de apenas 6,67% na densidade aparente, mantendo-se em 0,84 g/cm³. No entanto, é importante observar que, apesar dessa estabilidade na densidade aparente, ocorre uma diminuição percentual de 25,66% na resistência à compressão (de 5,11MPa para 3,80MPa) e 12,84% na resistência à flexão (2,18MPa para 1,90MPa).

Em um contexto comparativo, os estudos conduzidos por Leiva et al. (2019) resultaram na fabricação de geopolímeros, nos quais o pó de alumínio desempenhou o papel de agente formador de poros. Os resultados indicaram uma faixa de porosidade total entre 62% e 86%, correlacionada com uma resistência à compressão variando de 0,3 MPa a 7,8 MPa.

Esses resultados destacam a complexidade das interações entre os componentes adicionados e a necessidade de um equilíbrio cuidadoso na formulação

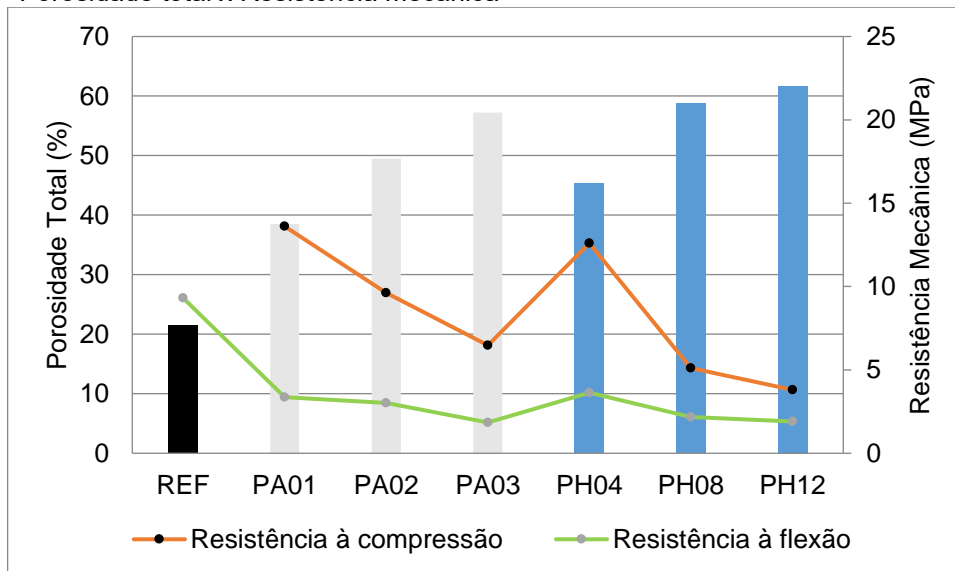
de argamassas para atender aos requisitos específicos de cada aplicação.

3.6.2 Porosidade Total

A Figura 12 apresenta a correlação entre a porosidade total obtida através da equação 5 apresentada anteriormente e as propriedades mecânicas das argamassas em estudo.

Ao analisar as variações entre as concentrações de 0,1% e 0,2% de PA, é evidenciado um aumento expressivo na porosidade, alcançando 49,46%, representando um acréscimo de 27,44%. Simultaneamente, as propriedades mecânicas do material sofreram alterações. A resistência à compressão diminuiu em 29,24%, passando de 13,61 MPa para 9,63 MPa, enquanto a resistência à flexão teve uma redução de 14,88%, indo de 3,36 MPa para 3,02 MPa.

Figura 12 - Porosidade total x Resistência mecânica



Fonte: Autor (2023)

Expandindo a análise para o intervalo de 0,2% a 0,3% de PA, a porosidade continuou a crescer, atingindo 57,21%, um acréscimo de 17,75%. Contudo, as propriedades mecânicas apresentaram declínios mais acentuados. A resistência à compressão diminuiu em 33,73%, chegando a 6,47 MPa, enquanto a resistência à flexão teve uma redução de 38,69%, alcançando 1,85 MPa.

Considerando globalmente o intervalo de 0,1% a 0,3% de PA, a porosidade total registrou um aumento notável de 48,68%. Em contrapartida, as características mecânicas do material sofreram uma redução substancial, com a resistência à compressão caindo em 55,19% e a resistência à flexão diminuindo em 42,26%.

Ao direcionar a análise para o PH, é possível observar comportamentos semelhantes. Entre 0,4% e 0,8%, a porosidade cresceu em 29,71%, atingindo 58,75%. Paralelamente, a resistência à compressão diminuiu em 59,60%, chegando a 5,11 MPa, enquanto a resistência à flexão teve uma redução de 40,11%, alcançando 2,18 MPa.

No intervalo de 0,8% a 1,2% de pH, a porosidade continuou a aumentar, registrando um acréscimo de 5,69% e alcançando 61,72%. As propriedades mecânicas seguiram a tendência de declínio. A resistência à compressão diminuiu em 25,79%, chegando a 3,80 MPa, enquanto a resistência à flexão teve uma redução de

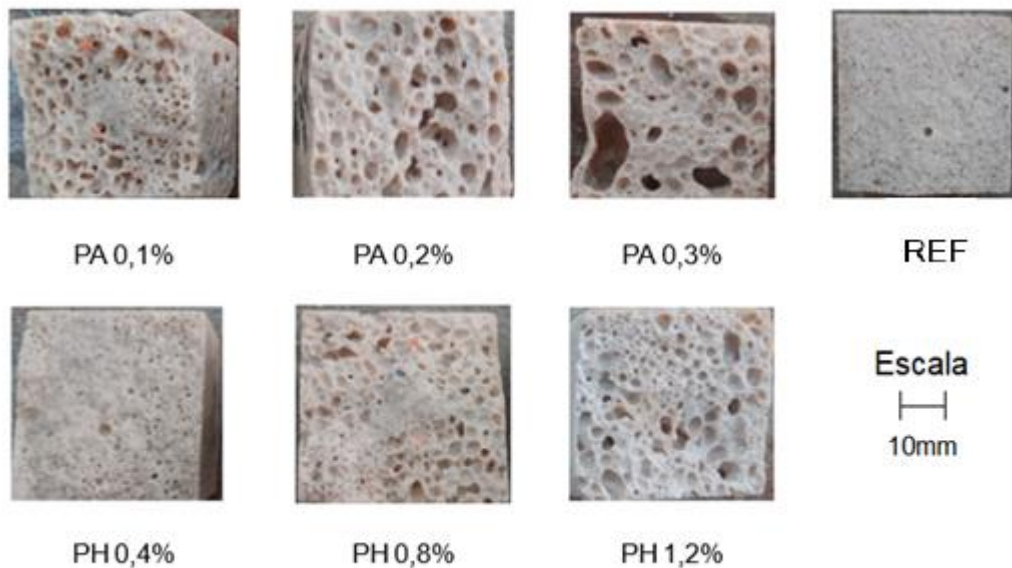
12,39%, atingindo 1,90 MPa.

Os resultados analisados corroboram com os achados por Bai et al. (2018), que, ao empregar PH, conseguiram porosidade total na faixa de 66% a 83%, associada a uma resistência à compressão variando entre 0,3 MPa e 11,6 MPa.

3.7 ANALISE VISUAL

A Figura 13 realiza uma comparação visual do impacto dos agentes porogênicos nas argamassas estudadas em relação à amostra padrão (REF).

Figura 13: Análise visual das amostras ensaiadas



Fonte: Autor (2023)

As amostras que contêm pó de alumínio demonstram REF um comportamento significativamente porogênico, com todas apresentando uma grande quantidade de macroporos. Notavelmente, a amostra com 0,3% PA revela a presença de poros com dimensões de até 10mm, indicando aglomeração. Este problema era previsto, considerando os resultados do ensaio de consistência, o que indica que houve coalescência dos poros, formando poros maiores.

Por outro lado, as amostras com adição de H_2O_2 exibem uma evolução linear na porosidade. A amostra com 0,4% de H_2O_2 mostra algumas falhas na formação de poros, sugerindo uma quantidade insuficiente desse agente formador. Nas amostras com 1,2% de H_2O_2 , os poros atingem tamanhos de até 6mm.

É perceptível, também, que não há, na maioria das amostras homogeneidade dos poros. Isso é um sinal de mixagem insuficiente.

A amostra padrão (REF) revela sinais de empacotamento ideal, corroborando com as expectativas visuais confirmadas nos ensaios de densidade aparente e porosidade total.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo representou um avanço significativo na busca por soluções sustentáveis na indústria da construção civil, especialmente ao explorar as propriedades das argamassas geopoliméricas com resíduo de polimento de porcelanato. A escolha estratégica desse resíduo não apenas contribui para uma utilização mais responsável de subprodutos industriais, mas também otimiza características essenciais dessas argamassas.

Ao analisar a influência dos agentes porogênicos, como peróxido de hidrogênio e pó de alumínio, é possível observar variações significativas na porosidade e resistência mecânica das argamassas. As formulações com 0,8% H_2O_2 e 0,2% PA destacam-se como as mais equilibradas e eficazes.

A amostra com 0,8% H_2O_2 exibiu uma resistência à compressão de 5,11 MPa e à flexão de 2,18 MPa, mantendo uma porosidade total significativa de 58,75%. A redução na densidade aparente sugere eficiência dos agentes porogênicos. Já a amostra com 0,2% PA manteve uma resistência à compressão de 9,63 MPa e à flexão de 3,02 MPa, com uma porosidade total de 49,46%. A diminuição na densidade aparente indica potencial economia de material, consolidando essa formulação como uma opção viável.

O resultado do índice de consistência de argamassa mostra que ainda há ajustes a serem realizadas para adequar o espalhamento das argamassas.

Com relação a porosidade total a amostra com 1,2% de H_2O_2 apresentou o melhor comportamento entre todas as estudadas, sendo a mais indicada para o uso nesse sentido.

Essas formulações destacam-se não apenas pela sua eficiência mecânica, mas também pela sua capacidade de proporcionar características sustentáveis. Ao contribuir para a redução da demanda por recursos naturais e das emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento, as argamassas geopoliméricas com resíduo de polimento de porcelanato surgem como alternativas ecológicas promissoras.

Este estudo oferece uma visão significativa sobre como materiais alternativos e resíduos industriais podem ser aproveitados eficazmente na criação de materiais de construção mais ecológicos. As informações obtidas não apenas têm relevância para pesquisas futuras, mas também fornecem dados práticos para aplicações na construção civil, impulsionando a redução do impacto ambiental e promovendo um setor mais sustentável e ecoeficiente. A flexibilidade dessas formulações as torna adaptáveis a diferentes contextos, oferecendo soluções sustentáveis e eficazes na construção civil.

5. REFERÊNCIAS

ABDOLLAHNEJAD, Z. et al. Mix design, properties and cost analysis of fly ash-based geopolymer foam. **Construction and Building Materials**, 2015.

ALVES, C. et al. Effect of Hydrogen Peroxide on the Thermal and Mechanical Properties of Lightweight Geopolymer Mortar Panels. **Minerals**, v. 13, n. 4, p. 542, 12 abr. 2023.

ALVES, Cleidson Rosa. **Propriedades térmicas e mecânicas de geopolímeros aditivados com peróxido de hidrogênio**. 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/206056/PECV1138-D.pdf?sequence=-1>. Acesso em: 10 out. 2023.

BAI, C.; COLOMBO, P. **Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review** **Ceramics International**. Elsevier Ltd, 1 out. 2018.

BAI, Chengying *et al.* Porosity, mechanical and insulating properties of geopolymer foams using vegetable oil as the stabilizing agent. **Journal Of The European Ceramic Society**, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 799-805, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.09.021>.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633–1656, ago. 1991.

DAVIDOVITS, Joseph. **30 Years of successes and failures in geopolymer applications: market trends and potential breakthroughs**. In: GEOPOLYMER INSTITUTE, 1., 2002, Melbourne. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2002. p. 1- 16. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/wpcontent/uploads/30YearsGEOP.pdf>. Acesso em: 13 maio 2023.

ELICHE-QUESADA, D. *et al.* Dust filter of secondary aluminium industry as raw material of geopolymer foams. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 32, p. 101656, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101656>.

FENG, J. et al. Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 65, p. 529–533, jan. 2015.

HARTMANN, Eduardo André. **Argamassa geopolimérica utilizando pó de alumínio como agente formador de poros**. 2016. 54 f. Monografia - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/171778/TCC-Hartmann_Eduardo_A.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 06 set. 2023.

KLIMA, K. M. et al. Synergistic effect of surfactants in porous geopolymer: Tailoring pore size and pore connectivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 134, p. 104774, 1 nov. 2022.

LANDI, E. et al. Alkali-bonded ceramics with hierarchical tailored porosity. **Applied Clay Science**, v. 73, n. 1, p. 56–64, mar. 2013.

LEIVA, C. *et al.* A porous geopolymer based on aluminum-waste with acoustic properties. **Waste Management**, [S.L.], v. 95, p. 504-512, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.042>.

MACCARINI, Helena Somer. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim**. 2015. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/157147>. Acesso em: 12 nov. 2023.

NBR 12653: **Materiais pozolânicos** – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos** – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 7214: **Areia normal para ensaio de cimento** - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

Norma **ASTM C270, 2019**, " Standard specification for mortar for unit masonry", ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2019, DOI: 10.1520/C0270-19AE01, www.astm.org.

Norma **ASTM C348, 2021**, " Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars", ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2021, DOI: 10.1520/C0348-21, www.astm.org.

Norma **ASTM D7348, 2021**, "Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues", ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2021, DOI: 10.1520/D7348-21, www.astm.org.

NOVAIS, R. M. et al. Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity. **Journal of Cleaner Production**, 2016.

NOVAIS, R. M.; PULLAR, ROBERT. C.; LABRINCHA, J. A. Geopolymer foams: An overview of recent advancements. **Progress in Materials Science**, v. 109, n. July 2019, p. 100621, abr. 2020.

NOVAIS, Rui M. et al. Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers. **Waste Management**, [S.L.], v. 52, p. 245-255, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16301660?via%3Di> hub. Acesso em: 13 jun. 2023.

PETLITCKAIA, Svetlana; POULESQUEN, Arnaud. Design of lightweight metakaolin based geopolymer foamed with hydrogen peroxide. **Ceramics International**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 1322-1330, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.021>.

PROVIS, J. L.; DEVENTER, J. S. J. VAN. Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 9, p. 2318–2329, maio 2007.

RAMOS, Giovanni A. et al. Effect of porcelain tile polishing residue on eco-efficient geopolymer: rheological performance of pastes and mortars. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 32, p. 101699, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101699>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220322932>. Acesso em: 14 nov. 2023.

RAMOS, Giovanni Antonio *et al.* Effect of porcelain tile polishing residue on geopolymer cement. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 191, p. 297-303, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.236>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618312782>. Acesso em: 27 jun. 2023.

RASHAD, Alaa M. Metakaolin as cementitious material: history, scours, production and composition :; a comprehensive overview. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 41, p. 303-318, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812009543>. Acesso em: 01 out. 2023.

SENNF, L. et al. Eco-friendly approach to enhance the mechanical performance of geopolymer foams: Using glass fibre waste coming from wind blade production. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117805, 10 abr. 2020.

SHI, Jinyan *et al.* Preparation and characterization of lightweight aggregate foamed geopolymer concretes aerated using hydrogen peroxide. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 256, p. 119442, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119442>.

YAN, Shu *et al.* Mechanical properties of geopolymer composite foams reinforced with carbon nanofibers via modified hydrogen peroxide method. **Materials Chemistry And Physics**, [S.L.], v. 253, p. 123258, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123258>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058420306283?via%3Di> hub. Acesso em: 08 nov. 2023.

ZHANG, Xiaohong *et al.* Porous geopolymer composites: a review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S.L.], v. 150, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106629>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X2100347X>. Acesso em: 20 jun. 2023.