



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

GLEISSON DOS SANTOS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS COM ADIÇÃO DE FIBRA DE  
PIAÇAVA**

MARABÁ-PA  
2017

GLEISSON DOS SANTOS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS COM ADIÇÃO DE FIBRA DE  
PIAÇAVA**

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. Eng. Elias Fagury Neto.

MARABÁ-PA  
2017

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

---

Silva, Gleisson dos Santos

Geopolímero com fibras naturais / Gleisson dos Santos Silva;  
orientador, Elias Fagury Neto. — 2016.

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, 2016.

1. Polímeros. 2. Cimento Portland. 3. Fibras – Propriedades  
mecânicas. 4. Materiais compostos. I. Fagury Neto, Elias, orient.  
II. Título.

CDD: 23. ed.: 620.192

---

GLEISSON DOS SANTOS SILVA

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS COM ADIÇÃO DE PÓ DE FIBRA DE  
PIAÇAVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia de Materiais da  
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará –  
UNIFESSPA, em cumprimento às exigências  
para obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Materiais. Orientador Prof. Dr.  
Elias Fagury Neto.

Data de aprovação: 22/03/2017

Conceito: EXCELENTE

Banca examinadora:



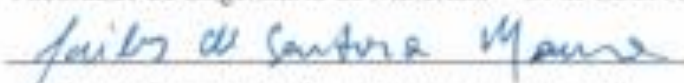
Prof. Dr. Elias Fagury Neto - Orientador

Faculdade de Engenharia de Materiais – UNIFESSPA



Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra - Membro

Faculdade de Engenharia de Materiais – UNIFESSPA



Prof. Eng. Jailes de Santana Moura – Membro

Faculdade de Engenharia de Materiais – UNIFESSPA

Dedico este trabalho a todos que me incentivam a estudar.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por cuidar de mim e me conceder sabedoria para trabalhar nos meus objetivos de vida.

A minha família, em especial a minha mãe que sempre me incentiva a prosseguir nos estudos.

Aos meus amigos de classe que trilharam comigo durante cinco anos de curso os caminhos da engenharia de materiais.

Ao meu orientador Prof. Dr. Elias Fagury Neto pela atenção e disponibilidade concedida a minha pessoa em todos os momentos deste trabalho e aos membros da banca o Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra e o Prof. Eng. Jailes de Santana Moura.

A empresa Metacaulim do Brasil pelo fornecimento do metacaulim utilizado no trabalho, em especial ao senhor Murilo Nacati Frade Gomes, analista administrativo da empresa.

A todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica em engenharia de materiais.

À Prof<sup>a</sup>. Me. Iana Damasceno, da Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará e ao pessoal do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção Civil do Instituto Federal do Pará.

Aos Servidores Públicos Federais e graduandos que juntos compõe o quadro humano da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.

*“Lembre-se: Você é do tamanho dos seus sonhos”.*

***Roberto Shinyashiki***

## RESUMO

O presente trabalho é centrado no desenvolvimento de um material com propriedades cimentícias, o geopolímero. Geopolímeros são polímeros inorgânicos cuja obtenção se dá pela polimerização de matérias-primas naturais de origem geológica contendo aluminossilicatos. O processo de polimerização envolve a reação química sob condições altamente alcalinas dos minerais Al-Si, produzindo a ligação polimérica Si-O-Al-O. O geopolímero é um tipo de cimento cujo processo de produção é viável econômico e ecologicamente, pois possui baixo custo de produção e a matéria-prima utilizada na produção é baseada em materiais aluminossilicatos que ocorrem em abundância na crosta terrestre. Por tudo isso, os geopolímeros estão substituindo o cimento Portland em muitas aplicações. Neste trabalho o objetivo foi produzir material geopolimérico a partir de filito, metacaulim, fibra de piaçava moída, vidro soda-cal moído e solução de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração 14M. A fibra de piaçava foi utilizado com o intuito de melhorar a resistência mecânica dos corpos de prova geopoliméricos que foram submetidos a 7, 15, e 24 dias de cura em estufa a temperatura de 50 °C. Os corpos de prova geopoliméricos foram submetidos aos ensaios de resistência mecânica a compressão e difratometria de raios-X. Os resultados de resistência à compressão mostraram que quanto maior a adição de fibra de piaçava moída na massa geopolimérica, maior é a resistência mecânica nos primeiros 15 dias de cura, sendo que quando o tempo de cura é superior a esse período de tempo, há o decréscimo na resistência à compressão.

**Palavras-chave:** Geopolímero, filito, metacaulim, vidro soda-cal moído, pó de fibra de piaçava moída, solução de hidróxido de sódio.



## ABSTRACT

This work is centered in the development of geopolymer, a material filled with cement properties. Geopolymers are inorganic polymers obtained by the polymerization of natural and geological feedstocks that contain aluminosilicates. The process of polymerization involves the chemical reaction under highly alkaline conditions of minerals Al-Si producing a polymeric bounding Si-O-Al-O. The geopolymer is a type of cement of which the production process is economic and ecologically available, because it has low production cost and its feedstock is based on aluminosilicates materials that exist in abundance on Earth's crust. Therefore, geopolymers are replacing Portland cement in many adhibitions. The aim of this work was to produce geopolymeric material from phyllite, metacaulim, ground piassava powder, ground soda-lime glass and a sodium hydroxide solution (NaOH) with a 14M concentration. The piassava powder was used to improve the mechanical resistance of the polymeric test specimens that were subjected to 7, 15 and 24 days of caring in a hothouse with 50°C of temperature. The polymeric proof bodies went through test of resistance and X-ray diffraction. In addition, tests of resistance to compression of the test specimens were made. The results showed that as bigger the addition of ground piassava powder in the geopolymeric massiness as bigger the mechanical resistance during the first 15 days of caring. When the time of caring is superior to this period, it occurs a decrease in the resistance to compression.

**Keywords:** Geopolymer, phyllite, metacaulim, ground soda-lime glass, ground piassava powder, sodium hydroxide solution.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Representação esquemática dos polissialatos .....	16
<b>Figura 2:</b> Representação esquemática dos polissialatos .....	16
<b>Figura 3:</b> Reações de geopolimerização dos polissialatos .....	17
<b>Figura 4:</b> a) Espuma geopolimérica; b) Tijolo maciço; c) Blocos vazados; d) Blocos maciços .....	19
<b>Figura 5:</b> Aeroporto de Brisbane. ....	19
<b>Figura 6:</b> Avião francês Rafale desenvolvido utilizando moldes geopoliméricos .....	20
<b>Figura 7:</b> Uso do geopolímero Pyrament, nos Estados Unidos, como material de reparação de rodovias .....	20
<b>Figura 8:</b> Instituto de Mudança Global (GCI), da Universidade de Queensland, na Austrália. ....	21
<b>Figura 9:</b> Tipos de metacaulins .....	23
<b>Figura 10:</b> Estrutura do mero da celulose .....	26
<b>Figura 11:</b> Orientação de fibras em compósitos .....	27
<b>Figura 12:</b> Fardos de piaçava .....	28
<b>Figura 13:</b> Fibra de piaçava moída .....	32
<b>Figura 14:</b> Difratoogramas de Raios-X do geopolímero com 7 dias de curas .....	34
<b>Figura 15:</b> Difratoogramas de Raios-X do geopolímero com 15 dias cura.....	34
<b>Figura 16:</b> Difratoogramas de Raios -X do geopolímero com 24 dias de cura.....	35
<b>Figura 18:</b> Resistência à compressão dos corpos de prova geopoliméricos.....	36

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
3.1	GEOPOLÍMEROS .....	14
3.1.1	Nanocristalinidade do Geopolímero.....	15
3.1.2	Reação de Formação do Geopolímero .....	16
3.1.3	Aplicações do Geopolímero .....	18
3.2	MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS .....	22
3.2.1	Metacaulim .....	22
3.3	FILITO .....	23
3.4	SILICATOS DE SÓDIO.....	24
3.5	FIBRAS VEGETAIS .....	25
3.5.1	Piaçava .....	27
3.5.2	Ensaio de difração de raios X (DRX) .....	28
3.5.3	Ensaio de Resistência à Compressão Axial.....	28
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
4.1	MATERIAIS .....	30
4.1.1	Matérias-Primas.....	30
4.1.2	Equipamentos e Vidrarias.....	30
4.2	METODOLOGIA .....	31
4.2.1	Calcinação do Filito .....	31
4.2.2	Preparação da Solução de Vidro Líquido (Silicato de Sódio).....	31
4.2.3	Cominuição da Fibra Vegetal de Piaçava .....	31
4.2.4	Síntese da Pasta do Cimento Geopolimérico .....	32
4.2.5	Confecção dos Corpos de Prova .....	32
4.2.6	Caracterização dos Geopolímeros .....	33
4.2.7	Difratometria de Raios -X (DRX).....	33
4.2.8	Resistência à Compressão Axial .....	33
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>34</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS GEOPOLÍMEROS .....	34
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....	36
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>39</b>

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....40**

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o material de construção civil mais amplamente utilizado, gerando um grande impacto no desenvolvimento da economia (TORGAL *et al.*, 2005). Por outro lado, a fabricação do cimento é responsável pela emissão de vários gases, especialmente o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que se acredita intensificar o efeito estufa. De acordo com Davidovits (2013), a produção de 1 tonelada de clínquer gera 0,95 toneladas de dióxido de carbono. As emissões anuais de  $\text{CO}_2$  oriundas da produção de cimento chegam a quase 3 bilhões de toneladas por ano em todo o mundo. Para essa produção faz-se necessária grande quantidade de energia e de recursos naturais não renováveis. Outro inconveniente associado ao uso de cimento Portland se relaciona ao concreto produzido, cuja vida útil usualmente não ultrapassa os 60 anos (TORGAL *et al.*, 2005).

Com intuito de reduzir os impactos ambientais ocasionados na produção de cimento Portland estão sendo realizados alguns estudos a fim de substituí-lo parcialmente. Dentre essas pesquisas encontra-se o desenvolvimento de materiais cimentícios suplementares, como geopolímero cuja produção é ambientalmente mais viável.

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos cuja obtenção se dá pela polimerização de matérias-primas naturais de origem geológica contendo aluminossilicatos. O termo foi introduzido por Davidovits para representar polímeros minerais resultantes da geoquímica. O processo de polimerização envolve a reação química sob condições altamente alcalinas dos minerais Al-Si, produzindo a ligação polimérica Si-O-Al-O. Por este motivo, a relação Si/Al é a principal variável no processo de geopolimerização. O controle deve ser feito por variações de temperatura, pressão e composição (razões molares) do geopolímero (DIAS, 2008). Além disso, são materiais inorgânicos, de alta resistência inicial, estável à temperatura até  $1250^\circ\text{C}$  e não inflamáveis. Isto deu um grande impulso para o desenvolvimento e inovação da técnica (DAVIDOVITS, 2002).

Shi *et al.* (2011) descrevem em um breve histórico a evolução do método de ativação alcalina. Glukhovsky (1989) descobriu princípios subjacentes à produção dos ligantes hidráulicos por ativação alcalina de materiais aluminossilicatos, denominado “cimento-solo”, nas décadas de 50 e 60. Posteriormente, Krivenko (1997) chamou esses ligantes de “Geocimentos” para destacar a presença nesses materiais de constituintes similares aos ligantes naturais presentes na crosta terrestre. Por fim, Davidovits, na década de 80, denomina esses ligantes de “Geopolímero”. Palomo *et al.* (1999) estabeleceram dois modelos de sistema de ativação alcalina para os materiais suplementares, que definem a diferença entre cimentos

álcali ativados e geopolímeros. O primeiro modelo se aplica aos materiais contendo Si e Ca, como as escórias de alto forno que são ativados com solução alcalina de baixa concentração e que têm o silicato de cálcio hidratado como produto principal da reação. O segundo modelo é referente aos materiais com Si e Al, tipo o metacaulim e as cinzas volantes, que são ativados com soluções de média a alta alcalinidade e que possuem como resultado da reação um mineral de aluminossilicatos hidratados, a zeólita, como os polímeros (VASSALO, 2013).

O geopolímero possui baixo custo de produção, pois é baseado em materiais aluminossilicatos que ocorrem em abundância na crosta terrestre. O processo de produção é energeticamente econômico, visto que o mesmo é curado e seco em temperaturas abaixo de 100 °C. Em relação à produção do cimento Portland, consome muito menos energia (DAVIDOVITS, 1994).

No presente trabalho dedicou-se à obtenção de um geopolímero utilizando como matérias-primas filito, metacaulim, vidro soda-cal moído e solução de hidróxido de sódio com concentração 14M. Como fase de reforço, adicionou-se também proporções determinadas de fibra da piaçava moída. Com a adição deste último componente procurou-se melhorar a resistência do geopolímero com inserção da mesma. O ativador alcalino, hidróxido de sódio, foi misturado ao vidro soda-cal moído originando o silicato de sódio.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Produzir materiais geopoliméricos a partir de filito e metacaulim, com adição de teores de fibra piaçava em pó, utilizando como ativador solução de hidróxido de sódio 14M.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as fases mineralógicas formadas nos geopolímeros.
- Avaliar a resistência mecânica das formulações com a adição de fibra de piaçava moída variando o percentual dessas em 2,5 e 5% em relação ao peso total de massa utilizada em cada formulação.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 GEOPOLÍMEROS

Os chamados geopolímeros ou polissialatos, terminologia adotada para abreviatura de poli-silicoaluminatos, foram descritos pela primeira vez em patentes pelo Prof. J. Davidovits em 1981, em que são apresentados vários exemplos de mistura de reagentes e processos de obtenção. Os polissialatos apresentam características particulares que revelam o seu grande potencial de aplicação como aglomerante, em substituição ao cimento Portland. Segundo o autor, trata-se de uma adaptação moderna dos processos de estabilização de solos caulíníticos ou lateríticos com cal ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ), feita pelos antigos Romanos e Egípcios na confecção de peças estruturais. Em sua publicação, intitulada “The Pyramids: An Enigma Solved”, afirmou que as grandes pirâmides do Egito foram erguidas, há 4.500 anos, com blocos moldados com este material. A preservação das pirâmides através de milhares de anos é a prova da extrema durabilidade dos materiais geopoliméricos (PINTO, 2011).

Na procura de novos materiais resistentes ao fogo, na forma de plásticos não inflamáveis e não combustíveis, Davidovits (1988a; 1991) observou que as condições hidrotérmicas utilizadas nas sínteses das resinas orgânicas eram semelhantes às das sínteses dos feldspatos e das zeólitas. Ambas requeriam meios altamente alcalinos, álcalis concentrados, pressão atmosférica e temperaturas menores do que 150 °C. Até então, a química desses minerais nunca tinha sido utilizada para sintetizar ligantes ou polímeros inorgânicos. Assim, Davidovits empregou essas condições para gerar uma nova classe de minerais ligantes, os geopolímeros, que apresentam estruturas e propriedades semelhantes aos cerâmicos. Porém, a síntese daqueles não requer as altíssimas temperaturas utilizadas na síntese destes. Assim como na síntese dos plásticos poliméricos, consiste em uma policondensação a baixas temperaturas. Apesar das semelhantes estruturas com os cerâmicos, os geopolímeros são polímeros inorgânicos com estruturas tridimensionais de aluminossilicatos reticulados contendo íons metálicos alcalinos. Resultam em produtos amorfos ou cristalinos dependendo da razão entre silício e alumínio e outros fatores. A designação química destes materiais é polissialato, onde sialato é uma abreviação para silício-oxo-aluminato (MELO, 2011).

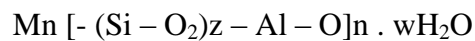
Basicamente, são formados por dois componentes: os materiais cimentícios suplementares e os líquidos alcalinos. A escolha dos materiais depende de fatores como a disponibilidade, o custo, o tipo de aplicação e demanda específica do produto final. Os



líquidos alcalinos são metais alcalinos solúveis, que geralmente são à base de sódio ou potássio, sendo os mais utilizados o hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), muitas vezes, combinados com silicato de sódio ou de potássio (WALLAH, 2006).

### 3.1.1 Nanocristalinidade do Geopolímero

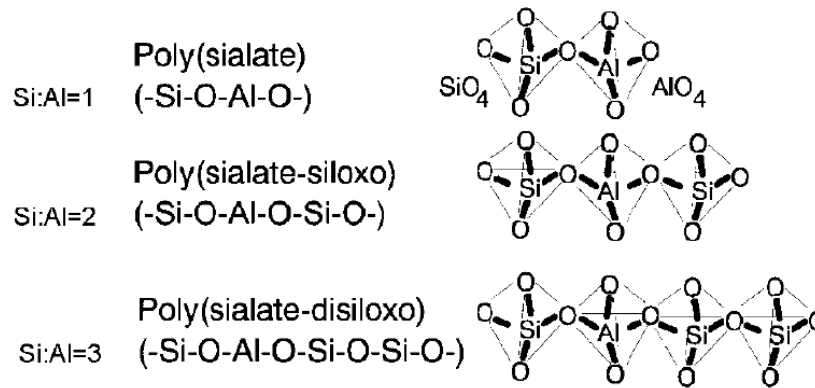
O processo de polimerização envolve a reação química sob condições altamente alcalinas dos minerais Al-Si, produzindo a ligação polimérica Si-O-Al-O, como descrito abaixo (SANTA, 2012):



Onde “M” é o elemento alcalino, o símbolo “-” indica a presença de uma ligação, “z” é 1, 2 ou 3 e “n” é o grau de polimerização (SANTA, 2012).

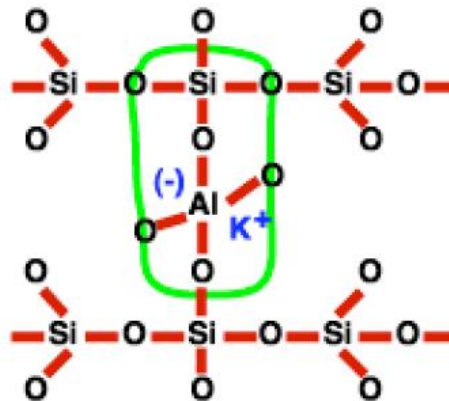
O produto formado pode ser considerado uma rocha sintética cuja estrutura contém uma rede tridimensional amorfa de átomos de silício e alumínio. A composição química dos materiais do geopolímero é similar a das zeólitas cristalinas, mas eles revelam uma estrutura atômica amorfa. O processo de polimerização pode ser assistido por aplicação de calor seguido de secagem. A reação química é rápida e a cura inicial requer um período entre 24 a 48 horas. Essa transformação baseia-se na organização e arranjo tridimensional em que os átomos de silício (Si) alternam com os de alumínio em coordenação tetraédrica, compartilhando os oxigênios. De acordo com a razão Si/Al os arranjos são formados. Tais arranjos são representados por três tipos, representados nas Figuras 1 e 2 (PINTO, 2011).

**Figura 1:** Representação esquemática dos polissialatos



Fonte: DAVIDOVITS, J., 2002.

**Figura 2:** Representação esquemática dos polissialatos



Fonte: DAVIDOVITS, J., 2002.

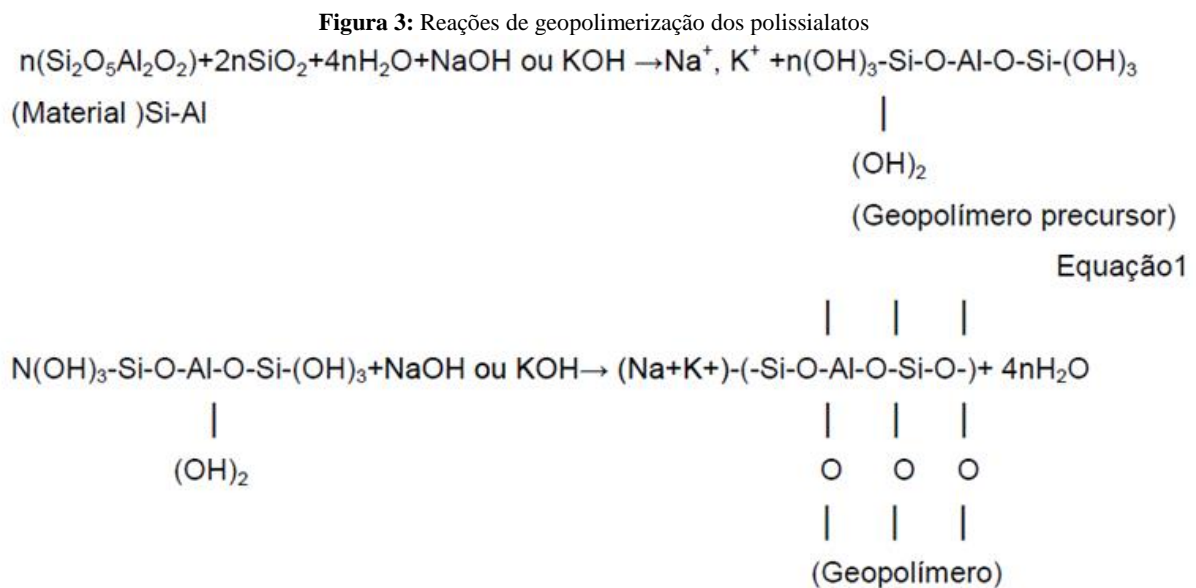
Pinto (2006) considera o resultado desse processo de polimerização um produto cuja estrutura é comparada a uma rocha e a composição química às zeólitas cristalinas, porém com uma relevante estrutura atômica amorfa com hidrotérmicos fechados variando em torno de 175°C. O tempo de cristalização pode variar de horas a dias (DAVIDOVITS, 1994).

### 3.1.2 Reação de Formação do Geopolímero

Descrita por diversos pesquisadores (Van Jaarsveld et al.,1997 e Pinto, 2004), o mecanismo de reação do geopolímero ou geopolimerização, dá-se pelo processo exotérmico, devido à policondensação. O mecanismo envolve a dissolução de Al e Si no meio alcalino, onde não só hidrolisa a superfície do material, como também dissolve a pequena quantidade de Al e Si, seguido por uma policondensação, através da reação de condensação, formando

um gel que é transformado numa rede tridimensional de estrutura silico-aluminato. Segundo Van Jaarsveld et al. (1997), a fase gel é altamente reativa e provavelmente produzida pela copolimerização de alumina e sílica individuais dissolvidas pelo hidróxido alcalino das fontes de sílica e alumina (VASSALO, 2013).

A formação esquemática do material geopolimérico é descrita por diversos autores da literatura (Davidovits, 1994; Van Jaarsveld et al., 1997; Wallah et al., 2006 e outros), como mostrada na Figura 3 (VASSALO, 2013):



Fonte: DAVIDOVITS, 1994.

Na Figura 3, o último termo mostra a água que é liberada durante a reação química. Esta água expelida durante o processo de cura e secagem é benéfica ao desempenho dos geopolímeros, uma vez que, elimina nano-poros descontínuos da matriz (WALLAH et al., 2006). O mesmo autor ainda esclarece que a água em uma mistura geopolimérica não tem nenhuma função na reação química. Apenas fornece trabalhabilidade à mistura durante a manipulação, ao contrário da reação química da água em uma mistura de concreto de cimento Portland durante o processo de hidratação. Porém, os geopolímeros são muito sensíveis ao processo de cura, principalmente ao risco de retração que aparece associada à perda de água. Granizo et al. (1997), Pinto (2006) e outros sugerem que os corpos de prova sejam envolvidos num filme plástico do tipo polietileno, para que elimine a chance de troca de água com o meio envolvente (VASSALO, 2013).

Assim, os geopolímeros são formados pela mistura de uma fonte de alumínio, uma fonte de silício (solução de silicato alcalino), e finalmente uma fonte de óxido de sódio e/ou

potássio, proveniente de uma solução que seja concentrada nos seus hidróxidos respectivos e da solução de silicato alcalina. Dessa forma, o que diferencia entre as estruturas formadas é basicamente a razão molar dos óxidos envolvidos na reação. Os ligantes geopoliméricos são considerados aluminossilicatos álcali-ativados que consistem de um componente sólido que contém  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de forma reativa (normalmente a reatividade é adquirida por ativação térmica), e uma solução alcalina ativadora de água, hidróxidos alcalinos, silicatos, aluminatos, carbonatos ou sulfatos ou mistura destes (BUCHWALD, 2011).

Devido a essas características físico-químicas, os geopolímeros garantem propriedades de destaque no estado fresco como: boa trabalhabilidade, boa coesão e acabamento superficial, o que resulta em um ganho rápido de resistência mecânica e dureza superficial (PINTO, 2006).

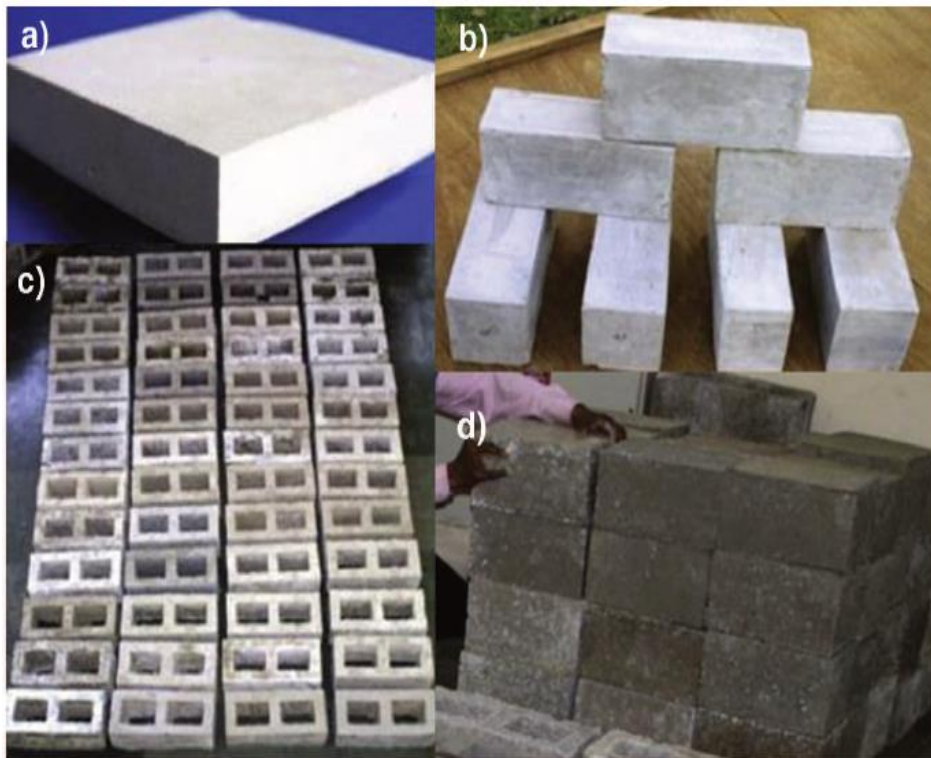
Comparando o geopolímero ao cimento Portland, pode-se observar uma outra diferença no processo de reação para obtenção da estrutura final. Os cimentos Portland pozolânicos dependem da presença de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) para a formação da matriz e ganho de resistência, enquanto os geopolímeros utilizam a policondensação dos precursores de sílica e alumina e um alto teor de álcali para atingirem resistência estrutural formando aluminossilicato hidratado (KHALE, 2007).

### 3.1.3 Aplicações do Geopolímero

Davidovits (1992) afirma que os geopolímeros podem ser utilizados tanto em países de primeiro mundo, onde os estudos enfatizam o encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos, quanto em países de segundo mundo nos quais é dada ênfase na produção de cimentos. Este autor, também diz que as propriedades dos geopolímeros dependem da estrutura química.

A otimização do estudo de propriedades das pastas geopoliméricas quanto a: concentração de ativador, dosagem sólido/líquido na mistura, tempo e temperatura de cura, adequaram as pastas geopoliméricas para a fabricação de alguns produtos como, argamassas de concreto, espuma geopolimérica, tijolos e blocos sólidos (SINGH et al., 2015). Na Figura 4 alguns desses artefatos são apresentados.

**Figura 4:** a) Espuma geopolimérica; b) Tijolo maciço; c) Blocos vazados; d) Blocos maciços



Fonte: SINGH et al.,2015

Um exemplo mostrado na Figura 5 de aplicação de cimento geopolimérico recém-concluído ocorreu no aeroporto de Brisbane (BWWA) na Austrália, que se tornou o aeroporto mais ambientalmente correto do mundo, nele foi utilizado cerca de 30.000 metros cúbicos de concreto geopolimérico, o que resultou na redução de mais de 6.600 toneladas de gás carbônico (MACCARINI, 2015).

**Figura 5:** Aeroporto de Brisbane.



Fonte: THE CHRONICLE 29 SETEMBRO, 2014.

Um exemplo mostrado por Davidovits na Figura 6 é o avião da companhia aeronáutica francesa Dassault Aviation, denominado Rafale, desenvolvido através da utilização de moldes geopoliméricos (VASSALO, 2013).

**Figura 6:** Avião francês Rafale desenvolvido utilizando moldes geopoliméricos



Fonte: DAVIDOVITS, J. (2002).

Ainda segundo Davidovits (2002), o concreto geopolimérico também é utilizado em aplicações de infraestrutura e reparação de rodovias. Um exemplo foi a aplicação do cimento Pyrament<sup>®</sup> nos aeroportos militares temporários da Arábia Saudita durante a guerra do Golfo em 1991 como mostra a Figura 7 (VASSALO, 2013).

**Figura 7:** Uso do geopolímero Pyrament, nos Estados Unidos, como material de reparação de rodovias



Fonte: DAVIDOVITS, J. (2002).

O Instituto de Mudança Global (GCI), da Universidade de Queensland, na Austrália, inaugurou o primeiro empreendimento a utilizar concreto livre de cimento Portland em construção suspensa. A obra mostrada na Figura 8, finalizada em agosto de 2013, utilizou 33 painéis de concreto pré-moldado à base de geopolímeros. Na avaliação da Wagners,

fabricante australiana da tecnologia, o concreto verde permitiu a redução de até 90% na emissão de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  associada à produção do cimento. Até então, o uso integral de geopolímeros acontecia apenas na produção de peças para pavimentação de solo, blocos de alvenaria e outras estruturas de menor complexidade, mas não as obras de maior envergadura. (GRANDES CONSTRUÇÕES, 2013).

**Figura 8:** Instituto de Mudança Global (GCI), da Universidade de Queensland, na Austrália.



**Fonte:** GRANDES CONSTRUÇÕES (2013).

## 3.2 MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS

### 3.2.1 Metacaulim

Metacaulim, precede do termo “meta”, que significa mudança e “caulim”, originado do termo chinês “Kauling”, ou “colina alta” que se refere a uma colina de Jauchau Fu, onde o material obtido é formado pela caulinita, apresentando cor branca ou quase branca devido ao baixo teor de ferro (SILVA, 1993).

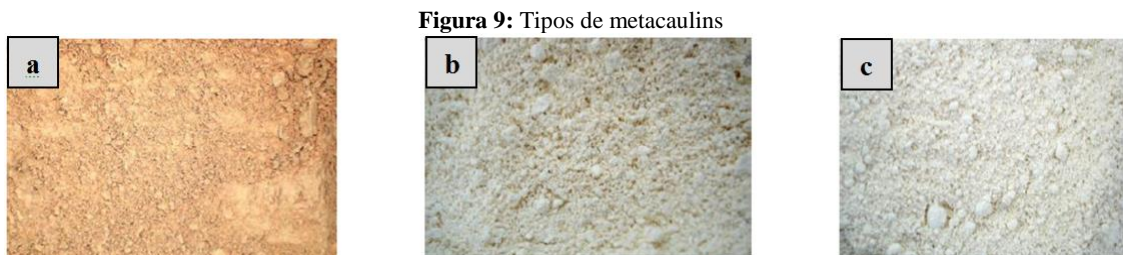
Metacaulim é um material aluminossilicato termicamente ativado, com alta atividade pozolânica, gerado pela calcinação de argilas caulínicas em temperaturas entre 650°C a 800°C, dependendo da pureza e cristalinidade das argilas (LI et al. 2010). Outra fonte de obtenção é por meio do tratamento de resíduos da indústria de papel, constituído basicamente de um caulim beneficiado de extrema finura, brancura e pureza (DAL MOLIN, 2005).

O metacaulim possui em sua composição elementos essenciais para produção de geopolímeros, entre eles SiO<sub>2</sub>, cerca de 52%, e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com aproximadamente 40%. Os outros 8% são considerados impurezas, e os elementos que as compõem são quartzo e outros argilominerais como o feldspato, a mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (NITA, 2006).

As propriedades do caulim são atrativas para diversas aplicações em função de suas características como alvura, maciez, baixa condutividade elétrica, além de ser inerte e não abrasivo. Uma das aplicações usuais do caulim está no processo de produção de papel, onde o caulim é utilizado como enchimento (carga) para reduzir a quantidade de celulose e melhorar as características e como tinta de revestimento (LUZ et al. 2009).

Segundo Davidovits (1994), com a transformação do caulim em metacaulim, o material se torna muito mais reativo, com propriedades pozolânicas. Além disso, o produto obtido pode ter diferentes graus de finura, superfície específica e também apresentar colorações variadas. Essas características dependem da composição química e mineralógica do caulim de base (VASSALO, 2013). A Figura 9 mostra três tipos de metacaulim produzidos por três empresas diferentes. Advanced Cement Technologies (a), Engelhard (b) e Metacaulim do Brasil (c), sucessivamente.





**Fonte:** ROCHA E VASCONCELOS, 2006.

Segundo Rocha e Vasconcelos (2006), os teores de silício e alumínio variam de 52 a 58% e 34 a 39%, respectivamente para as três amostras (VASSALO, 2013).

As fontes de metacaulim usadas em geopolímero variam muito em tamanho de partícula, pureza e cristalinidade da origem da caulinita, embora, quando adicionadas à mistura, a dispersão dessas partículas afeta muito pouco o comportamento reológico e o grau de reação álcali-ativado (LI *et al.*, 2010).

Um dos fatores do mecanismo de reação para que haja polimerização é a quantidade de íons lixiviados de silício e alumínio. Quanto mais íons disponíveis para reagir, maior será a formação de redes tetraédricas, e conseqüentemente maior será a resistência mecânica do polissialato. Como o metacaulim dispõe de grande quantidade de aluminossilicato amorfo, é de substancial importância sua adição como uma das matérias primas do estudo em questão (SANTA, 2012).

Uma pesquisa feita com 16 diferentes fontes de aluminossilicato para produção de geopolímeros revelou a necessidade de adicionar metacaulinita para formar gel e observaram que existe boa sinergia entre diferentes fontes de aluminossilicato. A adição de caulinita é necessária para aumentar a taxa de dissolução da alumina e melhorar a polimerização, porém em quantidades não muito elevadas, para não provocar maciez na estrutura, o que inviabiliza seu uso para aplicações em construção (SANTA, 2012).

### 3.3 FILITO

O filito é um material estratégico para fabricação de novos cimentos, pois este possui baixo valor agregado, é composto principalmente por Al e Si, e é uma rocha fácil de pulverizar, fornecendo um pó finíssimo. Seus componentes essenciais são filossilicatos de pequeno tamanho de grão, como a mica muscovita finamente dividida ou sericita, caulinita, e quartzo (VALERA *et.al.*, 2002; ABREU, 1973).

Através da análise de DRX (Difratometria de Raios X), foram identificadas no filito as fases minerais: mica (illita ou muscovita), clorita (possivelmente clinocloro), quartzo, feldspato de potássio ou microclínio, óxido de ferro e illita-esmectita ou illita-clorita interstratificadas nas seguintes proporções, respectivamente: 50-60%, 10-15%, 15- 20%, 5-10%, 5% e traços. Foi verificado que as análises químicas concordavam com a mineralógica. Os resultados confirmaram a presença de sílica e alumina nos silicatos e quartzo presentes. Os elementos alcalinos, principalmente óxido de potássio, foram associados à illita e microclínio. (GARZÓN et.al., 2010).

Teoricamente, qualquer material que contém Al e Si em sua composição pode ser a fonte sólida de aluminossilicato para a geopolimerização (Xu, 2002; Xu et.al., 2002). As fontes mais utilizadas na geopolimerização atualmente são o metacaulim ou caulim calcinado, e a cinza volante, que é um resíduo industrial. O metacaulim possui um custo elevado, e a cinza volante apresenta diversas fases complexas. Nesse sentido, o filito usado como um material alternativo na fabricação de geopolímero tem por objetivo baratear os custos de um processo industrial.

Dessa forma, a utilização do filito como precursor geopolimérico, é incentivada por sua abundância, baixo custo, e o fato de já ser aplicado nas indústrias cerâmicas como substituto parcial do caulim. É empregado em massas cerâmicas de grés sanitário, indústrias de argamassa, plastificante, ração animal, pigmentos, aglutinantes, concretos especiais, e materiais à prova de água devido à baixa permeabilidade (SANTOS, 1992).

### 3.4 SILICATOS DE SÓDIO

Os silicatos de sódio são os silicatos solúveis mais comuns. Em 1640 van Helmont observou que vidros com excesso de álcalis apresentava elevada solubilidade em água e, no final da segunda década do século XIX von Fuchs iniciou estudos experimentais sistemáticos com esses produtos, que chamou de “wasserglass” ou “vidros líquidos” (VAIL, 1952). Fuchs observou que estes produtos poderiam ser usados como adesivos, cimentos e pinturas à prova de fogo (ILLER, 1979).

Kleinlogel (1641), cita a prática de pintar repetidamente as superfícies de concreto utilizando silicatos de sódio diluídos frios ou quentes. Esta prática, que denomina “silicatação do concreto” diminui a permeabilidade do concreto à água, melhorando levemente sua resistência a ácidos. Por esta razão, pode ser usada para proteção de tanques destinados à armazenagem de vinhos e sucos (JOHN, 1995).

Atualmente, os silicatos de sódio são utilizados na produção de moldes perdidos na indústria de fundição, na produção de detergentes e sabões, como defloculantes, colas, produção de sílica precipitada, gel e sois (ILLER, 1979).

Vários são os processos para a produção dos silicatos de sódio. O primeiro é a fusão a aproximadamente 1300 °C de misturas de sílica e carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ou, menos frequentemente, de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). O segundo processo envolve a dissolução de mineral silicoso (areia, calcedônia, opala, diatomita entre outros), em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a alta temperatura e pressão (ILLER, 1979). No Brasil utiliza-se essa tecnologia. A composição química dos silicatos solúveis varia em faixa ampla. Para os casos dos silicatos de sódio a razão  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ , denominada módulo de sílica, varia entre 1,6 e 3,75, em massa (ILLER, 1979).

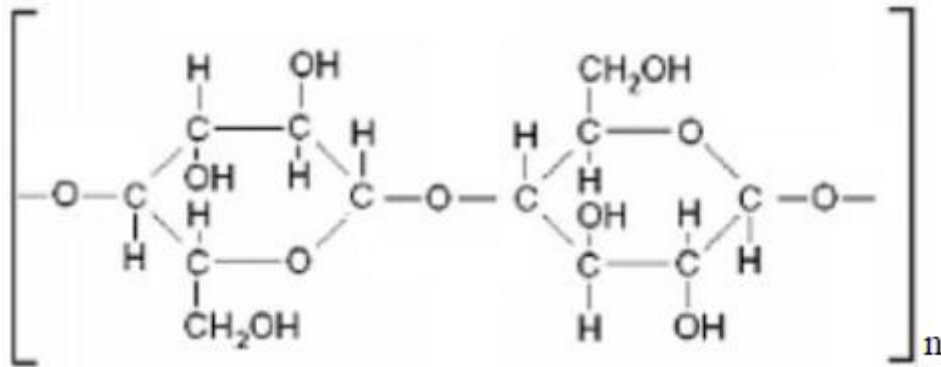
### 3.5 FIBRAS VEGETAIS

A utilização de reforços naturais em compósitos à base de geopolímero continua sendo um desafio inovador a essa classe de matérias. A procura de melhores propriedades físicas, mecânicas e químicas para os novos compósitos, o uso de fibras naturais conduzem os pesquisadores ao estudo de novos materiais que possam atender às exigências do mercado (MOE et al, 2012).

As fibras vegetais são, geralmente, classificadas de acordo com a sua origem e podem ser agrupadas em fibras: de semente (algodão), de caule (bananeira, juta, malva, linho, cânhamo), de folhas (sisal, piaçava, curauá, abacá, henequém), de fruto (coco) e de raiz (zacatão), de acordo com Morassi apud Silva (2003). Segundo Nabi Saheb e Jog (1999), as fibras de juta, rami e sisal são as mais utilizadas para compósitos poliméricos (RODRIGUES, F.S, 2010).

A celulose, que é o principal componente das fibras vegetais e principal responsável pela estabilidade e resistência mecânica, é um polissacarídeo linear de alta massa molar constituído por uma cadeia molecular formada pela união de unidades de anidro-D-glicose, ou simplesmente glicose-D. A estrutura da glicose-D é mostrada na Figura 10, sendo que cada unidade contém três grupos hidroxila (-OH). Estas hidroxilas formam ligações de hidrogênio dentro da molécula (intramolecular) e entre moléculas de celulose (intermolecular). As ligações de hidrogênio intermoleculares são as principais responsáveis pela cristalinidade da celulose. (OLIVEIRA, R. S, 2013).

**Figura 10:** Estrutura do mero da celulose



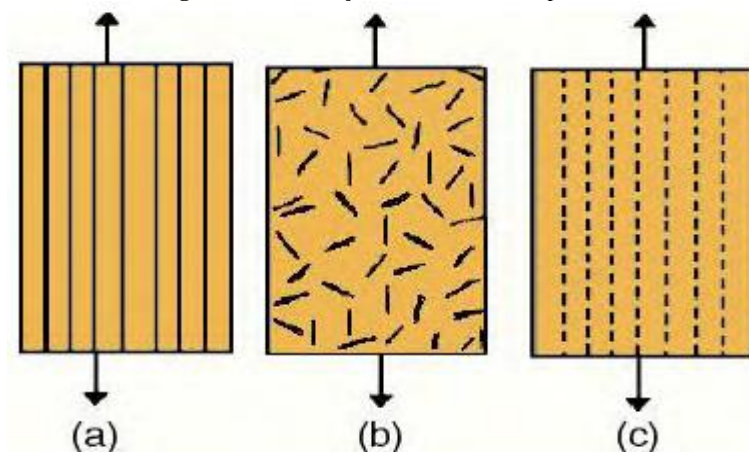
Fonte: RODRIGUES, J. S., 2013

As fibras vegetais apresentam vantagens importantes como: baixo custo, baixa densidade, boa resistência mecânica, baixa abrasividade aos equipamentos de processo e também por serem provenientes de fontes renováveis de matéria-prima, disponíveis em todo o mundo. Além disso, as fibras vegetais são biodegradáveis e não tóxicas ou poluentes, de modo que o seu descarte não acarreta problemas ambientais (SANTOS, 2007).

Os compósitos podem ser reforçados por fibras de tal forma que ambas fibras e matriz, conservem suas identidades químicas e físicas e, ainda, produzam uma combinação de propriedades que não podem ser conseguidas com um dos constituintes individualmente. Em geral, as fibras são os principais membros de transporte de cargas, enquanto a cercania da matriz as mantém na localização desejada, agindo como um transportador médio de carga e protegendo as fibras ambientais (MALLICK, 2006). Muitas propriedades de materiais compósitos fibrosos são fortemente dependentes de parâmetros microestruturais como diâmetro, comprimento, fração volumétrica, orientação e modo de dispersão da fibra (KURUVILA, 1999).

Quanto à orientação das fibras em compósitos pode ser: unidirecionais com fibras contínuas (a); aleatória com fibras descontínuas multidirecionais (b) e orientadas de fibras descontínuas (c), conforme mostrado na Figura 11.

**Figura 11:** Orientação de fibras em compósitos



Fonte: KURUVILA, 1999.

### 3.5.1 Piaçava

Piaçava, piaçaba, piaça, coqueiro – piaçaba, japeraçaba, pau – piaçaba, piaçabeira, piaçabeira, piaçaveira e vai tudo são os nomes populares de duas espécies (*Attalea funifera* e *Leopoldinia piassaba*) de palmeira cujas fibras (que se localizam na base das folhas) são utilizadas na fabricação de vassouras e corbeturas. *Attalea funifera* é nativa da Bahia e *Leopoldinia piassaba* é nativa da Amazônia. Piaçava, piaçaba e piaçá também designam a vassoura fabricada com essa fibra. Seu nome tem origem na língua tupi, significando planta fibrosa, devido ao seu caule característico (FERREIRA 1986). O aspecto que se destaca na fibra de piaçava da espécie *Attalea funifera*, é a sua rigidez. Comparativamente com as outras fibras lignocelulósicas a piaçava é relativamente mais dura e não se amolda com facilidade a uma solicitação mecânica. Este reforço aumenta significativamente a resistência de compósitos poliméricos e pode ser utilizado até uma quantidade de 40% em peso de fibras de piaçava incorporadas na matriz.

A piaçaveira possui estipe liso e cilíndrico, desde o subsolo até 15 metros de altura, folhas eretas, verde – escuras, com pecíolo longo e frutos comestíveis. A fibra dura e flexível é extraída das margens dos pecíolos e utilizada na confecção de vassouras e escovas. Suas sementes, por sua vez, fornecem marfim vegetal (FERREIRA, 1986). A Figura 12 mostra fados de piaçava.

**Figura 12:** Fardos de piaçava

Fonte: GUIMARÃES E SILVA, 2012.

### 3.5.2 Ensaio de difração de raios X (DRX)

Os ensaios de difração de raios-X permitem a determinação da composição mineralógica dos sólidos cristalinos presentes em um material. O ensaio consiste na produção de um feixe de raios difratados, quando um feixe de raios-X incide sobre um material cristalino. O ângulo de difração ( $\theta$ ) depende do comprimento de onda dos raios-X ( $\lambda$ ) e da distância interplanar ( $d$ ), conforme a Lei de Bragg (DIAS, 2008):

$$n_r \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \text{sen}\theta$$

sendo:

- $n_r$ : ordem de reflexão (numero inteiro).

A difração de raios-X foi empregada para caracterização das fases cristalinas presentes nos corpos de prova geopoliméricos.

### 3.5.3 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Um dos ensaios mecânicos realizado em materiais, para conhecer o seu comportamento e suas propriedades em determinadas situações, é o teste de compressão, em que se avalia como o material reage quando pressionado. Este teste é usualmente aplicado em concreto, cerâmicas, plásticos e compósitos. Para os metais é menos utilizado devido aos vários problemas envolvidos nos ensaios.

De modo geral, podemos dizer que o ensaio de compressão é um esforço axial, que tende a provocar um encurtamento ou ruptura do corpo submetido a este esforço. No teste de compressão o corpo de prova é testado pela aplicação de uma carga axial compressiva.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 Matérias-Primas

Na presente pesquisa utilizou-se as seguintes matérias-primas:

- Filito da região de Marabá-PA;
- Metacaulim HP fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil Ltda (SÃO PAULO-SP);
- Pó de fibra de piaçava moída;
- Vidro soda-cal moído;
- Solução de NaOH 14M.

#### 4.1.2 Equipamentos e Vidrarias

- Backeres, almofariz, bastão de vidro, cilindros plásticos, espátula, luvas, proveta, papel filme plástico;
- Estufa, marca Nova Ética;
- Mufla da marca MARCONI, modelo MA 385/3;
- Balança Marca MARTE, modelo UX8200S;
- Peneira (# 100 mesh), marca BERTEL.
- Difrátômetro de raios-X, modelo Miniflex 600;
- Moinho de bolas;
- Prensa elétrica, capacidade 100 T, digital, 4 dígitos e resolução 10 Kgf. Máquina pertencente ao Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção Civil do Instituto federal do Pará.



## 4.2 METODOLOGIA

### 4.2.1 Calcinação do Filito

O filito foi seco em estufa e desaglomerado no almofariz, em seguida peneirado em malha 100 mesh Tyler. Depois na mufla foi feita a calcinação do filito a temperatura de 580 °C por um período de 4 horas. A calcinação desta matéria-prima tem como objetivo aumentar a reatividade química da mesma à medida que essa passa do estado cristalino para o estado amorfo.

### 4.2.2 Preparação da Solução de Vidro Líquido (Silicato de Sódio)

Primeiro o vidro foi reduzido a pequenas partes a fim de facilitar o processo de moagem, depois disso colocou-se o mesmo em um moinho durante 8 horas, obtendo vidro soda-cal moído. Esse material foi misturado à solução de hidróxido de sódio 14M de forma que se fez a homogeneização por 10 minutos de ambos a fim de obter o vidro líquido.

### 4.2.3 Cominuição da Fibra Vegetal de Piaçava

A fim de facilitar a cominuição das fibras, primeiro com o auxílio de uma tesoura cortou-se essas manualmente com comprimento em torno de 30 mm.

O moinho utilizado na cominação das fibras foi um Macro Moinho de rotor horizontal com facas moveis e fixas com diâmetro máximo de 20 mm, movidas através da ação de um motor bifásico com rolamento. Esse equipamento foi fabricado por Deleo equipamentos para laboratório LTDA.

É importante ressaltar que, anteriormente a piaçava utilizada foi lavada com água e seca naturalmente sob luz solar. A Figura 13 mostra a fibra de piaçava moída.

**Figura 13:** Fibra de piaçava moída

Fonte: AUTOR, 2017.

#### 4.2.4 Síntese da Pasta do Cimento Geopolimérico

Em um Becker misturou-se a seco o filito, o metacaulim e a fibra da piaçava moída. Durante 4 minutos foi feita a homogeneização destas matérias-primas. Na sequência adicionou-se a esses materiais 61 ml de solução de silicato de sódio, de forma que foi feita a homogeneização de todo esse material por um período de cinco 5 minutos, momento em que se obteve uma pasta geopolimérica consistente.

#### 4.2.5 Confeção dos Corpos de Prova

Depois de formada a pasta geopolimérica, esta foi moldada com o auxílio de um bastão de vidro dentro de moldes de tubo PVC com dimensões de 2,5 e 5 cm (diâmetro X altura). Foram moldados 24 corpos de prova, 8 corpos de prova curaram durante 7 dias, 8 corpos de prova curaram durante 15 dias e 8 corpos de prova curaram durante 24 dias. Foram moldados 8 corpos de prova para cada tempo de cura, sendo 4 para cada formulação proposta. A Tabela 1 mostra as formulações desenvolvidas.

Tabela 1: Formulações desenvolvidas

	<b>FILITO (%)</b>	<b>METACALIM (%)</b>	<b>PÓ DA FIBRA DE PIAÇAVA (%)</b>
FORMULAÇÃO 1	<b>48,75</b>	<b>48,75</b>	<b>2,5</b>
FORMULAÇÃO 2	<b>47,5</b>	<b>47,5</b>	<b>5</b>

Fonte: AUTOR, 2017.

Em seguida os moldes foram embalados com filme fino de polietileno a fim de evitar o contato da superfície das amostras com o ar atmosférico, o que poderia acarretar a formação indesejada de carbonato de sódio nos mesmos. Feito isso, os corpos de prova foram levados à estufa a uma temperatura de 50 °C.

#### **4.2.6 Caracterização dos Geopolímeros**

Ao termino da cura de cada amostra essas foram desmoldadas e submetidas aos ensaios de difratometria de raios-X e compressão axial.

#### **4.2.7 Difratometria de Raios -X (DRX)**

Os ensaios de difração de raios-X permitem a determinação da composição mineralógica dos sólidos cristalinos presentes em um material. O ensaio consiste na produção de um feixe de raios difratados, quando um feixe de raios-X incide sobre um material cristalino (DIAS, 2008). 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).

#### **4.2.8 Resistência à Compressão Axial**

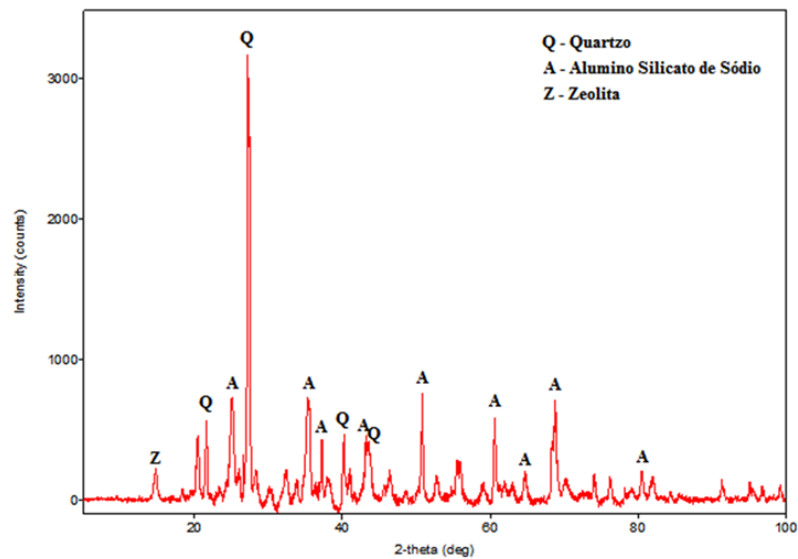
A resistência mecânica à compressão fornece uma visão geral sobre a qualidade do material e pode servir como um parâmetro para avaliar o grau de polimerização, uma vez que quanto mais polimerizada estiver a estrutura, maior será a resistência. Alguns fatores podem afetar o desempenho mecânico dos materiais geopoliméricos, entre eles: a distribuição do tamanho das partículas, a proporção de dissolução da fase gel, a natureza amorfa da matéria-prima sólida, o grau de cristalinidade, o teor percentual de cálcio na matéria-prima, a relação de dissolução entre Si/Al, a concentração do ativador, entre outros. (SANTA, 2012).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS GEOPOLÍMEROS

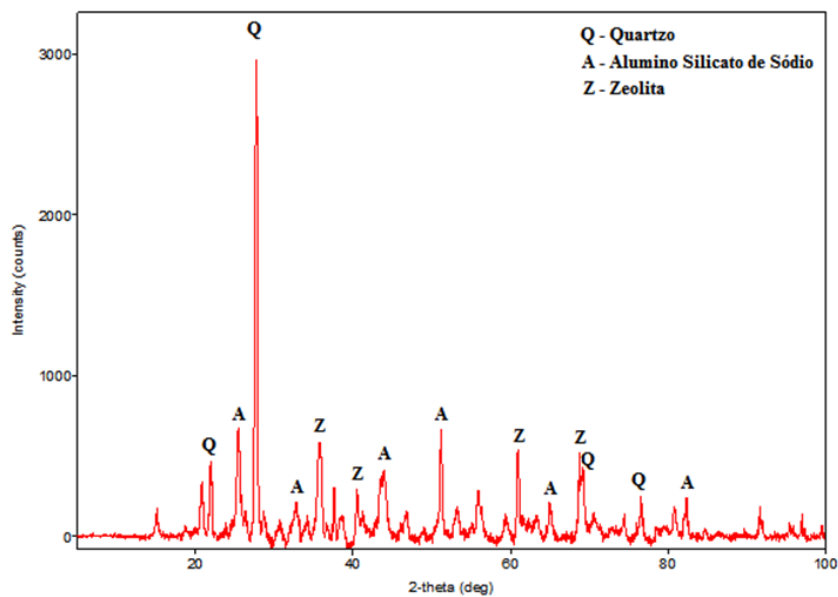
Nas Figuras 14, 15 e 16 são apresentados os difratogramas de raios-X dos geopolímeros. As amostras analisadas foram dos geopolímeros produzidos e curados em estufa a 50°C.

**Figura 14:** Difratogramas de Raios-X do geopolímero com 7 dias de curas



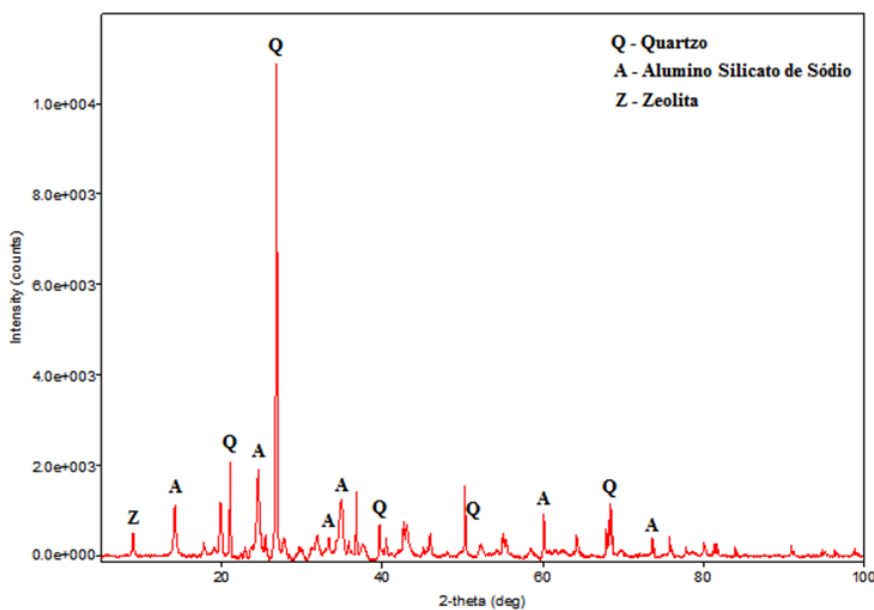
Fonte: AUTOR, 2017.

**Figura 15:** Difratogramas de Raios-X do geopolímero com 15 dias cura



Fonte: AUTOR, 2017.

**Figura 16:** Difratogramas de Raios -X do geopolímero com 24 dias de cura



Fonte: AUTOR, 2017.

Nos difratogramas pode-se visualizar as fases mineralógicas formadas nos geopolímeros em relação aos três tempos de cura propostos. Para todas as amostras analisadas foram verificados, picos característicos de quartzo. Esse mineral provavelmente já estava presente em alguns dos minerais precursores, como metacaulim e filito, portanto não é produto de síntese. Os três difratogramas mostram também a presença de diferentes fases de aluminossilicato de sódio, fases comuns no processo de geopolimerização em que se utiliza o hidróxido de sódio como ativador. Os corpos de prova com menor tempo de cura, 7 dias, apresentaram aluminossilicatos hidratados. Os corpos de prova com 15 dias de cura também apresentaram aluminossilicatos hidratados, entre eles a analcita que é constituído por silicato hidratado de sódio e alumínio. As amostras de 24 dias de cura mostraram também a presença do aluminossilicato de sódio (anidro), além de quartzo e zeólita.

A formação de zeólita é bastante comum em sínteses geopoliméricas devido à dissolução de aluminatos e silicatos pela solução ativadora alcalina. Contudo, uma investigação mais profunda é necessária para estabelecer o nível de formação de zeólitas em geopolímeros.

## 5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

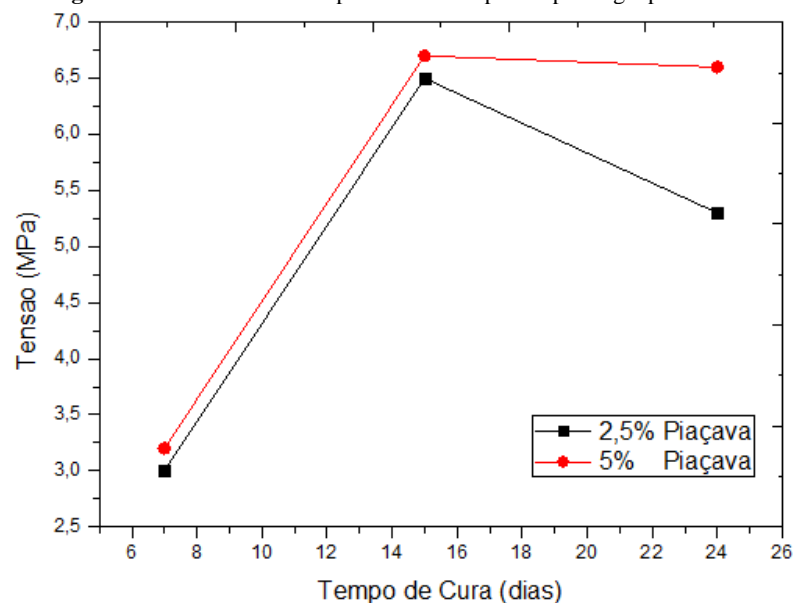
Os valores dos módulos de resistência à compressão dos corpos de prova rompidos nas idades de 7, 15 e 24 dias, curados a 50°C, são representados por meio do valor médio obtido para 4 corpos de prova cilíndricos de 2,5 cm de diâmetro por 5 cm de altura, conforme mostra a Tabela 2 e a Figura 18.

**Tabela 2:** Tensão média em MPa dos corpos de prova geopoliméricos

	TEMPO DE CURA (dias)	PIAÇAVA (%)	TENSÃO MÉDIA (MPa)
Formulação 1	7	2,5	3,00
Formulação 2	7	5	3,20
Formulação 1	15	2,5	6,50
Formulação 2	15	5	6,70
Formulação 1	24	2,5	5,30
Formulação 2	24	5	6,60

Fonte: AUTOR, 2017.

**Figura 17:** Resistência à compressão dos corpos de prova geopoliméricos



Fonte: AUTOR, 2017.

Os corpos de prova com 7 dias de cura e 2,5% de fibra de piaçava em relação a massa total dos 4 corpos de prova, obteve média de resistência a compressão de 3 MPa, inferior a média dos corpos de prova com adição de 5% de fibra de piaçava que obteve resistência igual a 3,2 MPa. Apesar de pequena a diferença a resistência à compressão dos corpos de prova com diferentes percentuais de piaçava, os geopolímeros com 5% de fibra curados por 7 dias, mostraram que o incremento na estrutura desses corpos de prova de fibra de piaçava tende a provocar um aumento na resistência à compressão. É importante observar que a diferença em relação à adição de fibras nas estruturas geopolimérica é pequena.

Em relação aos corpos de prova com 15 dias de cura a resistência à compressão dos corpos de prova com 5% de adição de piaçava novamente foi superior, 6,7 MPa, aos corpos de prova com adição de 2,5% de piaçava, 6,5 MPa.

O resultado de resistência à compressão dos corpos de prova com 24 dias de cura mostraram mais uma vez que os corpos de prova com adição de 5% de fibra de piaçava em sua estrutura apesar de terem uma queda de resistência à compressão, obtendo como resultado 6,6 MPa, sua resistência à compressão foi superior aos corpos de prova com adição de 2,5% de fibra de piaçava que tiveram uma queda maior em relação à resistência à compressão, obtendo como resultado 5,30 MPa. Essa diminuição na resistência a compressão dos corpos de prova com adição de 2,5 e 5% de fibra de piaçava pode ter sido causada, possivelmente devido à degradação da fibra da piaçava que por estar em contato com o ativador alcalino por um maior período de tempo, este pode ter provocado a degradação da celulose e lignina da fibra da piaçava as quais são responsáveis pela resistência mecânica das mesmas. Pois, enquanto o ativador alcalino é fundamental na reação de geopolimerização, esse é prejudicial à resistência das fibras uma vez que removem compostos fundamentais responsáveis por suas propriedades físicas e químicas. Ressaltando nesse caso, que a alta concentração da solução de hidróxido de sódio 14 M utilizada na preparação do silicato de sódio, provavelmente pode ter encontrado maior facilidade e rapidez na degradação das fibras dos corpos de prova com 2,5% de adição das mesmas, devido a sua elevada molaridade e a menor porcentagem de fibra de piaçava na estrutura geopolimérica dos mesmos. Provavelmente, por isso, a queda na resistência dos corpos de prova com adição de 2,5% fibra de piaçava é muito maior que nos corpos de prova com adição de 5% de fibra de piaçava, onde o tempo de degradação desta leva um maior tempo possivelmente devido sua maior quantidade na pasta geopolimérica.

## 6 CONCLUSÃO

Nos difratogramas de raios-X dos geopolímeros observou-se picos característicos de quartzo e a formação das fases comuns na síntese de materiais geopoliméricos, como aluminossilicatos hidratados e zeólitas, formadas durante a reação de policondensação das cadeias geopoliméricas.

Em relação à resistência média à compressão dos corpos de prova geopoliméricos os ensaios mecânicos mostraram que até os 15 dias de cura, a maior porcentagem de pó de fibra de piaçava moída provoca um aumento na resistência à compressão dos corpos de prova. Porém, com o passar do tempo a resistência à compressão dos corpos de prova decaiu, provavelmente devido a degradação da fibra da piaçava pela solução alcalina de silicato de sódio. Caso houvesse utilizado uma solução alcalina de menor molaridade, provavelmente a resistência à compressão dos corpos de prova seriam maiores.



## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fazer a análise química das matérias-primas utilizadas a fim de calcular a razão entre silício e alumínio utilizado nas formulações propostas, pois essa razão influencia diretamente nas propriedades físicas e químicas do geopolímero.
- Variar a concentração da solução alcalina de hidróxido de sódio utilizada na preparação do silicato de sódio.
- Alterar as condições de cura, como temperatura, tempo e ambiente, de forma a obter um geopolímero mais resistente à compressão.
- Variar o tamanho, a orientação e a porcentagem de pó de fibra de piaçava moída adicionada as pastas geopoliméricas.
- Avaliar as propriedades e estruturas dos geopolímeros ao longo de vários meses, utilizando análises de difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão (MET) e realizar ensaios de resistências à compressão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. F. **Recursos Minerais do Brasil**. Editora Edgard Blücher LTDA: São Paulo, 1973.

BUCHWALD, A., ZELLMANN, H.D., KAPS, C. **Condensation of aluminosilicate gels – model system for geopolymer binders**. Journal of Non-Crystalline Solids, v. 357, p.1376-1382, 2011.

CORREIA, S. A. E. **Compósitos de matriz geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e sisal**. 2011. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2011.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. In: ISAIA, G. C (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, vol.1, cap.12, p. 345-380, 2005.

DAVIDOVITS, J. – **Properties of geopolymer cements, Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, V. 1, SRIBM, Kiev, Ukraine, p.125 -149, 1994.**

DAVIDOVITS, J. **Environmentally Driven. Geopolymer Cement Applications**, Australia, p. 1-9, Out. 2002

DAVIDOVITS, J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymers Applications**. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Austrália, 2002.

DIAS, A. A. **Estudo da degradação de argamassa geopolimérica por ácido acético e sulfúrico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 128 p, 2008.

ENSAIO DE COMPRESSÃO, Aula 3 – ensaios mecânicos, 2012. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/alexleal3720/aula-3-ensaios-mecnicos-e-end-ensaio-de-compresso>> Acessado em 26 de março de 2017.

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. 2ª edição. Rio de Janeiro. 1986. p. 1 323.

GARZÓN, E.; SÁNCHEZ-SOTO, P.J.; ROMERO, C.; **Physical and geotechnical properties of clay phyllites**; - Applied Clay Science, 2010, 48, n. 3, 307.

GRANDES CONSTRUÇÕES, **Projeto australiano inova ao usar concreto livre de cimento**, 2013. Disponível em: <[http://www.grandesconstrucoes.com.br/br/index.php?option=com\\_contenido&task=printMateria&id=1438](http://www.grandesconstrucoes.com.br/br/index.php?option=com_contenido&task=printMateria&id=1438)> Acesso em 24 de novembro de 2014.

GUIMARÃES, L. A. C., SILVA, M. A. L. **Piaçava da Bahia (Attalea funifera Martius): do extrativismo à cultura agrícola**. Ilhéus – Bahia, 2012. 262 p.

IBGE. 2005. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, v. 20, 46 p.

ILLER, R. K. **The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry**. New York: J. Wiley e Sons, 1979. (Cap. 1 – The Occurrence, Dissolution, and Desposition of Silica; Cap. 2 – Polymerization of Silica; Cap. 3 – Water – Soluble Silicates)

JOHN. M. V. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1955. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo 1955.

KURUVILLA, J., MEDEIROS, E. S., CARVALHO, L. H. **Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, p. 136 – 141, 1999.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. **A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements**. Cem. Conc. Res., vol. 40, p.1341–1349, 2010.

LUZ, A. B.; CARVALHO, E.A.; BERTOLINO L.C.; SCORZELLI, R. B.; CAMPOS, A. R.. **Caulim**. Centro de Tecnologia Mineral - Ministério da Ciência e Tecnologia – Governo Federal. Rio de Janeiro, P. 225-294, 2009.

MACCARINI, S. H. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina - Centro de Joinville. 2015.

MALLICK, S., DASH, S. PARIDA, K. M. **Adsorption of chromium on manganese nodule leached residue obtained from NH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub> leaching**. Journal of Colloid and Interface Science, v. 297, n. 2 p. 419 – 425, maio de 2016.

MELO, L. G. A. **Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 185 p, 2011.

MOE THWE, KIN LIAO. “**Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo – glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites**”. Composites Part: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33:43 - 52.

NITA, C.. **Utilização de Pozolanas em Compósitos de Cimento Reforçados com Fibra de Celulose e PVA**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica de São Paulo – SP, 128 p, 2006.

OLIVEIRA, R. S. **Estudo do comportamento Mecânico de Compósitos Reforçados com Fibra Vegetal de Malva (Urena Lobata L.)** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pará – Faculdade de Engenharia de Materiais. 2013.

PINTO, A. T. Geo-Pol. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Apostila, Vila Real, p. 92, 2006.

RODRIGUES, J. S. **Pente De Macaco: uma alternativa para reforço em Compósitos Poliméricos antes e após mecerização**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pará – Faculdade de Engenharia de Materiais. 2013.

SANTOS, S.S. **Estudo da viabilidade de aplicação de fibras da pupunheira (Bactris gasipaes H. B.K) como alternativa à fibra de vidro no desenvolvimento de produtos.** Dissertação (Mestrado em Saúde e meio ambiente). 2007. Joinville/SC. 2007.

SILVA, S.P., **Geologia do Caulim**, 2a ed., Belém: DNPM 5º DS/DNPM, p.18, 1993.

SINGH B.; ISHWARYA G.; GUPTA M.; BHATTACHARYYA S.K.; **Geopolymer concrete: A review of some recent developments.** Construction and Building Materials. p. 78-90, 2015.

SANTA, R. B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel.** 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.

SANTOS, P. S.; **Ciência e tecnologia de argilas. Aplicações.** 2.a edição revisada e ampliada; Editora - Edgard Blücher LTDA: São Paulo, 1992.

SANTOS, S.S. **Estudo da viabilidade de aplicação de fibras da pupunheira (Bactris gasipaes H. B.K) como alternativa à fibra de vidro no desenvolvimento de produtos.** Dissertação (Mestrado em Saúde e meio ambiente). 2007. Joinville/SC. 2007.

VAIL, J. G. **Soluble Silicates: their properties and uses.** New York: Reinhold, 1952. V.1.

VASSALO. É. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 53 p, 2013.

VALERA, T.S.; RIBEIRO, A.P.; VALENZUELA, Díaz, F.R.; et.al.; **The effect of phyllite as a filler for PVC plastisols.** In: Annual Technical Conference, Society of Plastics Engineers, 2002.

WALLAH, S. E; RANGAN, B. V. **Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties.** Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia, 107 p, 2006.

XU, H.; **Geopolymerisation of Aluminosilicate Minerals;** Tese em doutorado, University of Melbourne, Austrália, 2002.

XU, H.; Van Deventer, J.S.J.; **Geopolymerization of multiple minerals;** Int. J. Miner. Process 2002, 59, 1131.