



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



**Geovanne Pereira Gondim dos Santos**

**Geopolímero à base de metacaulim com incorporação de resíduo de  
polimento de placas de vidro: Análise por meio da propagação de onda  
ultrassônica**

Uberlândia

2022

**Geovanne Pereira Gondim dos Santos**

GEOPOLÍMERO À BASE DE METACAULIM COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE PLACAS DE  
VIDRO: ANÁLISE POR MEIO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA  
ULTRASSÔNICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau em bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Leila Aparecida de Castro Motta

Uberlândia

2022

**Geovanne Pereira Gondim dos Santos**

GEOPOLÍMERO À BASE DE METACAULIM COM INCORPORAÇÃO DE  
RESÍDUO DO POLIMENTO DE PLACAS VIDRO: ANÁLISE POR MEIO DA  
PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA

Trabalho de Conclusão de Curso, na forma de artigo, apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau bacharel em Engenharia Civil.

---

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Leila Aparecida de Castro Motta

---

Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi

---

Prof. Dra. Eliane Betânia Carvalho Costa

---

Aluno: Geovanne Pereira Gondim dos Santos

Uberlândia

2022

## Lista de Figuras

Figura 1: Metacaulim.....	13
Figura 2: Resíduo de Vidro em Pó .....	14
Figura 3: Silicato de Sódio .....	15
Figura 4: Hidróxido de Sódio .....	15
Figura 5: Peneiramento do Resíduo de Vidro .....	19
Figura 6: Compósito Misturado Manualmente.....	20
Figura 7: Compósito Após Misturador Mecânico .....	20
Figura 8: Adensamento dos corpos de prova .....	21
Figura 9: Corpos de prova armazenados .....	21
Figura 10: Aparelho utilizado no ensaio de ultrassom .....	24
Figura 11: Amostra posicionada para o ensaio de ultrassom .....	24
Figura 12: Velocidade de Propagação da Onda em função da taxa A/P .....	25
Figura 13: Velocidade de Propagação da Onda em função da taxa incorporação de vidro .....	26
Figura 14: Gráfico de Pareto da Velocidade de Propagação da Onda.....	27
Figura 15: Superfície de Resposta Velocidade de Propagação da Onda.....	28
Figura 16: Curvas de Contorno Velocidade de Propagação da Onda .....	29
Figura 17: Gráfico de Valores Preditos x Observados – Velocidade de Propagação da Onda	30
Figura 18: Gráfico de Pareto considerando nível de significância de 10%.....	30
Figura 19: Variação do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos.....	31
Figura 20: Gráfico de Pareto Módulo de Elasticidade .....	32
Figura 21: Superfície de Resposta Módulo de Elasticidade .....	33
Figura 22: Curvas de Contorno Módulo de Elasticidade .....	34
Figura 23: Gráfico de Valores Preditos x Observados – Módulo de Elasticidade Dinâmico ..	35

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Aplicações de Geopolímero conforme razão molecular Si/Al .....	12
Tabela 2: Codificação das Variáveis .....	16
Tabela 3: Codificação e Descodificação das variáveis.....	17
Tabela 4: Relações e Razões utilizadas na formulação dos Geopolímeros.....	17
Tabela 5: Proporção dos constituintes em massa .....	17
Tabela 6: Proporção dos constituintes das formulações dos experimentos.....	18
Tabela 7: Velocidade de Propagação da Onda .....	24
Tabela 8: Comparação da Velocidade em função da taxa de incorporação de Vidro .....	27
Tabela 9: Módulo de Elasticidade Dinâmico dos compósitos estudados.....	31

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>9</b>
1.1. Objetivo.....	10
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>11</b>
2.1. Geopolímeros .....	11
2.2. Ativação Alcalina.....	11
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>13</b>
3.1. Materiais.....	13
3.2. Planejamento Experimental .....	15
3.3. Experimentos .....	17
3.4. Moldagem e cura dos corpos de prova.....	18
3.5. Ensaios .....	21
<b>4. Resultados e Discussão .....</b>	<b>24</b>
4.1. Velocidade de Propagação da Onda .....	24
4.2. Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	31
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>36</b>
<b>Referências .....</b>	<b>38</b>

## RESUMO

A indústria da construção civil explora e utiliza materiais naturais, causando degradação e impacto ambiental, tanto na extração destes materiais, quanto utilização e no descarte de resíduos. Em contrapartida, o mercado da construção civil tem em seu histórico, grande capacidade de agregar novas tecnologias no seu âmbito, principalmente renováveis, onde o objetivo é a utilização de materiais alternativos e/ou reutilização de materiais. Os geopolímeros tem se destacado por sua grande efetividade para esta finalidade, agregando qualidade aos novos materiais e se mostrando economicamente viáveis. Para a sintetização do geopolímero, são necessários dois tipos de materiais: a matéria prima (material base) e a solução alcalina, responsável pela ativação do geopolímero. A presente pesquisa visa a sintetização e a avaliação de um geopolímero a partir de metacaulim e resíduo de vidro como material base, ativado por silicato de sódio e hidróxido de sódio, estudados em diferentes proporções de solução. A partir do ensaio não destrutivo de ultrassom, foi possível estudar as características físicas do geopolímero e suas propriedades mecânicas. Os resultados obtidos demonstram que o geopolímero a base de 100% metacaulim se demonstrou a melhor alternativa para as características físicas. Apesar disso, a análise quanto a utilização do resíduo de vidro foi satisfatória, podendo observar que o resíduo de vidro pode ser incorporado com o intervalo de 0% - 12% sem perda significativa das propriedades estudadas. Além disso, foi comprovada que a interação entre o resíduo de vidro e a idade é significativa. Ademais, a taxa ativador/precursor se mostrou a variável mais significativa, verificando que, os resultados mais efetivos encontrados correspondem à diminuição da taxa A/P, a partir de um valor observado de 0,54.

**Palavras-chave:** geopolímero; resíduo de vidro; ativação alcalina; metacaulim;

## ABSTRACT

The construction industry explores and uses natural materials, causing degradation and environmental impact, both in the extraction of these materials and in the use and disposal of waste. On the other hand, the civil construction market has, in its history, great capacity to add new technologies in its scope, mainly renewable, where the objective is the use of alternative materials and/or reuse of materials. Geopolymers have stood out for their great effectiveness for this purpose, adding quality to new materials and proving to be economically viable. For the synthesis of the geopolymer, two types of materials are needed: the raw material (base material) and the alkaline solution, responsible for the activation of the geopolymer. The present research aims at the synthesis and evaluation of a geopolymer from metakaolin and waste glass as a base material, activated by sodium silicate and sodium hydroxide, studied in different proportions of solution. From the non-destructive ultrasound test, it was possible to study the physical characteristics of the geopolymer and its mechanical properties. The results obtained demonstrate that the geopolymer based on 100% metakaolin proved to be the best alternative for the physical characteristics. Despite this, the analysis regarding the use of waste glass was satisfactory, and it can be observed that waste glass can be incorporated with a range of 0% - 12% without significant loss of the properties studied. In addition, the interaction between glass residue and age has been shown to be significant. Furthermore, the activator/precursor rate proved to be the most significant variable, verifying that the most effective results found correspond to the decrease in the A/P rate, from an observed value of 0.54.

**Keywords:** geopolymer; glass residue; alkaline activation; metakaolin.

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento da indústria da construção civil traz consigo inovações que agregam ao mercado. A consciência ecológica dos consumidores está aumentando, isso faz com que as autoridades e os produtores busquem cada vez mais informações sobre os impactos ambientais associados aos processos produtivos e ao uso e descarte final dos produtos. Com diferentes vieses e alternativas, a oportunidade de escolha de um simples material ou método tornou-se relevante saber todo o processo de fabricação do material e se este agride ou não o meio ambiente.

O cimento Portland, por exemplo, destaca-se como o material artificial de maior produção do mundo. Na produção do clínquer ocorre o processo de descarbonatação de uma das matérias primas, o calcário, em que é emitida uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante produção de apenas uma tonelada de clínquer. Estima-se que as emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção correspondem de 5 a 10% das emissões globais de CO<sub>2</sub> produzidas pelo homem (SCRIVENER E KIRKPATRICK, 2008). Além da emissão de gases poluentes, há um alto consumo energético neste processo. Além disso, é importante destacar os resíduos da construção civil, os quais, muitas vezes não são descartados de forma correta e não são reutilizados.

A ABNT NBR 10004:2004 classifica como resíduos inertes, subgrupo dos resíduos não perigosos, aqueles resíduos que, quando em contato dinâmico ou estático com água destilada ou desionizada não tem seus constituintes solubilizados. Grande parte do resíduo da construção é inerte, isto é, não se altera com o meio e geram, portanto, uma permanência na natureza por tempo prolongado. Conseqüentemente, isto pode gerar grande volume aglomerado, o que é um grande risco para a ocupação urbana e para o meio ambiente. O resíduo da indústria vítrea é considerado inerte e é categorizado na Classe B da ABNT NBR 15114:2004, como altamente reaproveitável.

Assim, como dito inicialmente, o mercado da construção civil, visando se adaptar e inovar, busca constantemente a integração de novos materiais, processos e tecnologias, que transformem positivamente, a maneira como a construção civil afeta o ambiente externo, em geral, soluções que diminuam o impacto ambiental negativo atribuído a esta indústria (PROVIS, 2013).

Dessa forma, a reutilização de resíduos visa a substituição de matérias primas comuns da construção civil, em especial, a do cimento utilizado como aglomerante em compósitos como o concreto, por outros materiais equivalentes de qualidade e custos semelhantes, sendo

menos nocivos para o ambiente como os geopolímeros.

Duxson *et al.* (2006) caracteriza os geopolímeros, de forma sucinta, como uma série de ligantes inorgânicos desenvolvidos a partir do processo de sintetização chamado de ativação alcalina, no qual é incorporado a um material base rico em sílica e alumina, uma solução alcalina, que atua como catalisador para ativação alcalina. Como na produção de geopolímero não há calcinação em altas temperaturas diferentemente da produção do clínquer Portland, os geopolímeros em muito contribuem para o desenvolvimento sustentável. Ademais, os geopolímeros são materiais de alta resistência inicial, estáveis à altas temperaturas e não inflamáveis (PROVIS, 2013).

Muitos materiais foram listados e pesquisados como possíveis materiais base para o processo de geopolimerização, a exemplo, compostos industrializados como o metacaulim ou resíduos vindouros de processos industriais, como a cinza volante e escória de alto forno. Assim, tendo em vista as considerações supracitadas, o presente trabalho visa a utilização do resíduo de vidro como substituição parcial do metacaulim (material base) na obtenção de geopolímeros.

### **1.1. Objetivo**

A presente pesquisa tem por objetivo geral a obtenção e preparação de geopolímeros a partir metacaulim e de resíduos industriais de vidro como material base precursores. Foi feita uma avaliação referente a variação da quantidade de vidro incorporado ao metacaulim, assim como a variação da taxa ativador/precursor. Os geopolímeros foram obtidos a partir do processo de ativação alcalina com silicato de sódio e hidróxido de sódio.

Além disso, a pesquisa visa avaliar propriedades e características em estado final endurecido dos geopolímeros por meio do ensaio da onda ultrassônica. A partir do ensaio de onda ultrassônica é possível determinar, o módulo de elasticidade dinâmico e, principalmente, relacionar a velocidade de propagação da onda com a porosidade do compósito.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Geopolímeros

O conceito de geopolímero foi introduzido inicialmente ao tentar se aplicar os conhecimentos relacionados aos polímeros orgânicos à síntese de polímeros inorgânicos. A ativação alcalina de materiais minerais de aluminossilicatos dá nome ao que se chama de geopolimerização (DAVIDOVITS, 1976 e 1982).

Segundo Pinto (2006), a pesquisa e descoberta dos ligantes de base alcalina a partir de aluminossilicatos se deu ao analisar a durabilidade e alta resistência de cimentos antigos de construções históricas em comparação com o desgaste encontrados em obras de concreto armado atual. Silva (2016) afirma que em grandes escavações históricas e mineralógicas, ligantes muito antigos encontravam pouquíssima degradação e que em certas ocasiões eram encontrados de certa forma, intactos, do ponto de vista físico-químico.

O termo “geopolímero” foi cunhado por Davidovits ao tentar gerar um compósito inorgânico não inflamável, entretanto, o resultado obtido foi um material sílico-aluminoso obtido por meio da ativação alcalina. Davidovits (1991) caracteriza este novo material como um gel alcalino que, na sua fase de formação, os aluminossilicatos são ligados em uma estrutura tetraédrica tridimensional. Barbosa *et al* (2000) cunharam o termo polissialatos referenciando este mesmo material caracterizado pela síntese dos aluminossilicatos em solução alcalina em temperatura ambiente.

A partir disto, deu-se início a várias pesquisas sobre os aluminossilicatos e geopolimerização de materiais, sendo que, grande parte destas pesquisas visavam o entendimento das propriedades instigantes as quais os geopolímeros apresentavam. Como por exemplo elevada resistência à compressão, resistência ao fogo e a ácidos, além de baixa retração e baixa condutividade térmica (DAVIDOVITS, 1991).

### 2.2. Ativação Alcalina

Pinto (2006) afirma que há dois tipos de ativação alcalina: com a presença de cálcio e sem a presença de cálcio. Os geopolímeros pertencem ao grupo onde a presença de cálcio é desprezível e se formam quando o material base (precursores) entra em contato com uma solução alcalina (ativadores). A ativação desencadeia o processo de endurecimento por reações de policondensação (SCHNEIDER *et al.*, 2011).

. Este tipo de ativado alcalino leva como material precursor, materiais ricos em aluminatos e silicatos como exemplo, argilas e caulinita, metacaulim, resíduos industriais, escórias, sílica amorfa, cinzas volantes. Os precursores comumente são ativados com

hidróxidos de sódio ou potássio e soluções de silicato de sódio (DAVIDOVITS, 2013).

O estudo das propriedades dos aluminossilicatos garante que as características mecânicas do compósito final produzido estão diretamente relacionadas com a proporção de aluminossilicatos na mistura (VAFAEI; ALLAHVERDI, 2016). Schneider *et al.* (2011), afirmam que as propriedades finais do geopolímero em estado endurecido estão diretamente relacionadas com a composição química dos materiais precursores.

É comum encontrar, em pesquisas de geopolímeros, a razão molecular Si/Al, a qual, define em proporção, a quantidade de silício e alumínio presente nos materiais. Esta razão está diretamente ligada com a finalidade para a qual o geopolímero será utilizado, pois a razão afeta a microestrutura final do material e conseqüentemente, a devida utilização, como demonstra a Tabela 1. (DAVIDOVITS, 2002).

Tabela 1 – Aplicações de Geopolímero conforme razão molecular Si/Al

Razão Si/Al	Aplicações
1	Tijolos; Cerâmicas; Proteção ao fogo.
2	<b>Cimentos e concretos com baixa emissão de CO<sub>2</sub></b>
	Encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos
3	Compósitos com fibra de vidro para proteção ao fogo
	Equipamentos de fundição
	Compostos resistentes ao calor, de 200 a 1000 °C
	Ferramentas para aeronáutica
>3	Selantes para a indústria, de 200 a 600 °C
	Ferramentas para aeronáutica
20 – 35	Compósitos com fibra resistentes ao calor e ao fogo

Fonte: Davidovits (2002) traduzido e adaptado

### 2.3. Resíduo de Vidro

O vidro é o resultado da fusão de diversos óxidos inorgânicos. O principal entre eles é o óxido de silício, também chamado de sílica, que endurece após o processo de resfriamento (SICHERI *et al.*, 2007). Além disso, o vidro é um material que pode ser reciclado diversas vezes sem perder propriedades importantes. Mas esse resíduo pode ser utilizado também na produção de concretos e argamassas, como material pozolânico, por causa da sua composição e organização estrutural, composto basicamente por sílica amorfa. Neste contexto, esse resíduo pode ser aproveitado também como fonte de silício para formulações de geopolímeros.

### 3. METODOLOGIA E MATERIAIS

Diante do presente projeto, foram produzidos diferentes geopolímeros com adições parciais de resíduo de vidro para análise das propriedades mecânicas dos compósitos por meio de ensaio da onda ultrassônica, que possibilita análise da velocidade de propagação da onda no compósito, assim como a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico e porosidade.

O geopolímero foi produzido à base de metacaulim. A ativação alcalina do geopolímero se deu com soluções de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Para análise experimental foram variados três fatores: o teor de resíduo de vidro no compósito, a razão de ativadores/precusores, e a idade de ensaio dos geopolímeros.

A análise dos resultados se deu por comparação entre os compósitos gerados, procurando encontrar um ponto ótimo de execução para as variáveis especificadas.

#### 3.1. MATERIAIS

##### 3.1.1. Metacaulim

Foi utilizado no presente estudo o denominado Metacaulim HP ULTRA, doado pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda, de Jundiaí – Estado de São Paulo.

Figura 1 – Metacaulim



Fonte: Autor (2022)

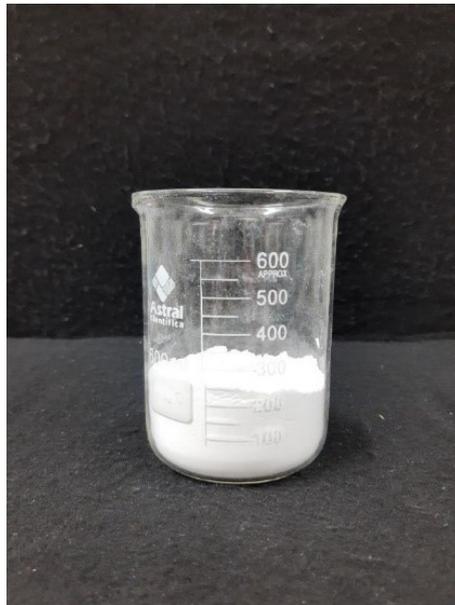
O metacaulim utilizado tem massa específica  $2,65\text{g/cm}^3$ , além de diâmetro médio de

12,4  $\mu\text{m}$  (GRATÃO, 2021). Além disso, sua composição tem caráter reativo caracterizado por 57% de  $\text{SiO}_2$  e 34% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (METACAULIM, 2022).

### 3.1.2. Resíduo de Vidro

Foi utilizado o resíduo de vidro coletado em uma indústria na cidade de Uberlândia que adquire placas de vidro float (ou vidro plano). No processo de lapidação das placas de vidro, feita na presença de água, as arestas das placas são polidas, o que gera o resíduo. A água contendo o resíduo é retida e tratada com produto flocculante para facilitar a retirada do resíduo da água. O resíduo em pó obtido tem massa específica  $2,48 \text{ g/cm}^3$  e diâmetro médio de partículas de  $19,6 \mu\text{m}$  (RIBEIRO, 2015).

Figura 2 – Resíduo de Vidro em pó

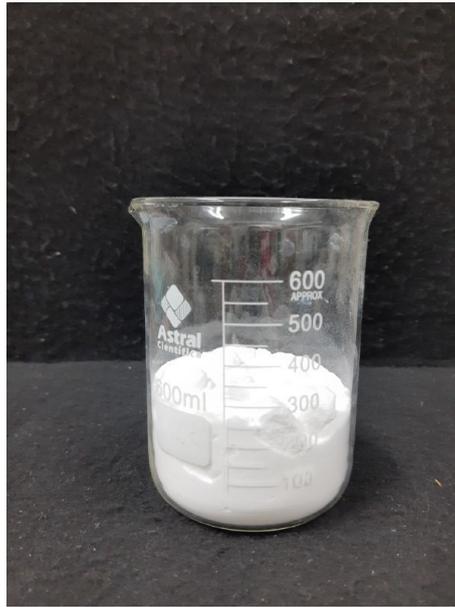


Fonte: Autor (2022)

### 3.1.3. Ativadores: Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio

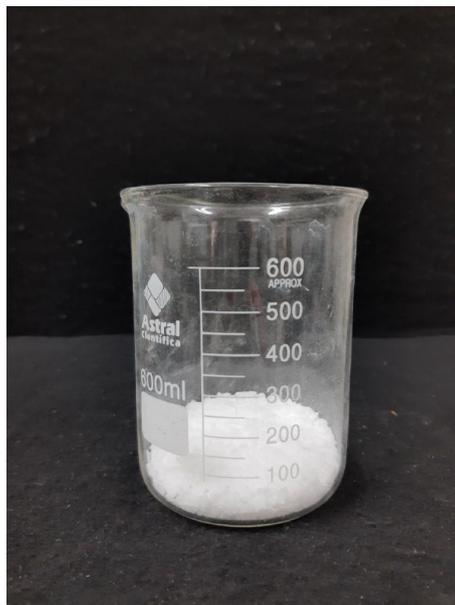
O silicato de sódio usado apresenta relação entre os óxidos ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) de aproximadamente 2. O Hidróxido de Sódio apresenta formato em escamas de  $\text{NaOH}$  com concentração de 96% - 99% . Os ativadores estão apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Figura 3 – Silicato de Sódio



Fonte: Autor (2022)

Figura 4 – Hidróxido de Sódio



Fonte: Autor (2022)

### 3.2. Planejamento Experimental

A escolha do planejamento experimental é de extrema importância quando se trabalha com diferentes variáveis em um processo. Peralta-Zamora *et al.* (2005) demonstram que para sistemas multivariados, o **planejamento fatorial** de experimentos viabiliza avaliar melhor as interações entre variáveis, além de viabilizar um melhor reconhecimento de ponto ótimo verdadeiro. Cunico *et al.* (2008) afirmam que para melhor análise de como as variáveis se interagem, o planejamento fatorial certifica-se como um dos métodos de avaliação mais adequado.

Para o planejamento fatorial, foi utilizado a fórmula  $b^k$ , na qual  $b$  é o número de níveis escolhidos e  $k$  representa o número de variáveis. Segundo Neves *et al.*, (2002), o caso mais simples deste método é representado em dois níveis (limites do intervalo de variação). Além disso, para estes autores, o procedimento experimental em dois níveis é mais bem aproveitado com a quantidade de variáveis reduzidas ( $>4$ ). Então, o planejamento experimental em dois níveis (-1 e 1) de codificação, com ponto médio (0) é demonstrado com a fórmula  $2^k$ , sendo  $k = 3$  variáveis independentes.

As variáveis escolhidas (A, B e C) para o ensaio foram: idade do compósito (A), variando entre 1 dia e 14 dias, com ponto médio de 7 dias de idade; a segunda variável foi o teor ativador/precursor (B), variando entre 0,5 e 0,7, com ponto médio igual a 0,6; e a terceira e última variável foi o teor de substituição do metacaulim pelo resíduo de vidro (C), com proporção de substituição em massa de 0% a 25%, com ponto médio de 12,5%, (ALVES, 2018; RIBEIRO, 2015; DADSETAN *et al.* 2021; ALVARENGA, 2018; NOVAIS *et al.* 2016).

Esta representação demonstra, portanto, que  $2^3 = 8$  experimentos. Segundo Cunico *et al.* (2008), é necessário calcular a tendência de linearidade e o cálculo do erro experimental, através de um ponto central (0) ensaiado em triplicata. Portanto, acrescidos a estes oito ensaios estão os experimentos de verificação, isto é, três experimentos utilizando os pontos médios da codificação. Por fim, para o planejamento fatorial fez-se um total de onze experimentos.

Na Tabela 2 é apresentada a codificação dessas variáveis, e na Tabela 3 a codificação e decodificação delas para cada experimento realizado.

Tabela 2 – Codificação das Variáveis

Codificação	Variável A	Variável B	Variável C
	Idade de Ensaio (dias)	Relação ativador/precursor	Teor de resíduo de vidro em substituição ao metacaulim (%)
-1	1	0,5	0
0	7	0,6	12,5
1	14	0,7	25

Fonte: Autor

Tabela 3 – Codificação e Descodificação das variáveis

Experimentos	Codificação			Descodificação		
	A	B	C	Idade (dias)	Ativ/Prec	Vidro (%)
1	-1	-1	-1	1	0,5	0
2	1	-1	-1	14	0,5	0
3	-1	1	-1	1	0,7	0
4	1	1	-1	14	0,7	0
5	-1	-1	1	1	0,5	25
6	1	-1	1	14	0,5	25
7	-1	1	1	1	0,7	25
8	1	1	1	14	0,7	25
9	0	0	0	7	0,6	12,5
10	0	0	0	7	0,6	12,5
11	0	0	0	7	0,6	12,5

Fonte: Autor

Para a análise estatística dos resultados obtidos e investigação do método de planejamento fatorial assim como a análise da interferência de uma variável em relação a outra foi utilizado o *software* Statistica 7.0.

### 3.3. Formulação dos geopolímeros

As formulações utilizadas na produção dos geopolímeros, assim como as razões essenciais foram feitas com embasamento e adaptação da literatura e de estudos anteriores do grupo de pesquisa da FECIV: relação ativadores/precursores, líquido/sólidos, molaridade das soluções, proporção dos ativadores (ALVES, 2018; GRATÃO, 2022; DADSETAN *et al.* 2021) e porcentagem de substituição do vidro (ALVARENGA, 2018; NOVAIS *et al.* 2016) listados na Tabela 4.

Ressalta-se que para definir os limites do teor de incorporação de resíduo de vidro foram

consultados vários trabalhos que avaliaram o uso de resíduos de diferentes origens para produção de geopolímeros (ALVARENGA, 2018; NOVAIS *et al*, 2016; SI *et al*, 2019; SI *et al*, 2020; DADSETAN *et al*, 2021; EL-NAGGAR *et al*, 2016; LIN *et al*, 2012; BAI *et al*, 2020). No entanto, nenhum trabalho avaliou o resíduo gerado no polimento de placas planas de vidro, o que motivou este estudo.

Tabela 4 – Relações utilizadas na formulação dos Geopolímeros

Líquido/ Sólido	Molaridade do NaOH (M)	Molaridade do Silicato de Sódio (M)	Silicato/Hidróxido
0,4	12	12	2,5

Fonte: Autor (2022)

A partir das três variáveis de projeto, relações e razões fixadas, foi possível determinar as proporções usadas para o preparo de cada formulação dos 11 experimentos, como demonstrado em proporção na Tabela 5 e em massa na Tabela 6.

Tabela 5 –Proporção dos constituintes das formulações dos experimentos

EXPERIMENTOS	METACAU LIM	VIDRO	NAOH	NA <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
1	1	0	0,14	0,36	0,6
2	1	0	0,2	0,5	0,68
3	1	0	0,14	0,36	0,6
4	1	0	0,2	0,5	0,68
5	0,75	0,25	0,14	0,36	0,6
6	0,75	0,25	0,14	0,36	0,6
7	0,75	0,25	0,2	0,5	0,68
8	0,75	0,25	0,2	0,5	0,68
9	0,88	0,13	0,17	0,43	0,64
10	0,88	0,13	0,17	0,43	0,64
11	0,88	0,13	0,17	0,43	0,64

Fonte: Autor (2022)

Tabela 6 – Proporção dos constituintes em massa

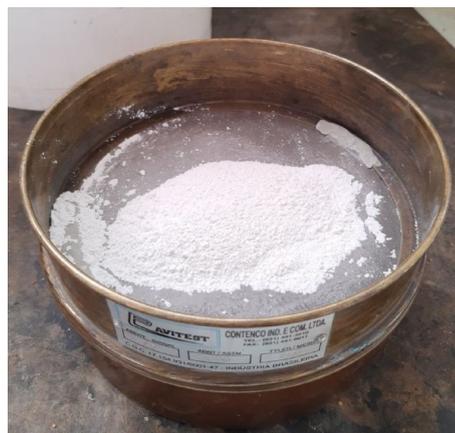
EXPERIMENTOS	VARIÁVEIS			CONSUMO DE MATERIAIS (g) P/ BATEDEIRA (>640 cm <sup>3</sup> )				
	IDADE	ATIV/PREC	% VIDRO	METACALUM	RESÍDUO DE VIDRO	NAOH	NA <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O (g)
1	1	0,5	0	585,033	0,000	83,576	208,940	351,020
2	1	0,7	0	514,635	0,000	102,927	257,317	349,951
3	14	0,5	0	585,033	0,000	83,576	208,940	351,020
4	14	0,7	0	514,635	0,000	102,927	257,317	349,951
5	1	0,5	25	437,629	145,876	83,358	208,395	350,103
6	14	0,5	25	437,629	145,876	83,358	208,395	350,103
7	1	0,7	25	385,089	128,363	102,690	256,726	349,147
8	14	0,7	25	385,089	128,363	102,690	256,726	349,147
9	7	0,6	12,5	478,546	68,364	93,756	234,390	350,023
10	7	0,6	12,5	478,546	68,364	93,756	234,390	350,023
11	7	0,6	12,5	478,546	68,364	93,756	234,390	350,023
<b>Total em Kg</b>				5,280	0,754	1,026	2,566	3,851

Fonte: Autor (2022)

### 3.4. Preparo dos geopolímeros e moldagem dos corpos de prova

O processo de produção dos geopolímeros inicia-se com a preparação do resíduo de vidro. O resíduo de vidro foi peneirado na peneira ASTM 200 Mesh com abertura de 75 µm. O intuito do peneiramento do resíduo de vidro se dá pela facilitação do destorroamento do material, devido ao longo período de armazenado e a utilização de partículas mais finas possíveis do material, conseqüentemente, mais reativas (GUIMARÃES, 2015).

Figura 5 – Peneiramento do Resíduo de Vidro



Fonte: Autor (2022)

A partir disto, foi realizada a pesagem de todo o material para cada experimento em questão. Em seguida, foram preparadas as soluções de hidróxido de sódio (12M) e silicato de sódio (12M). Ambas as soluções são exotérmicas, sendo necessário aguardar a redução de temperatura das mesmas, até cerca de 40°C, mensurada com um termômetro. Além disso, as

soluções foram preparadas separadamente e só misturadas posteriormente para obtenção da solução alcalina ativadora.

Assim, a solução ativadora foi adicionada aos materiais precursores, sendo estes, o metacaulim e o resíduo de vidro (nos experimentos em que há a incorporação do resíduo). Em seguida, a porção de água necessária para atingir o teor líquido/sólido foi adicionada na mistura, completando a água utilizada para as soluções do hidróxido e silicato de sódio. O compósito foi misturado manualmente cerca de três minutos, mistura apresentada na Figura 6, e posteriormente, homogeneizada em batedeira planetária industrial de doze litros por cerca de cinco minutos, representada na Figura 7. O procedimento se repetiu para todos os experimentos em questão

Figura 6 – Compósito misturado manualmente



Fonte: Autor (2022)

Figura 7 – Compósito após homogeneização em misturador mecânico



Fonte: Autor (2022)

Foram utilizadas formas metálicas prismáticas de 30 cm de comprimento e seção transversal de 2,5 cm x 2,5 cm para a moldagem dos corpos de prova, além da mesa de

adensamento por queda, onde foram aplicados trinta golpes no intervalo de 1 segundo em cada golpe, para uma camada única de material na forma (Figura 8). Após 24h os corpos de prova foram desmoldados e embalados em filme de PVC para minimizar a perda de umidade para o ambiente, armazenados na sala de cura, onde ficaram até a idade de ensaio (Figura 9).

Figura 8 – Adensamento dos corpos de prova



Fonte: Autor (2022)

Figura 9 – Corpos de prova armazenados



Fonte: Autor (2022)

### 3.5. ENSAIOS

#### 3.5.1 Ensaio de Ultrassom – Velocidade de Propagação da Onda

O ensaio de ultrassom foi realizado de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 8802:2019 por meio do equipamento Ultrasonic Pulse Velocity Tester UPV E48 da marca CONTROLS ( Figura 10). O ensaio foi realizado pela transmissão direta da onda, isto é, com o corpo de prova entre o transdutor emissor e o transdutor receptor (Figura 11). Entre a face do transdutor e a face do corpo de prova é necessário um material denominado acoplante, neste

caso, foi utilizado gel modelador fixador. Os corpos de prova prismáticos foram todos desmoldados com a idade de 1 dia e armazenados na sala de cura do laboratório.

As dimensões transversais dos corpos de prova foram medidas com paquímetro digital de precisão 0,01mm. Foram realizadas três medições ao longo do corpo de prova em ambas as faces, sendo considerada, a média aritmética destes valores. A dimensão longitudinal foi mensurada com paquímetro universal metálico, com precisão de 0,05mm. Ademais, a massa do corpo de prova também é mensurada para o cálculo da densidade de massa aparente utilizado posteriormente.

Figura 10 – Aparelho utilizado no ensaio de ultrassom



Fonte: Autor (2022)

Figura 11 – Amostra posicionada para o ensaio de ultrassom



Fonte: Autor (2022)

O dado obtido pelo ensaio com o equipamento é o tempo de propagação da onda entre os dois pontos (emissor e receptor), fornecido pelo equipamento em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ). Com este dado e as dimensões do corpo de prova, é possível determinar a velocidade de propagação da onda conforme ABNT NBR 8802:2019 a partir da equação Eq.01.

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Eq. 01}$$

Em que  $V$  é velocidade de propagação da onda, expressa milímetros por microssegundos ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ),  $L$  é a distância entre os pontos de acoplamento das faces dos transdutores, expressa em milímetros ( $\text{mm}$ ), e  $t$  é o tempo mensurado pelo aparelho, em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ). Segundo ABNT NBR 8802:2019, alguns fatores podem alterar a velocidade de propagação da onda, sendo alguns destes: a idade do compósito e a densidade do compósito.

### 3.5.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

A partir da velocidade de propagação da onda encontrada, de acordo com a ABNT NBR 15630:2009, é possível estimar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) a partir da Eq. 02:

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad \text{Eq. 02}$$

Em que  $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico expresso em megaPascal (MPa),  $v$  é a velocidade de propagação da onda, expressa milímetros por microssegundos ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ),  $\rho$  é a densidade de massa aparente do corpo de prova, expressa em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e  $\mu$  é o coeficiente de Poisson, adotado como  $\mu = 0,2$ , de acordo com a ABNT NBR 15630:2009.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Velocidade de Propagação da Onda

Os resultados de velocidade de propagação da onda ultrassônica obtidos por meio do tempo em microssegundos mensurado no equipamento durante o ensaio se encontram na Tabela 7, que contém as médias de velocidade da onda, em metros por segundo ( $\text{m}/\text{s}$ ) de dois corpos de prova que foram moldados para cada experimento, além do desvio padrão.

Tabela 7 – Velocidade de Propagação da Onda

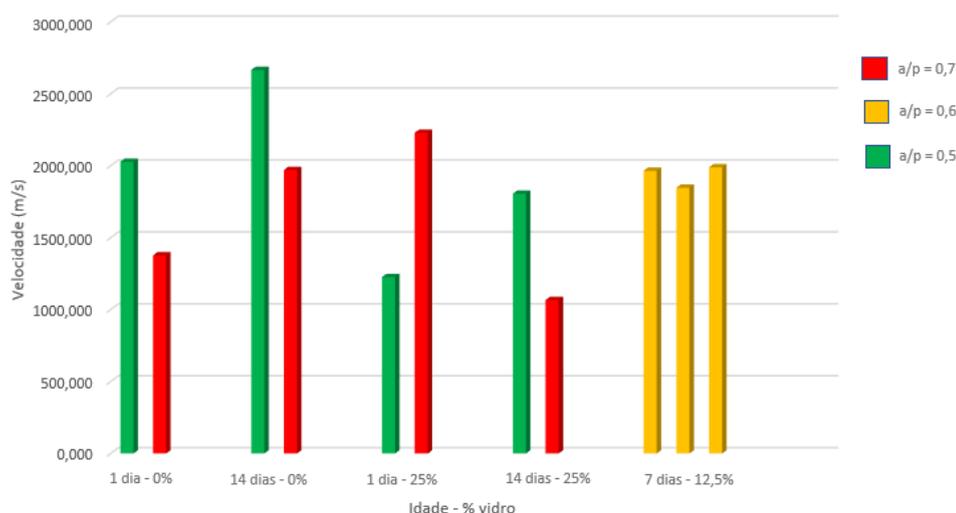
EXPERIMENTO	VARIÁVEIS			VELOCIDADE (m/s)	
	IDADE (DIAS)	A/P	% VIDRO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
EXP 01	1	0,5	0	2027,96	15,14
EXP 02	14	0,5	0	2665,81	31,76
EXP 03	1	0,7	0	1377,25	65,73
EXP 04	14	0,7	0	1970,25	26,47
EXP 05	1	0,5	25	2229,30	9,92
EXP 06	14	0,5	25	1806,03	7,53
EXP 07	1	0,7	25	1226,54	21,97
EXP 08	14	0,7	25	1066,69	83,11
EXP 09	7	0,6	12,5	1965,37	19,66
EXP 10	7	0,6	12,5	1847,35	5,17
EXP 11	7	0,6	12,5	1989,47	28,79

Fonte: Autor (2022)

Os dados a seguir serão analisados de duas formas para melhor aproveitamento e visualização dos resultados obtidos. Primeiramente as três variáveis estudadas serão observadas individualmente e posteriormente, serão analisadas de forma uníssona.

Para melhor análise dos dados, as Figura 12 e Figura 13, classificam e agrupam separadamente as velocidades em função das variáveis Ativador/Precursor e Teor de Vidro (%), respectivamente.

Figura 12 – Velocidade de propagação da onda em função da taxa A/P



Fonte: Autor (2022)

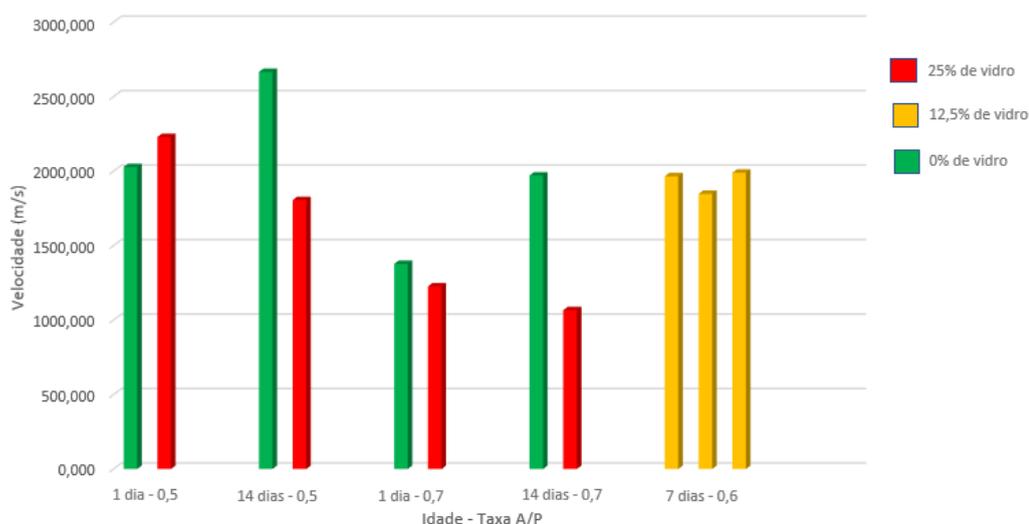
Os experimentos agrupados em duplas na Figura 11, no eixo horizontal, são de mesma idade (dias) e taxa de incorporação de vidro (%), sendo a única variável observada isoladamente, a taxa de ativador/precursor (A/P), variando de 0,5 (limite inferior) a 0,7 (limite superior). Pode-se notar que, mantendo a composição e idade, à medida que a taxa de

ativador/precursor aumenta, a velocidade de propagação da onda diminui.

Em todos os grupos de experimentos, pode se observar redução da velocidade de propagação da onda com o aumento do teor de ativadores. Este excesso de ativadores pode gerar maior porosidade no corpo de prova, pois a velocidade de propagação da onda é maior em sólidos, do que em líquidos ou poros que só contém ar (HALLIDAY, 2016). Isto é validado pela menor velocidade de propagação da onda e conseqüentemente, maior tempo de aferição. Alves (2018) conclui que o uso de ativadores em grandes quantidades em compósitos geopoliméricos produzem materiais não reagidos no composto.

Além disso, pode-se observar que, o EXP 02, com idade de 14 dias, taxa de ativador/precursor de 0,5 e 0% de incorporação de resíduo de vidro apresenta a maior velocidade de propagação da onda. Weng *et al.* (2005) afirma que uma partícula de metacaulim fina aumenta a solubilidade do material, ampliando a homogeneidade do aluminato que reage com os ativadores alcalinos, gerando assim uma microestrutura mais homogênea. Possivelmente, a causa da maior velocidade de propagação da onda no EXP 02 se dá devido a taxa ideal de ativador/precursor, além da ausência das partículas de resíduo de vidro pois, o vidro apresenta partículas com maiores dimensões do que o metacaulim, sendo que, o metacaulim tem partículas com dimensão média de 12,4  $\mu\text{m}$  e o resíduo de vidro tem dimensão média de 19,6  $\mu\text{m}$ .

Figura 13 – Velocidade de Propagação da Onda em função da taxa de incorporação de vidro



Fonte: Autor (2022)

Os experimentos agrupados em duplas na Figura 12, no eixo horizontal, são de mesma idade (dias) e taxa de ativador/precursor (A/P), sendo a única variável observada isoladamente, a taxa de incorporação de vidro (%), variando de 0% (limite inferior) a 25% (limite superior). Pode-se notar que, mantendo a composição de ativadores e idade, a incorporação de resíduo

de vidro diminuiu, no geral, a velocidade de propagação da onda, isto é, houve um aumento significativo dos vazios no geopolímero em estado endurecido.

Si *et al.* (2020) afirmam que a reatividade do vidro é baixa quando comparada com o metacaulim, o que pode diminuir a policondensação no processo de geopolimerização. Além disso, Hao *et al.* (2012) observaram que o grau de reação do geopolímero diminuiu quando a quantidade de resíduo de vidro incorporada é aumentada, resultando em maior porosidade no compósito, o que explica a menor velocidade de propagação da onda encontrada nos experimentos que continham 25% de resíduo de vidro.

Pode-se observar que, quando comparados com os experimentos EXP 05, 06, 07 e 08 ( com 25% de incorporação de vidro) os experimentos EXP 09, 10, 11 ( com 12,5% de incorporação de vidro) obtém uma velocidade de propagação da onda média superior, comparação essa demonstrada pela Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação da velocidade em função da taxa de incorporação de vidro

<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Taxa de Incorporação de Vidro</b>		
	<b>0% Vidro</b>	<b>12,5% Vidro</b>	<b>25% Vidro</b>
	2010,32	1934,06	1582,14

Fonte: Autor (2022)

Percebe-se que os experimentos em que não há a incorporação de vidro apresentam a maior velocidade e, conseqüentemente, a menor porosidade. Ainda assim, nota-se que é possível incorporar o resíduo de vidro sem perda significativa da velocidade de propagação da onda e, conseqüentemente, sem incremento da porosidade do compósito até uma taxa de 12,5%. Entretanto, a partir desta margem, a velocidade diminui consideravelmente e, conseqüentemente, a porosidade aumenta. Esta margem ótima de incorporação de resíduo de vidro ( entre 10% e 12,5%) também foi observada por outros pesquisadores (SI *et al.*, 2019; ALVARENGA, 2018; NOVAIS *et al.*, 2016; HAO, 2012; SI *et al.*, 2020).

Ademais, é possível identificar que a velocidade de propagação da onda é afetada pela idade do compósito quando se há incorporação de vidro. Nos experimentos EXP 01, 05, 03, 07, em idade inicial de 1 dia, não se nota muita interferência na velocidade e os valores permanecem na mesma faixa de intervalo. Entretanto, nas duplas de experimentos EXP 02/06 e EXP 04/08, ambos com maior idade (14 dias de ensaio) é possível observar maior queda de velocidade. Hao *et al.* (2012) atribuem a grande porosidade dos compósitos à quantidade exagerada de resíduo de vidro incorporado (>20%).

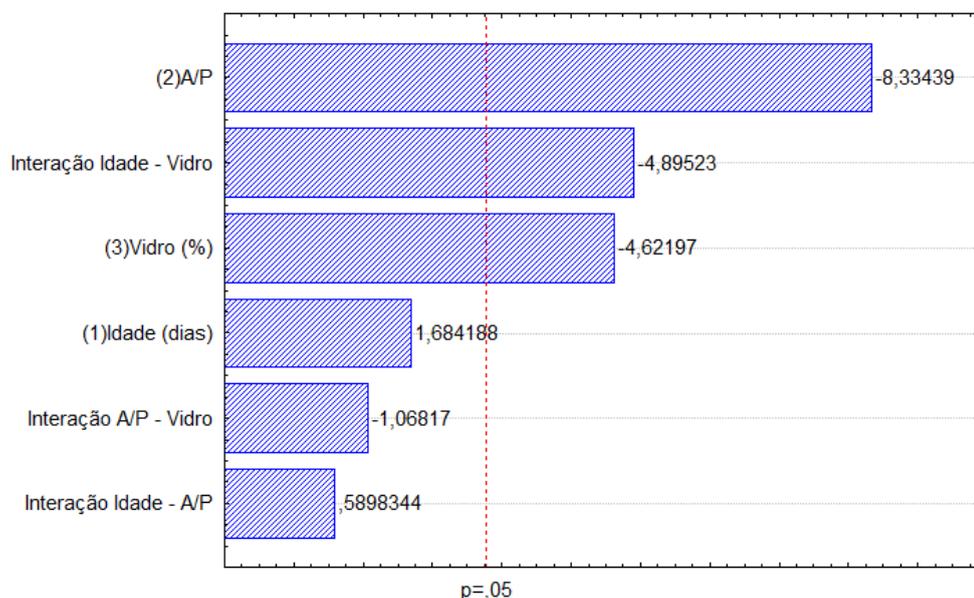
Além de observar os resultados de cada variável individualmente, foi realizado uma análise de influência das variáveis independentes no resultado, nesse caso, a velocidade de

propagação da onda e suas interações entre si, por meio do *software* Statistica 7.0.

Com o uso do *software* especificado, pode-se gerar o gráfico de Pareto (Figura 14), a Superfície de Resposta (Figura 15), e as Curvas de Contorno (Figura 16). O Gráfico de Pareto demonstra a significância das variáveis independentes analisadas. O valor de significância utilizado foi  $\rho = 0,05$  para determinar se as variáveis analisadas são, ou não, significativas para o resultado, nesse caso, a velocidade de propagação da onda. O gráfico de Pareto (Figura 13) lista as seguintes variáveis e suas interações:

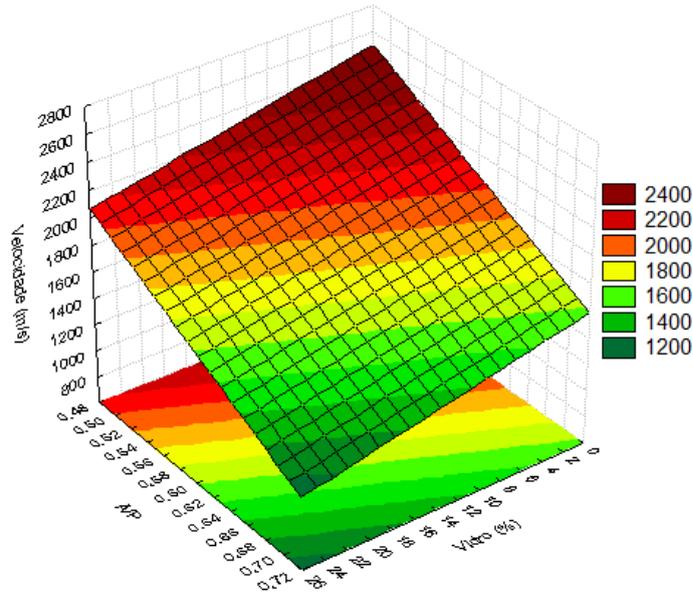
- “(1) Idade” – Variável Idade de Ensaio
- “(2) A/P” – Variável Taxa de Ativador/Precursor
- “(3) Vidro” – Variável Taxa de Incorporação de Resíduo de Vidro
- Interação das variáveis  $x$  e  $y$

Figura 14 – Gráfico de Pareto da velocidade de propagação da onda



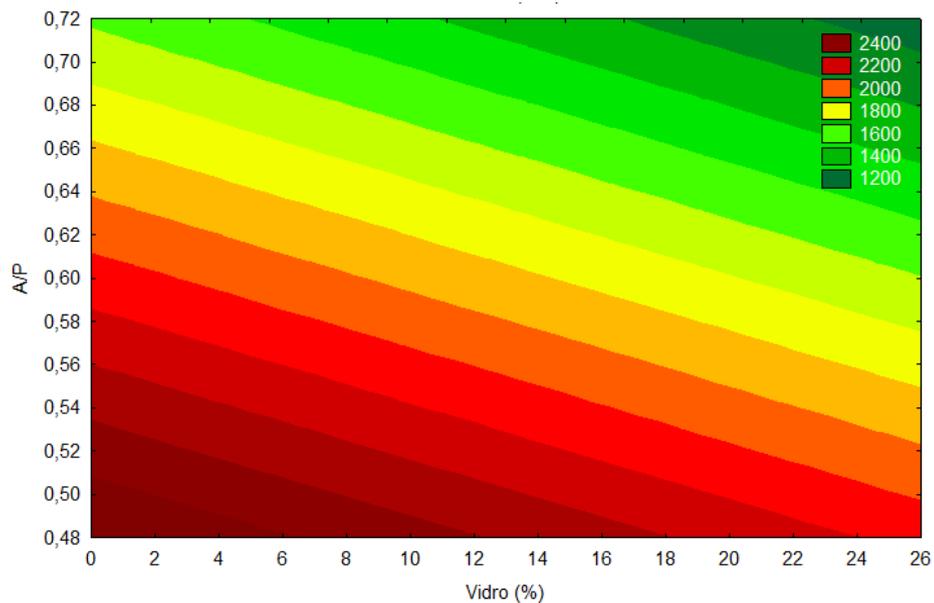
Fonte: Autor (2022)

Figura 15 – Superfície de Resposta Velocidade de Propagação da Onda



Fonte: Autor (2022)

Figura 16 - Curvas de Contorno Velocidade de Propagação da Onda (m/s)



Fonte: Autor (2022)

As variáveis e interações abaixo da linha de significância foram ignoradas no modelo, de acordo com o tratamento de dados feito no *software*, pois elas não apresentaram caráter significativo no resultado. Após o tratamento de dados, o coeficiente de determinação da regressão ( $R^2$ ) foi de 0,93, gerado pelo *software*.

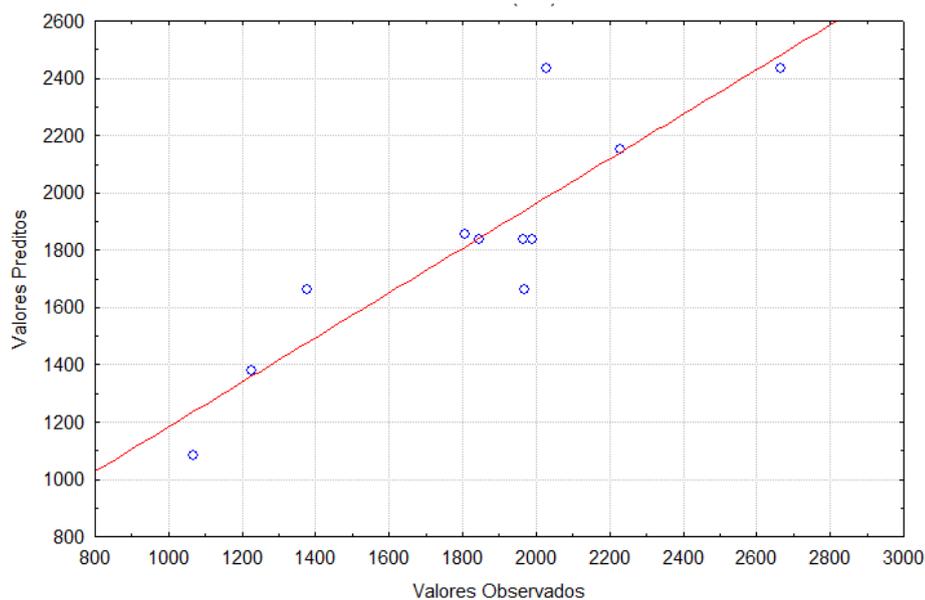
Através do gráfico de Pareto é possível observar que as variáveis que mais interferem no resultado são a taxa de ativador/precursor, a interação entre a idade dos compósitos e a incorporação de vidro, e a incorporação de vidro em si, respectivamente, nesta ordem de significância. O gráfico de Pareto confirma as análises levantadas anteriormente, as quais demonstram que a taxa ativador/precursor é extremamente importante para a velocidade de

propagação da onda e, conseqüentemente, a porosidade de cada compósito. Além disso, é possível observar que a interação entre a incorporação de vidro em função da idade também é um fator significativo. Em idade inicial, a incorporação de vidro não causou alteração significativa na velocidade, em comparação ao geopolímero sem resíduo. Entretanto, em idades mais elevadas, foi observada uma maior diferença entre os compósitos, ou seja, a geopolimerização ocorrida com o tempo gera matrizes mais densas quando se tem apenas o metacaulim.

Nos eixos da Superfície de Resposta (Figura 14) e Curvas de Contorno (Figura 15) foram alocados apenas as variáveis consideradas significativas pela Análise de Variância (ANOVA) do *software*. Na superfície de resposta, é possível notar que a velocidade de propagação da onda aumenta à medida que a taxa de ativador precursor diminui, a partir do valor 0,54. Além disso, no intervalo 0% - 12% de taxa incorporação do resíduo de vidro, a velocidade se mantém no máximo valor (cor mais escura no gráfico da Figura 16), com o limite superior (12%) sendo o limiar de aproveitamento deste resíduo no compósito, para uma relação ativador/precursor entre 0,5 e 0,53 aproximadamente.

Para confirmar a confiabilidade do modelo de regressão linear gerado pelo *software*, foi gerado o gráfico de valores preditos versus observados (Figura 17).

Figura 17 – Gráfico de Valores Preditos x Observados – Velocidade de Propagação da Onda

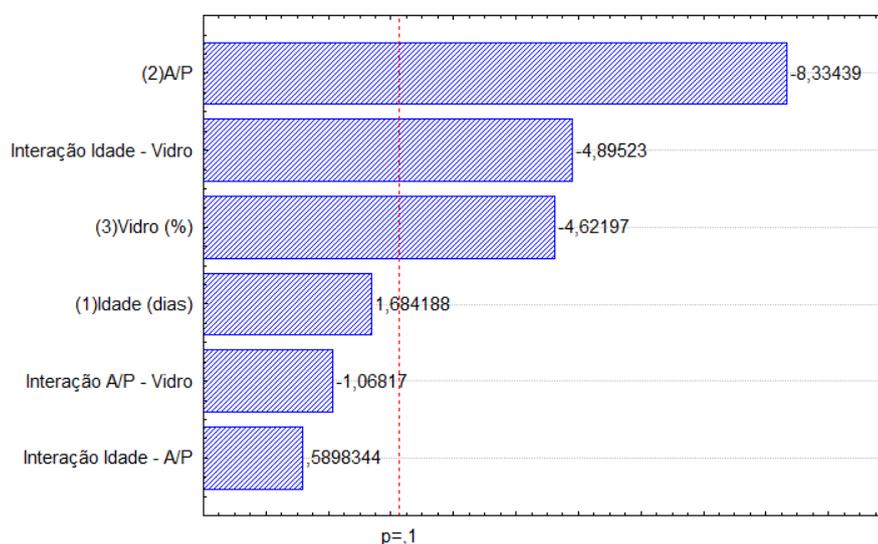


Fonte: Autor (2022)

Assim, entende-se que o modelo pode ser considerado confiável, sendo que os valores observados se ajustam à linha de regressão e o modelo explica 93% (valor de  $R^2$ ) dos dados de resposta ao redor da sua média. Alves (2018) propõe uma segunda análise dos dados, alterando o nível de significância de 5% para 10%, para verificar se há alteração das variáveis

significativas. A Figura 18 expressa essa mudança, confirmando que as variáveis consideradas significativas pelo *software* não se alteram e que a primeira análise tem alta confiabilidade.

Figura 18 – Gráfico de Pareto considerando nível de significância de 10%



Fonte: Autor (2022)

#### 4.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Assim como a velocidade de propagação da onda (e com isso, a porosidade) podem ser levantadas através do ensaio de ultrassom, outras características mecânicas de grande importância podem ser estimadas, como o Módulo de Elasticidade Dinâmico ( $E_d$ ).

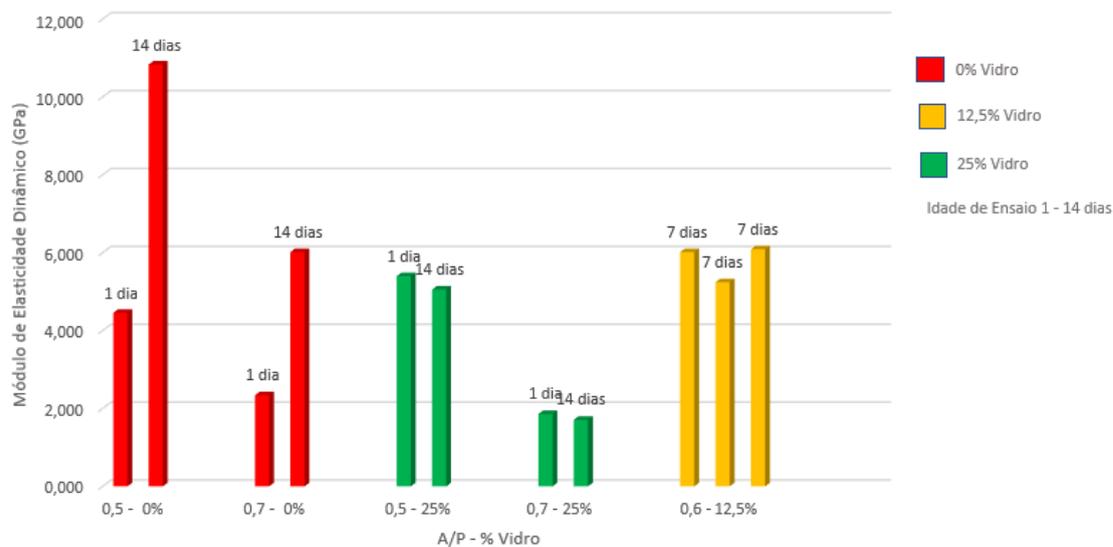
A partir dos resultados de tempo de leitura, obtidos do ensaio de ultrassom, velocidade de propagação da onda (Eq. 01) e características dos corpos de prova (dimensões e massa), foram determinados pela Equação 02, o módulo de elasticidade dinâmico. A Tabela 9 lista os resultados médios obtidos e os desvios padrão de cada experimento, enquanto a Figura 19 organiza os resultados em um gráfico de barras para melhor análise dos resultados.

Tabela 9 – Módulo de Elasticidade Dinâmico dos compósitos estudados

EXPERIMENTO	IDADE (DIAS)	A/P	% VIDRO	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)	
				MÉDIA	DESVIO PADRÃO
EXP 01	1	0,5	0	4,454	0,066
EXP 02	14	0,5	0	10,832	0,462
EXP 03	1	0,7	0	2,338	0,223
EXP 04	14	0,7	0	6,016	0,145
EXP 05	1	0,5	25	5,397	0,047
EXP 06	14	0,5	25	5,055	0,028
EXP 07	1	0,7	25	1,857	0,066
EXP 08	14	0,7	25	1,708	0,270
EXP 09	7	0,6	12,5	6,016	0,183
EXP 10	7	0,6	12,5	5,242	0,041
EXP 11	7	0,6	12,5	6,087	0,245

Fonte: Autor (2022)

Figura 19 – Variação do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos



Fonte: Autor (2022)

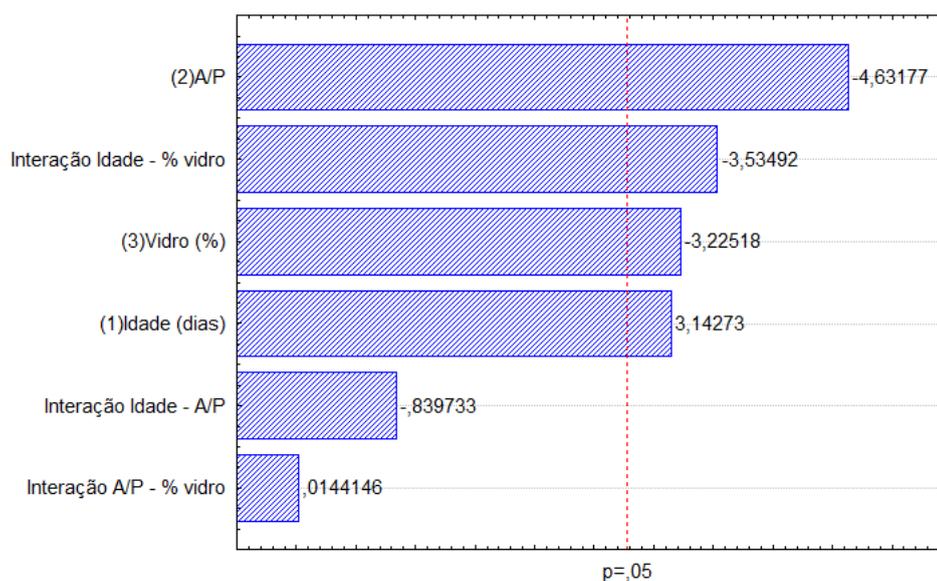
A partir dos resultados é possível observar que, em média, os valores encontrados para o módulo de elasticidade dinâmico se aproximam muito dos valores encontrados na literatura (SI *et al.*, 2019). Além disso, percebe-se que a composição que apresentou o maior valor de módulo de elasticidade dinâmico foi a composição de 0,5 de taxa ativador/precursor e 100% metacaulim, obtendo um resultado de aproximadamente 10,83 GPa.

Ademais, pode se observar que o módulo de elasticidade dinâmico aumenta muito com a idade do compósito, entretanto, a presença de resíduo de vidro pode alterar este efeito, então a interação destas duas variáveis pode ser considerada importante.

Além disso, é notório que uma alta taxa ativador/precursor gera uma queda no módulo de elasticidade dinâmico.

Assim como no grupo de resultados anteriores, para uma melhor análise e tratamento de dados, o quanto cada variável afeta nos resultados e suas interações, foi utilizado o *software Statistica 7.0*. A Figura 20 é o gráfico de Pareto gerado pelo *software*, mostrando as variáveis consideradas significativas para o modelo, levando em consideração uma significância  $\rho = 0,05$ .

Figura 20 – Gráfico de Pareto Módulo de Elasticidade



Fonte: Autor (2022)

As variáveis e interações abaixo da linha de significância foram ignoradas no modelo, de acordo com o tratamento de dados feito no *software*, pois as mesmas não apresentam caráter significativo no resultado. Após o tratamento de dados, o coeficiente de determinação da regressão ( $R^2$ ) foi de 0,92, gerado pelo *software*.

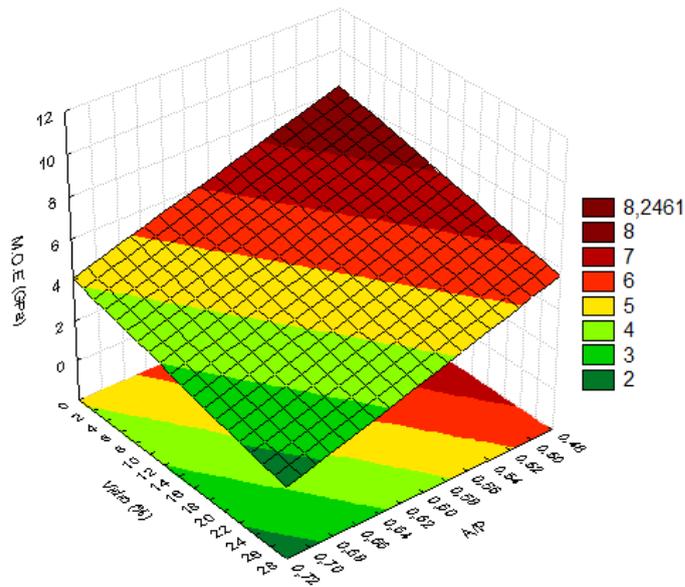
Por meio do gráfico de Pareto é possível observar que as variáveis que mais interferem no resultado são a taxa de ativador/precursor, a interação entre a idade dos compósitos e a incorporação de vidro, a variável taxa de incorporação de resíduo de vidro e a variável idade, respectivamente, nesta ordem de significância. O gráfico de Pareto do módulo de elasticidade confirma as análises levantadas anteriormente, as quais demonstram que a taxa ativador/precursor é extremamente importante para o módulo de elasticidade do compósito. Duxson *et al.* (2005) afirma que o módulo de elasticidade dos geopolímeros é determinado em grande parte pela microestrutura, se sua estrutura é densa e homogênea ela contribui para o aumento de rigidez do geopolímero. Portanto, é possível compreender o porquê a taxa ativador/precursor é tão significativa no modelo estudado, pois a taxa A/P está diretamente relacionada a formação da microestrutura do geopolímero através da ativação alcalina (SCHNEIDER *et al.*, 2011).

Além disso, é possível observar que a interação entre a incorporação de vidro e a idade do geopolímero também é um fator significativo. Nos compósitos sem adição de vidro, o módulo de elasticidade dinâmico evoluiu muito mais com o decorrer da idade. Nos compósitos com adição de vidro, o resíduo anulou o efeito do tempo e manteve constante o valor do módulo de elasticidade. Portanto, mesmo com o avanço da idade, o vidro incorporado não

contribuiu para a geopolimerização e conseqüente densificação da microestrutura. Isto pode ser devido a menor reatividade do resíduo por causa das dimensões das partículas (maiores do que as do metacaulim), considerando que o resíduo foi caracterizado por Ribeiro (2015) como bastante reativo, apresentando alta pozolanicidade.

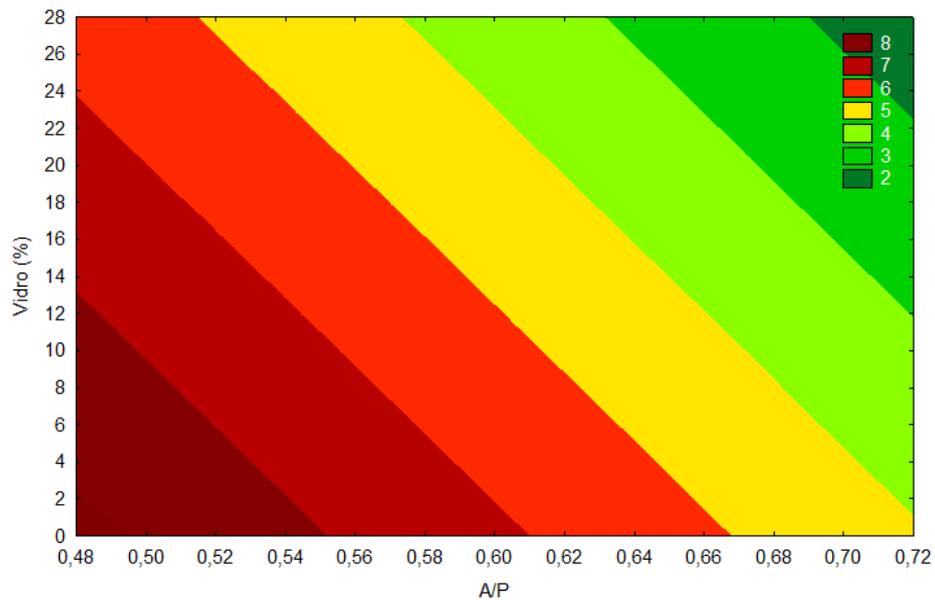
A Superfície de Resposta (Figura 21) e Curvas de Contorno (Figura 22), também geradas no *software* confirmam as análises levantadas anteriormente.

Figura 21 – Superfície de Resposta Módulo de Elasticidade



Fonte: Autor (2022)

Figura 22 – Curvas de Contorno Módulo de Elasticidade (GPa)

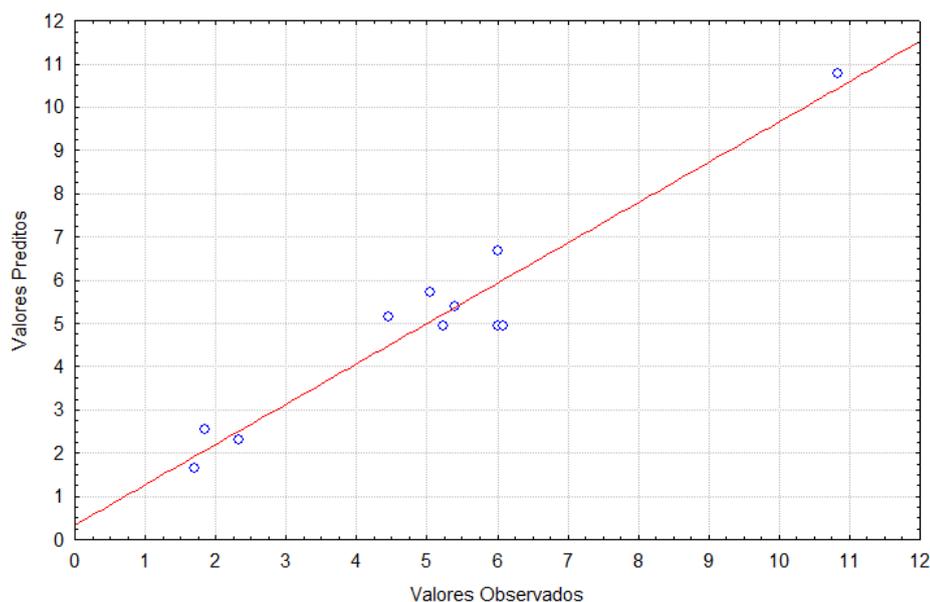


Fonte: Autor (2022)

No gráfico da Figura 22 é possível notar que o módulo de elasticidade aumenta à medida que a taxa de ativador/precursor e a taxa de incorporação de vidro diminuem, o módulo de elasticidade máximo foi obtido para taxa de ativador/precursor menor do que 0,55 e teor de vidro abaixo de 13%. Portanto, o intervalo (0% - 12%) de incorporação do resíduo analisado na velocidade de propagação da onda se mantém para o módulo de elasticidade dinâmico, com o limite superior de aproximadamente 12% sendo o limiar de aproveitamento deste resíduo no geopolímero a base de metacaulim, intervalo este que pode ser bem aproveitado na incorporação do resíduo sem perder as características ótimas vistas no EXP 02 (100% metacaulim).

Para confirmar a confiabilidade do modelo de regressão linear gerado pelo *software*, foi gerado o gráfico de valores preditos versus observados (Figura 23).

Figura 23 – Gráfico de Valores Preditos x Observados – Módulo de Elasticidade Dinâmico



Fonte: Autor (2022)

Assim, entende-se que o modelo pode ser considerado confiável, visto que os valores observados não se distanciam da linha de regressão e o modelo explica 92% (valor de  $R^2$ ) dos dados de resposta ao redor da sua média. A proposta de Alves (2018) para realização de uma segunda análise dos dados, alterando o nível de significância de 5% para 10%, para verificar se há alteração das variáveis significativas não é necessária pois, como demonstra o gráfico de Pareto (Figura 20), as outras variáveis estão muito distantes do limite de significância.

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram estudados compósitos de matriz geopolimérica, à base de metacaulim e resíduo de vidro oriundo do polimento de vidro plano, objetivando analisar as propriedades mecânicas do geopolímero, através do método de ensaio não destrutivo de ultrassom, quando variado em sua composição três incógnitas consideradas importantes pela literatura, as quais são, a idade do ensaio, a taxa de ativador/precursor e a taxa de incorporação do resíduo de vidro. No geral, os resultados obtidos foram de grande valia e se assemelham com o estudado na literatura. Os dados comprovam que o geopolímero a base de 100% metacaulim (EXP 02) apresentou as melhores propriedades físicas, atingindo velocidade de propagação da onda de 2665,81 m/s e com isso, baixa porosidade, e módulo de elasticidade dinâmico de 10,83GPa.

A análise quanto à utilização do resíduo de vidro foi satisfatória, com o intuito de se aproveitar um resíduo da indústria. Através das Superfícies de Resposta geradas pode se observar que o resíduo de vidro pode ser incorporado em substituição de até 12% do metacaulim sem perda significativa das propriedades estudadas.

Além disso, foi comprovada que a interação entre o resíduo de vidro e a idade é significativa. No primeiro estudo, percebeu-se que a compactação dos compósitos onde há a incorporação do resíduo de vidro não evolui com o tempo, ou seja, não há uma densificação da matriz pela geopolimerização quando o resíduo é incorporado, como acontece com os geopolímeros de 100% metacaulim. Este fator observado também se repete no estudo do módulo de elasticidade dinâmico, em que os geopolímeros que não contém o resíduo de vidro apresentam aumento significativo do módulo de elasticidade ao decorrer do tempo.

Os resultados atestam a importância da taxa ativador/precursor no processo de ativação alcalina nas propriedades estudadas. Em ambas as propriedades estudadas (velocidade de propagação da onda e módulo de elasticidade dinâmico), a taxa A/P se mostrou a variável mais significativa, verificando que os melhores resultados encontrados correspondem à proporção ativadores/precursores (A/P) compreendida entre 0,50 e 0,54.

É importante salientar que os resultados apresentados expressam o desempenho dos geopolímeros no contexto limitado especialmente das propriedades do resíduo utilizado. Assim, estudos complementares são necessários, variando, por exemplo, a granulometria do resíduo, a fim de complementar os resultados obtidos.

Por fim, pode-se concluir que a análise de forma geral contribuiu para o estudo dos materiais álcali ativados como um todo, avaliando propriedades de extrema importância para formação dos mesmos, além da compreensão do resíduo de vidro incorporado ao material base metacaulim.

## REFERÊNCIAS

ALVARENGA, C. **Síntese e caracterização de geopolímeros à base de metacaulim e micropartículas de vidro soda-cal.** Dissertação de Mestrado. 81p. Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais. 2018.

ALVES, L. C. S. **Geopolímero à Base de Metacaulim com Adição de Fibras de Sisal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p.122. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/22804>> Acesso em: 18 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15630:2009 **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação da onda ultrassônica,** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8802:2019 **Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica,** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15114:2004 **Resíduos Sólidos da Construção Civil – Áreas de Reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação,** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10004:2004 **Resíduos Sólidos - Classificação,** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BAI, T.; LIU, B.; WE, Y.; HUANG, W.; WANG, H.; XIA, Z. **Mechanical properties of metakaolin-based geopolymer with glass fiberreinforcement and vibration preparation.** School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, China, 2020.

BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; THAUMATURGO, C. **Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers.** International Journal of Inorganic Materials, v. 2, n. 4, p. 309–317, 2000.

CUNICO, M. W. M.; MIGUEL, O. G.; ZAWADZKI, S. F.; PERALTA-ZAMORA, P.; VOLPATO, N. **Planejamento Fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica.** Visão Acadêmica, Curitiba, v.9, n.1, Jan – Jun/2008.

DADSETAN, S.; SIAD, H.; LACHEMI, M.; SAHMARAN, M. **Extensive evaluation on the effect of glass powder on the rheology, strength, and microstructure of metakaolin-based geopolymer binders,** Construction and Building Materials, Volume 268, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182033172X>>. Acesso em: 18 jul. 2022

DAVIDOVITS, J. **Solid-Phase Synthesis of a Mineral Blockpolymer by Low Temperature Polycondensation of Alumino-Silicate Polymers: Na-poly(sialate) or Na-PS and Characteristics.** IUPAC- Symposium on Long-Term Properties of Polymers and Polymeric Materials, Stockholm, p. 2-14, 1976.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: inorganic polymeric new material**; J. THERM. ANAL., vol.37, p.1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications - Market Trends and Potential Breakthroughs**. In: GEOPOLYMER 2002 CONFERENCE, 3., 2002, Melbourne. Anais... Melbourne: Hotel Sofitel, 2002.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer cement. A review**. Geopolymer Institute, Technical papers, v. 21, p. 1-11, 2013.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; MALLICOAT, S. W.; KRIVEN, W. M.; VAN DEVENTER, J. S. **Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 269, n. 1-3, p. 47-58, 2005.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymer technology: the current state of the art**. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Parkville, Vic 3010, Australia, 2006.

EL-NAGGAR, M. R; EL-DESSOUKY, M. I;. **Re-use of waste glass in improving properties of metakaolin-based geopolymers: Mechanical and microstructure examinations**. Department of Radioactive Waste Management, Hot Laboratories Center, Atomic Energy Authority, Post Code 13759, Cairo, Egypt, 2016.

FENG, D.; PROVIS, J. L.; van DEVENTER, J. S. J. **Thermal activation of albite for the synthesis of one-part mix geopolymers**. Journal American Ceramic Society, v. 95, p. 565-572, 2012

GRATÃO, L. S. **Os Efeitos da Incorporação de Resíduos de Pneus nas Propriedades de Compósitos a Base de Geopolímero**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p.153. 2021. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/33537> > Acesso em: 30 jul. 2022.

GUIMARÃES, G, B. **Avaliação do uso de resíduo de vidro na produção de pisos polidos**. Dissertação de Mestrado. 125p. Faculdade Federal de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

HAO, H; LIN, K; WANG, D; CHAO, S; SHIU, H; CHENG, T; HWANG, C. **Utilization of Solar Panel Waste Glass for Metakaolinite-Based Geopolymer** Synthesis Department of Environmental and Material Engineering, Yan-Tai University, China, p.7, 2012.

HALLIDAY, D. **Fundamentos de física, volume 2 : gravitação, ondas e termodinâmica**. 10. ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2016.

LIN, K.; SHIU, H. SHIE, J; CHENG, T. HWANG, C; **Effect of composition on characteristics of thin film transistor liquid crystal display(TFT-LCD) waste glass-metakaolin-based geopolymers** Department of Environmental Engineering, National Ilan University, Ilan City 260, Taiwan. 2012.

METACAULIM HP ULTRA, **Metacaulim do Brasil**. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>> Acesso em: 18 jul. 2022

MEHTA, P.Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª Edição. São Paulo: IBRACON, 674 p, 2008.

NOVAIS, R. M. *et al.* **Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers**. Waste Management, v. 52, p. 245–255, 2016.

PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L.; NAGATA, N. **Por que otimização multivariada?** Engenharia Sanitária e Ambiental. v.10, n.2, p.106-110, 2005.

PINTO, A.T. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Editora UTAD, Portugal, 105 p., 2006.

PRADO, M.R. **Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e pet utilizadas em uma indústria de refrigerantes no Brasil**. Tese de D.Sc., UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2007.

PROVIS, J. L. **Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?** Department of Materials Science and Engineering, University of Sheffield, Sir Robert Hadfield Building, Mappin St, Sheffield S1 3JD, United Kingdom, 2013.

RIBEIRO, A. **Estudo de resíduo de lapidação de vidro para incorporação em argamassa de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. 86p. Faculdade Federal de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

SI, R; GUO, S; DAI, Q; WANG, J. **Atomic-structure, Microstructure And Mechanical Properties Of Glass Powder Modified Metakaolin-based Geopolymer**, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, 1400 Townsend Dr., Houghton, MI 49931-1295, United States. 2020.

SI, R; GUO, S; DAI, Q; WANG, J. **Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder**, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, 1400 Townsend Dr., Houghton, MI 49931-1295, United States. 2019

SICHERI, E. P4 CARAM, R.; dos SANTOS, J. C. P. Vidros na construção civil. ISAIA, G. C. (ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. v. 2. 1ed. São Paulo, IBRACON, 2007.

SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. **Innovation in use and research on cementitious material** Cement and Concrete Research 38, 128 – 136, 2008

SCHNEIDER, M; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. **Sustainable cement production —present and future**. Cement and Concrete Research. v. 41, n. 7, p. 642-650, Jul 2011.

SILVA, C. **Fabricação e Caracterização de Compósito de Matriz Geopolimérica a base de Metacaulim com incorporação de argila expandida como fase dispersa**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João del Rei. São João del Rei, p. 84. 2016

VAFAEI, M.; ALLAHVERDI, A. **Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan**. Construction and Building Materials, v.114, p. 290-6, 2016.

WENG, L.; SAGOE-CRENTSIL, K.; BROWN, T.; SONG, S. **Effects of aluminates on the formation of geopolymers.** *Materials Science and Engineering: B*, v. 117, n. 2, p. 163-168, 2005.