

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Especialização em Construção Civil

**ESTUDO DE ESPUMAS GEOPOLIMÉRICAS OBTIDAS
COM ADIÇÕES DE SILÍCIO METÁLICO, ALUMÍNIO
METÁLICO E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**

Aluna: Fabiana Marciana Abreu Santos

Orientadora: Professora Maria Teresa Paulino Aguilár

**Belo Horizonte,
Outubro/ 2017**

FABIANA MARCIANA ABREU SANTOS

**ESTUDO DE ESPUMAS GEOPOLIMÉRICAS OBTIDAS
COM ADIÇÕES DE SILÍCIO METÁLICO, ALUMÍNIO
METÁLICO E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Especialização em Construção Civil do departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

**Orientadora: Professora Maria Teresa Paulino
Aguilar**

**Belo Horizonte,
Outubro/ 2017**

S237e

Santos, Fabiana Marciana Abreu.

Estudo de espumas geopoliméricas obtidas com adições de silício metálico, alumínio metálico e peróxido de hidrogênio [manuscrito] / Fabiana Marciana Abreu Santos. - 2017

96 f., enc.: il.

Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguilár.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Inclui bibliografia.

1. Construção civil. 2. Cimento. 3. Agentes ativos de superfícies. 4. Porosidade. I. Aguilár, Maria Teresa Paulino. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691

Dedico à minha avó Sebastiana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a força que preciso para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, que me apoiaram para eu concluir meus estudos.

Aos professores e coordenadores do curso de especialização da UFMG, por transmitirem seus conhecimentos com tanta destreza e entusiasmo dedicando parte do seu tempo a nós alunos.

Em especial a Professora Maria Teresa Paulino Aguilar, por ser um exemplo de ser humano a ser seguido, por ter conseguido “plantar” a semente do princípio da sustentabilidade em nossas vidas e por me orientar neste trabalho.

A secretária do curso Ariela Monteiro, que sempre foi prestativa em nos auxiliar.

A Mestre Dayana Keitty Carmo Gonçalves e a mestranda Juliane Valadares Silva, que contribuíram e redigiram comigo o trabalho prógono (Artigo: Análise macroestrutural de espumas geopolimérica obtida com adições de silício metálico, alumínio metálico e peróxido de hidrogênio) que resultou na presente monografia.

Ao senhor Eduardo Albuquerque da Empresa Ferro Ligas Brasil pela doação do silício metálico.

“Dê-me uma alavanca e um ponto de apoio e levantarei o mundo”

Arquimedes de Siracusa (287 a.C. - 212 a.C.)

RESUMO

Uma das preocupações da engenharia civil, atualmente, se refere à emissão de CO₂ e ao consumo de energia que ocorrem durante o processo de produção do cimento Portland, à durabilidade dos concretos e à geração de resíduos de construção e demolição. Dentre as soluções investigadas para amenização destes problemas, destacam-se os cimentos geopoliméricos. Estes cimentos, obtidos da ativação alcalina de aluminossilicatos, podem ser utilizados como materiais estruturais e espumas. As espumas geopoliméricas são utilizadas na imobilização de metais tóxicos, e isolamento térmico acústico. Estas geralmente são obtidas a partir da adição de um agente surfactante na pasta geopolimérica. Neste trabalho se analisou a obtenção de espumas geopoliméricas à temperatura ambiente utilizando como precursor o metacaulim, ativador o KOH e três agentes surfactantes: silício metálico, alumínio metálico e peróxido de hidrogênio, em dois diferentes teores. Analisou-se a resistência mecânica e a densidade do material obtido, a distribuição, dimensões e quantidade dos poros formados em relação ao tipo e às quantidades de surfactante adicionadas. Os resultados mostram que todos os surfactantes são efetivos para produção da espuma geopolimérica. Em todos os casos os poros expandem quantitativamente e dimensionalmente, diminuindo a densidade do material.

Palavras-chave: *cimento geopolimerico, espuma geopolimérica, poros, surfactantes.*

SUMÁRIO

1 Introdução	15
2 Objetivos	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 Revisão Bibliográfica	18
3.1 Geopolímero.....	18
3.1.1 Matéria Prima para Geopolimerização	21
3.1.1.1 Precursor	21
3.1.1.1.1 A importância da calcinação.....	24
3.1.1.1.2 Metacaulim	26
3.1.1.2 Solução Ativadora	27
3.1.2 Síntese da Ativação Alcalina (Geopolimerização).....	32
3.1.3 Estrutura Química dos Geopolímeros	38
3.1.4 Propriedades dos Geopolímeros.....	42
3.1.4.1 Características em comparação a outros materiais	47
3.2 Espuma Geopolimérica (Geopolímero Poroso).....	51
3.2.1 Agentes Surfactantes	54
3.3 Aplicação	56
3.3.1 Relação Al/Si versus aplicação	62
4 Materiais e Métodos	65
4.1 Materiais.....	65
4.2 Métodos.....	65
4.2.1 Caracterização do metacaulim	66
4.2.2 Preparação da solução ativadora hidróxido de potássio - KOH	67
4.2.3 Confecção dos Corpos de Prova.....	67
4.2.4 Caracterização das pastas	69
5 Resultados e Discussão	70
5.1 Densidade	75
5.2 Análise dos poros	77
5.3 Resistência à compressão	80
5.4 Difração de raios X.....	70
5.4.1 Difração de raios X do metacaulim.....	70
5.4.2 Difração de raios X das pastas.....	71

6	Conclusão.....	83
7	Bibliografia	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Edifícios em Bruxelas construídos com cimento de escória ativada alcalinamente: a) Localizado na esquina da Rua Breydel nº 9 e avenida Oudergem nº 15, b) Localizado na rua King Victor Square N ^{os} 12 e 13.....	19
Figura 2: Composição da formulação do compósito geopolimérico.....	21
Figura 3: Dimensão de partículas e escala específica de área de superfície relacionada a materiais.....	23
Figura 4: Temperatura de calcinação versus qualidade do metacalim para geopolimerização.....	26
Figura 5: Viscosidades de soluções de hidróxido alcalino em função da molaridade.	30
Figura 6: Influência dos cátions alcalinos sobre o processo de geopolimerização	32
Figura 7: Fase dos processo de geopolimerização	33
Figura 8: Modelo ativação alcalina de aluminosilicatos/geopolimerização postulado na síntese das zeólitas.	35
Figura 9: Processo e produtos de reação de ativação alcalina de um precursor sólido de aluminosilicato.	37
Figura 10: ConFiguração tetraédrica do siliato Si-O-Al-O.....	40
Figura 11: Estrutura espacial dos geopolímeros - Gráficos moleculares computacionais de poli (sialato) (- Si-O-Al-O) e M (- Si-O-Al-O-Si-O-) poli (sialato-siloxo).	41
Figura 12: Modelo estrutural para Geopolímero de K-Poli (sialato-siloxo).....	41
Figura 13: Modelo Estrutura semi-esquemática para Geopolímero proposta para polímero de Na-polisialato	42
Figura 14: Tempo de cura versus o uso	47
Figura 15: Comparação com materiais existentes com base em geopolímeros.....	48
Figura 16: Comparação da retração entre cimentos confeccionados com argamassa tradicionais e cimento geopoliméricos, em função do tempo.....	49
Figura 17: Comparação da resistência à compressão dentre da argamassa tradicionais CPIIE-32 e CPV-ARI Plus, cimento geopoliméricos Na,K,Ca-PSS, em função da idade em dias.....	49
Figura 18: Comparação da reação álcali-agregado em cimentos geopolimerico e cimento Portland.....	50
Figura 19: Comparação de risco de incêndio entre geopolímero e resinas.....	50

Figura 20: Temperatura máxima de operação para diferentes materiais isolantes	51
Figura 21: Avião de combate francês Rafale	57
Figura 22: Manilhas fabricadas em concreto geopolímero (D=150mm)	57
Figura 23: Aplicação de produtos geopoliméricos de revestimento de concretos deteriorados.....	58
Figura 24: Obras com geopolímeros na Austrália (a) Piso/Laje de habitação residencial, (b) Painéis externos pré-moldados de uma edificação, (c) calçadas e (d) muro de contenção em torno de uma ponte rodoviária. Fonte: PROVIS e BERNAL (2014)	59
Figura 25: a) Visão geral do edifício Global Change Institute, b) Peça pré-moldados de concreto geopolimérico utilizados na construção da edificação.	59
Figura 26: a) Cura do pavimento geopolimérico, b) concretagem finalidade, c) vista geral da pista do aeroporto do BWWA e d) operação do aeroporto BWWA.....	60
Figura 27: Lajotas geopoliméricas - “Geopolfloor”	61
Figura 28: Painéis estruturais e ultraleves repelente de água para isolamento térmico e acústico.....	61
Figura 29: Aplicações em função da relação Si/Al.....	63
Figura 30: Representação esquemática da metodologia dos trabalhos experimentais	66
Figura 31: Amostras a) 1-Ref., b) 1-Si-0,1%,c) 1-Si-1%, d) 1-PH-0,1%, e) 1-PH-1%, f) 1-Al-0,1% e g) 1-Al-1%.	76
Figura 32: Imagem dos poros da amostra referência(1-Ref.)	77
Figura 33: Imagem dos poros a) 1-PH-0,1%,c) 1-PH-1%.....	77
Figura 34: Imagem dos poros, a 1-Si-0,1%,c) 1-Si-1%.....	78
Figura 35: Imagem dos poros, 1-Al-0,1%,c) 1-Al-1%.....	78
Figura 36: Difratoograma do material do Metacaulim (M= Mica e Q= Quartzo).....	71
Figura 37: Difratoograma da amostra de referência (M= Mica e Q= Quartzo).....	72
Figura 38: Difratoograma da amostra com silício metálico 0,01% (M= Mica, P=Plagioclásio e Q= Quartzo).	72
Figura 39: Difratoograma da amostra com silício metálico 0,1% (M= Mica e Q= Quartzo)	73
Figura 40: Difratoograma da amostra com peróxido de hidrogênio 0,01% (M= Mica, P=Plagioclásio e Q= Quartzo).	73
Figura 41: Difratoograma da amostra com peróxido de hidrogênio 0,1% (M= Mica e Q=	

Quartzo).....	74
Figura 42: Difratoograma da amostra com alumínio metálico 0,01% (M= Mica e Q= Quartzo).....	74
Figura 43: Difratoograma da amostra com alumínio metálico 0,1% (M= Mica, P=Plagioclásio e Q= Quartzo).	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores quantitativos de poros das fotos dos CP ^s	80
Gráfico 2 - Resistência à compressão	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Esquema das estruturas moleculares de polissílabos - Nomenclatura Estrutura Química dos Geopolímeros em Relação do Si:Al - Monómeros base de formação dos geopolímeros	39
Tabela 2 - Valores de porções molares proporcionais às fontes de aluminossilicato ...	44
Tabela 3 - Composição química do Metacaulim do Brasil	65
Tabela 4 - Composição dos corpos de prova de espuma geopoliméricas	68
Tabela 5 - Densidade das amostras e relação com a amostra de referência.....	77
Tabela 6 - Dados da leitura dos quantitativos de poros nas fotografias das amostras	78

LISTA DE NOTAÇÕES E ABREVIATURAS

BWWA - Brisbane West Wellcamp

C-A-S-H - Sílico-aluminato de Cálcio Hidratado

CPHIE-32 - Cimento Portland composto com escória

CPV-ARI Plus - Cimento Portland de alta resistência inicial - Plus

CP^{rs} - Corpos de Prova

C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado

DRX - Difração de Raios-X

EUA - Estados Unidos da América

ISO - International Organization for Standardization

M - Mica

N-A-S-H - Aluminossilicato de Sódio Hidratado

PA - Alta Pureza

P - Plagioclásio

Q - Quartzo

Ref. - Amostra de referência

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

1-Al-0,1% - Amostra de espuma geopolimérica com 0,001% de Alumínio metálico

1-Al-1% - Amostra de espuma geopolimérica com 0,01% de Alumínio metálico

1-PH-0,1% - Amostra de espuma geopolimérica com 0,001% de Peróxido de hidrogênio

1-PH-1% - Amostra de espuma geopolimérica com 0,01% de Peróxido de hidrogênio

1-Si-0,1% - Amostra de espuma geopolimérica com 0,001% de Silício metálico

1-Si-1% - Amostra de espuma geopolimérica com 0,001% de Silício metálico

1 Introdução

Um dos isolantes térmicos muito utilizados na construção civil é o Concreto Celular Autoclavado (CCA), constituído basicamente de cimento Portland (FREIRE e BERALDO, 2003). É sabido, que na produção de cimento Portland são emitidos gases do efeito estufa, se utiliza matérias primas não renováveis e se demanda altos níveis de energia (ZHANG, PROVIS, *et al.*, 2014).

Mundialmente são produzidos, aproximadamente, dois bilhões de toneladas/ano de cimento. Esta produção está associada à emissão CO₂, que corresponde de 6 a 7% das emissões totais de CO₂ geradas no planeta (SHIA, JIMÉNEZ e PALOMO, 2011). Assim sendo, pode se dizer que, o cimento é um material que impacta fortemente o meio ambiente.

Para redução desses impactos, se faz necessário a concepção de materiais alternativos, que apresentem propriedades adequadas e causem menor impacto ambiental. Desta forma, existe uma multiplicidade de pesquisas para investigação de materiais de maior durabilidade, por meio da melhoria das propriedades químicas, físicas ou mecânicas, que sejam ambientalmente viáveis (MAURI, DIAS, *et al.*, 2009). Dentre esses materiais, destacam-se os materiais produzidos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos, denominados geopolímeros (FENG, PROVIS, *et al.*, 2012).

Segundo Davidovits (2013), na produção de geopolímeros se emite de 40% a 80-90% menos CO₂ que na fabricação de cimento. A utilização de cinzas volantes e alguns resíduos agrícolas como precursores atribui maior ecoeficiência ao material (FERNANDEZ-JIMÉNEZ, PALOMO e CRIAD, 2004). Além disso, os geopolímeros apresentam excelentes propriedades como resistência à compressão, a flexão, a corrosão, a altas temperaturas, ao choque térmico, ao fogo, ao ataque de agentes químicos, rápido endurecimento, grande durabilidade, boa resistência a ácidos e capacidade de imobilizar metais tóxicos (SEVERO, COSTA, *et al.*, 2013). Haja vista tais características, o geopolímero vem sendo citado por muitos autores como um possível substituto do cimento Portland na construção civil, especialmente no que diz respeito ao uso de espumas geopoliméricas como isolante térmico.

As espumas geopoliméricas são obtidas a partir da mistura de agentes surfactantes na mistura da pasta geopolimérica. Estes agentes tensoativos reagem com os álcalis

presentes na pasta geopolimérica e liberaram gás hidrogênio no composto, os quais são responsáveis pela microestrutura espumosa do material (AGUILAR, DÍAZ e GARCÍA, 2010). Neste contexto, o presente trabalho estuda a síntese de três espumas geopoliméricas obtidas a partir de diferentes agentes surfactantes.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é estudar a síntese de espumas geopoliméricas obtidas com adições de silício metálico, alumínio metálico e peróxido de hidrogênio.

2.2 Objetivos Específicos

- Sintetizar a pasta geopolimérica de referência.
- Sintetizar espumas geopoliméricas utilizando diferentes surfactantes (alumínio e silício metálico e peróxido de hidrogênio).
- Caracterizar quanto à resistência à compressão as pastas geopoliméricas com e sem surfactantes.
- Caracterizar macroestruturalmente as pastas geopoliméricas com e sem surfactantes.

3 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica desse trabalho apresentará uma síntese sobre o tema em estudo. Na qual estão incluso os conceitos e características sobre o compósito geopolimérico, processo de geopolimerização, espumas geopoliméricas e agentes surfactantes.

3.1 Geopolímero

Os materiais ativados alcalinamente e os geopolímeros são novos aglutinantes obtidos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos e estão sendo discutidos como alternativa ao cimento Portland (PROVIS e BERNAL, 2014). Segundo Provis e Van Deventer (2009) o geopolímero pode ser definido como um material sólido e estável formado da ativação alcalina de um precursor (pó rico em aluminossilicato) e por um ativador (hidróxido alcalino ou silicato alcalino).

Estudo apontam que, o uso de álcalis como componente de materiais cimentícios vem sendo aplicado na construção civil no transcorrer do último centúria. Em 1908, por exemplo, o engenheiro alemão Kühl patenteou (KUEHL, 1908) um cimento que foi produzido a partir da reação de uma fonte de alcalina, com um precursor composto de alumina e sílica para formação de um material sólido semelhante ao cimento Portland endurecido (PROVIS e VAN DEVENTER, 2013); No ano de 1935 o químico inglês Arthur Oscar Purdon registrou a primeira patente de um cimento composto de escória ativada alcalinamente, em 1952 o mesmo fundou a companhia pública 'Le Purdociment' (falida em 1966), que vendia cerca de 375 toneladas/mês do material para construção de edifícios (residenciais, públicos e industrial), muitos deles ainda existente, em Bruexelas na Bélgica (BUCHWALD, VANOOTEGHEM, *et al.*, 2013). A Figura 1 apresenta duas destas edificações.



Figura 1: Edifícios em Bruxelas construídos com cimento de escória ativado alcalinamente: a) Localizado na esquina da Rua Breydel nº 9 e avenida Oudergem nº 15, b) Localizado na rua King Victor Square N^{os} 12 e 13 **Fonte:** Buchwald, Vanooteghem, *et al.* (2013)

Em 1939 materiais cimentícios ativados com álcalis também foi estudado por Feret (SHIA, JIMÉNEZ e PALOMO, 2011); E na década de 50, materiais semelhantes denominados como solo-cimento foram desenvolvidos na antiga União Soviética por Victor Glukhovsky e um pesquisador ucraniano do Kice (Kiev Instituto de Engenharia Civil, ex-URSS) (DUXSON e PROVIS, 2008 e AGUILAR, DÍAZ e GARCÍA, 2010), que deste então vem estudando o comportamento de cimentos antigos, comparados compósitos cimentícios modernos, (PINTO, 2004 e MODAREL, LARGO e PASCALI, 2014).

Em 1972, após a incidência de vários incêndios catastróficos em edificações na França o pesquisador francês Joseph Davidovits começou a pesquisar novos materiais inorgânicos, não inflamáveis e resistentes ao fogo (DAVIDOVITS, 1994). Em 1978, o pesquisador a partir de um precursor silício-aluminoso ativado alcalinamente conseguiu desenvolver um material amorfo com estrutura tridimensional, semicristalino, que denominou de geopolímero (DAVIDOVITS, 1991 e SEVERO, COSTA, *et al.*, 2013).

Deste então, o termo geopolímero foi introduzido por Davidovits na sociedade acadêmica e industrial (TORGAL e JALALI, 2009 e ZHANG, PROVIS, *et al.*, 2014). O prefixo “Geo” refere-se ao produto consolidado semelhante a uma rocha natural (MEDRI, 2009) e o sufixo “polímero” refere-se ao processo de polimerização que acontece na formação material (WEIL, BUCHWALD e DOMBROWSKI, 2005). Assim sendo, o geopolímero foi definido como nova classe de materiais de natureza

mineral com composição química similar as zeólitas, mas com uma microestrutura mista (de amorfa a semi-cristalina) (CILLA, COLOMBOB e MORELLI, 2013 e PANAGIOTOPOULOU, KONTORI, *et al.*, 2006).

Alonso e Palomo, (2001), Fernandez-Jimenez *et al.* (2004) e Palomo, Krivenko, *et al.* (2014) descrevem que, em função da composição química dos materiais precursores e dos procedimentos de ativação, os cimentos alcalinos são classificados em três grupos:

- o primeiro corresponde ao componente da ativação do gel C-S-H, que é obtido a partir da reação de materiais ricos em silício (Si) e cálcio (Ca) ou soluções alcalinas de baixa concentração. Semelhante ao gel obtido durante a hidratação do cimento portland, que absorve uma pequena percentagem de Al na sua estrutura (C-A-S-H gel);

- o segundo, compreende a obtenção de materiais que possuem uma estrutura molecular comparável a rochas naturais e são obtidos por meio da policondensação de unidades tetraédricas dos aluminossilicatos, com íons de metais alcalinos. Conglomerados fabricados com matérias-primas com baixo teor de cálcio e com altos teores de SiO₂ e Al₂O₃, como o metacaulim e cinzas volantes do tipo F (de usinas a vapor de carvão). Quando ativado com soluções alcalinas forma um material amorfo (aluminossilicato alcalino), que desenvolve alta resistência mecânica em idades prematuras. O principal produto formado desta reação é um polímero alcalino inorgânico tridimensional, um gel de N-A-S-H (geopolímero) (PANIAS, GIANNOPOULOU e PERRAKI, 2006).

- e o terceiro consiste em materiais obtidos a partir da combinação dos grupos dois anteriores, isto é ativação alcalina mista. O produto neste caso é um novo tipo de ligante conhecido como um cimento alcalino híbrido, formado do resultado da ativação alcalina de materiais com CaO, SiO₂ e Al₂O₃ conteúdo > 20%.

Em 1981, Davidovits conectou os geopolímeros à arqueologia. Por meio de análises nos blocos das maiores pirâmides do Egito, erguidas há mais 4500 anos, foi possível concluir que os blocos não eram de pedra calcária natural, e sim de um concreto desenvolvido da mistura de pedregulhos de calcário caulínico (cal (Ca[OH]₂) e barrilha Na₂CO₃). O autor defende que eles foram convencionados *in situ* e assemelha-se aos geopolímeros (DAVODOVITS, 2015 b). Ressalta-se porém, que

alguns pesquisadores como Campbell e Folk (1991) discordam fortemente dos resultados de Davidovits, pois os resultados químicos e geológicos contradizem a idéia de que os egípcios usaram cimento e não pedra calcária na construção das pirâmides (MODAREL, LARGO e PASCALI, 2014).

3.1.1 Matéria Prima para Geopolimerização

O geopolímero é sintetizado a partir da dissolução de materiais ricos em Al_2O_3 e SiO_2 em uma solução ativadora, processo químico denominado de geopolimerização, que dá origem a um hidrato aluminossilicato amorfo tridimensional (3D) (um gel de tipo $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot nH_2O$ [gel N-A-S-H], que se assemelham às estruturas zeólitas (DAVIDOVITS, 1991 e PROVIS, LUKEY e DEVENTER, 2005). Shi, Jiménez e Palomo (2011) ressaltam que o precursor (sólido) e o ativador (líquido) podem ser misturados em proporções variáveis dependendo da finura do material sólido (quanto mais fino o material, maior a demanda de água) e do produto a ser obtido. A figura 2 representa o modelo esquemático de produção do compósito geopolimérico

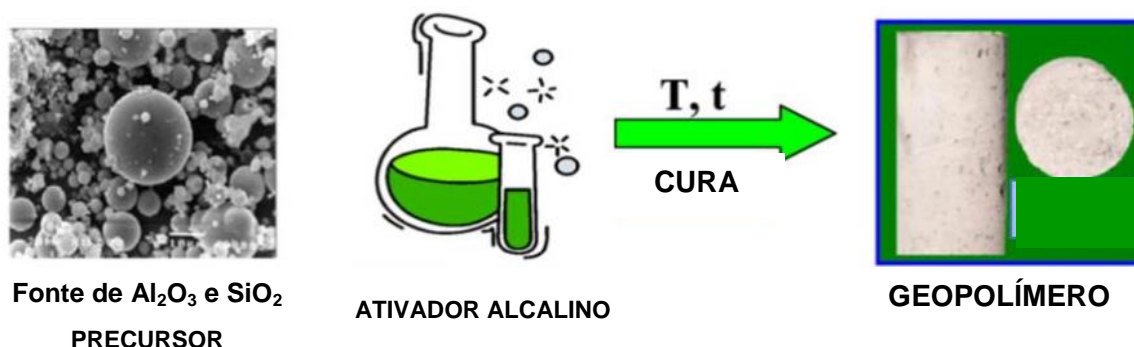


Figura 2: Composição da formulação do compósito geopolimérico.

Fonte: SHI, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO (2011)

3.1.1.1 Precursor

Davidovits (2015) cita que, o aglutinante ou precursor ou matéria-prima precursora utilizado na síntese dos geopolímeros precisa ter uma proporção significativa de íons de silício e alumínio mantidos em fases amorfas. Ou seja, precursor é um pó rico em aluminossilicato, logo é um elemento abundante da natureza, tendo em vista, que

mais de 75% da parte sólida inorgânica da crosta terrestre é composta por aluminossilicatos, que são formados da desagregação, intemperismo físico e desintegração química das rochas (OSÓRIO, 2006).

Além disso, os precursores empregados no processo de geopolimerização também podem ser derivados de outras fontes de aluminossilicato, desde que sejam um material inorgânico e que possua estrutura amorfa (HEATH, PAINE e MCMANUS, 2014). GONÇALVES (2016) descreve que os precursores a serem utilizados como matérias primas no processo de geopolimerização são compostos por altos teores de sílica e alumina reativas e podem ser classificados em três classes:

- subprodutos de outras indústrias (exemplo: Resíduos de mineração, escórias com baixo teor de cálcio, sílica de fumo, resíduos da indústria extrativa, cinzas volantes e alguns resíduos agroindustriais como cinzas de casca de arroz e bagaço de cana). Estes produtos contêm quantidades suficientes de alumina reativa e sílica (PANIAS, GIANNOPOULOU e PERRAKI, 2006).

- pós naturais de aluminossilicatos reativos (exemplo: Solo diatomáceo sedimentar formado a partir de esqueleto de microrganismos, vidro e tufos vulcânicos, gel de sílica de fontes termais ou ambiente ácido e argilas não ativadas termicamente) e

- aluminossilicatos ativados (exemplo: Argilas calcinadas em especial o metacaulim).

Apesar desta gama de materiais precursores, os aglutinantes comumente usados na síntese dos geopolímeros são: cinzas volantes classe-F, escórias granuladas e metacaulim (GARNAUT, 2008). Tendo em vista que, muitas pesquisas apontam que estes materiais possuem maior reatividade em comparação a outros precursores usados para sintetização dos geopolímeros. Panagiotopoulou, Kontori, *et al.* (2006), por exemplo, descrevem que, a reatividade dos pós de aluminossilicato em um ambiente alcalino varia de acordo com a seguinte ordem: metacaulim > zeólitas > escória de alto forno > cinzas volantes > pozolanas > caulim. Ressalta ainda que, quanto maior for a reatividade do precursor melhor será sua dissolução nas soluções alcalinas.

Alguns fatores característicos do tipo de precursor podem influenciar também na qualidade do produto final, como:

- o tamanho das partículas, que tem uma relação direta com a quantidade de água utilizada na mistura e com a velocidade da reação (RAHIER, DENAYER e VAN

MELE, 2003). Pois partículas finas e irregulares requerem a adição de muito mais água na mistura, para que se possa obter um aglutinante duradouro (DUXSON e PROVIS, 2008). Além disso, a taxa de reação é maior com a diminuição do tamanho de partícula e de acordo com a superfície específica do material. Partículas muito grandes podem ter baixa solubilidade no meio alcalino, pois impede o transporte de massa durante a polimerização, onde se obtém resultados deficientes na composição das cadeias poliméricas (LEONELLI e ROMAGNOLI, 2011). Segundo OSÓRIO (2006), quanto maior for o grau de finura ou superfície específica do precursor geopolimérico, maior será a resistência. Sobolev e Gutiérrez (2005) apresentam (Figura 3) um gráfico que relaciona de forma clara as dimensões de partículas com a escala específica da área superficial de diversos materiais.

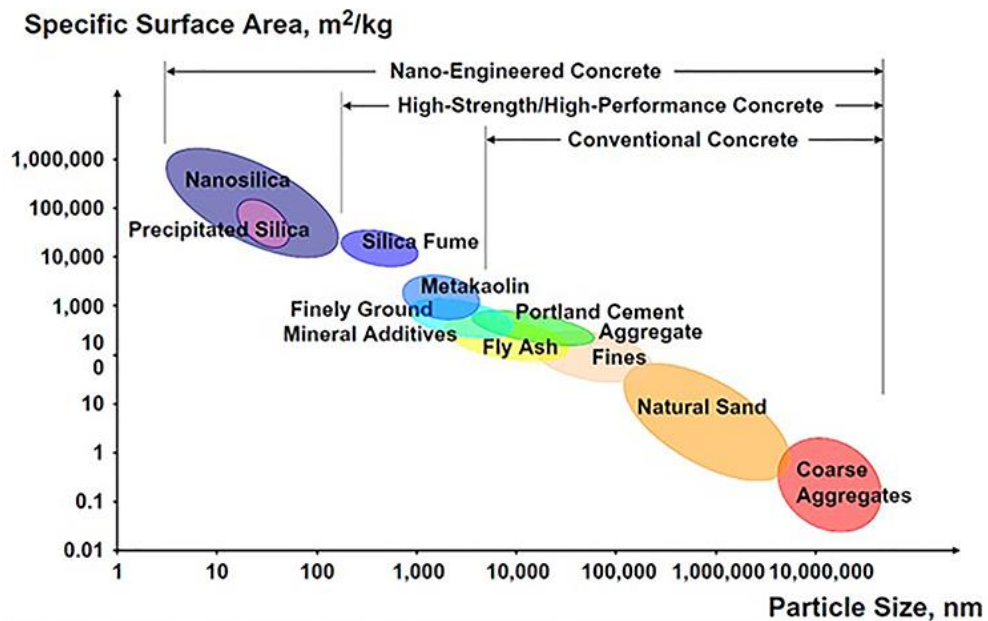


Figura 3: Dimensão de partículas e escala específica de área de superfície relacionada a materiais.

Fonte: SOBOLEV e GUTIÉRREZ (2005)

O metacaulim, por exemplo, possui partículas muito menores, que as do cimento Portland (RAHIER, DENAYER e VAN MELE, 2003) e devido a sua maior área de superfície específica, se demanda uma grande quantidade de água, para ter uma boa trabalhabilidade da pasta. O que leva a períodos prolongados de consolidação e temperaturas de cerca de 60-80°C para a remoção total da água que não faz parte da estrutura geopolimérica (PROVIS, DUXSON e VAN DEVENTER, 2010, LEONELLI e ROMAGNOLI, 2011). Por vez na síntese de geopolímeros com uso de cinzas volantes, que possuem partículas de forma de esféricas e uma menor área de superfície por unidade de volume, é demandado uma menor quantidade de água

para maximizar o empacotamento das partículas, o que conseqüentemente reduz a porosidade e a resistência do produto formado (DUXSON e PROVVIS, 2008).

- o precursor no processo de geopolimerização determina as propriedades e o tipo de aplicação do material, em função das suas características morfológicas e químico-composicional (LEONELLI e ROMAGNOLI, 2011). Pois a razão entre Si:Al irá influenciar de forma direta no tipo de microestrutura formada nos geopolímeros (BEZERRA, COSTA, *et al.*, 2013). Atualmente os geopolímeros são desenvolvidos e aplicados em 10 classes principais de materiais que estão associadas ao material precursor (DAVIDOVITS, 2006):

- 1- Geopolímero à base de vidro, poli (siloxonato), silicato solúvel, Si: Al = 1: 0
 - 2- Geopolímero à base de Caulinita / Hidrosodalitos, polisialato Si: Al = 1: 1
 - 3- Metabolismo MK-750 baseado em geopolímero, poli (sialato-siloxo) Si: Al = 2: 1
 - 4- Geopolímero à base de cálcio, (Ca, K, Na) -sialato, Si: Al = 1, 2, 3
 - 5- Geopolímero à base de rocha, poli (sialato-multisiloxo) $1 < \text{Si: Al} < 5$
 - 6- Geopolímero à base de sílica, ligação de sialato e ligação de siloxo em poli (siloxonato) Si: Al > 5
 - 7- Geopolímero à base de cinzas volantes
 - 8- Geopolímero baseado em ferro-sialato
 - 9- Geopolímero à base de fosfato, geopolímero à base de AlPO_4
- Geopolímero orgânico-mineral

Onde,

- $1 < \text{Si:Al} < 3$ – São aluminosilicatos ricos em alumínio. Ex.: metacaulim e cinzas volantes.
- $1 < \text{Si:Al} < 5$ – São minerais constituinte de rochas. Ex.: Caulinitas e esmectite.
- $5 < \text{Si:Al} < 25$ - São cinzas de casca de arroz e sílica pirogênica.

3.1.1.1.1 A importância da calcinação

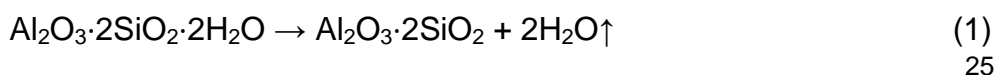
Segundo Davidovits (1991) e Xu (2002), os materiais de origem utilizados na geopolimerização, em termos de pré-tratamento, podem ser divididos em dois grupos principais: (1) materiais calcinados e (2) materiais não calcinados. Dias, (2008) cita que, a qualidade do geopolímero depende essencialmente da natureza

do material de precursor. Caso sejam produtos obtidos por calcinação, como, por exemplo, metacaulim (caulim calcinado), o geopolímero possuirá boas características de resistência quando comparados com outros produtos de origem não-calcinada.

Alguns autores como Davidovits, (1991), Xu e Van Deventer (2000) descrevem que os geopolímeros sintetizados por meio de fontes não calcinadas apresentam uma maior resistência à compressão na fase posterior da reação. E os produtos formados a partir da geopolimerização de fonte precursoras calcinadas têm uma dissolução e gelificação mais rápidas, além disso, possuem maior reatividade durante a geopolimerização e apresentam produtos geopoliméricos com resistência inicial à compressão elevada.

Segundo Osório (2006), Correia (2011) e Chang e Goldsby(2013) quando a matéria prima precursora do geopolímero não possui uma história térmica natural ou provocada (como as cinzas volantes ou da sílica de fumo), ela deve ser submetida a um tratamento térmico de desidratação (calcinação) controlada, de modo a transformá-la em um produto amorfo capaz de facilmente se combinar quimicamente e conseqüentemente desenvolver melhores produtos geopoliméricos. Este processo também conhecido desidroxilação, se baseia na retirada da água presente no material, o que leva a modificação da estrutura do material alterando a coordenação do íon alumínio com o oxigênio, e resulta em uma fonte de aluminossilicatos amorfo de elevada entropia (TORGAL, CASTRO-GOMES e JALALI, 2008, PROVIS e VAN DEVENTER, 2009 e BAPAT, 2012).

O caulim, por exemplo, deve ser submetido a um processo de calcinação realizado em uma faixa de temperatura dentre ~550-750°C, para que o alumínio passe de passa de coordenação 6 (octaédrica) para 4 (tetraédrica), formando assim o chamado metacaulim penta coordenado com alumínio (Al (V)), que é a coordenação mais adequada para a geopolimerização (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009) e (LEONELLI, KAMSEU, *et al.*, 2010). O resultado deste processo gera um material pozolânico de grande reatividade (OSÓRIO, 2006, PROVIS, DUXSON e VAN DEVENTER, 2010). O processo de calcinação é representado pela Equação 1 (DAVIDOVITS, 1991 e BAPAT, 2012).



Portanto, quando a calcinação do material precursor é efetuada em uma temperatura adequada, vai ocorrer à desidratação, levando à junção de dois hidroxilos OH⁻, formando uma molécula de água, que sai da estrutura deixando no seu lugar um átomo de oxigênio, formando um material altamente reativo (OSÓRIO, 2006).

Davidovits (2015) cita, que a temperatura ideal para a desidroxilação do caulim, a ser empregado na produção de geopolímero, deve ser de 750°C, pois nesta temperatura é obtido um metacaulim altamente reativo. Pois quando o caulim é calcinado em temperaturas inferiores a 500°C há um déficit de coordenação IV e V, e não se obtém uma geopolimerização satisfatória. E na temperatura em torno de 950°C se verifica fases de recristalização no produto, modificando assim o caráter amorfo do material, o que conseqüentemente diminui o seu potencial de combinação química do metacaulim (PROVIS e BERNAL, 2014 e PINTO, 2004). Na Figura 4 é possível verificar a influência da temperatura de calinação do caulim no processo de geopolimerização.

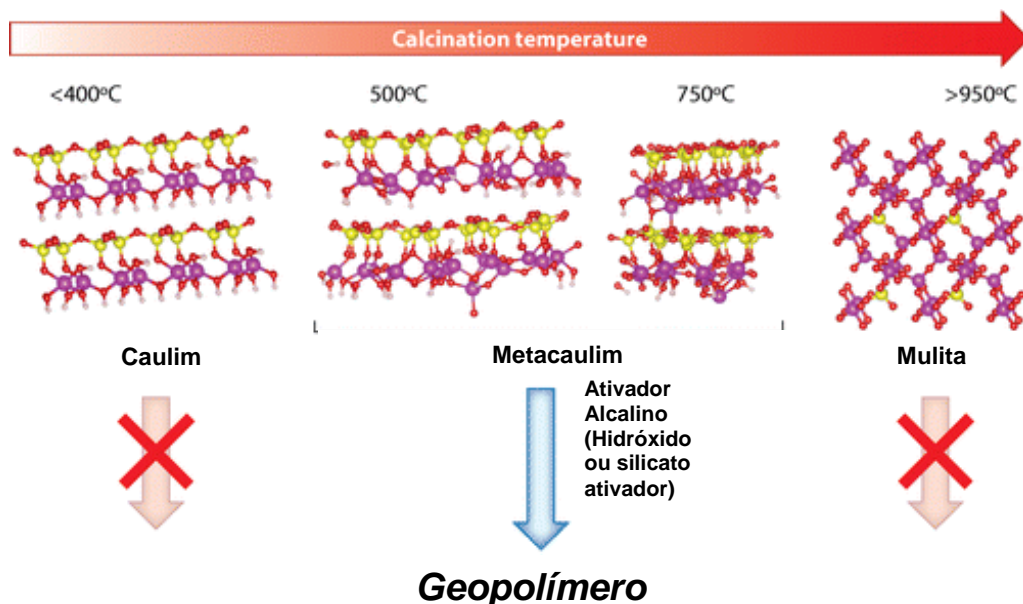


Figura 4: Temperatura de calcinação versus qualidade do metacaulim para geopolimerização

Fonte : PROVIS e BERNAL (2014)

3.1.1.1.2 Metacaulim

Neste trabalho o metacaulim será o precursor utilizado para a obtenção do compósito e das espumas geopolimericas. Como supracitado, o metacaulim é um

aluminossilicato anidro reativo obtido da calcinação do caulim, ele um material altamente reativo, que reage com soluções alcalinas que formam um material com elevado desempenho mecânico (ALONSO e PALOMO, 2001). Porém, a sua reatividade está condicionada as características (composição mineralógica morfologia, químicas) intrínsecas do caulim de origem, do grau de desidroxilação, a aglomeração e a área de superfície específica, que por vez depende da tecnologia de produção (tipo de forno e a temperatura de calcinação) (LEONELLI, KAMSEU, *et al.*, 2010). Como também aludido anteriormente, o aluminossilicato metacaulim apresenta uma maior reatividade em comparação com as outras matérias-primas, pois possui uma coordenação catiônica particular, qual propicia a sua dissolução em meios alcalinos aquosos (PROVIS, DUXSON e VAN DEVENTER, 2010, LEONELLI e ROMAGNOLI, 2011). E Palomo, Blanco-Varela, *et al.*, (1999) atribuem a durabilidade do produto final da geopolimerização ao metacaulim como fonte aluminossilicato.

3.1.1.2 Solução Ativadora

Além dos precursores sólidos reativos é necessário um ativador químico para realizar a reação de geopolimerização. Os ativadores alcalinos podem ser simples ou composto. Considerando a generalidade dos elementos alcalinos (grupo I da Tabela Periódica), pode se dizer que é possível obter inúmeras dissoluções ativadoras (OSÓRIO, 2006). Contudo, geralmente as soluções aquosas empregadas no processo de ativação alcalina são aquelas concentradas de hidróxido alcalino, silicato, carbonato ou sulfato, como: o sódio-polissialato (Na-PS), o potássio-polissialato (K-PS), o (sódio, potássio)-polissialato-siloxo [(Na-K)-PSS] e o potássio-polissialato-siloxo (K-PSS) (DAVIDOVITS, 1991, OSÓRIO, 2006 e PROVIS e VAN DEVENTER, 2009). Sendo o hidróxido de sódio e o de potássio os mais empregados na formulação dos geopolímeros (GONÇALVES, 2016).

De forma abrangente a ativação alcalina é uma reação de hidratação dos aluminossilicatos, por meio de substâncias do tipo alcalinas ou alcalino-terroso, conhecidas como (PUERTAS, 1995) e (CORREIA, 2011):

- hidróxidos (ROH, R(OH)₂),
- sais de ácidos fracos (R₂CO₃, R₂S, RF),

- sais de ácidos fortes (Na_2SO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),
- ou sais silicatos do tipo $\text{R}_2 \cdot (\text{n})\text{Si O}_2$,

em que: R é um íon alcalino do tipo Na, K ou Li, ou alcalino-terroso como o Ca.

O ativador químico ou a solução ativadora desempenha um papel vital no início do processo de geopolimerização, pois, é necessário um meio alcalino forte para aumentar a hidrólise superficial das partículas de aluminossilicato presentes na matéria-prima. Assim sendo, a concentração do ativador químico tem um efeito pronunciado nas propriedades mecânicas dos geopolímeros (PANIAS, GIANNOPOULOU e PERRAKI, 2006 e PART, RAMLI e CHEAH, 2017).

Segundo Puertas (1995) e Provis e Bernal (2014) as funções das substâncias ativadoras no processo são:

- acelerar a solubilização do precursor;
- promover a formação de hidratos estáveis de baixas solubilidade;
- favorecer a formação de uma estrutura compacta, por meio dos hidratos formados e
- permitir que o material se endureça e desenvolva resistência dentro de horas e dias.

Todos os silicatos solúveis são alcalinos e os valores da concentração de pH estão geralmente entre 10 e 13 (LEONELLI e ROMAGNOLI, 2011). Contudo, não existe fórmula química específica e peso molecular definido para os silicatos solúveis, como o sódio, potássio e lítio, que são formulados a partir da combinação de óxidos de metais alcalinos e de sílica em várias proporções. A fórmula geral para um silicato alcalino solúvel é representada na Equação 2 (CEES, 2013):



em que:

M = Na, K ou Li;

x = razão molar (MR),

ou seja, o número de mols de sílica (SiO_2) por mol de óxido de metal alcalino (M_2O).

O tipo dosagem e concentração do ativador devem ser estudados em função do precursor, pois a composição química e o grau de finura condicionam a reação de ativador (PINTO, 2004) e (BEZERRA, COSTA, *et al.*, 2013). Entretanto, características como a natureza, pH e viscosidade da solução ativadora também devem ser observados, pois estes fatores influenciam diretamente na estrutura e nas propriedades mecânicas dos produtos originados na geopolimerização (DAVIDOVITS, 2015).

Concentração do Ativador

A concentração do ativador alcalino é muito importante no processo de geopolimerização. A solubilidade do material aluminossilicato cresce com o aumento da concentração dos íons hidróxidos (GASTEIGE, FREDERICK e STREISEL, 1992). Contudo, a elevada concentração do ativador provoca atraso na formação do geopolímero, pois as espécies iônicas são limitadas na mobilidade dos íons, promovendo o retardo na formação de estruturas coaguladas (ALONSO e PALOMO, 2001). Xu (2002) cita que, o pH das soluções é conhecido por ter um efeito exponencial na taxa de dissolução dos materiais de aluminossilicato e portanto, é fortemente ligado ao grau de reação. Segundo Phair e Van Deventer (2001) o pH é o parâmetro que mais afeta a resistência mecânica dos produtos geopoliméricos, pois quanto maior for o seu valor, menor será o tempo necessário para o endurecimento da pasta. Pois, quando os valores de pH da solução são baixos a massa fica muito grossa e se comporta como um cimento, ao contrário disso, quando os valores de pH são elevados há uma diminuição da viscosidade, que consequentemente melhora a trabalhabilidade da mistura.

GONÇALVES (2016) também salienta, que se concentração da solução ativadora for muito elevada pode inviabilizar diversas aplicações industrial do produto, pois a reação de dissolução para formulação das soluções concentradas é exotérmica, ou seja, ha uma grande liberação de calor. Além disso, a concentração da solução aumenta em cerca de 5 mols, quando são utilizados aluminossilicatos com baixo teor de cálcio (metacaulim ou cinzas volantes com baixo teor de cálcio) como precursores sólidos (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009). Desta forma, o uso de uma solução com alta concentração pode levar a problemas de segurança e saúde ocupacional em uma grande industria, uma vez que essas soluções são

classificadas como corrosivas sob a legislação trabalhista de quase todos os países do mundo (PROVIS e BERNAL, 2014).

A viscosidade da solução ativadora

A solução ativadora com baixa viscosidade acelera a evaporação da água, que é necessária na reação do processo de geopolimerização, dificultando assim a trabalhabilidade da pasta e o desenvolvimento de fissuras no material consolidado (XU e VAN DEVENTER, 2003). Provis e Van Deventer (2009) citam, que a viscosidade da solução depende da natureza do cation alcalino e da molaridade (Figura 5).

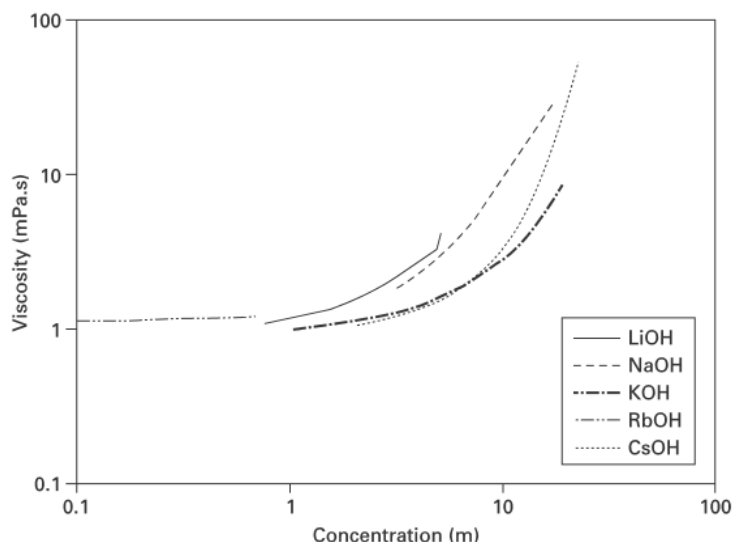


Figura 5: Viscosidades de soluções de hidróxido alcalino em função da molaridade.

Fonte: PROVIS e VAN DEVENTER (2009)

(DUXSON, LUKEY, *et al.*, 2005) corroboram a citação de Provis e Van Deventer (2009) quando descrevem, que a viscosidade das soluções de silicato alcalino aumenta com a concentração de silício, mas as soluções de silicato de potássio são menos viscosas do que soluções análogas contendo sódio. Estes autores ainda ressaltam, que a taxa de transferência de massa em soluções é inversamente proporcional à viscosidade, assim sendo, uma menor viscosidade irá melhorar a taxa de transporte de massa para as interfaces de reação e contribuir para um aumento na quantidade de material dissolvido durante a reação de geopolimerização.

Influência dos cátions alcalinos

Os cátions alcalinos (normalmente Na^+ ou K^+ , mas também Li^+ ou Cs^+), influenciam nas propriedades mecânicas e térmicas e na dissolução do aluminossilicato (LEONELLI e ROMAGNOLI, 2013). Pois segundo Barbosa et al. (1999) as propriedades ótimas do geopolímero são obtidas quando a concentração de Na^+ é suficiente para promover um mecanismo de compensação de carga na substituição do SiO_4 por AlO_4 .

Nos geopolímeros há pouco cálcio na constituição, fator este que não propicia a formação de carbonato de cálcio (processo denominado como carbonatação). No entanto quando há um excesso de íon alcalino (Na^+ ou K^+) devido ao demasiado uso de ativador pode ocorrer à formação abundante de eflorescências cristalinas de carbonato de sódio ou de potássio na superfície dos materiais, causando uma desagregação progressiva dos geopolímeros (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009). Esta reação é gerada pelos cátions alcalinos, que deverão permanecer retidos na estrutura para compensar o déficit de cargas dos ânions tetraédrico AlO_4 , em excesso eles migram para a superfície, onde se combinam com o CO_2 atmosférico. Portanto, deve-se ter um grande cuidado na dosagem do ativador, para que a razão Al/Na ou Al/K não seja superior a 1,0 (ALONSO e PALOMO, 2001) e (OSÓRIO, 2006).

Segundo Panagiotopoulou, Kontori, et al., (2006) e Xu e Van Deventer (2000), a polimerização e a cura também são influenciadas pela a dimensão dos cátions, pois os cátions menores auxiliam na dissolução do precursor e os com dimensões maiores favorecem no endurecimento, aumentam a resistência mecânica e capacidade refratária do material. A figura 6 apresenta um esquema da influência dos cátions alcalinos sobre o processo de geopolimerização.

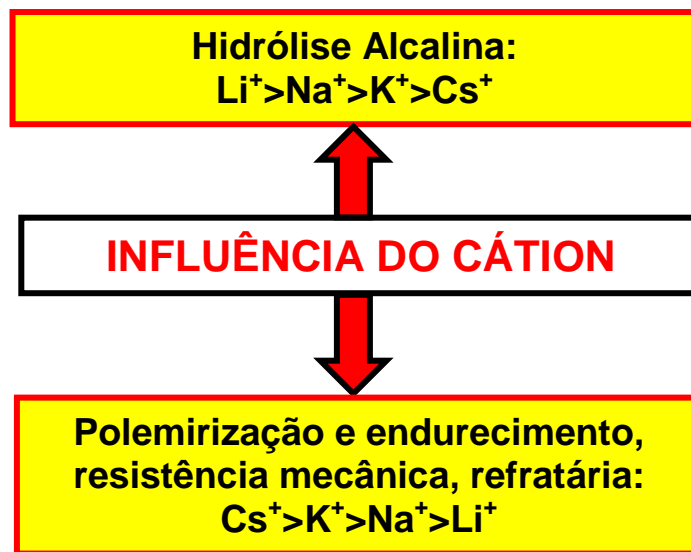


Figura 6: Influência dos cátions alcalinos sobre o processo de geopolimerização

Fonte: (LEONELLI e ROMAGNOLI (2011))

3.1.2 Síntese da Ativação Alcalina (Geopolimerização)

O mecanismo de reação exato que explica a configuração e o endurecimento de aglutinantes ativados por álcali, ainda não é bem entendido (TORGAL, CASTRO-GOMES e JALALI, 2008) e (DUXSON e PROVIS, 2008). Desta forma, muitos autores se baseiam nos primeiros trabalhos de Glukhovsky em 1967 e apresentam modelos que propõem mecanismos de explicação da geopolimerização e da ativação alcalina a partir de uma fonte precursora (SHI, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO, 2011 e DUXSON, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, *et al.*, 2006).

Em 1985 Davidovits e Sawyer e Davidovits (1991) explicaram, que a geopolimerização se trata de um fenômeno exotérmico, composto por um conjunto de reações de dissolução, coagulação, condensação e cristalização, que se define como o resultado da policondensação de monómeros, ainda hipotéticos, instituídos por ortosialatos. No qual envolve uma reação química entre vários óxidos de aluminossilicato (Al^{3+} na coordenação IV-V), com silicatos em condições altamente alcalinas, produzindo ligações de Si-O-Al poliméricas (DAVIDOVITS, 1991 e XU e VAN DEVENTER, 2000), onde o equilíbrio eletrostático da estrutura é propiciado por cátions, tais como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+ e possuem a função de equilibrar as cargas elétricas por meio da substituição de átomos de Si^{4+} por átomos de Al^{3+} . Isto ocorre no processo de dissolução, quando a elevada concentração de íons OH^-

na forma covalente quebra a cadeia de Si-O-Si, Si-O-Al e Al-O-Al presentes no material precursor e íons de silício e alumínio para a formação de grupos de circundantes Si-OH e Al-OH. Na sequência estas espécies químicas se condensam, formando ligações Si-O-Al e Si-O-O, Si, e dão origem à precipitação de um gel, que se caracteriza por ter estrutura tridimensional (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, MONZÓ FUSTER, et al., 2008).

Severo, Costa, *et al.*, (2013) e Provis (2013) também descrevem esta reação como um processo químico complexo, que ocorre entre a solução alcalina de ativação de precursores sólidos de aluminossilicatos. Sendo que, os ligantes obtidos nesta reação são formados fundamentalmente em duas etapas: a primeira quando ocorre a dissolução da matéria prima rica em sílica e alumina (precursor), ao ser misturado com uma solução alcalina (ativador), e a segunda de policondensação e endurecimento dos produtos (CORREIA, 2011). Estas fases encontram-se ilustradas na Figura 7.

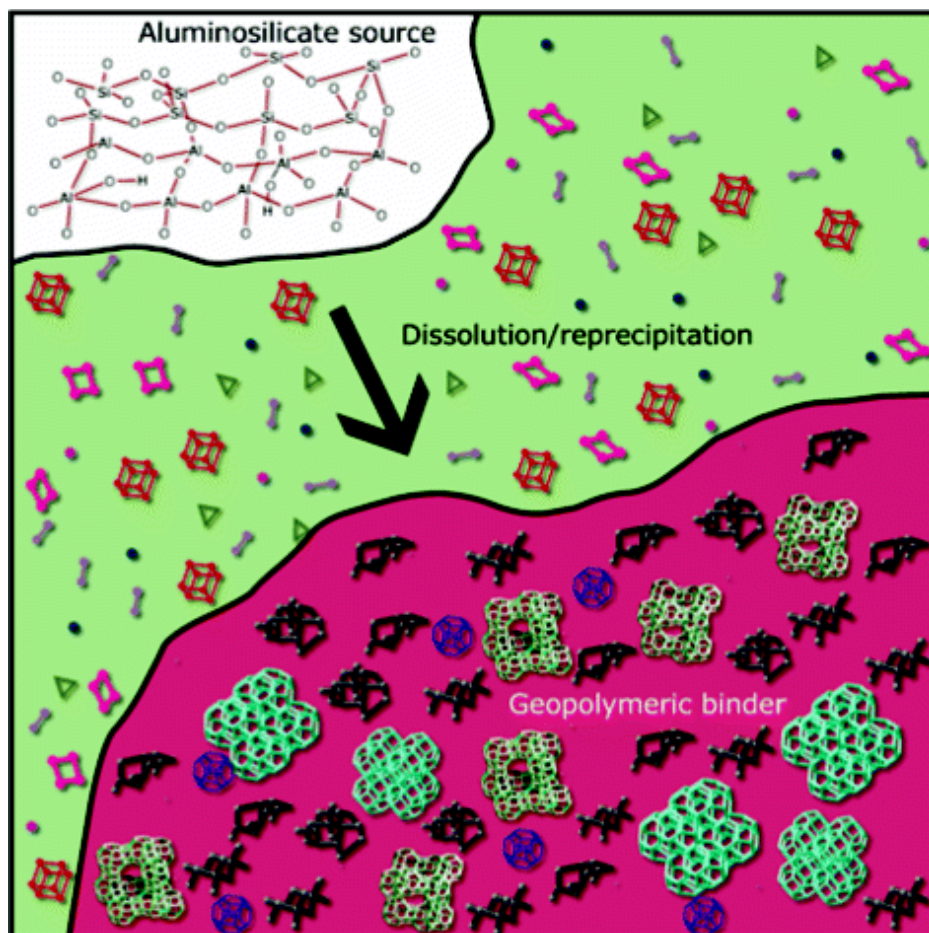


Figura 7: Fase dos processo de geopolimerização

Fonte: PROVIS, LUKEY e DEVENTER (2005)

Em algumas pesquisas a síntese de geopolimerização é descrita em três fases (Figura 8), conforme postulado na síntese das zeólitas, que ocorre em uma determinada cronologia, qual enquadra:

- a) Fase da destruição (Dissolução) – no início do processo os íons hidróxido OH^- provenientes do ativador alcalino dão lugar à quebra das ligações covalentes das espécies presentes. A extensão da dissolução irá depender de alguns fatores como a concentração da solução alcalina, cátion metálico alcalino usado na solução alcalina, velocidade de mistura, tempo de lixiviação e na estrutura, tamanho das partículas, área específica superficial e composição das fontes de Al-Si (aluminossilicato) (XU, 2002).
- b) Fase de orientação e transporte – a estrutura química de partida é quebrada, forma-se uma “sopa” de íons que são sujeitos, em face das suas cargas, a um processo de orientação e transporte em que a fase líquida assume particular importância. (SHI, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO, 2011).
- c) Fase de coagulação/precipitação/endurecimento – começam a formar pequenos núcleos de coagulação, que ligeiramente evoluem para processos de precipitação massiva de gel, e rapidamente endurecem. É nesta última fase que se registam os fenómenos de policondensação, ainda que limitados em extensão e espacialmente desorganizados. Por este motivo, a estrutura final é essencialmente amorfa (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009).

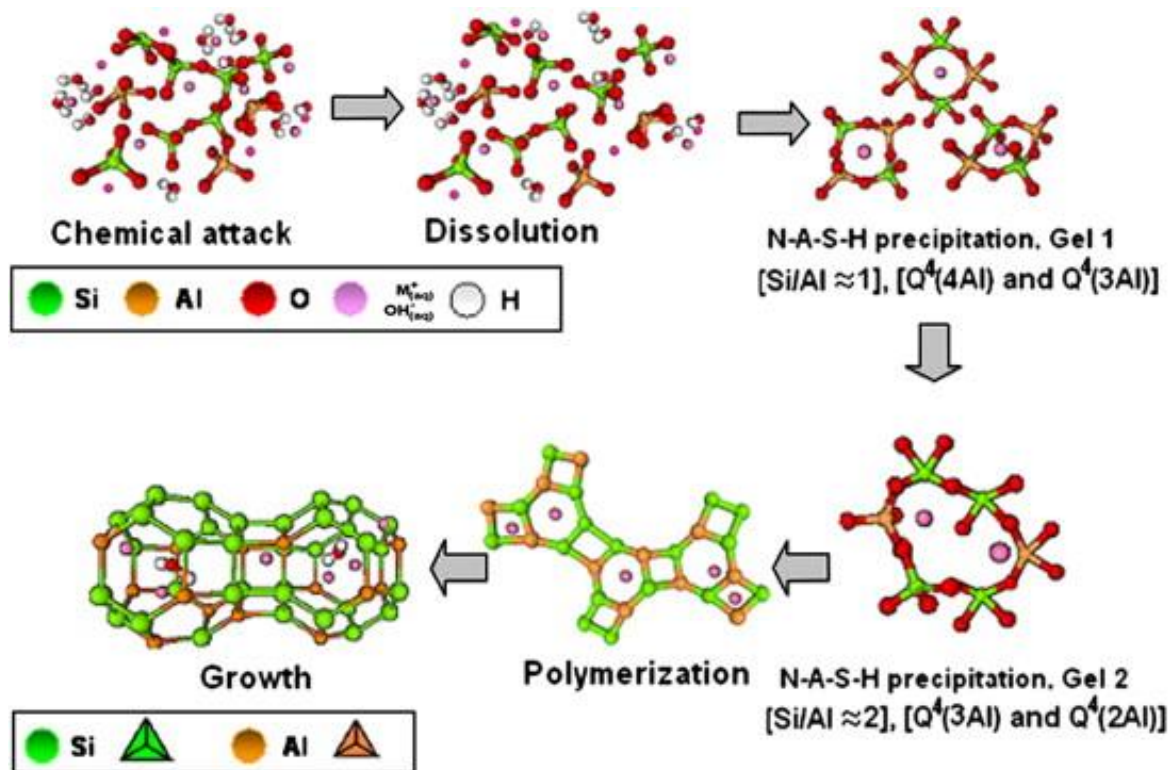


Figura 8: Modelo ativação alcalina de aluminosilicatos/geopolimerização postulado na síntese das zeólitas.

Fonte: SHI, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO (2011)

Segundo Davidovits (2016) , Duxson, Fernández-Jiménez, *et al.* (2006) e Provis e Van Deventer (2007) os processos de dissolução da fonte de aluminosilicato, a configuração e o endurecimento do cimento geopolímero são tão rápidos, que estas três fases ocorre quase concomitantemente. Portanto, nesta situação, não há tempo e espaço suficientes para que o gel ou a pasta cresçam com uma estrutura bem cristalizada, como no caso da formação das zeólitas (XU e VAN DEVENTER, 2000).

Palomo, Krivenko, *et al.* (2014) descrevem a síntese que ocorre no processo de ativação alcalina, por meio de modelo estrutural proposto pelos cientistas Palomo e Fernández-Jiménez:

“Quando a fonte de aluminosilicato entra em contato com a solução alcalina, ela se dissolve em várias espécies, principalmente monómeros de sílica e alumina. Estes monómeros interagem para formar dímeros, que por sua vez reagem com outros monómeros para formar trímeros, tetrâmeros e assim por diante. Quando a solução atinge a saturação, precipita-se um gel N-A-S-H metaestáveis rico em

Al (denominado Gel 1) como um produto de reação intermediária. Sua formação pode ser explicada pelo alto teor de íons Al^{3+} no meio alcalino nos estágios iniciais da reação (desde os primeiros minutos até as primeiras horas), pois o alumínio reativo se dissolve mais rapidamente do que o silício, porque as ligações Al-O são mais fracas que as ligações Si-O. A medida que a reação progride, mais grupos de Si-O na fonte original de aluminossilicato dissolvem, aumentando a concentração de silício no meio de reação e sua proporção no gel N-A-S-H (Gel 2). Essa reorganização estrutural determina a composição final do polímero, bem como a microestrutura dos poros e a distribuição no material, que são fundamentais para o desenvolvimento de muitas propriedades físicas do cimento resultante.”

Conforme citado no item 3.1 Geopolímero., os cimentos alcalinos são classificados em três grupos, desta forma Provis e Bernal (2014) retratam um modelo (Figura 9) de ativação alcalina para o 1° e o 2° grupo. Este modelo é parecido com o apresentado por Palomo, Krivenko, et al. (2014), porém os autores elucidam a participação do de cálcio de acordo com o seu teor na síntese dos geopolímeros:

“Os sistemas de alto teor de cálcio reação de acordo com a via do lado esquerdo (azul), com a natureza dos produtos secundários determinados pelo teor de Mg, enquanto os sistemas de cálcio baixo reagem de acordo com regra da mão direita (verde). Para cada tipo de precursor, a ativação de hidróxido tende a aumentar a proporção de produtos de cristalino e desordenados em comparação com a ativação de silicato.”.

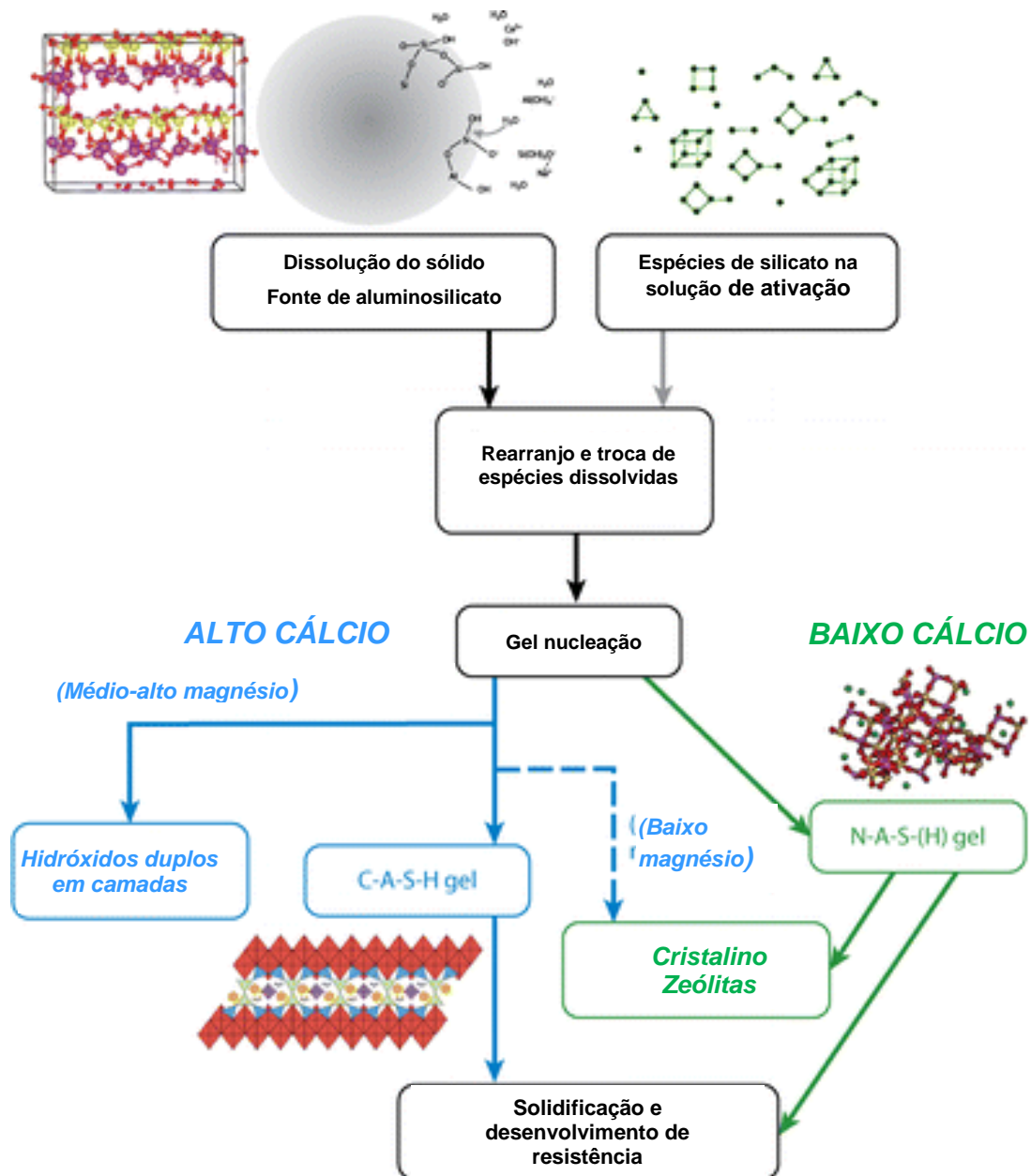


Figura 9: Processo e produtos de reação de ativação alcalina de um precursor sólido de aluminossilicato.

FONTE: PROVIS e BERNAL (2014)

Durante a geopolimerização é formado um gel, ou uma "resina" poli mineral (a verdadeira matriz geopolimérica) que consiste em tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados em sequência alternada. O gel atua como um adesivo para matérias-primas à base de aluminossilicato que não tenham reagido e quaisquer agentes de enchimento adicionados como aditivo (fibras, partículas de metal, pós de cerâmica e vidro, polímeros), como é o caso de resinas orgânicas. O processo realiza-se a baixas

temperaturas, entre 25°C e 120°C, e com uma consolidação rápida, 5 a 10 horas (MODARELLI, LARGO e PASCALI, 2014).

Em suma: a geopolimerização é um processo multifásico complexo, qual envolve uma série de reações químicas de dissolução-reorientação-solidificação, análogas às observadas na síntese de zeólitas por tratamento hidrotermal de precursores sólidos (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009). Existem vários critérios que estabelecem um paralelismo entre o processo de formação das zeólitas e o de obtenção produto resultante da ativação alcalina, como: a concentração dos reagentes presentes na reação; o tipo de álcali; dentre outros (PALOMO e FUENTE, 2002). Desta forma, o geopolímero pode ser considerado um aluminossilicato com estruturas análogas às zeólitas (PALOMO, ALONSO, *et al.*, 2004). Ressalta-se, porém, que os geopolímeros são amorfos/semicristalinos, enquanto as zeólitas possuem natureza cristalina (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009) e a temperatura e o teor de água são geralmente mais elevados nos sistemas de síntese das zeólitas, do que na geopolimerização, mas não existe uma clara distinção sobre as condições para a obtenção de cada produto (PROVIS, LUKEY e DEVENTER, 2005).

3.1.3 Estrutura Química dos Geopolímeros

Existem diversas denominações para os geopolímeros, tais como: materiais ativado alcalinamente, cimento ativado alcalinamente, cerâmica alcalina, geocimento, concreto de polímero inorgânico (SEVERO, COSTA, *et al.*, 2013). Apesar da variedade de nomenclaturas, esses termos descrevem materiais sintetizados utilizando a mesma reação química que é um processo que envolve uma reação exotérmica entre o precursor aluminossilicato, e uma solução altamente alcalina (DAVIDOVITS, 1994). Que resulta essencialmente em uma unidade de repetição de monômero de silialato (-Si-O-Al-O-) (DUXSON, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, *et al.*, 2006). A fórmula empírica apresentada a seguir, descrever-se designação química dos geopolímeros baseado em silício-aluminato, polisialato (DAVIDOVITS e SAWYER, 1985):



em que:

M - é um íon positivo de um metal alcalino ou alcalino terroso (Na^+ , K^+ , ou Ca^{2+})

n - é o grau de polimerização

z - é igual a 1, 2 ou 3 ou um número mais elevado

w - é o grau de hidratação

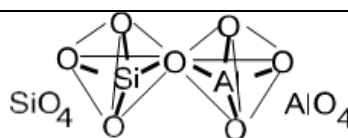
Em 1991 Davidovist sugeriu-se o termo polisialato para a designação química dos geopolímeros à base de silício-aluminatos (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009). Sialato é uma abreviatura de silício-oxo-aluminato (TORGAL, CASTRO-GOMES e JALALI, 2008). Os polisialatos são formados por correntes e anéis de polímeros com Si e Al, em coordenação tetraédrica, com quatro oxigênios e variam de amorfo a semi-cristalino, os quais apresentam uma grande semelhanças com a estruturas das zeólitas (DAVIDOVITS, 2002) e (PINTO, 2004) . Para a síntese destes materiais, ele os classificou em quatro tipos básicos de estruturas geopoliméricas, em função de quatro tipos de monómeros, de acordo com as razões moleculares entre a sílica e a alumina (OSÓRIO, 2006).

Tabela 1- Esquema das estruturas moleculares de polissílabos - Nomenclatura Estrutura Química dos Geopolímeros em Relação do Si:Al - Monómeros base de formação dos geopolímeros

Si: Al = 0, siloxo

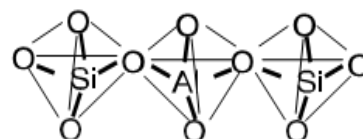
Si:Al = 1, sialato (sigla para silício-oxo-aluminato de Na, K, Ca, Li)
(-Si-O-Al-O-)

Abreviação: PSos



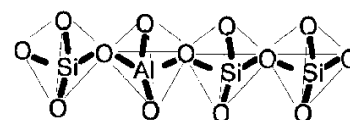
Si:Al = 2, sialato-siloxo
(-Si-O-Al-O-Si-O-)

Abreviação:PSS



Si:Al = 3, sialato-disiloxo
(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)

Abreviação:PSDS



Si : Al > 3, link sialate.

Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-sialato-disiloxo, poli (sialato-disiloxo)

-POPO-fosfato, poli (fosfato)

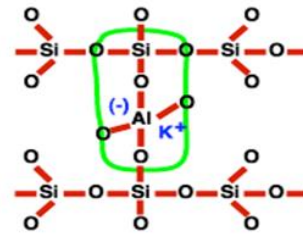
-PO-Si-O-PO-fosfo-siloxo, Poli (fosfo-siloxo) -PO

-Si-O-Al-O-PO-fosfo-sialato, poli (fosfo-sialato)

- (R) -Si-O-Si-O- (R) organo-siloxo, poli-silicone

-Al-O-PO-alumino-fosfo, poli (alumino-fosfato)

-Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O-ferro-sialato, poli (ferro-sialato)



Fonte: DAVIDOVITS (1994) e (DAVIDOVITS, 2002)

Davidovits (1994) verificou, que os geopolímeros são constituídos por uma malha tridimensional em coordenação tetraédrica de AlO_4 e SiO_4 alternados (Figura 10), por meio da compartilhização de oxigênios. Sendo que, a presença dos cations Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+ , dentre outros na cavidade desta estrutura é indispensável para balancear as cargas negativas do Al^{3+} (DAVIDOVITS, 1994) e (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009).

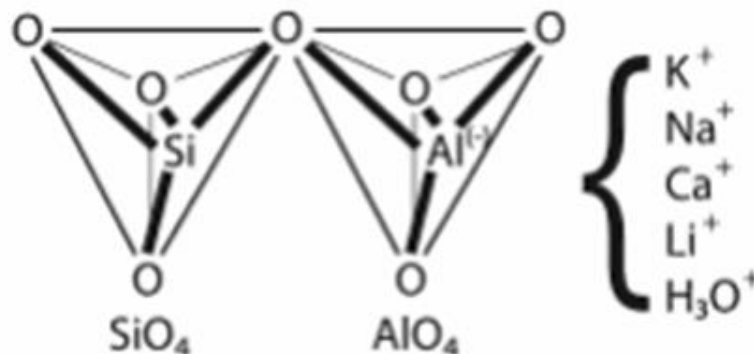


Figura 10: Configuração tetraédrica do sialato Si-O-Al-O

Fonte: DAVIDOVITS (2002)

Gráficos computacionais (Figura 11) foram elaborados por Davidovits, (1994) para ilustrar as formas moleculares de um de polímero Mn (-Si-O-Al-O-)n poli (sialato) e M N (-Si-O-Al-O-Si-O) n poli (sialato-siloxo) e suas estruturas. Em 1994 Davidovits também apresentou um modelo semi-esquemático da estrutura de geopolímeros K-Polisialato-siloxo (Figura 12) e Na-Poli sialato-siloxo (Figura 13), sintetizados da ativação alcalina do metacaulim.

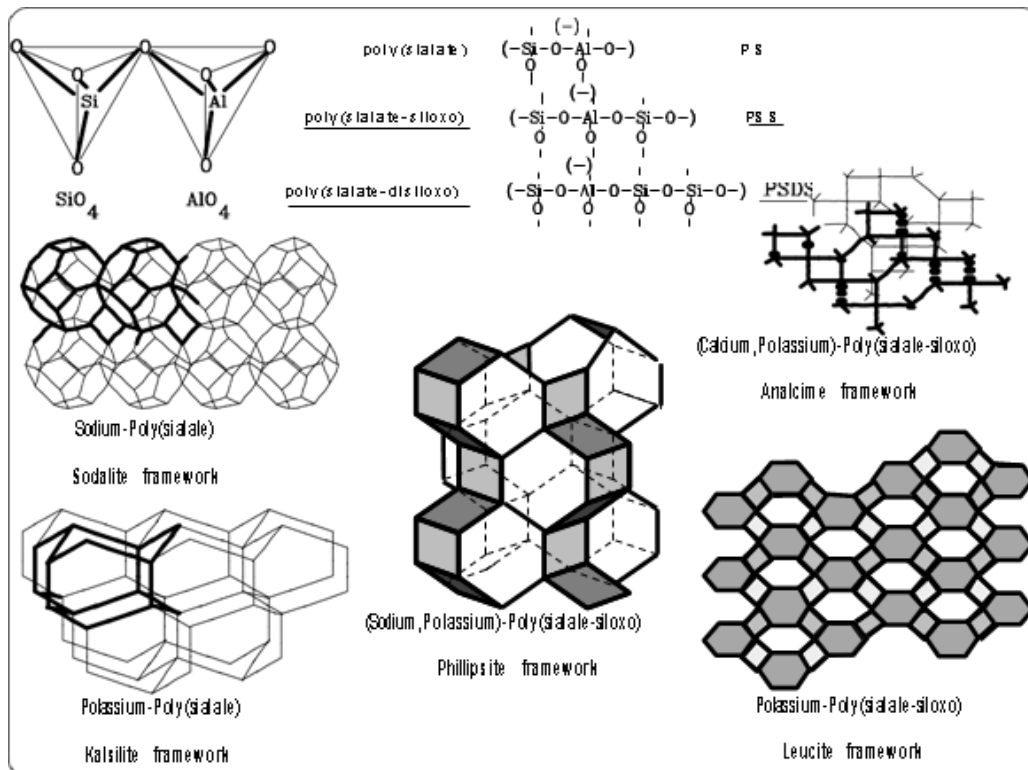


Figura 11: Estrutura espacial dos geopolímeros - Gráficos moleculares computacionais de poli (sialato) (- Si-O-Al-O) e M (- Si-O-Al-O-Si-O-) poli (sialato-siloxo).

Fonte: DAVIDOVITS (1994)

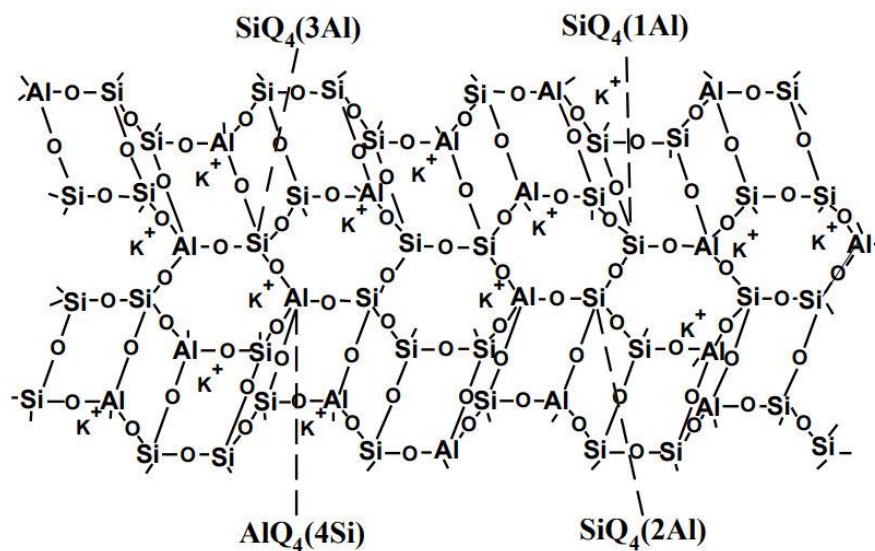


Figura 12: Modelo estrutural para Geopolímero de K-Poli (sialato-siloxo)

Fonte: DAVIDOVITS (1994)

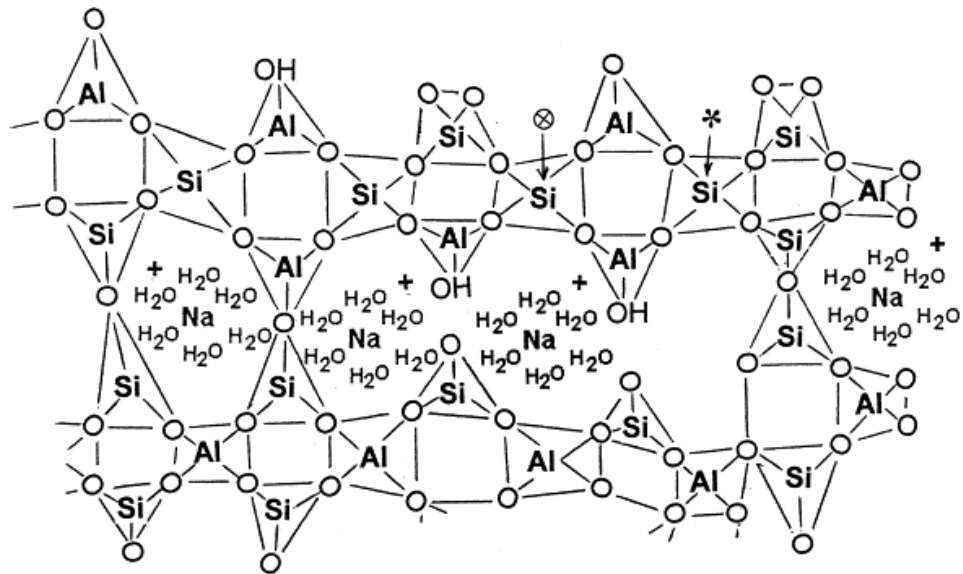


Figura 13: Modelo Estrutura semi-esquemática para Geopolímero proposta para polímero de Na-polissialato

Fonte: DAVIDOVITS (1994)

3.1.4 Propriedades dos Geopolímeros

Os geopolímeros possuem excelentes propriedades físico-químicas e mecânicas, incluindo como a alta resistência mecânica, resistência ao fogo, resistência térmica, resistência química, estabilidade térmica, alta dureza superficial, baixa condutividade térmica, durabilidade, boa resistência à abrasão, cura rápida, excelente aderência aos agregados e reforço, resistência ao congelamento-descongelamento, alta resistência à penetração de cloreto, alta capacidade de reter metais pesados, dentre outras (TURNER e COLLINS, 2010), (SEVERO, COSTA, et al., 2013, SWANEPOEL e STRYDOM, 2002). Por possuírem estas propriedades os geopolímeros são vistos como materiais inovadores e alternativos em aplicações industriais: na área de construção civil, em transporte, na área aeroespacial, na mineração e na metalurgia (PANIAS, GIANOPOULOU e PERRAKI, 2006, SEVERO, COSTA, et al., 2013 e DAVIDOVITS, 2015).

Yang, Song e Song (2017) e Duxson, Fernández-Jiménez, et al. (2006) citam que, uma das maiores vantagens do aglutinante geopolímero é a sua capacidade de reduzir o impacto ambiental por meio do processo de reciclagem. Além disso, a produção de geopolímeros reduz a necessidade de processos de calcinação à alta temperatura em comparação com a fabricação de clínquer para a produção de cimento Portland. Desta forma, os geopolímeros têm alto potencial para uso em

concretos "verdes" com menos impacto ambiental do que os concretos com base em cimento Portland (ZHANGA, WANGA, et al., 2012 e PAPA, 2011) .

Entretanto tais propriedades dependem principalmente da microestrutura do material formado, que por vez depende de vários fatores aludidos anteriormente, como: composição e química do processo, natureza do material precursor, relação Si/ Al, do tipo, concentração e composição do ativador alcalino, parâmetros de cura e etc.(LEONELLI e ROMAGNOLI, 2011) e (PROVIS e VAN DEVENTER, 2007). Portanto, os produtos geopolímeros não possuem todas essas propriedades em conjunto, pois a natureza do produto formado é definida pelas as reações que ocorrem entre a solução alcalina de ativação e os precursores sólidos de aluminossilicatos (PROVIS, 2013).

Segundo Duxson, Provis, *et al.* (2008), não existe uma formulação única, que abrange todas as propriedades supracitadas em um só produto, mas sim uma coleção de possíveis formulações de mistura, nas quais é utilizada uma ampla variedade de matérias-primas, para que se consiga obter um produto com as características desejadas. Assim sendo, conforme o uso pretendido é possível fabricar geopolímeros com diferentes desempenhos, comportamentos mecânico e propriedades. E para melhorar ainda mais as características destes ligantes, se podem incorporar agregados à mistura, de acordo com sua aplicação (OSÓRIO, 2006).

Provis (2013) cita que, devido à ampla gama de matérias primas que podem ser empregadas na obtenção de geopolímeros é essencial desenvolver uma compreensão detalhada do nível molecular das características químicas e físicas que controlam o desempenho macroscopicamente mensurável de materiais ativados por álcalis. Pois a partir da compreensão e conhecimento suficiente da reatividade e química das matérias-primas, é possível adaptar e criar boas combinações, para se obter ligantes com propriedades ótimas (DUXSON, PROVIS, *ET AL.*, 2007).

Desta forma, as propriedades dos geopolímeros e suas aplicações têm sido estudadas, no meio científico e industrial, dentre diversas disciplinas como nos setores da química (química inorgânica, físico-química, química colóide), mineralogia, geologia e tecnologias de processos de engenharia (DAVIDOVITS, 2015). Desta forma em 1982 Davidovits sugeriu com base na química das zeólitas,

vários limites e razões molares de composição, para obter alta resistência mecânica e durabilidade dos compósitos geopoliméricos:

(a) No ativador - $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1.85$

(b) No metacaulim - $0.20 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0.48$

$$3.30 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4.50$$

$$0.80 < \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1.60$$

(c) Entre o ativador e o metacaulim

$$10 < \text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 25$$

Onde está descrito Na, pode estar também K ou Li.

Ressalta-se porém, que alguns autores argumentam sobre os parâmetros relacionados ao material precursor (metacaulim) utilizado por Davidovits, e descrevem quem não se aplicam a outros materiais como: cinzas volantes e escórias de alto forno, tendo em vista, que nem toda a sílica e alumínio são reativos (TORRALBA, CASTRO-GOMES e JALALI, 2008a). Duxson, Fernández-Jiménez *et al.*, (2006) ainda ressaltam que, muitas características macroscópicas de geopolímeros obtidos de diferentes fontes de aluminossilicato podem muitas vezes parecer idênticas, entretanto sua microestrutura e propriedades físicas, mecânicas e químicas variam e dependem principalmente da matéria-prima da qual são derivadas. Desta forma, estes autores apresentam diferentes valores molares proporcionais às fontes de aluminossilicato (GONÇALVES, 2016):

Tabela 2 - Valores de porções molares proporcionais às fontes de aluminossilicato

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	NaOH (mol)	Referências
3,7-4,3	0,46-0,62	-	(THAKUR <i>et al.</i> , 2009)
3,9	-	-	(PROVIS <i>et al.</i> , 2006)
1,76	-	-	(NUGTEREN <i>et al.</i> , 2009)
3,0	-	-	(SILVA <i>et al.</i> , 2002)
2,04	0,46	12	(PALOMO <i>et al.</i> , 1999)
3,57-4,23		5-15	(SATHONSAOWAPHAK <i>et al.</i> , 2009)
2,3	0,85	14	(RICKARD <i>et al.</i> , 2008)
1,6	-	8	(FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ <i>et al.</i> , 2004)
4,05-4,14	0,62-1,05	5 – 10 – 15	(CHINDAPRASIRT <i>et al.</i> , 2009)

2,63	-	4,17-6,81	(PANIAS <i>et al.</i> , 2006) (KOMNITSAS <i>et al.</i> , 2007)
3,3-4,5	0,8	5 – 10 – 15	(RATTANASAK <i>et al.</i> , 2009)
2,0-3,5	-	8 – 16	(HARDJITO <i>et al.</i> , 2004)
1,8-1,9	1,0	-	(BARBIERI <i>et al.</i> , 2010)

Fonte GONÇALVES (2016)

Algumas pesquisas apresentam aspectos particulares observados na formulação dos geopolímeros, que estão diretamente correlacionados ao seu desempenho. Destacasse, que muitos destes aspectos também foram citados no decorrer do texto dos itens anteriores. Na sequência estão descritos alguns dos mais importantes:

O endurecimento rápido

Deriva da alta reatividade do sólido utilizado (por exemplo, metacaulim). (BUCHWALD, 2006).

Força máxima superior derivada reatividade

Depende da matéria-prima, da concentração alcalina da solução de ativador do grau de reação e o teor de água (porosidade). (BUCHWALD, 2006).

Durabilidade.

A durabilidade dos geopolímeros está associada à elevada estabilidade química e estrutura zeolítica amorfa do material (OSÓRIO, 2006).

Alta Resistência à Compressão

A resistência à compressão é determinada pela composição do sólido (teor de cálcio, Si/Al) (BUCHWALD, 2006). Ela também depende de vários outros fatores que incluem a tensão da fase de gel, a proporção da fase de gel/partículas de Al/Si não dissolvidas, a distribuição e a dureza dessas partículas não dissolvidas e a natureza amorfa do precursor (PALMERO, FORMIA, *et al.*, 2015). Sendo que, maiores resistência mecânica estão associadas aos materiais submetidos à calcinação, como cinzas volantes, escórias de alto forno e metacaulim (TORRALBA, CASTRO-GOMES e JALALI, 2008a). Xu (2002) cita, que a reatividade do material

precursor, a composição desejada de fase de gel e o conteúdo de K e Ca no gel são os principais fatores que influenciam na geopolimerização e na resistência à compressão dos geopolímeros. Outros fatores que influenciam são: o teor de umidade, tempo e temperatura de cura, concentração e/ou tipo da solução alcalina utilizada, razão H_2O/SiO_2 e Al_2O_3 (COSTA, BEZERRA, et al., 2013).

Resistência a agentes químicos

Esse comportamento está associado ao baixo teor de compostos de cálcio, bem como à menor permeabilidade dos aglutinantes (PALMERO, FORMIA, et al., 2015).

Resistência ao fogo

Devido à sua estrutura inorgânica, os geopolímeros são intrinsecamente resistentes ao fogo e demonstraram ter uma excelente estabilidade térmica muito superior que as dos cimentos tradicionais (DUXSON, PROVIS, et al., 2005).

Capacidade de reter metais pesados

Está vinculada a organização da estrutura amorfa tetraédrica (análoga aos da zeólitas) do material, qual possui capacidade de fixar grande número de íons eletropositivos como compensação do déficit de cargas negativa. Desta forma, os elementos tóxicos ficam confinados dentro da estrutura química do geopolímero (PINTO, 2004).

Vantagens ecológicas

Os benefícios da geopolimerização quando comparados com a tecnologia de produção cimento Portland baseiam-se na capacidade de utilizar resíduos ou subprodutos industriais como precursor, ação está que gera uma redução altamente significativa nas emissões de CO_2 (DUXSON, PROVIS, et al., 2007). Além disso, para calcinação caulim requer um processo de baixa temperatura (~ 750°C), quando comparada com a utilizada na produção do clínquer de cimento Portland (~1400-1450°C), desta forma, demandando assim menor energia para a sua produção e menor geração de CO_2 (ZHANG, PROVIS, et al., 2014).

Uma propriedade comum dentre os ligantes geopolímeros é o tempo de cura e endurecimento rápido, que varia de 2 a 6 horas, ressaltasse que tal rapidez não causa prejuízo da resistência à compressão, qual propicia o uso do produto formado em poucas horas (PALOMO, ALONSO, *et al.*, 2004) e (DUXSON, LUKEY e VAN DEVENTER, 2006). Davidovits, (2015) explica muito bem esta informação por meio da Figura 14, onde elucida que 1 hora após a execução da concretagem o cimento encontra-se endurecido e resistente o suficiente para o trânsito de pessoas; depois 4 horas está satisfatoriamente resistente para o tráfego de veículos, e após 6 horas está pronto para suportar o peso de um jato comercial.



Figura 14: Tempo de cura versus o uso

Fonte: DAVIDOVITS (2015)

Ressalta-se ainda, que a cura também é um parâmetro importante na produção de um produto de qualidade, pois quando ocorre à formação rápida da estrutura rígida se obtém um produto de baixa qualidade. Além disso, as amostras curadas em baixa temperatura crescem lentamente e possuem menor porosidade e maior dureza. Contrariamente do produto curado a uma temperatura elevada, que produz poros maiores, o que leva ao aumento da estrutura cumulativa dos poros causando um efeito negativo sobre as propriedades mecânicas finais do geopolímero formado (PALMERO, FORMIA, *et al.*, 2015).

3.1.4.1 Características em comparação a outros materiais

Segundo Garnaut (2008) pesquisas realizadas nos últimos anos descrevem, que devido às propriedades particulares presentes nos ligantes geopoliméricos, os

mesmos apresentam maiores vantagens e melhores desempenhos em comparação com materiais tradicionais como: cimentos Portland ordinários e polímeros orgânicos, como plásticos, PVC, epóxis, poliésteres e poliuretanos. Garnaut apresenta também uma síntese ilustrativa (Figura 15) de algumas propriedades ótimas geopolímeros.

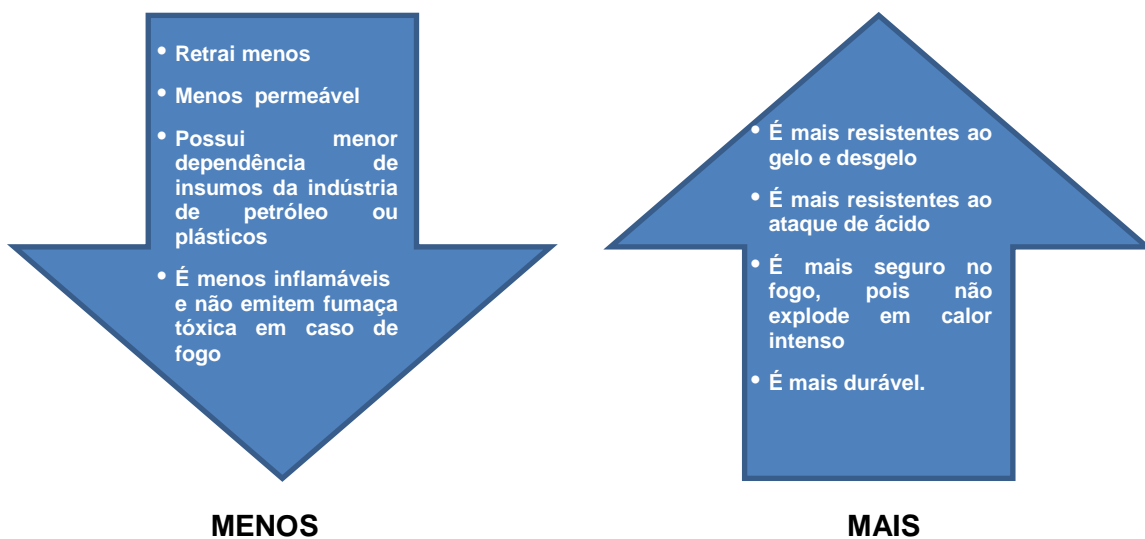


Figura 15: Síntese ilustrativa propriedades dos geopolímeros

Fonte: GARNAUT (2008)

Dentre estas pesquisas destaca-se o estudo realizado por Li, Huang, *et al.* (2005), onde foi verificado que o índice de retração em três argamassas geopoliméricas, confeccionadas com Metacaulim e Fumo de sílica foram menores do que ao da argamassa confeccionada com cimento Portland com fator água/cimento: 0,34 ~ 0,42 (Figura 16).

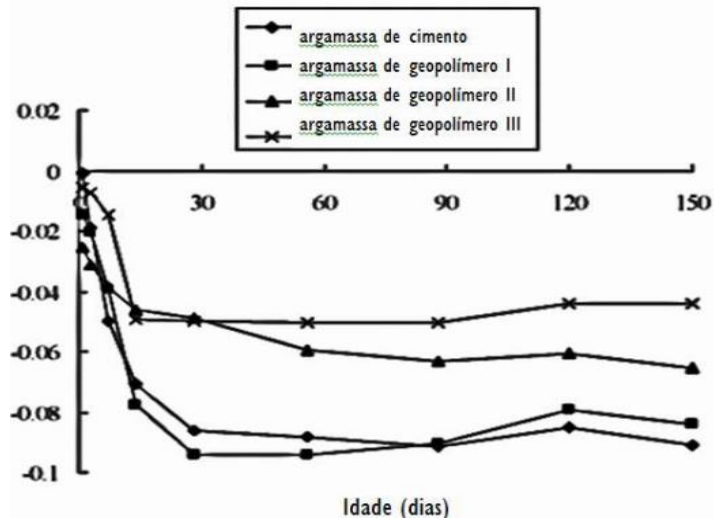


Figura 16: Comparação da retração entre cimentos confeccionados com argamassa tradicionais e cimento geopoliméricos, em função do tempo.

Fonte: LI, HUANG, *et al.* (2005)

Em 1999 Silva, Thomaz, *et al.* avaliaram a resistência a compressão dentre argamassas tradicionais de CPIIE-32 e CPV-ARI Plus, cimentos geopoliméricos confeccionados com pozolana artificial de estrutura amorfa com o alumínio em número de coordenação IV, ativadas com Na,K,Ca-PSS. Por meio da Figura 17 é possível verificar que, o cimento geopolimérico quando curado a 65°C por 4 horas, atinge resistência à compressão da ordem de 45MPa, enquanto o cimento ARI, atingiu 20MPa, chegando a 36MPa somente após 28 dias de idade. Após 3 e 28 dias de cura em temperatura ambiente os cimentos geopoliméricos também apresentaram melhor desempenho.

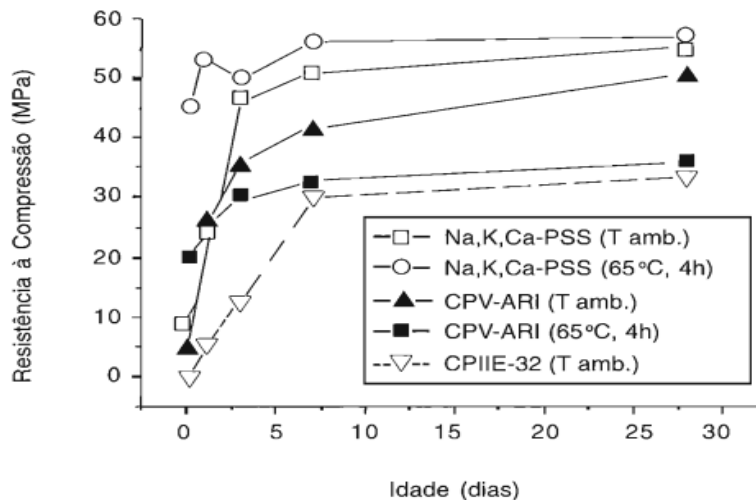


Figura 17: Comparação da resistência à compressão dentre da argamassa tradicionais CPIIE-32 e CPV-ARI Plus, cimento geopoliméricos Na,K,Ca-PSS, em função da idade em dias.

Fonte: SILVA, THOMAZ, *et al.* (1999)

Davidovits (2013), estudou a reação álcali-agregado (RAS) no cimento geopolimérico em comparação com o cimento Portland. E verificou-se após 250 dias que a expansão apresentada pelo geopolímero foi de -0,01 mm/m, enquanto o cimento Portland expandiu em cerca de 1,5mm/m (Figura 18).

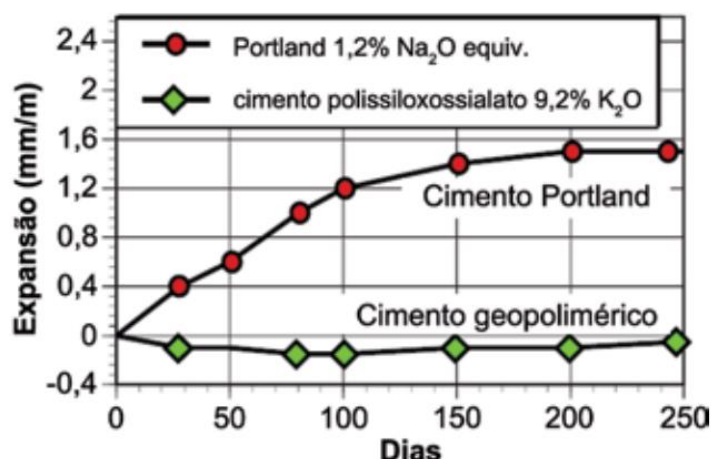


Figura 18: Comparação da reação álcali-agregado em cimentos geopolimérico e cimento Portland.

Fonte: DAVIDOVITS (2013)

Lyon, Balaguru, *et al.*, (1997), investigaram o risco de incêndio dentre compostos aluminossilicados e outros tipos de resinas- ISO 9705 - *Fire tests - Full - scale room test for surface products*, no qual o geopolímero foi o único material que obteve um resultado classificado como excelente, pois não inflamou e não gerou fumaça. A Figura 19, fornece a classificação qualitativa do risco de incêndio desses materiais verificada por estes autores.

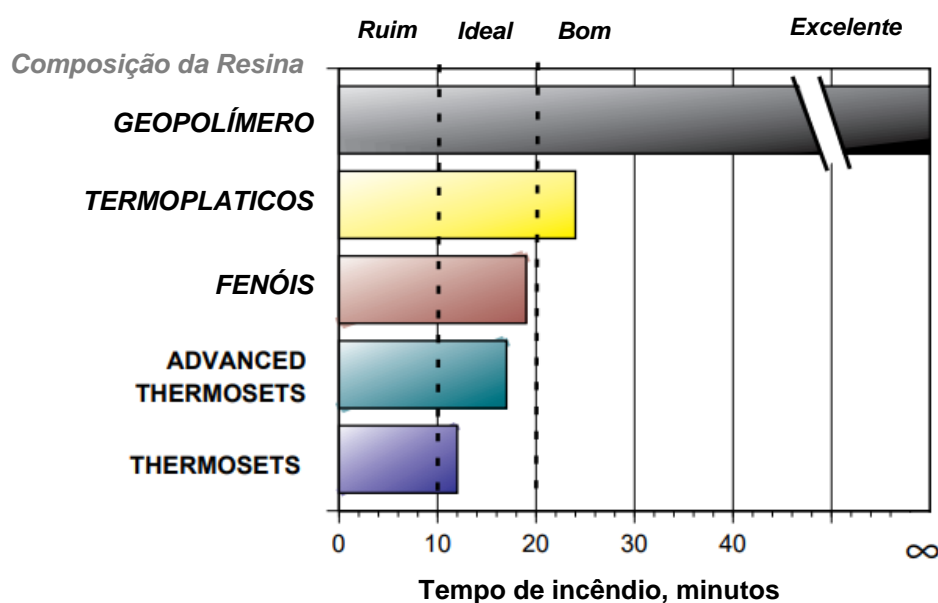


Figura 19: Comparação de risco de incêndio entre geopolímero e resinas.

Fonte: LYON, BALAGURU, *et al.* (1997)

O comportamento térmico das espumas geopolimérica em comparação ao desempenho de outros materiais com a mesma condutividade térmica, também foi avaliada por Davidovits (2015). Como pode ser verificado na figura 20, de todos os materiais que foram expostos a uma temperatura de 1000°C e somente a espuma geopolimérica e o silicato de cálcio resistiram a esta temperatura ao ensaio.

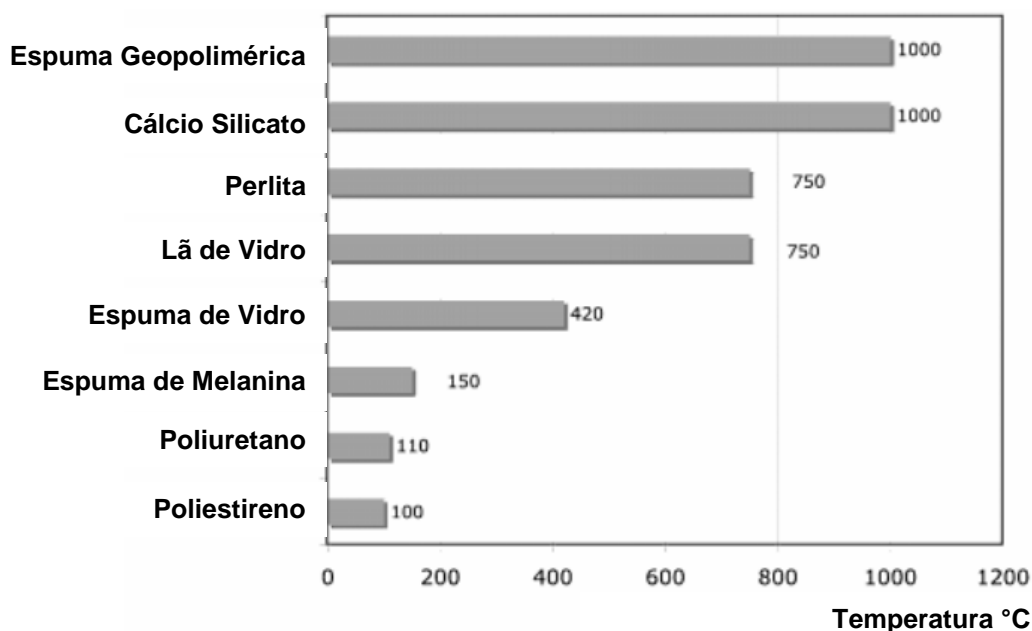


Figura 20: Temperatura máxima de operação para diferentes materiais isolantes

Fonte: DAVIDOVITS (2015)

3.2 Espuma Geopolimérica (Geopolímero Poroso)

Espumas geopolimérica, também denominadas como geopolímeros porosos e espumas inorgânicas são ligantes formados a partir da adição de um agente formador de poros (surfactantes) e são classificadas como nova classe de cerâmicas leves, porosas, alcalinas e de baixa densidade (BURROWS, 1968) e (BAIA e COLOMBO, 2017). Assim sendo, as espumas geopoliméricas são obtidas por meio da introdução de um agente surfactante na pasta geopolimérica (espuma direta), que gera uma estrutura celular com baixa densidade (PAPA, 2011).

Ou seja, as sínteses aplicadas para obtenção de geopolímeros poroso são as mesmas técnicas empregadas na formação de espuma química de concretos tradicionais (ZHANG, PROVIS, *et al.*, 2014) sendo:

- por geração de gás endógeno, mediante a mistura de agentes liberadores de gás, na pasta.

- por meio da introdução de uma fração de volume muito grande de bolhas de ar, geralmente através do uso de um agente espumante orgânico.

Na formulação de geração de gás podem ser usados diferentes agentes surfatantes para sintetizar a espuma geopolimérica (MASI, RICKARD, *et al.*, 2014). Sendo os pós de alumínio, silício metálico e peróxido de hidrogênio os surfactantes mais comumente usados para formação de gases na mistura geopolimérica (ZHANG, PROVIS, *et al.*, 2014). Estes produtos ao serem misturados na pasta de geopolímero reagem com o álcali gerando bolhas de gás produzindo uma microestrutura porosa no material endurecido (AGUILAR, DÍAZ e GARCÍA, 2010). Devido ao aprisionamento de ar que é composto principalmente de nitrogênio menos permeável ao O₂ e H₂ produzidos a partir da decomposição de peróxido de hidrogênio e pós de alumínio e silício metálico respectivamente (ASHBY, EVANS, *et al.*, 2000). No caso do uso de pós, como o silício metálico e o alumínio metálico reagem com o álcali gerando gás, que produz poros com microestrutura tipicamente fechada, aumentando assim o volume total da mistura (BAIA e COLOMBO, 2017) por meio de uma reação muito rápida. Quando se utiliza peróxidos de hidrogênio (H₂O₂), também ocorre uma reação instantânea, onde o H₂O₂ se decompõe em água (CILLA, COLOMBO e MORELLI, 2013).

As espumas inorgânicas, também podem ser formadas pela introdução de uma grande fração volumétrica de bolhas de ar na mistura, principalmente usando agentes espumantes orgânicos como detergentes, resinas de cola, saponina e proteínas hidrolisadas (ABDULLAH, HUSSIN, *et al.*, 2012). Algumas pesquisas apresentam ainda a moldagem de espumas geopoliméricas com o uso de emulsão à base de óleo, que permite obter geopolímeros hierarquicamente porosos adequados para aplicações catalíticas (MEDPELLI, SEO e SEO, 2014 e CANTAREL, NOUAILLE, *et al.*, 2015). Como também agentes tensoativos líquidos que portam ar durante a mistura (AGUILAR, DÍAZ e GARCÍA, 2010),

Em alguns estudos se destaca a aplicação das espumas geopolimérica como um benefício para estrutura de edificações, em termos de carga estrutural, bem como para aplicação como isolamento acústico e térmico de baixa toxicidade com valor de condutividade térmica em torno de 0,22 W/mK (ZHANG, PROVIS, *et al.*, 2014) e

(ABDOLLAHNEJAD, TORRAL e AGUIAR, 2014). Zhang, Provis, et al., (2015) citam que, o uso de espuma em vez de painéis ou placas de materiais térmicos levou a um aumento de 23% no isolamento térmico em parede de tijolos.

Segundo Cilla, Colombo e Morelli (2013), algumas propriedades deste material, como: alta permeabilidade, grande área superficial específica, boas características de isolamento, alta refração, resistência química e boas propriedades mecânicas, faz com que eles também sejam amplamente utilizadas em várias aplicações industriais, como filtros de gás quente, processo de separação sólido/líquido, suporte de catalisador e isoladores térmicos. Zhang, Provis, et al., (2014) também citam, que as espuma geopoliméricas podem ser usadas na construção de edifícios que requerem altas temperaturas ou propriedades de resistência ao fogo em que as espumas orgânicas ou os concretos de espuma Portland não podem atender. E como supracitado os geopolímeros possuem capacidade de imobilização de metais tóxicos, para aumentar a área de absorção deste material são produzidos geopolímeros porosos que podem ser usados como de estruturas filtrantes (AGUILAR, DÍAZ e GARCÍA, 2010).

A formação de espuma para reduzir a densidade de materiais geopolímeros está sendo relatada cada vez mais na literatura, uma vez que demonstrou ser eficaz na melhoria das propriedades isolantes (MASI, RICKARD, et al., 2014). Sendo que, as espumas formadas a partir de espuma química parecem ser mais eficazes na diminuição da densidade, mas podem apresentar grandes vazios desordenados, que afetam negativamente as propriedades térmicas e mecânicas do concreto (HAJIMOHAMMADI, NGO e MENDIS, 2017).

Segundo Ramamurthy, Nambiar e Ranjani, (2009), a porosidade na espuma consiste em poros de gel e poros capilares. Sendo que, materiais que possuem menor quantidade de vazios propiciam a formação de um ligante de espuma mais compacto, com maior resistência à compressão. Os autores ainda destacam que, o uso de materiais de precursores, que possuem partículas mais finas, como cinzas volantes, resultam em espumas com poros distribuídos mais uniformemente. Contudo, conforme citação de Zhang, Provis, et al., (2014), a disposição dos vazios e o tamanho dos poros na estrutura, bem como o comportamento mecânico e as propriedades de durabilidade da espuma irão depender do tipo de surfactante, do método de formação, da composição e da viscosidade da mistura e do processo de

cura.

3.2.1 Agentes Surfactantes

O surfactante é uma abreviatura amplamente utilizada para o agente tensoativo, o que significa literalmente ativo em uma superfície. O termo "superfície ativa" significa que o surfactante reduz a energia livre de superfícies e interfaces (KRONBERG, HOLMBERG e LINDMAN, 2014). Logo, a capacidade de formação de espuma de um surfactante está relacionada à sua eficácia para diminuir a energia interfacial ou a tensão superficial na interface gás-líquido (CILLA, COLOMBO e MORELLI, 2013).

Os surfactantes usados principalmente em soluções aquosas são classificados de acordo com seu grupo hidrofílico em tensoativos aniônicos, catiônicos, não iônicos e anfotéricos (FERNÁNDEZ, BENITO, et al., 2004). No caso de uma pasta contendo precursores de geopolímeros, que tem vários íons em solução (K^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , SiO_4^{2-}), os surfactantes não iônicos têm um efeito mais pronunciado, uma vez que possuem grupos hidrofílicos (CILLA, COLOMBO e MORELLI, 2013).

Salienta-se ainda, que o tipo e concentração de surfactante na mistura pode influenciar o tamanho da célula, a distribuição de tamanho e no grau de interconexão entre células adjacentes (relação célula aberta/fechada) (CILLA, COLOMBO e MORELLI, 2013). Geralmente o aumento na concentração do surfactante provoca um aumento da porosidade total e do tamanho dos poros: o volume total de pasta geopolimérica aumenta e são obtidos os produtos com consistência mais leve do que a matriz geopolimérica (VAOU e PANIAS, 2010).

A baixa viscosidade da pasta permite que o hidrogênio se propague facilmente através da mistura de reação, resultando em menor expansão. Além disso, a baixa viscosidade favorece a coalescência de bolhas de hidrogênio, que levam ao colapso da estrutura quando a pressão do gás excede a tensão superficial no poro (PAPA, 2011). Pois a pressão exercida na parede das bolhas desempenha o papel do esforço de cisalhamento em viscosidade, pois quando elas se deformam geram a expansão das bolhas e a formação de espuma na pasta. Consequentemente a expansão das bolhas causam uma diminuição da pressão de oxigênio sob temperatura constante, eliminando gradualmente o esforço de cisalhamento,

impedindo portanto, a continuação da expansão das bolhas e a formação de espuma na pasta (VAOU e PANIAS, 2010). Neste trabalho foram utilizados três tipos de agentes surfactante para obtenção das espumas geopoliméricas:

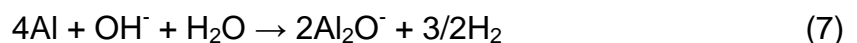
- Silício Metálico

A adição de silício metálico para produção de espuma geopolimérica produz uma reação exotérmica, o que gera o aumento da temperatura e evaporação da água contida na pasta. Este efeito térmico do silício metálico é importante para o processo de formação de espuma de geopolímero, pois reduz os tempos de consolidação e a água disponível na pasta devido ao aumento da temperatura (PAPA, 2011). Quando adicionado à mistura geopolimérica contendo metacaulim e solução alcalina de hidróxido de potássio, o silício metálico em pó gera porosidade em relação à liberação de hidrogênio (H₂) na mistura, qual é gerada conforme as seguintes reações de oxidação de silício em um ambiente básico (PALMERO, FORMIA, *et al.*, 2015):



- Alumínio Metálico

O pó de alumínio metálico é muito reativo em ambientes alcalinos, como hidróxido e silicatos alcalinos. Quando adicionado à mistura geopolimérica o alumínio dissolve-se como aluminato Al₂O⁻ reagindo com hidróxido, onde é liberado H₂, formando bolhas na pasta. Este processo é realizado de acordo com a seguinte equação:



As bolhas do gás H₂ são presas dentro da pasta, expandindo e aumentando o volume. Para evitar a fuga do gás, a pasta deve ter uma consistência adequada e moldagem rápida (AGUILAR, DÍAZ e GARCÍA, 2010).

- *Peróxido de Hidrogênio*

O peróxido de hidrogênio (H₂O₂) é um composto químico de forma aquosa, comumente conhecida como água oxigenada, termodinamicamente instável. O peróxido se decompõe facilmente em água produzindo oxigênio, que exerce o papel de agente de expansão na pasta geopolimérica. Este processo leva ao aumento da viscosidade da pasta de geopolímero, o qual ocorre conforme a seguinte reação (VAOU e PANIAS, 2010):



3.3 Aplicação

Segundo Davidovits, (2015-a) os geopolímeros podem ser aplicados em praticamente todos os campos da indústria, pois existe uma ampla variedade de ligantes geopolímeros. Estão inclusos nestas aplicações: estruturas e materiais resistentes ao fogo, artefatos de pedra decorativos, isolamento térmico, materiais de construção de baixa tecnologia, telhas de cerâmica de baixa energia, itens refratários, refratários de choque térmico, biotecnologias (materiais para aplicações medicinais), blindagens, indústria de fundição, cimentos e concretos, compósitos para reparação e fortalecimento de infra-estruturas, composições de alta tecnologia para interior e automóvel de aeronaves, sistemas de resina de alta tecnologia, contenção de resíduos radioativos e tóxicos, em artes e decoração.

Atualmente em vários países do mundo têm adotado o uso de geopolímeros em diversas atividades, (indústria de moldes, plásticos, aeronáutica, automobilística e construção civil) o uso de geopolímeros em substituição a materiais convencionais (OSÓRIO, 2006). Davidovits em 2002, apresentou por meio do Artigo “30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications” algumas destas aplicações. Dentre elas se destaca o avião de combate francês, denominado Rafale, fabricado em 1986, com moldes e ferramentas em geopolímero para Companhia Aeronáutica Francesa Dassault Aviation.



Figura 21: Avião de combate francês Rafale

Fonte: DAVIDOVITS (2002)

Gourley e Johnson (2005), desenvolveram na Austrália manilhas de esgoto em concreto geopolímero, com diâmetros dentre de 375mm a 1800mm, as mesmas apresentaram boa capacidade de suportar pressões hidrostáticas e resistência a compressão dentre 40 e 60 MPa, em 7 dias. Além disso, por meio de testes realizados em um ambiente de esgoto agressivo foi verificado, que os desempenhos das manilhas de esgoto de concreto geopolímero superaram as fabricados com concreto de cimento Portland.



Figura 22: Manilhas fabricadas em concreto geopolímero (D=150mm)

Fonte: GOURLEY e JOHNSON (2005)

Uma empresa em Spartanburg, EUA desenvolveu uma serie de produtos com base geopolimérica, para reparação e revestimento interno de manilhas, tubos, túneis e

áreas de contenção de concreto Portland deteriorada (MILLIKEN, 2017). Ressalta-se, que este tipo de aplicação também vem sendo usado por alguns países europeus e na também na Austrália.



Figura 23: Aplicação de produtos geopoliméricos de revestimento de concretos deteriorados

Fonte: MILLIKEN (2017)

A Austrália é o país que tem apresentado uma ampla quantidade de pesquisas sobre o geopolímero. No qual, a produção do material atualmente atinge uma escala comercial (FROENER, 2016). Desta forma, algumas empresas do País vêm comercializando em grande volume linhas de produtos geopoliméricos, compostos de uma mistura de cinzas volantes e escória granulada de alto forno, para projetos de infraestrutura civil (VAN DEVENTER, PROVIS e DUXSON, 2012 e PROVIS e BERNAL, 2014).



Figura 24: Obras com geopolímeros na Austrália (a) Piso/Laje de habitação residencial, (b) Painéis externos pré-moldados de uma edificação, (c) calçadas e (d) muro de contenção em torno de uma ponte rodoviária. **Fonte:** PROVIS e BERNAL (2014)

Entre as obras executadas na Austrália é importante destacar a primeira edificação construída no País com painéis (33) pré-moldados de concreto geopolimérico, composto de quatro pavimentos. Que é o edifício da Global Change Institute da Universidade de Queensland, em Brisbane, inaugurado em 2013 (DAVIDOVITS, 2013a).



Figura 25: a) Visão geral do edifício Global Change Institute, b) Peça pré-moldados de concreto geopolimérico utilizados na construção da edificação. **Fonte:** DAVIDOVITS (2013a)

Outra obra de destaque na Austrália é a construção do aeroporto Brisbane West Wellcamp - BWWA, Toowoomba, Queensland em 2014, construído em cinco meses, onde foram edificados 55.000m² de pavimento com espessura de 43,5 cm, com a utilização de aproximadamente 40.000 m³ de concreto geopolimérico (GLASBY, DAY, *et al.*, 2015).



Figura 26: a) Cura do pavimento geopolimérico, b) concretagem finalidade, c) vista geral da pista do aeroporto do BWWA e d) operação do aeroporto BWWA

Fonte: GLASBY, DAY, *et al.* (2015)

Também existe muitas aplicações para as espumas geopoliméricas, como filtro para tratamento de efluentes, catalizador, painéis para isolamento termo acústico, lajotas para revestimento e até mesmo *drug delivery* e confecção de osso sintético e etc. (PAPA, 2011). Na Itália, por exemplo, existe uma empresa, que por meio do projeto LIFE+ "Energeo", da Comissão Europeia implementou uma planta industrial piloto, para a produção de lajotas de revestimento de pisos em geopolímero. O empreendedor teve como objetivo demonstrar a viabilidade produção do material em escala industrial e reduzir os efeitos das emissões de gases estufa e consumo

energético de sua produção, fabricando assim um material ecoeficiente. Tal produto, denominado como “Geopolfloor” produzido com pasta e espuma geopoliméricas foi estudado e fabricado em parceria com as Universidades de Modena e Reggio Emília. Por meio de ensaios laboratoriais foram obtidas as resistências mecânicas a flexão > 7 MPa e resistência térmica de 800 °C (Ceramiche Gardenia Orchidea, 2009).



Figura 27: Lajotas geopoliméricas - “Geopolfloor”

Fonte: CERAMICHE GARDENIA ORCHIDEA (2009)

Também 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 3MPa de resistência à flexão (MEDRI, 2015). Ressalta-se que na Austrália também existe uma empresa que fabrica e comercializa painéis como estes.

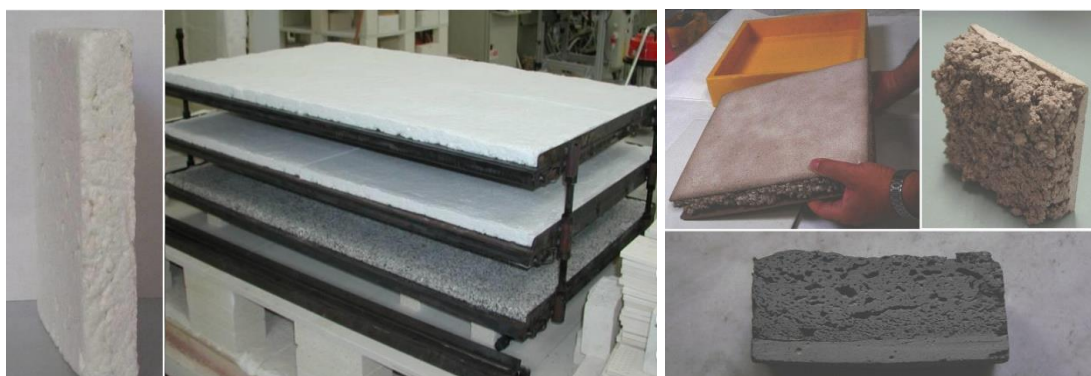


Figura 28: Painéis estruturais e ultraleves repelente de água para isolamento térmico e acústico

Fonte: MEDRI (2015)

Comercializações de materiais geopoliméricos também vêm sendo realizadas com grande protuberância em diversos países da União Européia. A produção comercial de produtos de construção ativados por álcalis, também tem crescido no Reino Unido, Holanda e República Tcheca (PROVIS e BERNAL, 2014).

No Brasil, o uso dos geopolímeros na construção civil, ainda é modesto, como exemplos podem ser citados o desenvolvimento de pedras e peças arquitetônicas utilizadas no acabamento do Templo de Salomão, recuperação do pavimento do aeroporto de Guarulhos e o Cobogó do Restaurante Manish, as três as construções localizadas em São Paulo. A empresa Wincret Designer Concrete Products Ltda. de marca denominada “Geo-Pol2”, com sede em São Paulo comercializa os produtos com base geopolimérica no País abrangem três linhas de produtos: o Cimento GP, o Microcimento GP-E e “Musse” GP-B (FROENER, 2016).

3.3.1 Relação Al/Si versus aplicação

Como pode ser verificado são diversos os usos dos geopolímeros. Ressalta-se que, existem vários outros exemplos de aplicações deste material ao redor do mundo. Contudo, a aplicação do geopolímero, está associada as suas propriedades, que por vez estão correlacionada com a composição química do geopolímero formado, logo a relação Si/Al influem diretamente no produto fabricado e na sua futura aplicação.

A razão atômica Si:Al nos ligantes geopoliméricos irá variar de acordo com o precursor utilizado. Davidovits (1991) cita, que ao modificar a relação dentre a composição de Si:Al e Na:Al, os materiais resultantes poderiam ter diferentes propriedades físicas e mecânicas. Segundo Provis e Van Deventer (2013) as relações Si/Al mais baixas, são obtidas estruturas tridimensionais rígida, do tipo zeolítico, que favorecem a obtenção de altas resistências mecânicas. As relações altas produzem materiais com características poliméricas resistente ao fogo e ao calor, chegando a resistir a temperaturas de até 1200°C. De acordo com o aumento da razão atômica Si/Al (até 35), vão-se obtendo materiais com maior carácter polimérico, formando assim cadeias mais largas e mais adequadas a outros tipos de aplicações, pois passa a existir menos alumínio, e o mesmo começa a funcionar como *cross-link* ligando cadeias longas de Si-O-Si-O- (DAVIDOVITS, 1994). Davidovits (2002) apresenta um quadro síntese (Figura 29) dos possíveis tipos de

materiais geopolimérica que podem ser obtidos, em função das razões Si/Al, versus o campo de aplicação.

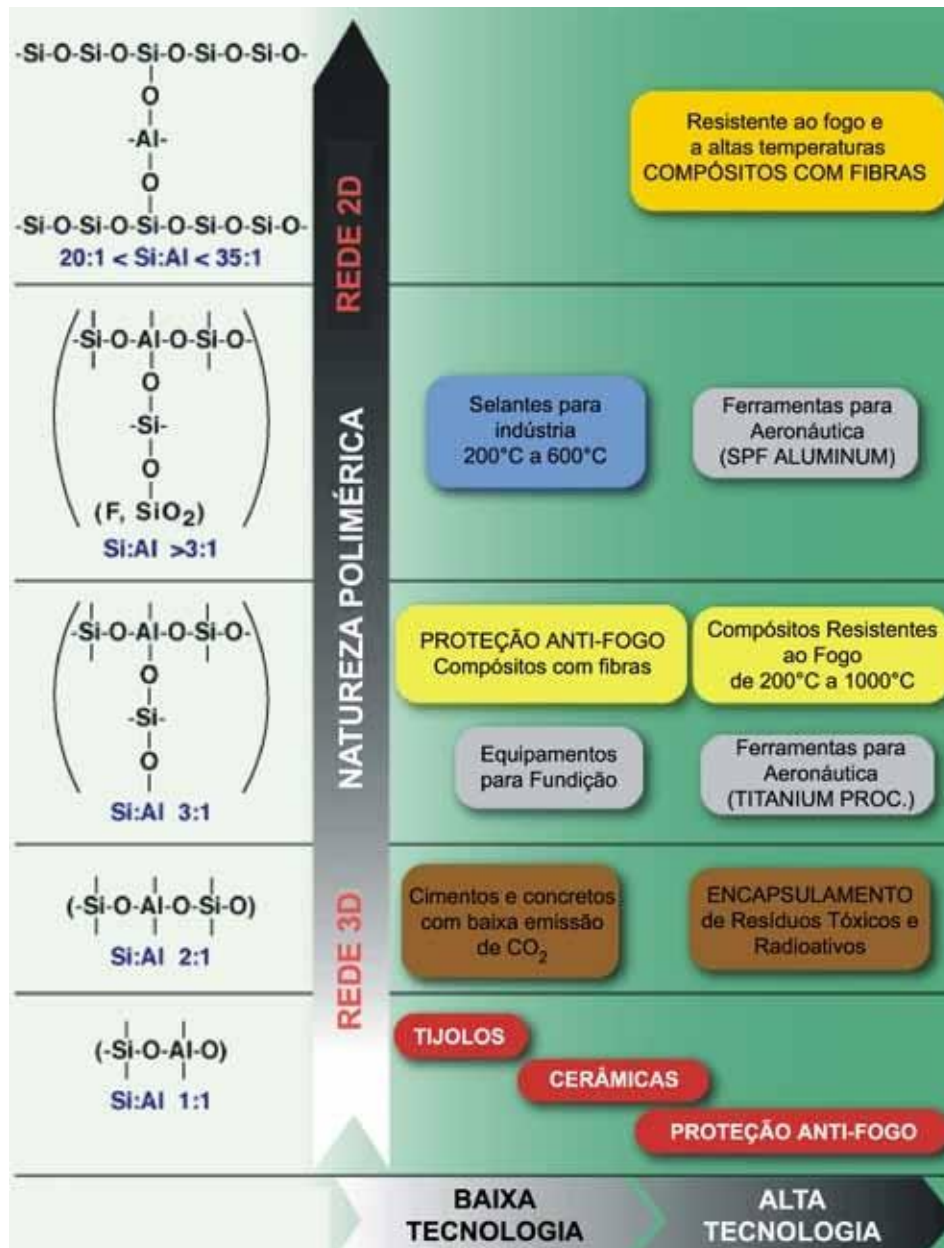


Figura 29: Aplicações em função da relação Si/Al

Fonte: DAVIDOVITS (2002)

Portanto, o desenvolvimento dos geopolímeros e suas aplicações são orientados por duas grandes linhas de atuação, que dependem das características de cada produto, envolvendo maior ou menor intervenção tecnológica (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009):

- uma com à obtenção de materiais de baixo custo, para o uso em grandes quantidades, como materiais de construção. Onde as matérias primas de base podem ser, além dos metacaulims, as escórias granuladas, as cinzas volantes e todos os aluminossilicatos que possuem uma razão atômica Si/Al que varia de 1 a 3.
- E outra dirigida à obtenção de materiais mais onerosos, em que a razão atômica referida pode alcançar valores até 35. Estes materiais poderão, substituir plásticos, certos metais e produtos cerâmicos.

4 Materiais e Métodos

A síntese, a análise da macroestrutura e o desempenho mecânico de espumas geopoliméricas obtidas por meio de diferentes agentes surfactantes foi de caráter experimental e se concretizou pela comparação com uma pasta de referência.

4.1 Materiais

Foi utilizado como precursor Metacaulim, produzido pela Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda., cuja composição química é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do Metacaulim do Brasil

PROPRIEDADES QUÍMICAS									
<i>Metacaulim</i>	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
	55,5%	36,5%	2,0%	1,0%	0,5%	0,5%	1,5%	0,1%	0,1%

Fonte: Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

Para a confecção da solução ativadora utilizou-se:

- Hidróxido de Potássio (KOH) sólido de alta pureza (PA), na forma de lentilhas, com 85,09% pureza da marca NEON, comercializada pela Sulfal Química,
- água deionizada.

Como agentes formadores de espuma utilizaram-se os surfactantes:

- Peróxido de Hidrogênio (H₂O₂), volume 10, na forma aquosa, da marca Farmax;
- Silício Metálico, na forma de pó, fornecido pela empresa Ferro Ligas Brasil;
- Alumínio Metálico, na forma de pó fornecido pela Magnesita.

4.2 Métodos

A metodologia experimental foi composta de quatro (4) etapas:

Etapa 1: caracterização do metacaulim quanto à estrutura do arranjo atômico;

Etapa 2: preparação as solução ativadora;

Etapa 3: moldagem dos corpos de prova (CP^S);

Etapa 4: caracterização das pastas.

A representação esquemática da metodologia empregada nos trabalhos experimentais é apresentada na Figura 30.

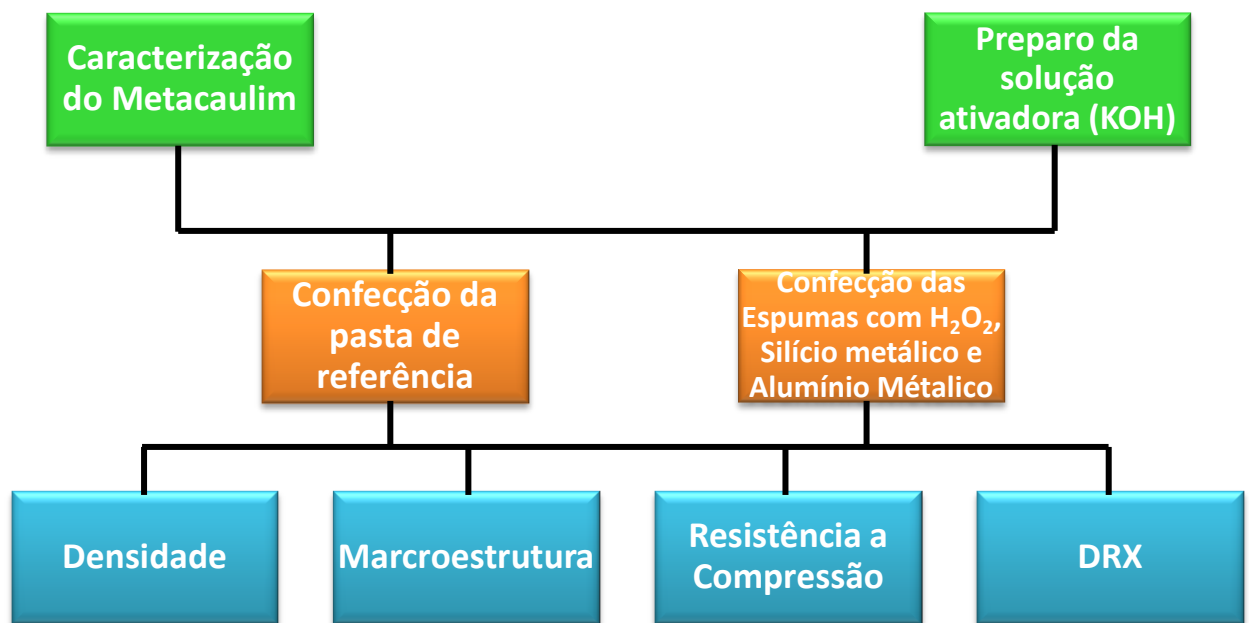


Figura 30: Representação esquemática da metodologia dos trabalhos experimentais

Fonte: Dados da pesquisa

Os ensaios foram realizados nos laboratórios da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica, do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção e Laboratório de Raios X, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

4.2.1 Caracterização do metacaulim

A caracterização do metacaulim foi realizada por difratometria de raios X utilizando Difratômetro da marca PANalytical, modelo Empryean, com tubo cobre (Cu), detector proporcional de Xe (xenônio), radiação Cu – K α , (40 kV, 25 mA). As

amostras foram varridas com ângulo de $3,03^\circ$ - $89,97^\circ$ (2θ), comprimento de onda de $1,5406 \text{ \AA}$ (alfa 1), passo de $3,03^\circ$ - $89,97^\circ$ (3° - 90°), sendo as intensidades registradas por 1s em cada passo de $0,06^\circ$.

4.2.2 Preparação da solução ativadora hidróxido de potássio - KOH

Utilizou-se como solução ativadora KOH a 10 mols. Segundo Alonso e Palomo, (2001a), quando a concentração do ativador é < 5 mols, a ativação do metacaulim ocorre apenas em menor grau e o produto da reação principal é o gel C-S-H. Se a concentração do ativador for de ≥ 10 mols, a dissolução do metacaulim é muito rápida e o produto de reação principal é um aluminossilicato com alto desempenho mecânico. Provis e Van Deventer (2013) e Davidovits (2013) também citam que as pastas geopoliméricas ativadas K-silicato/KOH proporcionam maior resistência mecânica, devido o K^+ ser mais básico, em comparação com Na^+ , logo ele permite maiores taxas de solubilização, ionização e dissolução. Além disso, o K^+ possui uma menor esfera de hidratação, portanto ele tende a permitir reações de policondensação mais densas, que podem proporcionar uma maior formação de redes poliméricas.

A solução foi preparada com antecedência de 24 horas para garantir o seu resfriamento, pois em seu processo de produção ocorre uma reação exotérmica (GONÇALVES, 2016). O procedimento para obtenção da solução consistiu na pesagem das lentilhas KOH e dissolução das mesmas em água deionizada com auxílio de um Agitador Magnético marca IKA-MAG HP 4.

4.2.3 Confeção dos Corpos de Prova

Após a pesagem dos materiais em uma balança de precisão, da marca BEL Engineering, foram produzidas pastas de referência e espumas geopoliméricas utilizando metacaulim e KOH 10 mols, na proporção de 1 para 0,85 em peso. Para a síntese foi realizada uma mistura manual da solução alcalina com o metacaulim. No caso das espumas se utilizou surfactantes nas proporções de 1 de metacaulim para 0,1 e 1% do agente surfactantes. Os agentes surfactantes utilizados foram H_2O_2 , alumínio metálico e silício metálico. Iniciou-se a preparação da espuma com a

mistura uniforme dos agentes surfactantes em pós com o precursor e posteriormente houve a adição da solução de KOH a 10 mols, após a total homogeneização da massa, as pastas foram vertidas nas formas. A confecção das espumas formuladas com peróxido de hidrogênio foi executada de um modo similar, porém devido à forma aquosa do agente surfactante, os três materiais, metacaulim, H₂O₂ e KOH, foram misturados simultaneamente, até se obter uma pasta homogênea e depois foram colocadas nas formas. Ressalta-se que, as misturas foram realizadas de formas independentes da quantidade do agente tensoativo.

Foram moldados vinte um (21) corpos de prova cilíndricos com diâmetro de aproximadamente 2,8cm e altura de 5,6cm, sendo três (3) amostras de pasta geopolimérica de referência e dezoito (18) de espumas geopoliméricas. Na tabela 4 são apresentadas a nomenclatura utilizada para as diferentes pastas.

Tabela 4 - Composição dos corpos de prova de espuma geopoliméricas

Amostras	Metacaulim Brasil	Solução KOH 10mols	Agente surfactante
1-Ref.	1	0,85	-
2-Ref.			
3-Ref.			
1-PH1-0,1%	1	0,85	Peróxido de hidrogênio 0,001%
2-PH-0,1%			
3-PH-0,1%			
1-PH-1%	1	0,85	Peróxido de hidrogênio 0,01%
2-PH-1%			
3-PH-1%			
1-Si-0,1%	1	0,85	Silício metálico 0,001%
2-Si-0,1%			
3-Si-0,1%			
1-Si-1%	1	0,85	Silício metálico 0,01%
2-Si-1%			
3-Si-1%			
1-Al-0,1%	1	0,85	Alumínio metálico 0,001%
2-Al-0,1%			
3-Al-0,1%			

1-AI-1%	1	0,85	Alumínio metálico 0,01%
2-AI-1%			
3-AI-1%			

Fonte: Dados da pesquisa

4.2.4 Caracterização das pastas

As amostras, após serem curadas à temperatura ambiente, durante 14 dias, foram avaliadas quanto à densidade, distribuição porosimétrica e resistência mecânica. A ocorrência da geopolimerização foi avaliada por DRX após 60 dias da moldagem.

Para avaliação da densidade, todos os corpos de prova foram medidos com o paquímetro Mitutoyo com precisão de 0,1mm e pesados em uma balança de precisão da marca BEL Engineering com precisão 0,001g. Após obtenção das medidas dos CP^s, realizou-se o cálculo da densidade por meio da equação de grau de concentração de massa volumétrica:

$$d = \frac{m}{V} \quad (9)$$

em que, *d* é a densidade. *m* é a massa da amostra e *V* é o volume.

Para avaliação da distribuição porosimétrica, as amostras foram fotografadas com Microscópio Digital Micro-Measurement, com 1000 vezes de ampliação. Logo após foi realizada a leitura do número e tamanho dos poros nestas imagens, utilizando o software ImageJ, no formato voxel de dados de 8 bits/make binary. Depois foi realizada a compilação dos dados e a análise comparativa dentre os resultados obtidos.

Para o ensaio de resistência mecânica à compressão as amostras tiveram que ser preparadas e lixadas, utilizando a Politriz Struers DP-10, para que suas superfícies ficassem uniformes e paralelas. Posteriormente foi realizado o rompimento dos CP^s por compressão, utilizando a máquina universal de ensaios, da marca Instron, série 5500, modelo 5582, com capacidade de 100KN, usando a taxa de aplicação de 1 N/s.

Com objetivo de verificar a natureza das fases e das estruturas do arranjo atômico das matérias primas, metacaulim, bem como das amostras. Para tal ensaio os fragmentos das amostras do CP de referência e das espumas geopoliméricas foram triturados manualmente com o uso de um pistilo e almofariz, e depois foram passados na peneira nº 200 (#0,075mm) e caracterizadas por Difração de Raios X, utilizando o mesmo procedimento e equipamento descrito no item 3.2.1.

5 Resultados e Discussão

5.4 Difração de raios X

5.4.1 Metacaulim

Por meio da difração de raios X do metacaulim (Figura 36) observou-se a formação de um halo difuso compreendido dentre os ângulos de $\approx 15^\circ$ a 35° (2θ), o que caracteriza a estrutura amorfa do material. Segundo Barnes e Bensted (2002) e Fernandez-Jimenez, Torre, *et al.* (2006) essa é uma propriedade essencial para uma geopolimerização plena, uma vez que, quanto mais amorfa a estrutura do material precursor maior será a reação de geopolimerização.

Também foram constatados alguns picos cristalinos, nos quais se verificou a presença de materiais como mica e quartzo; certamente originados da calcinação incompleta da caulinita (GONÇALVES, 2016) e (TRINDADE, SILVA, *et al.*, 2017). As informações da presença dos compostos foram fornecidas pelo The International Centre for Diffraction Data. Contudo, como citado por Duxson, Fernández-Jiménez, *et al.*, (2006) a maioria dos metacaulins comerciais contem níveis de impurezas, principalmente a moscovita e o dióxido de titânio, o efeito dessas impurezas é limitado devido sua baixa dissolução na geopolimerização, desta forma, estes produtos não interferem no mecanismo de formação dos geopolímeros.

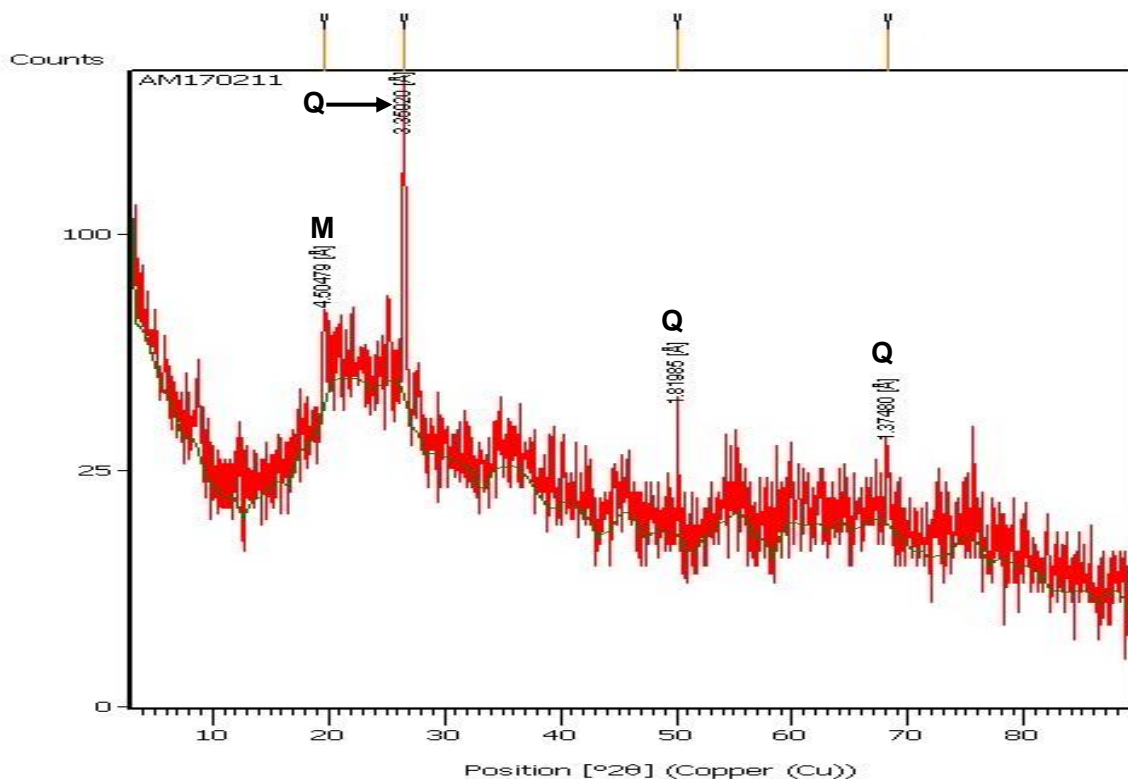


Figura 31: Difratograma do material do Metacaulim (M= Mica e Q= Quartz)
 Fonte: Dados da pesquisa

5.4.2 Pastas Geopoliméricas

Os difratogramas das pastas produzidas são apresentados nas figuras 37 a 43. Em todas as amostras observou-se a presença de halo amorfo em torno dos ângulos $\approx 27^\circ$ - 29° (2θ), que é característico da geopolimerização (DAVIDOVITS, 1994) e (DUXSON, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, *et al.*, 2006). Zhang, Provis, *et al.* (2013) citam, que a presença acentuada de um halo amorfo em $2\theta \approx 27^\circ$ representa a formação do gel aluminosilicato (N-A-S-H).

Também se verificou fases cristalinas nas amostras, com a presença de mica, e quartzo, originárias do material precursor. Sendo que, o pico de maior intensidade em todas as amostras foi registrado no ângulo $27^\circ(2\theta)$ e indica a presença de quartzo (3.34Å , 3.35Å). Observou-se ainda, a presença de materiais cristalinos da família do Plagioclásio nas amostras 1-Si 0,1%, 1-PH0,1% e 1-Al-0,1%, os produtos formados também podem ter sido originados do metacaulim, tendo em vista, que não é comum a existência desta fase em geopolímeros.

E apesar da adição de diferentes surfactantes, não se constatou alteração

significativa de fases formadas dentro as amostras. Contudo, as amostras 1-Si-0,1%, 1-Al-0,1% e 1-Al-1% apresentam menor incidência de fases cristalinas.

As informações da presença dos compostos foram fornecidas pelo The International Centre for Diffraction Data.

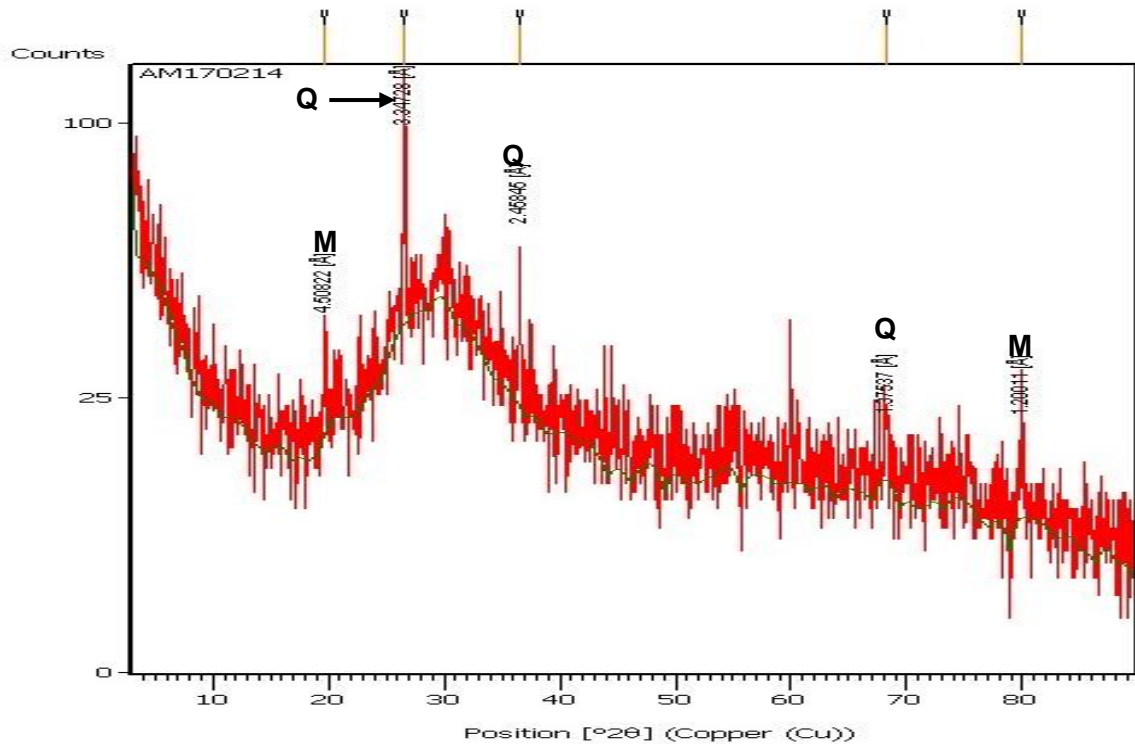


Figura 32: Difratoograma da amostra de referência (M= Mica e Q= Quartzo)
Fonte: Dados da pesquisa

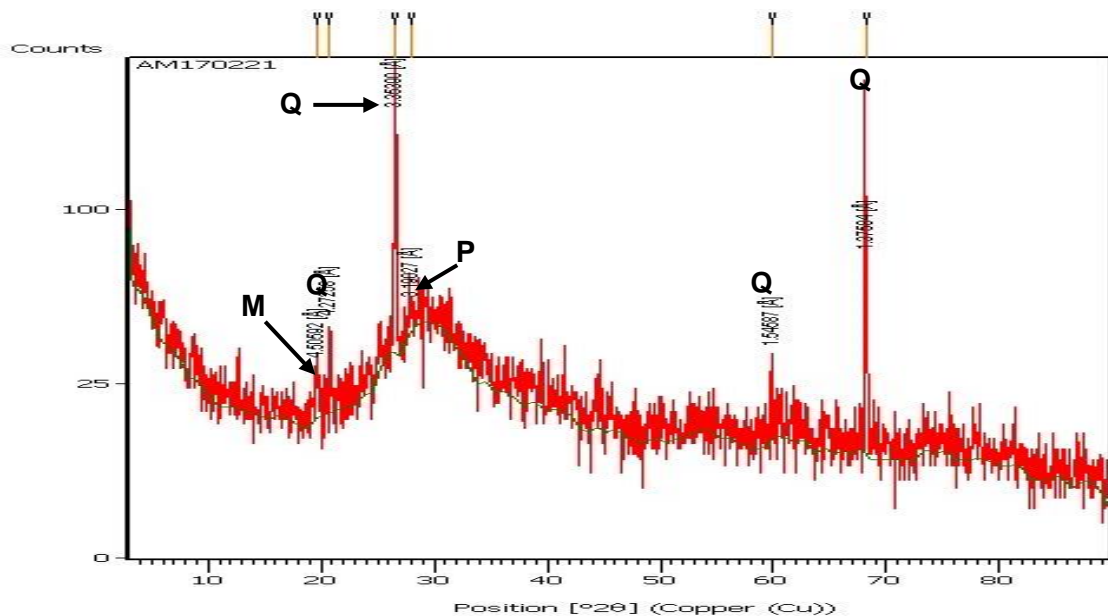


Figura 33: Difratoograma da amostra com silício metálico 0,01% (M= Mica, P=Plagioclásio e Q= Quartzo).
Fonte: Dados da pesquisa

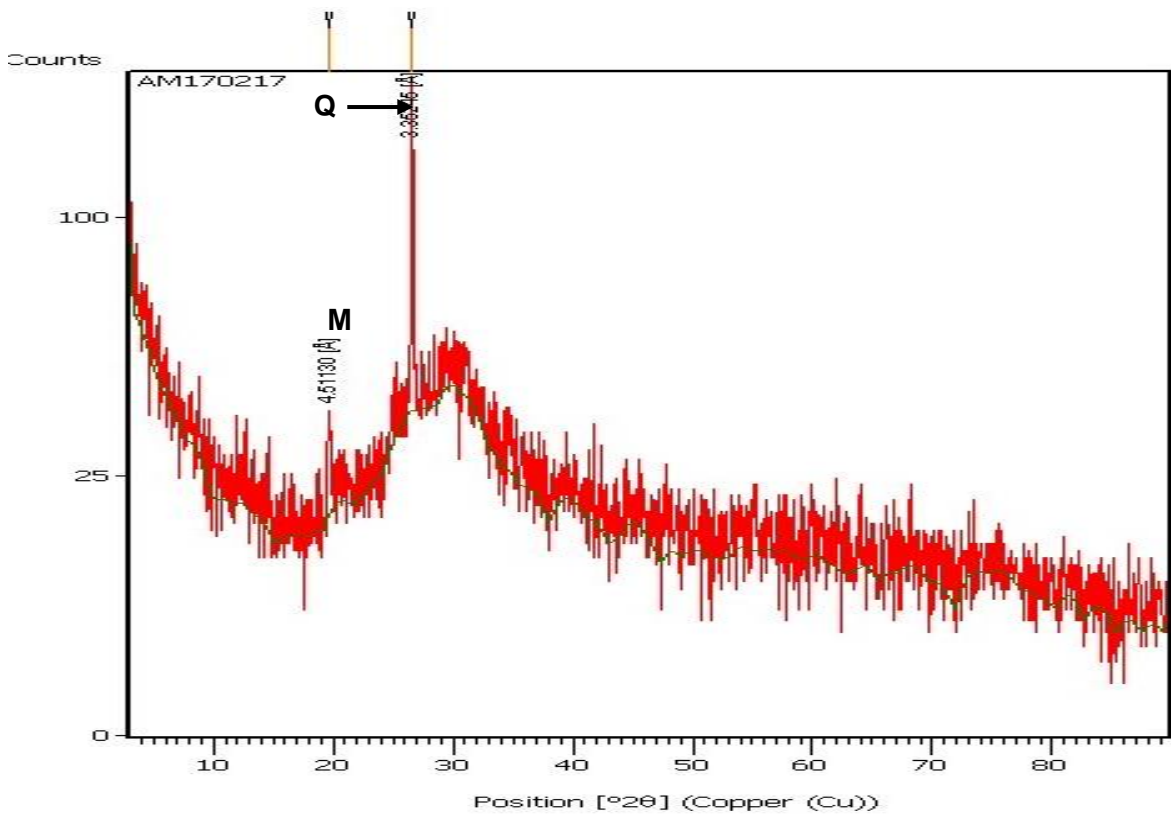


Figura 34: Difratograma da amostra com silício metálico 0,1% (M= Mica e Q= Quartz)
 Fonte: Dados da pesquisa

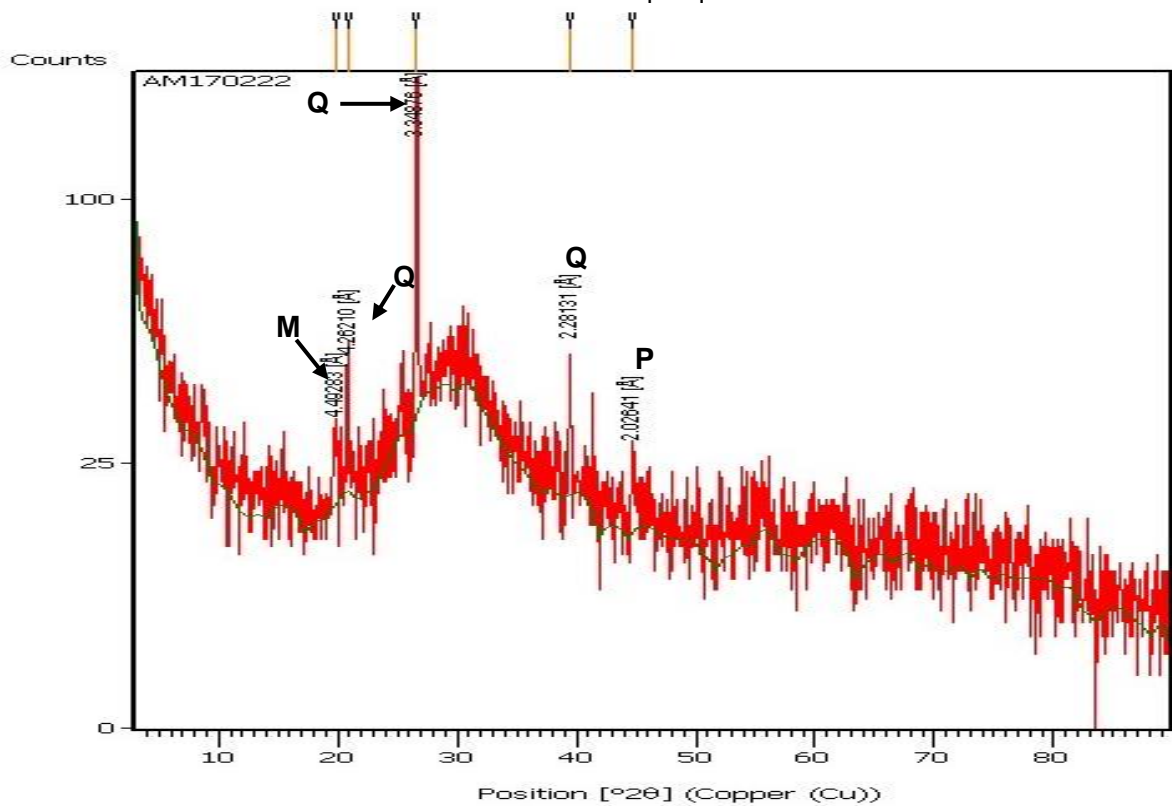


Figura 35: Difratograma da amostra com peróxido de hidrogênio 0,01% (M= Mica, P=Plagioclásio e Q= Quartz).
 Fonte: Dados da pesquisa

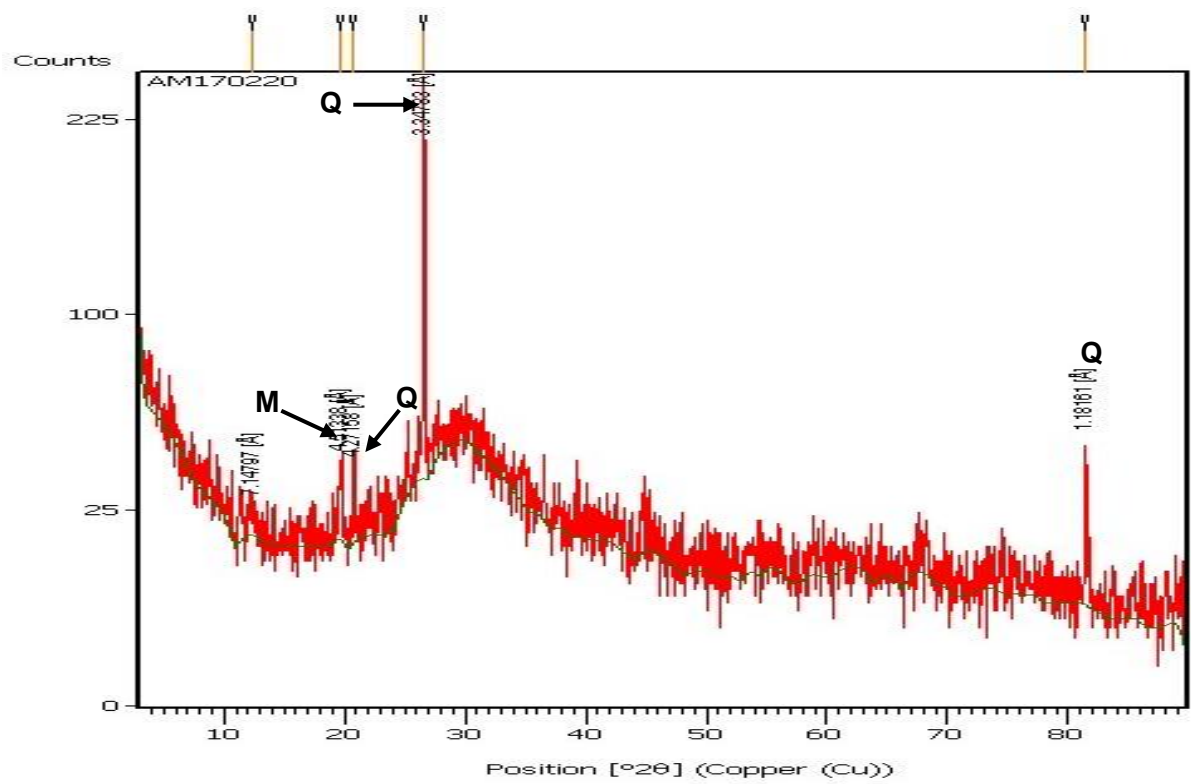


Figura 36: Difratoograma da amostra com peróxido de hidrogênio 0,1% (M= Mica e Q= Quartzo).
 Fonte: Dados da pesquisa

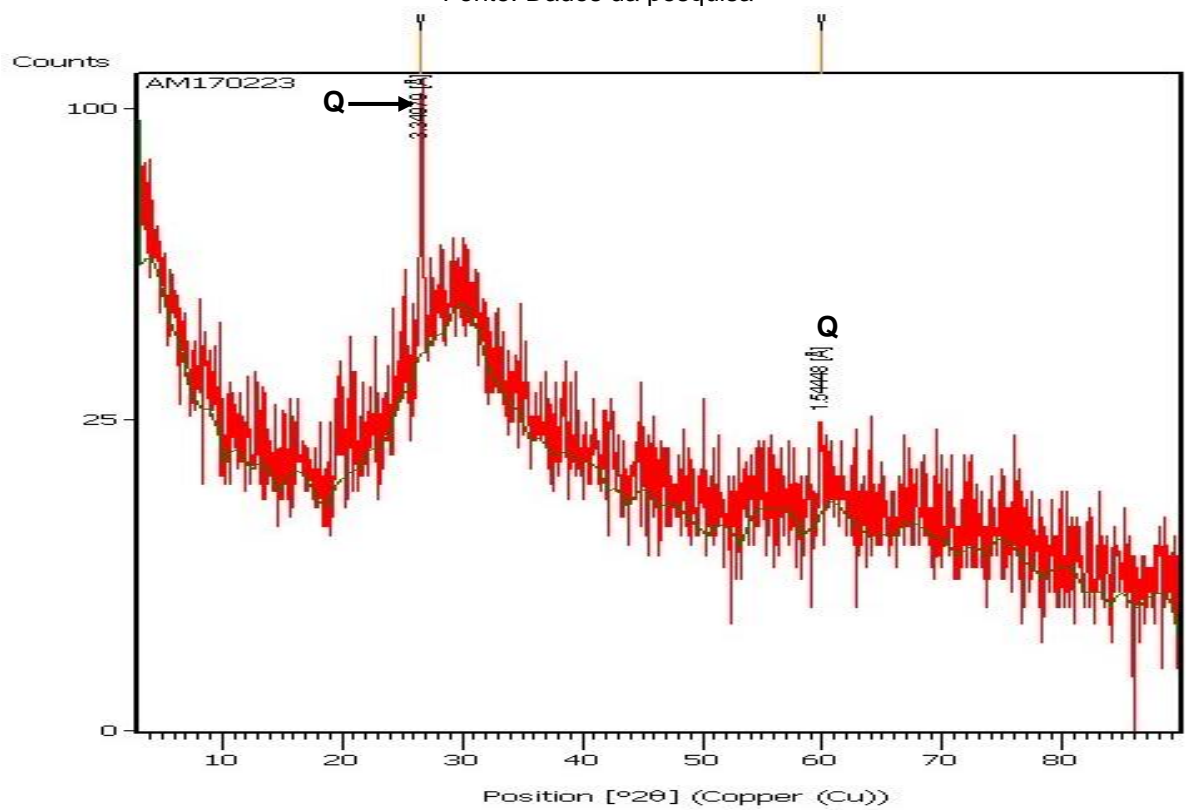


Figura 37: Difratoograma da amostra com alumínio metálico 0,01% (M= Mica e Q= Quartzo).
 Fonte: Dados da pesquisa

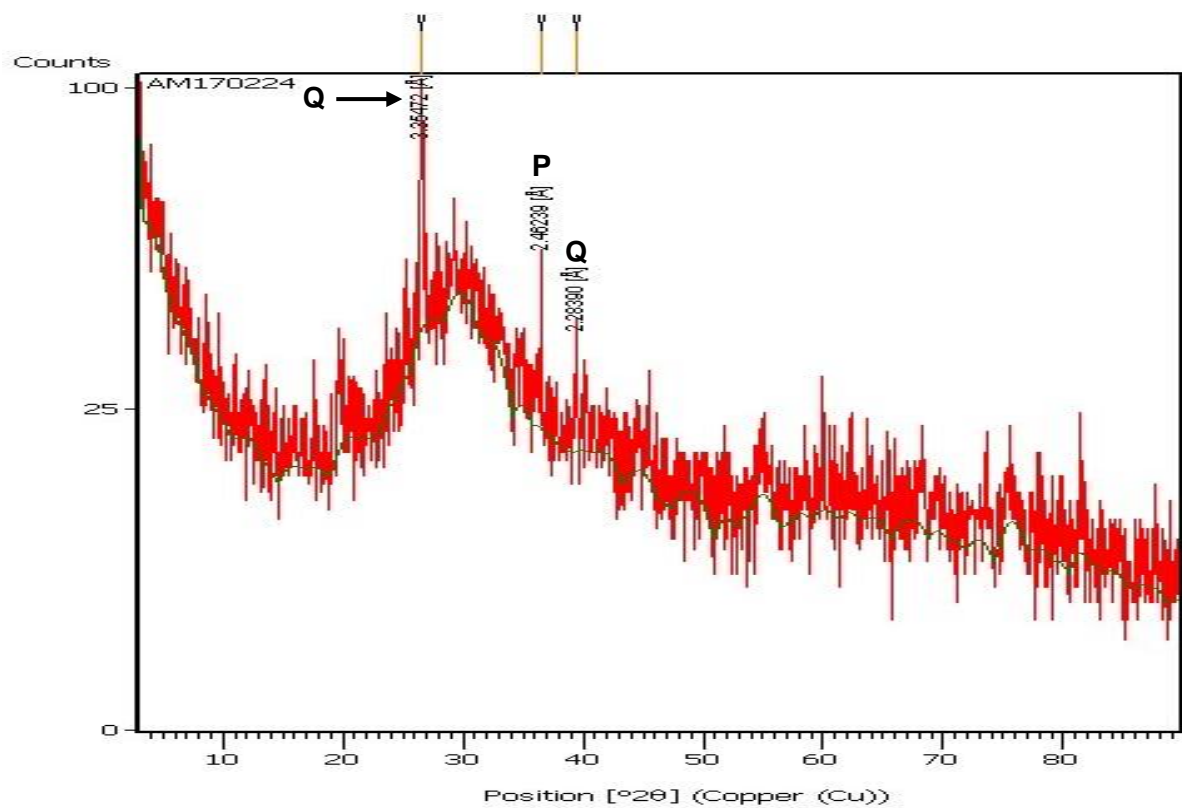


Figura 38: Difratoograma da amostra com alumínio metálico 0,1% (M= Mica, P=Plagioclásio e Q= Quartzo).
 Fonte: Dados da pesquisa

5.1 Densidade

Todas as amostras foram desenformadas após 24h de cura a temperatura ambiente, e foram mantidas no mesmo ambiente por 14 dias. Entretanto, algumas amostras apresentaram baixo volume, assim sendo, elas foram descartadas, pois era inviável a realização do ensaio de resistência à compressão, restando somente sete (7) amostras, sendo uma amostra de referência e um exemplar de cada tipo de espuma apresentados na figura 31.

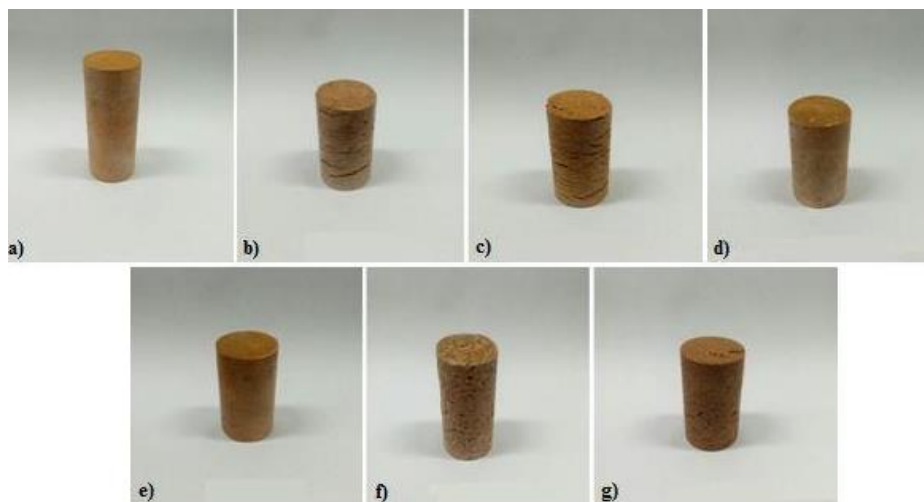


Figura 39: Amostras a) 1-Ref., b) 1-Si-0,1%, c) 1-Si-1%, d) 1-PH-0,1%, e) 1-PH-1%, f) 1-Al-0,1% e g) 1-Al-1%.

Fonte: Dados da pesquisa

Na Tabela 5 são apresentados os valores das densidades calculadas. Observa-se que houve redução na densidade em todas as amostras com adição de surfactante em comparação com a densidade da pasta de referência. Confrontando as amostras nota-se que, a menor redução de massa volumétrica foi à obtida com o peróxido de hidrogênio. Obteve-se uma maior redução na densidade das espumas produzidas com os surfactantes em pó, alumínio metálico e silício metálico, principalmente nas pastas que foram adicionados uma maior quantidade de surfactante. O mesmo sucedeu no trabalho desenvolvido por Masi, Rickard, *et al.* (2014). Tendo em vista, que quando se aumenta a quantidade do surfactante é avoluma a porosidade (HAJIMOHAMMADI, NGO e MENDIS, 2017) e conforme citado por Zhang, Provis, *et al.*, (2014) são os vazios que determinam a densidade e conseqüentemente a resistência do concreto em espuma. Contudo, as amostras com peróxido de hidrogênio apresentaram comportamento diverso, pois independente da quantidade H_2O_2 adicionado na mistura, os valores de densidade foram similares. Segundo Masi, Bignozzi, *et al.*, (2014 a) este comportamento pode ser atribuído a menor viscosidade da pasta com H_2O_2 , que favorece na coalescência da massa, após um efeito colapsante dos poros antes do endurecimento em gel.

Tabela 5 - Densidade das amostras e relação com a amostra de referência

Amostras	Densidade(kg/m ³)	Relação (CP/Ref)
1-Ref	1764,81	1,00
1-PH-0,1%	1679,98	0,95
1-PH-1%	1671,24	0,95
1-Si-0,1%	1551,90	0,88
1-Si-1%	1390,86	0,79
1-Al-0,1%	1341,48	0,76
1-Al-1%	1302,05	0,74

Fonte: Dados da pesquisa

5.2 Análise dos poros

As imagens fotográficas extraídas por meio do microscópio digital estão apresentadas nas figuras de 32 a 35:

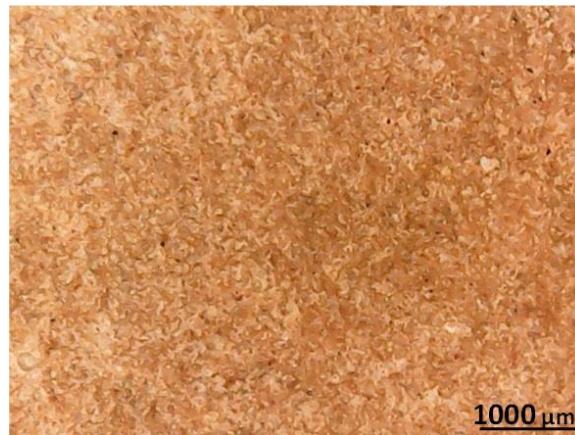


Figura 40: Imagem dos poros da amostra referência(1-Ref.)

Fonte: Dados da pesquisa

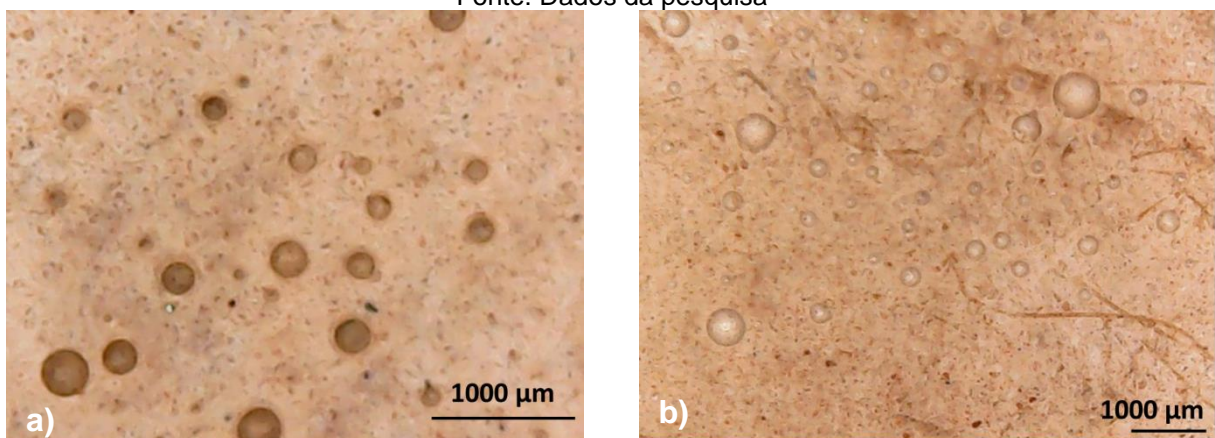


Figura 41: Imagem dos poros a) 1-PH-0,1%,c) 1-PH-1%

Fonte: Dados da pesquisa

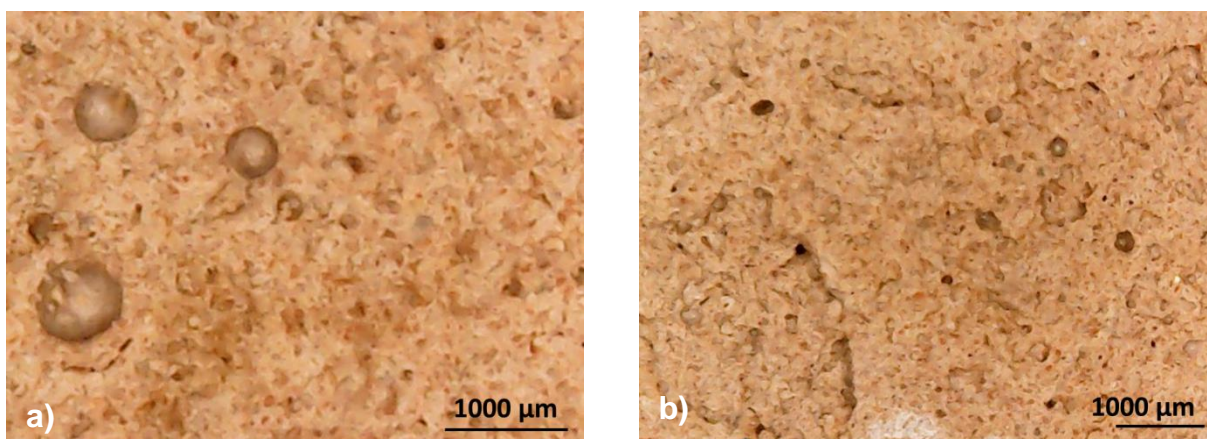


Figura 42: Imagem dos poros, a) 1-Si-0,1%, c) 1-Si-1%.
Fonte: Dados da pesquisa

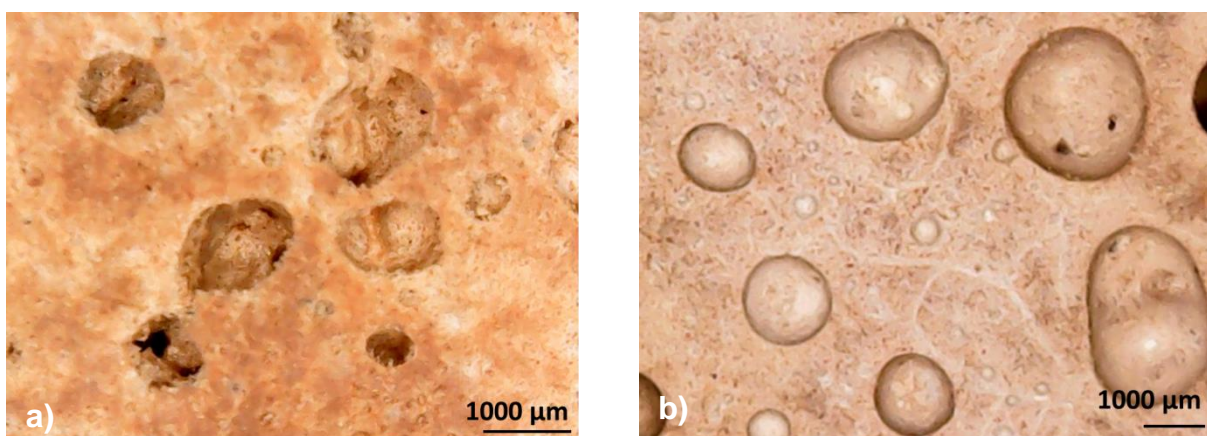


Figura 43: Imagem dos poros, a) 1-Al-0,1%, c) 1-Al-1%.
Fonte: Dados da pesquisa

Na Tabela 6 são apresentados os dados da leitura procedida pelo Imagej. Ressalta-se que, não foi possível fazer tal leitura na fotografia da imagem de referência, pois devido ao contraste da foto o software lia tudo como poros.

Tabela 6 - Dados da leitura dos quantitativos de poros nas fotografias das amostras

CP	Quantidade de poros	% poros com áreas $\leq 0,1\text{mm}^2$	% de poros com áreas $> 0,1\text{mm}^2$
1-PH-0,1%	550	98,00	2,00
1-PH-1%	559	99,28	0,72
1-Si-0,1%	758	97,89	2,11
1-Si-1%	1695	99,40	0,60
1-Al-0,1%	589	98,30	1,70
1-Al-1%	1737	99,54	0,46

Fonte: Dados da pesquisa

Os dados acima indicam que as espumas formadas com adição de silício metálico e

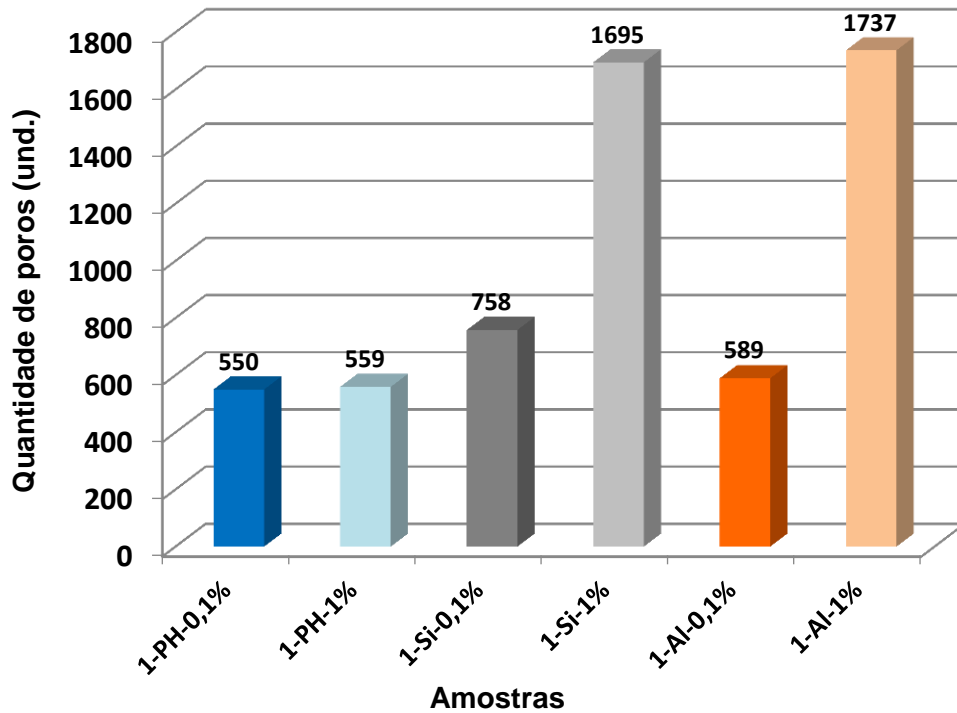
alumínio metálico apresentaram resultados de quantitativos de poros equivalentes, principalmente após a dição de um teor maior de surfactantes, porém as dimensões dos poros das amostras com alumínio metálico foram maiores e mais abertas.

Também se verificou que houve uma equiparação entre as dimensões dos poros, pois todas as amostras apresentaram uma disposição quantitativa menor que $0,1\text{mm}^2$. Nota-se, porém, que a distribuição dos poros das amostras com peróxido de hidrogênio é mais uniforme e homogênea e composta por poros de menores dimensões dentre $>0,001$ a $0,03\text{mm}^2$. Masi, Rickard, *et al.* (2014) citam que, independente do teor de peróxido de hidrogênio na mistura, os poros serão abertos com distribuição muito uniforme.

Maior teor de surfactante esta associado a um aumento significativo de poros nas amostras de alumínio metálico e silício metálico de ~66% e 55% respectivamente, enquanto nas amostras H_2O_2 praticamente não existiu alteração no número de poros. Masi, Rickard, *et al.*(2014) afirmam que este tipo de comportamento está associado a cinética reação rápida do alumínio, que promove o colapso de grande parte dos poros no decorrer da moldagem antes do endurecimento, tendo em vista, que a reação de formação de espuma inicia-se durante o processo da mistura. Além disso, a aplicação de agentes químicos na formação de espuma produzem geopolímeros de baixa densidade caracterizados por poros grosseiros com tendência ao colapso. Os agentes químicos de formação de espuma reagem à temperatura ambiente e a cinética da reação é rápida em condições de alta alcalinidade. Isso causou dificuldades no controle do tamanho dos poros, já que a reação começou antes da moldagem dos CP's. Ressalta-se ainda, que todas as amostras apresentaram um aumento do tamanho dos poros após o acréscimo de 1% do agente surfactante.

O Gráfico 1 apresenta os números de poros, em unidade identificado em cada fotografia.

Gráfico 1 - Valores quantitativos de poros das fotos dos CP^s

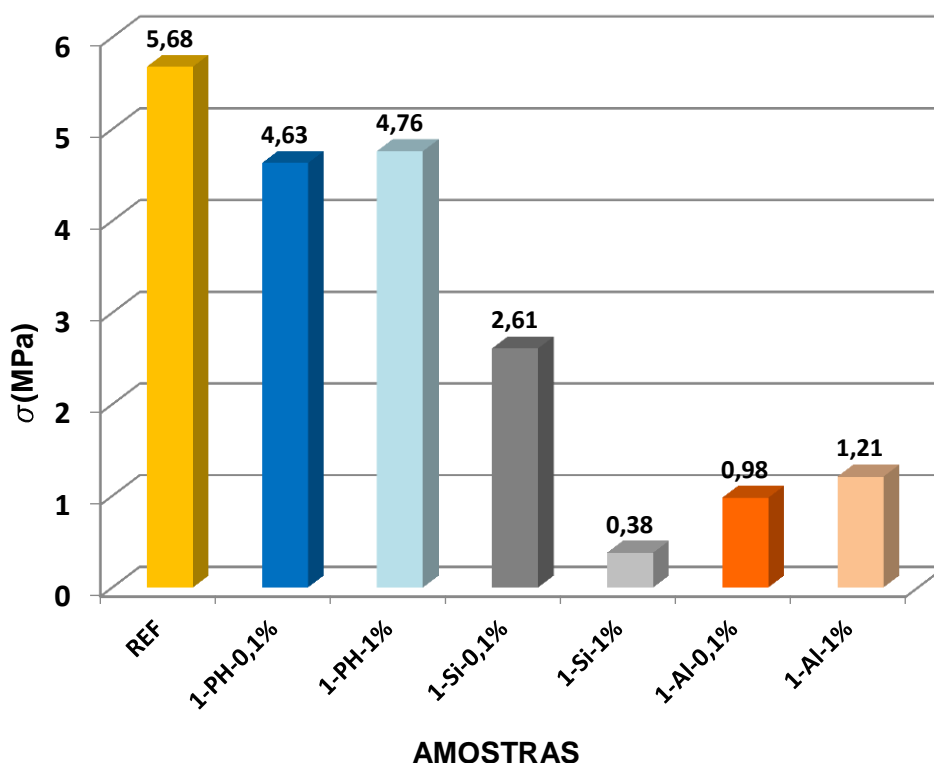


Fonte: Dados da pesquisa

5.3 Resistência à compressão

Os valores do ensaio de resistência à compressão das amostras estão representados no Gráfico 2. Observa-se que os valores obtidos ficarão em uma faixa entre 0,31MPa e 5,68 MPa. Como era esperado o maior valor de resistência à compressão foi verificado na amostra da pasta de referência. Em comparação realizada somente dentre os CP^s de espumas geopoliméricas, as amostras que possuem como agente surfactante o peróxido de hidrogênio, PH-1%, apresentou o melhor resultado de resistência à compressão, enquanto a amostra que possui 1% de Silício Metálico obteve um pior comportamento. Também se observou que os valores de resistência das amostras de peróxido de hidrogênio ficaram bem próximos a resistência da amostra de referência. E que, a variação entre os resultados de PH-0,1% e PH-1% foi muito pequena em relação ao acréscimo do teor de surfactante adicionado nas misturas.

Gráfico 2 - Resistência à compressão



Fonte: Dados da pesquisa

Fazendo uma correlação dentre os resultados obtidos de densidade, da análise de poros, e de resistência à compressão pode se verificar, que as amostras de peróxido de hidrogênio tiveram um melhor comportamento apresentando uma maior resistência à compressão. Fator este que está associado a menor quantidade de poros e as maiores densidade alcançadas, em comparação aos valores obtidos nas amostras de Si-0,1%, Si-1%, Al-0,1% e Al-1%. Segundo Mehta e Monteiro (2006) a densidade (ou o volume vazio) é fundamental para a resistência de qualquer material sólido poroso e que independentemente do método empregado para a obtenção da espuma, a resistência à compressão irá diminuir com a redução da densidade. Informação está que corrobora os resultados obtidos.

As amostras obtidas com o surfactante silício metálico apresentaram a maior variação na densidade e resistência à compressão comparando as quantidades de silício adicionadas. Quanto maior a quantidade de silício metálico utilizado, maior foi à quantidade de poros verificada, que conseqüentemente levaram a uma menor densidade e menor a resistência à compressão. Masi, Rickard, *et al.* (2014) explicam, que geralmente quando se aumenta o teor de surfactante, a uma

diminuição da resistência à compressão. Desta forma se pode dizer que o acréscimo da quantidade do agente surfactante na mistura levou a diminuição da resistência.

A amostra AI-1% apresenta uma quantidade maior de poros quando adicionado, conseqüentemente maior redução na densidade após o aumento do agente surfactante. Também foi observado, que apesar do aumento da quantidade de vazios, houve também uma diminuição da proporção de poros com dimensões $>0,1\text{mm}^2$, e os mesmo passaram a apresentar uma microestrutura mais grosseira. Conforme citado por Palmero, Formia, *et al.* (2015) a redução do tamanho dos poros contribui para aumentar os valores mecânicos e a durabilidade das espumas geopolimérica. Desta forma, pode se dizer que os resultados obtidos são coerentes com situações análogas apresentadas em outros estudos.

6 Conclusão

No estudo realizado se verificou que, em comparação com a amostra de referência, houve uma redução da densidade nas pastas geopoliméricas com adição dos surfactantes. A diminuição da densidade foi maior nas espumas com maior teor de alumínio metálico e silício metálico. A massa específica das pastas com peróxido de hidrogênio foram equivalentes, independentemente do teor de surfactante.

No que se refere à distribuição e tamanho dos poros das amostras, observou-se que as espumas formadas com alumínio metálico continham poros maiores e mais abertos enquanto as amostras com H_2O_2 apresentaram uma distribuição uniforme com poros menores.

As amostras produzidas com peróxido de hidrogênio apresentaram uma melhor resistência à compressão, enquanto a amostra com 1% de Silício Metálico apresentou a menor resistência. Houve também um pequeno aumento da resistência mecânica da amostra com alumínio metálico.

Por meio da análise de DRX foi possível verificar que o precursor apresenta fases cristalinas, mas que sua estrutura é predominante amorfa, assim como os materiais ativados com e sem surfactante. Em todos os materiais sintetizados também se identificou o halo amorfo em aproximadamente 27° , característico do processo de geopolimerização.

É possível sintetizar espumas geopoliméricas utilizando como agentes formadores de espuma (surfactantes) o peróxido de hidrogênio, o silício metálico e o alumínio metálico. Sendo que, os geopolímeros porosos obtidos a partir da adição de peróxido de hidrogênio apresentaram poros menores, que reduziu moderadamente a densidade do produto, e consequentes melhores valores de resistência à compressão. Desta forma, a utilização de peróxido de hidrogênio como agente espumante permite um maior controle na alteração da densidade do material consolidado. Enquanto o emprego do silício metálico e o alumínio metálico como surfactantes reduzem de maneira significativa a densidade e apresentam valores de resistência pouco relevante.

7 Bibliografia

ABDOLLAHNEJAD, Z.; TORRAL, F. P.; AGUIAR, J. L. B. D. **Foam geopolymers: State of the art and preliminary experimental results.** International Conference on Construction Materials and Structures, At South Africa, Guimarães, Portugal, Novembro 2014.

ABDULLAH, M. M. A. B. et al. **Fly Ash-based Geopolymer Lightweight Concrete Using Foaming Agent.** International Journal of Molecular Sciences, Perlis, Malásia, v. 13, n. 6, p. 7186-7198, Junho 2012. ISSN 1422-0067.

AGUILAR, R. A.; DÍAZ, O. B.; GARCÍA, J. I. E. **Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates.** Construction and Building Materials, Coahuila, México, v. 24, p. 1166–1175, 25 Janeiro 2010. ISSN 0950-0618.

ALONSO, S.; PALOMO, Á. **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio.** Materials Letters, Madri, Espanha, n. 42, p. 55-62, Janeiro 2001. ISSN 00167-577X.

ALONSO, S.; PALOMO, Á. **Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide–metakaolin solid mixtures.** Cement and Concrete Research, Madri, Espanha, v. 31, p. 25-30, Janeiro 2001a. ISSN 0008-8846.

ASHBY, M. F. et al. **Metal Foams: A Design Guide.** 1. ed. Boston, Estados Unidos da América: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 978-0-7506-7219-1.

BAIA, C.; COLOMBO, P. **High-porosity geopolymer membrane supports by peroxide route with the addition of egg white as surfactant.** Ceramics International, Padova, Itália, v. 43, n. 2, p. 2267–2273, Fevereiro 2017. ISSN 0272-8842.

BAPAT, J. D. **Mineral Admixtures in Cement and Concrete.** New York, Estados Unidos: CRC Press, 2012. 91-98 p. ISBN 978-1-4398-1792-6.

BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; THAUMATURGO, C. **Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers.** International Journal of Inorganic Materials 2, Rio de Janeiro, Brasil, v. 2, n. 4, p. 309–317, Maio 2000. ISSN 1466-6049.

BARNES, P.; BENSTED, J. **Structure And Performance Of Cements**. 1. ed. New York, Estados Unidos da América: CRC Press, 2002. ISBN 978-0419233305.

BEZERRA, I. M. T. et al. **Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos - REMAP, Campina Grande, Brasil, v. 8.2, p. 101 –105, Julho 2013. ISSN 1809-8797.

BUCHWALD, A. **What are geopolymers? Current state of research and technology, the opportunities they offer, and their significance for the precast industry**. Concrete technology, Weimar, Alemanha, v. 72, n. 7, p. 42-49, Janeiro 2006. ISSN 0373-4331.

BUCHWALD, A. et al. **Purdocement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s**. Materials and Structures, Ghent, Bélgica, v. 48, p. 501-511, Outubro 2013. ISSN 10.1617.

BURROWS, R. C. **Process of preparing inorganic foams from alkali metal silicates and aluminum**. US 3396112 A, 6 Agosto 1968.

CANTAREL, V. et al. **Solidification/stabilisation of liquid oil waste in metakaolin-based geopolymer**. Journal of Nuclear Materials, Bagnols-sur-Cèze, França, v. 464, p. 16–19, Setembro 2015. ISSN 0022-3115.

CEES. CEES - **Centre Européen d'Etude des Silicates**, Fevereiro 2013. Disponível em: <http://www.solublesilicates.eu/docs/solsil_broch_1302.pdf>. Acesso em: 15 Maio 2017. Bruxelas, Bélgica.

CERAMICHE **Gardenia Orchidea**. Comissão Europeia, 2009. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE09_ENV_IT_000108_LAYMAN.pdf>. Acesso em: 05 Junho 2017.

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química**. 11. ed. Versão Impressa: São Paulo, Brasil: Mc Graw Hill, 2013.

CILLA, M. S.; COLOMBO, P.; MORELLI, M. R. **Geopolymer foams by gelcasting**. Ceramics International, Pensilvânia, Estados Unidos, v. 40, n. 4, p. 5723-5730, Dezembro 2013. ISSN 0272-8842.

CORREIA, E. A. S. **Tese de Doutorado: Compósitos de Matriz Geopolimérica Reforçados com Fibras Vegetais de Abacaxi e de Sisal.** João Pessoa: Universidade Federal de Paraíba, 2011.

COSTA, D. L. et al. **Estudo da adição de alumina em corpos geopoliméricos a base de metacaulim.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos-REMAP, Campina Grande, Brasil, v. 8.2, p. 96 –100 , Julho 2013. ISSN 1809-8797.

DAVIDOVITS, J. **Mineral polymers and methods of making them.** US4349386 A, 14 Setembro 1982.

DAVIDOVITS, J. **Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process.** US4472199 A, 18 Setembro 1984.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials.** Journal Thermal Analysis, Saint Quentin, França, v. 37, p. 1633-1656, 1991. ISSN 0022-5215.

DAVIDOVITS, J. **Properties of Geopolymer Cements.** First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ucrânia, p. 131-149, 1994.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications Market Trends and Potential Breakthroughs.** Geopolymer 2002 Conference, Saint-Quentin, França, Outubro 2002.

DAVIDOVITS, J. **What is a geopolymer? Introduction.** Institute Geopolymer, 2006. Disponível em: <<https://www.geopolymer.org/science/introduction/>>. Acesso em: 3 Abril 2017.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Cement, a review. Saint-Quentin, França. 2013.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Institute,** 2013a. Disponível em: <<https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>>. Acesso em: 06 Junho 2017.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications.** 4. ed. Saint-Quentin, França: Institut Géopolymère, 2015.

DAVIDOVITS, J. **Materials Today,** Junho 2015a. Disponível em: <<http://www.materialstoday.com/polymers-soft-materials/features/environmental-implications-of-geopolymers/>>. Acesso em: 30 Maio 2017.

DAVIDOVITS, J. **Materials Today**, 17 Janeiro 2016. Disponível em: <<http://www.materialstoday.com/polymers-soft-materials/features/geopolymers-natural-and-synthetic-metakaolin/>>. Acesso em: 28 Maio 2017.

DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVITS, R. **Poly(sialate-disiloxo)-based geopolymeric cement and production method thereof**. US7229491 B2, 12 Junho 2007.

DAVIDOVITS, J.; SAWYER, J. L. **Early high-strength mineral polymer**. US 4509985 A, 22 Fevereiro 1985.

DAVIDOVITS, J. **FAQ for artificial stone supporters**. Geopolymer Institute, 3 Agosto 2015 b. Disponível em: <<https://www.geopolymer.org/faq/faq-for-artificial-stone-supporters/>>. Acesso em: 10 Julho 2017.

DIAS, A. D. A. **Dissertação: Estudo da Degradação de Argamassa Geopolimérica por Ácido Acético e Sulfúrico**. Campos dos Goytacazes: UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF, 2008.

DUCMAN, V.; KORAT, L. **Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H₂O₂ as foaming agents**. Materials Characterization, Ljubljana, Eslovênia, v. 113, p. 207-213, Janeiro 2016. ISSN 1044-5803.

DUXSON, P. et al. **Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Victoria, Austrália, v. 269, p. 47-58, Novembro 2005. ISSN 0927-7757.

DUXSON, P. et al. **Geopolymer technology: the current state of the art**. Journal of Materials Science, Parkville, Austrália, n. 42, p. 2917–2933, Maio 2006. ISSN 0022-2461.

DUXSON, P. et al. **The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'**. Cement and Concrete Research, Victoria, Austrália, v. 37, n. 12, p. 1590–1597, Dezembro 2007. ISSN 0008-8846.

DUXSON, P.; LUKEY, C. G.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Thermal evolution of metakaolin geopolymers: Part 1 – Physical evolution**. Journal of Non-Crystalline Solids, Victoria, Austrália, v. 352, p. 5541-5555, Dezembro 2006. ISSN 0022-3093.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L. **Designing Precursors for Geopolymer Cements**. The American Ceramic Society, Victoria, Austrália, v. 12, n. 91, p. 3864–3869, Setembro 2008. ISSN 10.1111.

EJAZ, T.; JONES, A. G.; GRAHAM, P. **Solubility of Zeolite A and Its Amorphous Precursor under Synthesis Conditions**. Journal of Chemical & Engineering data, Londres, Inglaterra, p. 574-576, 14 Abril 1999. ISSN 10.1021.

FENG, D. et al. **Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers**. Journal of the American Ceramic Society, Victoria, Austrália, v. 95, n. 2, p. 565-572, 1 Fevereiro 2012. ISSN 10.1111.

FERNÁNDEZ, E. et al. **Ceramic membrane ultrafiltration of anionic and nonionic surfactant solutions**. Journal of Membrane Science, Oviedo, Espanha, v. 1-6, n. 246, Novembro 2004. ISSN 0376-7388.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A. et al. **Quantitative determination of phases in the alkali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity**. Fuel, Madri, Espanha, v. 85, n. 5-6, p. 625-634, Abril 2006. ISSN 0016-236.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. et al. **Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado**. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Madri, Espanha, v. 47, p. 35-43, 2008. ISSN 0366-3175.

FERNANDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, Á.; CRIAD, M. **Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model**. Cement and Concrete Research, Madri, Espanha, v. 35, p. 1204-1209, 30 Agosto 2004. ISSN 0008-8846.

FROENER, M. S. **Dissertação: Valorização de Cinza de Fundo por meio da Síntese de Ligantes Geopoliméricos: Otimização de Traços em Pasta e Avaliação dos Sistemas em Argamassas**. Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

GARNAUT, R. **Geopolymer Alliance**. Slideblas, Fevereiro 2008. Disponível em: <https://slideblast.com/geopolymer_597061631723dda1d4b8fd36.html>. Acesso em: 2017 Abril 15.

GASTEIGE, H. A.; FREDERICK, J. W. J.; STREISEL, R. C. **Solubility of Aluminosilicates in Alkaline Solutions and a Thermodynamic Equilibrium Model**.

Journal of Chemical & Engineering, Corvallis, Estados Unidos , n. 31, p. 1183-1190, 1992. ISSN 0888-5885.

GLASBY, T. et al. **EFC Geopolymer Concrete Aircraft Pavements at Brisbane West Wellcamp Airport**. Concrete 2015 Conference, Melbourne, Austrália, p. 1-9, Agosto 2015.

GONÇALVES, D. K. C. **Dissertação: “Síntese Caracterização de Cimentos Geopoliméricos Comerciais”**. Belo Horizonte, Brasil: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

GOURLEY, J.; JOHNSON, G. **Developments in Geopolymer Precast Concrete**. In: **DAVIDOVITS, J. Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions** - Proceedings of the Geopolymer 2005 World Congress. Saint-Quentin, França: Institut Géopolymère, 2005. p. 139-143. ISBN 2-9514820-0-0.

HAJIMOHAMMADI, A.; NGO, T.; MENDIS, P. **Regulating the chemical foaming reaction to control the porosity of geopolymer foams**. Materials and Design, Victoria, Austrália, v. 120, p. 255–265, Abril 2017. ISSN 0264-1275.

HEATH, A.; PAINE, K.; MCMANUS, M. **Minimising the global warming potential of clay based geopolymers**. Journal of Cleaner Production 7, Bath, Reino Unido, n. 78, p. 75-83, Fevereiro 2014. ISSN 0959-6526.

HLAVÁČEK, P. et al. **Inorganic foams made from alkali-activated fly ash: Mechanical, chemical and physical properties**. Journal of the European Ceramic Society, Praga, República Checa, v. 35, n. 2, p. 703-709, 2015 Fevereiro. ISSN 0955-2219.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. **Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review**. Journal of Materials Science, Indore, Índia, v. 42, p. 729–746, Fevereiro 2007. ISSN 1573-4803.

KRONBERG, B.; HOLMBERG, K.; LINDMAN, B. **Surface Chemistry of Surfactants and Polymers**. 1. ed. Pondicherry, Índia: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. ISBN 0-471-49883-1.

KUEHL, H. **Slag cement and process of making the same**. US900939 A, 1908 Outubro 1908.

LEONELLI, C. et al. **Materie prime di origine naturale nel processo di geopolimerizzazione**. Ceramica Informazione, Faenza, Itália, v. 489, p. 305-310, Agosto 2010. ISSN 0009-0271.

LEONELLI, C.; ROMAGNOLI, M. **Geopolimeri polimeri inorganici chimicamente attivati**. 2. ed. Bolonha, Itália: Società Ceramica Italiana, 2011. ISBN 987-1-4477-1973-7.

LI, K.-L. et al. **Early Mechanical Property and Durability of Geopolymer**. In: DAVIDOVITS, J. Geopolymers, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions-Anais Congresso Mundial Geopolymer 2005. Saint-Quentin, França: Geopolymer Institute, 2005. p. 117-120. ISBN 2-9514820-0-0.

LYON, R. E. et al. **Fire resistant aluminosilicate composites**. **Fire and Materials - FAM**, New Jersey, Estados Unidos da América, v. 21, n. 2, p. 67-73, Março 1997. ISSN 1099-1018.

MASI, G. et al. **A comparison between different foaming methods for the synthesis of light weight geopolymers**. Ceramics International, Perth, Austrália, v. 40, p. 13891–13902, 5 Junho 2014. ISSN 0272-8842.

MASI, G. et al. **The Influence of Short Fibres and Foaming Agents on the Physical and Thermal Behaviour of Geopolymer Composites**. Advance in Science and Technology: 13th International Ceramics Congress, Bologna, Itália, v. 92, p. 56-61, Julho 2014 a. ISSN 1662-0356.

MAURI, J. et al. **Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico**. Revista Matéria, Campos dos Goytacazes/RJ, Brasil, v. 14, n. 3, p. 1039 - 1046, 2009. ISSN 1517-7076.

MEDPELLI, D.; SEO, J.-M.; SEO, D.-K. **Geopolymer with Hierarchically Meso-/Macroporous Structures from Reactive Emulsion Templating**. Journal American Ceramic Society, Arizona, Estados Unidos da América, v. 97, n. 1, p. 70-73, Janeiro 2014. ISSN 1551-2916.

MEDRI, V. **GEOPOLIMERI: “Ceramiche” Per uno Sviluppo Sostenibile**. L’Industria dei Laterizi, n. 115, p. 48-53, Janeiro 2009. ISSN 11-23-8208.

MEDRI, V. Institute of Science and Technology for Ceramics-ISTEC: National Research Council of Italy. **Geopolimeri per Edilizia Ed Infrastrutture, Trasporti, Riciclo e**

Biomateriali, 2015. Disponível em: <<http://www.istec.cnr.it/index.php/eng/our-research/high-tech-and-nanotechnology/387-geopolymers-for-building-and-infrastructures-transport-recycling-and-biomaterials>>. Acesso em: 10 Junho 2017.

MEDRI, V. et al. **Role of the morphology and the de hydroxylation of metakaolins on geopolymerization**. Applied Clay Science, Faenza, Itália, n. 50, p. 538–545, Outubro 2010. ISSN 0169-1317.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete Microstructure, Properties, and Materials**. 30. ed. New York, Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 2006. ISBN 0-07-158919-8.

MILLIKEN. **Milliken Infrastructure Solutions**, 2017. Disponível em: <<http://infrastructure.milliken.com/internal-pipe-rehab/>>. Acesso em: 6 Junho 2017.

MILLIKEN. Milliken. Milliken Infrastructure Solutions, 2017. Disponível em: <<http://infrastructure.milliken.com/internal-pipe-rehab/>>. Acesso em: 6 Junho 2017.

MODAREL, R.; LARGO, A.; PASCALI, L. **I geopolimeri: “Ritorno al passato o salto nel futuro”**. inGENIO: Informazione tecnica progettuale, Galazzano, Itália, n. 24, Julho 2014. ISSN 2307-8928.

OSÓRIO, P. D. L. **Dissertação: Concepção de um Saferoom Anti – Tornado em Betão Geopolimérico**. Braga, Portugal: Universidade do Minho, 2006.

PALMERO, P. et al. **Geopolymer technology for application-oriented dense and lightened materials**. Elaboration and characterization. Ceramics International, Abruzzi, Itália, v. 41, n. 10, p. 12967-12979, Dezembro 2015. ISSN 0272-8842.

PALOMO, Á. et al. **Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin**. Cement and Concrete Research, Madri, Espanha, v. 29, p. 997–1004, Março 1999. ISSN 0008-8846.

PALOMO, Á. et al. **Alkaline Activation of Fly Ashes: NMR Study of the Reaction Products**. Journal of the American Ceramic Society, Madri, Espanha, v. 87, n. 6, p. 1141-1145, Junho 2004. ISSN 1551-2916.

PALOMO, Á. et al. **A review on alkaline activation: new analytical perspectives**. Materiales de Construcción, Madri, Espanha, v. 64, n. 315, Agosto 2014. ISSN 0465-2746.

PALOMO, Á.; FUENTE, J. I. L. D. L. **Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes Part I. Stabilisation of boron.** Cement and Concrete Research, Madrid, Espanha, v. 33, p. 281-288, Agosto 2002. ISSN 0008-8846.

PANAGIOTOPOULOU, C. et al. **Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media.** Journal of Materials Science, Atenas, Grécia, v. 42, p. 2967–2973, Dezembro 2006. ISSN 10853-006.

PANIAS, D.; GIANNOPOULOU, I. P.; PERRAKI, T. **Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Atenas, Grecia, n. 301, p. 246–254, Dezembro 2006. ISSN 0927-7757.

PAPA, E. **Tese de Mestrado: Produção e Caracterização de Schiume Inorganiche a Base Geopolimerica.** UNIVERSITA' DI BOLOGNA, FACOLTA' DI CHIMICA INDUSTRIALE. Bologna, Itália. 2011.

PART, W. K.; RAMLI, M.; CHEAH, C. B. **An Overview on the Influence of Various Factors on the Properties of Geopolymer Concrete Derived From Industrial Byproducts.** In: NAZARI, A.; SANJAYAN, J. G. HANDBOOK OF LOW CARBON CONCRETE. 1. ed. Hawthorn, Austrália: Elsevier Inc. , 2017. Cap. 11, p. 263-334.

PEDROSO, F. L. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem.** Concreto & Construções- Ibracon, São Paulo, Brasil, n. Ano XXXVII - 53, p. 14-19, Janeiro, Fevereiro, Março. 2009. ISSN 1809-7197.

PHAIR, J. W.; SMITH, J. D.; DEVENTER, J. S. J. V. **Characteristics of aluminosilicate hydrogels related to commercial “Geopolymers”.** Materials Letter, Victoria, Austrália, n. 57, p. 4356 - 4367, Março 2003. ISSN 0167-577X.

PHAIR, J. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers.** Minerals Engineering, Victoria, Austrália, v. 14, p. 289-304, Março 2001. ISSN 0892-6875.

PIMRAKSAA, K. et al. **Lightweight geopolymer made of highly porous siliceous materials with various Na₂O/Al₂O₃ and SiO₂/Al₂O₃ ratios.** Materials Science & Engineering, Khon Kaen, Tailândia, n. 528, p. 6616-6623, Abril 2011. ISSN 0921-5093.

PINTO, A. T. **Tese: Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino.** Braga, Portugal: Universidade do Minho, 2004.

PROVIS, J. L. **Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?** Materials and Structures, Sheffield, Inglaterra, Reino Unido, v. 47, p. 11-25, Novembro 2013. ISSN 1871-6873.

PROVIS, J. L. **Tese: Modelling the Formation of Geopolymer.** Victoria, Austrália: Department of Chemical and Biomolecular Engineering - The University of Melbourne, Março, 2006.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. **Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials.** Review of Materials Research, Sheffield, Inglaterra, Reino Unido, v. 44, p. 299-327, Julho 2014. ISSN 10.1146.

PROVIS, J. L.; DUXSON, P.; VAN DEVENTER, J. S. J. **The role of particle technology in developing sustainable construction materials.** Advanced Powder Technology, Victoria, Austrália, v. 21, n. 1, p. 2-7, Janeiro 2010. ISSN 0921-8831.

PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; DEVENTER, J. S. J. V. **Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results.** Chemistry of Materials, Victoria, Austrália, v. 17, p. 3075-3085, 11 Maio 2005. ISSN 10.1021.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling.** Chemical Engineering Science, Victoria, Austrália, v. 32, n. 9, p. 2318-2329, Maio 2007. ISSN 0009-2509.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications.** Reino Unido: Woodhead Publishing Limited e CRC Press, 2009. 6 p.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM.** 1. ed. Londres, Inglaterra: Springer, 2013. ISBN 2213-2031.

PUERTAS, F. **Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro.** Materiales de Construcción, Madrid, Espanha, v. 45, n. 239, p. 53-64, 1995. ISSN 10.3989.

RAHIER, H.; DENAYER, J. F.; VAN MELE, B. **Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses Part IV Modulated DSC study on the effect of particle size**

of metakaolinite on the production of inorganic polymer glasses. Journal of Materials Science, Brussels, Bélgica, v. 38, p. 3131–3136, Julho 2003. ISSN 1573-4803.

RAMAMURTHY, K.; NAMBIAR, E. K. K.; RANJANI, G. I. S. **A classification of studies on properties of foam concrete.** Cement & Concrete Composites, Chennai, Índia, v. 31, n. 6, p. 388-396, Abril 2009. ISSN 0958-9465.

RUBENSTEIN, M. **State of the planet. Earth Institute** - Columbia University, 2012. Disponível em: <<http://blogs.ei.columbia.edu/2012/05/09/emissions-from-the-cement-industry/>>. Acesso em: 29 Abril 2017.

SEVERO, C. G. S. et al. **Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos - REMAP, Campina Grande, PB, Brasil , v. 8, n. 2, p. 55-67, 7 Julho 2013. ISSN 1809-8797.

SHI, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, Á. **New Cements for the 21st Century: The Pursuit of an Alternative to Portland Cement.** Cement and Concrete Research, Madri, Espanha, n. 41, p. 750–763, Março 2011. ISSN 0008-8846.

SHI, C.; KRIVENKO, P. V.; ROY, D. **Alkali-Activated Cements and Concretes.** 1. ed. Ontário, Canadá: Taylor & Francis, 2006.

SILVA, F. J. et al. **Cimento polimérico inorgânico para aplicações civis inorganic polymeric cement for civil applications.** Revista Militar de Ciência e Tecnologia - RMCT, Rio de Janeiro, Brasil, v. XVI , n. 3, p. 54-63, 3º Quadrimestre 1999. ISSN 0102-3542.

SILVA, P. D.; SAGOE-CRENSIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. **Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂.** Cement and Concrete Research, North Ryde, Austrália, n. 37, p. 512–518, Janeiro 2007. ISSN 0008-8846.

SINGH, B. et al. Geopolymer concrete: **A review of some recent developments. Construction and Building Materials.** Roorkee, Índia, v. 85, p. 78-90, Março 2015. ISSN 0950-0618.

SOBOLEV, K.; GUTIÉRREZ, M. F. **How Nanotechnology Can Change the Concrete World Successfully mimicking nature's bottom-up construction processes is one**

of the most promising directions. American Ceramic Society Bulletin, San Nicolás de los Garza, México, v. 84, n. 10, p. 14 -18, Outubro 2005. ISSN 0002-7812.

SWANEPOEL, J. C.; STRYDOM, C. A. **Utilisation of fly ash in a geopolymeric material.** Applied Geochemistry, Pretória, África do Sul, n. 17, p. 1143–1148, Janeiro 2002. ISSN 0883-2927.

TORGAL, F. P.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. **Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products.** Construction and Building Materials, Castelo Branco, Portugal, v. 22, p. 1305 -1314, Novembro 2008. ISSN 0950-0618.

TORGAL, F. P.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. **Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture.** Construction and Building Materials, Castelo Branco, Portugal, v. 22, p. 1315-1322, Novembro 2008a. ISSN 0950-0618.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Ligantes Geopoliméricos. Uma Alternativa ao Cimento Portland?** INGENIUM, Praga, Portugal, p. 66-68, Novembro/Dezembro 2009. ISSN 0870-5968.

TRINDADE, A. C. C. et al. **On The Mechanical Behavior of Metakaolin Based Geopolymers Under Elevated Temperatures.** Materials Research, Belo Horizonte, Brasil, p. 1-8, Julho 2017. ISSN 1980-5373.

TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. **Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete.** Construction and Building Materials, Melbourne, Australia, n. 24, p. 1166–1175, Julho 2010. ISSN 0950-0618.

V.MEDRI et al. **Role of the morphology and the de hydroxylation of metakaolins on geopolymerization.** Applied Clay Science, Faenza, Itália, n. 50, p. 538–545, Outubro 2010. ISSN 0169-1317.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P. **Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement.** Minerals Engineering, Victoria, Austrália., n. 29, p. 89–104, Março 2012. ISSN 0892-6875.

VAOU, V.; PANIAS, D. **Thermal insulating foamy geopolymers from perlite.** Minerals Engineering, Atenas, Grécia, v. 23, n. 14, p. 1146 -1151, Julho 2010. ISSN 0892-6875.

WEIL, M.; BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K. **Development of Geopolymer Concrete Supported by Systems Analysis.** Proceeding of the 2nd Int. Symposium of Non-traditional Cement and Concrete, ed. By Bilek and Kersner., 2005. ISSN 80-214-2853-8.

XU, H. Tese: **Geopolymerisation of Aluminosilicate Minerals.** Victoria, Austrália: Department of Chemical Engineering, The University of Melbourne, 2002.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. **The geopolymerisation of alumino-silicate minerals.** International Journal of Mineral Processing, Victoria, Austrália, v. 59, p. 247-266, Junho 2000. ISSN 0301-7516.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Effect of Source Materials on Geopolymerization.** American Chemical Society, Victoria, Austrália, v. 42, n. 8, p. 1698-1706, Março 2003. ISSN 10.1021.

YANG, K.-H.; SONG, J.-K.; SONG, K.-I. **CO Reduction Assessment of Alkali-Activated Concrete Based on Korean Life-Cycle Inventory Database.** In: NAZARI, A.; SANJAYAN, J. G. HANDBOOK OF LOW CARBON CONCRETE. 1. ed. Gwangju, Coreia: Elsevier, 2017. Cap. 7, p. 139-157.

ZHANG, Z. et al. **Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 2. Thermodynamics of sodium silicate activation of metakaolin.** Thermochemica Acta, Toowoomba, Austrália, v. 565, n. 10, p. 163-171, Agosto 2013. ISSN 0040-6031.

ZHANG, Z. et al. **Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction.** Construction and Building Materials, Brisbane, Austrália, v. 56, p. 113-127, Janeiro 2014. ISSN 0950-0618.

ZHANG, Z. et al. **Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete.** Cement & Concrete Composites, Toowoomba, Austrália, v. 62, p. 97 - 105, Junho 2015. ISSN 0958-9465.

ZHANG, Z. et al. **Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide.** Thermochemica Acta, Toowoomba, Austrália, n. 539, p. 23–33, Março 2012. ISSN 0040-6031.