



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



LUCAS ALVES POLISEL

**ANÁLISE DO USO DE RESÍDUO DE VIDRO EM
GEOPOLÍMERO À BASE DE METACAULIM**

Uberlândia – MG

2022

LUCAS ALVES POLISEL

**ANÁLISE DO USO DE RESÍDUO DE VIDRO EM
GEOPOLÍMERO À BASE DE METACULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Leila Aparecida de Castro Motta.

Uberlândia – MG

2022

RESUMO

Há tempos que a pauta ambiental vem se tornando cada vez mais popular. Sua popularidade vem em decorrência justamente da urgência de sua discussão, imprescindível em tempos de um crescimento populacional acelerado e desordenado, que traz consigo maiores impactos ambientais. Concomitantemente ao crescimento populacional vem a expansão urbana, a necessidade de ampliações, adaptações, construções de casas e prédios e com isso a utilização de maiores quantidades de materiais de construção, como o cimento. O consumo de cimento Portland no mundo tem crescido anualmente, e juntamente com isso, os impactos ambientais atrelados a ele, desde sua extração à sua produção, responsável por cerca de 8% de toda emissão de gás carbônico no mundo. Em virtude de tamanho impacto, é necessário buscar alternativas menos danosas ao meio ambiente e é neste contexto que surgem os geopolímeros, na substituição do cimento em algumas de suas aplicações na construção civil, sendo possível em seu desenvolvimento a utilização de resíduos e subprodutos industriais. Este trabalho visa a sintetização de mistura geopolimérica de metacaulim e resíduo de vidro plano, utilizando hidróxido de sódio e silicato de sódio como soluções ativadoras. Por meio da análise de ensaios de resistência compressão foi possível avaliar o efeito das variáveis taxa de ativadores/precursores, idade de ensaio e teor de substituição de metacaulim por resíduo de vidro, a fim de analisar a viabilidade técnica de tal mistura cimentante como alternativa ao cimento Portland na construção civil. Os resultados obtidos demonstraram correlação inversa entre as variáveis de substituição parcial de metacaulim por vidro e taxa de ativadores e precursores, sendo o geopolímero composto apenas por metacaulim o que apresentou melhores resultados mecânicos. Entretanto, a análise da adição de resíduo de vidro se mostrou satisfatória até 12,5% em substituição ao metacaulim, sem grandes perdas do desempenho mecânico do compósito. Foi encontrada também relação ótima de ativadores/precursores próxima de 0,59. Os resultados obtidos foram preliminares, destacando que estudos posteriores com o refinamento da finura do resíduo de vidro plano utilizado podem resultar em compósitos com melhor resistência a compressão.

Palavras-chave: Geopolímero; Resíduo de vidro; Metacaulim; Resistência à compressão.

ABSTRACT

The environmental agenda has been becoming more and more popular for some time. Its popularity stems precisely from the urgency of its discussion, essential in times of accelerated and disorderly population growth, which brings with it greater environmental impacts. Concomitantly with population growth comes urban expansion, there is a need for expansions, adaptations, construction of houses and buildings and with that the use of greater amounts of construction materials, such as cement. Portland cement consumption in the world has taken huge and growing proportions annually, and along with that, the environmental impacts linked to it, from its extraction to its production, responsible for about 8% of all carbon dioxide emissions in the world. Due to such impact, it is necessary to seek alternatives that are less harmful to the environment and it is in this context that geopolymers arise, replacing cement in some of its applications in civil construction, making it possible in its development to use industrial waste and by-products. This work aims to synthesize a geopolymeric mixture of metakaolin and flat glass waste, using sodium hydroxide and sodium silicate as activating solutions. Through the analysis of compression tests, it was possible to evaluate the effect of the variables activator/precursors rate, test age and metakaolin replacement content by glass residue, in order to analyze the technical feasibility of such a cement mixture as an alternative to cement. Portland in construction. The results obtained showed an inverse correlation between the variables of partial replacement of metakaolin by glass and the rate of activators and precursors, with the geopolymer composed only of metakaolin which presented the best mechanical results. However, the analysis of the addition of glass residue was satisfactory up to 12,5% in substitution of metakaolin, without major losses in the mechanical performance of the composite. An optimal ratio of activators/precursors close to 0.59 was also found. The results obtained were preliminary, highlighting that further studies with the refinement of the fineness of the waste of float glass used can result in composites with better mechanical properties.

Keywords: Geopolymer; Glass waste; Metakaolin; Compressive strength.

Lista de Figuras

Figura 1- Nomenclaturas da transformação da estrutura tridimensional do sílico-aluminato de amorfa para semicristalina.....	7
Figura 2 - Solubilidade da sílica e alumina em função do pH.....	9
Figura 3 - Metacaulim	12
Figura 4 - Resíduo de Vidro	12
Figura 5 - Silicato de Sódio	13
Figura 6 - Hidróxido de Sódio.....	13
Figura 7 - Peneiramento do Resíduo de Vidro	17
Figura 8 - Mistura após homogeneização manual	18
Figura 9 - Mistura dos materiais na argamassadeira	18
Figura 10 - Molde metálico cúbico.....	19
Figura 11 - Moldes na flowtable para adensamento.....	19
Figura 12 - Corpos de prova embalados após desmolde	20
Figura 13 – Medição de corpo de prova	21
Figura 14 - Ensaio à compressão dos corpos de prova preparados.	21
Figura 15 – Evolução da resistência à compressão dos compósitos com a idade para diferentes relações ativadores/precursores	23
Figura 16 – Evolução da resistência à compressão dos compósitos produzidos com diferentes teores de adição de vidro	24
Figura 17 - Gráfico de Pareto	25
Figura 18 - Superfície de resposta obtida para os diferentes teores de resíduo de vidro e relações ativador/precursor.....	26
Figura 19 – Curva de contorno da superfície de resposta obtida para os diferentes teores de resíduo de vidro e relações ativador/precursor.	26
Figura 20 - Gráfico de valores preditos x observados para resistência à compressão	27

Lista de tabelas

Tabela 1 - Codificação das variáveis do planejamento experimental	14
Tabela 2 - Experimentos realizados e suas respectivas codificações e descodificações	15
Tabela 3 - Relações ótimas utilizadas para composição dos geopolímeros	15
Tabela 4 - Proporção de materiais para as formulações	16
Tabela 5 – Quantidade em massa de materiais para formulações	16
Tabela 6 - Resultados do ensaio à compressão.....	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 GEOPOLÍMEROS.....	6
2.2 ATIVAÇÃO ALCALINA.....	8
2.3 RESÍDUO DE VIDRO.....	10
3. OBJETIVOS.....	11
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
4.1 MATERIAIS.....	11
4.1.1 METACAULIM.....	11
4.1.2 RESÍDUO DE VIDRO.....	12
4.1.3 SILICATO DE SÓDIO E HIDRÓXIDO DE SÓDIO.....	13
4.2 MÉTODOS.....	14
4.3 FORMULAÇÃO, PREPARAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	15
4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	20
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	22
6. CONCLUSÕES.....	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

1. INTRODUÇÃO

Em 2022 a população mundial atingiu a marca de 7,8 bilhões de pessoas (DCEU, 2022), e há projeções de que esse número aumente em mais 2 bilhões até 2050. Em complemento a esse crescente populacional há também expectativas do aumento da quantidade de pessoas que vivem em áreas urbanas, passando de 55% para 70% de toda a população (ONU, 2019). Adjacente a esses números e expectativas surge a demanda de alocação de toda essa massa habitacional nos grandes centros urbanos, sendo necessário gerar moradia e infraestrutura, o que significa construir prédios, hospitais, escolas, adaptar e modificar as cidades, tudo para comportar essa população de forma a garantir também uma qualidade de vida digna e o bem estar coletivo dessas pessoas. Daí surge a necessidade de um desenvolvimento econômico eficiente. De acordo com Hirschman (1961, p.28):

“É da própria natureza do desenvolvimento que se estabeleçam prioridades e que certas atividades recebam temporariamente tratamento preferencial, para que criem oportunidades econômicas e favoreçam toda a sociedade. A preferência deve recair sobre as atividades que maximizam as expansões econômicas diretas ou induzidas em outros setores.”

Assim surge a importância da indústria da construção civil, setor de impacto direto na economia e crucial para o desenvolvimento social. O investimento em infraestrutura promove o crescimento econômico, porque aumenta o retorno dos insumos privados (capital e trabalho) e incentiva o investimento e o emprego (Rigolon, 1996, p.2). Segundo Teixeira e Carvalho (2006) é um setor de grande contribuição relativa para a formação do produto nacional, sendo o segundo setor com maior contribuição, considerado efeitos diretos, indiretos e totais, tendo participação relativa de 11,25%, números que não são alcançados por setores como agropecuários, comércio e instituições financeiras. Porém, é um setor que apresenta impactos ambientais, grande parte em virtude da necessidade de extração de recursos naturais, processos produtivos e geração de resíduos e subprodutos.

Um dos materiais mais utilizados no setor e no mundo é o Cimento Portland, sua produção é associada a grandes impactos ambientais. Inicialmente agride o meio ambiente na extração de calcário e argila, materiais não renováveis, degradando o solo e liberando resíduos no meio ambiente e também em sua produção, na calcinação, processo de transformação do

calcário em cal virgem que ocorre em grandes fornos, onde há grandes liberações de CO₂ na atmosfera, gás associado ao efeito estufa.

Surge desse contexto a urgência de se pesquisar materiais com menor impacto ambiental, frente ao cimento Portland e assim surge o geopolímero como alternativa, sendo obtido por meio da ativação alcalina, podendo incorporar diversas matérias primas, subprodutos industriais e resíduos. Além disso os materiais álcali-ativados podem apresentar propriedades como elevadas resistências iniciais e finais, resistência a ataques químicos, a ácidos, resistência ao fogo, durabilidade e menor liberação de gás carbônico na atmosfera (TORGAL *et al.*, 2007).

Os materiais base escolhidos para o estudo foram o metacaulim e o pó de vidro, sendo este último um resíduo industrial e fonte de óxido silicato (SiO₂), por ter esse elemento de forma abundante em sua composição.

Portanto, o objetivo do trabalho é a obtenção de um compósito geopolimérico a partir do metacaulim como material base e adição de resíduo produzido pela lapidação do vidro, material de natureza pozolânica, buscando analisar suas propriedades e viabilidade de aplicação como material ligante na construção civil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica é dividida em três partes. As duas primeiras partes abordam informações a respeito de geopolímeros, ativação alcalina e sua correlação. A terceira e última parte aborda características e informações a respeito do processo produtivo do resíduo de vidro plano utilizado.

2.1 GEOPOLÍMEROS

Após grandes incêndios irromperem na França entre os anos de 1970 e 1973 envolvendo materiais plásticos orgânicos, surgiu a necessidade de sua substituição. Davidovits começou sua pesquisa sobre novos materiais resistentes ao calor na forma de materiais plásticos não inflamáveis e não combustíveis. O resultado foi o surgimento de materiais poliméricos inorgânicos (DAVIDOVITS, 2002; DAVIDOVITS, 2020).

O termo geopolímero só foi criado e aplicado por Davidovits em 1979. Para a designação química de geopolímeros à base de sílico-aluminato foi sugerido polissialato, sendo o sufixo “sialato” uma abreviação de sílico-oxo-aluminato. A rede de sialato consiste em tetraedros de SiO₄ e AlO₄ conectados por ligações de hidrogênio. São polímeros em cadeias e

anéis com Si^{4+} e Al^{3+} em coordenação 4 com o oxigênio e variam de amorfo a semi-cristalino (DAVIDOVITS, 1994; DAVIDOVITS, 2002).

Conforme Equação 1, os possialatos possuem forma empírica, onde M é um cátion (Na^+ , K^+ e Ca^+), n é o grau de policondensação, w significa o valor das moléculas de água e z possui valores de 1, 2 ou 3, dependendo da razão entre os átomos de silício e alumínio, sendo nomeados conforme mostra a Figura 1. (DAVIDOVITS, 1994; DAVIDOVITS, 2002).

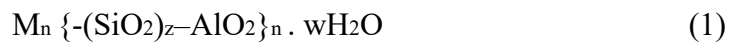
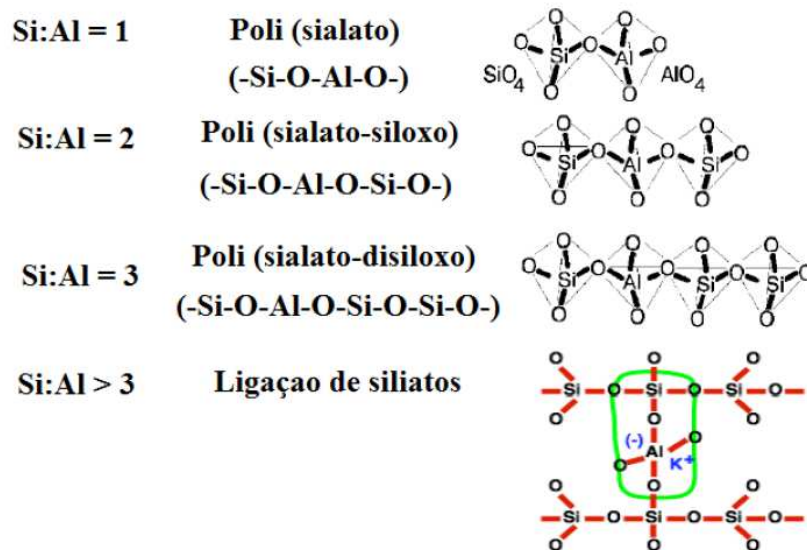


Figura 1- Nomenclaturas da transformação da estrutura tridimensional do sílico-aluminato de amorfa para semicristalina



Fonte: Davidovits (2002), tradução Alves (2018)

Severo *et al* (2013) relata que materiais semelhantes já eram desenvolvidos na década de 1950 na antiga União Soviética liderado por Glukhovsky, recebendo o nome de cimento solo, a designação “solo” surgiu pelo fato de utilizarem para sua produção material natural e “cimento” pela sua capacidade ligante. Glukhovsky iniciou sua pesquisa percebendo o fato do material ser desenvolvido de forma similar aos cimentos antigos e por apresentar uma elevada durabilidade.

Embora sejam materiais inovadores baseiam-se em um princípio muito antigo, estudos realizados no *Institute for Applied Archaeological Sciences, Barry University*, demonstraram que a formulação utilizada pelos romanos, envolvia uma configuração geopolimérica, produzindo material zeolítico. Foram estudadas argamassas de Jericó datadas de 7000 aC

contendo até 40% em peso de zeólita. Esses concretos e argamassas de civilizações passadas demonstram excepcional durabilidade e resistência à erosão, que pode ser esperado também de cimentos geopoliméricos modernos (DAVIDOVITS, 2002).

O termo geopolímero é utilizado para referenciar um material ligante obtido pela reação química entre elementos inorgânicos. São elementos que possuem uma estrutura semicristalina, normalmente seus precursores possuem formas cristalinas bem definidas, que por meio da reação química, são desfeitas para formar a ligação. São resultado da reação de aluminossilicatos adicionados à uma solução aquosa alcalina (DAVIDOVITS, 1991; DUXSON *et al.*, 2007).

Apesar de compreender uma variedade de propriedades e características, tais quais alta resistência à compressão, baixa retração, cura rápida ou lenta, resistência a ácidos, resistência ao fogo e baixa condutividade térmica, as mesmas não são inerentes a todas as formulações geopoliméricas, sendo sua microestrutura e propriedades mecânicas, químicas, físicas e térmicas dependentes das matérias primas das quais o geopolímero é derivado (DUXSON *et al.*, 2007)

Precursores de aluminossilicato com baixo teor de cálcio, como cinzas volantes e metacaulim são mais comumente ativados com soluções de hidróxido de metal alcalino ou silicato e um pH relativamente alto é necessário para induzir a reação desses precursores (PROVIS, 2013).

O termo geopolímero foi utilizado, pois esse material é constituído principalmente por óxidos de alumínio e de silício, que são os principais constituintes da crosta terrestre, derivando assim o prefixo “geo”. O sufixo “polímero” se refere ao processo ocorrido no material durante sua síntese: a polimerização (BUCHWALD *et al.*, 2005).

2.2 ATIVAÇÃO ALCALINA

Glukhovsky propôs um mecanismo geral de ativação alcalina em materiais constituídos fundamentalmente por sílica e alumina reativa, seu modelo é composto por um conjunto de reações de dissolução, coagulação, condensação e cristalização (GLUKHOVSKY, 1980 apud SEVERO *et al.*, 2013).

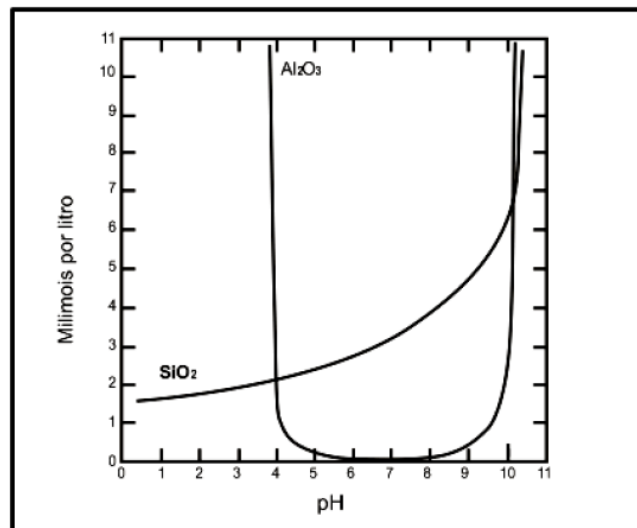
Ativação alcalina é a reação de síntese dos geopolímeros, sendo definida, de modo geral como uma reação de hidratação de alumino-silicatos com substâncias alcalinas ou alcalino-terrosos, sendo uma vasta gama de materiais aluminossilicosos suscetíveis a esse tipo de reação (SEVERO *et al.*, 2013).

No método usual de duas partes, o ativador alcalino é normalmente uma solução de hidróxido de sódio, hidróxido de potássio ou silicatos de sódio ou potássio em altas concentrações (LAHOTI *et al.*, 2019).

A resistência à compressão de geopolímeros se mostra inversamente proporcional a granulometria de suas partículas, obtendo com partículas mais finas, maior resistência a compressão. Partículas com maior finura proporcionam maiores superfícies de contato, aumentando assim a densidade do geopolímero e melhorando a velocidade das reações (SATA *et al.*, 2012; EL-NAGGAR, EL-DESSOUKY, 2016)

De acordo com estudos de Mason (1966) a solubilidade de ambos, sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) são mais eficientes em meio básico, sendo a alumina solúvel nos extremos e a sílica altamente solúvel apenas em meio básico, conforme Figura 2.

Figura 2 - Solubilidade da sílica e alumina em função do pH



Fonte: Mason (1966)

O ataque alcalino resulta na liberação de espécies silicato e aluminato, com liberação inicial mais rápida de Al em relação ao Si. Este Al dissolvido pode reagir inicialmente com qualquer silicato fornecido pela solução ativadora, levando à formação de oligômeros aluminossilicato, sendo a razão pela qual sua utilização como ativador favorece a sintetização de geopolímeros com propriedades mecânicas mais elevadas em fase inicial que aqueles que utilizam apenas NaOH (SEVERO *et al.*, 2013).

Sathonsaowaphak *et al* (2009) estudaram o aumento da molaridade de NaOH, o que resultou na diminuição da trabalhabilidade e no aumento da resistência à compressão até a

concentração de 12,5 M, assim aumentando a quantidade de íons Na no sistema, responsáveis por equilibrar as cargas e formar as redes de aluminossilicato.

2.3 RESÍDUO DE VIDRO

O vidro pode ser definido como material inorgânico, com estrutura amorfa (desprovido de organização da estrutura atômica), formado pela fusão de suas matérias primas em altas temperaturas e que em seguida sofre um rápido resfriamento na fase líquida, onde seu volume diminui gradativamente e sua viscosidade aumenta, já que não há o completo arranjo dos átomos, assim não formando cristais, pois na cristalização, a variação específica do material ocorre de forma mais abrupta (SHELBY, 2007).

A utilização do resíduo de vidro em geopolímeros pode, nas devidas proporções, promover alterações benéficas quanto às propriedades mecânicas do compósito produzido. Diversas pesquisas estudaram a utilização do vidro, de diferentes fontes, como placas, recipientes de vidro soda-cal, vidro borossilicato e vidro âmbar como um dos materiais precursores de geopolímeros, encontrando intervalo, no qual a incorporação do resíduo em valores de 5% a 12,5% em massa, trouxeram melhora das propriedades mecânicas dos compósitos (DADSETAN, *et al.*, 2021; CYR; IDIR; POINOT, 2012; ALVARENGA *et al.*, 2021; SI *et al.*, 2020).

O dióxido de silício (SiO₂), ou sílica, é o principal constituinte do vidro, representando cerca de 70 a 98% de sua composição (GRILLO, 2019).

O resíduo de vidro utilizado foi coletado em uma indústria na cidade de Uberlândia-MG, que adquire placas de vidro *float* (ou vidro plano) e faz o processamento dessas placas para produção de peças de vidro laminado e/ou temperado, entre outros. As placas são lapidadas para retirada de arestas, este processo ocorre na presença de água, na qual a porção mais fina do resíduo é transportada e bombeada para uma estação de tratamento. Nesta etapa, para a decantação dos sólidos presentes na água, são adicionados à água, policloreto de alumínio e um polímero aniônico, que possuem ação flocculante, porém, a utilização destes materiais inviabiliza a reincorporação dos resíduos na produção de novas peças de vidro (RIBEIRO, 2015), justificando, portanto, o estudo da incorporação desse resíduo na produção de outros materiais.

3. OBJETIVOS

Este trabalho visa a obtenção, sintetização e caracterização de geopolímeros utilizando metacaulim e resíduo de vidro, utilizando silicato de sódio e hidróxido de sódio como ativadores. O estudo se deu por meio de um comparativo, entre a resistência a compressão de um geopolímero de referência, sem adição de resíduo de vidro e outros com percentuais de resíduo em substituição ao metacaulim.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a resistência a compressão dos geopolímeros formulados;
- Avaliar a influência da variável da idade do compósito na resistência a compressão;
- Avaliar a influência da variável de taxa de ativadores e precursores na resistência a compressão, encontrando um ponto ótimo de utilização;
- Avaliar a influência da variável de incorporação de resíduo de vidro em substituição ao metacaulim na resistência a compressão, encontrando um ponto ótimo de utilização;

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Metacaulim

O metacaulim utilizado nos compósitos, denominado Metacaulim HP ULTRA, foi doado pela empresa Metacaulim do Brasil e Indústria e Comércio Ltda – São Paulo, o mesmo é ilustrado na Figura 3. O material possui massa específica de 2,56 g/cm³ e é composto majoritariamente de SiO₂ e Al₂O₃, em valores de 57% e 34%, respectivamente, valores fornecidos pelo fabricante (METACAULIM, 2022).

Figura 3 - Metacaulim

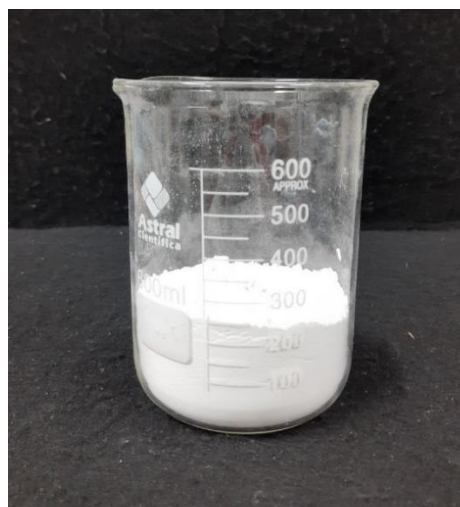


Fonte: Autor (2022)

4.1.2 Resíduo de vidro

Inicialmente, por se tratar de um resíduo industrial, o pó de vidro foi peneirado na peneira de abertura de 75 μm (n $^\circ$ 200) para garantir um controle granulométrico antes de sua utilização. Para o cálculo das formulações, sua massa específica foi adotada como 2,48 g/cm 3 , dado encontrado previamente por Ribeiro (2015). O material se encontra identificado na Figura 4.

Figura 4 - Resíduo de Vidro

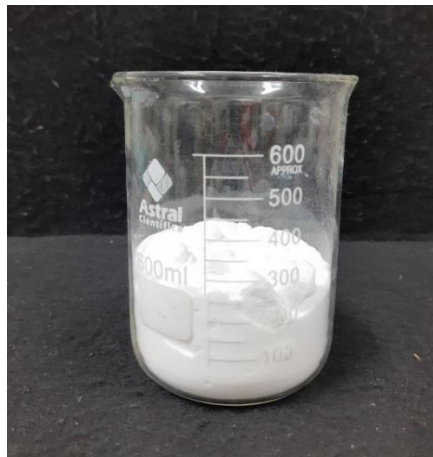


Fonte: Autor (2022)

4.1.3 Silicato de sódio e hidróxido de sódio

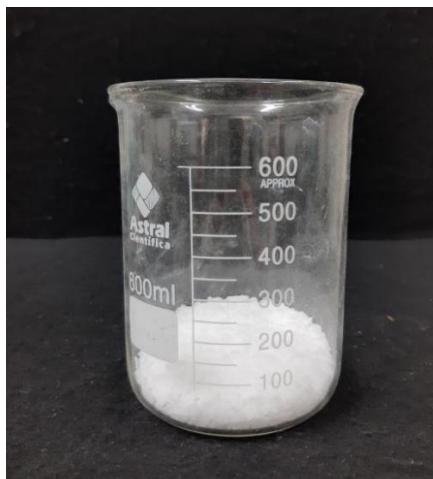
Para a solução ativadora do compósito, como dito anteriormente, foram utilizados o silicato de sódio e hidróxido de sódio. O silicato foi fornecido pela empresa PQ Corporation com denominação “Bristesil C207”, com uma relação entre óxidos ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) de 2,05 e pH de 14,0, dados fornecidos pelo fabricante. Sua adição se dá em razão da necessidade de aumentar a relação de sílica/alumina ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$). O hidróxido de sódio foi obtido da empresa StartQuímica, com concentração de 96 a 99%, dados do fabricante. Seus nomes comerciais são Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio, conforme mostra a Figura 5 e a Figura 6, respectivamente.

Figura 5 - Silicato de Sódio



Fonte: Autor (2022)

Figura 6 - Hidróxido de Sódio



Fonte: Autor (2022)

Para o cálculo das relações em massa de cada experimento, foram utilizadas relações otimizadas, sendo essas ambas as molaridades do hidróxido de sódio e silicato de sódio de 12 M, e proporção em massa entre si de 1,0: 2,5 (NaOH:Na₂SiO₃) seguindo as recomendações de Alves (2018) e Sathonsaowaphak *et al.* (2009).

4.2 MÉTODOS

Com o intuito de analisar três variáveis e suas respectivas influências na propriedade do geopolímero sintetizado, foi escolhido o planejamento fatorial 2^k dentre os demais planejamentos experimentais para a investigação das combinações analisadas.

Três foram as variáveis escolhidas para análise, substituição em massa de metacaulim por resíduo de vidro (A), idade de ensaio do compósito (B) e relação entre ativadores e precursores (C), onde cada uma delas apresentam valores máximos (+1), mínimos (-1) e pontos centrais (0). Segundo CUNICO *et al.* (2008), as repetições de experimentos são de suma importância para determinar o erro experimental e a tendência de linearidade, assim também foi incluído no estudo o ensaio em triplicata dos pontos centrais de cada variável.

A Tabela 1 indica a codificação das três variáveis e a Tabela 2 as respectivas codificações e descodificações de cada experimento efetuado.

Tabela 1 - Codificação das variáveis do planejamento experimental

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

Fonte: Autor (2022)

Tabela 2 - Experimentos realizados e suas respectivas codificações e descodificações

Experimentos	Codificação			Descodificação		
	A	B	C	Resíduo de Vidro (% em massa)	Idade (dias)	Ativador/Precursor
1	-1	-1	-1	0,0	1	0,5
2	-1	-1	1	0,0	1	0,7
3	-1	1	-1	0,0	14	0,5
4	-1	1	-1	0,0	14	0,5
5	0	0	0	12,5	7	0,6
6	0	0	0	12,5	7	0,6
7	0	0	0	12,5	7	0,6
8	1	-1	-1	25	1	0,5
9	1	-1	1	25	1	0,7
10	1	1	1	25	14	0,7
11	1	1	1	25	14	0,7

Fonte: Autor (2022)

4.3 FORMULAÇÃO, PREPARAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para o cálculo das formulações dos geopolímeros foram utilizadas relações ótimas encontradas por Alves (2018) e Sathonsaowaphaket *al.* (2009). As mesmas foram fixadas conforme Tabela 3 para que as três variáveis escolhidas pudessem ser analisadas de forma mais criteriosa.

Tabela 3 - Relações ótimas utilizadas para composição dos geopolímeros

Líquido/Sólido	Molaridade do NaOH (M)	Molaridade do Na ₂ SiO ₃ (M)	Proporção em massa de NaOH/ Na ₂ SiO ₃
0,4	12	12	1: 2,5

Fonte: Autor (2022)

Com isso, foram determinadas as proporções usadas no preparo das misturas de cada experimento, inicialmente em proporção e em seguida em massa, conforme Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente.

Tabela 4 - Proporção de materiais para as formulações

EXPERIMENTOS	METACAULIM	VIDRO	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ 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	0,875	0,125	0,17	0,43	0,64
6	0,875	0,125	0,17	0,43	0,64
7	0,875	0,125	0,17	0,43	0,64
8	0,75	0,25	0,14	0,36	0,6
9	0,75	0,25	0,14	0,36	0,6
10	0,75	0,25	0,2	0,5	0,68
11	0,75	0,25	0,2	0,5	0,68

Fonte: Autor (2022)

Tabela 5 – Quantidade em massa de materiais para formulações

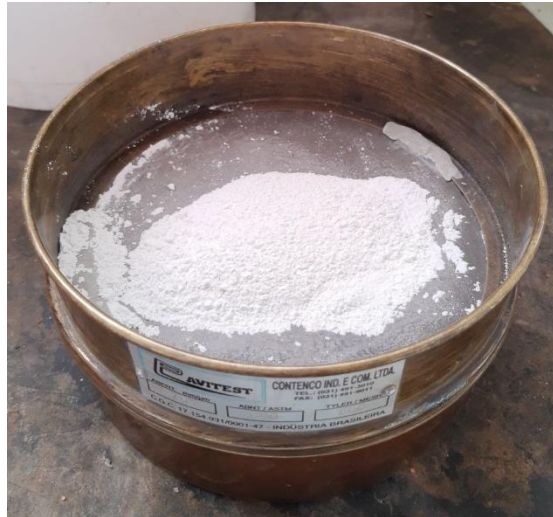
Experimentos	Consumo em gramas para preparo de 640 cm ³				
	Metacaulim	Resíduo de vidro	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O
1	585,033	0,00	83,576	208,940	351,020
2	514,635	0,00	102,927	257,317	349,951
3	585,033	0,00	83,576	208,940	351,020
4	514,635	0,00	102,927	257,317	349,951
5	478,546	68,364	93,756	234,390	350,023
6	478,546	68,364	93,756	234,390	350,023
7	478,546	68,364	93,756	234,390	350,023
8	437,629	145,876	83,358	208,395	350,103
9	437,629	145,876	83,358	208,395	350,103
10	385,089	128,363	102,690	256,726	349,147
11	385,089	128,363	102,690	256,726	349,147
Massa Total (Kg)	5,280	0,754	1,026	2,566	3,851

Fonte: Autor (2022)

A quantidade de materiais utilizados para formulação de cada experimento foi aumentada, por questões de segurança, para que não faltasse material e para atingir um volume mínimo exigido para homogeneização no misturador.

Após definidas as formulações para composição de cada experimento, o processo de produção do geopolímero iniciou-se com o peneiramento do resíduo de vidro na peneira de abertura $75\ \mu\text{m}$ (n° 200), como dito anteriormente, de acordo com a ABNT NBR NM 248: 2001, conforme Figura 7.

Figura 7 - Peneiramento do Resíduo de Vidro



Fonte: Autor (2022)

Em seguida todos os materiais a serem utilizados foram pesados. Após a pesagem o hidróxido de sódio e silicato de sódio foram dissolvidos separadamente para se atingir soluções de 12 M cada. Em seguida à formulação das soluções alcalinas, por se tratarem de soluções exotérmicas, ambas foram mantidas na capela até que retornassem a temperatura próxima à ambiente, para enfim serem misturadas, e novamente aguardou-se a diminuição da temperatura que foi checada com termômetro digital.

Foram adicionadas à solução ativadora os materiais precursores do geopolímero, metacaulim e resíduo de vidro (conforme as proporções de cada formulação). Em seguida, foi adicionada a quantidade de água necessária para que as formulações atingissem a relação de líquidos/sólidos fixada e para cada adição de material a mistura foi homogeneizada manualmente, vide Figura 8, para que por fim fosse homogeneizada mecanicamente por uma argamassadeira por 5 minutos, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 8 - Mistura após homogeneização manual



Fonte: Autor (2022)

Figura 9 - Mistura dos materiais na argamassadeira



Fonte: Autor (2022)

Finalizada a homogeneização mecânica o material foi introduzido em 4 camadas de volume aproximadamente iguais, em formas metálicas cúbicas de lado de 4 centímetros, representada na Figura 10. Os corpos de prova foram adensados na mesa de adensamento por

queda, ilustrada na Figura 11, aplicando-se 30 golpes, no intervalo de 1 segundo cada, em camada única.

Para a preparação dos moldes foi utilizada fita adesiva em todas as faces internas do molde metálico e posteriormente foi aplicada uma fina camada de desmoldante nas mesmas, visando facilidade no processo de desforma.

Figura 10 - Molde metálico cúbico



Fonte: Autor (2022)

Figura 11 - Moldes na flowtable para adensamento



Fonte: Autor (2022)

Os corpos de prova foram moldados, identificados e embalados em filme plástico para se evitar perdas de umidade para o ambiente ($25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$) e foram armazenados em sala de cura,

com temperatura controlada. Após 24 horas de sua confecção, os corpos de prova foram desmoldados e foram novamente envoltos em filme plástico, ilustrado na Figura 12, sendo armazenados na sala de cura até a data de ensaio.

Figura 12 - Corpos de prova embalados após desmolde



Fonte: Autor (2022)

Os geopolímeros foram curados em temperatura ambiente, buscando equiparar o material à cura de cimentos tradicionais, visando a viabilidade do material como material construtivo, mesmo que segundo Si (2020) a cura térmica proporcione maiores resistências aos compósitos geopoliméricos.

4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO

A realização do ensaio de compressão visou determinar a resistência média à compressão dos compósitos, por meio da Equação 2.

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2)$$

Em que σ é a tensão de compressão, expressa em megaPascals (MPa), N é a força de compressão, expressa em Newton (N) e A a área de aplicação da carga de compressão, expressa em milímetros ao quadrado (mm^2).

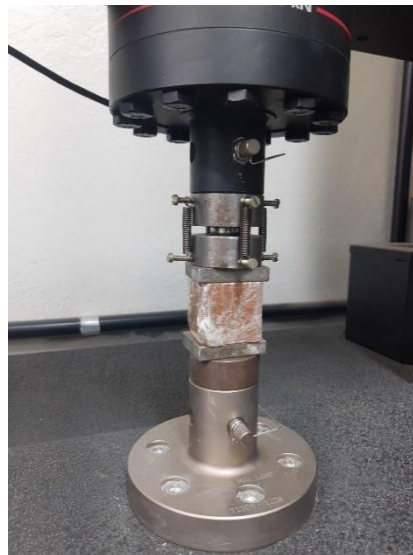
Inicialmente, as dimensões dos corpos de prova foram tomadas com um paquímetro digital de precisão de 0,01 mm, conforme Figura 13, a fim de se obter a média aritmética de duas medidas de cada lado do cubo. Os cubos foram envoltos em plástico filme, conforme representado na Figura 14, em seguida foram ensaiados na máquina Universal de Ensaio Instron 5982, com células de carga de 5 kN.

Figura 13 – Medição de corpo de prova



Fonte: Autor (2022)

Figura 14 - Ensaio à compressão dos corpos de prova preparados.



Fonte: Autor (2022)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos com os ensaios de compressão encontram-se na Tabela 6, contendo as informações sobre cada experimento, assim como as tensões médias de compressão e desvios padrões obtidos, ambos em MPa, para cada experimento.

Tabela 6 - Resultados do ensaio à compressão

Experimentos	Resíduo de vidro (% em massa)	Ativador/ Precursor	Idade de ensaio (dias)	Resistência à compressão (MPa)	
				Média	σ (Desvio Padrão)
1	0,0	1	0,5	22,35	3,6
2	0,0	1	0,7	14,05	1,32
3	0,0	14	0,5	29,58	2,15
4	0,0	14	0,5	23,41	0,41
5	12,5	7	0,6	17,25	6,82
6	12,5	7	0,6	14,03	2,52
7	12,5	7	0,6	19,68	2,43
8	25	1	0,5	13,28	1,41
9	25	1	0,7	2,42	0,21
10	25	14	0,5	23,64	1,73
11	25	14	0,7	12,52	1,15

Fonte: Autor (2022)

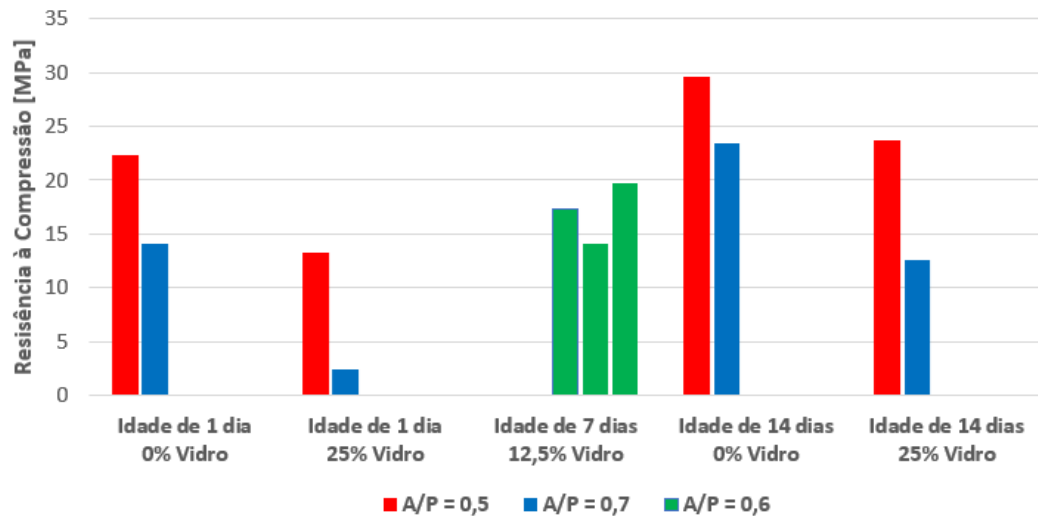
O maior valor médio de resistência à compressão obtido foi no experimento 3, o qual foi testado com valores dos limites inferiores de relação ativador/precursor (0,5) e de porcentagem de resíduo de vidro (0%), ensaiado com 14 dias, e obteve valor de $29,58 \pm 2,15$ MPa.

Os resultados de resistência à compressão obtidos foram analisados em gráficos isolando as variáveis de relação ativadores/precursos e adição de vidro, conforme Figura 15 e Figura 16, respectivamente, a fim de melhor visualização de suas influências sobre o compósito.

No gráfico da Figura 15, no eixo horizontal, são agrupados os experimentos com mesma idade de ensaio (1 dia , 7 dias e 14 dias) e porcentagem de substituição de metacaulim por

resíduo de vidro (0%, 12,5% e 25%), visando analisar a influência da relação entre ativadores e precursores, variando de seu limites de 0,5 a 0,7.

Figura 15 – Evolução da resistência à compressão dos compósitos com a idade para diferentes relações ativadores/precursores

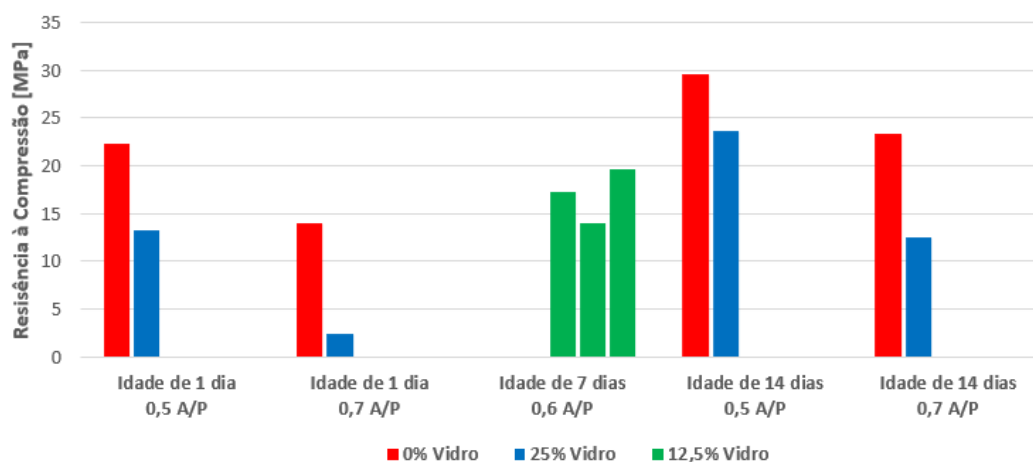


Fonte: Autor (2022)

É possível observar em todos os agrupamentos das colunas a perda de resistência à compressão com o aumento da relação entre ativadores e precursores, mostrando correlação inversa entre ambos. Alves (2018) concluiu que, em excesso, a quantidade de ativadores alcalinos produz materiais não reagidos no composto, prejudicando sua resistência mecânica final. Concentrações altas de ativadores produzem alto pH em fase líquida o que provoca uma limitação da mobilidade de íons da dissolução, dificultando a difusão de espécies na fase aquosa, retardando assim a polimerização (PALOMO, 2001).

Também é possível verificar, quando comparados os agrupamentos de colunas 1 e 4, e 2 e 5, o nítido ganho de resistência, conforme maior a idade do compósito ensaiado, indicando a correlação positiva existente entre ambos.

Figura 16 – Evolução da resistência à compressão dos compósitos produzidos com diferentes teores de adição de vidro



Fonte: Autor (2022)

No gráfico exibido na Figura 16, no eixo horizontal, são agrupados os experimentos com mesma idade de ensaio (1 dia, 7 dias e 14 dias) e relação de ativadores e precursores utilizados na composição (0,5, 0,6 e 0,7), para análise da influência da porcentagem em massa de substituição de metacaulim por resíduo de vidro, com limites variando de 0% a 25%.

Assim como na variável de relação ativadores e precursores, há correlação negativa entre a adição em massa de resíduo de vidro e a resistência à compressão, onde em todos os agrupamentos os experimentos utilizando apenas metacaulim obtiveram valores maiores de resistência mecânica quando comparados a seus pares com substituição por vidro. Resultados indicam que devido a diferença de distribuição granulométrica entre o metacaulim e o vidro, em que o primeiro possui partículas mais finas e maior superfície de contato que o vidro, sendo assim, a substituição parcial destes materiais interfere negativamente na reatividade do compósito, e, portanto, em sua resistência mecânica (NOVAIS, 2016).

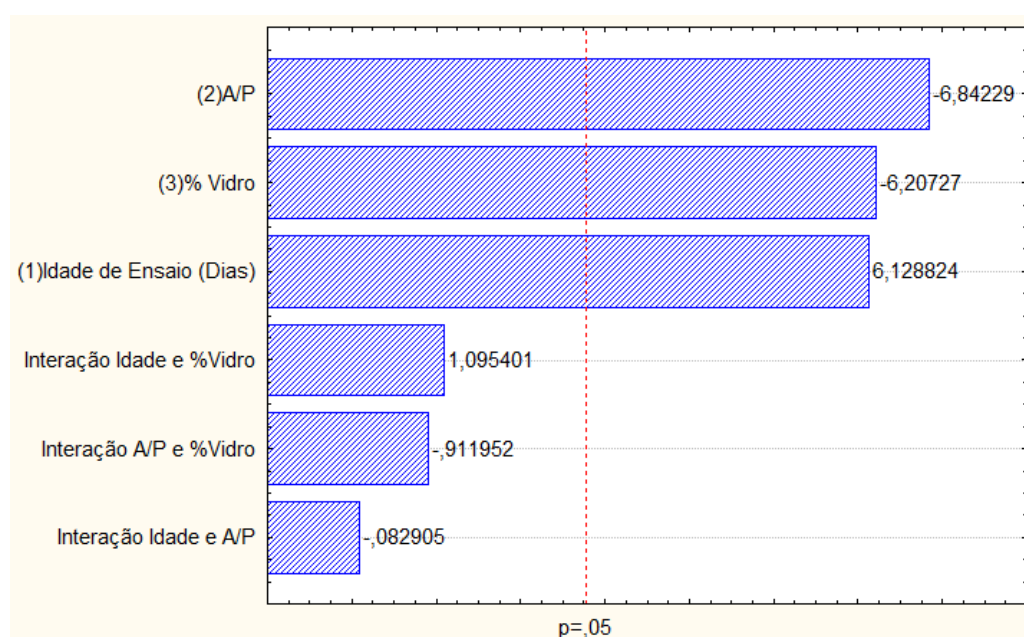
De acordo com Si (2020), devido a menor granulometria das partículas do vidro, a quantidade do resíduo não reagente tende a aumentar quanto maior seu teor na mistura, sendo as regiões ao redor das partículas de vidro não reagidas possíveis geradores de microfissuras, afetando a propriedade mecânica de compressão.

A análise da significância de cada variável para os valores de tensão de compressão foi realizada por meio do software *Statistica 7.0*, que por meio de regressão linear e da distribuição *t* de Student, forneceu o gráfico de Pareto, demonstrado na Figura 17. Foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, obtendo coeficiente de determinação da regressão (R^2) de 0,96, o que

expressa boa precisão e adequação para análise do efeito dos componentes sobre a resistência do geopolímero. Inicialmente, foram avaliadas as variáveis e suas interações:

- “(1) Idade de ensaio (Dias)” – Variável Idade de Ensaio
- “(2) A/P” – Variável relação de ativadores e precursores
- “(3) % Vidro” – Variável porcentagem em massa de incorporação de resíduo de vidro
- Interação das variáveis entre si

Figura 17 - Gráfico de Pareto

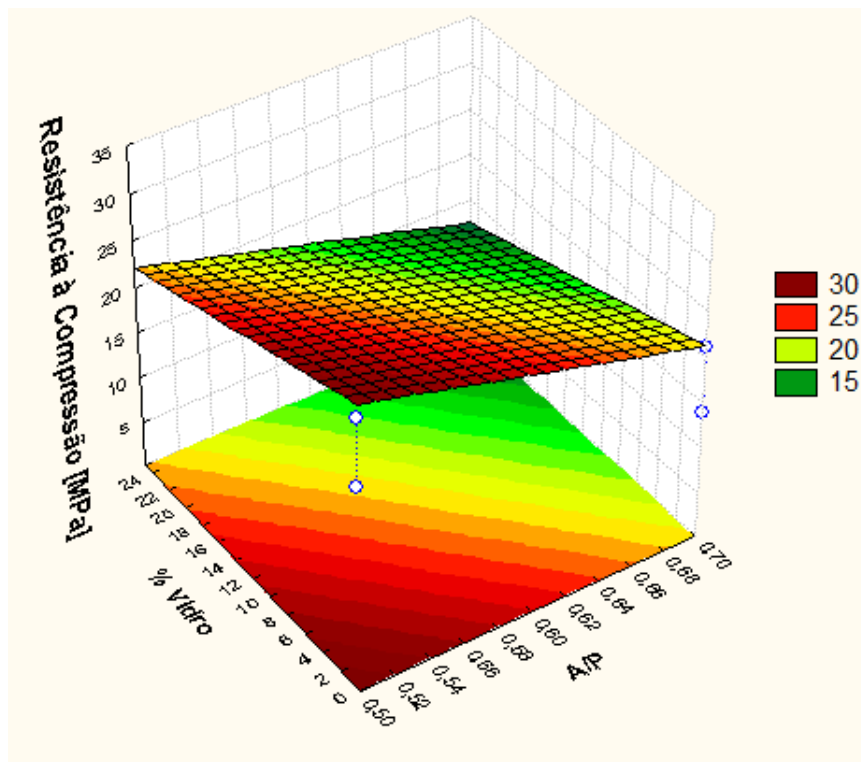


Fonte: Autor (2022)

Pelo gráfico de Pareto, é possível verificar que todas as variáveis possuem significância para a resistência à compressão, algo que não ocorre com as interações entre elas. É possível identificar, conforme dito anteriormente, a correlação negativa das variáveis da relação ativadores/precursores e incorporação de resíduo de vidro em relação aos valores de resistência e a correlação positiva da idade de ensaio com o aumento da mesma. É também verificável valores de significância, em módulo, muito próximas para todas as variáveis, validando os dados dos gráficos anteriores.

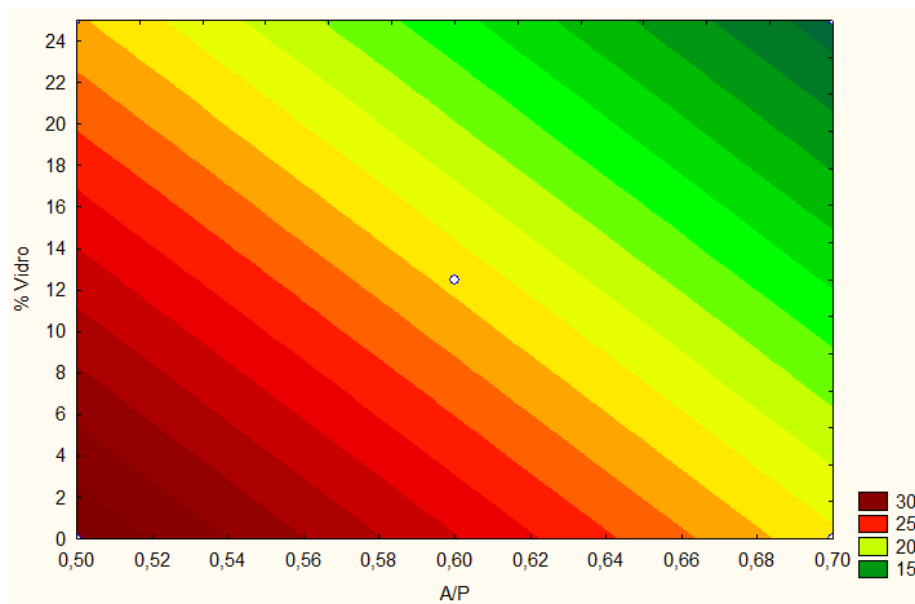
Foi realizado um tratamento de dados, a fim de retirar as interações abaixo da linha de significância e em seguida foram geradas as superfícies de resposta (Figura 18) e curva de contorno (Figura 19) para as variáveis de ativador/precursor e resíduo de vidro, para idade de ensaio de 14 dias, que corroboram os dados citados anteriormente.

Figura 18 - Superfície de resposta obtida para os diferentes teores de resíduo de vidro e relações ativador/precursor



Fonte: Autor (2022)

Figura 19 – Curva de contorno da superfície de resposta obtida para os diferentes teores de resíduo de vidro e relações ativador/precursor.



Fonte: Autor (2022)

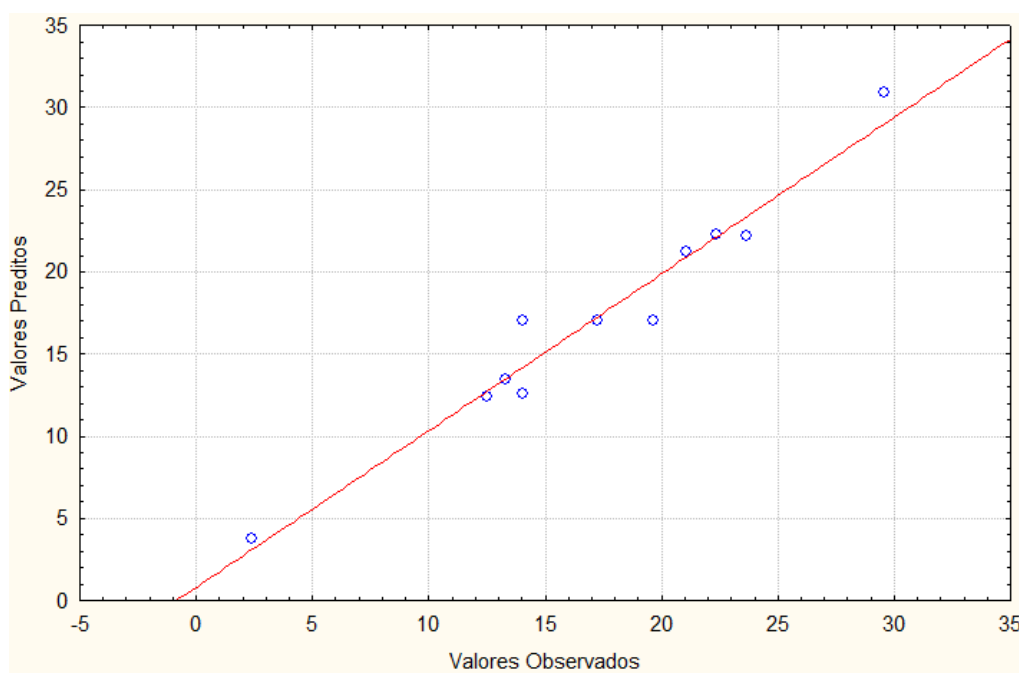
Analisando a superfície de resposta e a curva de contorno, percebe-se a correlação negativa entre as variáveis e a propriedade estudada, e é possível encontrar limites máximos nos quais suas utilizações podem ser aproveitadas a partir da Equação 3, modelo obtido que originou a superfície de resposta.

$$\text{Resist. a comp} = 55,182 - 48,4875 \times \text{Rel.} \frac{A}{P} - 0,3519 \times \text{Incorp. vidro} \quad (3)$$

Para a relação entre ativadores e precursores pode ser adotado como valor satisfatório um limite máximo de 0,59, quando se utiliza até 12,5 % de resíduo de vidro, obtendo-se valor de resistência à compressão de 26,57 MPa. Valores iguais de resistência são obtidos para 0% de incorporação de vidro e relação a/p de 0,5. Resultados tidos como ótimos também foram encontrados neste intervalo por Novais (2016), o qual encontrou 12,5% como limite ótimo de incorporação de resíduo de vidro. Si (2019) obteve bons resultados para limites mais baixos de uso do resíduo, com valor ótimo de 5%.

Foi gerado também um modelo de regressão linear com os valores preditos e observados, a fim de confirmar a confiabilidade do modelo obtido, o que foi atestado, conforme Figura 20, em que é possível observar a baixa dispersão entre os resultados observados da linha de regressão.

Figura 20 - Gráfico de valores preditos x observados para resistência à compressão



Fonte: Autor (2022)

6. CONCLUSÕES

O estudo visou a composição de matriz polimérica com metacaulim e resíduo do polimento de vidro plano, com o objetivo de avaliar variáveis de grande importância, visando a possibilidade de utilizar resíduo de vidro plano como precursor para desenvolvimento de geopolímeros e suas influências na propriedade mecânica de resistência à compressão.

O valor máximo obtido para resistência à compressão foi do EXP 03, sem incorporação de vidro, com taxa ativador/precursor de 0,5 e máximo de idade de ensaio (14 dias), onde foi obtida resistência média à compressão de $29,58 \pm 2,15$ MPa. Esse resultado se deu devido à combinação da menor taxa a/p e incorporação de vidro, fatores que contribuíram para maior reatividade do geopolímero, auxiliando em seu ganho de resistência.

Os resultados obtidos por meio da superfície de resposta e curva de contorno atestam que o resíduo de vidro pode ser incorporado até teores de 12,5% em substituição ao metacaulim, valor compatível ao encontrado na literatura em estudos similares.

Estes resultados podem estar relacionados a maior granulometria do resíduo de vidro plano utilizado. Estudos devem ser realizados posteriormente com o intuito de analisar o refinamento do resíduo de vidro plano e sua influência na resistência à compressão da matriz geopolimérica, visando agregar valor construtivo ao material estudado

Apesar da proximidade dos valores, em módulo, de significância das variáveis, a relação ativador/precursor se mostrou a mais influente, com valor ótimo em 0,5 e limite máximo de 0,59 quando o resíduo de vidro é incorporado. Possivelmente em razão do aumento da geração de materiais não reagidos, o que prejudica sua resistência à compressão.

Conclui-se que as informações obtidas neste trabalho contribuíram para estudo dos materiais geopoliméricos, mostrando ser viável a aplicação de resíduo de vidro em substituição parcial ao metacaulim, agregando valor a este subproduto industrial e mostrando que geopolímeros são reais alternativas ao cimento Portland, amplamente utilizado na construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, C. do B. C. S.; SALES, R. do B. C.; CALDAS, R. B.; CETLIN, P. R.; AGUILAR, M. T. P. Use of glass waste in the production of metakaolin-based geopolymer submitted to room temperature and thermal curing. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 147-160, jan./mar. 2022.
- ALVES, Lorayne Cristina da Silva. **Geopolímero à base de metacaulim com adição de fibras de sisal**. 2018. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1233>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados-Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001. 13 p.
- BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. **Development of geopolymer concrete supported by system analytical tools**. Proceeding of the 2nd int. Synposiun of Non-tradition Cement and concrete, ed. By Bilekand Kersner, p. 25-35, 2005.
- CUNICO, M. W. M, et al. **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, Sina *et al.* **Extensive evaluation on the effect of glass poder on the rheology, strength, and microstructure of metakaolin based geopolymer binders**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 268, p. 121168-121184, jan. 2021.Elsevier BV.
- DAVIDOVITS, Joseph; DAVIDOVICS, Michel. **Geopolymer: ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites**. How Concept Becomes Reality., v. 36, p. 1939-1949, 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, Joseph. **Environmentally driven geopolymer cement applications**. In: Proceedings of 2002 Geopolymer Conference. Melbourne. Australia. 2002.
- DAVIDOVITS, Joseph. **Properties of geopolymer cements**. In: First international conference on alkaline cements and concretes. Kiev, Ukraine: Kiev State Technical University, 1994. p. 131-149.
- DUXSON, Peter *et al.* **Geopolymer technology: the current state of the art**. Journal of Materials Science, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007a.

Glukhovskiy, V. D., Rostovskaja, G. S., Rumyna, G. V. **High strength slag-alkaline cements**. 7th International Congress Chemical Cement, Vol.3, Paris, Theme 5, 164 – 168, 1980.

GRILLO, Fernanda. **Caracterização de geopolímeros a partir de resíduos de vidro e lodo de anodização do alumínio da região metropolitana de Curitiba**. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ufpr, Curitiba, 2019.

HIRSCHMAN, Alberto. **Estratégia do desenvolvimento econômico**. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1961

LAHOTI, M.; TAN, K. H.; YANG, E. H. **A critical review of geopolymer properties for structural fire resistance applications**. Construction and Building Materials, v. 221, p. 514–526, 2019.

Mason, Brian Harold. **Principles of geochemistry**. 3. Ed. J. Wiley, p.160, 1966

METACAULIM HP ULTRA, **Metacaulim do Brasil**. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>> Acesso em: 25 jul. 2022

New Year's Day 2022: January 1, 2022. United States Census Bureau, 2022. Disponível em: <https://www.census.gov/newsroom/stories/new-years-day.html>. Acesso em: 02 de abril de 2022.

NOVAIS, Rui M.; ASCENSÃO, G.; SEABRA, M.P.; LABRINCHA, J.A.. **Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers**. Waste Management, [S.L.], v. 52, p. 245-255, jun. 2016.

ONU, 2019. **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050**. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>. Acesso em: 03 de abril de 2022.

ONU, 2019. **População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/83427-populacao-mundial-deve-chegar-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu>. Acesso em: 03 de abril de 2022.

PALOMO, A.; ALONSO, S. **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio**. Materials Letter. Madrid, p. 55-62. jan. 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00212-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00212-3). Acesso em: 10 set. 2022.

PROVIS, John L. **Geopolymer sand other álcali activated materials: why, how, and what?**

RILEM ANNUAL WEEK IN PARIS, 2013, Paris. **Anais [...]**. Paris: Rilem, 2013. p. 1-15

- 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
- RIGOLON, Francisco J. Z.; PICCININI, Maurício S. **O investimento em infra-estrutura e a retomada do crescimento econômico sustentado**. Rio de Janeiro: BNDES, 1997. (Textos para discussão, 63).
- SATA, Vanchai; SATHONSAOWAPHAK, Apha; CHINDAPRASIRT, Prinya. **Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack**. Cement and Concrete Composites, v. 34, n. 5, p. 700-708, 2012.
- SATHONSAOWAPHAK, Apha; CHINDAPRASIRT, Prinya; PIMRAKSA, Kedsarin. **Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar**. Journal Of Hazardous Materials, [S.L.], v. 168, n. 1, p. 44-50, 30 ago. 2009. Elsevier BV.
- SEVERO, C. G. S et al. **Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 55-67, 07 jul. 2013.
- SHELBY, J. E. **Introduction to glass Science and technology**. Royal Society of Chemistry, 2007.
- 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
- SI, Ruizhe; GUO, Shuaicheng; DAI, Qingli; WANG, Jiaqing. **Atomic-structure, microstructure and mechanical properties of glass powder modified metakaolin-based geopolymer**. Construction And Building Materials, Houghton, Mi, v. 254, p. 119303-119314, set. 2020. Elsevier BV.
- TEIXEIRA, Luciene Pires; CARVALHO, Fátima Marília Andrade de. **A CONSTRUÇÃO CIVIL COMO INSTRUMENTO DO DESENVOLVIMENTO DA ECONOMIA BRASILEIRA**. Revista Paranaense de Desenvolvimento, Curitiba, v. 109, n. 1, p. 9-25, mar. 2006.
- TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said. **Ligantes Poliméricos. Uma alternativa ao cimento Portland?**. Revista Ingenium, n.116, p.94-96, 2010. Disponível em: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/10728/1/ING116_Comunicacao-1v2.pdf. Acesso em: 04 de abril de 2022.