

## **Caracterização de geopolímeros elaborados com resíduos de vidro e lodo de anodização**

### **Characterization of geopolymers made with glass residues and anodizing sludge**

DOI:10.34117/bjdv7n6-446

Recebimento dos originais: 18/05/2021

Aceitação para publicação: 18/06/2021

#### **Fernanda Grillo**

Mestre em engenharia civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 - Bairro Campo Comprido, Curitiba – PR,  
Brasil  
E-mail: fernandagrillo.fg@hotmail.com,

#### **Adalberto Matoski**

Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 - Bairro Campo Comprido, Curitiba – PR,  
Brasil  
E-mail: adalberto@utfpr.edu.br

#### **Mauro Edson Alberti**

Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 - Bairro Campo Comprido, Curitiba – PR,  
Brasil  
E-mail: alberti@utfpr.edu.br

#### **RESUMO**

A reciclagem de resíduos industriais é uma prática importante para a sustentabilidade pois ameniza o impacto ambiental. Assim, o objetivo desse trabalho é a caracterização de um material cimentante, utilizando como matérias-primas resíduos industriais. Nessa pesquisa foram utilizados os resíduos gerados na indústria do vidro, lodo de anodização do alumínio e um fíler mineral. Para obtenção do meio alcalino foi usada solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio. As análises envolvidas no processo de caracterização dos insumos e mistura, foram: granulometria, porosidade, fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foram realizados ensaios de resistência à compressão nas amostras para avaliar o grau de polimerização, tendo em vista que, quanto maior a resistência mais polimerizada é a estrutura. Com 90 dias de cura em temperatura ambiente os corpos de prova atingiram uma média de resistência à compressão de 17,8 MPa. Em cura térmica após 7 dias obteve-se 31,5 MPa. Em ensaios DRX os geopolímeros apresentaram estrutura amorfa e configurações semelhantes às fases cristalinas provenientes das matérias-primas.

**Palavras-chave:** geopolímeros, aluminossilicatos, lodo, pó de vidro

## ABSTRACT

The recycling of industrial waste has been consolidated as an important practice for the sustainability, mitigating the environmental impact. The present study aimed at the development of a cement material, using as raw materials industrial waste. The residues of the stonework of flat glass, aluminum anodizing sludge and a mineral filler were used; and to obtain the alkaline medium was used sodium hydroxide solution and sodium silicate, used as activators. (XRD), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and particle size distribution, porosity, X-ray fluorescence (FRX) and X-ray diffraction (XRD). Compressive strength tests were performed on the geopolymer samples to evaluate the degree of polymerization, considering that the higher the resistance the more polymerized the structure. After 90 days of curing at room temperature, the geopolymer matrices reached an average of 17.8 megapascals (MPa) and, after 7 days of thermal cure, 31.5 MPa. In XRD tests the geopolymers presented amorphous structure and similar configurations the crystalline phases from the raw materials.

**Keywords:** geopolymer, aluminosilicates, sludge, glass powder

## 1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é conhecido por sua atividade e importância para o desenvolvimento do país, contudo os insumos que esse setor utiliza geram um significativo passivo ambiental. Para obtenção desses insumos há a necessidade da extração de elevadas quantidades de matérias-primas não renováveis e de elevado consumo energético, tendo como subprodutos, conseqüentemente, uma série de resíduos, gases, etc., responsáveis pelo efeito estufa (CHEN et al., 2010).

O concreto armado é uma das técnicas construtivas mais utilizadas no mundo devido às suas excelentes propriedades mecânicas. Porém, necessita elevado consumo de cimento, que por sua vez tem elevada contribuição na emissão de CO<sub>2</sub>. Nesse contexto, nota-se a crescente procura por materiais que possam substituir com eficácia o cimento Portland, mantendo suas principais propriedades, que tenham vantagem econômica e com menor emissão de gases nocivos ao meio ambiente (LEE et al., 2018).

Uma alternativa com fundamento na sustentabilidade é o desenvolvimento de cimentos geopoliméricos (GP), que são obtidos pela utilização de materiais ricos em sílica e alumina ativados em meio alcalino. Entre os precursores desse geopolímero pode-se citar alguns resíduos industriais como: cinzas volantes, metacaulim como utilizado no trabalho de PREZA et al. (2020), resíduos agrícolas, algumas lamas (panasqueiras), escória de alto forno, pozolanas, lodo de anodização de alumínio, etc., conforme citam TORRAL et al. (2008). A produção do cimento geopolimérico necessita de ativadores

alcalinos, sendo que os mais utilizados são os hidróxidos e silicatos de sódio ou potássio justificando seu uso nessa pesquisa. FENG, et al., (2012).

Entre os materiais precursores escolhidos para este trabalho estão: o pó de vidro, que é o fornecedor de sílica, um filer mineral, com alto teor de alumina e silicato, e o lodo de anodização do alumínio (LAA). Esse lodo pode ser obtido do processo eletroquímico aplicado em peças de alumínio, usado para produzir uma fina camada de alumina ( $Al_2O_3$ ) em sua superfície, que envolve o material a fim de protegê-lo de uma oxidação mais profunda e nociva à peça metálica.

O resíduo gerado pelo processo de anodização possui um grande potencial de reciclagem por ter alto teor de alumina em sua composição, geralmente classificado como resíduo não tóxico, podendo ser empregado na fabricação de peças cerâmicas com propriedades tecnológicas específicas, tais como: resistência mecânica, refratariedade e isolamento elétrico (CASAGRANDE et al., 2008).

A relevância dessa pesquisa está no fato de que a reciclagem é um processo que transforma e reaproveita resíduos, que de outra forma seriam descartados como lixo. Assim diminui-se o volume de resíduos que terão que ser encaminhados para locais apropriados para descarte. Cabe observar ainda que o cimento geopolímico pode ser utilizado na adsorção de rejeitos de processos industriais altamente prejudiciais ao meio ambiente, como por exemplo o índigo carmim, conforme citado por PIRES et al. (2019), justificando mais uma vez sua utilização. Assim, o objetivo desse trabalho é o desenvolvimento e caracterização de compósito geopolimérico a partir de resíduos industriais, tais como pó de vidro e lodo de anodização do alumínio.

## 2 MATERIAIS

Os materiais precursores para síntese do geopolímico foram os seguintes: resíduos do corte de vidro plano, lodo de anodização de alumínio e filer mineral. Os resíduos de vidro foram obtidos de cortes e lapidações de vidro, descartados em forma sólida, sendo misturados em água ou secos. O lodo foi obtido de uma indústria de anodização pois esse material é descartado como um resíduo.

Os ativadores alcalinos adotados foram: hidróxido de sódio (NaOH), com 97% de pureza (dado fornecido pelo fabricante) e silicato de sódio ( $Na_2SiO_3$ ), com a razão entre  $SiO_2/Na_2O$  de 3,3 (dado fornecido pelo fabricante). Foi utilizada a água do sistema de abastecimento da cidade.

A sequência do processo para tratamento de pó de vidro estruturou-se da seguinte forma: a) o material foi seco em temperatura ambiente; b) após, foi encaminhado para o processo de secagem em uma estufa a 100°C durante 24 horas. Quando retirado, esse material foi levado para a moagem em moinho de bolas, passando posteriormente por um processo de peneiramento. O material selecionado foi o passante em malha de 75  $\mu\text{m}$ . Estes métodos foram adaptados dos trabalhos de KIM et al., 2014; RIBEIRO, 2015; e SPRICIGO, 2017.

O lodo de anodização passou por um processo de secagem em estufa à temperatura de 100°C por 48 horas. Após a secagem, o resíduo foi destorroado e, em seguida, passou por processo de moagem no moinho de bolas por 30 minutos. Em seguida, peneirou-se o resíduo em peneira com malha de 75  $\mu\text{m}$ . O material não passante por esta peneira foi levado à moagem em um moinho de panelas e novamente peneirado, considerando-se apenas os materiais passantes na referida malha.

O fíler utilizado nessa pesquisa foi derivado do pó de rochas, sendo um produto comercializado em lojas de materiais de construção, com baixo custo, tendo na sua composição um alto teor de sílica e alumínio. A granulometria adotada foi a passante na malha de 75  $\mu\text{m}$ .

Os materiais utilizados foram caracterizados com a utilização do DRX e do equipamento de espectroscopia de fluorescência de Raios X por dispersão em energia (EDXRF). Também foi utilizado o granulômetro a laser para a caracterização do tamanho das partículas.

Para execução da solução alcalina, os elementos foram pesados em balança de precisão, misturados por cerca de 2 minutos e armazenados em recipiente por 24 horas. Os resíduos de vidro, lodo de anodização e o fíler, foram misturados juntamente com a solução de hidróxido de sódio 5 mol/L e o silicato de sódio. As misturas seguiram um planejamento experimental, nas quais foram adotadas relações percentuais de massa líquida  $\leq 40\%$ , conforme recomendado por (HAJJAJI, 2013).

### 3 MÉTODO DA PESQUISA

Adotou-se 10 composições distintas para síntese dos geopolímeros, conforme indicado na Tabela 1, na qual é apresentada a porcentagem de cada elemento da massa total.

Tabela 1 – percentual de componentes das composições

COMP.	VIDRO (%)	LODO (%)	FÍLER (%)	NAOH (%)	SILICATO (%)
1	24	12	24	22	18
2	25	15	20	22	18
3	35	20	15	13,5	16,5
4	30	17,5	22,5	13,5	16,5
5	30	17,5	22,5	10	20
6	35	15	20	10	20
7	40	17	13	10	20
8	40	15	15	10	20
9	30	15	30	10	20
10	20	15	30	10	20

Fonte: O autor, 2021

Para a execução e síntese destes traços foram utilizados 8.000 gramas de massa total, para moldar 18 corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro interno por 100 mm de altura, considerando 10% de perdas na moldagem e desmoldagem. Este volume de material foi obtido adotando-se como alvo uma densidade média dos de 2 g/cm<sup>3</sup>.

A relação entre SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, representa o fator que foi considerado para definição das proporções, ou seja:  $3 \leq \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 6$ . Por sua vez, Hajjaji (2013) recomenda em sua pesquisa que a relação Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> esteja dentro do intervalo:  $0,13 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0,40$ .

Para os ativadores alcalinos buscou-se utilizar razões molares Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> de 0,3 semelhante ao adotado por outros autores, como citado por Davidovits (2013).

Considerando que a reação desta combinação é exotérmica, o material foi deixado em temperatura ambiente para resfriar, por aproximadamente 2 horas, até atingir o equilíbrio com a temperatura ambiente. Após atingir esse equilíbrio os resíduos sólidos foram pesados e misturados em uma argamassadeira até sua homogeneização. Em seguida foi adicionada à mistura a solução de silicato de sódio preparada previamente, permanecendo neste procedimento por um período de 3 minutos, até total homogeneização da mistura. O processo foi adaptado de Nuernberg (2018).

Os corpos de prova foram moldados em formas metálicas e rosqueáveis, de dimensões 50x100 mm. As amostras foram desmoldadas 24 horas após o processo de moldagem e deixadas para curar em temperatura controlada de 23° ± 1°C, até atingir a idade de rompimento. As amostras foram, então, ensaiadas à compressão para verificar o desempenho dos materiais sintetizados, com idades de 7, 28 e 90 dias.

Seguindo a orientação dos trabalhos citados, optou-se pela cura habitual recomendada para argamassas feitas a partir de cimento Portland. Esse procedimento tem como finalidade a caracterização do comportamento do geopolímero, indicando assim

sua viabilidade, visto que argamassas convencionais dispensam o uso de cura térmica para que ocorra reação. Utilizou-se, também, a cura térmica para efeitos de comparação.

Para a determinação da resistência mecânica foram realizados ensaios de compressão uniaxial conforme NBR 7215:1997. Para a determinação da porosidade dos compósitos foi calculada a relação dos valores obtidos na densidade aparente pela densidade real. A determinação das densidades aparente e real foi feita de acordo com ASTM C 373-88 (2013).

## 4 RESULTADOS DA PESQUISA

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Análise química de fluorescência de Raios X (FRX) – resíduo do vidro utilizado

Na Tabela 2, observam-se os resultados encontrados na análise química do resíduo do pó de vidro. Verifica-se que estão presentes na composição do vidro 78,00% de sílica, fundamentais para a formação do vidro, 16,38% de óxido de cálcio e 5,63% de MgO, ambos com a função estabilizadora de evitar que o vidro seja solúvel e impedir que ocorra cristalização.

Tabela 2 – Análise química do resíduo do pó de vidro.

Análise Química (% em massa)	
Óxidos	Quantidade (%)
SiO <sub>2</sub>	78,00
CaO	16,37
MgO	5,63

Fonte: O autor, 2021

A composição química do resíduo de vidro plano possui a presença de íons alcalinos de CaO, os quais podem funcionar como mecanismo de ligação entre tetraedros de SiO<sub>4</sub> e AlO<sub>4</sub>. Percebe-se a total ausência de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, porém, grande quantidade de SiO<sub>2</sub>, principal componente para formação de uma matriz geopolimérica. Observa-se que este vidro é do tipo soda-cal-sílica, formado essencialmente pelo derretimento de suas matérias primas, que são: sílica (SiO<sub>2</sub>), soda e cal, na forma de Ca(OH)<sub>2</sub> e dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), que fornece o óxido de magnésio.

#### 4.1.2 Fluorescência Raio X – Lodo de Anodização de Alumínio

A análise química realizada no lodo de anodização evidencia que o principal óxido constituinte do resíduo é o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. O alumínio tem origem principalmente na etapa de

decapagem das peças durante o processo de anodização e demais tratamentos de superfícies. Quanto ao percentual de SO<sub>3</sub> na composição do LAA, não foram identificadas concentrações significativas na composição química. Os resultados são apresentados pela Tabela 3, onde os teores estão expostos em porcentagem da massa total da amostra.

Tabela 3 – Análise química do Lodo de anodização de Alumínio (LAA).

Análise Química (% em massa)	
Óxidos	Quantidade (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	97,08
SO <sub>3</sub>	2,92

Fonte: O autor, 2021

Os ensaios realizados mostram que o lodo amostrado é majoritariamente formado por óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), com um teor de 97,08%, e o restante de óxido de enxofre. O material analisado caracteriza-se, também, por não apresentar teores de hidróxido de sódio, que é utilizado durante o processo eletroquímico. O lodo é gerado na etapa de decapagem durante o processo de tratamento de superfície de peças de alumínio, sendo a principal justificativa para o alto teor de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

#### 4.1.3 Fluorescência raio X – fíler mineral

A composição química do fíler determinado pela técnica de FRX é apresentada na Tabela 4, expressa em termos de quantidade em massa dos óxidos presentes.

Tabela 4 – Análise química do fíler.

Análise Química (% em massa)	
Óxidos	Quantidade (%)
SiO <sub>2</sub>	56,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,19
CaO	0,92
K <sub>2</sub> O	7,39
SO <sub>3</sub>	7,24
TiO <sub>2</sub>	0,33

Fonte: O autor, 2021

O fíler mineral utilizado contém 56,75% de óxidos de sílica e 27,16% de óxidos de alumínio, dois componentes essenciais para a geopolimerização, com razão entre óxidos SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> encontrada de 2,09. Tais proporções demonstram que o material é adequado para a fabricação do geopolímero, pois contém alto teor de silicatos e alumina.

Outro aspecto a ser observado é que, além desse filer atender aos requisitos, também apresentou viabilidade econômica por dispensar o processo de calcinação.

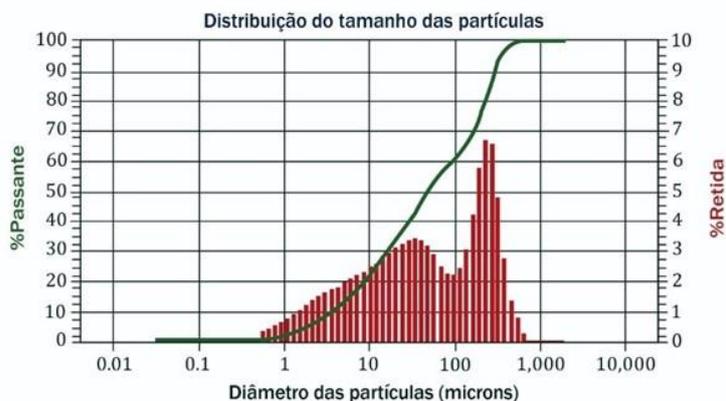
#### 4.1.4 Granulometria do pó de vidro

Para a amostra de pó de vidro se obteve um diâmetro médio para as partículas de 25,75  $\mu\text{m}$ . É desejável que a maioria das partículas sejam menores que 65  $\mu\text{m}$ , pois grande parte da reação ocorre na interface partícula-líquido e quanto mais finas as partículas, maior é a área de superfície e mais reativo será o material para a composição. A distribuição granulométrica para o vidro é considerada adequada, visto que o material possui diâmetro médio equivalente ao recomendado pela literatura.

#### 4.1.5 Granulometria do lodo de anodização de alumínio

Os resultados da distribuição do tamanho de partícula do lodo de anodização de alumínio estão representados na Figura 2.

Figura 2 – Distribuição do tamanho de partícula do lodo de anodização de alumínio



Fonte: O autor, 2021

O diâmetro médio para a amostra foi de 46,45  $\mu\text{m}$ . Com este resultado constatou-se que o lodo utilizado possui uma distribuição granulométrica de acordo com o recomendado na bibliografia. A porcentagem da distribuição foi: diâmetro médio abaixo de 10% passante com 3,22  $\mu\text{m}$ , abaixo de 50% com 46,45  $\mu\text{m}$  e diâmetro abaixo de 90% com 294,00  $\mu\text{m}$ . Observa-se que o diâmetro médio tem sua faixa de distribuição semelhante a do vidro, ou seja, variando de 1,34 a 352  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.6 Granulometria fíler

Os resultados da distribuição do tamanho de partícula do fíler indicam que o diâmetro médio para a amostra foi de 9,66  $\mu\text{m}$ , inferior ao do lodo de alumínio e vidro. Esse aspecto justifica o aumento da densidade do corpo de prova sintetizado, pois estes elementos auxiliam no empacotamento das partículas, reduzindo o número de vazios.

A porcentagem da distribuição foi: diâmetro médio abaixo de 10% passante com 1,63  $\mu\text{m}$ , abaixo de 50% com 9,66  $\mu\text{m}$  e diâmetro abaixo de 90% com 45,37  $\mu\text{m}$ . O diâmetro médio é 5 vezes menor que o das partículas de LAA e representa 40% do tamanho das partículas de vidro. A faixa de distribuição é homogênea e estreita, variando de 0,49 a 66,92  $\mu\text{m}$ .

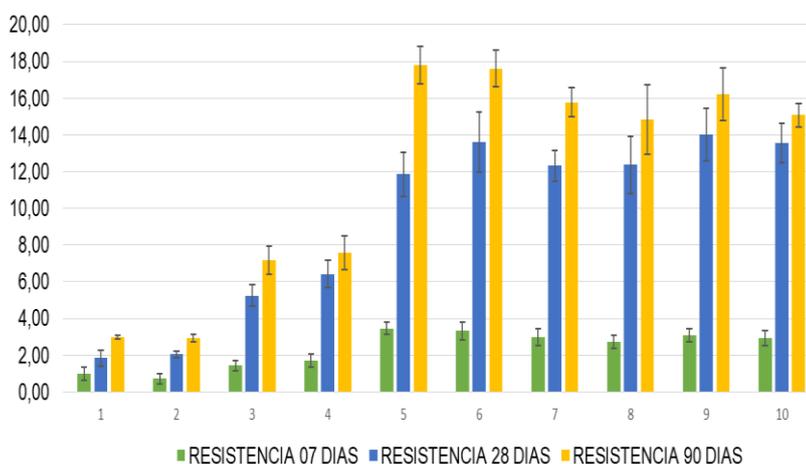
O fíler, por ter diâmetros muito menores, proporciona à mistura maior empacotamento das partículas e redução de vazios, aumentando a densidade e diminuindo a porosidade do material resultante. Observa-se que todos os resíduos utilizados nesta pesquisa apresentaram granulometrias próximas ou inferiores às especificadas para o cimento Portland comum, aspecto esse que auxilia na geopolimerização.

### 4.2 AVALIAÇÃO DO MATERIAL SINTETIZADO

#### 4.2.1 Resistência mecânica

A Figura 2 refere-se às resistências mecânicas (MPa) das composições geopoliméricas com 7 dias, 28 dias e 90 dias de idade em temperatura ambiente. A identificação de cada composição segue a ordem da tabela 1. Nesse gráfico, cada coluna representa a média da resistência à compressão e respectivo desvio padrão para ensaios realizados em 6 amostras para cada composição em cada idade.

Figura 2 – Resistência mecânica dos geopolímeros com 7, 28 e 90 dias de idade.



Fonte: O autor, 2021

A composição identificada com o nº 5, com 30% de vidro, 17,5% de LAA e 22% de fíler como componentes sólidos, 10% de NaOH e 20% de silicato como solução aquosa, obteve maior média de resistência à compressão em idade de 7 dias de idade à temperatura ambiente. Ou seja, esta composição obteve 3,5 MPa. Esse aspecto evidencia que desde as primeiras idades há um início significativo do processo de geopolimerização.

Por sua vez, os menores resultados observados foram aqueles onde a concentração de solução de hidróxido de sódio foram superiores a 10% (composições 1, 2 e 3), demonstrando assim um limite para sua utilização, considerando o objetivo de obter resistências elevadas.

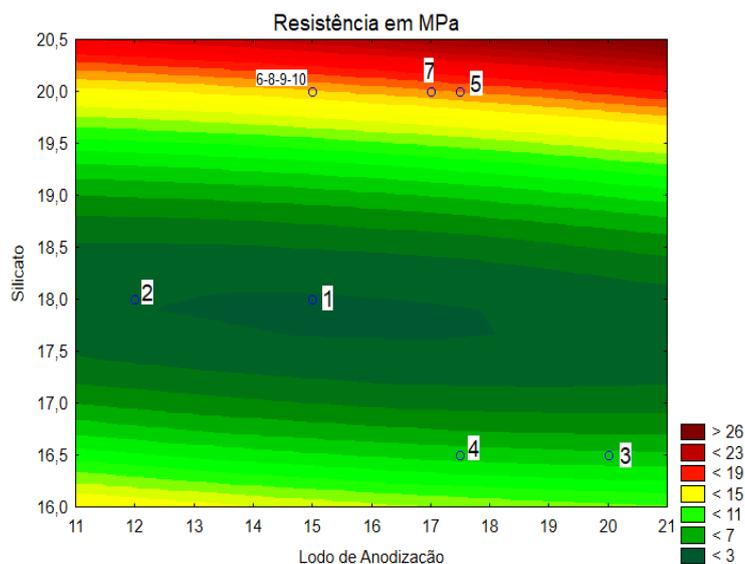
Comparando-se o resultado entre as composições 4 e 5, percebe-se que o aumento da proporção de silicato de sódio na composição aumenta a resistência à compressão. A composição 4 é semelhante à outra, porém, altera-se a composição da parte líquida, com 10% de NaOH e 20% de silicato, comprovando mais uma vez que o acréscimo da solução de NaOH acima de 10% diminui a resistência, enquanto o silicato aumenta.

As análises realizadas com 90 dias de cura demonstraram maior resistência mecânica se comparadas aos elementos testados aos 7 e 28 dias, o que demonstra que a argamassa geopolimérica precisa de um tempo prolongado para alcançar o endurecimento final e ganho de resistência.

Considerando o período de cura de 28 dias, observa-se que a composição 5 obteve a maior média de resistência à compressão, com 17,8 MPa, justificada como demonstrado anteriormente pelo menor teor de hidróxido de sódio.

O gráfico de superfície de resposta é apresentado pela Figura 3, na qual foi considerada a relação entre os dois elementos que influenciaram positivamente para a composição.

Figura 3 – Gráfico de superfície de resposta para 90 dias de idade



Fonte O autor, 2021

No gráfico de superfície de resposta observa-se que a resistência mecânica aumenta conforme utiliza-se silicato de sódio. Segundo a análise, a proporção entre LAA e silicato de sódio apresenta-se com silicato na proporção 20 a 20,5% da composição.

#### 4.2.2 Cura térmica

Para verificação do ganho de resistência por meio de cura térmica, foram sintetizadas amostras da composição 5 e 6, sendo três unidades de cada composição. Após desmoldados, os corpos de prova foram deixados para endurecimento em temperatura ambiente por 3 dias e, em seguida, foram levados à estufa a 50°C por 4 dias. Os corpos de prova foram rompidos com idade de 7 dias obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela das resistências mecânicas aos 7 dias para corpos de prova em cura térmica.

Composição	Co			Média (MPa)	V
	2	3	3		
5	2			2	
	8,53	0,18	0,96	9,89	,50
	3			3	
6	3,17	9,99	1,23	1,46	,20

Fonte: O autor, 2021

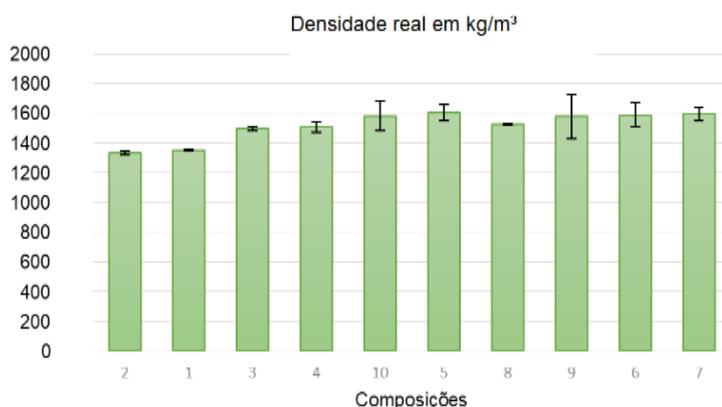
Verificou-se o rápido ganho de resistência à compressão por meio da cura térmica, comprovando que a temperatura é um fator que auxilia no processo de geopolimerização.

### 4.2.3 Porosidade

A densidade aparente do material foi obtida com 90 dias de idade do geopolímero. As densidades aparentes dos geopolímeros variaram de 1,3 g/cm<sup>3</sup> a 1,6 g/cm<sup>3</sup>. As composições 5, 6 e 7 foram as que obtiveram as maiores densidades justificando assim as maiores resistências obtidas. Este fato pode ser explicado devido às proporções dos elementos utilizados nas composições, dentre os quais ressalta-se novamente o menor teor de hidróxido de sódio. Percebe-se, também, que composições com maior teor de lodo de anodização possuem maiores densidades devido à massa específica unitária deste material ser maior que os demais componentes utilizados na síntese dos geopolímeros. A massa específica do vidro, do LAA e fíler são 2,50 g/cm<sup>3</sup>, 3,84 g/cm<sup>3</sup> e 3,15 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

Os resultados da determinação da densidade real das composições geopoliméricas com 90 dias de idade estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Densidade real das composições geopoliméricas com 90 dias de idade em kg/m<sup>3</sup>.



Fonte: O autor, 2021

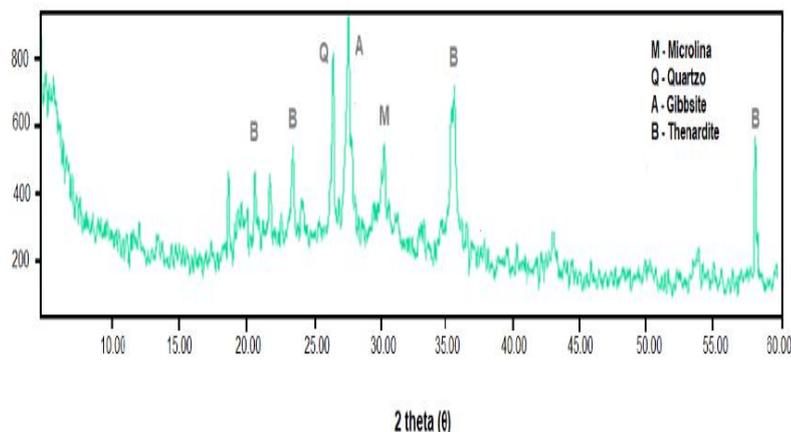
A composição com menor teor de lodo obteve uma densidade inferior em comparação com as demais, conforme comprovado pela análise de variância. Observa-se assim que dentre os componentes utilizados, o lodo foi o material que mais influenciou para o aumento da densidade real. Esse aspecto pode ser justificado pela sua composição, pois o lodo utilizado contém 97% de óxido de alumínio.

### 4.2.4 DRX – Análise do material sintetizado FRX

Na Figura 5, apresenta-se o difratograma da composição 6, que apresentou o maior

teor de sílica e, conseqüentemente, com maiores picos de cristalinidade aparente.

Figura 5 – DRX Geopolímero da composição 6 com 90 dias de idade



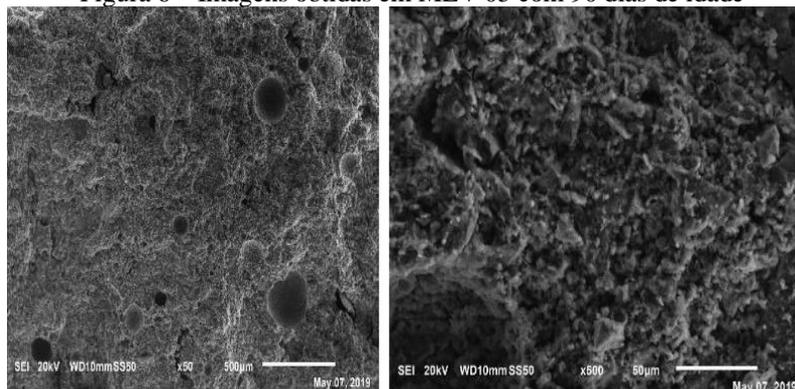
Fonte: O autor, 2021

Como observado no difratograma da composição 6, foram identificadas as fases cristalinas de quartzo, gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), e thenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), cristalinidade remanescente das matérias-primas. A microclina ( $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ ) normalmente é identificada em geopolímeros, devido aos elementos precursores comumente inseridos na mistura. Ela é proveniente de rochas ígneas e neste trabalho ela é provavelmente derivada do fíler mineral. Nota-se a presença de halos difusos entre  $20^\circ$  e  $40^\circ$ , tipicamente observado em materiais amorfos e polímeros inorgânicos, devido à presença de silicatos na composição. O halo é identificado devido à presença dos aluminossilicatos amorfos da composição da matriz geopolimérica. A relação Si/Al determina o ângulo central do halo, quanto maior a relação Si/Al menor o ângulo central em que o halo aparece, devido ao começo da cristalização da sílica no processo de geopolimerização.

#### 4.2.5 MEV – Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 6 refere-se à microscopia eletrônica de varredura da composição 6, com 90 dias de idade, com aumentos de 50X e 500X.

Figura 6 – Imagens obtidas em MEV 05 com 90 dias de idade



Fonte: O autor, 2021

Os poros apresentados na figura 6 advindos da evaporação dos líquidos presentes no processo de endurecimento do geopolímero, possuem diâmetro entre 100 e 150  $\mu\text{m}$  existindo poros maiores, com diâmetro de 250  $\mu\text{m}$ , porém em menor quantidade. Além desse fato, foram identificadas partículas de lodo de anodização e de vidro não reagidas na matriz, o que leva a considerar uma necessidade de alteração do processo de cura, como o aumento do tempo por exemplo.

#### 4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A composição química e mineralógica do resíduo de vidro plano, apresenta uma quantidade suficiente e necessária do  $\text{SiO}_2$  que, por ser o principal componente na formação da matriz geopolimérica, atende assim aos requisitos indicados na literatura.

O lodo proveniente da anodização do alumínio tem um elevado teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  justificado pelo processo de anodização do alumínio. Considerando que cada indústria adapta o processo de anodização da maneira que lhe convier, adotando parâmetros diferentes, pode haver diferença dos componentes químicos encontrados em seus resíduos. O fíler mineral utilizado mantém o padrão da composição química, pois possui mais de 83% de sua composição como sendo o  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

A variação entre os tamanhos das partículas melhora a composição geopolimérica, uma vez que essa influencia o volume de vazios da mistura, diminuindo assim a porosidade. O aspecto da morfologia e grau de esfericidade dos materiais são aspectos importantes que podem permitir uma distribuição granulométrica contínua, que pode levar a uma maior compacidade, tendo como consequência um aumento da resistência mecânica.

No estudo dos geopolímeros o tipo de material utilizado na composição, a relação

sólido/líquido e a porosidade são algumas das variáveis que influenciam diretamente no valor dessa propriedade mecânica. Ressalta-se que os materiais sintetizados para este projeto experimental foram curados em temperatura ambiente. A cura em temperatura ambiente é almejada, pois dispensa o gasto energético e equipara-se à propriedade de cura dos cimentos tradicionais. No entanto, pela diferença significativa entre os resultados, a cura térmica mostrou-se viável apesar de levar a um maior custo operacional. Em outras palavras, a proposta de aplicação desse produto pode ser um indicador importante no tipo de cura a ser utilizado.

A alteração da composição da parte líquida com um aumento do teor de NaOH levou a uma redução da resistência mecânica. Esse aspecto pode ser justificado, pois o hidróxido de sódio atua apenas como catalisador, sendo que o silicato atua no processo de geopolimerização, levando a uma melhora das propriedades mecânicas. Outro aspecto observado foi que o aumento do teor de hidróxido de sódio na mistura levou a um aumento de tempo necessário para a cura em temperatura ambiente.

A porosidade identificada é típica em geopolímeros sintetizados e curados em temperatura ambiente, devido a algumas partículas reagirem parcialmente ao serem ativadas, sendo que esta é ocasionada pela presença de líquidos que não fizeram parte da reação. A existência de poros e suas interconexões podem ser minimizadas, pois é através deles que ocorre a entrada de água na estrutura, seja por capilaridade ou absorção.

## 5 CONCLUSÕES

A utilização dos resíduos do pó de vidro, lodo de anodização de alumínio e fíler mineral, para a sintetização de materiais geopoliméricos é viável justificado pelas questões de sustentabilidade e pelos resultados de resistência mecânica encontrados.

O aumento de resistência mecânica à compressão foi obtido com a ampliação do tempo de cura em temperatura ambiente. Ou seja esses geopolímeros, para o aumento da resistência mecânica, necessitam de um tempo de cura mais elevado quando comparado ao tempo de cura das às argamassas convencionais.

A composição com 30% de líquidos ativadores em valores de massa levou à maior média de resistência à compressão, com 17,8 MPa aos 90 dias de idade.

Corpos de prova curados em estufa obtiveram resistência à compressão média de 31,5 MPa, com tempo de cura de 7 dias, sendo os três primeiros dias em cura à temperatura ambiente e os quatro dias restantes em cura térmica a 50°C. Essa elevação de praticamente 70% na cura justifica plenamente a utilização da cura térmica para esse tipo

de material.

Observou-se que a adição da solução de hidróxido de sódio acima de 10% em massa reduz a resistência mecânica à compressão em todas as idades, indicando assim o limite para utilização de ativador alcalino.

Conclui-se, assim, que existe viabilidade para a obtenção de geopolímeros a partir de resíduos industriais do setor de vidro, do lodo de anodização de alumínio, juntamente com material que tenha como base o aluminossilicato e atuando em meio alcalino. Assim, o cimento geopolimérico à base de resíduos do vidro e lodo de anodização do alumínio revela-se como mais uma alternativa de material cimentício, com características de desempenho voltadas para situações não estruturais e com apelo à sustentabilidade.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.- ABNT- NBR 7215: “Cimento Portland: determinação da resistência à compressão”. Rio de Janeiro, 1997.

ASTM. “Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density , Apparent Porosity, and Apparent specific Gravity of Fired Whiteware Products.” ASTM C373-88. ASTM International. 88, n. 2006, p. 40–41, 2013.

CASAGRANDE, M. C.; SARTOR, M. N.; GOMES, V.; DELLA, V. P.; HOTZA, D.; OLIVEIRA, A. P. N. “Reaproveitamento de Resíduos Sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico”. Cerâm. Ind. 2008, v. 13, n. 1.

CHEN, C.; HABERT, G., BOUZIDI, Y., JULLIEN, A. “Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation”. Journal of Cleaner Production, v. 18, n. 5, p. 478-485, 2010.

DAVIDOVITS, J. X. “Geopolymer cement: A review”. Geopolymer Institute, Technical papers, v. 21, p. 1-11, 2013.

FENG, D.; PROVIS, J. L.; DEVENTER, J. S. J. “Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers”. Journal of the American Ceramic Society, v. 95, n. 2, 2012.

HAJJAJI, W. et al. Composition and technological properties of geopolymers based on metakaolin and red mud. Materials & Design, v. 52, p. 648 - 654, 2013.

KIM, J., MOON, J. H., SHIM, J. W., SIM, J., LEE, H. G., & Zi, G. “Durability properties of a concrete with waste glass sludge exposed to freeze-and-thaw condition and de-icing salt”. Construction and Building Materials, 66, 398-402, 2014.

LEE, Hyeongi et al. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. Journal of Cleaner Production, v. 170, p. 683-693, 2018.

NUERNBERG, N. B. Desenvolvimento e caracterização de geopolímeros a partir da cinza de casca de arroz e do lodo de anodização de alumínio. Dissertação de Mestrado. Universidade Do Extremo Sul Catarinense – UNESC. 2018.

PIRES, V. P.; WATZKO, E. S.; PINEDA, T. G. - Adsorção de índigo carmim em geopolímeros conformados a partir de resíduos industriais: revisão bibliográfica – Brazilian Journal of Development DOI:10.34117/bjdv5n12-116 – vol. 5, nº2 – Curitiba – 2019.

PREZA, C. R. A. S.; BRITO, W.S.; LIMA, A. S. S. ; NASCIMENTO, S.C.C.; SOUZA, J. A. S. - Geopolimerização do Metacaulim ferruginoso com adição de cinza volante - Brazilian Journal of Development DOI:10.34117/bjdv6n3-150 - vol. 6, nº2 – Curitiba – 2020.

RIBEIRO, A. O. Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 87 f., 2015.

SPRICIGO, L. P. Valorização de resíduos de vidro plano e de anodização de alumínio para síntese de geopolímero. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais PPGCEM. Criciúma – SC: UNESC, 2017.

TORGAL, F. P.; GOMES, J. P.; JALALI, S. “Ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira: resistência ao desgaste e ao ataque de soluções ácidas”. Engenharia Civil, UM, n. 31, p. 67 – 76, 2008.