



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ADRIELI OLIVEIRA DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMAS GEOPOLIMÉRICAS
PRODUZIDAS A PARTIR DE MICROSSÍLICA E REJEITO DE
MINÉRIO SULFETADO DE COBRE**

MARABÁ-PA

2018

ADRIELI OLIVEIRA DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMAS GEOPOLIMÉRICAS
PRODUZIDAS A PARTIR DE MICROSSÍLICA E REJEITO DE
MINÉRIO SULFETADO DE COBRE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Materiais da Universidade Federal do Sul e
Sudeste do Pará em cumprimento às exigências
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientador:

Prof. Dr. Elias Fagury Neto.

Marabá-PA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Silva, Adrieli Oliveira da

Caracterização de espumas geopoliméricas produzidas a partir de microssílica e rejeito de minério sulfetado de cobre / Adrieli Oliveira da Silva ; orientador, Elias Fagury Neto. — 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2018.

1. Polímeros. 2. Concreto. 3. Reaproveitamento (sobras, refugos, etc.). 4. Engenharia de materiais. 5. Flotação. I Fagury Neto, Elias, orient. II. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. III. Título.

CDD: 22. ed.: 620.192

ADRIELI OLIVEIRA DA SILVA

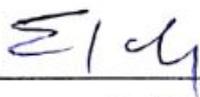
**CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMAS GEOPOLIMÉRICAS
PRODUZIDAS A PARTIR DE MICROSSÍLICA E REJEITO DE
MINÉRIO SULFETADO DE COBRE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Materiais da Universidade Federal do Sul e
Sudeste do Pará em cumprimento às exigências
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

DATA DA AVALIAÇÃO: 13 de março de 2018

CONCEITO: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Elias Fagury Neto

(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientador)



Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo

(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)



Prof. Dra. Renata Lilian Ribeiro Portugal Fagury

(FEMMA – IGE – UNIFESSPA – Membro)

Dedico este trabalho aos meus pais Antônio Carlos e Maria Juvanira que não me deixaram desistir e não mediram esforços para realizar os meus sonhos que hoje também são seus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor pela força que colocou no meu coração para lutar até alcançar esta grande meta na minha vida, Toda Honra e Glória a Ti Senhor.

Agradeço aos meus pais, que me deram apoio nas horas difíceis, de desânimo e cansaço e que apesar de todas as dificuldades me fortaleceram.

Obrigada à minhas irmãs, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo superior, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Aos meus tios Francisco Ribeiro e Elisangela Lima minha gratidão eterna pelos cuidados e amparo no momento mais importante da minha vida, obrigada pela confiança e força dedicados.

A Thales Lima da Silva meu muito obrigada pelos momentos de paciência e cuidado ao longo deste percurso.

Aos meus avôs, vovô Mulato e vovô Pretinho que partiram e não conseguiram participar desse momento, muito obrigada por fazerem parte da minha vida nunca vou esquecê-los, saudades eternas.

A minha amiga Lana Letícia que mesmo longe se fez presente e sempre me apoiou e sonhou comigo este sonho. Ao meus amigos Camila Portilho e Elton Douglas pela atenção e apoio assim como todos os colegas e professores da FEMAT.

Ao meu orientador Professor Elias Fagury Neto deixo minha palavra de gratidão pois reconheço a paciência e o esforço.

A esta universidade e a toda sua direção eu deixo uma palavra de agradecimento pela oportunidade de concluir este curso.

Para quem não mencionei, mas de alguma forma teve interferência neste caminho que percorri eu deixo minha lembrança e agradecimento.

*Às vezes aparecem barreiras no seu caminho
para ver até onde vai sua fé.*

(Autor Desconhecido)

RESUMO

O estudo de cimentos e argamassas geopoliméricas foi iniciado nos anos de 1970, a partir dos trabalhos de J. Davidovits, usando principalmente fontes aluminossilicosas em presença de soluções fortemente alcalinas. A principal vantagem deste material é que a cura pode ser feita em temperatura ambiente, sem prejuízo de suas propriedades. Neste sentido, o presente trabalho desenvolveu espumas geopoliméricas a partir do rejeito de flotação do minério sulfetado de cobre e microssílica, ambos rejeitos oriundos dos processos de flotação do minério de cobre e de obtenção do silício metálico, respectivamente. Foram desenvolvidas formulações com proporções variáveis das matérias-primas e misturadas à solução ativadora alcalina (NaOH). Os corpos de prova desenvolvidos foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de infravermelho (FTIR) e difratometria de raios-X (DRX). Obteve-se espumas geopoliméricas de elevada porosidade, com aplicações na área da construção civil, em substituição à materiais tradicionais por apresentar alta porosidade e baixa densidade, as fases mineralógicas identificadas foram quartzo, silicato de sódio, silicato de ferro, silicato de sódio hidratado e trona, características de geopolímeros.

Palavras-chave: Espumas. Geopolímeros. Rejeitos. Porosidade.

ABSTRACT

The investigations about geopolymeric cements and mortars began in the 1970s, based on the work of J. Davidovits, mainly using aluminosilicate sources in the presence of strongly alkaline solutions. The main advantage of this material is that the cure can be carried out at room temperature, without prejudice to its properties. In this sense, the present work developed geopolymer foams from the copper ore flotation waste and microsilica, both tailings from the copper ore flotation process and from the metallic silicon production, respectively. Formulations with varying proportions of the raw materials were mixed to the alkaline activating solution (NaOH). The specimens developed were characterized by scanning electron microscopy (SEM), infrared spectroscopy (FTIR) and X ray diffractometry (XRD). High porosity geopolymer foams were obtained with applications in the civil construction area, replacing the traditional materials with a high porosity and low density material; the identified mineralogical phases were quartz, sodium silicate, iron silicate, sodium silicate hydrate and trona, characteristics of geopolymers.

Keywords: Foams, geopolymers, waste, porosity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estruturas químicas dos polisialatos.....	18
Figura 2 - Relação de solubilidade entre Al_2O_3 e SiO_2 em função do pH.....	19
Figura 3 - Esquema do processo em que se obtém microssílica como subproduto.	22
Figura 4 - Relação de aplicação dos materiais geopoliméricos entre Si/Al.	25
Figura 5 - RMSC utilizado.	26
Figura 6 - MCS utilizada para a síntese.....	27
Figura 7 - Fluxograma que demonstra as etapas do processo de preparação das espumas geopoliméricas.....	28
Figura 8 - Material moldado, pronto para a cura.....	29
Figura 9 - Difratorômetro de raios X utilizado para caracterização da amostra.....	30
Figura 10 - Microscópio eletrônico de varredura.....	31
Figura 11 - Espectrômetro de infravermelho.....	32
Figura 12 - Início do ensaio de avaliação do gás produzido na geopolimerização da espuma.	33
Figura 13 - Realização do ensaio.....	33
Figura 14 - Difratoograma de raios X da amostra de espuma geopolimérica.....	36
Figura 15 - Micrografia de MEV da região de fratura do geopolímero.....	37
Figura 16 - Micrografia de MEV e espectro de EDS da região de fratura.....	38
Figura 17 - Espectros de FTIR da amostra e das matérias-primas.....	39
Figura 18 - Ensaio de deslocamento volumétrico da massa geopolimérica durante cura de 7 dias.....	41
Figura 19 - Ensaio de deslocamento volumétrico da massa geopolimérica durante cura de 12 dias.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relação das matérias-primas e procedência	25
Tabela 2- Análise química do RMSC e MSC.....	33
Tabela 3- Deslocamento volumétrico das formulações, após 7 e 12 dias de cura.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AAR	Reação Agregada alcalina
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Alumina
CaO	Óxido de Cálcio
cm ⁻¹	Centímetro a menos um
CO ₂	Dióxido de Carbono
CP	Cimento Portland
CSHs	Hidratos de Silicato de Cálcio
CuO	Óxido de cobre
DRX	Difratômetro de Raios X
EDS	Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios X
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro ou Hematita
FTIR	Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier
H ₂	Gás Hidrogênio
H ₂ O	Água
K ₂ O	Óxido de potássio
KBr	Brometo de potássio
kV	Quilo Volt
M	Molar
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MgO	Óxido de magnésio
Min	Minuto
ml	Mililitro
MnO	Óxido de manganês
MSC	Microssílica
Na	Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
O	Oxigênio
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
RMSC	Rejeito de Minério de Cobre Sulfetado
Si	Silício

SiO	Gás de sílica
SiO ₂	Quartzo
SO ₃	Óxido sulfúrico
V ₂ O ₅	Pentóxido de Vanádio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 GEOPOLÍMEROS	18
3.2 ESPUMAS GEOPOLIMÉRICAS.....	21
3.3 MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS	21
3.3.1 Microssílica	21
3.3.2 Rejeito de minério sulfetado de cobre	23
3.4 APLICAÇÕES DE GEOPOLÍMEROS	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 MATÉRIAS-PRIMAS	26
4.2 METODOLOGIA.....	27
4.3.1 Difratomia de Raios X.....	29
4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	30
4.3.3 Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier	31
4.3.4 Ensaio para a quantificação de gás produzido na geopolimerização	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	34
5.2 ANÁLISE MINERALÓGICA	35
5.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	37
5.4 ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FORIER	38
5.5 QUANTIFICAÇÃO DE GÁS PRODUZIDO NA GEOPOLIMERIZAÇÃO	40
6. CONCLUSÕES.....	44

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

O estudo de materiais alternativos em substituição ao cimento Portland (CP) nasce da necessidade de diminuição das emissões de gases de efeito estufa, que é gerada em grande quantidade durante sua produção, pois o CP é um dos materiais mais usados no mundo devido a sua incorporação ao concreto, que tem grande uso na construção civil.

Assim a mudança climática devido ao aquecimento global, uma das maiores questões ambientais tornou-se uma grande preocupação durante a última década. O aquecimento global é causado pela emissão de gases de efeito estufa, como o CO₂, para a atmosfera pelas atividades humanas. Entre os gases de efeito estufa, o CO₂ contribui com cerca de 65% do aquecimento global (MCCAFFREY, 2002 apud WALLAH; RANGAN, 2006). A indústria de cimento é responsável por cerca de 6% de todas as emissões de CO₂, porque a produção de uma tonelada de CP emite aproximadamente uma tonelada de CO₂ na atmosfera (DAVIDOVITS, 1994; MCCAFFREY, 2002).

Como resultado destes estudos estão os geopolímeros. Os cimentos geopoliméricos surgem como uma nova classe de materiais de alto desempenho para aplicações estruturais como aglomerante mineral capaz de substituir total ou parcialmente o CP (BIGNO; JOSÉ; THAUMATURGO, 2005).

A este respeito, a tecnologia de geopolímeros proposta por Davidovits (1988; 1988) é uma promessa considerável para aplicação na indústria de concreto como um aglutinante alternativo para o CP. Em termos de redução do aquecimento global, a tecnologia de geopolímeros poderia reduzir as emissões de CO₂ para a atmosfera causadas pelas indústrias de cimento e agregados em cerca de 80% (DAVIDOVITS, 1994 apud WALLAH; RANGAN, 2006).

Os geopolímeros são materiais de baixo teor de cálcio que podem se converter em resíduos de aluminossilicatos tais como cinzas volantes e escória em cimentos sólidos aglutinantes. Esses aglutinantes ativados por álcalis são resistentes quimicamente ao calor e fogo, podem ser utilizados como alternativa verde para o CP devido a economia de CO₂ alcançável se projetado efetivamente.

O presente trabalho desenvolveu espumas geopoliméricas a partir da tecnologia proposta por Davidovits que consiste em aluminossilicatos presente em meio de soluções ativadoras alcalinas. Para tanto, foram empregados como matérias-primas subprodutos industriais tais como o rejeito de minério sulfetado de cobre (RMSC) e a microssílica (MSC), ativados com o uso de uma solução de NaOH 14M.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral foi o desenvolvimento e caracterização de espumas geopoliméricas produzidas a partir de rejeitos industriais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar as melhores proporções entre as matérias-primas usadas para cada composição;
- Realizar a caracterização mineralógica das matérias-primas e das espumas geopoliméricas por difratometria de raios X;
- Caracterizar morfológicamente as espumas produzidas por microscopia eletrônica de varredura;
- Estudar as composições em termos de formação das fases geopoliméricas através de espectroscopia na região do infravermelho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GEOPOLÍMEROS

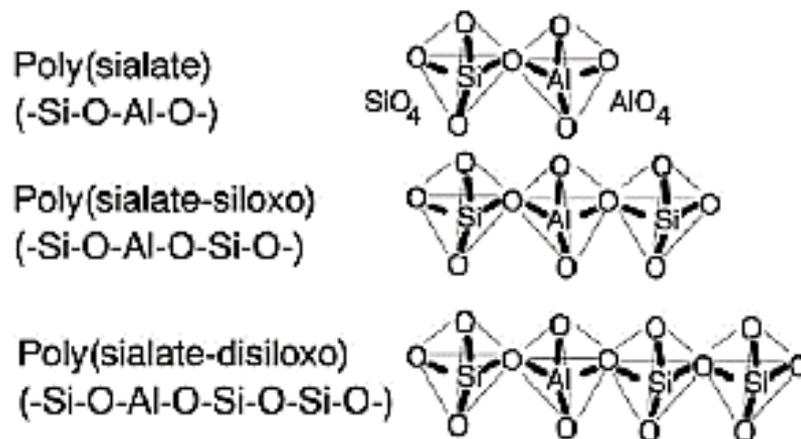
O termo "geopolímero" foi introduzido pela primeira vez por Davidovits em 1978 para descrever uma família de ligantes minerais com composição química semelhante a zeólitos, mas com uma microestrutura amorfa. Ele também sugeriu o uso do termo "poli (sialato)" para a designação química de geopolímeros à base de sílico-aluminato (DAVIDOVITS, 1988, 1988, 1991; VAN JAARSVELD et al., 2002); Sialato é uma abreviatura de silício-oxi-aluminato.

Os poli (sialatos) são polímeros de cadeia e anel com Si^{4+} e Al^{3+} em número de coordenação IV com o oxigênio e variam de amorfo a semicristalino como a fórmula empírica (WALLAH; RANGAN, 2006).



Onde "z" é 1, 2 ou 3 ou superior até 32; M é um cátion monovalente tal como potássio ou sódio, e "n" é um grau de policondensação (DAVIDOVITS, 1984, 1988, 1994, 1999). Davidovits (1988; 1991; 1994; 1999) também distinguiu 3 tipos de polisialatos, nomeadamente o tipo de poli(sialato) (-Si-O-Al-O), o tipo de poli(sialato-siloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O) e o tipo de poli(sialato-disiloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O). As estruturas desses polisialados podem ser esquematizadas como na Figura abaixo:

Figura 1 - Estruturas químicas dos polisialatos.

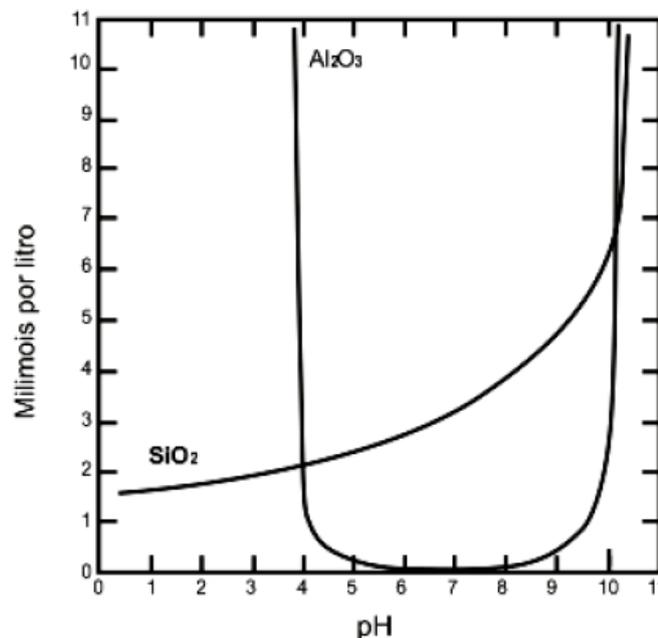


Fonte: (DAVIDOVITS, J. 2002 apud WALLAH; RANGAN, 2006)

A geopolimerização envolve a reação química de óxidos de alumino-silicato (Si_2O_5 , Al_2O_2) com polissilicatos alcalinos produzindo ligações de Si-O-Al poliméricas. Polissilicatos são geralmente silicato de sódio ou potássio fornecido pela indústria química ou fabricado em pó de sílica fina como subproduto da metalurgia do ferro-silício (WALLAH; RANGAN, 2006).

A relação da solubilidade da sílica e alumina pode ser verificada em estudo realizado por Mason (1966), conforme Figura 2.

Figura 2 - Relação de solubilidade entre Al_2O_3 e SiO_2 em função do pH.



Fonte: (MASON, 1966 apud SEVERO et al., 2013)

Observa-se que enquanto a SiO_2 é altamente solúvel em meio básico, a Al_2O_3 é solúvel nos extremos, tanto no meio ácido quanto no básico, apresentando baixa solubilidade em condições de pH neutro (SEVERO et al., 2013).



Essas reações sugerem que moléculas de água e íons OH^- são consumidos em dissolução contínua. De acordo com as reações, a alcalinidade (concentração de $[\text{OH}]^-$) tem um importante influência sobre a taxa de dissolução da sílica (SiO_2) e da alumina (Al_2O_3), porém a temperatura

e a reatividade da matéria prima em si também são fatores determinantes (SAGOE-CRENTISIL; WENG, 2007; VAN JAARSVELD et al., 1999).

Ao contrário dos cimentos comuns, os geopolímeros não formam hidratos de silicato de cálcio (CSHs) para a formação e força da matriz, mas utilizam a policondensação de precursores de sílica e alumina e um alto teor de álcali para obter resistência estrutural. Por conseguinte, os geopolímeros são por vezes referidos como ligantes de alumino-silicato alcalinizados (DAVIDOVITS, 1994; PALOMO et al., 1999; ROY, 1999; VAN JAARSVELD et al., 2002). No entanto, Davidovits (1999; 2005) afirmou que usar o termo "alcalino-ativado" poderia criar confusão significativa e gerar ideias falsas sobre o concreto geopolímero. Por exemplo, a utilização do termo "cimento ativado com álcali" ou "cinzas volantes ativadas por álcali" pode ser confundida com o termo "Reação agregada alcalina (AAR)", uma propriedade prejudicial bem conhecida em concreto.

Existem dois constituintes principais de geopolímeros, nomeadamente os materiais de origem e os líquidos alcalinos. Os materiais de origem para geopolímeros à base de alumino-silicato devem ser ricos em silício (Si) e alumínio (Al). Estes podem ser minerais naturais cuja fórmula empírica contém Si, Al e oxigênio (O) (Davidovits, 1988c). Alternativamente, materiais de subproduto, como cinzas volantes, fumaça de sílica, escória, cinzas de casca de arroz, lama vermelha, etc., podem ser utilizados como materiais de origem. A escolha dos materiais de origem para a produção de geopolímeros depende de fatores como disponibilidade, custo e tipo de aplicação e demanda específica dos usuários finais. Os líquidos alcalinos são de metais alcalinos solúveis que geralmente são baseados em sódio ou potássio (WALLAH; RANGAN, 2006).

Entre os materiais de resíduos ou subprodutos, as cinzas volantes e a escória são as mais potenciais fonte de geopolímeros. Vários estudos foram relatados relacionados ao uso desses materiais de origem. Cheng e Chiu (2003) relataram o estudo de fazer geopolímero resistente ao fogo usando escória de alto forno granulada combinada com metacaulinita. A combinação de hidróxido de potássio e silicato de sódio foi utilizada como líquidos alcalinos. Van Jaarsveld et al., (1997; 1999) identificaram o uso potencial de materiais de resíduos como: cinzas volantes, solo contaminado, rejeitos de minas e resíduos de construção para imobilizar metais tóxicos. Palomo et al., (1999) relataram o estudo de geopolímeros à base de cinzas volantes. Eles usaram combinações de hidróxido de sódio com silicato de sódio e hidróxido de potássio com silicato de potássio como líquidos alcalinos. Verificou-se que o tipo de líquido alcalino é um fator significativo que afeta a resistência mecânica e que a combinação de silicato de sódio e hidróxido de sódio proporcionou a maior resistência à compressão.

3.2 ESPUMAS GEOPOLIMÉRICAS

O cimento de espuma é um material leve que é preparado por formação de espuma na pasta de cimento sem a necessidade de tratamento térmico em autoclave.

Devido à facilidade de moldagem dos geopolímeros a partir de uma suspensão aquosa e a possibilidade de ajustar o componente através das reações de geopolimerização, permitindo assim a retenção da forma produzida, os geopolímeros oferecem a possibilidade de produzir eficientemente componentes altamente porosos e cerâmicos (CILLA; MORELLI; COLOMBO, 2014).

A abordagem típica é emprestada do procedimento utilizado na indústria do cimento, que consistem na adição à suspensão aquosa de geopolímero de componentes (tais como sílica ativa ou pó de Al) capaz de gerar *in situ* H₂ gasoso devido à reação de oxidação que ocorre com Si metálico ou Al em um ambiente altamente alcalino [(PRUD'HOMME et al., 2010) (PRUD'HOMME et al., 2011) (ABDULLAH et al., 2012)]. Outra abordagem que foi proposta é a adição de peróxidos, que se decompõe em água devido ao alto pH gerando gás. Essas abordagens fornecem uma maneira adequada de fabricar componentes porosos, mas quando estas rotas de processamento são usadas as células são tipicamente fechadas, isto é, nenhum poro de interligação é presente nas paredes celulares, limitando assim as propriedades, tais como a permeabilidade a líquidos ou gases do componente. Apesar de estudos, pouco trabalho tem sido dedicado à produção de espumas de geopolímeros de formas alternativas (STROZI CILLA; COLOMBO; RAYMUNDO MORELLI, 2014).

3.3 MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS

3.3.1 Microsílica

A microsílica é manufaturada em fábricas de Silício e Ferro Silício. A sílica ativa é um subproduto da fabricação do silício metálico.

O silício metálico é produzido em fornos elétricos de redução. Em seu modelo termoquímico de fabricação é gerado um gás (SiO) que, ao sair do forno elétrico oxida-se formando a sílica amorfa (SiO₂), contendo uma pequena quantidade de outros óxidos e

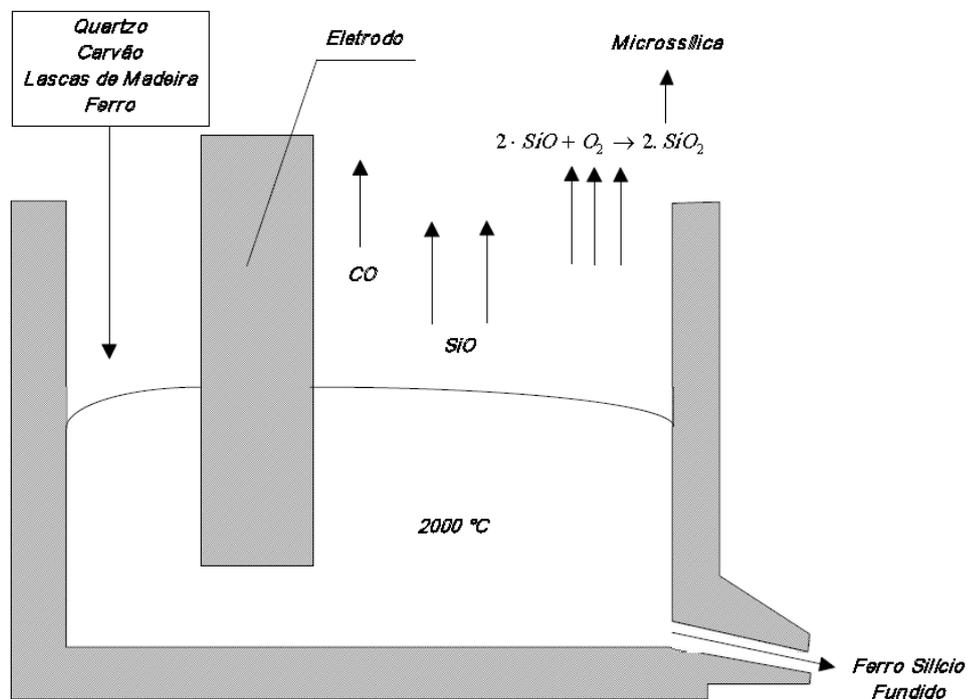
elementos é captado em filtros de manga. As partículas de microssílica são esféricas, vítreas e possuem um diâmetro médio menor do que $1\mu\text{m}$, apresentando altíssima superfície específica e uma massa específica aparente de $150\text{-}300\text{ kg/m}^3$. O material pode ser aplicado neste estado, embora existam algumas vantagens na mistura dele com água, antes do seu contato com o restante do material (NETTO; OLIVEIRA; LUÍS, 1994).

Num processo de densificação a massa específica aparente do material poderá ser majorada em mais de duas vezes. A microssílica é normalmente comercializado na forma:

- Densificado: densidade a granel $> 0,5\text{ g/cm}^3$
- Não Densificado: densidade a granel $< 0,5\text{ g/cm}^3$

A outra forma de processamento é a suspensão aquosa (lama). Um metro cúbico de suspensão terá aproximadamente 700 kg de microssílica, a uma concentração usual de 50 % de sólidos.

Figura 3 - Esquema do processo em que se obtém microssílica como subproduto.



Fonte: (NETTO; OLIVEIRA; LUÍS, 1994)

A sílica ativa é um subproduto do processo de fabricação do silício metálico ou das ligas de ferro-silício. A produção dessas ligas se dá em fornos elétricos de fusão, tipo arco-voltaico

em temperaturas de aproximadamente 2000°C. A sílica ativa é coletada ao passar através de filtros de mangas, em geral possui uma quantidade de SiO₂ maior que 80%. As matérias-primas utilizadas no processo são o quartzo de alta pureza, o carvão ou coque (fonte de carbono), cavacos de madeira e, eventualmente, o minério de ferro no caso da produção de ferro-silício.

A sílica ativa é um pó fino cuja cor varia de cinza claro a cinza escuro. Como o SiO₂ é incolor, a cor da sílica é determinada pelo teor de carbono e de óxido de ferro presentes. As características da sílica ativa, como cor distribuição granulométrica e composição química, dependem do tipo de liga da qual é produzida, o tipo de forno, a composição química e dosagem (SOUZA; MOZZER, 2010).

Até recentemente, a microssílica era considerada um material de refugo, tendo sido descartadas grandes quantidades desse material. Nos últimos anos, tem se constatado que a microssílica apresenta propriedades favoráveis no emprego em diferentes aplicações, inclusive do concreto (NETTO; OLIVEIRA; LUÍS, 1994).

3.3.2 Rejeito de minério sulfetado de cobre

Os minerais sulfetados são os mais importantes para a indústria de extração do cobre. Calcopirita, calcocita e bornita são os principais minerais sulfetados de cobre. Secundariamente estão os minerais oxidados e carbonatados (AZEVEDO; RIBEIRO; NAKAYAMA, 2009).

O beneficiamento de minérios sulfetados seguido da pirometalurgia é responsável por 80% da produção mineral de cobre. A rota hidrometalúrgica é utilizada para produção de 20% do cobre a partir de minerais oxidados e carbonatados.

As principais etapas de beneficiamento de minérios sulfetados envolvem a cominuição, flotação e separação sólido/líquido.

As etapas de cominuição utilizadas no processamento de minérios sulfetados de cobre são a britagem primária, realizada geralmente através de britadores giratórios, a etapa de moagem que na maioria dos casos utiliza moinho SAG (moinho semi-autógeno) juntamente com britagem de *pebbles* (realizada em britadores de cone) e moagem de bolas. Alternativamente em substituição ao SAG e britagem de *pebbles* aparece a prensa de rolos precedida de britagem secundária (em britador de cone).

Após as etapas de cominuição, onde os minerais de cobre já se encontram liberados, o minério é processado na etapa de flotação. A etapa mais importante de beneficiamento de minérios sulfetados de cobre é a concentração por flotação. Atualmente a flotação é feita através

de células de flotação de grande capacidade (células tipo tanque) e também em colunas de flotação, geralmente utilizadas para as etapas de limpeza. Os principais reagentes utilizados incluem coletores, espumantes e modificadores (AZEVEDO; RIBEIRO; NAKAYAMA, 2009).

O concentrado obtido na etapa de flotação passa pelo processo de separação sólido/líquido através do espessamento e da filtração, geralmente realizada em filtros prensa.

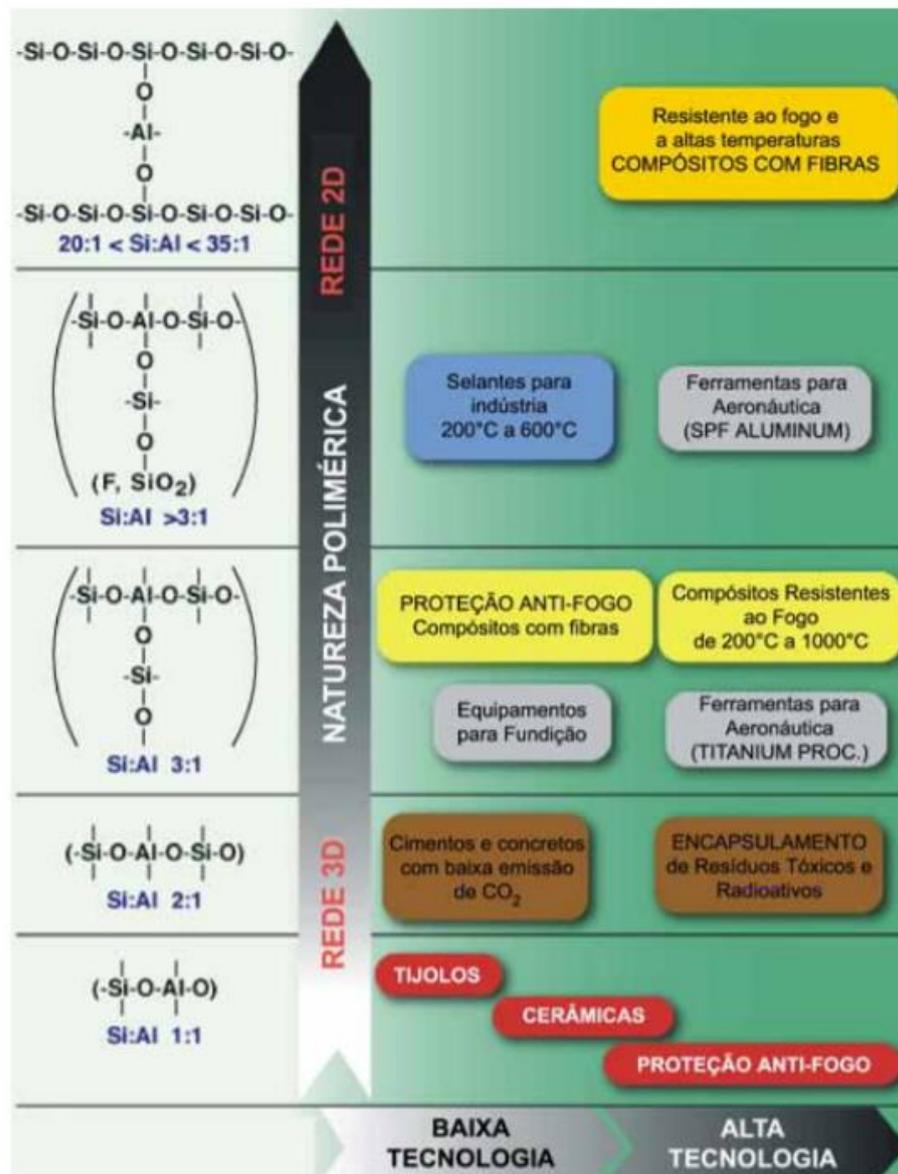
No Brasil podem ser citadas algumas plantas de processamento de cobre como Caraíba, Sossego, Chapada e Salobo. Porém é no Chile que se encontram as maiores minas produtoras de cobre, tais como: El Teniente e Andina (produzindo 600 mil toneladas de cobre por ano), a mina Escondida, a qual produz cerca de 25% da produção total de cobre do Chile e a mina de Chuquibambilla, a qual representa o maior depósito de superfície de cobre do mundo (AZEVEDO; RIBEIRO; NAKAYAMA, 2009).

A reciclagem merece destaque na cadeia produtiva do cobre, pois contribui com cerca de um terço da produção, além de movimentar a economia e favorecer o desenvolvimento sustentável (AZEVEDO; RIBEIRO; NAKAYAMA, 2009).

3.4 APLICAÇÕES DE GEOPOLÍMEROS

São numerosas as aplicações dos materiais geopoliméricos tendo em vista que são considerados um novo tipo de material, tendo em atenção propriedades tão significativas como a resistência mecânica, o baixo módulo elástico ou o excelente comportamento à ação das altas temperaturas, diversos investigadores têm proposto os mais variados campos de aplicação, como a fabricação de concreto de elevado desempenho, compósitos para revestimentos anti-fogo em aeronaves, restauro de pedras em monumentos, melhoramento de solos, proteção de estruturas degradadas, balística, fabricação de moldes e outros (PINTO, 2006). A imagem abaixo relaciona a aplicação com a razão atômica, pois a medida que aumenta a razão Si/Al vão se obtendo materiais com maior caráter polimérico formando cadeias mais largas e mais adequadas a outro tipo de aplicações.

Figura 4 - Relação de aplicação dos materiais geopoliméricos entre Si/Al.



Fonte: (PINTO, 2006).

A espuma geopolimérica é um material leve que é preparado por formação de gases na massa de geopolímero e não necessita de tratamento térmico em autoclave. Existem muitas vantagens no uso de espumas na indústria da construção, especialmente para a habitação pré-fabricada, o peso mais leve dos blocos de construção minimiza a carga morta do edifício e torna a construção mais fácil e rápida. Os vazios de ar em blocos de baixa densidade reduzem significativamente a condutividade térmica dos blocos e a velocidade do som através das paredes e atuam como isolador térmico e sonoro, aumentam a sustentabilidade do edifício.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATÉRIAS-PRIMAS

Para a síntese da espuma geopolimérica foram usadas as seguintes matérias-primas oriundas dos respectivos locais:

Tabela 1- Relação das matérias-primas e procedência.

Matérias-primas	Procedência
Microsílica	Dow Corning Silício do Brasil Indústria e Comércio Ltda., Breu Branco-PA
RMSC	Mina do Sossego explorada pela Vale S.A. Canaã dos Carajás-PA
Hidróxido de sódio	CRQ - Produtos Químicos EIRELLI

Fonte: Autor, 2018.

O RMSC foi utilizado como fonte de Al_2O_3 , SiO_2 e CaO para a síntese da espuma geopolimérica.

Figura 5 - RMSC utilizado.



Fonte: Autor, 2018.

A MCS foi utilizada como fonte de SiO_2 ativa, como fator espumante para a síntese da espuma geopolimérica.

Figura 6 - MCS utilizada para a síntese.



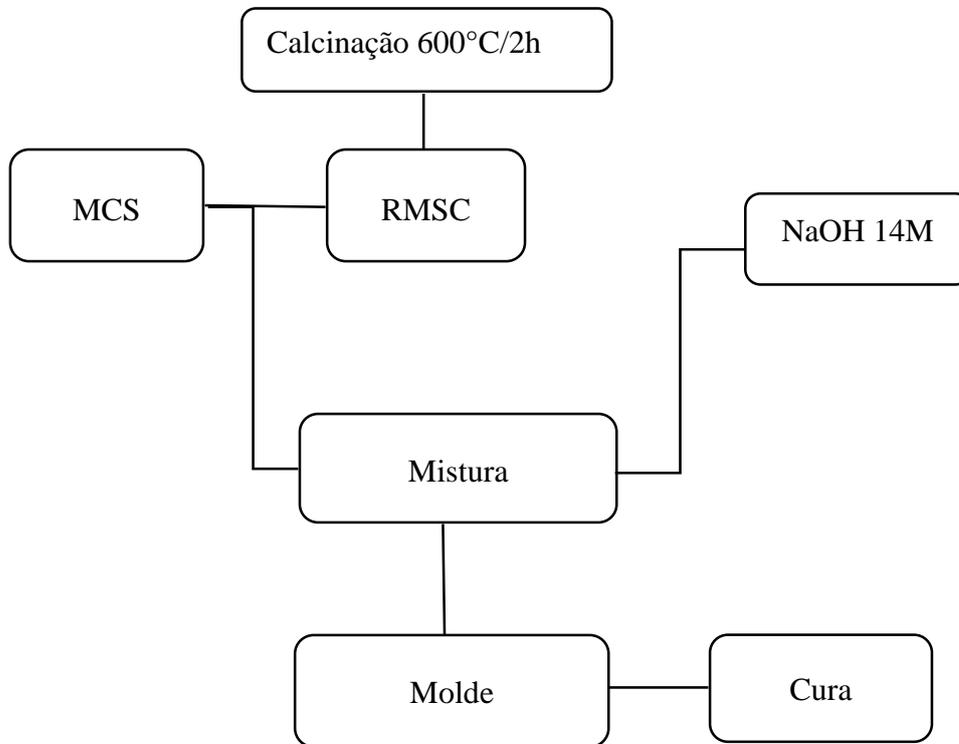
Fonte: Autor, 2018.

4.2 METODOLOGIA

Primeiramente, foi preparada uma solução alcalina. A solução de NaOH utilizada foi proveniente da dissolução do material sólido em água destilada ficando com a concentração de 14M. Para a preparação foram utilizadas 560g de NaOH e 1l de água destilada, em que se acrescentava água aos poucos a quantidade designada, misturando durante todo o tempo para a diluição ser mais eficiente.

Segundo Rangan (2014) a concentração de NaOH pode variar entre 8 e 16M, frisando que a maior concentração de hidróxido de sódio possibilita que a reação ocorra de forma mais eficiente. O RMSC foi calcinado à 600°C por 2h em forno mufla (Marconi modelo MA 385/3) para eliminação dos voláteis. A microssílica foi utilizada sem nenhum tratamento anterior. Em seguida, foi efetuada a mistura de microssílica e rejeito; após, foi adicionada a solução de NaOH e foram misturadas de forma manual por aproximadamente sete minutos. O fluxograma a seguir mostra as etapas de preparação dos geopolímeros.

Figura 7 - Fluxograma que demonstra as etapas do processo de preparação das espumas geopoliméricas



Fonte: Autor, 2018.

Os corpos de prova com 5cm de altura e 2,5 cm de diâmetro foram moldados e levados a cura por um período de 10 dias, a mesma foi feita em temperatura ambiente.

Figura 8 - Material moldado, pronto para a cura.



Fonte: Autor, 2018.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS E DOS GEOPOLÍMEROS

4.3.1 Difractometria de Raios X

A difratometria de raios X (DRX) é uma técnica de caracterização mineralógica de materiais muito utilizada para identificação das espécies de minerais presentes e também permite estudar as características cristalográficas destes minerais e, com o uso de software, quantificar cada espécie mineral. Além disto, é possível analisar a microestrutura dos materiais por meio de informação sobre orientação e tamanho dos cristais, parâmetros de rede, tensões internas, identificação de fases, entre outras possibilidades (MELO, 2011).

Segundo Barroso (2009) a difratometria de raios X representa o fenômeno de interação entre o feixe de raios X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material, relacionado ao espalhamento coerente. A técnica consiste na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, constituindo feixe difratado.

Para a prática do DRX o material foi inicialmente moído em almofariz, para a obtenção do pó e subsequentemente submetido à leitura no equipamento.

A identificação dos componentes mineralógicos foi realizada através de um difratômetro de raios-X, Rigaku Miniflex 600, operando a 30kV, com passo de $0,02^\circ$ e velocidade de varredura de $20^\circ/\text{min}$. O equipamento pertence ao Instituto de Geociências e Engenharias da UNIFESSPA.

Figura 9 - Difratômetro de raios X utilizado para caracterização da amostra.



Fonte: Autor, 2018.

4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um equipamento que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida, é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de amostras sólidas. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observada (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

A técnica de MEV permite analisar a morfologia das amostras em escala micrométrica, tais como as fases presentes nos materiais, tamanho médio de grãos, porosidade, distribuição de fases, identificação de trincas entre outras características. O equipamento utilizado foi o MEV TM 3000, Hitachi. Acoplado ao MEV fez-se uso também do espectrômetro de energia dispersiva de raios X (EDS) que se fundamenta por ser uma técnica usada para a análise elementar ou caracterização química de uma amostra.

O equipamento de MEV utilizado do modelo HITACHI TM 3000 com aceleração de voltagem de 15 kV e o equipamento de EDS com modelo SwiftED3000.

Para a análise no MEV e EDS a amostra foi fraturada para adequar às dimensões certas ao equipamento, o que permitiu a visualização de imagens nas regiões de fratura assim como caracterização química no EDS. (modelo)

Figura 10 - Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Autor, 2018.

4.3.3 Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é considerada uma das mais importantes técnicas experimentais para a caracterização de polímeros, em termos de identificação e/ou determinação de características estruturais dos polímeros, principalmente no que se refere a grupos funcionais e de ligações presentes na amostra. Além das informações qualitativas, a análise por FTIR permite a determinação semi-quantitativa de componentes de

uma amostra ou mistura, esteja ela no estado sólido, líquido, gasoso ou em solução (não-aquosa). Dependendo da natureza da amostra a ser analisada pode ser uma técnica fácil e rápida (pode prover informações em menos de 5 minutos), sendo possível também analisar amostras pequenas ou em pequenas quantidades.

Para a análise de FTIR o material foi anteriormente moído em almofariz, para a obtenção do pó e subsequente leitura no equipamento. As análises foram realizadas no Laboratório de Análises Química do Instituto de Ciências Exatas da UNIFESSPA, utilizando-se espectrômetro de marca Agilent Technology, modelo Cary 630 FTIR, usando pastilhas de brometo de potássio (KBr), com varredura na faixa de 4000–600 cm^{-1} .

Figura 11 - Espectrômetro de infravermelho.



Fonte: Autor, 2018.

4.3.4 Ensaio para a quantificação de gás produzido na geopolimerização

Este ensaio foi desenvolvido com intuito de avaliar a emissão de gás durante a reação de formação da espuma. Inicialmente, foram colhidas duas pequenas quantidades de material antes da cura, ou seja, o material ainda não estava consolidado; este material retirado consistiu em duas formulações preparadas a primeira foi de 50% RMSC e 50% de MCS; a segunda com 70% RMSC e 30% MSC. Foram preparadas duas amostras de cada, preenchendo 5ml de

material em uma seringa de 20cm³. As seringas foram vedadas para não haver a perda de gás e de água, tornando assim possível a quantificação de gás, referente ao deslocamento do êmbolo da seringa.

Figura 12 - Início do ensaio de avaliação do gás produzido na geopolimerização da espuma.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 13 - Realização do ensaio.



Fonte: Autor, 2018.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Inicialmente, é apresentado na Tabela 2 o resultado da análise da composição química das matérias primas, oriundas da ficha técnica de cada material. A quantificação dos componentes químicos é essencial para se prever o comportamento da massa durante a reação de geopolimerização.

Tabela 2- Análise química do RMSC e MSC.

Componentes	RMSC (%)	MSC (%)
Al ₂ O ₃	11,19	-
CaO	9,46	-
Fe ₂ O ₃	23,05	-
K ₂ O	0,87	-
MgO	5,34	-
P ₂ O ₅	3,52	-
SiO ₂	44,49	95,5
SO ₃	1,7	-
V ₂ O ₅	0,15	-
MnO	0,007	-
CuO	0,04	-
Orgânicos*	0,008	1,6

(*Eliminados após a calcinação).

Fonte: Autor.

Como pode ser observado as matérias-primas apresentam em grandes quantidades compostos que são imprescindíveis para a síntese de geopolímeros como Al₂O₃, SiO₂ e CaO, ou seja, aluminossilicatos.

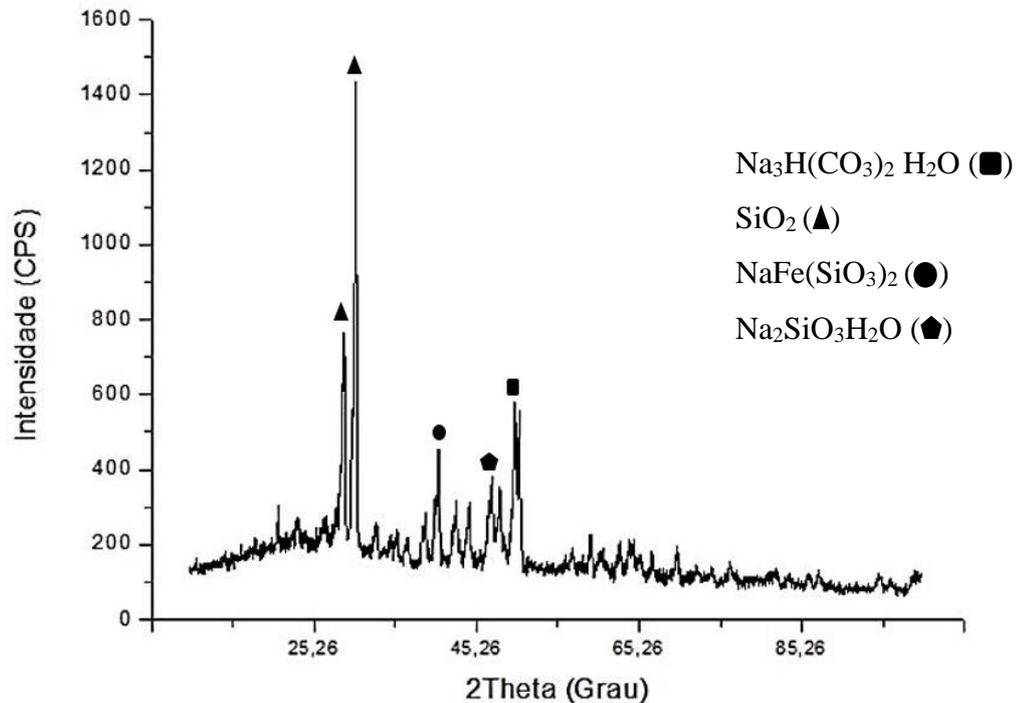
O RMSC apresenta variados componentes em sua composição, resultado da gênese da rocha mãe da qual o minério é extraído e processado. Destaca-se os elevados teores de sílica e a alumina, que se tornam indispensáveis para o processo de geopolimerização em meio alcalino. A MSC como pode ser observado apresenta elevada quantidade de SiO₂ amorfa resultante do seu processo de obtenção, e apresenta além de tudo uma elevada área específica por se tratar de partículas muito finas. As partículas de microssílica são esféricas, vítreas e possuem um diâmetro médio menor do que 1(μm), apresentando altíssima superfície específica e uma massa específica aparente de 150-300 Kg/m³. O material pode ser aplicado neste estado, embora existam algumas vantagens na mistura dele com água, antes do seu contato com o restante do material (NETTO; OLIVEIRA; LUÍS, 1994).

Os primeiros testes de geopolimerização foram realizados, misturando-se as matérias primas inicialmente selecionadas nas proporções de 70% de RMSC e 30 % de MSC. Observou-se que a quantidade de NaOH adicionada foi suficiente para molhar adequadamente a massa de material sólido, promovendo assim o início da dissolução dos materiais.

5.2 ANÁLISE MINERALÓGICA

A partir da análise mineralógica por DRX foi possível identificar as principais fases presentes no geopolímero.

Figura 14 - Difratoograma de raios X da amostra de espuma geopolimérica.



Fonte: Autor, 2018.

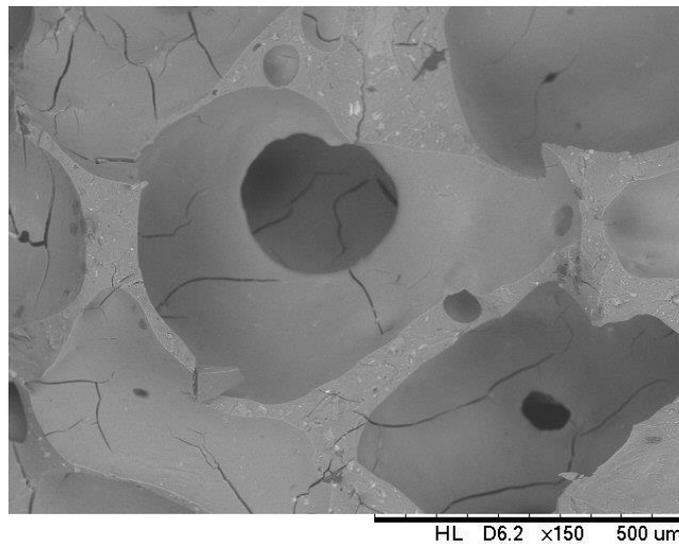
A partir do difratograma foram identificadas as principais fases formadas como: quartzo SiO_2 , silicato de sódio e ferro $\text{NaFe}(\text{SiO}_3)_2$, silicato de sódio hidratado $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{H}_2\text{O}$ e trona $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, que são obtidos a partir da reação de síntese de formação da espuma geopolimérica, como visto a reação de geosíntese ocorreu de forma bem rápida, mas o suficiente para formação de algumas fases. Pode-se observar que a presença de trona que é um bicarbonato de cálcio é proveniente da eflorescência de componentes em sua superfície.

Essas fases que compõem o material são provenientes da rápida reação em que são formadas, anteriormente a completa consolidação da espuma geopolimérica.

5.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As Figuras a seguir, mostram as micrografias de MEV das espumas geopoliméricas desenvolvidas. É mostrada também a imagem de EDS, que identifica pontualmente os componentes químicos presentes no material.

Figura 15 - Micrografia de MEV da região de fratura do geopolímero.

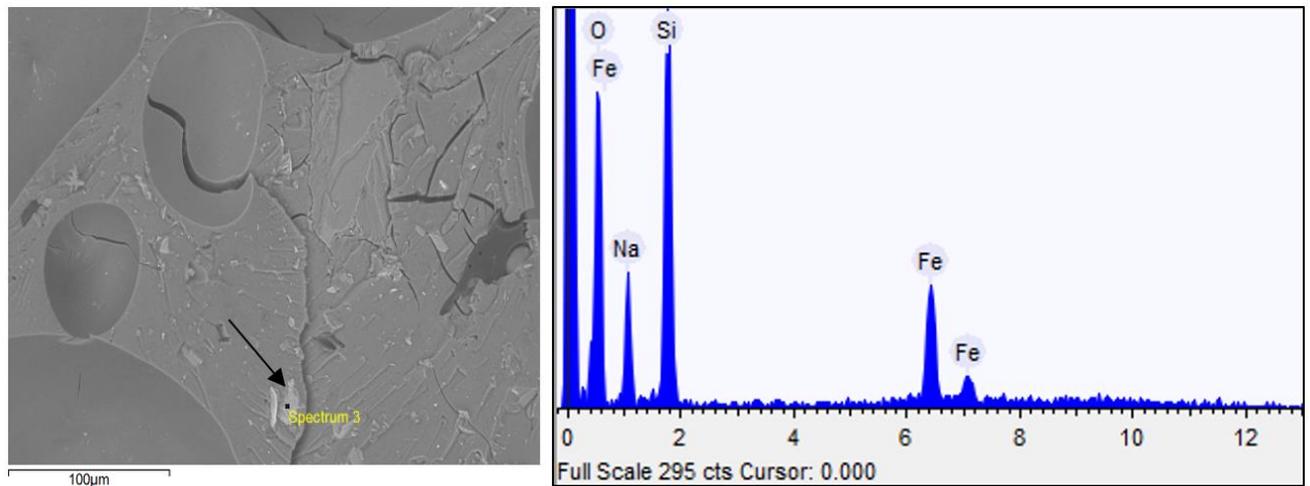


Fonte: Autor, 2018.

Assim como visto na micrografia, a amostra apresenta elevada porosidade e com grandes quantidades de microtrincas oriundas do processo de inchamento que a mistura sofre assim que é colocada no molde e durante o processo de cura. A grande quantidade de poros se deve a eliminação de gás durante a geosíntese das matérias-primas para formação da espuma (H_2). Observa-se que cada porosidade é rodeada por microtrincas.

As trincas são resultantes do inchamento da estrutura pela liberação de gases e formação de poros, que ocorre enquanto a amostra está se consolidando e endurecendo.

Figura 16 - Micrografia de MEV e espectro de EDS da região de fratura.



Fonte: Autor, 2018.

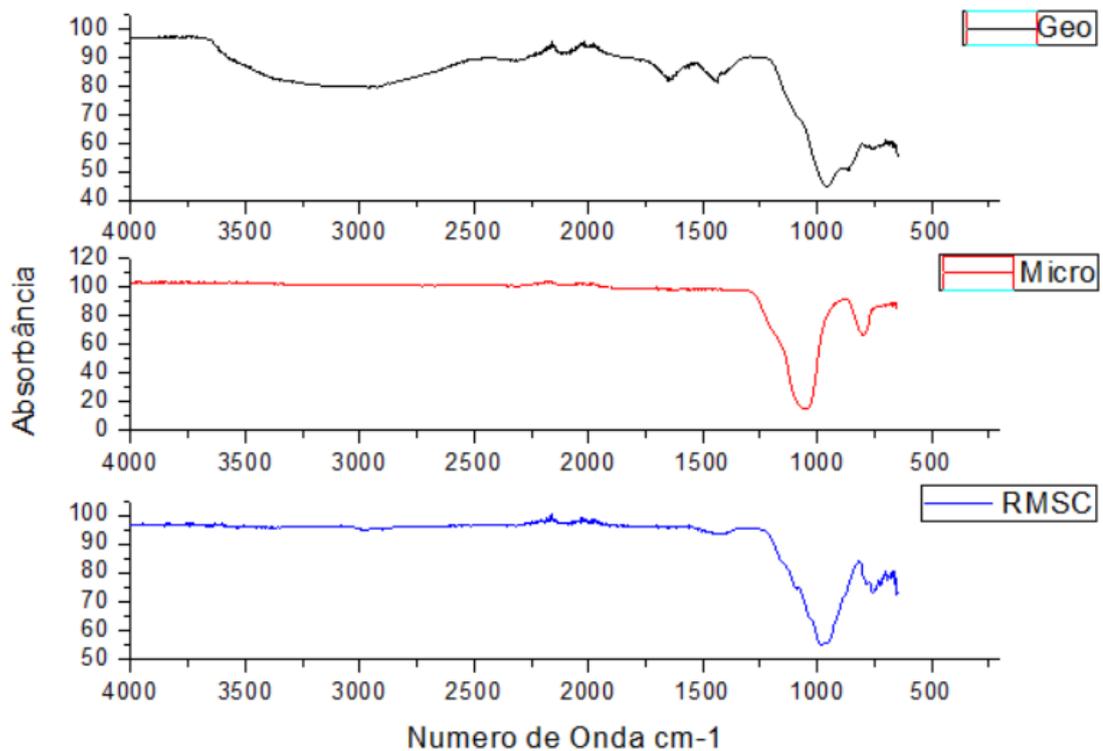
Na imagem da Figura 16 pode-se observar pelo espectro de EDS a presença dos elementos Si, Fe, Na e O, o que caracteriza a formação da matriz geopolimérica típica, assim como é possível visualizar a porosidade aberta comum das espumas desta natureza.

A reação de geossíntese responsável pela formação da espuma se deve ao fato de estar presente nas matérias-primas materiais componentes metálicos, como é o caso da microssílica utilizada que apresenta em pequenas quantidades de silício metálico resultante do seu processo de obtenção. Esta pequena quantidade de material metálico juntamente com a NaOH causa essa reação, liberando gases e formando poros, sendo esta a responsável pela formação da espuma.

5.4 ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FORIER

A seguir são apresentados os resultados dos ensaio de espectroscopia de infravermelho (FTIR) da espuma geopolimérica, MSC e RMSC.

Figura 17 - Espectros de FTIR da amostra e das matérias-primas.



Fonte: Autor, 2018.

No espectro referente ao geopolímero, observa-se as vibrações características $\approx 780 \text{ cm}^{-1}$ referente às vibrações Si-O-Si decorrentes da formação da estrutura e dissolução gerada pela reação de geopolimerização.

A região no espectro em cerca de 1100 cm^{-1} está relacionada a partículas ricas em sílica que não reagiram. Levando em consideração que essas amostras contêm relativamente alto teor de silicato de sódio e que a faixa principal é a banda de $\sim 1040 \text{ cm}^{-1}$ (banda parecida com a de metacaulim) está relacionada a partículas de ativador sólido não dissolvido. A dissolução das espécies de sílica e alumina componentes do RMSC é muito maior (HAJIMOHAMMADI et al., 2017).

A posição da banda principal sugere que ao aumentar o teor de sílica da amostra, a relação Si/Al da espuma final diminui. A banda de 1100 cm^{-1} , pico mais alto, sugere níveis de reação mais elevados (HAJIMOHAMMADI et al., 2017).

Bandas entre $463\text{-}672 \text{ cm}^{-1}$ são atribuídas às vibrações dos tetraedros de sílica ou alumina. Bandas próximas a 796 cm^{-1} e a 693 cm^{-1} estão relacionadas à presença de alumínio e

quartzo, respectivamente, fazendo parte da composição química do metacaulim. A banda próxima a 800 cm^{-1} está relacionada às vibrações de AlO_4 , enquanto que a banda próxima a 688 cm^{-1} está relacionada às vibrações simétricas de estiramento do Si-O-Si (DE VARGAS, 2015).

De acordo com Vassalo (2013), após a ativação alcalina duas bandas são de importante análise, sendo a primeira compreendida entre $1005\text{-}990\text{ cm}^{-1}$ e a segunda entre $960\text{-}944\text{ cm}^{-1}$. A primeira banda é atribuída à vibração dos alongamentos assimétricos de Si-O-T (T= Si ou Al) e conhecida como sendo sensível à conectividade e razão Si/Al. A segunda banda é atribuída à vibração de alongamentos assimétricos de estruturas de Si-O-Na, que indica a influência da concentração de NaOH sobre as bandas.

As pastas geopoliméricas possuem uma estrutura básica de Si-O-Al-O, nas quais a banda principal e característica é próximo de 1000 cm^{-1} no espectro de FTIR. Bandas nesta região estão relacionadas aos estiramentos assimétricos de Al-O-Si, característicos da policondensação dos aluminossilicatos no processo de álcali-ativação. É por esta razão que ocorre um deslocamento da banda 1090 cm^{-1} para bandas de menor frequência para as amostras álcali-ativadas ($\sim 1000\text{ cm}^{-1}$). Conforme De Vargas et al. (2015) é importante que o meio esteja fortemente alcalino para dissolver a sílica e alumínio, bem como hidrolisar a superfície das matérias-primas, para gerar a policondensação dos aluminossilicatos, de modo que quanto melhor for o processo de policondensação dos aluminossilicatos, mais definida é a banda.

5.5 QUANTIFICAÇÃO DE GÁS PRODUZIDO NA GEOPOLIMERIZAÇÃO

Como já relatado este ensaio surgiu da necessidade de quantificação do gás produzido durante o processo de formação do geopolímero, por ativação alcalina das matérias-primas, pois a relação das quantidades de matérias-primas e emissão do gás (H_2) é o que determina a natureza da porosidade.

Inicialmente a seringa contendo a massa geopolimérica foi posta à cura com volume de 5 ml (5 cm^3) e o acompanhamento foi feito com 7 e 12 dias de cura. A Tabela 3 mostra os resultados de deslocamento volumétrico para as duas formulações estudadas.

Tabela 3- Deslocamento volumétrico das formulações, após 7 e 12 dias de cura.

	70%RMSC e 30% MSC	50%RMSC e 50% MSC
7 dias	2 cm ³	2 cm ³
12 dias	2 cm ³	4 cm ³

Fonte: Autor, 2018.

Figura 18 - Ensaio de deslocamento volumétrico da massa geopolimérica durante cura de 7 dias.



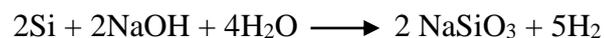
Fonte: Autor, 2018.

Figura 19 - Ensaio de deslocamento volumétrico da massa geopolimérica durante cura de 12 dias.



Fonte: Autor, 2018.

A expansão volumétrica é decorrente da formação de gases durante a reação de geopolimerização. A maior quantidade de gás emitido é resultante da formulação que tem maior quantidade de microssílica (50% RMSC e 50% MSC) e maior tempo de cura, o que comprova que, provavelmente, a presença de um pequeno teor de silício metálico, em reação com o NaOH forma o gás hidrogênio, através da reação a seguir:



O H₂ presente é o responsável tanto pela ação de inchamento da amostra, como a de emissão de gases (H₂) durante a dissolução das matérias-primas. Como consequência do inchamento pela emissão de gás hidrogênio, ocorre a formação da estrutura porosa das espumas, estrutura esta que se torna consolidada após algumas horas depois do início da reação de geopolimerização.

O caminho de reação de geopolimerização juntamente com a reação de decomposição de gás hidrogênio pode dar origem a uma distribuição de tamanho de poro mais ou menos desejável. A distribuição de tamanho dos poros pode ter efeitos positivos ou negativos nas propriedades de espuma, dependendo da sua aplicação. Uma distribuição de tamanho estreito melhora as propriedades isolantes das espumas de concreto. Por outro lado, uma ampla

distribuição de tamanho de poro forma uma rede complexa de canais de ar conectados que leva a uma dissipação de ondas sonoras considerável dentro da matriz de espuma e melhora a resistência acústica. O alto pH básico e as altas temperaturas geralmente catalisam a decomposição de gás hidrogênio, e a solução de silicato de sódio é bem conhecida por ajudar a estabilizar a reação de decomposição. Na solução alcalina de gás hidrogênio, o silicato de sódio desativa as partículas coloidais finamente dispersas de hidróxidos metálicos e óxidos hidratados que atuam como catalisadores na reação de decomposição de gás hidrogênio. A reologia da mistura e a configuração precoce e endurecimento da matriz também podem afetar a estabilização dos vazios quando são formados recentemente no sistema. Se a pasta de geopolímero é viscosa e se ajusta rapidamente, a maioria das bolhas pode ser presa dentro da matriz nas primeiras idades de sua formação, o que impede a conexão entre si (HAJIMOHAMMADI et al., 2017).

6. CONCLUSÕES

A obtenção de espumas geopoliméricas foi possível a partir das matérias primas propostas. A melhor formulação proposta é aquela que apresenta maior emissão de gás, ou seja, aquela que apresenta maior quantidade de microssílica (50% RMSC e 50% MSC). Através dos resultados de difratometria de raios-X observou-se a formação de fases típicas de geopolímeros, tais como silicato de sódio hidratado e trona. As micrografias de MEV mostraram a formação de uma matriz geopolimérica porosa. Os poros foram formados a partir da reação do NaOH com o Si metálico presente na microssílica, que é um subproduto da síntese do Si por redução carbotérmica. Tal reação forma gás hidrogênio durante a reação de geosíntese. As trincas observadas atestam que a formação de gases ocorreu mesmo após o início da consolidação da matriz. As análises de FTIR mostraram a formação do geopolímero a partir das matérias primas utilizadas, com a presença das bandas de estiramento vibracional de ligações de Si-O-Si e Si-O-Al.

A partir do ensaio de deslocamento volumétrico foi-se possível a determinação da quantidade de gás emitido durante a geosíntese, pois é notório que o gás é o responsável pela natureza da porosidade da espuma.

O trabalho adotou durante todo o seu percorrer a síntese e a caracterização de espumas geopoliméricas, formadas através de rejeitos industriais, mostrando assim a importância de estudos que visem o aproveitamento de resíduos e diminuição das emissões de gases de efeito estufa que é uma das grandes problemáticas do mundo nos dias atuais.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinar a porosidade das espumas obtidas.
- Estudos em cima da alta refratariedade e teste de chama das espumas a fim de identificar novas aplicações.
- Empregar KOH como ativador alcalino, em substituição à NaOH.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, M. M. A. B. et al. Fly Ash Porous Material using Geopolymerization Process for High Temperature Exposure. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 13, n. 12, p. 4388–4395, 2012.
- AZEVEDO, F. DE; RIBEIRO, S.; NAKAYAMA, L. **Cadeia Produtiva Do Cobre**. [s.l: s.n.].
- BIGNO, I. C.; JOSÉ, F.; THAUMATURGO, C. Cimentos geopoliméricos a base de resíduos agrícolas e agro-industriais. **Inter American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in Ecological and Sustainable Construction**, v. IAC-NOCMAT, 2005.
- CILLA, M. S.; MORELLI, M. R.; COLOMBO, P. Open cell geopolymer foams by a novel saponification/peroxide/gelcasting combined route. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 34, n. 12, p. 3133–3137, 2014.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - Aplicações e preparação de amostras - Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores**. Centro de ed. Porto Alegre: 2007, 2007.
- HAJIMOHAMMADI, A. et al. Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H₂O₂: The impact of mix design. **Materials and Design**, v. 130, n. March, p. 381–391, 2017.
- NETTO, P. A.; OLIVEIRA, M. M. DE; LUÍS, W. **Concretos e Argamassas com Microssílica**. [s.l.] Universidade Federal de Goiás, 1994.
- PINTO, A. Geopolymer System. **Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila ...**, p. 88, 2006.
- PRUD'HOMME, E. et al. Silica fume as porogent agent in geo-materials at low temperature. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 30, n. 7, p. 1641–1648, 2010.
- PRUD'HOMME, E. et al. In situ inorganic foams prepared from various clays at low temperature. **Applied Clay Science**, v. 51, n. 1–2, p. 15–22, 2011.

- SOUZA, M. H. DE; MOZZER, P. Sílica Ativa e Cinza Volante Materiais Pozolânicos. 2010.
- STROZI CILLA, M.; COLOMBO, P.; RAYMUNDO MORELLI, M. Geopolymer foams by gelcasting. **Ceramics International**, v. 40, n. 4, p. 5723–5730, 2014.
- WALLAH, S. E.; RANGAN, B. V. Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties. **Concrete**, p. 107, 2006.
- DAVIDOVITS, J., Synthetic Mineral Polymer Compound of The Silicoaluminates Family and Preparation Process, **United States Patent** - 4,472,199, p. 1-12. USA, 1984.
- DAVIDOVITS, J., Soft Mineralurgy and Geopolymers. Paper presented at the Geopolymer '88, **First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne**, France, 1988.
- DAVIDOVITS, J., Geopolymer Chemistry and Properties. **First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne**, France, 1988.
- DAVIDOVITS, J., Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. **Journal of Thermal Analysis**, p. 1633-1656, 1991.
- DAVIDOVITS, J., Properties of Geopolymer Cements. **First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**. Kiev, Ukraine: Kiev State Technical University, p. 131-149, 1994.
- DAVIDOVITS, J., Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. **Paper presented at the Geopolymere 99 International Conference**, Saint-Quentin, France, 1999.
- VAN JAARSVELD, J. G. S., VAN DEVENTER, J. S. J., LUKEY, G. C., The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. **Chemical Engineering Journal**, p. 63-73, 2002.
- MELO, L. G. A. **Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 185p, 2011.

BARROSO, M. D. B. **Desenvolvimento de compósitos com matriz de geopolímeros reforçados com partículas de quasicristais AlCuFe**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal da Paraíba, 64p, 2009.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

DAVIDOVITS, J., Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries. **World Resource Review**, p. 263-278, 1994.

DAVIDOVITS, J., High-Alkali Cements for 21st Century Concretes. **V. Mohan Malhotra Symposium on Concrete Technology: Past, Present And Future**, University of California, Berkeley, 1994.

DAVIDOVITS, J., Geopolymers of the First Generation: SILIFACE-Process. **Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy**, Compiègne, France, 1988.

DAVIDOVITS, J., Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. **Geopolymere 99 International Conference**, Saint-Quentin, France, 1999.

DAVIDOVITS, J., Green-Chemistry and Sustainable Development Granted and False Ideas About Geopolymer-Concrete. **International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete (GGC)**, Perth, Australia, 2005.

PALOMO, A., M.W.GRUTZECK, M.T.BLANCO., Alkali-activated fly ashes A cement for the future. **Cement And Concrete Research**, p. 1323-1329, 1999.

ROY, D. M., Alkali-activated cements Opportunities and Challenges. **Cement & Concrete Research**, p. 249-254, 1999.

CHENG, T. W., CHIU, J. P., Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. **Minerals Engineering**, p. 205-210, 2003.

VAN JAARVELD, J. G. S., VAN DEVENTER, J. S. J., & LORENZEN, L., The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. **Minerals Engineering**, p. 659-669, 1997.

VAN JAARVELD, J. G. S., VAN DEVENTER, J. S. J., SCHWARTZMAN, A., The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. **Material and leaching characteristics. Minerals Engineering**, p.75-91, 1999.

SAGOE-CRENTSIL, K., WENG, L., Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part II. High Si/Al ratio systems. **Journal of Material Science**, v. 42, p. 3007 – 3014, 2007.

MASON, B., **Principles of geochemistry**. 3. Ed. New York:Wiley, 1966.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MCCAFFREY, R., Climate Change and the Cement Industry. **Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)**, p. 15-19, 2002.

DE VARGAS, A. S. *et al.* **Argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes alcali-ativadas contendo areia de fundição**. Cerâmica. São Paulo, vol.61, no.359, jul./set. 2015.