

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**GUSTAVO MOREIRA DE LIMA LOPES
VICENTE MAYRINK PAES**

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE UM COMPÓSITO
COM BASE GEOPOLIMÉRICA COM ADIÇÃO DE FIBRA DE JUTA**

Rio de Janeiro

2019

GUSTAVO MOREIRA DE LIMA LOPES
VICENTE MAYRINK PAES

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE UM COMPÓSITO
COM BASE GEOPOLÍMÉRICA COM ADIÇÃO DE FIBRA DE JUTA**

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof.^a Orientadora: Lais Alves
Prof. Coorientador: João Santos

**Rio de Janeiro
2019**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L864 Lopes, Gustavo Moreira de Lima.

Estudo da resistência à compressão de um compósito com base geopolimérica com adição de fibra de juta / Gustavo Moreira de Lima Lopes [e] Vicente Mayrink Paes – 2019.

70f. : il. color., grafs., tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.

Bibliografia: f. 64-70.

Orientador: Lais Alves.

Co-orientador: João Santos

1. Engenharia mecânica. 2. Polímeros. 3. Resistência de materiais. 4. Testes não destrutivos. I. Paes, Vicente Mayrink II. Alves, Lais (Orient.). III. Santos, João (Co-orient.). IV. Título.

CDD 621

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

RESUMO

Devido a necessidade de novas tecnologias que diminuam o impacto negativo ao meio ambiente, os geopolímeros, materiais a base de aluminossilicatos, surgem como uma boa alternativa ao cimento Portland por possuírem boas propriedades mecânicas, como a alta resistência inicial. O objetivo desse trabalho foi analisar o comportamento de compósitos geopoliméricos industriais com a adição de fibras naturais de juta, de acordo com sua quantidade inserida e com o tempo de cura do material, buscando identificar se sua utilização traz benefícios nas propriedades mecânicas do compósito. Essa análise foi feita através da realização de ensaios de compressão. Os resultados mostraram que os compósitos geopoliméricos com reforço fibroso possuíram uma boa compatibilidade entre fibra e matriz, apresentando um bom comportamento mecânico. A inserção das fibras permitiu uma maior capacidade do compósito de resistir às cargas após a ocorrência de fissurações, aumentando sua ductilidade. Além do acréscimo da deformação, também ocorreu um aumento da resistência à compressão do material.

Palavras-chave: Geopolímeros. Compósitos. Fibras de juta. Resistência à compressão.

ABSTRACT

Due to the need for new technologies that reduce the negative impact on the environment, the geopolymers, aluminosilicate-based materials, appear as a good alternative to Portland cement for having good mechanical properties, such as high initial strength. The objective of this work was to analyze the behavior of industrial geopolymer composites with the addition of jute fibers, according to the curing time of the material and the amount of fiber inserted, trying to identify if their use could bring benefits in the mechanical properties of the composite. Compression tests were made and the results showed that the fibrous reinforced geopolymer composites have brought a good compatibility between fiber and matrix, showing a good mechanical behavior. The addition of the fibers allowed a greater ability of the composite to resist the loads after cracking, increasing its ductility. In addition to the increased deformation, there was also an increase in the compressive strength of the material.

Keywords: Geopolymers. Composites. Jute fibers. Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Evolução do aumento de temperatura global média com o nível de concentração de CO ₂ atmosférico..... | 18 |
| Figura 2: Ilustração da geopolimerização; a) reorganização; b) gelificação; e c) formação de grandes redes | 21 |
| Figura 3: Estrutura dos Polisialatos..... | 22 |
| Figura 4: Perda de massa de materiais cimentícios submetidos ao ataque ácido. ... | 24 |
| Figura 5: Comparação do índice de retração do cimento Portland e do cimento GP. | 24 |
| Figura 6: Aeroporto ABWW na Austrália. | 26 |
| Figura 7: Classificação de compósitos quanto à matriz utilizada. | 27 |
| Figura 8: Classificação de compósitos quanto ao tipo de reforço. | 28 |
| Figura 9: Representações esquemáticas de características da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos. a) concentração; b) tamanho; c) forma; d) distribuição e e) orientação. | 28 |
| Figura 10: Comportamento carga-deformação do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras..... | 29 |
| Figura 11: Representação esquemática da orientação e distribuição de fibras nos compósitos. 1) contínuas e alinhadas; 2) descontínuas e alinhadas; 3) descontínuas e orientadas de forma aleatória. | 31 |
| Figura 12: Exemplos de Fibras Naturais. | 33 |
| Figura 13: Estrutura de uma fibra natural..... | 34 |
| Figura 14: Plantação de Juta..... | 35 |
| Figura 15: Remoção e secagem das fibras. | 35 |
| Figura 16: Falha de material. a) dúctil e b) frágil sob compressão. | 36 |
| Figura 17: Componentes do Cimento GP-1818. | 39 |
| Figura 18: CPs do GP-1818 feitos com molde de ferro. | 40 |
| Figura 19: CP do GP-1818 com molde de PVC. | 40 |
| Figura 20: Composição química dos materiais. GP-1818 à esquerda. Novo material à direita. | 41 |
| Figura 21: Pesagem do pó precursor e do líquido ativador. | 42 |
| Figura 22: Haste e hélice do agitador mecânico. | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 23: Adição do pó ao líquido..... | 43 |
| Figura 24: Agitador mecânico com velocidades de 30% à esquerda e 50% à direita. | 44 |
| Figura 25: Pesagem das fibras de juta..... | 45 |
| Figura 26: Preparação do geopolímero com fibra. a) adição das fibras e b) geopolímero com fibra. | 45 |
| Figura 27: Molde de ferro cilíndrico para os corpos de prova. | 46 |
| Figura 28: Molde de PVC. | 47 |
| Figura 29: Moldagem do geopolímero. a) sem fibra e b) com fibra. | 47 |
| Figura 30: Corpos de prova com 1 dia de cura. a) CP-0F1D; b) CP-1F1D; c) CP- 2F1D e d) CP de Teste. | 49 |
| Figura 31: Corpos de prova com 7 dias de cura. a) CP-0F7D; b) CP-1F7D e c) CP- 2F7D. | 49 |
| Figura 32: Corpos de prova com 14 dias de cura. a) CP-0F14D; b) CP-1F14D e c) CP-2F14D. | 49 |
| Figura 33: Destaque do poro no CP-2F14D..... | 50 |
| Figura 34: Comparação da coloração dos corpos de prova em relação ao tempo de cura. a) 1 dia; b) 7 dias e c) 14 dias. | 50 |
| Figura 35: Rachadura destacada no CP-0F14D. | 51 |
| Figura 36: Retífica faceadora utilizada na regularização dos corpos de prova. | 52 |
| Figura 37: Fixação do corpo de prova no equipamento de retificação. | 52 |
| Figura 38: Base de um corpo de prova após retificação. | 53 |
| Figura 39: Máquina de ensaios universais MTS..... | 54 |
| Figura 40: Corpo de Prova posicionado na máquina de ensaio. | 54 |
| Figura 41: Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 1 dia de cura..... | 57 |
| Figura 42: CPs de 1 dia após o ensaio de compressão. | 57 |
| Figura 43: Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 7 dias de cura..... | 58 |
| Figura 44: CPs de 7 dias após o ensaio de compressão. | 59 |
| Figura 45: Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 14 dias de cura..... | 60 |
| Figura 46: CPs de 14 dias após o ensaio de compressão. | 60 |
| Figura 47: Comparação dos resultados de Tensão de Compressão x Tempo de cura dos corpos de prova..... | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Aplicações do geopolímero conforme a razão Si/Al..... | 26 |
| Tabela 2 - Classificação do compósito reforçado com fibras de acordo com a porcentagem volumétrica de fibras no compósito | 30 |
| Tabela 3 - Produção Mundial das Fontes de Fibras no ano de 2012..... | 33 |
| Tabela 4 - Composição química do GP-1818 e do Novo Material..... | 41 |
| Tabela 5 - Identificação dos corpos de prova..... | 48 |
| Tabela 6 - Resultados do geopolímero sem fibra..... | 55 |
| Tabela 7 - Resultados do compósito de geopolímero com 1% de fibra. | 55 |
| Tabela 8 - Resultados do compósito de geopolímero com 2% de fibra. | 56 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------------------------|--|
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| Al | Alumínio |
| Si | Silício |
| O | Oxigênio |
| Na | Sódio |
| K | Potássio |
| Ca | Cálcio |
| °C | Graus Celsius |
| MPa | Megapascal |
| ppm | Partes por milhão |
| m ³ | Metro cúbico |
| Al ₂ O ₃ | Óxido de Alumínio |
| SiO ₂ | Dióxido de Silício |
| H ₂ O | Água |
| OH | Hidróxido |
| CaCO ₃ | Carbonato de Cálcio |
| Caulinita | Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ .2H ₂ O |
| Metacaulim | Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ |
| 3CaO.SiO ₂ | Silicato Tricálcio, Alita |
| 2CaO.SiO ₂ | Silicato Dicálcio, Belita |
| NaOH | Hidróxido de Sódio |
| H | Hidrogênio |
| SiO ₄ | Silicato |
| AlO ₃ | Aluminato |
| H ₂ SO ₄ | Ácido Sulfúrico |
| HCl | Ácido Clorídrico |
| lb | Libra |
| mm | Milímetro |
| N | Newton |
| in | Polegada |
| ton | tonelada |

| | |
|-------------------------|---|
| μm | Micrômetro |
| nm | Nanômetro |
| Å | Ångström |
| GPa | Giga Pascal |
| f_c | Valor de resistência à compressão |
| F | Carga máxima alcançada |
| A | Área da seção transversal do corpo de prova |
| D | diâmetro |
| L_0 | Comprimento inicial |
| L_f | Comprimento final |
| ε | Deformação específica |
| E | Módulo de elasticidade |
| B_2O_3 | Trióxido de boro |
| Na_2O | Óxido de sódio |
| K_2O | Óxido de potássio |
| CaO | Óxido de cálcio |
| MnO | Óxido de manganês |
| As_2O_3 | Trióxido de arsênio |
| MoO_3 | Trióxido de molibdênio |
| Sb_2O_3 | Trióxido de antimônio |
| g | gramas |
| RPM | Rotações por minuto |
| kN | Quilonewton |
| mm/min | Milímetro por minuto |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|----------|---|
| ABWW | Aeroporto Brisbane West Wellcamp |
| ACV | Análise do Ciclo de Vida |
| AM | Amazonas |
| CEFET/RJ | Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca/Rio de Janeiro |
| CP | Corpo de prova |
| CP-0F1D | Corpo de prova sem fibra e com 1 dia de cura |
| CP-0F7D | Corpo de prova sem fibra e 7 dias de cura |
| CP-0F14D | Corpo de prova sem fibra e 14 dias de cura |
| CP-1F1D | Corpo de prova com 1% de fibra e 1 dia de cura |
| CP-1F7D | Corpo de prova com 1% de fibra e 7 dias de cura |
| CP-1F14D | Corpo de prova com 1% de fibra e 14 dias de cura |
| CP-2F1D | Corpo de prova com 2% de fibra e 1 dia de cura |
| CP-2F7D | Corpo de prova com 2% de fibra e 7 dias de cura |
| CP-2F14D | Corpo de prova com 2% de fibra e 14 dias de cura |
| CPC | Cimento Portland Comum |
| CPo | Cimento Portland |
| GP | Geopolímero |
| LADES | Laboratório de Compósitos e Adesivos |
| LEM | Laboratório de Estruturas e Materiais |
| MAA | Materiais Álcali Ativados |
| PS | Polisialato |
| PSS | Polisiloxosialato |
| PDSS | Polidisiloxosialato |
| PUC | Pontífica Universidade Católica |
| RILEM | Réunion Internationale de Laboratoires et Experts des Matériaux |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 13 |
| 1.2 | OBJETIVO..... | 13 |
| 1.3 | METODOLOGIA..... | 14 |
| 1.4 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 15 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | GEOPOLÍMEROS | 16 |
| 2.1.1 | Química dos Geopolímeros..... | 19 |
| 2.1.2 | Propriedades dos Geopolímeros..... | 23 |
| 2.2 | APLICAÇÕES | 25 |
| 2.3 | MATERIAIS COMPÓSITOS..... | 27 |
| 2.3.1 | Compósitos Reforçados com Fibras..... | 29 |
| 2.4 | FIBRAS NATURAIS | 31 |
| 2.4.1 | Fibra de Juta | 34 |
| 2.5 | ENSAIO DE COMPRESSÃO EM CONCRETO | 36 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 39 |
| 3.1 | GEOPOLÍMERO | 39 |
| 3.1.1 | Fibra de Juta | 44 |
| 3.1.2 | Compósito de Geopolímero com Fibra de Juta..... | 45 |
| 3.2 | PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA..... | 46 |
| 3.3 | REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO | 53 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 55 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 62 |
| 6 | SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS | 63 |
| | REFERÊNCIAS | 64 |

1 INTRODUÇÃO

A preservação do meio ambiente é um tema de muita importância e que vem ganhando adeptos após a revolução industrial. Aquecimento global, queimadas, derretimento de geleiras, mudanças climáticas, poluição e grandes desastres naturais em geral são alguns exemplos de impactos que geraram a preocupação de grandes grupos de pessoas com o mundo em que vivemos. Por isso, é necessário identificar as ações e produtos utilizados que colaboram para essa degradação e procurar alternativas para diminuir os riscos ao nosso planeta, visando melhorar a nossa harmonia com a natureza no presente e no futuro.

Na construção civil, o concreto é uma das substâncias mais usadas no mundo e requer grandes quantidades de cimento de Portland, que produz grande quantidade de dióxido de carbono (CO₂). Assim, com esse detrimento muito significativo ao meio ambiente, surge uma importância de formas inovadoras e alternativas de substituição a esse material (PROVIS, 2014).

Os geopolímeros aparecem como uma opção alternativa que não só oferecem menos riscos ao meio ambiente, mas também possuem boas propriedades mecânicas que os tornam um material de construção de grande necessidade de estudo e de projeção para o futuro (PROVIS, 2009).

O cimento geopolimérico é uma mistura a base de polisiloxossilato, que é um composto aluminossilicato (Al-Si-O), de sódio, potássio e cálcio (Na, K, Ca-PSS) e possui resistência mecânica, durabilidade e dureza superficial elevadas (DAVIDOVITS, 1994). Baseado na composição e nos agregados utilizados, ele é capaz a adquirir outras propriedades como maior resistência inicial (PROVIS, 2009), resistência química e refratariedade (BORGES *et. al.* 2014).

O uso do reforço fibroso em compósitos geopoliméricos tem o objetivo de obter melhores propriedades para os compósitos (MOE *et. al.* 2002). Por possuírem baixo custo e fácil obtenção, as fibras naturais começaram a ser mais pesquisadas, com a intenção de proporcionarem melhores propriedades mecânicas para o material (SAHEB e JOG, 1999).

Para comprovar a qualidade do material, reforçado ou não com fibras, é aconselhável a realização de ensaios mecânicos. O ensaio de compressão é relativamente fácil de ser realizado e nele é obtido a resistência à compressão que é uma propriedade que quase sempre é especificada em projetos, principalmente na área de construção civil. Além disso, diversas propriedades do concreto podem ser deduzidas a partir da resistência à compressão, como módulo de elasticidade, impermeabilidade e durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

1.1 JUSTIFICATIVA

Pela crescente busca de materiais mais sustentáveis, os geopolímeros podem ser considerados uma classe inovadora de materiais. Além de trazerem menos impactos ao meio ambiente, apresentam grande resistência inicial e durabilidade. Por ser uma combinação de materiais aluminossilicatos com soluções alcalinas ativadoras e ser um material novo, é necessário um estudo experimental de suas propriedades mecânicas para fazer melhor análise sobre suas características e assim, poder utilizá-los em circunstâncias apropriadas.

A adição de fibras pode trazer ganhos em propriedades mecânicas e por isso a ideia de inserção de algum tipo de fibra em compósitos geopoliméricos surgiu. Como a juta é de fácil obtenção, ela foi utilizada visando observar sua eficiência e o comportamento mecânico do material com esse reforço fibroso quando submetido a ensaio de compressão.

1.2 OBJETIVO

O estudo do geopolímero tornou-se necessário para analisar suas propriedades mecânicas a partir de ensaios realizados em laboratório. A princípio, somente ensaios de compressão foram realizados para 3 corpos de prova cilíndricos, sem adição de fibras.

Depois, um novo material com a adição das fibras de juta foi obtido e assim foi planejado realizar ensaios de compressão dos compósitos geopoliméricos com duas variáveis. A primeira variável foi o tempo de cura, usando corpos de prova curados com 1 dia, 7 dias e 14 dias. A segunda variável foi a quantidade de fibras adicionadas, utilizada para analisar a eficiência da fibra de juta, pretendendo-se realizar ensaios de compósitos geopoliméricos de três formas distintas (0%, 1% e 2% de volume de fibra na mistura).

Desse modo, o objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento do material em relação à resistência mecânica de compressão, comparando a taxa de deformação do compósito geopolimérico com a adição das fibras de juta baseados nas variáveis apresentadas.

1.3 METODOLOGIA

Para apresentar e fundamentar de forma teórica os experimentos realizados, fez-se necessário pesquisa a livros, dissertações e artigos que fornecessem informações e condições de serem desenvolvidos o trabalho na prática.

As amostras foram devidamente preparadas no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), localizado no CEFET/RJ, respeitando-se a proporção da mistura para a produção do geopolímero e moldadas em formas cilíndricas para o teste de resistência à compressão. Foram preparadas 3 amostras por dia com diferentes quantidades de fibra, totalizando 9 corpos de prova, para a posterior análise. Os corpos de prova foram desmoldados após 1 dia e a cura foi realizada ao ar ambiente até as datas estipuladas para os testes.

Uma análise química foi realizada no LADES em ambos os materiais para verificação dos componentes e posterior comparação das amostras. Ensaio mecânicos de compressão, utilizando as instalações do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM), localizado na PUC-RIO, foram realizados para obtenção dos resultados do teste de resistência à compressão para assim ser feita a consequente análise.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No primeiro capítulo, é abordado a apresentação do tema, com introdução, justificativa, objetivo, metodologia e organização do trabalho.

O segundo capítulo é reservado para a revisão bibliográfica, expondo o que são geopolímeros, sua origem de estudo e utilização, a química desse tipo de material e suas propriedades mecânicas. Também é descrito a definição e constituição de materiais compósitos, dando importância para a inserção do reforço fibroso nesses materiais, comentando sobre fibras naturais e destacando a fibra de juta. Por fim, é citado alguns campos de aplicações dos geopolímeros e é feita uma revisão sobre ensaio de compressão.

O terceiro capítulo apresenta os materiais utilizados e métodos de preparo que tiveram de ser realizados para obtenção da mistura e posterior corpo de prova, além de informações sobre os ensaios de compressão que esses corpos foram submetidos.

No quarto capítulo são mostrados os resultados obtidos e as discussões e análises desses resultados.

No quinto capítulo é apresentada a conclusão do trabalho.

No sexto e último capítulo são feitas as sugestões para trabalhos futuros. Seguido das referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GEOPOLÍMEROS

Polímeros são substâncias compostas por moléculas formadas por uma ou mais espécies, ou até mesmo grupos, de átomos ligando-se, geralmente através de uma ligação covalente, a fim de formar uma macromolécula. Estas são formadas através de uma reação química, sendo o processo que dá origem a essa reação chamado de polimerização (YOUNG e LOVELL, 2011).

O termo “geopolímero”, utilizado para se referir a polímeros com uma base de compostos minerais, foi originado na década de 1970 pelo professor francês Joseph Davidovits empregado para descrever materiais sintetizados através da reação de aluminossilicatos, que possuem uma base de Al e Si, com soluções alcalinas ativadoras (PROVIS *et. al.* 2009).

No entanto, foi na década de 1950, através das pesquisas de Glukhovsky, na Ucrânia, que os elementos álcali-ativados começaram a ser estudados. Ele desenvolveu materiais parecidos com os geopolímeros, que na época ele chamou de “cimento de solo”, por causa da sua capacidade ligante e por utilizarem materiais naturais (KRIVENKO *et.al.*, 2006).

Décadas depois, uma pesquisa mais aprofundada se iniciou devido a necessidade da busca de alternativas para os polímeros orgânicos após uma série de incêndios na França, entre 1970 e 1973. Como foi observado que na natureza apenas materiais minerais possuem resistência ao fogo e ao calor, o alvo da pesquisa foi o estudo de polímeros inorgânicos. Apesar de terem um comportamento parecido com os polímeros orgânicos, como a capacidade de se estabilizarem a baixas temperaturas e em pouco tempo, os geopolímeros são mais duros, são inorgânicos, estáveis a temperaturas de até 1250 °C e não-inflamáveis (DAVIDOVITS, 2002).

Enquanto Glukhovsky pesquisava sobre cimentos álcali-ativados, produzidos em sua maioria com escórias de alto forno, Davidovits focou seus estudos em materiais baseados em metacaulim (argilas calcinadas), sendo considerado o precursor das pesquisas nesse campo (DUXSON *et al.*, 2006).

Apesar de “geopolímero” ser o termo mais utilizado para descrever esse grupo de materiais de forma genérica, outros autores se referem a ele como “cimentos álcali ativados” (PAOLOMO *et. al.*, 2003), “geocimentos” (KRIVENKO, 1994), “concreto de polímero inorgânico” (SOFI *et. al.*, 2006) e “hidrocerâmicos” (BAO *et. al.*, 2005). Mesmo com essas diversas nomenclaturas, todos esses termos são citados para nomear materiais sintetizados utilizando o mesmo método químico, que pode ser descrito como uma dissolução álcali mediada e reações de precipitações em um substrato reativo aquoso (DUXSON *et. al.*, 2006).

Materiais Álcali Ativados (MAA) é uma classificação mais ampla de materiais que engloba qualquer sistema ligante derivado da reação entre um metal alcalino e pó de silicatos, que pode ser um silicato de cálcio ou um precursor rico em aluminossilicatos. As fontes alcalinas utilizadas podem incluir hidróxidos (como o NaOH), silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos ou óxidos - Essencialmente qualquer substância solúvel capaz de fornecer cátions de metais alcalinos, aumentar o PH da reação e acelerar a dissolução do sólido precursor.

Geopolímeros são muitas vezes vistos como um subgrupo de MAA, onde a fase ligante é quase exclusivamente aluminossilicatos e altamente coordenados. Para formar o gel geopolimérico primário, a disponibilidade de cálcio nos componentes reativos deve geralmente ser mais baixa. Ambas as classificações do geopolímero e dos MAA foram aprovadas pelo comitê RILEM TC 224-AAM (PROVIS e VAN DEVENTER, 2013).

Existem diversas combinações possíveis para a obtenção dos geopolímeros, no entanto as mais utilizadas são à base de cinza volante, de metaucalin e sílica ativa (DUXSON *et. al.*, 2006). As diversas versões do geopolímero produzidas com diferentes fontes de aluminossilicato possuem características macroscópicas parecidas, já as características microscópicas são variadas (VICKERS *et. al.*, 2015).

Através de vários estudos, foi observado que o cimento geopolimérico pode ser considerado uma alternativa para o cimento Portland, atualmente o mais utilizado para produção de concreto empregado em diversas aplicações estruturais, uma vez que ambos são capazes de endurecer e adquirir resistência à temperatura ambiente (DAVIDOVITS, 2013).

Determinadas composições de geopolímero são capazes de atingir uma resistência compressiva de aproximadamente 20 MPa em apenas 4 horas após sua preparação quando curadas a temperaturas mais elevadas (DAVIDOVITS, 2013), enquanto o cimento Portland comum possui resistências variando entre 11 e 26 MPa aos 3 dias de idade (ZHANG, 2011).

Foi observado que com a produção contínua de cimento Portland, as emissões de dióxido de carbono (CO_2) continuariam a crescer. Isso se deve ao fato de que para a obtenção do cimento Portland, há uma reação entre a calcita e a sílica, e cada tonelada produzida gera 0,55 tonelada de CO_2 . Além disso, há a necessidade da combustão de combustíveis a base de carbono, gerando mais 0,40 tonelada de CO_2 . Ou seja, a produção de 1 tonelada de CPo gera 0,95 tonelada de CO_2 (DAVIDOVITS, 1991).

A Figura 1 mostra a evolução do aumento de temperatura global média com o nível de concentração de CO_2 na atmosfera, realçando a necessidade de preocupação e maior controle sobre essas emissões.

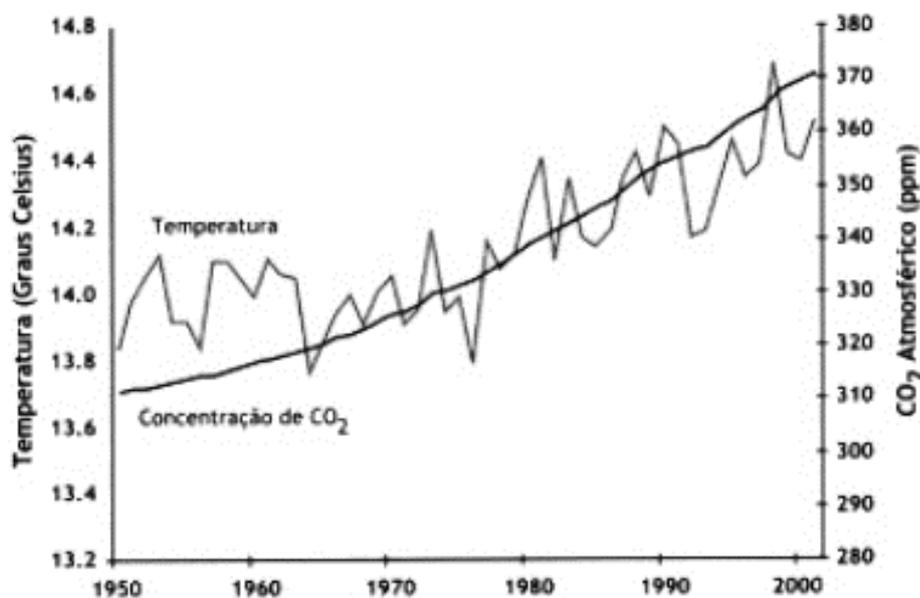


Figura 1: Evolução do aumento de temperatura global média com o nível de concentração de CO_2 atmosférico.

Fonte: Geopol – disponível em <http://www.geopolymer.com.br> (2019).

Na busca pela maior preservação do meio ambiente, um estudo comparativo da análise do ciclo de vida (ACV) entre concretos geopoliméricos e os concretos à

base de cimento Portland foi realizado por BORGES *et. al.* (2014), relacionando o consumo total de energia e emissões de CO₂ na produção de 1 m³ de concreto. Os resultados mostraram que o consumo energético e as emissões de CO₂ foram reduzidas em 45,8% e 72,4%, respectivamente, nas situações em que o concreto geopolímero foi usado na substituição ao concreto tradicional de cimento Portland, revelando um maior potencial sustentável.

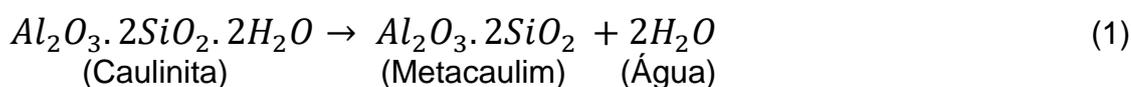
2.1.1 Química dos Geopolímeros

Como citado de forma breve anteriormente, as características macroscópicas do geopolímero serão muito similares, independente dos materiais aluminossilicatos utilizados. No campo microscópico, no entanto, haverá mudanças significativas, podendo mudar completamente sua microestrutura e as propriedades químicas, térmicas e mecânicas do geopolímero. Essas variações dependerão da quantidade e do material utilizado (VICKERS *et. al.*, 2015).

Os sistemas geopoliméricos são compostos de duas fases. Uma fase sólida, também conhecida como precursor, e uma fase líquida, chamada de ativador. O precursor é composto de materiais aluminossilicatos, que contém Si e Al capazes de serem facilmente dissolvidos em uma solução alcalina, sendo as cinzas volantes e o metacaulim os mais utilizados (GIANNOPOULOU e PANIAS, 2007).

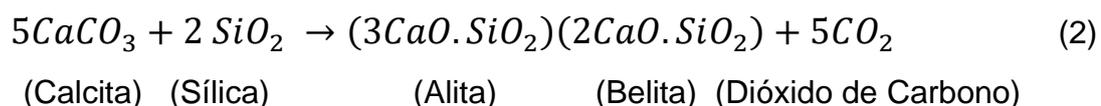
O metacaulim é obtido através do tratamento térmico do caulim (do inglês *kaolin clay*), um minério encontrado em diversas regiões do mundo, sendo o de origem chinesa considerado mais puro. Uma das substâncias do caulim é a caulinita (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O). Ela é tratada a temperaturas entre 600 e 800 °C, processo conhecido com calcinação. Com isso, a água é liberada da caulinita, gerando um aluminossilicato amorfo, o metacaulim (Al₂O₃.2SiO₂) (KHATIB *et. al.*, 2018).

A reação de obtenção do metacaulim é uma forma de desidroxilação, que consiste em remover o grupo oxyl (OH), pode ser resumido na Equação 1.



No caso do cimento Portland comum, seus constituintes são formados a partir da calcário, fonte de calcita [carbonato de cálcio (CaCO_3)] utilizada no processo, e a sílica [dióxido de silício (SiO_2)] (DAVIDOVITS, 1994). No processo de calcinação da calcita e da sílica, são gerados a alita [silicato tricálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)], belita [silicato dicálcio ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)] e dióxido de carbono (TENÓRIO *et. al.*, 2003).

Esse processo é resumido através da Equação 2.



A Figura 2 a seguir é uma ilustração simplificada do processo de geopolimerização a partir do metacaulim. O aluminossilicato utilizado sofre uma desconstrução após a adição do ativador. No ativador, a presença de Na^+ e OH^- faz com que o aluminossilicato se reorganize, como visto na Figura 2-a. O gel começa a se formar após a reorganização das moléculas, através da condensação dos oligômeros, que são complexos moleculares formados pela repetição de algumas unidades, como pode ser observado na Figura 2-b. Com isso, há uma estabilização e formação de grandes redes através da polimerização, representada na Figura 2-c (PARK e POUR-GHAZ, 2018).

De acordo com PROVIS *et. al.* (2009), existem diversos tipos de ativadores disponíveis e suas propriedades físicas e químicas desempenham um papel importante na determinação das propriedades do geopolímero. Hidróxidos e silicatos de sódio e potássio são geralmente as soluções ativadoras mais comuns. No entanto, por causa da alta disponibilidade e do menor custo, a solução básica mais utilizada é à base de sódio, como o NaOH.

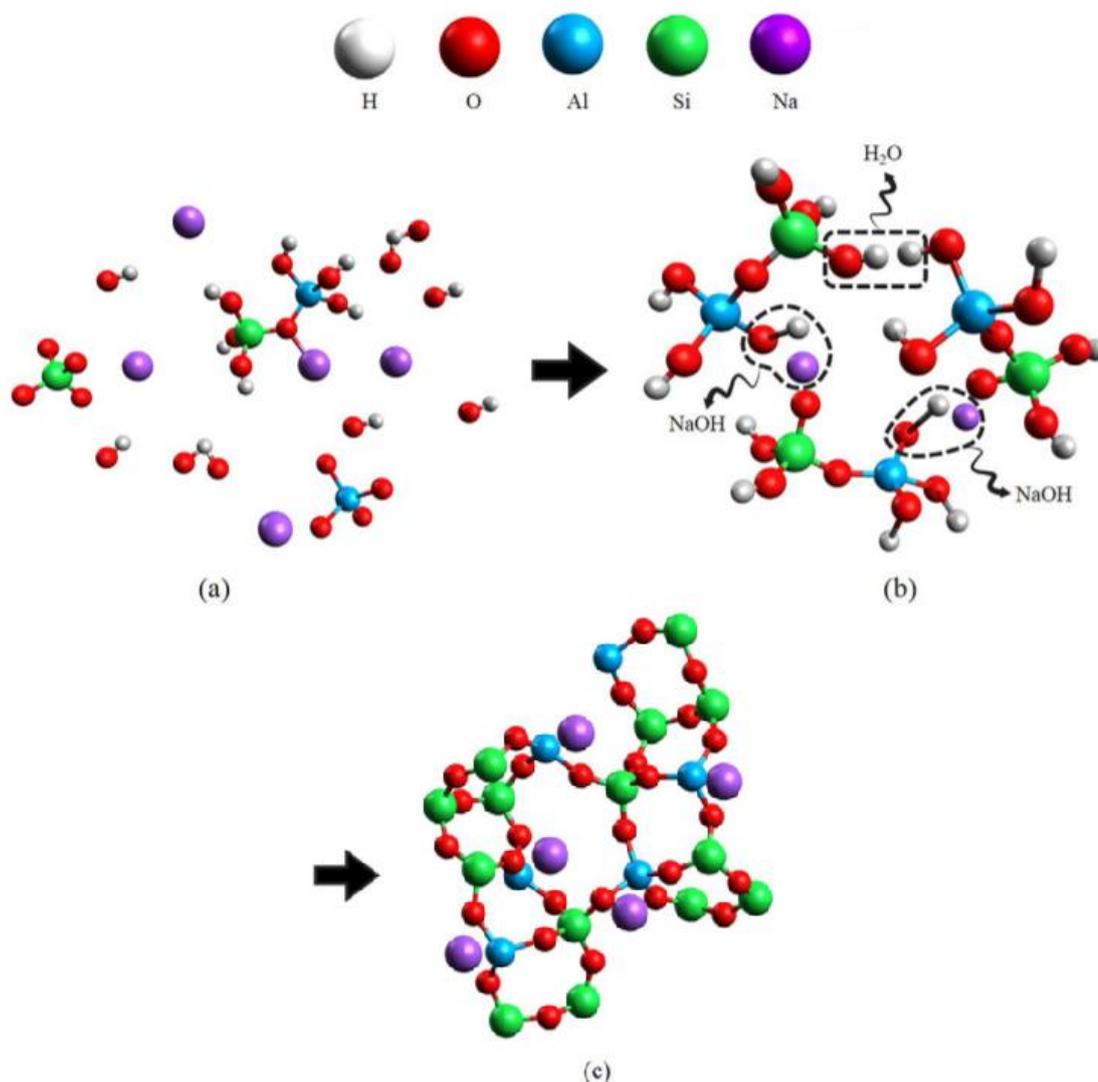


Figura 2: Ilustração da geopolimerização; a) reorganização; b) gelificação; e c) formação de grandes redes
Fonte: PARK e POUR-GHAZ (2018).

O nome “Polisialato” foi sugerido para a designação química dos geopolímeros a base de silício e alumínio. Sialato é uma abreviação para a estrutura denominada de silicooxo-aluminato. A rede de sialato é uma unidade básica, formada através da união das moléculas de silicato (SiO₄) e de aluminato (AlO₄), que quando combinada em repetição da origem aos polysialatos (DAVIDOVITS, 1994). Como pode ser observado na Figura 3, dependendo da proporção Si/Al, as redes recebem nomenclaturas diferentes.

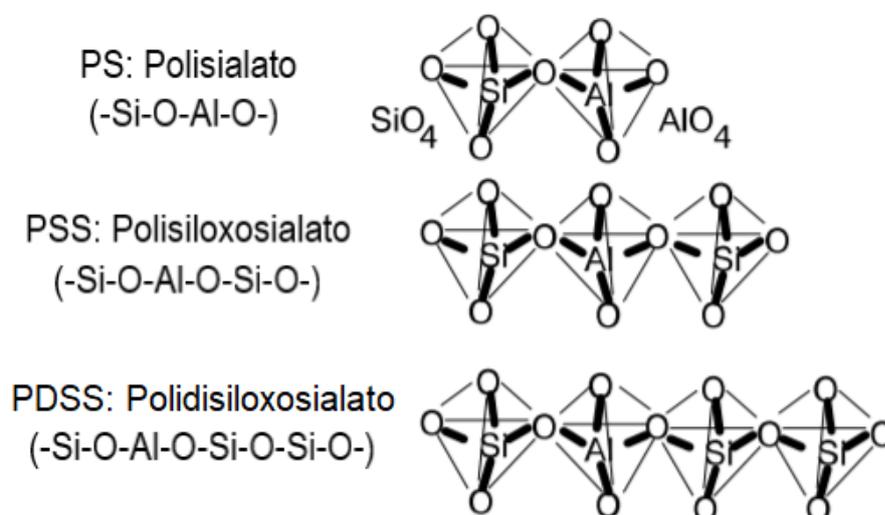


Figura 3: Estrutura dos Polisialatos.
Fonte: adaptado de DAVIDOVITS (1994)

A razão Si/Al é responsável por ditar as características do produto. Ela interfere diretamente nas propriedades do material, alterando, por exemplo, a resistência compressiva, elasticidade, resistência à altas temperaturas e inclusive a presença de eflorescência na superfície, que é uma camada esbranquiçada que pode ser atribuída à presença de um sal. Alguns estudos indicam que a resistência à compressão aumenta em uma relação diretamente proporcional com a proporção de Si para Al, mas há uma maior chance de presença de eflorescência por causa do potássio (K) livre (HE *et. al.*, 2016).

DAVIDOVITS (1994) propôs uma fórmula empírica, Equação 3, para relacionar os íons provenientes do ativador, o nível de hidratação e a razão Si/Al. A estrutura tetraédrica dos sialatos, vista anteriormente na Figura 4 acima, por possuir uma carga negativa, necessita dos íons positivos do ativador, comumente Na^+ , K^+ e Ca^{++} , para preencherem as cavidades das redes.



M = cátion do ativador;

n = grau da polimerização;

z = valores entre 1 e 3;

w = nível de hidratação.

2.1.2 Propriedades dos Geopolímeros

No processo de reação, o aluminossilicato e o líquido ativador afetam diretamente o produto final. O primeiro possui efeito na dissolução e reação subsequente, enquanto o segundo dissolve o material sólido, determina a ruptura e recombinação da estrutura do aluminossilicato, a policondensação e balanço de carga do sistema de reação (DUXSON *et. al.*, 2005).

Por se apresentarem de diversas formas devido aos diferentes tipos de precursores (metacaulim, cinzas volantes, etc.) e de ativadores (à base potássio, à base de sódio), os materiais que são resultados da mistura podem possuir propriedades mecânicas, térmicas, físicas e sua microestrutura variadas. Além disso, outros parâmetros contribuem para essa variação, como regime de cura e teor de água presente na solução ativadora (VICKERS *et. al.*, 2015).

Os geopolímeros são caracterizados por adquirir altos valores de resistência à compressão nas primeiras idades, tendo assim maior vantagem em relação ao CPo, que necessita de maior tempo para conseguir bons resultados nesse quesito. MEHTA e SIDDIQUE (2017) comprovaram essa propriedade, estudando geopolímeros à base de cinzas volantes com baixo teor de cálcio. Os resultados mostraram que o concreto geopolimérico pode ser considerado benéfico para aplicações cuja resistência nas primeiras idades é priorizada. No estudo em questão, relacionando com a resistência à compressão total de 28 dias encontrada, o material adquiriu cerca de 92% de sua resistência em apenas 3 dias e 97% em 7 dias, enquanto no concreto convencional a porcentagem de resistência adquirida aos 7 dias foi de apenas 70%.

Boa resistência quando exposto à altas temperaturas é mais uma propriedade interessante a se destacar. Inicialmente desenvolvido para suportar temperaturas elevadas, os geopolímeros possuem uma melhor performance nessas condições em relação aos materiais à base de CPo (DAVIDOVITS, 1999).

Diferente do CPo, os geopolímeros possuem boa resistência contra o ataque de ácidos (DAVIDOVITS, 1994). A Figura 4 apresenta a perda de peso em porcentagem de materiais imersos em uma solução de concentração ácida de 5% de H₂SO₄ e HCl. Comparado com os outros materiais, o geopolímero manifesta

menor perda de massa, com cerca de 5-8% de percentual, mostrando assim grande vantagem em relação aos demais.

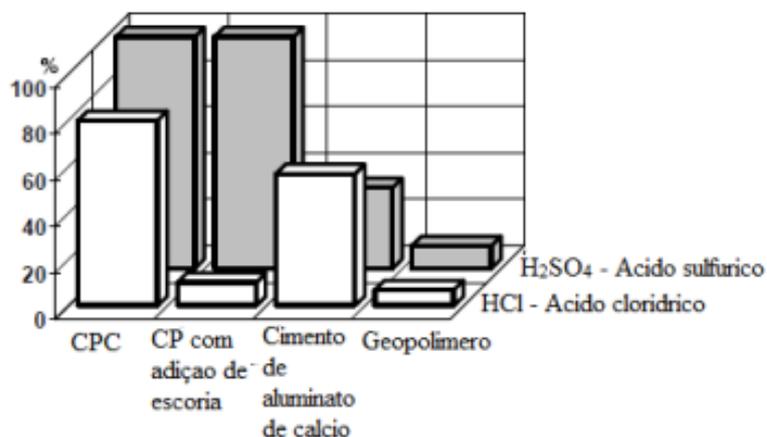


Figura 4: Perda de massa de materiais cimentícios submetidos ao ataque ácido.
 Fonte: ALVES (2008), adaptado de DAVIDOVITS (1994).

Segundo BIGNO (2008), o baixo índice de retração quando comparado ao CPo, como observado na Figura 5 a seguir, torna o geopolímero um material promissor para aplicações em diversas áreas da construção civil. A retração é a diminuição do volume, podendo comprometer a qualidade do material. Portanto, o cimento GP possui boa estabilidade volumétrica.

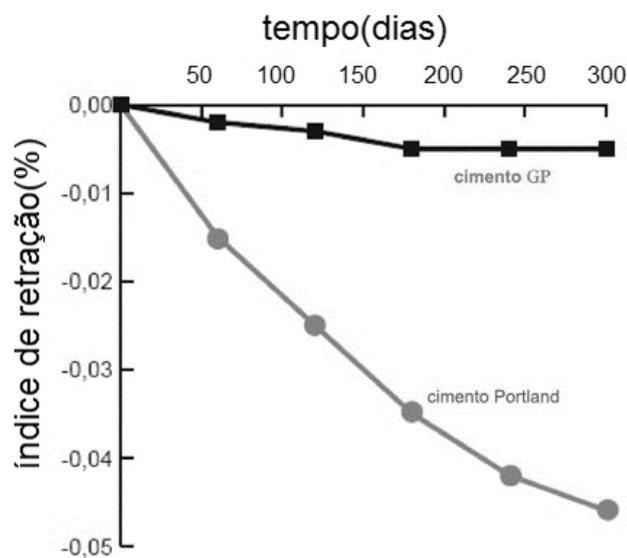


Figura 5: Comparação do índice de retração do cimento Portland e do cimento GP.
 Fonte: Geopol – disponível em <http://www.geopolymer.com.br> (2019)

O material geopolímero é suscetível a deformações, possuindo baixa resistência à tração (BENTUR *et. al.*, 2007) e por isso, a adição de fibras pode se tornar uma alternativa para superar essa fragilidade, sendo incorporadas à matrizes cimentícias, fornecendo para esses materiais um aumento na sua força de tensão, ductilidade, tenacidade e maior durabilidade (VICKERS *et. al.*, 2015). O uso de agregados também pode trazer benefícios em suas propriedades, sendo importante selecionar um reforço que não seja reativo com os constituintes do geopolímero durante o processo de cura e que seja quimicamente resistente à alta alcalinidade da pasta geopolimérica (MUSIL e KRIVEN, 2014).

2.2 APLICAÇÕES

Por possuir propriedades interessantes e ser uma alternativa ao CPo, o cimento geopolimérico está sendo mais utilizado no campo da construção civil: em pavimentos, na fabricação de peças pré-moldadas e em reparos estruturais, principalmente pelo fato de adquirir um valor de resistência consideravelmente alto em pouco tempo, facilitando na rapidez do desenvolvimento do projeto (VICKERS *et. al.*, 2015).

Um grande uso desse material que pode ser destacado aconteceu em 2014, durante a construção do Aeroporto Brisbane West Wellcamp (ABWW) na Austrália (Figura 6). Nesse projeto do aeroporto na Austrália, foi utilizado cerca de 40 mil metros cúbicos (m³) de concreto geopolimérico para a pavimentação das pistas e construção das edificações, marcando um recorde de quantidade de proveito desse material na engenharia e reduzindo em uma porcentagem de 80% de emissão de dióxido de carbono quando comparado com o CPo, significando mais de 8 mil toneladas de CO₂ poupados (GLASBY *et. al.*, 2015).

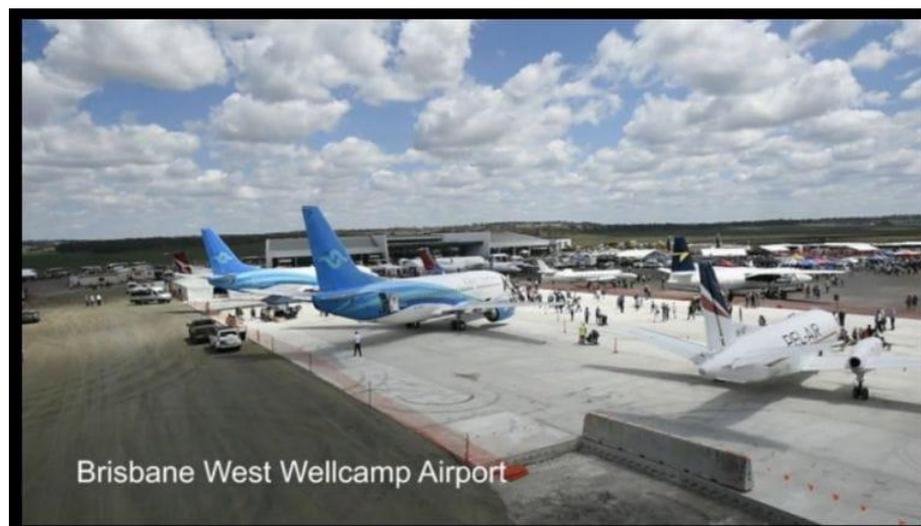


Figura 6: Aeroporto ABWW na Austrália.
Fonte: The Chronicle 29 (Set. 2014).

A razão entre o raio atômico de silício (Si) e de alumínio (Al) afeta a microestrutura do material, diferenciando assim os possíveis campos de aplicações para cada valor dessa razão, como apresentado na Tabela 1 (PANIAS e GIANNOPOULOU, 2004).

Tabela 1 - Aplicações do geopolímero conforme a razão Si/Al.

| Razão Si/Al | Aplicações |
|--------------------|---|
| 1 | -Tijolos -Cerâmica -Proteção de Fogo |
| 2 | - Cimentos e concretos com baixa emissão de gás carbônico - Encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos |
| 3 | - Compósitos com fibra de vidro para proteção ao fogo - Equipamentos de fundição - Compostos resistentes ao calor, de 200 a 1000 °C - Ferramentas para aeronáutica |
| >3 | - Selantes para a indústria, de 200 a 600 °C - Ferramentas para a aeronáutica |
| 20-35 | -Compósitos com fibra resistentes ao calor e ao fogo |

Fonte: PANIAS e GIANNOPOULOU (2004); adaptado de ALVES (2018).

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Compósitos são uma combinação de dois ou mais materiais (metais, cerâmicos, polímeros), com o objetivo de incorporar as melhores características de cada componente e assim adquirir propriedades vantajosas para desejada utilidade (CALLISTER, 2013).

São constituídos por uma fase contínua chamada matriz e por uma fase descontínua e dispersa, denominada reforço. A matriz confere a estrutura do compósito, enquanto o reforço realça alguma propriedade desejada (CALLISTER, 2013).

A matriz pode ser de diferentes tipos, como visto na Figura 7. No caso dos compósitos com reforço fibroso, sua função é garantir a orientação e o espaçamento das fibras, transmitir as forças de cisalhamento entre as camadas de fibra para que o compósito resista a forças de torção e dobramento e evitar danos superficiais ao reforço fibroso (MANO, 1991).



Figura 7: Classificação de compósitos quanto à matriz utilizada.
Fonte: CALLISTER (2013).

Quanto à fase dispersa, o compósito pode ser estrutural, reforçado com partículas e reforçado com fibras, observado na Figura 8. O compósito estrutural pode ser laminado ou “em sanduíche”. No caso de partículas, sua interação com a matriz será influenciada pela dimensão das partículas. Por outro lado, as fibras podem estar ordenadas alinhadamente ou de forma aleatória, orientadas de forma contínua ou descontínua. Na Figura 9, pode-se notar diferentes características da fase dispersa,

como sua forma, tamanho, distribuição e orientação. Esses fatores podem influenciar as propriedades dos compósitos (CALLISTER, 2013).



Figura 8: Classificação de compósitos quanto ao tipo de reforço.
Fonte: CALLISTER (2013).

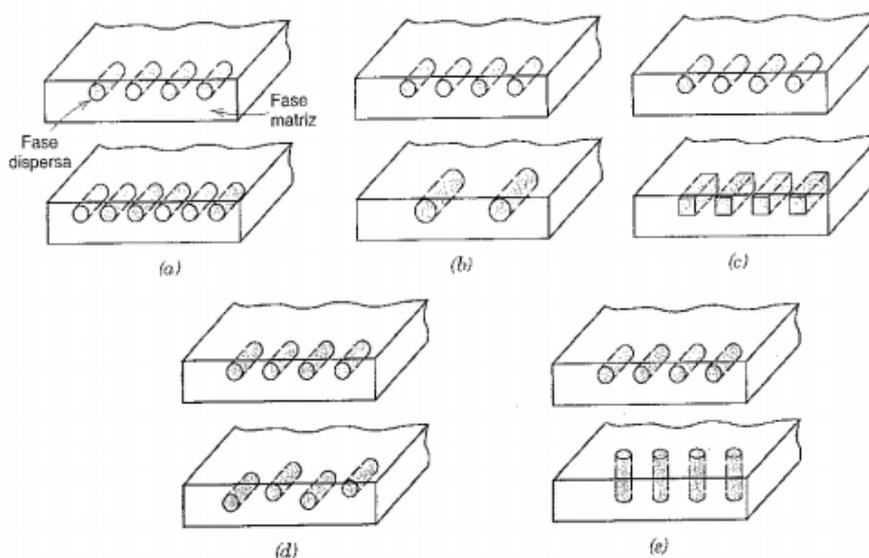


Figura 9: Representações esquemáticas de características da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos. a) concentração; b) tamanho; c) forma; d) distribuição e e) orientação.
Fonte: CALLISTER (2013)

O concreto é um exemplo de material compósito, que consiste em um meio de ligação (cimento) no qual são incorporadas partículas ou fragmentos de agregados. O cimento é um material seco e finamente pulverizado que desenvolve a propriedade de ligação como resultado da hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

2.3.1 Compósitos Reforçados com Fibras

Os compósitos reforçados com fibras são tecnologicamente os mais importantes. Assim, esse tipo de reforço vem despertando interesse em engenheiros de diversos setores, já que a forma fibrosa de um material possui alto módulo de elasticidade e elevada resistência à tração (SCHWARTZ, 1984; CALLISTER, 2013).

A inserção de fibras em matrizes cimentícias permite uma melhora de seu comportamento frágil quando sujeitas a altas tensões, controlando a abertura de fissuras e aumentando a tenacidade do material (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Por isso, as fibras estão sendo utilizadas de forma crescente na construção civil, como em estruturas de concreto como túneis e pavimentos (FIGUEIREDO, 2000).

Podemos ver um exemplo do efeito da fibra no gráfico Carga x Deformação representado na Figura 10, que revela que o concreto convencional sofre sua falha quando a deflexão atinge a tensão máxima da matriz, enquanto o concreto reforçado com fibras não se rompe após o início da fissuração e continua suportando cargas consideráveis mesmo com deflexões superiores à deformação na fratura do concreto simples, evidenciando o aumento de tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras (LUCENA, 2017).

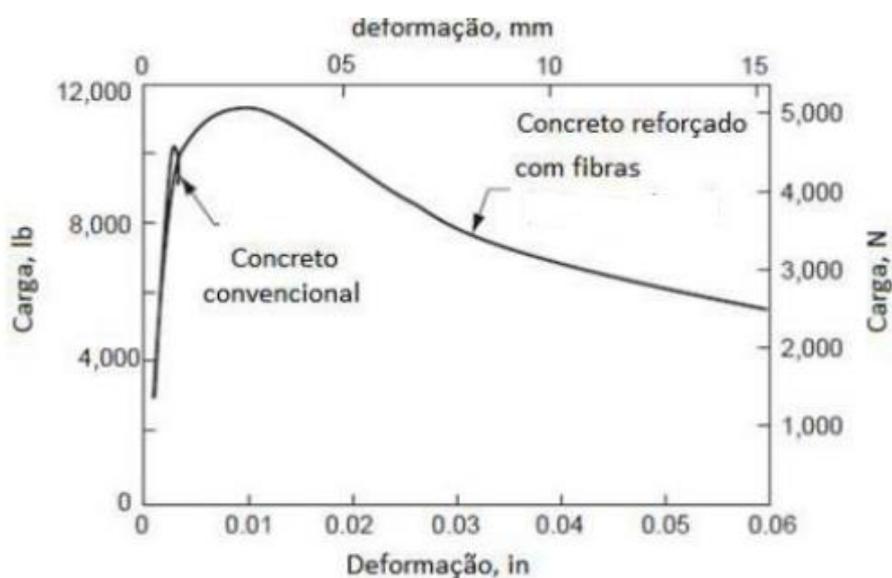


Figura 10: Comportamento carga-deformação do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras.

Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2006).

As propriedades desses tipos de compósitos variam conforme sua estrutura, dependendo da forma e distribuição das fibras, da estrutura da matriz e da interface-fibra-matriz (BENTUR e MINDESS, 2007).

Na teoria, pelo ponto de vista de fortalecer e endurecer o concreto é desejável ter uma grande proporção e alta concentração de fibras incorporadas. Porém, há a redução considerável da trabalhabilidade com o aumento dessas duas variáveis. Portanto, é importante alcançar uma seleção da quantidade e proporção adequada de fibras (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

De acordo com CALLISTER (2013), para que ocorra um efetivo aumento da resistência do compósito com uma transferência eficiente de cargas entre fibras e matriz, é necessária uma análise experimental para verificar a adesão entre a fibra e a matriz para selecionar o comprimento adequado.

Além disso, a fração volumétrica de fibras no compósito também influencia na estabilidade de uma adequada interação entre fibra e matriz. De acordo com a porcentagem de fibras no volume total do compósito, podemos classificar o compósito reforçado com fibras de três formas conforme indica a Tabela 2. Quando é desejado reduzir a fissuração decorrida da retração, é mais comum utilizar a fração volumétrica baixa. No desejo de aumentar significativamente propriedades como tenacidade, resistência ao impacto e módulo de ruptura é recomendado o uso de moderada fração. Para melhor desempenho dos compósitos, a presença de fibras em alta fração de volume permite o endurecimento por deformação dos compósitos (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Tabela 2 - Classificação do compósito reforçado com fibras de acordo com a porcentagem volumétrica de fibras no compósito

| Classificação | Fração Volumétrica em % |
|----------------------|--------------------------------|
| Baixa | Entre 0 e 1 |
| Moderada | Entre 1 e 2 |
| Alta | Maior que 2 |

Fonte: adaptado de MEHTA e MONTEIRO (2006).

As fibras podem ser orientadas nos compósitos de forma descontínua, unidirecionais de forma contínua e aleatoriamente em aspecto descontínuo e multidirecional. A Figura 11 apresenta essas diferentes maneiras de arranjo. A

concentração, distribuição e orientação das fibras influenciam significativamente a resistência e outras propriedades dos compósitos (CALLISTER, 2013). As melhores propriedades mecânicas são adquiridas quando a distribuição é uniforme, como por exemplo, distribuídas no sentido longitudinal melhorando a resistência à tração do material. Entretanto, para dispersar as fibras de maneira uniforme é preciso de técnicas apuradas para verificar a distribuição das fibras, como a Microscopia Eletrônica de Varredura, que necessitam de maior tempo para sua devida aplicação (ABREU, 2015).

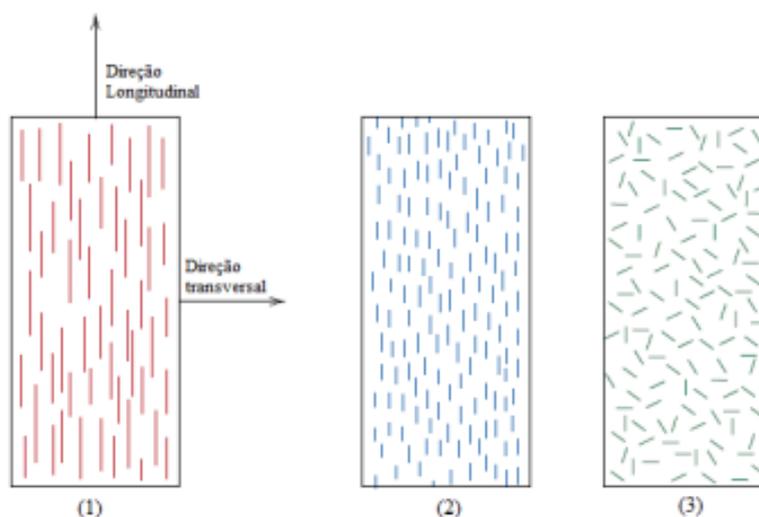


Figura 11: Representação esquemática da orientação e distribuição de fibras nos compósitos. 1) contínuas e alinhadas; 2) descontínuas e alinhadas; 3) descontínuas e orientadas de forma aleatória.

Fonte: CALLISTER (2013).

No início do século XX, a utilização do reforço fibroso foi iniciada, com o uso de fibras de amianto. Depois, seu aproveitamento também começou a ser visto em matrizes cimentícias, com o uso de fibras de vidro, aço, nylon e polipropileno, além das fibras naturais, como o sisal e a juta (BENTUR e MINDESS, 2007).

2.4 FIBRAS NATURAIS

No geral, fibras podem ser divididas em 2 grupos: sintéticas e naturais. As fibras sintéticas, atualmente, são as mais utilizadas pelas suas excelentes propriedades, com destaque para a fibra de vidro que domina o mercado por suas características

mecânicas e custo inferior quando comparadas com as fibras de carbono e aramida. No entanto, essas fibras possuem desvantagens consideráveis, por serem não-recicláveis e deixarem resíduos durante o reaproveitamento de materiais compostos por elas. Além disso, elas são muito abrasivas e causam irritação na pele durante seu manuseio (ALAM *et. al.*, 2014).

Materiais reforçados com fibras naturais começaram a ser estudados por volta de 1930 por Norman de Bruyne (HILL e HUGHES, 2010). Cientistas começaram a pesquisar mais sobre o assunto quando observaram que materiais poliméricos reforçados com fibras possuíam uma vantagem sobre outros materiais convencionais quando propriedades específicas eram comparadas. Foi então que, por uma constante preocupação com o meio ambiente, as fibras naturais começaram a atrair a atenção dos pesquisadores. Geralmente, essas fibras possuem baixo custo e densidade, além de excelentes propriedades específicas capazes de complementar as desvantagens da matriz (SAHEB e JOG, 1999).

Fibras naturais podem ser divididas de acordo com a origem: Vegetal, Animal e Mineral. Apesar das fibras minerais possuírem boas propriedades mecânicas e capacidade de retardar o fogo, elas foram banidas por serem consideradas prejudiciais à saúde humana. As fibras animais são superiores às fibras vegetais quando comparadas as propriedades elásticas e, em alguns casos, a resistência ao calor. As fibras vegetais podem ser obtidas de diversas partes das plantas, com suas características variando. A Figura 12 mostra alguns dos tipos e as origens de fibras animais e vegetais (BHATTACHARYYA *et. al.*, 2015).

Em relação as fibras naturais, podemos classificar as plantas como primárias ou secundárias dependendo de sua utilização. Plantas primárias são aquelas que são cultivadas para a obtenção de suas fibras, enquanto nas plantas secundárias, seu material fibroso é um subproduto. Juta e sisal são exemplos de plantas primárias, enquanto o coco é considerado como secundária. A Tabela 3 especifica a produção mundial de cada fonte de fibra vegetal elencada no período de 2012 (FARUK *et. al.*, 2012).

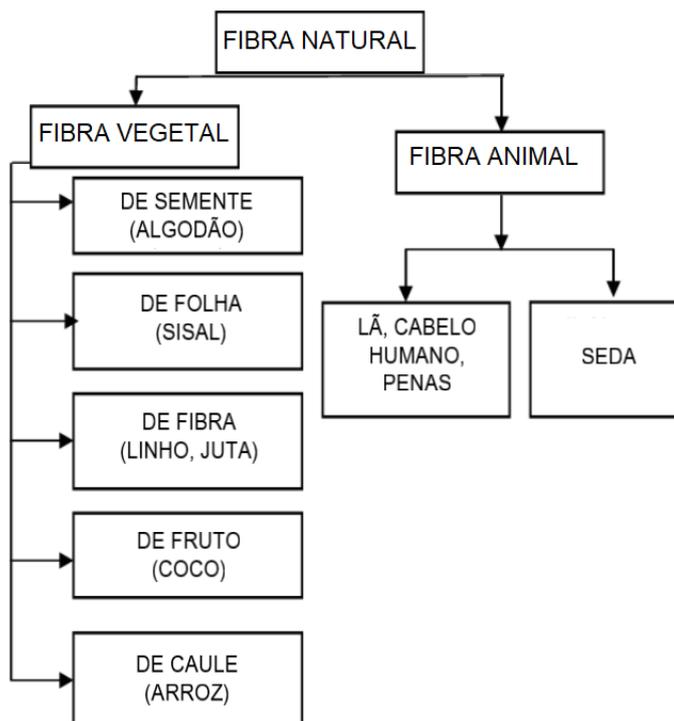


Figura 12: Exemplos de Fibras Naturais.
 Fonte: Adaptado de BHATTACHARYYA *et. al.* (2015).

Tabela 3 - Produção Mundial das Fontes de Fibras no ano de 2012.

| Fonte de Fibra | Produção Mundial (10 ³ ton) |
|----------------|--|
| Coco | 100 |
| Sisal | 378 |
| Linho | 830 |
| Juta | 2.300 |
| Bambu | 30.000 |
| Cana de Açúcar | 75.000 |

Fonte: Adaptado de FARUK *et. al.* (2012).

As fibras naturais podem ser consideradas, de certa forma, materiais compósitos por possuírem microfibras, chamadas de fibrilas, conectadas através de uma matriz amorfa de lignina e hemicelulose, que junto da celulose e da pectina formam a parede celular. (AZADI *et. al.*, 2013). A parede celular em uma fibra não é uma membrana homogênea, pois cada fibra possui uma estrutura formada por camadas complexas, sendo formada por uma parede primária e uma secundária (JOHN e ANANDJIWALA, 2008).

Dentro dessas paredes celulares, a celulose com alta resistência à tração existe como um sistema das matrizes de lignina reforçadas pelas fibrilas. Cada fibrila pode ser considerada uma cadeia de unidades cristalinas conectadas nas matrizes amorfas. A Figura 13 é um esquema de uma parede celular indicando uma lamela média e 3 camadas da parede secundária (ZIMMERMANN *et al.*, 2004).

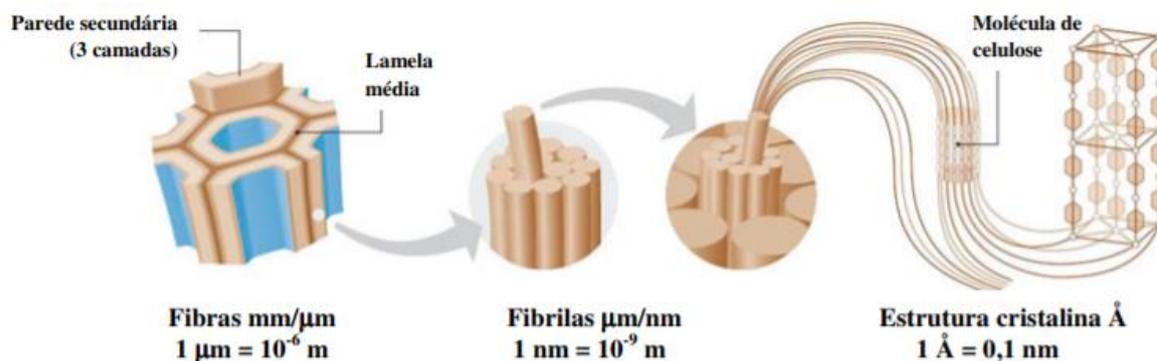


Figura 13: Estrutura de uma fibra natural.
Fonte: FIDELIS (2014); adaptado de ZIMMERMANN *et al.* (2004).

2.4.1 Fibra de Juta

A juta foi trazida ao Brasil na década de 1930 através da imigração japonesa na Amazônia e se tornou uma das principais atividades econômicas do povo na região. A planta é cultivada e colhida após 4 meses, quando alcança uma altura entre 3 e 4 metros com um talo de 2 centímetros de espessura. A Figura 14 mostra uma plantação de juta em Manacapuru, AM. A fibra da juta se encontra entre o talo interno e a casca. As árvores são cortadas próximas ao solo com o uso de foices. Em seguida, as folhas são removidas e das árvores, que são então mergulhadas no rio em feixes e lá ficam por alguns dias. Os feixes são retirados do rio após o tempo determinado e as fibras são separadas do caule e levadas para secar, como observado na Figura 15 (HOMMA, 2016).



Figura 14: Plantação de Juta.
Fonte: ERNESTO DE SOUZA (2010).



Figura 15: Remoção e secagem das fibras.
Fonte: ERNESTO DE SOUZA (2010).

As propriedades físicas da fibra, como limite de resistência, flexibilidade, absorção de água e elasticidade dependem de uma série de fatores como o comprimento das moléculas fibrosas, seu alinhamento, diâmetro da fibra, grau de polimerização, origem, condições de crescimento da planta e estrutura cristalina. A região cristalina da parede é responsável pela sua maior força de ligação. Comparada a outras fibras, a de juta possui uma afinidade pela absorção de água razoavelmente elevada (ALAM *et. al.*, 2014; FIDELIS, 2014).

DEFOIRD *et. al.* (2010) realizaram diversos testes com comprimentos variados de fibras de bambu, coco e juta a fim de estudar suas resistências à tração. Eles concluíram que o teor de celulose é o principal responsável pela resistência, como citado anteriormente, enquanto o ângulo microfibrilar é proporcional à capacidade de deformação. A juta por eles utilizada possuía teor de celulose de 61-

71,5% e ângulo microfibrilar de 8%, o que proporciona resistências à tração de aproximadamente 353 MPa, módulo de elasticidade de 26,25 GPa e capacidade de deformação de apenas 3,05%.

2.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO EM CONCRETO

O ensaio de resistência à compressão é um dos mais usuais para caracterização mecânica de materiais cimentantes. Para realizar o ensaio, um corpo de prova do material é feito com tamanho e formato padronizado (HIBBELER, 2006).

Os corpos de prova são submetidos a uma força axial compressiva, provocando seu encurtamento. Se o material for frágil, o ensaio é levado até a ruptura, enquanto em materiais dúcteis, o ensaio é interrompido quando ocorre a deformação lateral do corpo de prova. A Figura 16 mostra o comportamento de materiais dúcteis e frágeis sob compressão. A ruptura nos materiais frágeis ocorre pelo efeito de cisalhamento provocado pela tensão de compressão e não ocorrem deformações laterais significativas comparando com os materiais dúcteis (ZOLIN, 2011).

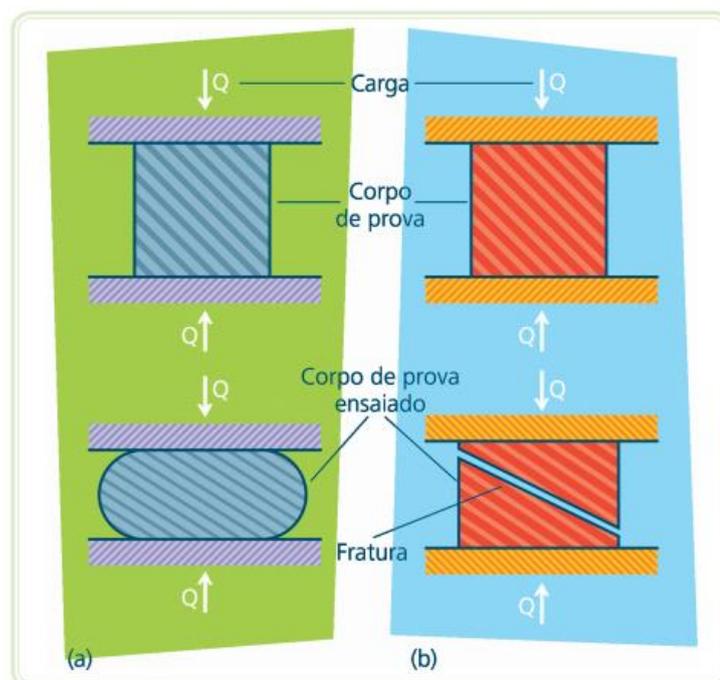


Figura 16: Falha de material. a) dúctil e b) frágil sob compressão.
Fonte: ZOLIN (2011).

O ensaio de compressão ajuda a determinar o valor de resistência à compressão (f_c) que um material possui. Essa resistência é a tensão máxima necessária para causar a ruptura e é a propriedade mais importante de materiais com baixa ductilidade. Quando não suportar uma maior carga, o corpo de prova já pode ser considerado rompido, mesmo se não possuir sinais visíveis de fratura externa, pois terá fissuração interna em um nível avançado (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Para calcular f_c é usada a Equação 4:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Onde f_c é a o valor de resistência à compressão em megapascal (MPa), F é a carga máxima alcançada no ensaio em Newton (N) e A é a área da seção transversal do corpo de prova em milímetro quadrado (mm^2). Em CP cilíndrico, para calcular a área usamos a fórmula na Equação 5 abaixo, onde D é o diâmetro do corpo de prova em milímetro (mm) (HIBBELER, 2006).

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (5)$$

Também podemos calcular a deformação específica (ε) sofrida pelo CP, usando uma simples fórmula de variação de comprimento, mostrada através da Equação 6 a seguir, onde L_0 é o comprimento inicial e L_f o comprimento final.

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L_f}{L_0} \quad (6)$$

É possível calcular a deformação específica real (ε_r) através da integral abaixo, na Equação 7, considerando-se o intervalo da variável de L_0 a L_f .

$$\varepsilon_r = - \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = - \ln(1 - \varepsilon) \quad (7)$$

As máquinas utilizadas no ensaio podem apresentar o gráfico tensão x deformação indicando o comportamento do material ao longo do ensaio, assim como no ensaio de tração (ZOLIN, 2011).

Os materiais frágeis, comparado com seu comportamento sob tração, apresentam resistência à compressão consideravelmente maior. Como a fase elástica é pequena, geralmente essa é a única propriedade avaliada nesse tipo de ensaio (HIBBELER, 2006).

O ensaio apresenta certas limitações, como a possibilidade de atrito entre os cabeçotes das máquinas e as faces do corpo de prova, podendo alterar os resultados. Outro obstáculo é a chance de ocorrer flambagem, que é o encurvamento do corpo de prova. Esse problema ocorre principalmente em corpos de prova de materiais dúcteis, e que possuem um comprimento muito maior em relação ao diâmetro (ZOLIN, 2011). A norma sobre moldagem de corpos de prova de concreto, NBR 5738, determina que quando o material é cilíndrico, a altura deve ser o dobro do diâmetro, padronizando o tamanho.

Também de acordo com ZOLIN (2011), é necessário centralizar o corpo no equipamento de teste e obter um perfeito paralelismo entre as placas do equipamento, garantindo que o esforço de compressão seja distribuído de forma uniforme.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Essa parte será dedicada à descrição dos materiais, métodos de preparo e dos ensaios utilizados neste trabalho. Foram necessárias algumas etapas para a obtenção dos resultados discutidos mais a frente, como o preparo do geopolímero, corte das fibras de juta, preparação dos corpos de prova, tempo de cura e por fim os ensaios de compressão.

3.1 GEOPOLÍMERO

O material utilizado inicialmente neste trabalho foi o geopolímero Cimento GP-1818 da empresa Geo-Pol®, como observado na Figura 17, composto por pó precursor à base de metacaulim (à esquerda) e de líquido ativador à base de NaOH (à direita).



Figura 17: Componentes do Cimento GP-1818.

Após a devida preparação e desmoldagem do material, observou-se que os corpos de prova (CP) do material preparados com ambos os tipos de molde estavam muito danificados, como visto nas Figuras 18 e 19.



Figura 18: CPs do GP-1818 feitos com molde de ferro.



Figura 19: CP do GP-1818 com molde de PVC.

Devido às condições dos CPs do material antigo, um novo material, geopolímero industrial, foi fornecido para a realização do trabalho. Foi solicitado ao fornecedor (o mesmo do material anterior) uma identificação do novo material, mas apenas foi informado que este possui uma formulação de ligante mais evoluída, com ingredientes que melhoram seu desempenho e garante melhores propriedades após a cura, mas com proporções semelhantes de pó / líquido em relação ao GP-1818.

Uma análise química foi realizada no LADES utilizando-se um espectrômetro de massas S2 Ranger, da Bruker, para analisar uma amostra de cada material em formato de disco com medidas de 0,5 cm de altura por 5 cm de diâmetro. O princípio do procedimento da espectrometria de massas consiste em separar os íons do material de acordo com sua taxa de massa/carga eletrônica e determiná-los qualitativa e quantitativamente.

Com os resultados, observou-se que a principal diferença entre os materiais (Figura 20) é que o novo possui uma coloração mais escura e uma razão maior de Si/Al além de não conter cálcio, como descrito na Tabela 4.

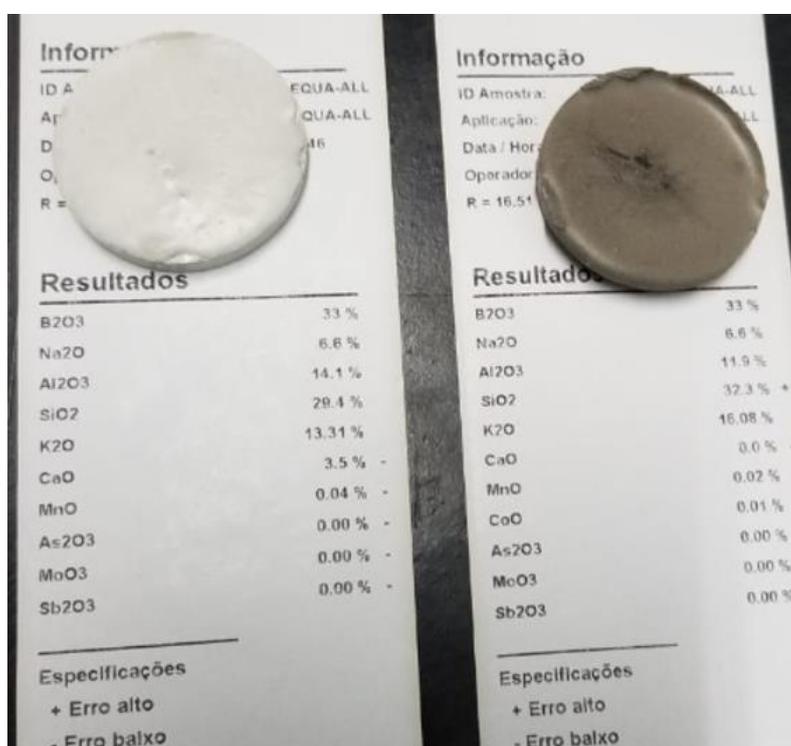


Figura 20: Composição química dos materiais. GP-1818 à esquerda. Novo material à direita.

Tabela 4 - Composição química do GP-1818 e do Novo Material.

| Componente | GP-1818 | Novo Material |
|--------------------------------|---------|---------------|
| Al ₂ O ₃ | 14,1% | 11,9% |
| SiO ₂ | 29,4% | 32,3% |
| K ₂ O | 13,31% | 16,8% |
| CaO | 3,5% | 0% |

Para respeitar a proporção de aproximadamente 75 g de pó precursor para cada 100 g de líquido ativador, foi calculado o material necessário para preencher os moldes para a confecção dos corpos de prova e, com o auxílio de uma balança de precisão digital de até 0,01g e com carga máxima suportada de 510 g, foi separada e medida a quantidade de material.

De acordo com os cálculos, a quantidade ideal de pó precursor para a produção da pasta geopolimérica seria de aproximadamente 187,09 g. Para o líquido ativador, seriam necessários 249,47 g. No entanto, pequenas variações são aceitáveis pois elas não seriam suficientes para alterar significativamente as propriedades do geopolímero. A Figura 21 ilustra a pesagem do material. Foram utilizados dois recipientes diferentes e a balança foi devidamente zerada antes de cada medição. À esquerda, 187,17 g de pó precursor e à direita, 249,78 g de líquido ativador.



Figura 21: Pesagem do pó precursor e do líquido ativador.

Após a pesagem, o pó precursor foi adicionado ao líquido ativador, como observado na Figura 23, para então ser misturado com o auxílio de um agitador mecânico. Essa ordem foi adotada para facilitar a mistura devido ao tipo de haste e hélice utilizado no agitador mecânico, como podem ser vistos na Figura 22 a seguir.



Figura 22: Haste e hélice do agitador mecânico.



Figura 23: Adição do pó ao líquido.

A pasta geopolimérica foi então preparada com o auxílio do agitador mecânico com velocidade máxima de 3000 RPM, disponível no LADES. O material foi misturado por 2 minutos à velocidade de 900 RPM (30%). Após esse tempo, a máquina foi parada para que os resíduos de pó nas laterais do recipiente fossem raspados e adicionados à mistura novamente. Então o material foi novamente misturado com uma velocidade maior, de 1500 RPM (50%) por mais 2 minutos. Pode-se observar o agitador mecânico e as velocidades utilizadas na Figura 24.

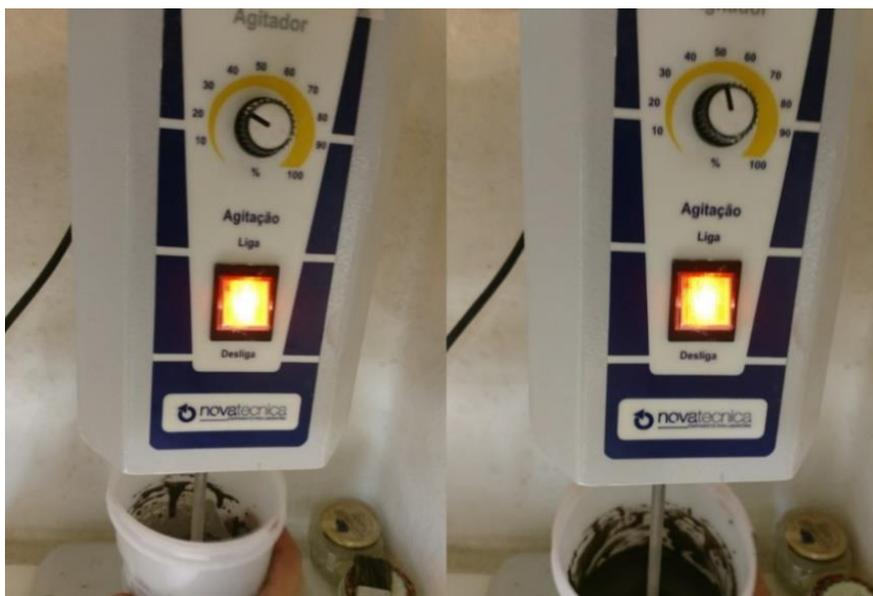


Figura 24: Agitador mecânico com velocidades de 30% à esquerda e 50% à direita.

3.1.1 Fibra de Juta

As fibras utilizadas são feitas com 100% de juta. Primeiramente ela foi cortada em comprimento de 50 mm, porém a trabalhabilidade do material piorou consideravelmente. Por isso, foi pensado em utilizar um tamanho menor. PIKANÇO e GHAVAMI (2008) concluíram que uma melhor performance de fibras de curauá no comportamento à compressão de argamassas foram as cortadas com 25 mm de comprimento e por isso, foi resolvido utilizar esse mesmo comprimento para as fibras de juta no presente trabalho. Após o corte, as fibras foram pesadas na balança digital. FIDELIS (2014) estudou diversas propriedades da juta, e por se tratar de um estudo utilizando materiais nacionais, a densidade da fibra de juta utilizada neste trabalho foi de $1,61 \text{ g/cm}^3$, valor obtido por ele.

Considerando essa densidade, a quantidade de fibra a ser utilizada foi calculada e adicionada com base no volume de material necessário para preencher o molde. Com relação à quantidade de fibras, os corpos de prova foram preparados sem fibra, com 1% e 2% do volume de material em fibras de juta, o que representava aproximadamente 3g e 6g, respectivamente. A Figura 25 mostra a pesagem das fibras de juta.



Figura 25: Pesagem das fibras de juta.

3.1.2 Compósito de Geopolímero com Fibra de Juta

Para a preparação do compósito, as fibras foram adicionadas ao geopolímero aos poucos e misturadas devagar e manualmente, para evitar que elas ficassem completamente concentradas. Na Figura 26.a é possível observar o processo de adição das fibras ao geopolímero.

Conforme as fibras foram sendo adicionadas, a trabalhabilidade do material se tornou significativamente pior, dificultando o manuseio na mistura e sua colocação nos moldes. É possível observar o aspecto do geopolímero com fibra na Figura 26.b

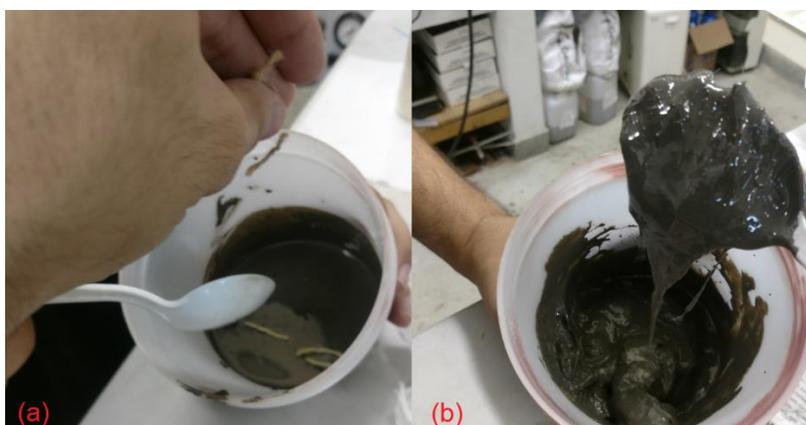


Figura 26: Preparação do geopolímero com fibra. a) adição das fibras e b) geopolímero com fibra.

3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Inicialmente, moldes cilíndricos de ferro com medidas de 100 mm de altura por 50 mm de diâmetro foram utilizados para o preparo dos corpos de prova que seriam submetidos ao ensaio de compressão. Com o auxílio de uma lixa, os resíduos internos de outros testes e parte da oxidação foram removidos para que os corpos de prova não fossem afetados. O molde de ferro pode ser observado na Figura 27 a seguir.



Figura 27: Molde de ferro cilíndrico para os corpos de prova.

No entanto, mesmo com o auxílio de um desmoldante e dos preparos realizados, parte do material aderiu ao molde de ferro, fazendo com que o corpo de prova fosse parcialmente danificado como citado anteriormente. Moldes de PVC foram então preparados para que se aproximassem das medidas dos moldes de ferro. As medidas dos moldes de PVC eram de 48 mm de diâmetro e 110 mm de altura. Eles possuíam alturas maiores pois para o desmolde seria necessário cortá-los, então uma folga foi adotada para facilitar o corte do tubo.

Um desmoldante disponível no LADES foi utilizado para auxiliar na desmoldagem. Ele foi aplicado no interior do molde com um pincel e colocado para secagem ao ar ambiente no interior da capela. Após a secagem do produto, uma das extremidades do molde foi devidamente selada com o uso de uma fita adesiva transparente para formar uma base. Foram utilizadas 6 camadas de fita para formar a

base do tubo e evitar o vazamento do geopolímero. Os moldes de PVC podem ser visualizados na Figura 28.



Figura 28: Molde de PVC.

Após a secagem e a preparação da base com fita, os moldes foram preenchidos com as pastas geopoliméricas. Foi necessário um cuidado maior na transferência da mistura com fibra para que não fosse derramada para fora dos moldes. É possível observar que o geopolímero sem fibra possuiu um aspecto mais líquido, proporcionando uma mistura mais homogênea. Pode ser visto na figura 29 a transferência das misturas geopoliméricas para os moldes e a diferença entre a fluidez de cada material.



Figura 29: Moldagem do geopolímero. a) sem fibra e b) com fibra.

Todos os CPs ficaram nos moldes por apenas 1 dia pelo fato do geopolímero possuir uma secagem rápida. Após esse tempo, eles foram desmoldados com o auxílio de ferramentas para cortar os moldes de PVC. Os CPs foram então curados ao ar ambiente após esse tempo, por um total de 7 e 14 dias para os corpos com maior tempo de cura. Recipientes contendo água foram posicionados perto dos CPs para evitar que o ambiente seco devido ao ar refrigerado pudesse prejudicá-los.

Após a preparação das amostras, cada uma recebeu uma identificação baseada em seu tempo de cura e porcentagem volumétrica de fibras. A Tabela 5 a seguir contém as identificações criadas para referenciar as amostras desenvolvidas para estudo neste trabalho. O modelo de identificação utilizado foi CP-**XF YD**, sendo CP definido como corpo de prova, **X** a porcentagem de fibra (F) e **Y** o tempo de cura em dias (D).

Tabela 5 - Identificação dos corpos de prova.

| Porcentagem de fibras Tempo de cura | 0 % | 1% | 2% |
|--|------------|-----------|-----------|
| 1 dia | CP-0F1D | CP-1F1D | CP-2F1D |
| 7 dias | CP-0F7D | CP-1F7D | CP-2F7D |
| 14 dias | CP-0F14D | CP-1F14D | CP-2F14D |

As Figuras 30 a 32 a seguir contém todos os corpos de prova criados para a execução do trabalho. Como visto na Figura 30, um corpo de prova extra foi criado a fim de verificar o comportamento do material quando faceado com uma retífica, demonstrado mais adiante, e para a devida regulagem de velocidade da máquina de ensaio de compressão.

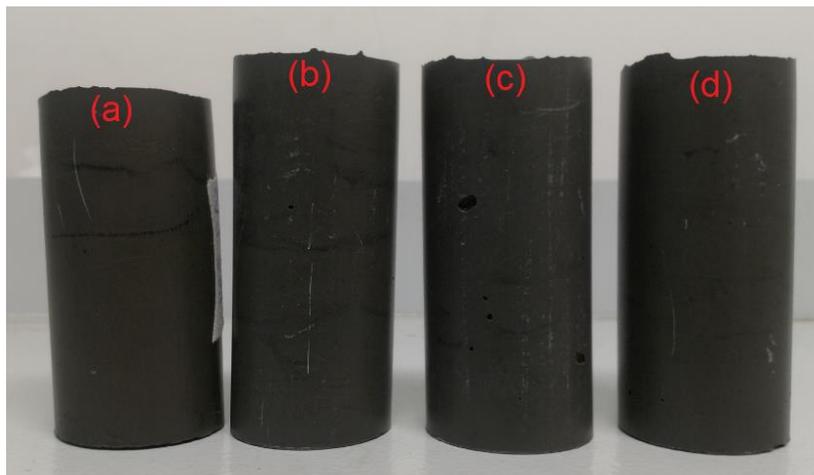


Figura 30: Corpos de prova com 1 dia de cura. a) CP-0F1D; b) CP-1F1D; c) CP-2F1D e d) CP de Teste.

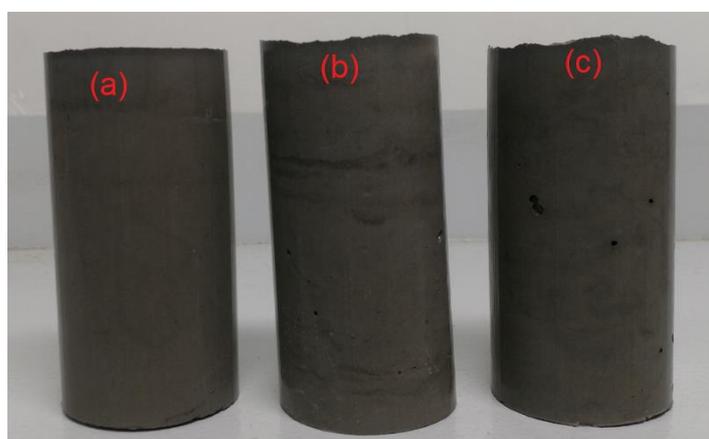


Figura 31: Corpos de prova com 7 dias de cura. a) CP-0F7D; b) CP-1F7D e c) CP-2F7D.

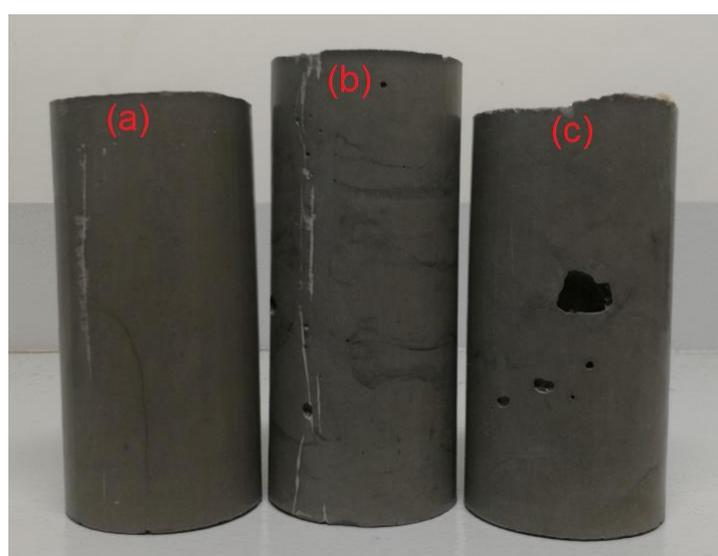


Figura 32: Corpos de prova com 14 dias de cura. a) CP-0F14D; b) CP-1F14D e c) CP-2F14D.

Pode-se notar na Figura 33 que no CP-2F14D houve a formação de um grande poro. É possível que esse poro tenha se formado devido ao acúmulo de ar durante o preenchimento. A possível causa desse acúmulo é a quantidade de fibra adicionada à mistura. Mesmo com a falha, o CP foi testado para observar a influência dela na resistência e no comportamento da fratura.



Figura 33: Destaque do poro no CP-2F14D

A Figura 34 é uma comparação lado a lado dos CPs sem fibra com 1, 7 e 14 dias de cura. Inicialmente ele possui uma cor cinza escuro, que desvanece ao longo do tempo. Observa-se uma variação maior da cor logo nos primeiros dias de idade.

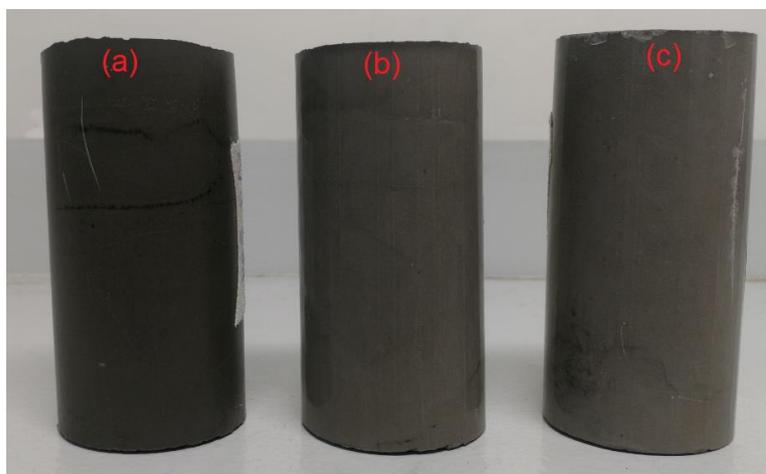


Figura 34: Comparação da coloração dos corpos de prova em relação ao tempo de cura. a) 1 dia; b) 7 dias e c) 14 dias.

No dia combinado para o transporte dos CPs do CEFET para o laboratório da PUC, foi observado que o corpo sem fibra com 14 dias de cura possuía uma rachadura, como destacado na Figura 35. O motivo é desconhecido, pois os cuidados devidos foram tomados e essa falha não se encontrava no material nos dias anteriores.

Antes da realização dos ensaios de compressão, foi necessário que as bases do corpo de prova tivessem suas superfícies regularizadas, buscando manter um alinhamento, diminuindo as imperfeições e tornando as bases planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova. Para isso, foi utilizada uma retífica faceadora da Setor Indústria, disponibilizada pelo Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-RIO, mostrada na Figura 36.



Figura 35: Rachadura destacada no CP-0F14D.



Figura 36: Retífica faceadora utilizada na regularização dos corpos de prova.

O procedimento consiste primeiramente no posicionamento do corpo de prova e logo após acontece o travamento pneumático do próprio, que segura os CPs em posição sem danificá-los. Foi requerido o auxílio de outro CP (utilizado o CP de teste) e um gabarito de madeira para facilitar a fixação, como mostra a Figura 37.



Figura 37: Fixação do corpo de prova no equipamento de retificação.

Após a fixação, há a refrigeração do disco e do CP com água, evitando o atrito e facilitando no corte que é realizado em sequência. Desse modo, é removida uma fina camada de material das bases, promovendo uma superfície lisa e sem ondulações. A Figura 38 apresenta a base de um CP após faceamento.



Figura 38: Base de um corpo de prova após retificação.

Entretanto, durante o faceamento do CP-0F14D, por causa da falha destacada na Figura 35, o corpo se rompeu completamente, não havendo possibilidade da realização do ensaio com o mesmo.

3.3 REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaios universais MTS modelo 311.11 (Figura 39) com capacidade de carga de 1000 kN, disponibilizada no laboratório LEM da PUC-RIO, respeitando as normas da NBR 5739, que aborda esse tipo de ensaio em CP cilíndrico.

Como mostra a Figura 40, o corpo de prova foi centralizado no prato inferior com o auxílio do círculo concêntrico de referência e em seguida, uma rótula esférica foi posicionada no prato superior, acima do CP. Dessa maneira, é possível prosseguir com a realização do ensaio.



Figura 39: Máquina de ensaios universais MTS.



Figura 40: Corpo de Prova posicionado na máquina de ensaio.

O ensaio foi executado utilizando uma velocidade de 0,2 mm/min e terminado algum tempo depois da tensão máxima de ruptura obtida. Durante sua realização, dados de carga suportada e deslocamento são obtidos para posterior análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão realizados na PUC-RIO serão expostos e discutidos neste capítulo. Como citado anteriormente, o material utilizado no trabalho foi desenvolvido com base em diferentes tempos de cura e quantidades de fibra.

Os ensaios foram realizados a fim de se analisar a carga máxima suportada pelos corpos de prova com relação ao deslocamento exercido pela máquina. Com o resultado obtido no ensaio, é possível calcular a tensão máxima suportada pelo material utilizando as Equações 4 e 5 citadas no item 2.5.

Nas Tabelas 6, 7 e 8 a seguir estão demonstrados os valores de carga máxima (F em kN) obtidos no ensaio de compressão e a tensão máxima (f_c) calculada para os corpos de prova sem fibra, com 1% e com 2% de volume de material em fibra de juta, respectivamente. Os valores de deformação real (ϵ) foram obtidos utilizando-se as Equações 6 e 7 do item 2.5. Podem ser observados os valores para deformação real inicial até o ponto de tensão máxima (ϵ_i), a deformação real do corpo até o momento de ruptura (ϵ_r) e a razão entre estes valores (ϵ_i / ϵ_r) e a média ($M \epsilon_i / \epsilon_r$).

Tabela 6 - Resultados do geopolímero sem fibra.

| Sem Fibra | | | | | | | |
|------------------|----------------------|---------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| CP | Tempo de cura | F (kN) | f_c (MPa) | ϵ_i (%) | ϵ_r (%) | ϵ_i / ϵ_r (%) | M ϵ_i / ϵ_r |
| CP-0F1D | 1 | 17,84 | 9,86 | 1,15 | 1,38 | 83,61 | |
| CP-0F7D | 7 | 19,59 | 10,82 | 1,42 | 1,51 | 94,18 | 88,90 |
| CP-0F14D | 14 | - | - | - | - | - | |

Tabela 7 - Resultados do compósito de geopolímero com 1% de fibra.

| 1% de fibra | | | | | | | |
|--------------------|----------------------|---------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| CP | Tempo de cura | F (kN) | f_c (MPa) | ϵ_i (%) | ϵ_r (%) | ϵ_i / ϵ_r (%) | M ϵ_i / ϵ_r |
| CP-1F1D | 1 | 34,02 | 18,80 | 1,54 | 2,13 | 72,16 | |
| CP-1F7D | 7 | 47,59 | 26,30 | 1,17 | 1,64 | 71,43 | 74,48 |
| CP-1F14D | 14 | 53,99 | 29,84 | 0,95 | 1,18 | 79,84 | |

Tabela 8 - Resultados do compósito de geopolímero com 2% de fibra.

| 2% de fibra | | | | | | | |
|-------------|---------------|--------|----------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| CP | Tempo de cura | F (kN) | fc (MPa) | ϵ_i (%) | ϵ_r (%) | ϵ_i / ϵ_r (%) | M ϵ_i / ϵ_r |
| CP-2F1D | 1 | 44,15 | 24,40 | 1,12 | 1,69 | 65,94 | |
| CP-2F7D | 7 | 52,89 | 29,23 | 1,04 | 1,99 | 52,34 | 60,64 |
| CP-2F14D | 14 | 48,69 | 26,91 | 1,07 | 1,69 | 63,65 | |

Os gráficos apresentados nas Figuras 41, 43 e 45 representam uma comparação dos resultados obtidos no ensaio de compressão em relação às variáveis de porcentagem volumétrica de fibra e tempo de cura. Nas Figuras 42, 44 e 46 pode-se observar o estado dos corpos de prova após a realização dos ensaios.

Os resultados obtidos no ensaio para os corpos com 1 dia de cura podem ser verificados na Figura 41. No gráfico, é possível observar as vantagens obtidas através da inserção da fibra de juta na matriz geopolimérica. Os corpos com fibra apresentaram maior capacidade de deformação antes de seu rompimento, como era esperado.

No entanto, é possível observar que a carga exigida para a falha do material aumentou consideravelmente com o aumento da quantidade de fibras, ao contrário do observado em outros trabalhos, como o de PIKANÇO e GHAVAMI (2008), que demonstra que a inserção de fibras de juta em um material cimentício a base de argamassa reduziu sua resistência à compressão e de FRAYYEH, Q. e SWAIF (2018), mostrando que a adição de fibras de carbono acima de 1% da mistura também começou a apresentar redução na resistência à compressão.

Apesar do CP-2F1D ter suportado uma carga superior, é possível notar que o CP-1F1D apresentou uma deformação maior do que os outros, com $\epsilon_r = 2,13\%$. É possível que esse comportamento possa ser atribuído a uma melhor distribuição das fibras na matriz geopolimérica. O CP-0F1D alcançou não apenas a menor resistência, mas também a menor taxa de deformação.

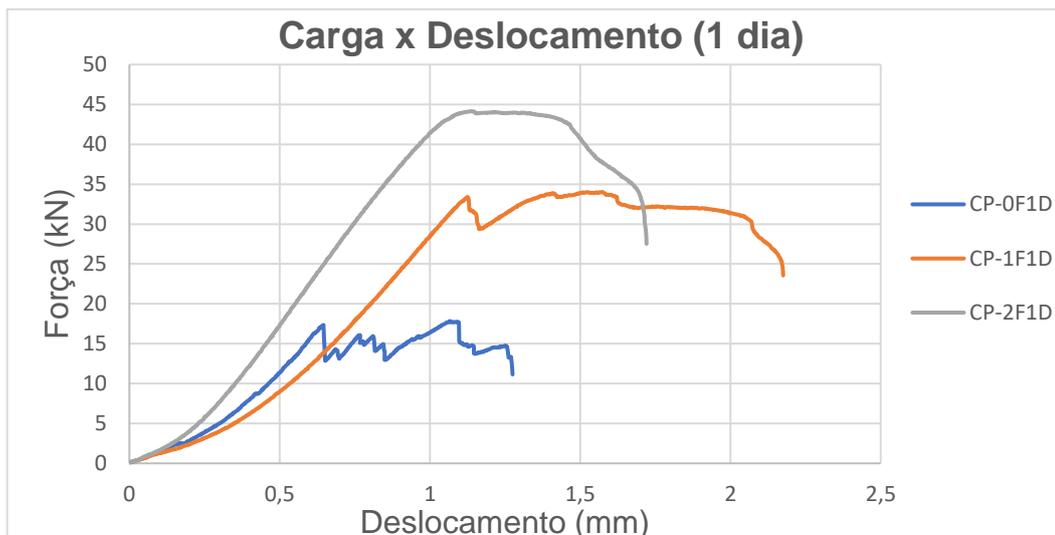


Figura 41: Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 1 dia de cura.

O estado dos corpos de prova com 1 dia de cura após o ensaio de compressão pode ser notado na Figura 42 a seguir. Nota-se que em virtude da ausência da fibra no corpo de prova, o CP-0F1D, ao ser submetido ao ensaio e pouco tempo após alcançar o limite de carga suportada, perdeu grande parte de seu material, comportamento que corresponde a ausência de fibras que possam segurar o material. No caso dos corpos com fibra, eles mantiveram boa parte de sua forma original.



Figura 42: CPs de 1 dia após o ensaio de compressão.

Para os corpos com 7 dias de idade, os resultados obtidos no ensaio podem ser observados na Figura 43. O CP-0F7D apresentou comportamento semelhante com o observado no CP-0F1D, com um aumento pequeno de sua resistência, mas sendo perceptível a ocorrência da fissuração na estrutura do corpo logo após alcançar a carga máxima.

No entanto, diferentemente do gráfico anterior, o CP-2F7D apresentou maior capacidade de deformação final em relação ao CP-1F7D, com uma deformação de $\epsilon_r = 1,99\%$, o que mostra, provavelmente, a eficiência da fibra de juta para suportar os esforços por mais tempo. Ambos os corpos com fibra continuam apresentando melhor taxa de deformação e maior resistência a compressão, e continuam resistindo as cargas aplicadas após a fissuração ocorrida depois de alcançado o limite da estrutura.

Com relação ao estado após a realização do ensaio nos corpos de 7 dias, pode-se notar uma reação da estrutura semelhante aos corpos de 1 dia. É notável que as fibras da juta são responsáveis pela retardação da propagação das fissuras ao longo dos corpos de prova. Os estados dos corpos CP-0F7D, CP-1F7D e CP-2F7D logo após a realização do ensaio podem ser observados na Figura 44.

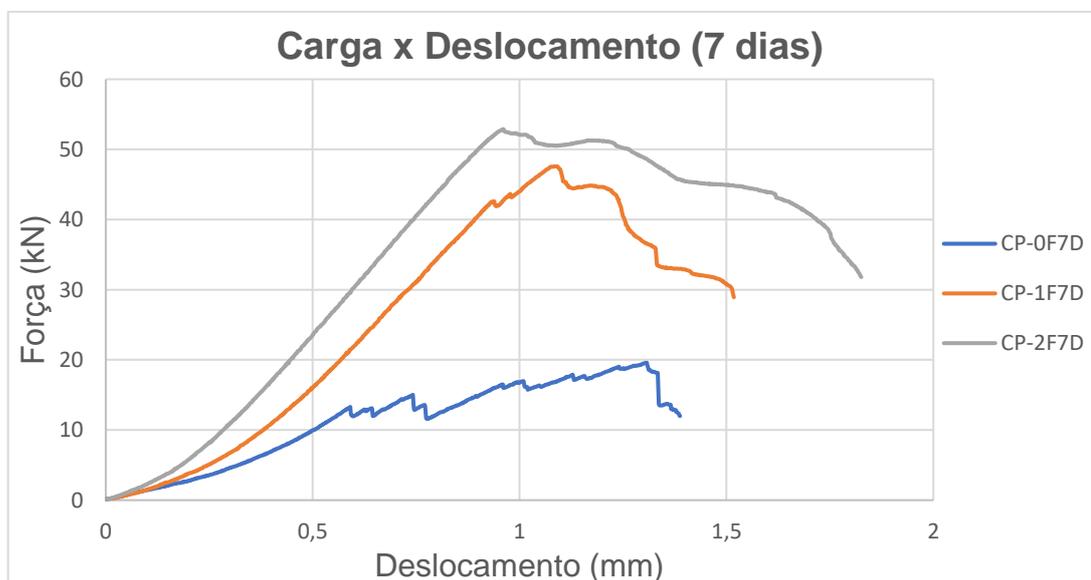


Figura 43: Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 7 dias de cura.



Figura 44: CPs de 7 dias após o ensaio de compressão.

Por fim, a Figura 45 apresenta os dados dos ensaios dos corpos com 14 dias de cura, com exceção do CP-0F14D, que conforme dito no item 3.2 apresentava uma rachadura significativa e provavelmente por isso, no momento da retificação o próprio se desfez e não foi possível realizar o ensaio.

Analisando os CPs restantes, percebemos que a carga máxima suportada foi maior no CP-1F14D, diferentemente dos ensaios anteriores. Isso deve-se provavelmente ao fato de que, no CP-2F14D, a adição de maior quantidade de fibras ocasionou uma pior compactação da mistura, facilitando o acúmulo de ar na mistura e promovendo um número maior de defeitos, como citado anteriormente e observado na Figura 33, na qual mostra a formação de um grande poro. Foi justamente nessa imperfeição em que a fissuração começou a ocorrer, como pode ser notado na Figura 46.

Apesar disso, o maior volume de fibras se mostrou mais eficiente na capacidade de deformação, como observado também nos corpos de 7 dias. Outra observação sobre o CP-1F14D é que ele foi o corpo com a menor taxa de deformação e o menor deslocamento dentre os corpos testados, com $\epsilon_r = 1,18\%$. É possível que essa característica seja devida as fibras se desprenderem da matriz após o início da fissuração ocorrida ao atingir a tensão máxima suportada pelo compósito.

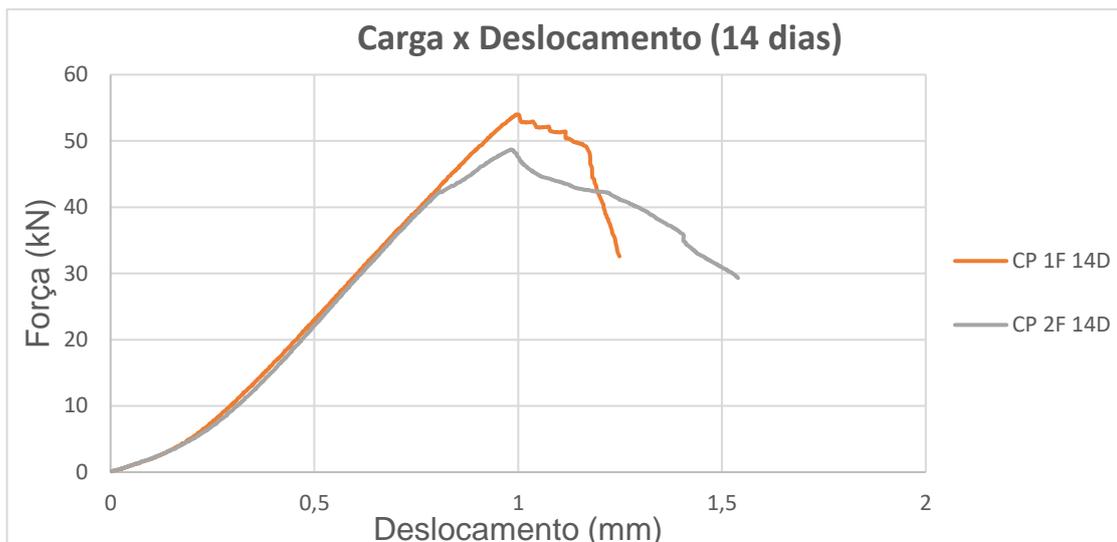


Figura 45: Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 14 dias de cura.



Figura 46: CPs de 14 dias após o ensaio de compressão.

No geral, considerando-se a razão dos valores de deformações ϵ_i e ϵ_r apresentados anteriormente nas tabelas 6, 7 e 8 pode-se observar que as os corpos contento maior volume de fibra foram realmente capazes de suportar a carga por mais tempo. Os corpos com 2% de fibra apresentaram os melhores resultados, demonstrando que eles alcançaram apenas de 52% a 66% de sua deformação final ao atingir a tensão máxima. Isso condiz com o que se era esperado, considerando

que os corpos sem fibra demonstraram ter a menor razão de deformação, com valores de 83% e 94%.

Pelo gráfico da Figura 47, é possível notar que os materiais com 1% e 2% de fibra adquiriram em 1 dia de cura cerca de 60,0% e 83,5%, respectivamente, de sua resistência máxima encontrada com uma maior idade. Isso comprova a qualidade do compósito geopolimérico em adquirir grande resistência inicial mesmo com a inserção de fibras de juta.

Apesar do material sem fibras não ter apresentado grande resistência, mostrando certa fragilidade, sua porcentagem de resistência inicial comparada com a encontrada em 7 dias de cura foi 91,13%, o que era esperado de acordo com o que foi citado no item 2.1.2.

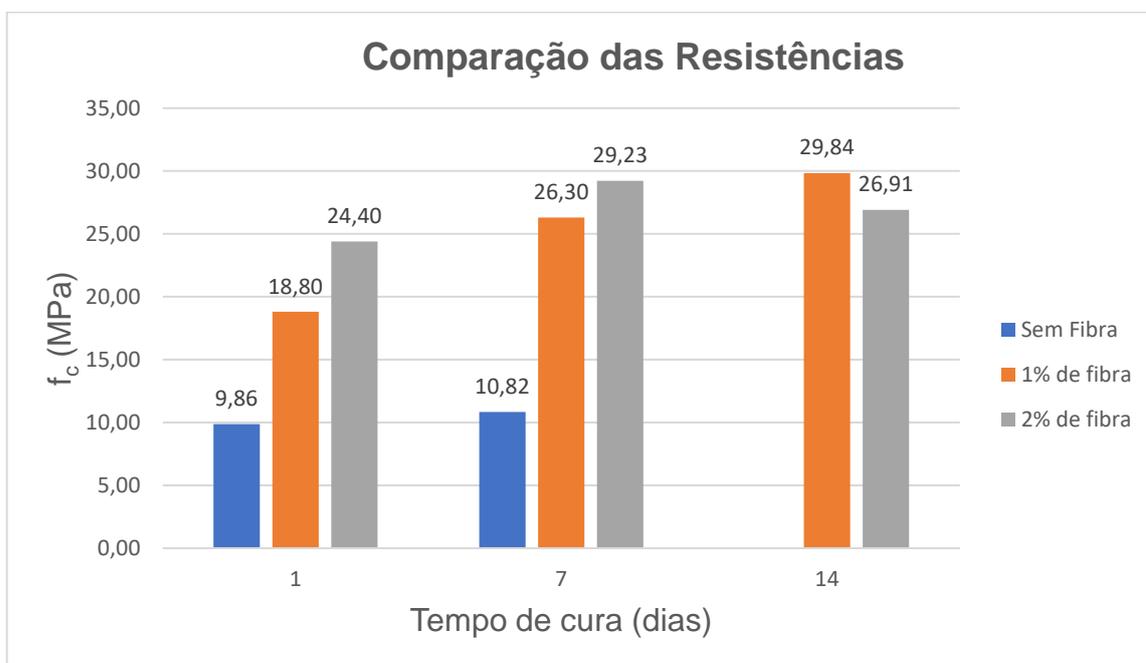


Figura 47: Comparação dos resultados de Tensão de Compressão x Tempo de cura dos corpos de prova.

5 CONCLUSÃO

Nota-se que a inserção de fibras de juta nos compósitos geopoliméricos trouxe um aumento de pelo menos 90%, como visto nos corpos curados em 1 dia, da resistência à compressão em relação aos compósitos sem fibra analisados e uma boa resistência à deformação inicial, antes de alcançar a força máxima, diminuindo a fragilidade do material.

Baseando-se nas razões entre a deformação inicial e a deformação final real, ϵ_i / ϵ_r , para cada volume de fibra, notou-se que a média dos valores foi de aproximadamente 89% para os corpos sem fibra, 74% para os corpos com 1% de volume de fibra e 61% para os corpos com 2% de fibra.

Além disso, as fibras foram capazes melhorar a ductilidade do compósito geopolimérico, permitindo um aumento na sua capacidade de sofrer deformações e resistir a cargas compressivas após a ocorrência de fissurações, algo que não ocorre no material sem fibra.

Acredita-se que a zona de fragilidade encontrada no CP-2F14D tenha ocorrido por uma concentração desbalanceada de fibras no interior do corpo de prova, o que afetou negativamente a resistência máxima encontrada.

Portanto, analisando todos esses fatores, é possível dizer que houve uma boa compatibilidade entre fibra e matriz, já que o material apresentou visualmente que suportou bem aos esforços, mantendo boa parte de sua forma, além de adquirir melhores ganhos de resistência e deformação de acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nos conhecimentos adquiridos durante as pesquisas e consultas aos trabalhos antigos necessários para a conclusão deste trabalho, como sugestão de trabalhos futuros recomenda-se:

- Realizar a análise do ensaio de compressão com compósito geopolimérico reforçado com outro tipo de fibra.
- Comparação da resistência a compressão do geopolímero com 1 ou 2% de volume e diferentes tamanhos de fibra.
- Análise das propriedades do geopolímero baseado na influência da temperatura no processo de cura.
- Comparação das propriedades do geopolímero com adição de agregados.

REFERÊNCIAS

- ABREU, R. e OLIVEIRA, H. **Concreto Reforçado com Fibras: Aperfeiçoamento das Propriedades Físicas e Mecânicas**. Seminário Científico da FACIG. Minas Gerais, 2005.
- ALAM, M.M.; MANIRUZZAMAN, M. e MORSHED, M.M. **Application and Advances in Microprocessing of Natural Fiber (Jute)–Based Composites**. In Hashmi, S., Batalha, G.F., Tyne, C.J.V. & Yilbas, B. (Eds.), *Comprehensive Materials Processing*. Amsterdam, Netherlands, pp. 243–260, 2014.
- ALVES, L.C.S. **Geopolímero à Base de Metaculim com Adição de Fibras de Sisal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- AZADI, P.; INDERWILDI, O.R.; FARNOOD, R. e KING, D.A. **Liquid fuels, hydrogen and chemicals from lignin: A critical review**. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 21, 2013.
- BENTUR, A. e MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. CRC Press, 2007.

BHATTACHARYYA, D.; SUBASINGHE, A. e KIM, N.K. **Natural Fibers: Their composites and flammability characterizations in Multi Funcionality of Polymer Composites**. K. Friedrich and U. Breuer (eds.), William Andrew Publishing, Oxford. Reino Unido, 2015.

BIGNO, I. C. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agro-industriais**. 280f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

BORGES, P. H. R. *et. al.* **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, v. 14, n. 2, p. 153-168, 2014.

CALLISTER, W. D. e RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of materials science and engineering**. [S.I.]: Wiley, 2013.

DAVIDOVITS J. **Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials**. Journal of Thermal Analysis, Vol. 37, p. 1633-1656. França, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Properties of Geopolymer Cements**. Geopolymer Institute, Alkaline Cements and Concretes. Ucrânia, 1994.

DAVIDOVITS, J. **Chemistry of geopolymeric systems, terminology**. In: Geopolymer. p. 9-39. 1999.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications**. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, p.1-9. Saint-Quentin. França, 2002.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement a review**, publicado em Geopolymer Science and Technics, Technical Paper #21, Geopolymer Institute Library, 2013. Disponível em: <www.geopolymer.org>. Acesso em 28 agosto 2019.

DEFOIRD, N. *et. al.* **Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre**. Composites: Part A, 41, 588-595, 2010.

DIAS N. A. A. **Geopolímeros: Contributos Para A Redução das Eflorescências**. Universidade do Minho. Portugal, 2010.

DUXSON, P. *et. al.* **Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties**, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 269, 47-58. 2005.

DUXSON, P. *et. al.* **Geopolymer technology: the current state of the art**. Journal of Materials Science, 42:2917-2933. Austrália, 2006.

ERNESTO DE SOUZA, 2010. Fotos das jutas. Disponível em: < <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI183007-18283,00-GENTE+DE+FIBRA.html>>. Acesso em: 15 setembro 2019.

FARUK O. *et al.* **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010**. Prog Polym Sci 37:1552–1596, 2012.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Têxteis Reforçados com Fibras de Juta**. Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2014.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de Aço**. p. 69 Boletim Técnico, Série BT/PCC/260– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

FRAYYEH, Q. e SWAIF, A. **Mechanical properties of fly ash geopolymer mortar reinforced with carbon fibers**. MATEC Web Conf. vol. 162, artigo 02028, 2018. Disponível em: < https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2018/21/matecconf_bcee32018_02028/matecconf_bcee32018_02028.html > Acesso em: 28 outubro 2019.

Geopol - Cimento Geopolimérico. Gráfico temperatura. Disponível em: < <http://www.geopolymer.com.br/PDF/cpxgp.pdf> >. Acesso em: 5 agosto 2019.

Geopol – Cimento Geopolimérico. Índice de retração. Disponível em: < http://www.geopolymer.com.br/PDF/FT_CIM_GP.pdf >. Acesso em: 2 agosto 2019.

GIANNOPOULOU, I. e PANIAS, D. **Structure, Design and Applications of Geopolymeric Materials**. Proceedings of the 3rd International Conference on Deformation Processing and Structure of Materials. Sérvia, 2007.

GLASBY, T. *et. al.* **EFC Geopolymer Concrete Aircraft Pavements at Brisbane West Wellcamp Airport**. In: 2015 RILEM Week and Concrete 2015 in Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia, 27., Melbourne. Anais. Melbourne: The Pullman Hotel, 2015.

HE, P. *et. al.* **Effects of Si/ Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer**. Ceram. Int. 42, 14416–14422, 2016.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. Pearson Prentice Hall, 2006.

HILL, C. e HUGHES, M. Natural **Fibre Reinforced Composites Opportunities and Challenges**. *Jornal de Biomateriais e Bioenergia*. vol. 4. p 148-158, 2010.

HOMMA, A. K. O. **A imigração japonesa na Amazônia: sua contribuição ao desenvolvimento agrícola**. Alfredo Kingo Oyama Homma. – ed. 2 – Brasília, DF: Embrapa, 2016.

HULL, D.; **An Introduction to Composite Materials**. Cambridge Univ. Press Cambridge, ed. 2. Reino Unido, 1996.

JOHN, M.J. e ANANDJIWALA, R.D. **Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites**. *Polymer Composites*, vol. 29, p. 187-207, 2008.

KELLY, A. e TYSON, W.R. **Fiber Strengthened Materials**. In: Zackay, V.F., Ed., *High Strength Materials*, John Wiley & Sons Inc. Nova York, 1965.

KHATIB, J. M.; BAALBAKI, O. e ELKORDI, A. A. **Metakaolin. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete.** p. 493–511. 2018.

KRIVENKO, P.V.; SHI, C. e ROY, D. **Alkali-Activated Cements and Concretes.** Taylor & Francis. Estados Unidos. 2006.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina.** 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia.** São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

MEHTA, A. e SIDDIQUE, R. **Strength, permeability and micro-structural characteristics of low-calcium fly ash based geopolymers.** Construction and Building Materials. 141: 325–334, 2017.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. L. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.** McGraw-Hill Publishing, Ed. 3. Estados Unidos, 2006.

MOE T. e KIN L., **Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites,** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33:43-52. 2002.

MUSIL, S. e KRIVEN, W. **In Situ Mechanical Properties of Chamotte Particulate Reinforced, Potassium Geopolymer.** Journal of the American Ceramic Society, v. 97, n. 3, p. 907-915, 2014.

NOGUEIRA, A.S. **Estudo da adesão de fibras de vidro e de carbono incorporadas a compósitos de matriz geopolimérica.** Rio de Janeiro, 2018.

PANIAS, D. e GIANNOPOULOU, I. **Geopolymers: a new generation of inorganic polymeric novel materials**. National Technical University of Athens, Proc. of 1 st International Conference on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology, AMIREG, 2004.

PARK, S. e POUR-GHAZ, M. **What is the role of water in the geopolymerization of metakaolin?** Construction and Building Materials, 182, 360–370, 2018.

PICANÇO, M.S. e GHAVAMI, K. **Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia**. REM: R. Esc. Minas, Ouro preto. vol. 61, n. 1, p. 13-18. Ouro Preto, 2008.

PROVIS, J. L. et. al. **Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications**. Elsevier. 2009.

PROVIS, J. L. **Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?** Materials and Structures. v. 47, n. 1-2, p. 11-25, Jan. 2014.

PROVIS, J.L. e VAN DEVENTER, J.S.J., **Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report**, RILEM TC 224-AAM, RILEM State-of-the-Art Reports 13. 2014.

SAHEB, D.N. e JOG, J.P. **Natural Fiber Polymer Composites: A Review**. Advances in Polymer Technology. John Wiley & Sons, v. 18, n. 4, p.351-363, 1999.

SCHWARTZ, M. M. **Composite materials handbook**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1984.

TENÓRIO, J.A.S. et. al. **Decomposição da fase majoritária do cimento Portland - Parte II: alita com adições de Fe e Al**. REM: Rev. Esc. Minas [online]. vol. 56, n. 2, p. 113-117. Ouro Preto, 2003.

The Chronicle 29 Set. 2014. Figura do Aeroporto BWWA. Disponível em: <<https://www.thechronicle.com.au/news/build-it-and-they-will-come/2401983/#/54>>. Acesso em: 2 setembro 2019.

TRINDADE, A.C.C. **Desenvolvimento e comportamento mecânico de compósitos geopoliméricos têxteis reforçados com fibra de juta**. Rio de Janeiro, 2017.

VICKERS, L. *et. al.* **Fire resistant geopolymers: role of fibres and fillers to enhance thermal properties**. Springer, 2015.

YOUNG, R. e LOVELL, P. **Introduction to Polymers**. 3rd Edition, Boca Raton, 2011.

ZHANG H. **Building Materials in Civil Engineering**. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. p. 46-80. 2011.

ZIMMERMANN, T.; POHLER, E. e GEIGER, T, **Cellulose Fibrils for Polymer Reinforcement**, Advanced Engineering Materials, v. 6, p. 754-761, 2004.

ZOLLIN, Ivan. **Ensaio mecânicos e análises de falhas**. Santa Maria, 2011.