



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Renata Prestes Luiz

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGENTE ESPUMANTE EM
GEOPOLÍMERO DE METACAULIM**

Santa Cruz do Sul

2020

Renata Prestes Luiz

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGENTE ESPUMANTE EM
GEPOLÍMERO DE METACULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Ma. Camila Crauss

Santa Cruz do Sul
2020

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Grupos de solo-cimentos	16
Figura 1 – Tipos de poli(sialatos) conforme organização química	18
Figura 2 – Microestrutura em função da razão Si/Al	20
Figura 3 – Obtenção de cimentos geopoliméricos	25
Figura 4 – Tipos de materiais geopoliméricos em função da relação Si:Al	30
Figura 5 – Painéis estruturais para isolamento térmico e acústico.....	31
Figura 6 – Pasta geopolimérica nos moldes.....	36
Figura 7 – Macroestrutura dos geopolímeros.....	44
Figura 8 – Gráfico das resistências mecânicas e da massa específica real	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas	33
Tabela 2 – Propriedades químicas	33
Tabela 3 – Composição das pastas geopoliméricas	36
Tabela 4 – Resistências à tração na flexão.....	40
Tabela 5 – Resistências à compressão axial	41
Tabela 6 – Absorção de água e índice de vazios.....	43
Tabela 7 – Massas específicas	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	Antes de Cristo
CP	Cimento Portland
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de carbono
Si	Silício
O	Oxigênio
Al	Alumínio
SiO ₂	Dióxido de silício
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Na ₂ O	Óxido de sódio
H ₂ O	Água
CaO	Óxido de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
SiO ₄	Silicato
AlO ₄	Aluminato
Na ⁺	Sódio
K ⁺	Potássio
Li ⁺	Lítio
Ca ²⁺	Cálcio
Ba ²⁺	Bário
IV	Algarismo quatro em Romano
V	Algarismo cinco em Romano
OH	Hidroxilo
KOH	Hidróxido de potássio
NaOH	Hidróxido de sódio
pH	potencial Hidrogeniônico
MPa	Megapascal
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
°C	grau Celsius
%	Porcentagem
±	Mais ou menos
<	Menor que
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
μm	Micrômetro

M	Mol por litro ou molaridade
W/m.K	Watts por metro Kelvin
g	Gramma
kg	Quilograma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo geral	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	JUSTIFICATIVA	12
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1	Cimento Portland	13
4.2	Cimentos antigos e ligantes obtidos por ativação alcalina	14
4.3	Geopolímeros	17
4.3.1	Matéria prima	21
4.3.2	Ativadores	22
4.3.3	Cura	23
4.4	Cimento geopolimérico	24
4.5	Geopolímeros porosos	26
4.6	Aplicações	29
5	METODOLOGIA	32
5.1	Considerações iniciais e materiais	32
5.1.1	Precursor	33
5.1.2	Ativador alcalino	34
5.1.3	Agente espumante	35
5.2	Confecção e moldagem dos corpos de prova	35
5.3	Ensaio	37
5.3.1	Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	37
5.3.2	Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão axial	38
6	RESULTADOS E ANÁLISES	40
6.1	Resistências à tração na flexão e à compressão axial	40
6.2	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	43
7	CONCLUSÃO	47
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS	49

ANEXO A – Relatório de resistências	52
--	-----------

RESUMO

O cimento Portland é um material versátil e de grande aplicabilidade na construção civil, no entanto, devido ao grande volume de dióxido de carbono (CO₂) liberado durante seu processo de fabricação, o mesmo tem sido alvo de críticas. Além disso, outros inconvenientes como a baixa resistência a ataques químicos, ao fogo e a impossibilidade de aproveitamento de resíduos na sua formulação impõe limitações ao seu uso. Neste sentido, a busca por materiais alternativos, de menor impacto ambiental e maiores possibilidades de aplicação vem se tornando uma crescente. Uma possibilidade que vem ganhando destaque é o uso dos geopolímeros, que são materiais compostos por precursores ricos em sílica e alumina ativados por uma solução alcalina. Além dos geopolímeros convencionais, os geopolímeros porosos, obtidos pela incorporação de um agente surfactante, também estão em evidência pelas suas propriedades de isolamento térmico e imobilização de resíduos tóxicos. Este trabalho teve como objetivo, avaliar as resistências à tração na flexão e à compressão, bem como a massa específica, absorção de água e índice de vazios de um geopolímero sintetizado a base de metacaulim com hidróxido de potássio, além de avaliar a influência que a adição de diferentes porcentagens de peróxido de hidrogênio tem sobre essas propriedades. Os resultados comprovam que a incorporação de agente surfactante na matriz geopolimérica é capaz de promover a diminuição da densidade do material, tornando-o mais leve. As resistências mecânicas obtidas não apresentaram variação significativa para as diferentes porcentagens de adição de agente espumante, destacando a necessidade de avaliar melhor a composição do geopolímero e promover a correção das proporções utilizadas a fim de obter um material com propriedades melhoradas.

Palavras-chave: Geopolímero. Metacaulim. Poroso. Peróxido de hidrogênio.

1 INTRODUÇÃO

Ao realizar uma breve pesquisa é possível observar a importância dos materiais de construção para a humanidade, bem como os impactos ambientais e econômicos gerados na sua utilização. Baseados no desenvolvimento destes materiais estão pautados os avanços da construção civil no que diz respeito à durabilidade, resistência mecânica, resistência a ataques químicos, aplicabilidade, entre outros. Neste contexto, os cimentos são alvos frequentes de estudos a fim de ampliar as possibilidades de utilização de diferentes matérias primas em sua fabricação.

A descoberta do cimento foi de suma importância para o desenvolvimento das nações. Conjuntamente com outros materiais e métodos ele solidifica as estruturas que dão origem às cidades e promovem o suprimento de necessidades humanas como moradia, capacidade de locomoção, saneamento, desenvolvimento econômico, etc.

Embora possa ser visto como excelente ligante devido a sua versatilidade e ao seu relativo baixo custo, o cimento apresenta, no entanto, alguns inconvenientes em termos de durabilidade. Entre as desvantagens pode-se citar a baixa resistência ao fogo, suscetibilidade à carbonatação, ataques de cloretos, reações expansivas do tipo álcali-agregado, entre outras. (TORRALBA; CASTRO-GOMES; JALALI, 2005). Além disso, outro fato de grande relevância que tem atraído a atenção de pesquisadores é o alto índice de poluição por dióxido de carbono (CO_2) produzido durante a fabricação do cimento Portland comum.

Frente aos problemas expostos, é evidente a necessidade de criar novos materiais ligantes que sejam capazes de suprir as demandas de cimento, mas que apresentem melhor desempenho e sejam ambientalmente mais corretos, gerando menor impacto e poluição ao meio ambiente. Uma alternativa amplamente pesquisada para este fim são os ligantes obtidos por ativação alcalina e os geopolímeros, e este trabalho visa abordar as principais características bem como avaliar algumas propriedades destes materiais, em específico a ativação alcalina do metacaulim e o uso de um agente espumante para a produção de um geopolímero leve.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar propriedades físicas e mecânicas de um geopolímero à base de metacaulim e de um geopolímero poroso com adição de um agente espumante.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho caracterizam-se em:

- Determinar os materiais a serem utilizados para a produção dos geopolímeros;
- Determinar as proporções de precursor e ativador para a formulação das pastas geopoliméricas;
- Estabelecer as porcentagens de adição de agente espumante;
- Produzir um geopolímero de metacaulim e um geopolímero poroso a partir deste;
- Determinar a absorção de água, índice de vazios e massa específica;
- Avaliar a resistência à compressão;
- Avaliar a resistência à tração na flexão.

3 JUSTIFICATIVA

Durante muito tempo os avanços em pesquisas e novas tecnologias eram baseados somente na obtenção de produtos que oferecessem melhor qualidade, praticidade e fossem mais vantajosos para o desenvolvimento econômico. Não havia qualquer preocupação com os recursos disponíveis e os impactos negativos que poderiam ser gerados em consequência desse desenvolvimento, afinal a humanidade caminhava para o progresso e ainda não tinha conhecimento dos riscos a que estaria sujeita.

Hoje, muitos desses riscos já são conhecidos e agora as pesquisas são voltadas para solucionar tais problemas sem, no entanto, afetar o avanço que se deseja, buscando um equilíbrio entre as partes. Dentro desse aspecto, o problema atualmente mais evidente certamente é a proteção ao meio ambiente. Existe a consciência de que se atitudes não forem tomadas para minimizar e/ou extinguir os impactos negativos sobre a natureza, esta entrará em colapso e todo o futuro estará comprometido.

A construção civil está intimamente ligada a isso, pois é uma das grandes responsáveis pelas mudanças nas paisagens naturais, quer seja pela introdução das estruturas ou pela exploração das matérias primas utilizadas. Neste contexto, o cimento merece destaque, pois sua fabricação libera na atmosfera enormes quantidades de gás carbônico, contribuindo para o aquecimento global. Além disso, o uso do cimento para a produção de concretos requer em sua formulação materiais pétreos de granulometria específica e considerável pureza, caso contrário sua aderência fica prejudicada e pode ocasionar sérias consequências no desempenho previsto. Fato este que faz com que mais recursos naturais sejam necessários e a paisagem natural seja degradada, através da exploração de pedreiras.

Frente ao exposto, faz-se compreender a extrema importância de ampliar os estudos visando à aplicação de materiais e métodos mais eficazes além de ambientalmente menos impactantes e, para o caso específico do cimento, podemos citar a utilização dos geopolímeros. Tais materiais possibilitam a utilização de matéria prima minimamente processada e até mesmo o aproveitamento de resíduos industriais, além disso, não necessitam de elevado gasto energético para sua produção e ainda podem oferecer uma resistência maior que a do cimento comum, permitindo um vasto campo de aplicações.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, inicialmente são abordados aspectos e características do cimento convencional do tipo Portland, a fim de elucidar semelhanças e diferenças com os ligantes obtidos por ativação alcalina e geopolímeros. Sequencialmente são abordados os principais assuntos referentes aos ligantes ativados alcalinamente e geopolímeros, apresentando características, materiais, métodos de obtenção e, por fim, algumas de suas possíveis aplicações.

4.1 Cimento Portland

Segundo Battagin (c2019), os primeiros passos para o desenvolvimento do cimento datam de 1756, onde o inglês John Smeaton obteve um produto de alta resistência por meio da calcinação de calcários moles e argilosos. Posteriormente, em 1818, o francês Louis Vicat obteve resultados semelhantes pela mistura de componentes argilosos e calcários, sendo considerado o inventor do cimento artificial. Entretanto, foi em 1824 que o inglês Joseph Aspdin teve a ideia de queimar pedras calcárias e argila e depois triturá-las até obter um pó. Este pó misturado com água e após secar tornava-se tão duro quanto às rochas usadas nas construções e era resistente a umidade. A mistura foi patenteada por ele no mesmo ano e recebeu o nome de Cimento Portland (CP) por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

O cimento é um dos materiais de construção mais utilizados em todo o mundo e sua produção não envolve o uso de tecnologias muito elaboradas. Sua formulação é basicamente composta pela combinação de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, provenientes do calcário e da argila. Em suas devidas proporções as matérias primas são trituradas, moídas e misturadas homogeneamente, após são levadas ao forno em temperatura de aproximadamente 1500°C onde se verifica o processo de calcinação. Neste ponto a mistura perde grande parte da água de formação e libera na atmosfera o dióxido de carbono (CO_2) juntamente com os gases resultantes da queima do combustível utilizado para o seu aquecimento. O produto resultante é resfriado rapidamente para evitar cristalizações prejudiciais e é chamado clínquer. Finalmente o clínquer é moído e se acrescenta uma pequena quantidade de gesso

para regular a pega, caso contrário esta ocorreria quase instantaneamente e prejudicaria a utilização do cimento. (COUTINHO, 1973 apud PINTO, 2004).

Voltando a atenção para a questão da poluição, o cimento é responsável por cerca de 5% das emissões de CO₂ no mundo. No Brasil, as emissões da indústria cimenteira representam algo em torno dos 2,6% devido a algumas inovações já adotadas pelo setor. Dados apontam que cerca de 600 quilos de CO₂ são emitidos na produção de uma tonelada de cimento no Brasil, estando abaixo da média mundial de cerca de 900 quilos. Contudo, estes valores ainda representam um desafio a ser vencido diante da perspectiva de aumento na demanda de cimento. (GOLDEMBERG, 2016 apud FREIRE, 2016).

Além disso, concretos à base de cimento Portland quando submetidos a condições agressivas podem apresentar alterações importantes que afetam seu comportamento estrutural e exigem a utilização de materiais pétreos com granulometria bem definida, limitando ações de reciclagem e/ou incorporações de escombros, materiais residuais ou mesmo restos do próprio concreto, o que impõe a degradação do ambiente pela constante exploração de pedreiras. (PINTO, 2004). Resumidamente, o cimento Portland apresenta uma série de desvantagens como, por exemplo, elevado consumo energético, elevado grau de poluição ambiental, considerável permeabilidade à penetração de agentes agressivos, baixa resistência ao ataque de ácidos, baixíssima resistência ao fogo, etc., o que acaba por comprometer sua resistência, durabilidade e vida útil. (TORGAL; CASTRO-GOMES; JALALI, 2005).

Portanto, fica clara a necessidade de se desenvolver soluções alternativas que atenuem essas deficiências ou mesmo sejam capazes de extingui-las. O uso de novos ligantes pode representar um avanço importante para o setor da construção civil no que diz respeito à tecnologia, economia e sustentabilidade. (SWAMY, 1986 apud PINTO, 2004).

4.2 Cimentos antigos e ligantes obtidos por ativação alcalina

Enquanto se encontram frequentemente estruturas com pouco mais de 20 anos que apresentam acentuado grau de degradação dos concretos e argamassas fabricadas com CP, verifica-se por outro lado, a existência de obras antigas construídas a cerca de 2000 anos, como é o caso do Coliseu de Roma, que se

mostram praticamente inalteradas passado todo este tempo, não evidenciando desagregação ou modificação química de suas argamassas frente aos fatores agressivos ambientais. (PINTO, 2004). Os concretos e ligantes antigos apresentam a estabilidade e dureza de uma rocha natural, sem apresentar grandes sinais de desgaste ou alteração química, assumindo um comportamento mecânico muito satisfatório. (DAVIDOVITS, 1988 apud PINTO, 2004).

Buscando compreender as razões do excelente desempenho desses cimentos antigos utilizados em construções históricas ainda existentes, o cientista e pesquisador Glukhovsky, do Instituto de Engenharia Civil de Kiev, na Ucrânia, motivou-se a desenvolver estudos investigativos durante os anos 50. (PINTO, 2004).

A partir das análises de Glukhovsky foi possível então concluir que tais cimentos eram compostos por aluminossilicatos (combinações químicas de alumínio (Al), silício (Si) e oxigênio (O)) cálcicos hidratados, semelhantes aos do cimento Portland, e por um zeólito, a analcite, rocha natural presente na crosta terrestre e que explica a durabilidade destes ligantes. (TORGAL; JALALI, 2009).

A presença deste zeólito permitiu compreender o modo de formação dos cimentos antigos: os zeólitos formam-se na Natureza, por exemplo, pela interação entre cinzas vulcânicas muito finas e praticamente amorfas e ambientes lacustres de caráter alcalino (águas com elevado teor em carbonatos ou bicarbonatos de sódio). (PINTO, 2004, p. 9).

Devido ao fato dos zeólitos encontrados apresentarem caráter amorfo chegou-se assim a conclusão de que se tratam do produto final estável de uma reação de fases intermediárias. Ou seja, os zeólitos não foram usados como matéria prima de partida na obtenção dos cimentos, mas são o resultado final de um processo reativo que envolve aluminossilicatos, cal e outros materiais em meio alcalino. (PINTO, 2004).

Baseando-se nas investigações e nos resultados obtidos parece ser possível criar novos sistemas ligantes ativados alcalinamente. Tais sistemas têm origem nos aluminossilicatos, que compõem grande parte dos compostos sólidos inorgânicos da crosta terrestre e, portanto são mais abundantes que as matérias primas usadas na fabricação do CP, sendo capazes de reproduzir artificialmente a síntese das rochas naturais siliciosas, cuja elevada resistência mecânica e durabilidade é conhecida. (DAVIDOVITS, 1991).

A ativação alcalina pode ser explicada de forma simplificada como uma reação de hidratação de aluminossilicatos com substâncias do tipo alcalinas ou alcalino-terrosas. Glukhovsky propôs um mecanismo geral de ativação alcalina desses aluminossilicatos, onde o modelo é composto por um conjunto de reações de dissolução, coagulação, condensação e cristalização. A primeira fase consiste na quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si quando o pH da solução alcalina aumenta, transformando-se em uma fase coloidal. Em seguida, ocorre acumulação dos produtos, estes interagem simultaneamente entre si para formar uma estrutura coagulada que após culminará na geração de uma estrutura condensada, esta então se cristaliza através do tempo e da temperatura. (SEVERO *et al.*, 2013).

Assim, este pesquisador descobriu a possibilidade de produzir ligantes a partir de argilas de baixo teor de cálcio ou livres de cálcio e soluções de metais alcalinos, os quais nomeou de “solo-cimentos”, devido sua semelhança com os minerais naturais. (KRIVENKO, 2017). A formação dos ligantes “solo-cimentos” pode ser dividida em dois grupos, dependendo da composição de seus materiais constituintes, apresentados no Quadro 1, e tais compostos são submetidos à ativação alcalina com hidróxido de sódio (NaOH) ou de potássio (KOH), provocando a reação que alterará a estrutura dos materiais. (GRANIZO, 1998 apud PINTO, 2004).

Quadro 1 – Grupos de solo-cimentos

Materiais	Exemplos	Composição química
Compostos solúveis de metais alcalinos em conjunto com aluminossilicatos sem a presença de cálcio	Cinzas vulcânicas; Cinzas volantes; Metacaulim; Argilas calcinadas.	$\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$
Compostos ricos em cálcio envolvendo materiais alcalino-terrosos	Cal; Cimento Portland; Escórias de alto-forno.	$\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$

Fonte: Adaptado de PINTO (2004).

Alguns anos após os estudos de Glukhovsky, no começo dos anos 70, uma série de catástrofes provocadas por incêndios na França, levou Joseph Davidovits a

desenvolver uma pesquisa com o objetivo de produzir materiais poliméricos inorgânicos resistentes ao fogo. (DAVIDOVITS, 1991).

Segundo Santa (2016), este pesquisador também realizou uma investigação sobre a durabilidade de cimentos antigos, onde, depois de analisar amostras coletadas de algumas pirâmides do Egito e de construções de Jericó de 7000 a.C., ele propôs uma teoria baseada nas características das construções, na qual declara que as pirâmides foram construídas com blocos moldados *in loco*.

As novas descobertas e as pesquisas já realizadas anteriormente proporcionaram a fundamentação necessária para iniciar a formulação e o desenvolvimento de um novo material baseado na produção dos cimentos antigos e na síntese e química das zeólitas naturais. (DAVIDOVITS, 2008 apud SANTA, 2016). Estes materiais foram, mais tarde, designados geopolímeros.

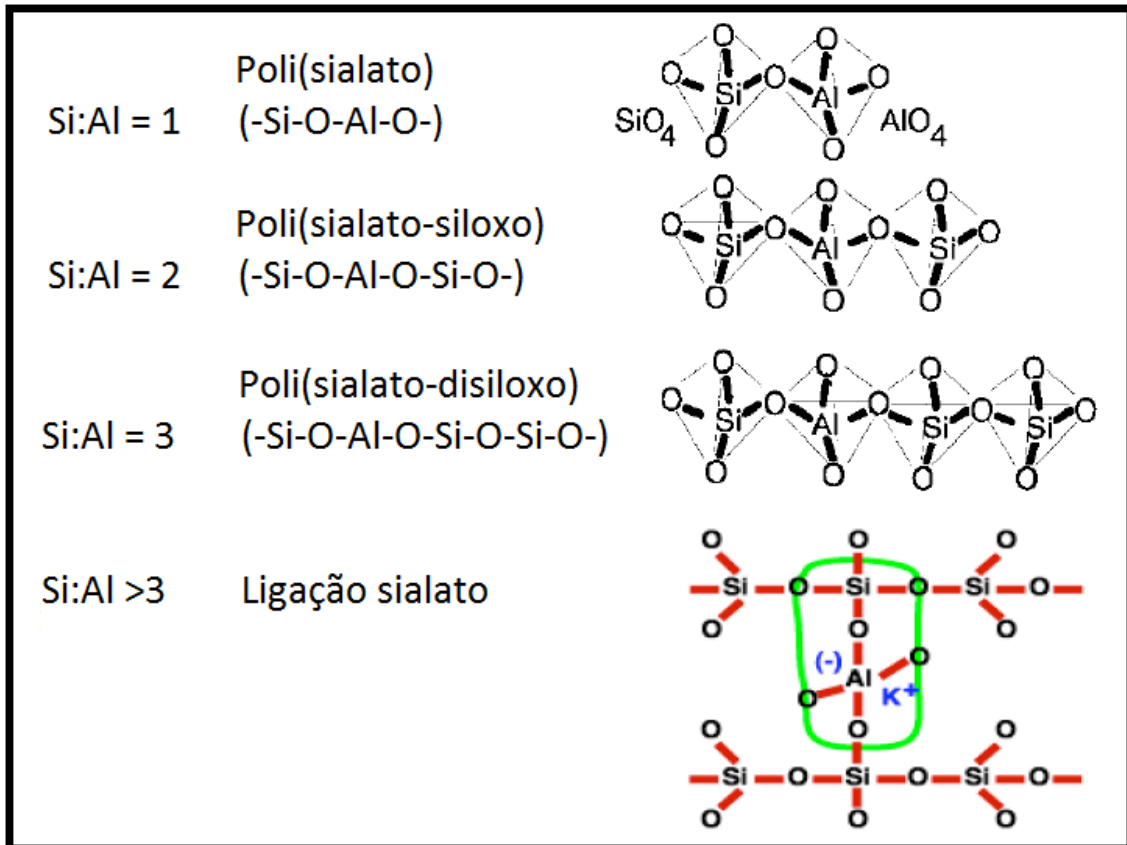
4.3 Geopolímeros

Dentro do âmbito da ativação alcalina existem dois modelos distintos. O primeiro modelo é o da ativação da escória de alto forno, material geralmente mais utilizado, que possui elevada quantidade de óxido de cálcio (CaO) e ao ser ativado com soluções alcalinas de baixa e média concentração origina produtos de reação do tipo silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O segundo modelo baseia-se em elementos compostos basicamente por sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), como é o caso do metacaulim, ativados com uma solução alcalina de alta concentração, cujo produto final é uma espécie de polímero de elevada resistência. (PALOMO; GRUTZECK; BLANCO, 1999). O segundo modelo foi o mais amplamente desenvolvido por Davidovits, sendo patenteado por ele sob o nome de geopolímero. O prefixo “geo” refere-se à semelhança com materiais geológicos e o sufixo “polímero” por ser baseado na química dos aluminossilicatos. (SANTA, 2016).

Em síntese, geopolímeros são polímeros inorgânicos obtidos através da reação química de aluminossilicatos ativados com soluções alcalinas, produzindo ligações poliméricas do tipo Si-O-Al. Na designação química dos geopolímeros o termo poli(sialatos) foi empregado, onde sialato é a abreviatura para silício-oxo-aluminato. As estruturas tridimensionais variam de amorfas a semicristalinas e são baseadas na relação Si:Al podendo variar de 1:1, 2:1, 3:1 ou maior que 3, onde apresenta uma ligação de Si-Al que faz ponte entre as cadeias de siloxo.

(DAVIDOVITS, 2002). A figura a seguir demonstra a organização química dos poli(sialatos) variando conforme a relação Si:Al.

Figura 1 – Tipos de poli(sialatos) conforme organização química



Fonte: Adaptado de DAVIDOVITS (2002).

Conforme Davidovits (1991, 1994), a rede de sialatos é composta de tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados alternadamente compartilhando todos os oxigênios. Para balancear a carga negativa do Al^{3+} em coordenação IV, devem estar presentes nas cavidades da estrutura íons positivos do tipo Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , entre outros. A fórmula empírica geral é a seguinte:

$$\text{Mn} [- (\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2]_n, w\text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

Onde:

M = cátion de metal alcalino como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , etc.

n = grau de polimerização

z = 1, 2 ou 3

w = grau de hidratação

De modo geral, as reações de geopolimerização podem ser descritas pelas seguintes etapas elencadas por Davidovits (1999 apud SANTA, 2016, p. 43-44):

- 1) ao misturar as proporções de materiais ricos em aluminossilicatos amorfos, com o ativador alcalino, inicia-se a dissolução das partículas devido à alcalinidade elevada do meio, deixando os íons de Al e Si livres para reagir;
- 2) após a dissolução, as espécies se difundem na solução para iniciar a formação das novas ligações;
- 3) a união dos monômeros formados por silício e alumínio, coordenados com oxigênio, formam os anéis de polímeros, condensando-se e precipitando-se na forma de um gel;
- 4) o processo final ocorre quando a maior parte do material disponível na reação se organiza, formando os poli (sialatos) e imobilizando a formação de novas reações, ou seja, causando o endurecimento da estrutura geopolimérica formada.

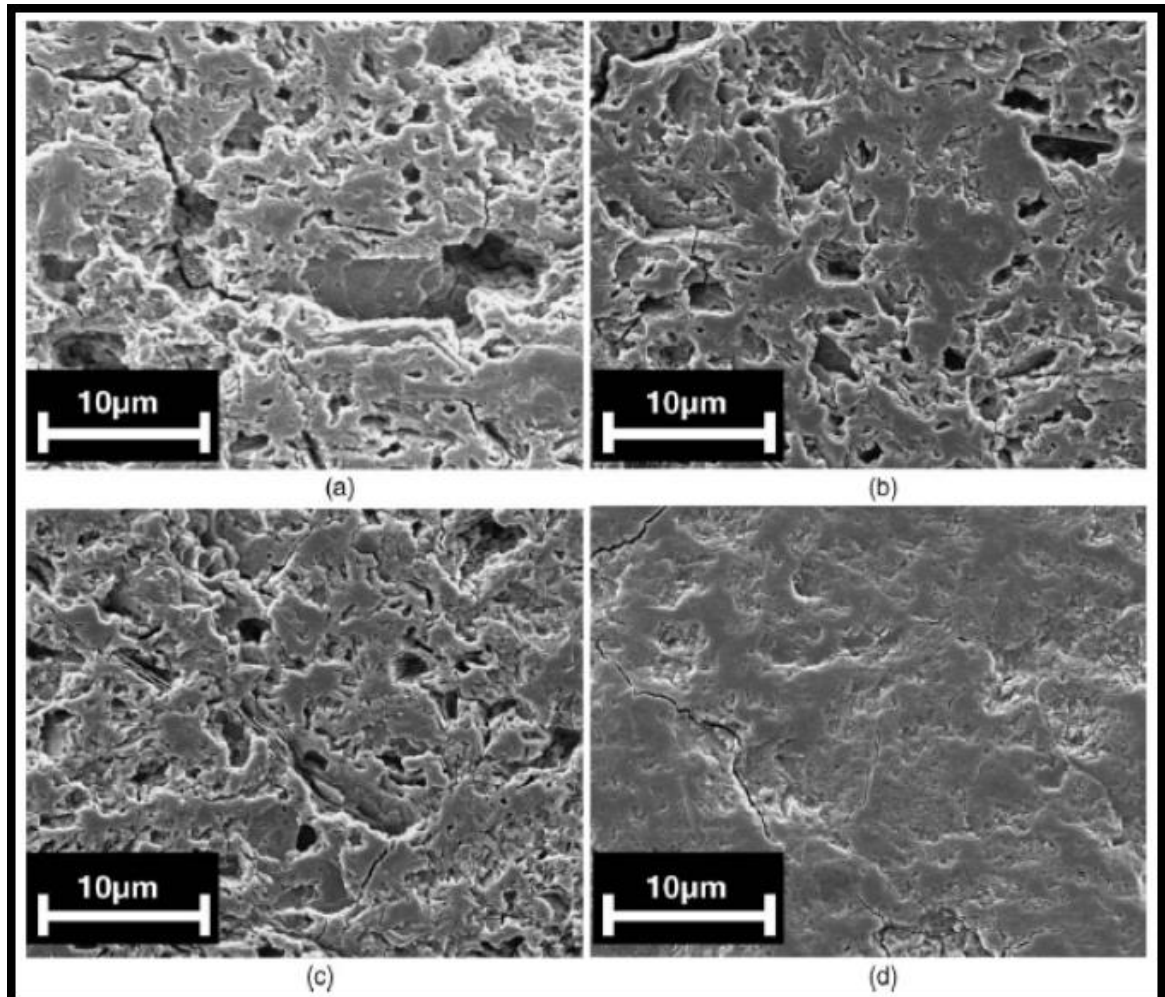
Os geopolímeros são então considerados polímeros, pois se transformam, passam por policondensação e endurecem rapidamente a baixa temperatura (algumas horas a 30°C, poucos minutos a 85°C e apenas alguns segundos em micro-ondas). Além disso, são duros, estáveis a temperaturas de até 1250°C e não inflamáveis. (DAVIDOVITS, 2002).

A matéria prima para a sua produção pode ser qualquer material inorgânico constituído por sílica e alumina, desde que tenha sofrido tratamento térmico, o qual provoca mudanças na organização molecular propiciando melhores condições de combinação. (PINTO, 2004). Sabe-se que a resistência dos geopolímeros depende dos materiais de origem e, quando estes são de origem calcinada, tais como o metacaulim, cinzas volantes e escória, apresentam maiores resistências à compressão se comparados com os sintetizados a partir de materiais não calcinados, como, por exemplo, a argila caulínica. Além disso, o geopolímero pode ser obtido utilizando um único material precursor ou pela combinação de vários materiais. (HARDJITO *et al.*, 2004). No entanto, cabe ressaltar que as propriedades dos geopolímeros são também afetadas pela alteração na quantidade de Si e Al disponível para a reação, portanto, uma compreensão completa da reatividade das matérias primas em um meio alcalino é de suma importância para definir as composições iniciais e atingir os resultados desejados. (SEVERO *et al.*, 2013).

Analisando as características morfológicas, misturas de metacaulim ativado com silicato de sódio e hidróxido de sódio apresentam produtos porosos para a relação Si/Al < 0,40 e produtos homogêneos quando a razão é superior a 1,65. Uma micrografia eletrônica de varredura, como pode ser visto na Figura 2, mostrou a

diferença da microestrutura do geopolímero quando as razões Si/Al são alteradas para valores entre 1,45 e 1,60. (DUXSON *et al.*, 2005 apud TORGAL; JALALI, 2009).

Figura 2 – Microestrutura em função da razão Si/Al. (a)1,45; (b)1,50; (c)1,55; (d)1,60.



Fonte: TORGAL; JALALI, 2009.

Em estudos feitos utilizando a ativação alcalina do metacaulim, alguns pesquisadores avaliaram o efeito das razões atômicas de Si/Al nas propriedades dos geopolímeros produzidos. Os experimentos foram realizados com razões variando de 1,2 a 2,5 e, de maneira geral, concluíram que a razão ideal de Si/Al fica entre os valores de 1,5 e 2. Isso porque valores superiores aos ideais demonstraram uma diminuição nas propriedades mecânicas do material. (VASSALO, 2013).

Duxson *et al.* (2005 apud VASSALO, 2013) realizaram análises em função das razões de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e relataram que os geopolímeros possuem melhores propriedades para razões entre 3,0 e 3,8 visto que alterações nessas proporções

resultaram em sistemas com baixa resistência. Porém, os autores ressaltam que os valores são válidos apenas para o metacaulim, e que outros materiais devem ter suas razões específicas estabelecidas.

Ainda sobre a ativação do metacaulim, em sistemas produzidos com maior teor de Si, as estruturas formadas são do tipo poli(sialato-siloxo) e poli(sialato-disiloxo), apresentando geopolímeros mais rígidos e com maiores resistências. Avaliando os teores de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ em diferentes quantidades, comprovou-se que a maior concentração de Si promoveu amostras mais homogêneas do que aquelas com baixo teor de Si, que apresentaram a presença de grãos, ou seja, materiais possivelmente não reagidos. (SILVA *et al.*, 2007 apud VASSALO, 2013).

4.3.1 Matéria prima

Os geopolímeros podem ser fabricados com uma gama de materiais distintos, como já foi mencionado. Sabe-se que qualquer material composto de sílica e alumina pode ser ativado alcalinamente, entretanto, a maioria dos estudos concentram-se em matérias primas como escória de alto forno, metacaulim, cinzas volantes, argilas cauliníticas e lama vermelha. (LI; SUN; LI, 2010). Neste estudo, será trabalhada a ativação alcalina do metacaulim, produto obtido através da calcinação do caulim.

A caulinita é o principal mineral de argila constituinte do caulim, sendo caracterizada estruturalmente pela justaposição de duas lâminas T-O (tetraédrica de silício e octaédrica de alumínio). O alumínio da lâmina octaédrica está em coordenação com dois átomos de oxigênio e quatro hidroxilos OH, apresentando comportamento estável. Ao aquecer o caulim durante algumas horas acontece a desidroxilação, isto é, a perda dos hidroxilos OH que se agrupam dois a dois, liberando uma molécula de água e deixando no seu lugar um oxigênio. Concomitantemente ocorre a alteração da coordenação do alumínio, que passa a tetraédrica (maioria) e pentaédrica (parcial). A transformação do caulim em metacaulim torna o material muito mais reativo. (PINTO, 2004). O metacaulim obtido pode apresentar diferentes graus de finura, superfície específica e variação na coloração, dependendo da composição química e mineralógica do caulim base. (VASSALO, 2013).

Para promover a desidroxilação do caulim a temperatura deve ser acima dos 600 e abaixo dos 950°C, pois até os 500°C a reação é reversível, ou seja, é possível obter de novo a hidratação do caulim se for adicionada água. (DAVIDOVITS, 1999 apud PINTO, 2004).

Em temperaturas inferiores a 600°C a geopolimerização não é obtida de modo satisfatório devido a um déficit de coordenação IV e V do alumínio e para temperaturas em torno dos 950°C começam a se verificar fases de cristalização, que modificam significativamente o caráter amorfo do material e logo seu potencial de combinação química. (GRANIZO, 1998 apud PINTO, 2004).

Outro fato relevante que deve ser levado em consideração na escolha da fonte precursora está relacionado ao tamanho médio das partículas. Quanto mais finas e com elevada área superficial, maior será a dissolução dos aluminossilicatos, tornando o processo de geopolimerização mais eficiente e gerando estruturas mais densas e resistentes. (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007 apud ALVARENGA, 2018).

4.3.2 Ativadores

O processo de ativação alcalina consiste na liberação dos elementos Si e Al. Para que haja a formação e estabilização de uma nova estrutura é necessário um meio fortemente alcalino capaz de dissolver certa quantidade de sílica e alumina e hidrolisar a superfície das partículas da matéria prima. Além disso, é necessária também a presença de um cátion, chamados ativadores, para o balanceamento de carga. (SEVERO *et al.*, 2013).

Na obtenção de ligantes geopoliméricos, os ativadores mais utilizados são os hidróxidos de sódio ou potássio, o carbonato de sódio e os silicatos de sódio ou potássio. Os ativadores são classificados como simples, se forem apenas uma base alcalina (hidróxido de sódio ou potássio), e compostos se são formados pela combinação de uma base alcalina com um silicato de sódio ou potássio. O que regula o tipo, a dosagem e a concentração do ativador é o material de partida, pois a composição química e o grau de finura condicionam a reação de ativação. (PINTO, 2004).

Segundo alguns autores, os ativadores alcalinos têm um papel importantíssimo na reação de polimerização, sendo que esta se desenvolve mais rapidamente quando o ativador contém silicatos solúveis em vez de somente

hidróxidos alcalinos. Quando se utiliza silicato associado ao hidróxido, além da reação polimérica ser favorecida, obtém-se um produto com mais Si e maior resistência. (PALOMO *et al.*, 1999; CRIADO *et al.*, 2005 apud TORGAL; JALALI, 2009).

Pinto (2004), estudando a ativação alcalina do metacaulim, relatou que a utilização de uma solução de ativação composta provoca um aumento na resistência mecânica de cerca de 30 para 60 MPa em compressão simples e de 5 para 7 Mpa em tração. Além disso, a conclusão das reações de ativação em temperatura ambiente fica entre os 7 e 10 dias.

Cabe salientar que o tamanho do cátion é uma característica do ativador que afeta a cinética da reação e a formação do geopolímero. O cátion Na^+ , por exemplo, tem um tamanho menor que o K^+ e por isso exhibe formação de pares com menores oligômeros de silicato. Observa-se que quanto maior o tamanho do cátion, mais favorecida é a formação de oligômeros de silicato maiores, na qual o $\text{Al}(\text{OH})^{-4}$ prefere se ligar. Assim, precursores ativados com hidróxido de potássio (KOH) acabam apresentando maior resistência se comparados com os sintetizados a partir de soluções de hidróxido de sódio (NaOH). (PHAIR; VAN DEVENTER, 2002 apud SEVERO *et al.*, 2013).

4.3.3 Cura

A fabricação de geopolímeros envolve diversos parâmetros que têm grande influência nas propriedades químicas e mecânicas dos produtos obtidos, como, por exemplo, temperatura, tempo e umidade durante o processo de cura. Entretanto estes fatores dependem do tipo de matéria prima utilizada na ativação alcalina. (SEVERO *et al.*, 2013).

O efeito que diferentes temperaturas causam sobre as propriedades dos geopolímeros merece destaque durante a síntese destes materiais, pois, apesar de serem curados em temperatura ambiente, se forem submetidos a um aumento adequado de temperatura podem obter uma significativa melhora de suas propriedades. Temperaturas de cura em torno dos 60°C parecem ser as mais favoráveis, porém o tempo de exposição precisa ser controlado. (SEVERO *et al.*, 2013).

Jaarsveld *et al.* (2002) observaram que nos sistemas metacaulim e cinzas a cura a determinada temperatura aumenta a resistência, contudo se a cura

for longa enfraquece a estrutura do material resultando em retração excessiva. (TORGAL; JALALI, 2009, p. 52).

Avaliando o efeito da temperatura (10 a 80°C) e do tempo de cura em um metacaulim ativado com silicato de sódio, Rovnanik (2010 apud VASSALO, 2013) analisou o comportamento do geopolímero no que diz respeito às propriedades mecânicas, distribuição de poros e microestrutura. Seus resultados demonstraram que a temperatura é de fundamental importância, pois temperaturas mais elevadas promoveram um aumento da resistência à compressão em idades iniciais. Entretanto, aos 28 dias de cura foi constatada redução da resistência se comparada com as amostras curadas em temperatura ambiente.

Importa também, inferir sobre o teor de umidade, essencial para o desenvolvimento da resistência dos materiais obtido por ativação alcalina. Deve-se tentar evitar a perda da água de hidratação, pois isso implicaria numa possível retração. (PINTO, 2004). A fim de evitar a perda da integridade microestrutural do produto formado, a umidade relativa deve ser controlada principalmente no início da cura. (SEVERO *et al.*, 2013).

4.4 Cimentos geopoliméricos

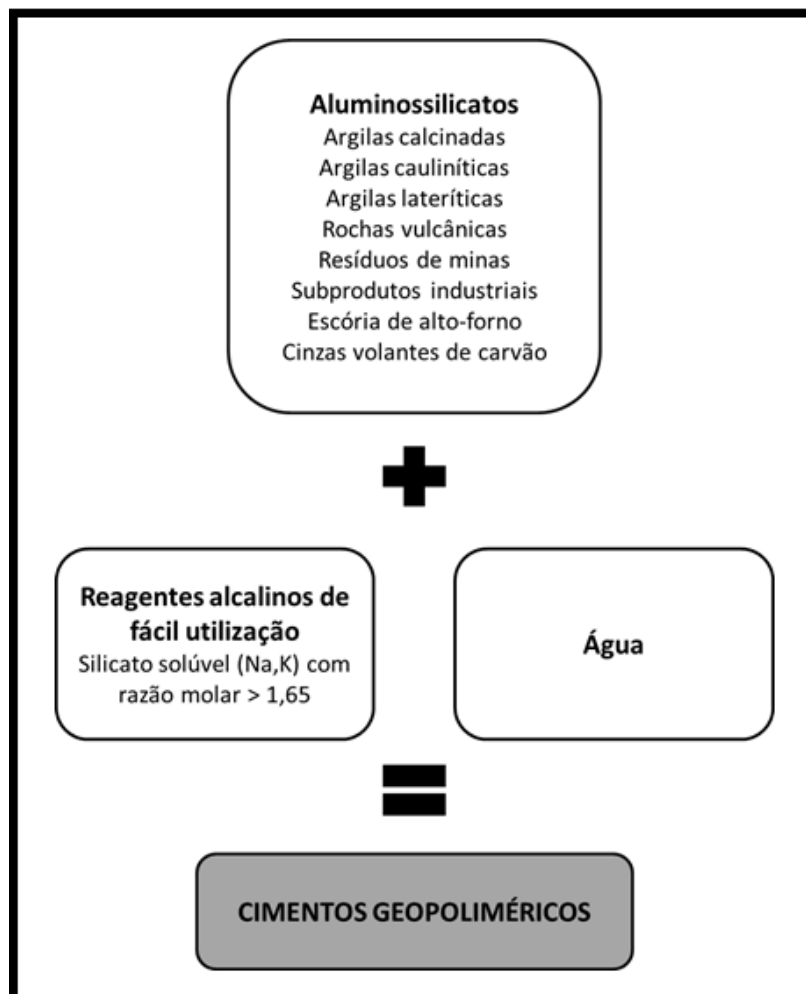
O cimento geopolimérico é um sistema ligante que endurece em temperatura ambiente. Se um composto geopolimérico tiver de ser submetido à cura térmica ele não pode ser chamado de cimento, mas somente de ligante geopolimérico. (DAVIDOVITS, 1991).

O cimento geopolimérico é inovador e constitui uma alternativa ao cimento Portland, pois utiliza materiais naturais minimamente processados ou mesmo subprodutos, como resíduos industriais, reduzindo significativamente as emissões de dióxido de carbono, além de se mostrar altamente resistente e durável comparado com o cimento convencional. (DAVIDOVITS, 2013).

Uma auditoria independente realizada pela Zeobond Pty Ltd, na Austrália, comparou as emissões de dióxido de carbono de ligantes obtidos por ativação alcalina com as emissões do cimento Portland de baixo CO₂ (cimento com substituição parcial por cinzas volantes), observando mesmo assim reduções nos níveis de CO₂ de aproximadamente 80%. (TORGAL; JALALI, 2010).

Sua produção requer um aluminossilicato, um reagente alcalino de fácil utilização (silicatos solúveis de sódio ou potássio com razão molar maior que 1,65) e água. A adição de cátions de cálcio, essencialmente escórias de alto forno, são os responsáveis pelo endurecimento em temperatura ambiente, sendo que os cimentos geopoliméricos curam mais rapidamente que os do tipo Portland, alcançando a maior parte de sua resistência dentro de 24 horas. (DAVIDOVITS, 2013).

Figura 3 – Obtenção de cimentos geopoliméricos



Fonte: Adaptado de DAVIDOVITS (2013).

Conforme o material precursor utilizado, desenvolvem-se diferentes tipos de cimentos geopoliméricos, dentre os quais se podem citar: cimento à base de escória, composto por metacaulim + escória de alto forno + silicato alcalino; cimento à base de rocha, onde há a substituição de parte do metacaulim por tufos vulcânicos selecionados, gerando melhores propriedades e menores emissões de CO₂ do que os à base de escória; cimento à base de ferrossialato, semelhante ao de rocha, mas

envolvendo elementos geológicos com alto teor de óxido de ferro. (DAVIDOVITS, 2013).

4.5 Geopolímeros porosos

Os geopolímeros têm despertado muito o interesse de pesquisadores por se mostrarem amplamente utilizáveis e mais sustentáveis que o cimento Portland. Esse interesse pode ser observado com o aumento significativo de estudos e publicações a respeito de materiais geopoliméricos, porém, no que diz respeito à linha específica de geopolímeros porosos, ainda há poucas informações sobre eles. (BAI; COLOMBO, 2018).

Geopolímeros porosos são materiais que possuem baixas condutividades térmicas, sendo capazes de resistir a elevadas temperaturas, além de baixas densidades e boas propriedades de isolamento acústico, o que os torna uma alternativa aos concretos celulares utilizados na construção civil. (ZHANG *et al.*, 2014; BERNAL *et al.*, 2011 apud KORF, 2019).

Alguns autores afirmam que todos os geopolímeros são porosos, porém outros dizem que esta é uma micro porosidade, que pode ser obtida pelo simples ajuste na formulação e processamento dos materiais precursores. Entretanto, alguns trabalhos estão sendo desenvolvidos com a finalidade de introduzir propositalmente uma macro porosidade na matriz geopolimérica. (ALVES, 2018).

Desta maneira, geopolímeros porosos, ou espumas geopoliméricas como também são chamados, são obtidos pela introdução de um agente espumante (surfactante) na matriz, gerando uma estrutura celular de baixa densidade. (PAPA, 2011 apud SANTOS, 2017). A espumação tem como objetivo introduzir um grande número de vazios individuais (células fechadas) ou redes interconectadas de vazios (células abertas) dentro do geopolímero. Tais vazios podem ser produzidos pela introdução de um volume grande de bolhas de ar ou pela geração endógena de gás, onde agentes liberadores de gás são misturados à pasta geopolimérica. (TSAOUSI *et al.*, 2019).

Quando as espumas geopoliméricas são produzidas pela introdução volumétrica de bolhas de ar, normalmente isso ocorre com o uso de agentes orgânicos, como detergentes, resinas de cola, saponina e proteínas hidrolisadas. (ABDULLAH *et al.*, 2012 apud SANTOS, 2017). Já nas formulações onde há a

geração endógena de gás, os agentes mais utilizados são os pós de alumínio e silício metálico e soluções de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). (ZHANG *et al.*, 2014 apud SANTOS, 2017).

Na síntese de geopolímeros porosos que utilizam os pós de metais como agente surfactante, existe uma reação desses pós com a água e o hidróxido em ambiente alcalino, o que ocasiona a liberação de bolhas de gás hidrogênio. Já nos materiais sintetizados com o peróxido de hidrogênio acontece a decomposição da solução em água e oxigênio gasoso, sendo este último o responsável pela geração das bolhas. (TSAOUSI *et al.*, 2019).

Segundo Atkins (2004), o peróxido de hidrogênio, sofre uma decomposição bem lenta em condições ambientes, formando o gás oxigênio e a água, porém alguns elementos químicos podem acelerar esta reação funcionando como catalisadores, a reação que ocorre na presença de um catalisador é chamada de catálise. [...] Alguns elementos presentes na composição dos geopolímeros como o Al_2O_3 , K_2O , Fe entre outros funcionam como catalisadores do H_2O_2 e com isso a formação de bolhas nos geopolímeros acontece logo nos primeiros minutos da cura. (ALVES, 2018, p. 43).

A introdução de agentes surfactantes na matriz geopolimérica gera uma distribuição de macro poros modificando a densidade do material, que diminui à medida que se aumenta a quantidade de surfactante adicionado. Porém, essa densidade não muda significativamente depois de excedida certa quantidade de agente formador de poros, devido ao fenômeno de coalescência. O pó de alumínio, a partir de certa concentração, apresenta tendência ao colapso dos poros, produzindo poros grosseiros e não uniformemente distribuídos. Do mesmo modo, se adicionado em quantidades elevadas, o peróxido de hidrogênio também fica sujeito a coalescência. (SILVA, 2019).

Além disso, de acordo com Ramamurthy, Nambiar e Ranjani (2009 apud SANTOS, 2017) a distribuição dos poros no geopolímero também é afetada pelo grau de finura do material precursor. Materiais que possuem partículas mais finas geram espumas geopoliméricas com distribuição mais uniforme dos poros.

Outro fator que merece destaque é o tamanho dos poros formados, pois exerce mudanças significativas sobre a resistência à compressão dos geopolímeros. Para uma dada porosidade total, uma diminuição no tamanho dos poros leva a um aumento linear da resistência. (SCHEFFLER; COLOMBO, 2006; LIU, 1997 apud BAI; COLOMBO, 2018). Materiais geopoliméricos com 61% de porosidade apresentaram 7,8 MPa de resistência à compressão para um tamanho médio dos

poros de 266 μm e apenas 3,7 MPa de resistência quando o tamanho médio dos poros era de 609 μm . (ESMAILY; NURANIAN, 2012 apud BAI; COLOMBO, 2018). Palmero *et al.* (2015 apud ALVES, 2018) investigaram também a resistência à flexão de geopolímeros porosos a base de metacaulim, obtendo resultados de 0,6 MPa a 0,4 MPa para porosidades variando entre 56 e 75%.

Novais *et al.* (2016a), em estudo utilizando metacaulim com adição de cinzas volantes e peróxido de hidrogênio, destacam que a quantidade de agente espumante incorporada ao geopolímero controla o número, o volume e a área dos poros. Quanto maior a quantidade de H_2O_2 adicionada à matriz, maior será a porosidade total e a absorção de água e menor será a condutividade térmica e a densidade aparente do material.

Segundo Nguyen *et al.* (2017 apud SILVA, 2019) o aumento do volume de poros leva a diminuição da densidade do material, o que ocasiona a redução da resistência a compressão. Isso acontece devido há uma redução nas ligações, pois quanto mais poros, menor é a quantidade de pasta geopolimérica, o que aumenta a probabilidade de ocorrência de um colapso sob a aplicação de carga. Entretanto, o nível de porosidade pode ser controlado pela quantidade de agente espumante adicionada ao geopolímero, sendo possível sintonizar as propriedades térmicas, físicas e mecânicas desejadas de acordo com a aplicação do material. (NOVAIS *et al.*, 2016a).

Alguns estudos são relatados, demonstrando as propriedades obtidas em função das quantidades de agente surfactante incorporado à matriz geopolimérica, são eles:

- Geopolímero produzido à base de vidro sódico (perlita) onde houve a incorporação de uma solução de H_2O_2 a 30%, variando as porcentagens de adição de 0,6 a 2,9%. Para a adição de 2% de peróxido de hidrogênio, o geopolímero apresentou condutividade térmica de 0,03 W/m.K. (VAOU; PANIAS, 2010 apud ALVES, 2018).
- Geopolímero sintetizado utilizando 2/3 de metacaulim e 1/3 de cinza volante de biomassa, sendo utilizado como agente espumante uma solução de H_2O_2 a 3%, variando as porcentagens de adição de 0,03 a 1,2%. O material apresentou condutividade térmica de 0,107 W/m.K e resistência à compressão de 1,23 MPa. (NOVAIS *et al.*, 2016a).

- Geopolímero elaborado com 100 g de cinza volante, 80 g de silicato de sódio e 6 g de peróxido de hidrogênio, submetido à cura a 55°C. Apresentou porosidade de 79,9%, condutividade térmica de 0,08 W/m.K e resistência à compressão de 0,82 MPa. (FENG *et al.*, 2015 apud ALVES, 2018).

Portanto, é possível constatar que, assim como nos geopolímeros convencionais, os geopolímeros porosos têm suas propriedades afetadas por diversos fatores, que vão desde a dimensão e disposição dos vazios até a escolha dos materiais precursores, agente surfactante, métodos de produção e processo de cura.

4.6 Aplicações

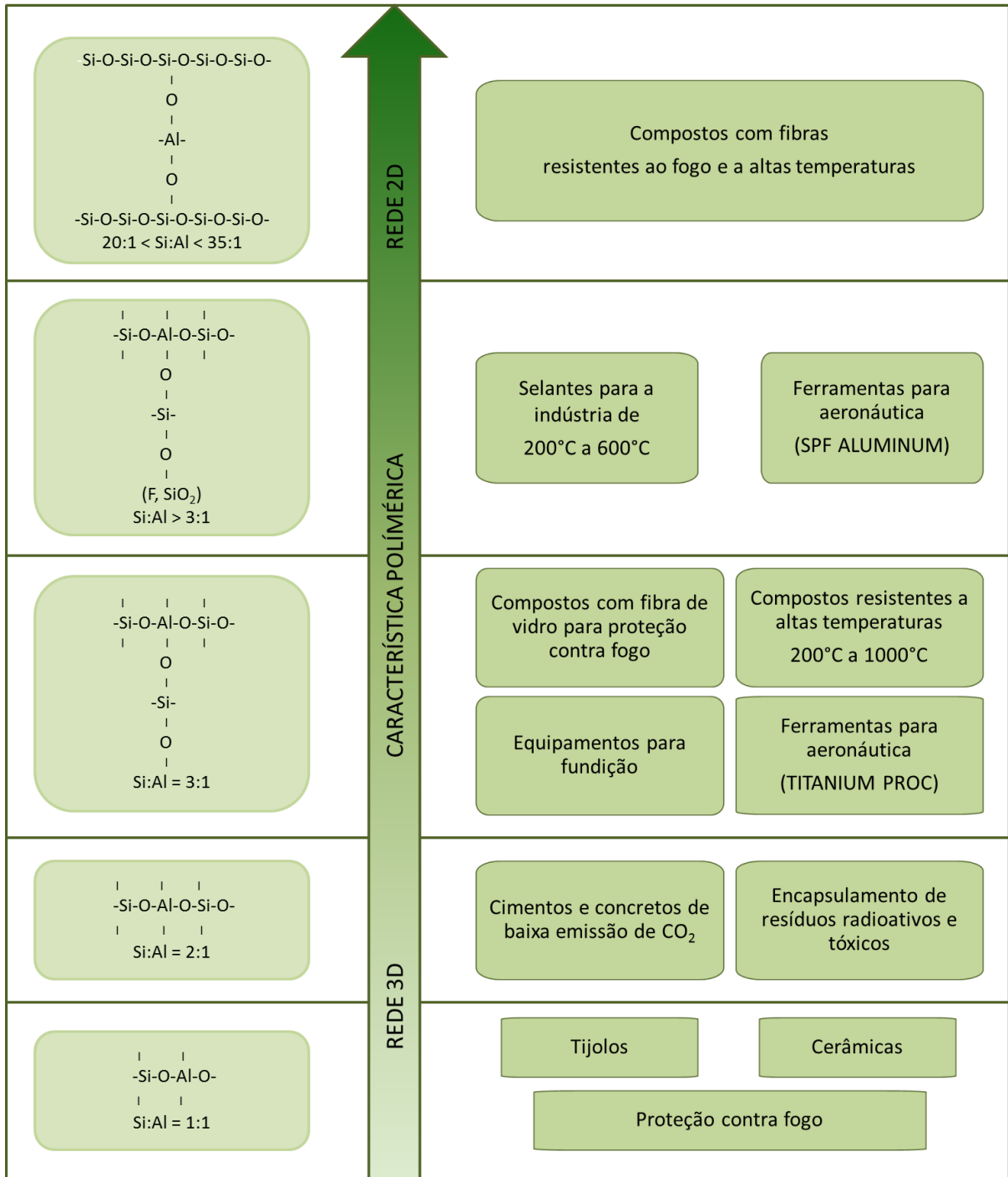
Assim como o cimento Portland, os geopolímeros são materiais de grande versatilidade, encontrando aplicações em diversos setores da indústria. Isso acontece pelo fato de apresentarem alta resistência mecânica, resistência ao gelo-degelo, elevada inércia química e excelente comportamento a altas temperaturas. Além disso, sua estrutura de natureza similar aos zeólitos confere-lhe a capacidade de imobilização de resíduos tóxicos como os metais pesados e até mesmo materiais radioativos. (KUNZE *et al.*, 1999 apud PINTO 2004).

As propriedades dos geopolímeros dependem da sua estrutura química, que é comandada pela razão Si/Al. Sendo assim os materiais produzidos podem ser resumidamente divididos em duas linhas, conforme o tipo de aplicação. A primeira referente a materiais de baixo custo para utilização em grande escala, como materiais de construção. Nesta linha as matérias primas base podem ser metacaulins, escórias granuladas, cinzas volantes e geralmente todos os aluminossilicatos em que a razão atômica Si/Al varie de 1 a 3. A segunda linha caracteriza-se por materiais mais sofisticados, onde a razão atômica é mais elevada, podendo alcançar valores até 35, admitindo a incorporação de fibras, por exemplo, carbono e vidro. (PINTO, 2004).

Davidovits (2002) elenca diversos usos dos geopolímeros, dentre eles estão painéis de madeira revestidos resistentes ao fogo, painéis e paredes isolantes, artefatos decorativos, painéis de espuma expandida de geopolímero para isolamento térmico, ladrilhos cerâmicos, tijolos, itens refratários, reparação e reforço de infraestruturas, itens à prova de fogo para aeronaves e automóveis, resinas de alta

tecnologia, concreto e materiais para construção, equipamentos e ferramentas para fundição, entre outros. O autor demonstra de maneira simplificada, através do esquema a seguir, a divisão destes materiais conforme a relação Si:Al.

Figura 4 – Tipos de materiais geopoliméricos em função da relação Si:Al



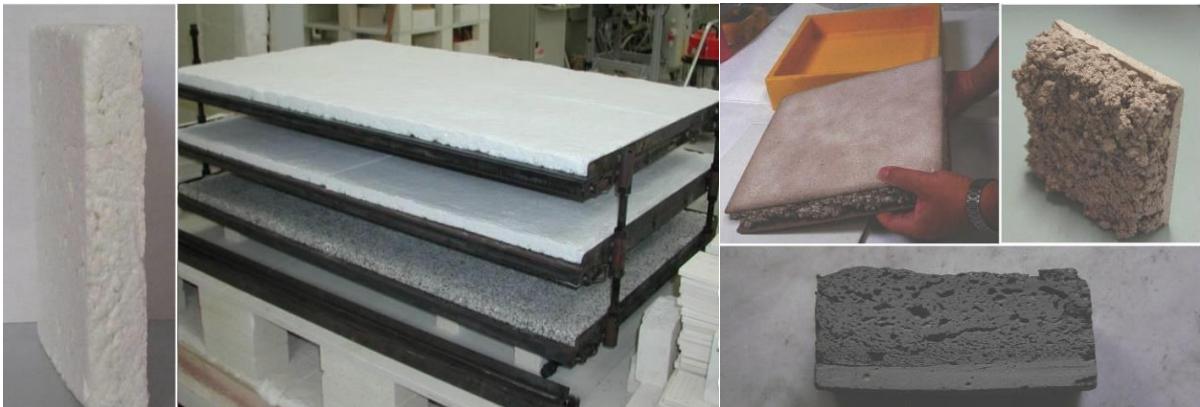
Fonte: Adaptado de DAVIDOVITS (2002).

Assim como os geopolímeros, as espumas geopoliméricas ou geopolímeros porosos, também possuem ampla diversidade de aplicações. Devido às suas propriedades como alta permeabilidade, alto índice de refração, boas características de isolamento, resistência química e mecânica, há a possibilidade destes materiais serem aplicados para muitas funções, como filtros de gás quente, em processos de separação sólido/líquido, como suporte de catalisadores e isoladores térmicos. (CILLA; COLOMBO; MORELLI, 2013 apud SANTOS, 2017).

Novais *et al.* (2016b) e Tang *et al.* (2015) em seus estudos, aplicam espumas geopoliméricas para a retenção de metais pesados, obtendo bons resultados e relatando que elas podem ser usadas satisfatoriamente para o tratamento de águas residuais de indústrias. Além disso, Zhang *et al.* (2014, 2015 apud SANTOS, 2017) sugerem que os geopolímeros porosos podem ser usados na construção de edifícios que necessitam de aporte a altas temperaturas ou resistência ao fogo. Os mesmos autores relatam que o uso desses materiais no lugar de placas e painéis térmicos convencionais promoveu 23% de aumento no isolamento térmico de paredes de tijolos.

Na Itália foram desenvolvidos painéis estruturais para isolamento térmico e acústico, os mesmos foram confeccionados com espumas geopoliméricas compostas de metacaulim e resíduos de subprodutos industriais, e possuem 3 MPa de resistência à flexão (MEDRI, 2015 apud SANTOS, 2017, p. 61).

Figura 5 – Painéis estruturais para isolamento térmico e acústico



Fonte: MEDRI (2015 apud SANTOS, 2017).

Como é possível perceber, existe uma infinidade de possíveis aplicações aos geopolímeros, sejam eles porosos ou não, basta que se faça a adequada dosagem de seus materiais precursores a fim de obter as propriedades necessárias a cada uso.

5 METODOLOGIA

Conforme os objetivos propostos neste trabalho foram realizados ensaios em laboratório visando avaliar propriedades físicas e mecânicas de um geopolímero de metacaulim, bem como a influência que a adição de um agente espumante tem sobre estas propriedades. Como não existem normas específicas para a caracterização dos geopolímeros, os ensaios tiveram como base as informações contidas na literatura, bem como as normas vigentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para argamassas de cimento tipo Portland.

Foram produzidos quatro geopolímeros a serem ensaiados, o primeiro deles sem a adição de agente espumante, servindo assim como referência para a avaliação das modificações em suas propriedades. Os demais foram confeccionados substituindo-se uma porcentagem da solução ativadora por uma solução de agente espumante, a fim de que a relação sólido/líquido se mantivesse constante. As porcentagens de substituição foram estabelecidas em 4, 7 e 10%.

5.1 Considerações iniciais e materiais

Primeiramente foram definidos os materiais a serem utilizados e suas respectivas proporções para a formulação das pastas geopoliméricas, as quais posteriormente foram moldadas, curadas e submetidas aos ensaios. Os materiais selecionados foram o metacaulim, solução alcalina de hidróxido de potássio e como agente espumante o peróxido de hidrogênio.

Em análise preliminar, baseada no estudo de Santa (2016), uma amostra foi produzida utilizando 125 ml de solução alcalina e 500 g de metacaulim, no entanto, tal relação sólido/líquido não se mostrou adequada para promover a trabalhabilidade do material, inviabilizando a moldagem das amostras. Desta forma, optou-se por adicionar solução até que o material apresentasse consistência e trabalhabilidade suficientes para a confecção dos corpos de prova, o que resultou na definição do uso de 625 ml de solução alcalina para ativar 1 kg de metacaulim. Tais valores representam uma relação água/precursor de aproximadamente 0,63, o que se caracteriza por ser um pouco acima das relações normalmente empregadas nos geopolímeros. Este fato se deve principalmente pelas limitações dos equipamentos disponíveis para a mistura das matérias primas.

5.1.1 Precursor

A matéria prima fonte de aluminossilicato escolhida para a produção do geopolímero foi o Metacaulim HP Ultra da empresa Metacaulim do Brasil, considerado de alta reatividade, cujas propriedades físicas e químicas estão descritas nas tabelas a seguir.

Tabela 1 – Propriedades físicas

Elemento	Resultado	Valor típico	Valor limite (NBR 15894/2010)
Perda ao fogo	2,3%	2,0%	< 4,0%
Finura (< #325 - 44µm)	7,5%	5,0%	< 10,0%
Área específica (cm ² /g)	216.000	230.000	> 150.000
Massa específica (kg/dm ³)	2,53	2,55	-
Massa unitária (kg/dm ³)	0,68	0,60	-

Fonte: Metacaulim do Brasil Indústria e comércio LTDA (2020).

Tabela 2 – Propriedades químicas

Elemento	Resultado	Valor típico	Valor limite (NBR 15894/2010)
SiO ₂	59,5%	55,5%	44,0% a 65,0%
Al ₂ O ₃	33,5%	36,5%	26,0% a 46,0%
Fe ₂ O ₃	1,5%	2,0%	-
TiO ₂	0,9%	1,0%	-
CaO	0,2%	0,5%	CaO +MgO < 1,5%
MgO	0,3%	0,5%	
K ₂ O	1,4%	1,5%	0,658 K ₂ O + Na ₂ O < 1,5%
Na ₂ O	0,2%	0,1%	< 0,5%
SO ₃	0,2%	0,1%	< 1,0%

Fonte: Metacaulim do Brasil Indústria e comércio LTDA (2020).

Com as informações fornecidas pela empresa é possível verificar que a razão molar entre $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ do metacaulim utilizado corresponde ao valor de 3,01. Este valor é um pouco abaixo dos valores ótimos preconizados por Davidovits (1985 apud SANTA, 2016), que sugere algo entre 3,5 e 4,5. Entretanto, na literatura existem estudos que utilizam valores variando desde 1,14 até 4,95. (SANTA, 2016). Portanto, conclui-se que o valor apresentado neste trabalho é um valor médio razoável para reação de geopolimerização.

5.1.2 Ativador alcalino

O ativador alcalino utilizado para a reação de síntese do geopolímero foi o hidróxido de potássio (KOH) em lentilhas EMSURE[®] do Grupo Merck, de elevada pureza. A escolha se deu baseada em estudos que demonstraram que o tamanho do cátion do ativador influencia a reação e formação do geopolímero. Como visto anteriormente, precursores ativados com KOH tendem a apresentar resistência superior se comparados com aqueles ativados com NaOH, visto que o cátion K^+ tem tamanho maior que o cátion Na^+ , favorecendo as ligações de $\text{Al}(\text{OH})^{-4}$. (PHAIR; VAN DEVENTER, 2002 apud SEVERO *et al.*, 2013).

Para a utilização do ativador é necessário diluí-lo em água e essa diluição é definida através da concentração molar que se deseja alcançar, considerando que o KOH possui massa molar de 56,1056 g/mol. A concentração molar para a solução ativadora foi escolhida com base tanto na literatura estudada, que apresenta em sua maioria concentrações entre 6 e 15 M, como também na disponibilidade de material para a realização dos ensaios. Por tais motivos, a concentração do ativador foi estabelecida em 8 M para todas as diferentes amostras testadas.

A solução alcalina foi preparada com o auxílio de um agitador magnético e com antecedência à sua utilização, para que a mesma estivesse em temperatura ambiente, pois ocorre uma reação exotérmica ao misturar as lentilhas de KOH com água, elevando sua temperatura, o que poderia interferir na ativação do metacaulim. No processo de diluição do hidróxido de potássio utilizou-se água deionizada a fim de evitar a presença de íons indesejáveis nas reações de síntese do geopolímero.

5.1.3 Agente espumante

Como agente incorporador de ar foi utilizado o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) de alta pureza da marca Synth. O mesmo foi preparado em uma solução com concentração de 3% em peso onde, para cada 100 g de solução, foram utilizados 10,35 g de H_2O_2 de teor 29%.

O peróxido de hidrogênio é um composto químico que se apresenta na forma aquosa e é termodinamicamente instável, ou seja, facilmente se decompõe em água produzindo oxigênio, que exerce a função de agente espumante na pasta geopolimérica. (SANTOS, 2017).

5.2 Confeção e moldagem dos corpos de prova

Primeiramente foram preparados os moldes para receberem as pastas geopoliméricas, sendo utilizados três moldes cilíndricos e um molde prismático triplo para cada pasta formulada. Os mesmos foram limpos, montados e receberam uma fina camada de óleo mineral para facilitar a posterior desmoldagem. Os corpos de prova cilíndricos possuem 5 cm de diâmetro x 10 cm de altura e os prismáticos dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

O primeiro geopolímero confeccionado foi o utilizado como referência, ou seja, sem adição de agente espumante. Inicialmente procedeu-se a pesagem do metacaulim em balança de precisão de 0,001 g. Para cada formulação foram utilizados 1,5 kg de metacaulim. Após a pesagem, o mesmo foi transferido para a argamassadeira planetária.

Respeitando a proporção sólido/líquido previamente estabelecida, um total de 937,5 ml de solução alcalina ativadora foi incorporada ao metacaulim. Na sequência, a argamassadeira foi ligada em velocidade baixa durante 10 minutos, até a pasta se tornar homogênea. A moldagem foi realizada logo após, onde a pasta foi transferida em porções para os moldes metálicos e, com o auxílio de espátulas, cada porção foi devidamente acomodada a fim de evitar vazios e descontinuidades nas amostras.

O procedimento padrão definido pela NBR 13279:2005 preconiza o uso de mesa de adensamento para uniformização das amostras, porém optou-se por não utilizá-la, pois isso implicaria na perda das bolhas de ar incorporadas com o uso do agente espumante nas demais amostras, o que iria contra os critérios estabelecidos

para o estudo. Por este motivo, todos os corpos de prova, incluindo os de referência, foram moldados sem o uso da mesa de adensamento para que obedecessem ao mesmo padrão.

As demais pastas geopoliméricas foram preparadas e moldadas seguindo o mesmo roteiro, porém houve a incorporação da solução de peróxido de hidrogênio e agitação por mais 2 minutos antes da moldagem. A seguir é apresentada uma tabela com os materiais e as respectivas quantidades utilizadas em cada preparo.

Tabela 3 – Composição das pastas geopoliméricas

Geopolímero	Metacaulim (g)	Hidróxido de Potássio (ml)	Peróxido de Hidrogênio (ml)
Referência	1500	937,5	-
4% de H ₂ O ₂	1500	900,0	37,5
7% de H ₂ O ₂	1500	871,9	65,6
10% de H ₂ O ₂	1500	843,8	93,7

Fonte: Autora (2020).

Figura 6 – Pasta geopolimérica nos moldes



Fonte: Autora (2020).

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram embalados em filme plástico a fim de evitar a perda excessiva de água durante o processo de cura. Inicialmente a cura foi realizada em estufa com temperatura de 70°C durante 48 horas. Passado este período, as amostras foram desmoldadas, seladas novamente em filme plástico e retornaram à estufa até completar 7 dias de cura. Em seguida, foram retiradas e mantidas em condições ambientes, ainda seladas, até atingir os 28 dias necessários para serem submetidas aos ensaios.

5.3 Ensaios

5.3.1 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

Este ensaio é definido pela NBR 9778:2005, a qual exige que devam ser testadas pelo menos duas amostras com a quantidade mínima de material de 150 centímetros cúbicos (cm³), no caso de argamassas.

Primeiramente as amostras são mantidas em estufa à temperatura de (105 ± 5)°C por um período de 72 horas, em seguida as mesmas são pesadas e é feito o registro da massa da amostra seca (m_s). Após é realizada a saturação, onde os corpos de prova são imersos em água à temperatura de (23 ± 2)°C e mantidos nessa condição também por 72 horas.

A seguir, com o corpo de prova ainda imerso, é feito o registro da massa da amostra imersa (m_i) com o auxílio de uma balança hidrostática.

Por último, retira-se o corpo de prova da imersão e enxuga-o com pano úmido, procedendo à pesagem e registro da sua massa saturada após imersão (m_{sat}). Com os dados obtidos é possível calcular os parâmetros a seguir.

- Absorção de água
Expressa em porcentagem.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

- Índice de vazios
Expresso em porcentagem.

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (3)$$

- Massa específica da amostra seca
Expressa em gramas por centímetro cúbico.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (4)$$

- Massa específica da amostra saturada
Expressa em gramas por centímetro cúbico.

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{sat}}}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (5)$$

- Massa específica real
Expressa em gramas por centímetro cúbico.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (6)$$

5.3.2 Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão axial

Este ensaio é determinado pela NBR 13279:2005, definindo que devem ser ensaiados no mínimo três corpos de prova. Os mesmos são preparados em moldes prismáticos metálicos com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm. As amostras devem permanecer por (48 ± 24) horas nos moldes, sob temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(60 \pm 5)\%$, a seguir devem ser desmoldadas e mantidas nas mesmas condições até a ruptura na idade de 28 dias.

Para a determinação da resistência à tração na flexão, posicionar o corpo de prova em equipamento que garanta a aplicação de uma carga uniforme e sem choque de (50 ± 10) newtons por segundo, lembrando que a face rasada do corpo de prova não deve ficar em contato com os dispositivos de apoio nem com o dispositivo de carga. Aplicar a carga até a ruptura da amostra. A resistência à tração na flexão é calculada segundo a equação:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{40^3} \quad (7)$$

Onde:

R_f é a resistência à tração na flexão, em megapascal;

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;

L é a distância entre os suportes, em milímetros.

Na determinação da resistência à compressão axial são utilizadas as metades dos três corpos de prova do ensaio de flexão. Essas metades são posicionadas em equipamento que garanta a aplicação de uma carga uniforme e sem choque de (500 ± 50) newtons por segundo, e igualmente a face rasada do corpo de prova não deve ficar em contato com os dispositivos de apoio nem com o dispositivo de carga. Aplicar a carga até a ruptura da amostra. A resistência à compressão é calculada segundo a equação:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (8)$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão, em megapascal;

F_c é a carga máxima aplicada, em newtons;

1600 é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga, em milímetros quadrados.

Conforme a norma, o resultado da resistência final é a média da resistência dos três corpos de prova ensaiados à tração na flexão e das seis metades ensaiadas à compressão. Deve-se observar ainda o desvio absoluto máximo, que é a diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afasta da média. O desvio absoluto máximo não deve ser superior a 0,3 MPa para tração na flexão e a 0,5 MPa para compressão, caso haja valores superiores a estes deve ser calculada nova média, desconsiderando os mesmos.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios bem como as considerações e correlações com os dados da literatura.

Algumas dificuldades foram enfrentadas na determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, as quais serão expostas em item a seguir, sendo que na literatura estudada não existem relatos de problemas semelhantes, tornando difícil o estabelecimento de correlações mais precisas com o fato ocorrido.

6.1 Resistências à tração na flexão e à compressão axial

Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão axial foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria. O relatório completo emitido pelo laboratório encontra-se no ANEXO A ao final deste trabalho.

As amostras prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm foram submetidas aos testes de carga conforme descrito no item 5.3.2 da metodologia apresentada, sendo ensaiadas três amostras para cada composição de pasta geopolimérica, as quais forneceram as resistências médias à tração. As duas metades resultantes de cada amostra do ensaio de tração foram ensaiadas à compressão, das quais também se obtiveram as resistências médias. Os dados são apresentados nas Tabelas 4 e 5 a seguir, onde são estabelecidos também o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada amostra em relação à média obtida.

Tabela 4 – Resistências à tração na flexão

Geopolímero	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
Referência	0,70	0,10	13,51
4% de H ₂ O ₂	0,67	0,14	20,27
7% de H ₂ O ₂	0,65	0,05	7,05
10% de H ₂ O ₂	0,90	0,27	29,70

Fonte: Autora (2020).

Tabela 5 – Resistências à compressão axial

Geopolímero	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	2,21	0,36	16,38
4% de H ₂ O ₂	2,85	0,34	11,80
7% de H ₂ O ₂	1,88	0,34	18,31
10% de H ₂ O ₂	1,98	0,27	13,38

Fonte: Autora (2020).

Com os resultados obtidos é possível verificar que as resistências mecânicas representam certa limitação ao uso do material para fins de construção civil, principalmente no que diz respeito à resistência a tração na flexão.

Muitas são as variáveis que influenciam na obtenção de boas propriedades mecânicas e que podem estar relacionadas com as resistências obtidas. Assim como ressalta Santa (2016), entre as principais variáveis que afetam o desempenho do material estão o tipo de matéria prima, as proporções de aluminossilicatos e de material amorfo, a molaridade da solução ativadora, as proporções entre sólido e ativador, a proporção de água, o tempo e a temperatura de cura.

Nos materiais utilizados no estudo é possível que não se tenha alcançado as proporções ótimas de Si/Al, tanto pelo uso único do metacaulim como também de uma solução ativadora simples, contendo apenas hidróxido de potássio. Segundo Komnitsas e Zaharaki (2007 apud SANTA, 2016) quando o metacaulim é utilizado puro tende a enfraquecer a estrutura dos geopolímeros. Além disso, o uso de ativador simples forma uma razão menor entre Si/Al e Na ou K/Al, promovendo uma nucleação mais lenta, já o uso de ativador composto com silicato pode auxiliar na dissolução do silício promovendo maior condensação e resistência mecânica. (SHI; KRIVENKO; ROY, 2006; VAN JAARVELD; VAN DEVENTER; LORENZENI, 1997 apud SANTA, 2016). Xu e Van Deventer (2003 apud SANTA, 2016) relatam aumento de 40 para 50 MPa de resistência com a adição de 2% de silicato na solução ativadora.

Cabe ressaltar também sobre a possibilidade de que haja partículas não reagidas do material precursor, que podem ter ficado aprisionadas na estrutura, ou seja, elas ficam retidas pelo gel durante a precipitação do geopolímero e neste caso o ativador não atinge todas as partículas e não acontece a dissolução completa. O

material não reagido permanece na estrutura apenas como enchimento e, se estiver em grandes proporções, pode enfraquecer a mesma e prejudicar a resistência. (SANTA, 2016).

Outros fatores importantes são as proporções de água e o processo de cura. A água é fundamental no processo, pois é ela que irá auxiliar no carregamento da solução ativadora até as moléculas do sólido. Entretanto, seu excesso pode afetar a geopolimerização causando a formação de poros e a tendência à formação de cristais maiores, o que diminui a área de superfície específica e conseqüentemente reduz a resistência do material. (OLIVIA; SARKER; NIKRAZ, 2008 apud SANTA, 2016). No que diz respeito à cura, temperaturas elevadas promovem a liberação mais rápida da água, comprometendo a completa cimentação e ocasionando trincas na estrutura. (FORSGREN *et al.*, 2011 apud SANTA, 2016). Santos (2017) ressalta que quando ocorre a formação rápida da estrutura rígida os produtos formados são de baixa qualidade.

A respeito da incorporação de peróxido de hidrogênio como agente espumante para obtenção de um geopolímero poroso, Novais *et al.* (2016a) confirma em seu estudo que quanto maior a quantidade de agente surfactante adicionado à matriz geopolimérica, maior será a porosidade e menor será a densidade do material, com conseqüente redução da resistência à compressão. Abdollahnejad *et al.* (2015 apud ALVES, 2018) relatam resistência à compressão entre 3,5 e 4,5 MPa para uma argamassa geopolimérica com adição de 1% de H₂O₂ porém, quando a adição do surfactante foi de 3% a resistência reduziu para 0,3 MPa.

Contudo, Novais *et al.* (2016a) também explica que quando a adição de peróxido de hidrogênio excede um certo valor, a quantidade de oxigênio aumenta muito, causando a coalescência da bolha e abrindo a estrutura ao ambiente, reduzindo assim a expansão e induzindo menores variações na densidade.

Todas essas informações parecem corroborar as possíveis causas de o geopolímero de referência não apresentar elevada resistência, provavelmente devido às condições de sintetização, moldagem e cura a sua estrutura tornou-se enfraquecida. Além disso, as resistências dos geopolímeros em que houve a adição de agente surfactante se mantiveram próximas, pois possivelmente a quantidade de H₂O₂ adicionada já se encontrava em excesso, favorecendo a coalescência na pasta e não causando diferenças significativas na variação das resistências.

6.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, foram seguidas as recomendações da NBR 9778:2005 de acordo com o descrito no item 5.3.1 da metodologia apresentada. No entanto, surgiram algumas dificuldades no decorrer do ensaio.

Em teste preliminar com uma amostra, quando a mesma entrou em contato com a água para fazer a saturação começou a apresentar rachaduras devido à baixa resistência e rápida absorção. Por este motivo, optou-se por deixar os corpos de prova 24 horas em condições ambientes antes de proceder à saturação, para que os mesmos adquirissem umidade lentamente evitando o choque pela imersão e o surgimento de fissuras. Entretanto, mesmo após esse período, as amostras apresentaram algumas fissuras e o desprendimento de alguns pedaços, o que inutilizou um corpo de prova da pasta de referência, um com 4% e um com 7% de adição de peróxido de hidrogênio.

Em virtude das dificuldades elencadas os ensaios foram realizados com 48 horas de imersão e não com 72 horas como é o indicado na norma utilizada como referência. Os resultados obtidos para absorção de água e índice de vazios são apresentados na Tabela 6 e as massas específicas seca, saturada e real na Tabela 7 a seguir.

Tabela 6 – Absorção de água e índice de vazios

Geopolímero	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
Referência	33,98	44,17
4% de H ₂ O ₂	32,12	38,88
7% de H ₂ O ₂	31,88	36,52
10% de H ₂ O ₂	33,55	33,00

Fonte: Autora (2020).

Tabela 7 – Massas específicas

Geopolímero	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)
Referência	1,30	1,74	2,33
4% de H ₂ O ₂	1,21	1,60	1,98
7% de H ₂ O ₂	1,15	1,51	1,80
10% de H ₂ O ₂	0,98	1,31	1,48

Fonte: Autora (2020).

Como dito anteriormente, não existem relatos semelhantes na literatura sobre as dificuldades enfrentadas com os corpos de prova durante o ensaio, no entanto, acredita-se que esses fatos ocorreram devido aos valores limitados de resistência.

As macroestruturas dos geopolímeros produzidos com as diferentes porcentagens de incorporação de peróxido de hidrogênio podem ser visualizadas na Figura 7. Nota-se a diferença na quantidade e tamanho dos poros conforme há um aumento na porcentagem de H₂O₂ adicionado.

Figura 7 – Macroestrutura dos geopolímeros



Fonte: Autora (2020).

É possível observar através dos resultados de massa específica, que a adição de peróxido de hidrogênio é capaz de promover a redução da densidade do material

e que esta redução é proporcional à quantidade de surfactante introduzido na matriz geopolimérica. A amostra contendo 10% de H_2O_2 apresentou uma densidade 36,5% menor que a amostra de referência. Entretanto, quando são avaliados os valores obtidos para absorção de água e índice de vazios, os resultados não são compatíveis com o esperado. A pouca variação na absorção de água e a diminuição do índice de vazios com o aumento de H_2O_2 incorporado à pasta não condiz com os resultados das massas específicas nem com a macroestrutura do material, onde é possível observar visualmente um aumento na porosidade. Era esperado que o maior teor de peróxido de hidrogênio adicionado conduzisse ao maior índice de vazios e absorção de água, no entanto, o resultado encontrado foi o oposto.

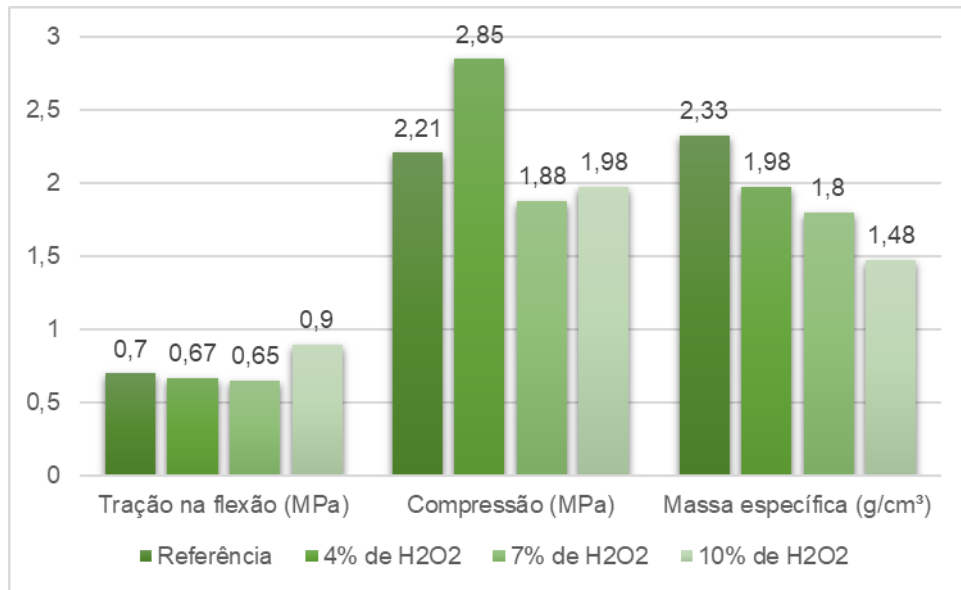
Uma hipótese levantada para explicar a discrepância nos dados se deve ao fato de que as amostras de referência apresentaram mais fissuras que as amostras com 4% de H_2O_2 e estas, por sua vez, mais fissuras do que aquelas com 7%, sendo que os corpos de prova com 10% de agente surfactante foram os que se mantiveram em melhores condições. Portanto, é possível que tenha ocorrido uma absorção maior de água nas amostras que apresentaram mais fissuras, visto que a estrutura interna ficou exposta.

Outro fato que pode estar relacionado aos dados obtidos diz respeito à estrutura porosa, a adição de agente espumante provavelmente favoreceu a formação de uma porosidade fechada, ou seja, sem a interconexão dos poros, o que induz uma menor absorção de água nestes geopolímeros e influencia nos resultados de índice de vazios.

Além disso, o geopolímero de referência provavelmente já possuía alguma porosidade, decorrente tanto da sua síntese como também da ineficiência do adensamento.

Na Figura 8 a seguir há uma representação gráfica, com a finalidade de observar melhor o comportamento dos valores médios de resistência à tração na flexão e à compressão e dos valores obtidos para a massa específica real das amostras, conforme a porcentagem de agente espumante incorporada na matriz geopolimérica.

Figura 8 – Gráfico das resistências mecânicas e da massa específica real



Fonte: Autora (2020).

Observa-se que a variação da massa específica real segue uma sequência decrescente conforme se aumenta a quantidade de solução de peróxido de hidrogênio, o que corrobora a análise visual da macroestrutura apresentada na Figura 7. No entanto, as características mecânicas de resistência à tração e à compressão não seguem a mesma tendência. Mesmo que os valores das tensões sejam bastante próximos, a partir dos resultados obtidos nos ensaios não foi possível estabelecer uma correlação linear entre as propriedades mecânicas e a densidade das amostras.

7 CONCLUSÃO

O estudo possibilitou a produção de um geopolímero a base de metacaulim ativado com solução de hidróxido de potássio de concentração 8 M, onde foram adicionadas diferentes porcentagens de peróxido de hidrogênio como agente formador de poros, a fim de avaliar sua influência sobre as propriedades do material.

Obteve-se para resistências à tração na flexão valores que variaram de 0,65 a 0,90 MPa e para resistências à compressão axial uma faixa de valores de 1,88 a 2,85 MPa. As variações nos resultados foram pequenas para as diferentes adições de H_2O_2 e se mantiveram próximas aos valores do geopolímero de referência, sintetizado sem a adição de agente surfactante.

A incorporação de peróxido de hidrogênio na matriz geopolimérica se mostrou eficiente em promover a redução da densidade do material, chegando a um valor de $1,48 \text{ g/cm}^3$. No entanto, quando avaliados o índice de vazios e a absorção de água, os valores mostraram-se incoerentes com a macroestrutura porosa observada no geopolímero e para a relação direta que possuem com a densidade, apresentando menor índice de vazios para a adição de 10% de H_2O_2 . Portanto, não foi possível chegar a um resultado preciso sobre o índice de vazios, seria necessária uma nova reprodução dos ensaios ou a utilização de outros métodos para a verificação desta característica de forma confiável.

Cabe ressaltar que a caracterização dos geopolímeros nas suas diferentes propriedades seguiu orientações de normas que são aplicadas para argamassas de cimento, devido à falta de normativas específicas para este material. Por esse motivo, é preciso avaliar com cuidado possíveis comparações entre estes diferentes produtos, pois os geopolímeros possuem suas particularidades e uma complexidade na sua produção que ainda está em processo de estudo e evolução.

Contudo, verifica-se que é possível criar um material geopolimérico e a partir dele um geopolímero poroso. É necessário apenas formular as combinações ótimas entre as matérias primas e estabelecer as melhores condições de sintetização que proporcionarão ao produto final as características de desempenho desejadas, sendo assim viável sua aplicação na construção civil para diferentes finalidades.

8 SUGESTÕES PARA TABALHOS FUTUROS

Para a obtenção de produtos geopoliméricos com resistências mecânicas mais elevadas são necessárias algumas adaptações na formulação inicial, desta forma sugere-se que sejam adaptadas as quantidades de sílica da mistura, utilizando uma solução ativadora composta com silicato de sódio, por exemplo, para que a razão Si/Al seja mais eficiente no desenvolvimento da resistência deste material.

Além disso, podem ser utilizadas soluções com diferentes molaridades, diferentes relações de sólido/líquido e teores menores de substituição da solução ativadora pelo agente surfactante.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, Cristiane Bom Conselho Sales. **Síntese e caracterização de geopolímeros à base metacaulim e micropartículas de vidro soda-cal.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- ALVES, Cleidson Rosa. **Propriedades térmicas e mecânicas de geopolímeros aditivados com peróxido de hidrogênio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos** – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos** – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- BAI, Chengying; COLOMBO, Paolo. **Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review.** *Ceramics International*, v. 44, ed. 14, 2018, p. 16103-16118.
- BATTAGIN, Arnaldo Forti. **Uma breve história do cimento Portland.** Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, c2019. Disponível em: <https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>. Acesso em: 25 set. 2019.
- DAVIDOVITS, Joseph. **Geopolymer Cement a review.** *Geopolymer Science and Technics*, Technical Paper 21, Geopolymer Institute Library, 2013. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/library/technical-papers/>. Acesso em: 2 set. 2019.
- DAVIDOVITS, Joseph. **Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materials.** *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, 1991, p. 1633-1656.
- DAVIDOVITS, Joseph. **Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement.** *Journal of Materials Education*, Vol. 16 (2&3), 1994, p. 91-139.
- DAVIDOVITS, Joseph. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications** – Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer Conference, Melbourne, Australia, 2002. Disponível em: https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/30YearsGEOP.pdf. Acesso em: 2 set. 2019.
- FREIRE, Diego. **Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO₂.** Agência FAPESP. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://agencia.fapesp.br/>

especialistas-discutem-papel-da-industria-do-cimento-nas-emissoes-de-co2/23449/. Acesso em: 4 nov. 2019.

HARDJITO, D. *et al.* **Brief review of development of geopolymer concrete.** George Hoff Symposium, American Concrete Institute, Las Vegas, 2004. Disponível em: http://portfolio.petra.ac.id/user_files/10-002/Paper%20to%20George%20Hoff%20Symposium.pdf. Acesso em: 5 out 2019.

KORF, Edgar Munaretto. **Avaliação das propriedades de um material geopolimérico espumígeno desenvolvido com diferentes tipos de metacaulim.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade Meridional, Passo Fundo, 2019.

KRIVENKO, P. **Why Alkaline Activation** – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. *Journal of Ceramic Science and Technology*, v. 8, nº 3, 2017, p. 323-334.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. **The comparison between álcali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements.** *Cement and Concrete Research*, v. 40, ed. 9, 2010, p. 1341-1349.

NOVAIS, Rui M. *et al.* **Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity.** *Journal of Cleaner Production*, v. 119, 2016a, p. 99-107.

NOVAIS, Rui M. *et al.* **Novel porous fly-ash containing geopolymer monoliths for leadadsorption from wastewaters.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 318, 2016b, p. 631-640.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. **Alkali-activate fly ashes: A cement for the future.** *Cement and Concrete Research*, v. 29, 1999, p. 1323-1329.

PINTO, Amândio Teixeira. **Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Portugal, 2004.

SANTA, Rozineide Aparecida Antunes Boca. **Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANTOS, Fabiana Marciana Abreu. **Estudo de espumas geopoliméricas obtidas com adições de silício metálico, alumínio metálico e peróxido de hidrogênio.** Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SEVERO, C.G.S. *et al.* **Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente.** *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 8.2, 2013, p. 55-67. Disponível em: <<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/334/276>>. Acesso em: 29 set. 2019.

SILVA, Juliane Valadares e. **Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrogênio**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

TANG, Qing *et al.* **Preparation and characterization of porous metakaolin-based inorganic polymer spheres as an adsorbent**. *Materials and Design*, v. 88, 2015, p. 1244-1249.

TORGAL, F.P.; CASTRO-GOMES, J.P.; JALALI, S. **Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ambiental ao cimento Portland no contexto da economia do carbono**. *Betão: revista da APEB*, 2005. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/4590>>. Acesso em: 29 set. 2019.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. **Ligantes obtidos por activação alcalina**. Universidade do Minho, Guimarães: TecMinho, 2009.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. **Ligantes obtidos por activação alcalina**. Parte 2 – Benefícios ambientais. *Revista Engenharia Civil*, v.37, 2010, p. 63-72.

TSAOUSI, G. M. *et al.* **Development of lightweight insulating building materials from perlite wastes**. *Materiales de Construcción*, v. 69, n. 333, 2019.

VASSALO, Érica Antunes de Souza. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ANEXO A – Relatório de resistências

Enviado pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria.

ARGAMASSA – REF 1:600						
Exemplar	Carga de Ruptura à Flexão (N)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Carga de Ruptura à Compressão (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistências médias calculadas (MPa)	
					Tração na Flexão	Compressão
1	301	0,70	2.400	1,50	0,7	2,2
			3.900	2,44		
2	259	0,61	3.600	2,25		
			3.700	2,31		
3	342	0,80	4.000	2,50		
			3.600	2,25		
Desvio-padrão (MPa):		0,1	Desvio-padrão (MPa):		0,4	<ul style="list-style-type: none"> • Data de ensaios: 09 / 09 / 2020 • Teor de umidade na mistura: - - - • Índice de consistência: - - -
Desvio absoluto máximo (MPa):		0,1	Desvio absoluto máximo (MPa):		0,7	
Coeficiente de variação (%):		13,7	Coeficiente de variação (%):		16,4	

ARGAMASSA – 4% 1:600						
Exemplar	Carga de Ruptura à Flexão (N)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Carga de Ruptura à Compressão (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistências médias calculadas (MPa)	
					Tração na Flexão	Compressão
1	355	0,83	5.300	3,31	0,7	2,8
			4.200	2,63		
2	259	0,61	4.400	2,75		
			4.400	2,75		
3	246	0,58	3.900	2,44		
			5.100	3,19		
Desvio-padrão (MPa):		0,1	Desvio-padrão (MPa):		0,3	<ul style="list-style-type: none"> • Data de ensaios: 11 / 09 / 2020 • Teor de umidade na mistura: - - - • Índice de consistência: - - -
Desvio absoluto máximo (MPa):		0,2	Desvio absoluto máximo (MPa):		0,4	
Coeficiente de variação (%):		20,9	Coeficiente de variação (%):		11,9	

ARGAMASSA – 7% 1:600						
Exemplar	Carga de Ruptura à Flexão (N)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Carga de Ruptura à Compressão (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistências médias calculadas (MPa)	
					Tração na Flexão	Compressão
1	301	0,70	3.400	2,13	0,7	1,9
			3.900	2,44		
2	273	0,64	2.800	1,75		
			2.800	1,75		
3	259	0,61	2.400	1,50		
			2.700	1,69		
Desvio-padrão (MPa):		0,0	Desvio-padrão (MPa):		0,3	<ul style="list-style-type: none"> • Data de ensaios: 11 / 09 / 2020 • Teor de umidade na mistura: - - - • Índice de consistência: - - -
Desvio absoluto máximo (MPa):		0,1	Desvio absoluto máximo (MPa):		0,4	
Coeficiente de variação (%):		7,6	Coeficiente de variação (%):		18,3	

ARGAMASSA – 10% 1:600						
Exemplar	Carga de Ruptura à Flexão (N)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Carga de Ruptura à Compressão (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistências médias calculadas (MPa)	
					Tração na Flexão	Compressão
1	287	0,67	3.000	1,88	0,9	2,0
			3.400	2,13		
2	355	0,83	2.800	1,75		
			3.100	1,94		
3	506	1,19	2.800	1,75		
			3.900	2,44		
Desvio-padrão (MPa):		0,3	Desvio-padrão (MPa):		0,3	<ul style="list-style-type: none"> • Data de ensaios: 09 / 09 / 2020 • Teor de umidade na mistura: - - - • Índice de consistência: - - -
Desvio absoluto máximo (MPa):		0,3	Desvio absoluto máximo (MPa):		0,3	
Coeficiente de variação (%):		29,3	Coeficiente de variação (%):		13,3	