

Manuela Hoffmann Menger

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS
CONTENDO CIMENTO ÁLCALI-AATIVADO E MICROFIBRAS
METÁLICAS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Fernando Pelisser

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Menger, Manuela Hoffmann

Comportamento mecânico de compósitos contendo
cimento álcali-ativado e microfibras metálicas /
Manuela Hoffmann Menger ; orientador, Fernando
Pelisser, 2018.

101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Cimento álcali-ativado.
3. Microfibras metálicas. 4. Resíduo Cerâmico. 5.
Tenacidade. I. Pelisser, Fernando. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

Manuela Hoffmann Menger

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS
CONTENDO CIMENTO ÁLCALI-AATIVADO E MICROFIBRAS
METÁLICAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de
“Mestre em Engenharia Civil” e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 27 de Março de 2018.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Júnior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Adriano Michael Bernardin, Dr.
Universidade do Extremo Sul Catarinense

À Deus e a meus pais, a base de tudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, o agradecimento Àquele que tornou e torna todos os sonhos possíveis, que é a base e o guia de tudo: muito obrigada, Deus!

Ao professor Doutor Fernando Pelisser, que me permitiu iniciar a pesquisa na graduação ainda, por toda paciência, empenho e sentido prático que sempre me orientou, sendo imprescindível e incansável nesse processo.

Aos professores Philippe Jean Paul Gleize, Luiz Roberto Prudêncio Júnior e Adriano Michael Bernardin, pelas contribuições na banca e durante todo o trabalho. Aos funcionários do departamento da Pós Graduação e do laboratório de Materiais de Construção Civil, Mari, Pri, Renato e Luiz Henrique, sempre tão solícitos.

À minha família, em especial aos meus pais Ézio e Margarete, que nunca mediram esforços para apoiar meus sonhos, me dando liberdade e a certeza de que sempre serão meu porto seguro, amo demais vocês. À minha querida sobrinha Maria Luiza e meus irmãos Gabriela e Gabriel, pelos finais de semana impagáveis que aliviavam a saudade de morar longe.

Aos meus colegas da universidade que se tornaram amigos especiais: Cândida, Camila, Leili, Régis, Mariana, Eduardo, Ariane, André, Luís.

Aos colegas de sala e laboratório, pelas conversas e aprendizados trocados: André, Lucas, Carol, César, Giovanni, Madeleine e Zé. Em especial elas, que além de colegas de sala se tornaram amigas especiais pelas quais tenho um enorme carinho: Nágilla, Vanessa e Paula.

À eles, os quais tenho prazer de chamar de amigos, que dividiram além de dúvidas do mestrado, angústias, frustrações, pensamentos e principalmente, fé: Geisiele, Geannina e Alex.

As minhas amigas de sempre, que mesmo distantes sempre estiveram presentes: Luiza, Géssica, Taís, Dayani e Quelen. As minhas amigas de graduação, que me acompanham até hoje: Letícia, Bruna e Marília.

Por último, agradeço à UFSC, NanoTec-Lab, LMCC, FAPESC, CNPq, Capes e PPGEC, pelo espaço para realizar tal trabalho e apoio financeiro.

Muitas pessoas foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho, mesmo que por algum motivo não foram citadas, meu muito obrigada!

“Não fui Eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”
(Josué, 1:9)

RESUMO

O grande avanço tecnológico e a preocupação com sustentabilidade e meio ambiente vêm promovendo a pesquisa para desenvolvimento de novos cimentos produzidos de várias matérias-primas diferentes. Os geopolímeros são uma alternativa, sendo materiais produzidos com baixo impacto ambiental e propriedades mecânicas satisfatórias, que podem ser melhoradas com a adição de microfibras metálicas, que propiciam ao material uma maior resistência à tração. Nesta pesquisa, foi avaliada a influência da adição de microfibras metálicas em uma matriz de geopolímero, composta por metacaulim e resíduo do polimento de placas cerâmicas, utilizando como ativadores alcalinos silicato de sódio e hidróxido de sódio. Foram produzidas pastas com três teores de microfibras (5%, 10% e 15% em massa de aglomerante), e três traços de argamassa (1:2, 1:3 e 1:4, - aglomerante:areia, em massa) com três concentrações de microfibras (10%, 20% e 30%, em massa de aglomerante), que foram comparadas as amostras de referência sem adição de microfibras. As propriedades mecânicas foram avaliadas através de ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, tenacidade e módulo de elasticidade, além da microestrutura da zona de transição microfibra-pasta. As propriedades mecânicas classificam o cimento geopolimérico como de alta resistência, atingindo até 95 MPa de resistência à compressão aos 28 dias (referência com 68 MPa). Foi observada uma melhora da resistência à flexão com o aumento da concentração de microfibras metálicas, atingindo 20 MPa com o teor de 30% no traço 1:3, com acréscimo de 104% quando comparado à referência (9,7 MPa), com maior resistência após fissuração e melhora na tenacidade. Foi observada melhora do desempenho pós pico de fissuração e capacidade de absorção de tensões na propagação de fissuras. O concreto com adição de 20% de microfibras metálicas, apresentou o melhor desempenho mecânico.

Palavras-chave: Cimento álcali-ativado; Microfibras metálicas; propriedades mecânicas; resíduo cerâmico, tenacidade.

ABSTRACT

The great technological advance and the concern with sustainability and the environment have been promoting research for the development of new cements produced from several different raw materials. Geopolymers are an alternative, being materials produced with low environmental impact and satisfactory mechanical properties, which can be improved with the addition of metallic microfibers, which provide the material with a higher tensile strength. In this research, the influence of the addition of metallic microfibers in a geopolymer matrix, composed of metakaolin and ceramic plaque polishing residue, was evaluated using alkali activators sodium silicate and sodium hydroxide. Slurries with three microfiber contents (5%, 10% and 15% by weight of binder) were produced, and three traces of mortar (1: 2, 1: 3 and 1: 4, - binder: sand, by mass) with three concentrations of microfibers (10%, 20% and 30%, by mass of binder), which were compared to reference samples without addition of microfibers. The mechanical properties were evaluated through tests of compressive strength, flexural tensile strength, toughness and modulus of elasticity, as well as the microstructure of the microfiber-paste transition zone. The mechanical properties classify the geopolymer cement as high strength, reaching up to 95 MPa of compressive strength at 28 days (reference with 68 MPa). An improvement of the flexural strength was observed with the increase of the metal microfiber concentration, reaching 20 MPa with the content of 30% in the 1: 3 trace, with an increase of 104% when compared to the reference (9.7 MPa), with higher resistance after cracking and improvement in toughness. Improved post-peak crack performance and strain-absorbing capacity were observed in crack propagation. The concrete with the addition of 20% of metallic microfibres presented the best mechanical performance.

Keywords: Alkali-activated cement; Metal microfibers; mechanical properties; ceramic residue, tenacity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do arranjo espacial da estrutura do cimento álcali-ativado.....	31
Figura 2: Estrutura cristalina da argila caulinitica.....	32
Figura 3: Reação de desidroxilação na transformação do caulim e metacaulim.....	33
Figura 4: Mecanismo de reação de cimentos álcali-ativados.....	36
Figura 5: Modelo experimental adotado.....	52
Figura 6: Microfibras utilizadas.....	54
Figura 7: MEV mostrando superfície da microfibras.....	54
Figura 8: Amostra posicionada para ensaio de flexão.....	58
Figura 9: Amostra posicionada para ensaio de compressão.....	59
Figura 10: Curva carga x deslocamento da ASTM C 1018.....	60
Figura 11: Curva Granulométrica do metacaulim.....	63
Figura 12: DRX da amostra de Metacaulim.....	64
Figura 13: Espalhamento das pastas no estado fresco.....	65
Figura 14: Resistência à compressão das pastas.....	66
Figura 15: Resistência à flexão das pastas.....	67
Figura 16: Ensaio de <i>flowtable</i> em argamassa (1:4) com 30% de microfibras.....	68
Figura 17: Resistência à compressão das argamassas.....	69
Figura 18: Módulo de Elasticidade Dinâmico das argamassas.....	70
Figura 19: Resistência à Flexão <i>versus</i> Deslocamento das argamassas do traço 1:2.....	71
Figura 20: Resistência à Flexão <i>versus</i> Deslocamento das argamassas do traço 1:3.....	72
Figura 21: Resistência à Flexão <i>versus</i> Deslocamento das argamassas do traço 1:4.....	73
Figura 22: Comparativo das resistências à flexão das argamassas.....	74
Figura 23: Amostra com 30% de microfibras depois de rompida.....	75
Figura 24: Amostra de referência depois de rompida.....	76
Figura 25: Curva Média Resistência à Flexão <i>versus</i> Deslocamento traço 1:2.....	76
Figura 26: Curva Média Resistência à Flexão <i>versus</i> Deslocamento traço 1:3.....	77
Figura 27: Curva Média Resistência à Flexão <i>versus</i> Deslocamento traço 1:4.....	77
Figura 28: Microscopia eletrônica de varredura da interface microfibras-pasta.....	80
Figura 29: MEV da interface fibra/matriz.....	80

Figura 30: Microscopia eletrônica de varredura da sessão transversal da microfibrã e zona de transiçãõ.	81
Figura 31: Massa específica das argamassas	82
Figura 32: Absorçãõ de água nas argamassas	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Razões molares propostas por Davidovits e desenvolvidas por outros pesquisadores.	39
Tabela 2: Composição química do RPP.	53
Tabela 3: Granulometria do RPP.	53
Tabela 4: Propriedades químicas do silicato de sódio.	53
Tabela 5: Propriedades químicas do Metacaulim.	63
Tabela 6: ANOVA para os resultados de resistência à compressão.	69
Tabela 7: ANOVA para os resultados de módulo de elasticidade.	71
Tabela 8: Variação nas resistências à flexão nos três traços de argamassa.	73
Tabela 9: ANOVA para os resultados de resistência à flexão.	75
Tabela 10: Cálculo dos índices de tenacidade.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al: Alumínio

ASTM: *American Society For Testing Materials*

CAA: Cimento Alkali-Ativado

CO₂: Dióxido de carbono ou gás carbônico

CP: Cimento Portland

DRX: Difração de raios X

Hz: *Hertz*

K: Potássio

K⁺: Cátion de potássio

KOH: Hidróxido de Potássio

MK: Metacaulim

Na: Sódio

Na⁺: Cátion de sódio

NaOH: Hidróxido de sódio

RPP: Resíduo do Polimento de Porcelanato.

Si: Silício

SS: Silicato de sódio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVOS	28
1.2	Estrutura da dissertação.....	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS	31
2.1.1	Materiais precursores	32
2.1.2	Ativação Alcalina	33
2.1.2.1	Mecanismo de Ativação Alcalina e Polimerização	35
2.1.3	Relações de Óxidos	37
2.1.3.1	Cura.....	40
2.1.4	Composições em Cimentos Álcali-Ativados	40
2.1.5	Propriedades dos cimentos álcali-ativados	42
2.2	Adição de fibras e Microfibras no geopolímero.....	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	MATERIAIS	52
3.1.1	Metacaulim	52
3.1.2	Resíduo do polimento de placas cerâmicas	52
3.1.3	Ativadores alcalinos	53
3.1.4	Microfibras metálicas	53
3.1.5	Areia	54
3.2	Procedimento de Mistura	55
3.3	Caracterização	55
3.3.1	Consistência	55
3.3.2	Difração de Raios X	55
3.3.3	Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica . 56	
3.3.4	Resistência à compressão nas amostras cilíndricas	56
3.3.5	Módulo de Elasticidade Dinâmico	56
3.3.6	Resistência à Tração na flexão	58

3.3.7	Resistência à compressão nas amostras prismáticas.....	58
3.3.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	59
3.3.9	Tenacidade.....	59
3.3.10	Análise Estatística dos Resultados.....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	Caracterização do Metacaulim.....	63
4.2	Pastas com Microfibras Metálicas	64
4.3	Argamassas com Microfibras Metálicas	67
4.3.1	Consistência.....	67
4.3.2	Resistência à compressão	68
4.3.3	Módulo de Elasticidade Dinâmico	70
4.3.4	Resistência à tração na flexão	71
1.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	80
1.2.2	Absorção de Água e Massa Específica	81
5	CONCLUSÕES	85
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por concretos de alta eficiência, baixo custo e reduzido impacto ambiental, principalmente quando comparados aos concretos convencionais produzidos com cimento Portland, tem promovido o desenvolvimento de materiais cimentícios sem clínquer, dentre os quais estão incluídos os cimentos geopoliméricos, também denominados álcali-ativados (CAA), cuja utilização pode contribuir para redução das emissões de CO₂ em projetos de construção (PROVIS, 2013). O estudo de cimentos álcali-ativados é um tema ativo e em rápido desenvolvimento pela comunidade de pesquisa mundial (PROVIS, PALOMO e SHI, 2015).

O estudo de CAA pode ser considerado como uma área de pesquisa desafiadora e com potencial de grande impacto econômico e ambiental. Este cimento pode ser produzido utilizando uma grande variedade de matérias-primas (PROVIS, PALOMO e SHI, 2015), pois não necessitam de materiais com elevado grau de pureza e uniformidade; com custo competitivo, e com reduzido gasto de energia e baixa emissão de dióxido de carbono (CO₂), podendo atingir até 80% de redução de emissões de CO₂ – comparados ao cimento Portland –, para geopolímeros produzidos a partir de cinza volante, escórias de alto forno e pozolanas naturais (VAN DEVENTER et al. 2012). Embora alguns estudos recentes, considerando todo processo de fabricação e aplicação, não mostrem essa vantagem (TURNER E COLLINS, 2013), tais diferenças dependem de uma série de fatores, que vão desde a qualidade e custos dos materiais em determinados locais; até a composição, produção e desempenho do concreto aplicado.

Os geopolímeros podem ser produzidos com custo competitivo (MCLELLAN et al., 2011), com reduzido gasto de energia e baixa emissão de gases tóxicos na atmosfera (VAN DEVENTER, et. al. 2012). Essas características favorecem a produção em escala industrial e mostram a possibilidade da produção desses materiais em larga escala, contribuindo para suprir a demanda por cimento que cresce a cada ano.

Mesmo considerando o excelente desempenho do cimento Portland na produção de concretos e argamassas, os cimentos geopoliméricos apresentam alta resistência mecânica (RASHAD, 2013), elevada durabilidade (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2007), baixa retração (DUXSON et al., 2007), rápido endurecimento (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2007), boa resistência aos ácidos (DUXSON et al., 2007), boa resistência ao fogo (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2007) e baixa condutividade térmica (DUXSON et al., 2007).

No que diz respeito à flexibilidade, as propriedades elásticas do geopolímero curado e o comportamento da resistência de peças estruturais de concreto geopolimérico são similares àqueles observados no concreto de cimento Portland (RANGAN, 2010). Tais propriedades podem ser consideravelmente melhoradas quando incorporadas fibras à matriz do compósito. Entre as fibras utilizadas e estudadas, destacam-se as fibras metálicas que, quando adicionada,s formam uma estrutura de ponte nas microfissuras controlando seu crescimento e conduzindo à uma maior resistência do concreto, enquanto que fibras maiores controlam as macro fissuras, que aumentam a capacidade de suporte de carga e a ductilidade. (GHAFARI *et al.*, 2014).

No presente trabalho, foram estudados os efeitos da adição de microfibras metálicas nas propriedades mecânicas de pastas e argamassas de geopolímero, este composto por metacaulim e resíduo cerâmico ativado alcalinamente com hidróxido de sódio e silicato de sódio.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é analisar o efeito de microfibras metálicas no comportamento mecânico de cimento álcali-ativado composto com metacaulim (MK) e resíduo de polimento de placas cerâmicas (RPP).

A pesquisa teve os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o efeito da concentração de fibras no desempenho mecânico de argamassas utilizando cimento álcali-ativado;
- Desenvolver compósitos à partir de cimentos álcali-ativados com resistência à compressão e à flexão elevadas.

1.2 Estrutura da dissertação

No próximo capítulo, é apresentada uma revisão da literatura sobre cimentos álcali-ativados, seus materiais precursores, ativadores alcalinos, resíduos do polimento de placas cerâmicas e microfibras metálicas. O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos, procedimento de moldagem das amostras e ensaios realizados. No quarto capítulo são abordados os resultados obtidos e realizada análise dos mesmos. O quinto capítulo contém as conclusões obtidas com o

trabalho, e, por fim, no sexto capítulo são propostas linhas de pesquisa para trabalhos futuros

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

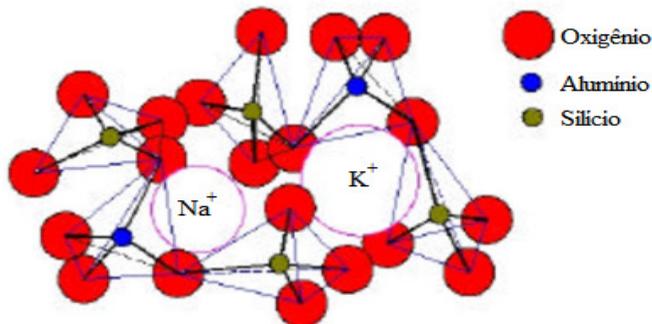
2.1 CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS

Com base nos cimentos antigos, Glukhovskyc, citado por DAVIDOVITS (1988), desenvolveu um novo material que chamou de “solo-cimentos”, que apresenta uma formação muito semelhante com à de muitos minerais e rochas que constituem a crosta terrestre. Esses cimentos podem ser nomeados de diferentes maneiras, entre eles os principais encontrados na literatura são geopolímero, geocimento, cimento alcalino, polímero inorgânico, cerâmicos ligados por álcali, hidrocerâmico e zéocimentos (BAKHAREV, 2005).

O termo “geopolímero” foi patenteado por Davidovits em 1976 nos Estados Unidos, para designar esses cimentos que, quando sofrem a ativação alcalina, passam por uma reação de polimerização inorgânica, resultando em aluminossilicatos, justificando então a utilização da nomenclatura de “cimentos álcali-ativados”. São considerados polímeros inorgânicos, cuja composição química dos materiais é similar à dos materiais zeolíticos naturais, porém com estrutura amorfa.

Esses cimentos são compostos por uma fonte e um líquido alcalino, sendo que esse material utilizado como fonte deve ser rico em sílica (Si) e alumina (Al), podendo ser de origem natural como a caulinita e outras argilas, ou obtidos de maneira alternativa, como cinzas volantes, sílica, escória, cinzas da casca de arroz, entre outros. Os líquidos alcalinos utilizados para ativação, geralmente são à base de sódio ou potássio, sendo combinados com hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH) (PINTO, 2006).

Figura 1: Representação do arranjo espacial da estrutura do cimento álcali-ativado.



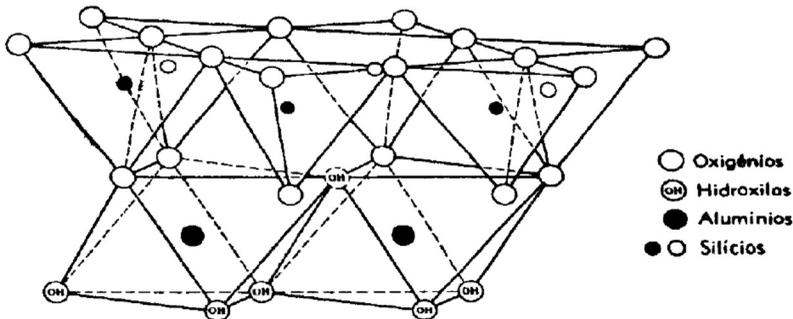
Fonte: PINTO, 2006.

2.1.1 Materiais precursores

Para produzir cimentos álcali-ativados, têm-se uma variedade de precursores minerais, oriundos de matérias-primas naturais, subprodutos industriais e resíduos. Os mais comuns, são: cinza volante, zeólita, metacaulim, sílica ativa e escórias. As principais razões para o uso de pozolanas à base de argila em argamassas e concretos foram a disponibilidade de materiais e durabilidade (SHI *et al.*, 2011; PINTO, 2006).

O metacaulim é um dos principais materiais utilizados na produção de cimentos geopoliméricos, pois é oriundo de uma fonte natural (obtido através da calcinação do caulim) e com baixo impacto ambiental em sua produção. Os caulins são aluminossilicatos hidratados, cuja composição química aproxima-se de $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, correspondendo à aproximadamente 46,54% de SiO_2 , 39,50% de Al_2O_3 , 13,96% de H_2O e outros elementos (como ferro, titânio, manganês, magnésio, potássio e sódio) em menor quantidade. Pertence ao grupo 1:1 das argilas, e tal denominação se deve ao fato da camada atômica desses minerais ser formada por uma folha de sílica tetraédrica (quatro átomos de oxigênio ligados à um átomo de silício) ligada à uma camada de alumina octaédrica (oito átomos de oxigênio ligados à um átomo de alumínio), conforme apresentados na Figura 2 (PAIVA, MONTE e FALCÃO, 2005).

Figura 2: Estrutura cristalina da argila caulínítica



Fonte: GRIM, 1962 *apud* SOUZA, 2003.

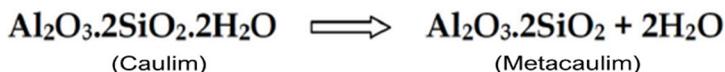
Através do tratamento térmico do caulim, que se converte após obter um grau muito elevado de desidroxilação, é possível obter o metacaulim. O colapso parcial da estrutura cristalina forma uma fase de

transição com elevada reatividade, um material com composição semicristalina. Vários estudos foram realizados para examinar a reação de desidratação e para determinar o nível de reatividade do metacaulim, de acordo com as condições de processamento e a pureza da argila de origem, sendo que o caulim de origem deve ser naturalmente puro ou refinado através de técnicas de processamento, e sua temperatura de ativação térmica (calcinação) deve ser controlada pois é de extrema importância (SABIR, WILD e BAI, 2001).

Não há um consenso entre os pesquisadores sobre a faixa ideal de temperatura utilizada para calcinação do caulim e obtenção do metacaulim, assim como o tempo de calcinação e patamares de queima utilizados. No entanto, acredita-se que essa temperatura deve ser superior à 700°C e inferior à 900°C, pois, a partir dessa temperatura há formação de espinélios e mulita, que apresentam baixa reatividade. A escolha da temperatura está diretamente ligada à composição do caulim utilizado (RASHAD, 2013).

Durante o tratamento térmico nas argilas, um menor grau de cristalização promove uma taxa de desidroxilação maior, apresentada na Figura 3, mostrando que nessa reação de dissociação não há liberação de gases tóxicos como dióxido de carbono (CO₂), somente de água, provando a característica ecoeficiente desse material. (ZAMPIERI, 1989).

Figura 3: Reação de desidroxilação na transformação do caulim e metacaulim.



Fonte: PINTO (2006).

2.1.2 Ativação Alcalina

Palomo (1999) destaca que a ativação alcalina de materiais residuais é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas e amorfas (parcialmente ou totalmente amorfas ou metaestáveis) em compósitos cimentícios. O ativador, tipicamente uma solução com concentração de NaOH ou KOH, dissolve a matéria prima para formar unidades tetraédricas de SiO₄ e AlO₄. O Al e Si dissolvidos saem da superfície da partícula e formam um gel entre as partículas, endurecendo (ERDOGAN, 2015).

A ativação alcalina começa por um processo de desidratação do caulim ou metacaulim, provoca-se o aumento do teor em álcalis com cátions do tipo Na^+ ou K^+ que, a partir da transformação da coordenação do alumínio de 6 para 4, consegue-se reorganizar a estrutura espacial do corpo sólido, estável e resistente.

Quando o material de fonte (metacaulim, cinza volante, etc.) entra em contato com a solução alcalina, a dissolução das espécies de silicato começa sendo afetada pelo tipo e concentração de ativador. Em solução de NaOH , a lixiviação de Al^{3+} e Si^{4+} é mais elevada que em soluções de KOH . Sendo assim, a concentração de álcali é importante no controle de lixiviação de alumina e sílica, no processo de geopolimerização e nas propriedades mecânicas do geopolímero endurecido (XU e VAN DEVENTER, 1999 *apud* RATTANASAK e CHINDAPRASIRT, 2009).

A concentração de ativador deve ser suficiente para garantir a ruptura das ligações originais da matéria prima, mas, quando em excesso, tende a formar carbonato de sódio (Na_2CO_3). Apesar disso, ainda não há consenso sobre a quantidade ideal do ativador e diversas opiniões sobre o uso de diferentes ativadores (BARBOSA *et al.*, 1999; RATTANAASK *et al.*, 2009; KOMNITSAS *et al.*, 2007; PINTO, 2006).

A ativação alcalina é uma reação de lixiviação e solubilização de alumino-silicatos com substâncias do tipo alcalino ou alcalino-terroso, nomeadas por Pinto (2006), como:

- Hidróxidos (ROH , $\text{R}(\text{OH})_2$),
- Sais de ácidos fracos (R_2CO_3 , R_2S , RF),
- Sais de ácidos fortes (Na_2SO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),
- Sais silicatados do tipo $\text{R}_2 \cdot (\text{n})\text{SiO}_2$.

Onde R é um íon alcalino do tipo Na, K ou Li, ou alcalino terroso como o Ca.

Estudos realizados por Xu e Van Deventer (2000), identificaram uma maior dissolução em materiais ativados com uma solução alcalina de NaOH do que KOH , com cadeias mais solúveis. Entretanto, Komnitsas (2007) destaca que o tamanho do cátion influencia na morfologia formada, sendo que o uso de ativadores do tipo KOH (em que o K^+ possui tamanho superior ao Na^+), favorecem a formação de oligômeros maiores que resultam em uma melhor resistência à compressão quando comparados com materiais sintetizados em soluções de NaOH .

2.1.2.1 Mecanismo de Ativação Alcalina e Polimerização

A composição, estrutura e propriedades do produto de reação obtidos na ativação alcalina do metacaulim são diretamente afetadas pela superfície específica e composição do caulim inicial, além do tipo de ativador e sua concentração (RASHAD, 2013).

Palomo (1999) propôs dois modelos de ativação alcalina: o primeiro é a ativação alcalina da escória de alto forno (Si + Ca), com a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) como principal produto, o segundo é a ativação alcalina de metacaulim e cinza volante (Si + Al), com a formação de estrutura similar às zeólitas.

Glukhovsky, em 1967, desenvolveu um modelo que explica os mecanismos de formação da estrutura tridimensional dos cimentos álcali-ativados, descrevendo uma série de transformações de destruição/condensação que ocorrem no sólido inicial, dividindo esse processo em três etapas (Glukhovsky, 1967 *apud* Palomo *et al.*, 2011):

1. Destruição/Coagulação:

Nessa primeira etapa ocorre a ruptura das ligações de Me-O, Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si no material de partida, promovendo a formação de produtos complexos instáveis oriundos da adição de átomos de metais alcalinos. O resultado é uma redistribuição da densidade eletrônica em torno do átomo de silício. Ocorre um processo de dissolução em que as partículas sólidas do material inicial são dissolvidas quando entram em contato com o ativador alcalino.

2. Coagulação/Condensação:

Em um segundo momento, aumenta o contato entre os produtos desagregados, formando uma estrutura coagulada, abrindo espaço para a policondensação. A ativação alcalina desse cimento envolve um passo de dissolução seguida por uma etapa de policondensação, quando exposta à uma solução de NaOH ou KOH (RASHAD, 2013). A policondensação é um processo químico de polimerização que envolve uma reação entre moléculas multifuncionais de monômeros, havendo liberação de água.

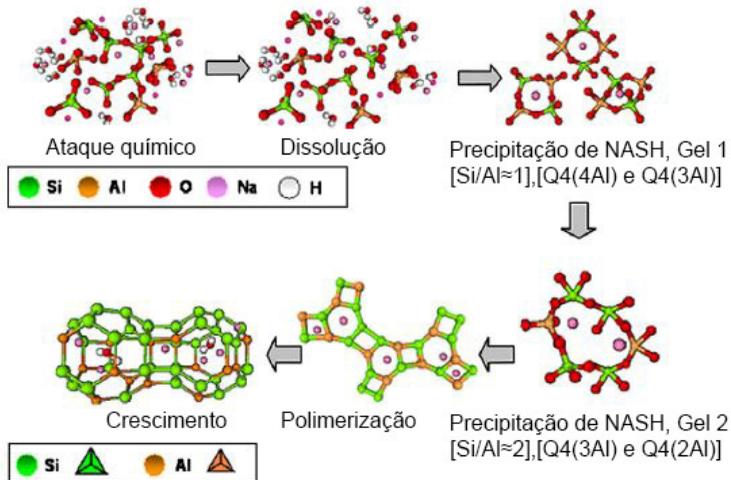
3. Condensação/Cristalização:

As partículas provenientes da fase sólida inicial, conjuntamente com as micropartículas da condensação favorecem a precipitação do produto, que tem sua composição quantitativa e qualitativa determinada pela composição

mineralógica do material inicial, a natureza do ativador alcalino e as condições de cura e endurecimento.

Em compostos de cimento Portland, a reação de hidratação da água e do cimento gera a formação de hidratos do tipo C-S-H, enquanto que nos cimentos álcali-ativados o processo de dissolução pode ser conhecido como geopolimerização, pois há a formação de um gel, conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Mecanismo de reação de cimentos álcali-ativados.



Fonte: Adaptado de PALOMO, SHI E JIMÉNEZ, 2011.

O gel de N-A-S-H formado no processo de geopolimerização é um hidrato de aluminossilicato, com estrutura tridimensional na ordem nanométrica, semelhante às zeólitas (PALOMO, SHI e JIMÉNEZ, 2001). Granizo *et al.* (2007), constataram em seus estudos que o produto de reação da ativação alcalina do MK com soluções de NaOH é um aluminossilicato de sódio amorfo e um gel do tipo N-A-S-H com boas propriedades mecânicas, sendo que o grau de reação aumentou à medida que aumenta o grau de concentração de NaOH. Além disso, Li *et al.* (2010) relata que como no caso do gel de C-S-H, géis N-A-S-H são difíceis de caracterizar com DRX, devido à sua estrutura amorfa ou nanocristalina.

Durante a fase de dissolução, há uma intensa liberação de calor (que varia de acordo com a concentração de ativador). As partículas

maiores reagem com a solução ativadora enquanto que as menores ficam presas no interior das esferas, podendo comprometer parte da resistência final do material. Após o processo de dissolução, acontece a nucleação, onde as moléculas entram em contato com outras para formar moléculas maiores, se dispondo de uma maneira em que os espaços vazios acomodam o balanceamento dos íons da solução ativadora. Esse fenômeno denomina-se polimerização e determina o fim das reações químicas de formação dos cimentos álcali-ativados (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2004).

Pinto (2006) resume o mecanismo da ativação alcalina, em termos práticos, como um processo de policondensação (síntese polimérica) em que os tetraedros de SiO_4 e AlO_4 se ligam alternadamente entre si, compartilhando os oxigênios. Os íons alcalinos (K^+ e Na^+) atuam como agente formadores da estrutura, compensando o excesso de cargas negativas decorrente da alteração da coordenação do alumínio com o oxigênio, e são os componentes que determinam as propriedades ligantes. A ativação alcalina promove uma alteração na estrutura do aluminossilicato. A estrutura plana hexagonal do filosilicato transforma-se numa estrutura espacial, pois os ânions tetraédricos de SiO_4 e AlO_4 vão ligar-se, alternadamente, compartilhando todos os oxigênios dos vértices. As unidades não se encontram continuamente ligadas em uma estrutura organizada e reticulada, o que é próprio das estruturas amorfas.

Além disso, a relação Si/Al rege muitas propriedades dos geopolímeros. Com o aumento da relação, o geopolímero apresenta propriedades mecânicas melhoradas devido ao aumento das ligações de Si-O-Si, propiciadas pela maior presença de Si, além de incremento na densidade (HE *et al.*, 2016).

2.1.3 Relações de Óxidos

Davidovits em 1982 apresentou uma faixa ideal de razões molares para obtenção de um geopolímero ativado com cátions de sódio. Com o desenvolvimento do material, vários pesquisadores desenvolveram faixas de razões molares diferentes, que são apresentadas na Tabela 1.

Tais relações de óxidos influenciam nas propriedades dos geopolímeros, de maneira geral. Como exemplo, pode ser citada a alumina (Al_2O_3) que interfere na velocidade de hidratação do cimento e reduz a resistência à compressão quando dosada em excesso (DAVIDOVITS, 1982). Além disso, a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ também tem

efeito significativo na resistência à compressão, sendo que os índices ótimos estão entre 3,5 e 5,5, variando de acordo com o tipo de ativador e condição de cura.

A relação utilizada no trabalho é a estabelecida por Pelisser *et al.* (2013), que apresenta valores diferentes dos que foram propostos por Davidovits inicialmente, mas são semelhantes aos adotados por outros pesquisadores, além de propiciarem a produção de um geopolímero com desempenho satisfatório

Tabela 1: Razões molares propostas por Davidovits e desenvolvidas por outros pesquisadores.

Relações	Faixa Ideal Definida por Davidovits, 1982	Faixas utilizadas por outros pesquisadores					
		Yunsheng <i>et al.</i> , 2008	Ryu <i>et al.</i> , 2013	Rattanasak e Chindaprasirt, 2009	Granizo, Blanco-Varela e Martínez-Ramírez, 2007	Songpiriyakij <i>et al.</i> , 2010	Pelisser <i>et al.</i> , 2013
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,5 a 4,5	4,5	3,76 a 4,62	3,3 a 4,5	2,88 a 3,66	3,88	3,2
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,8 a 1,2	0,8	1,63 a 3,14	0,8 a 1,2	-	0,83	0,46
$\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$							
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,2 a 0,28	-	5 a 14,5	0,2 a 0,48	0,11 a 0,44	0,21	0,14
$\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$							
$\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$	-	-	-	-	-	-	1,6
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	15 a 17,5	6,4	-	10 a 25	5,49 a 15,58	-	-
$\text{H}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$							

2.1.3.1 Cura

Parte da natureza e concentração do álcali, grau de amorficidade do pó (fonte) de aluminossilicato, e muitos outros fatores influenciam nas propriedades finais dos CAA's, entre eles a definição das etapas, temperatura de cura e tempo de cura (LANCELLOTTI, 2013).

Em seu trabalho, Palomo *et al.* (1999), afirmaram que a temperatura de cura é especialmente importante entre 2h e 5h, e constatou uma resistência mais elevada em amostras curadas à 85°C do que à 65°C, sendo que o aumento de resistência não se torna significativo em processos de cura de 24h. Já Bondar *et al.* (2011), em seus estudos, verificaram um aumento na resistência de amostras curadas à 60°C, quando comparadas com amostras com temperatura de cura igual à 40°C, sendo que não há acréscimo significativo quando a temperatura adotada é superior à 80°C.

Pinto (2006) ressalta que, quando o processo de cura/endurecimento é acelerado acima da temperatura ambiente, a estrutura do geopolímero fecha-se ainda mais e torna-se quase impermeável em condições de pressão normal. Oposto a isso, Bernal e Provis (2014), visando o uso desse material em aplicações cotidianas, verificaram que a temperatura de cura desses materiais próximos à do ambiente pode proporcionar resultados muito bons no que diz respeito à resistência à compressão (em torno de 60 MPa aos 28 dias ou superior à 100 MPa aos 180 dias, em cubos de argamassa de 100mm).

Sendo assim, neste trabalho, será adotada uma temperatura de cura em estufa próxima à temperatura ambiente, sendo em torno de 23°.

2.1.4 Composições em Cimentos Álcali-Ativados

Os cimentos álcali-ativados podem ser obtidos através de várias fontes de matéria prima, o que também permite obter composições com outros materiais, reagindo com o material fonte. Quando caracterizados e comprovada a sua possível utilização, esses podem ser incorporados como adição ou substituição em matrizes cimentícias, para melhora da mesma.

Como exemplo de composição, Ohno (2014) utilizou dois tipos diferentes de cinza volante, criando uma composição que atendesse satisfatoriamente padrões de resistência e reológicos, que permitissem seu uso. O uso de dois tipos de cinza volante se deu pelo motivo de que uma apresentava endurecimento imediato e a outra não promovia o endurecimento até as 24h para desmoldagem das amostras.

Além dos principais materiais precursores que já são amplamente estudados (metacaulim, cinzas volantes e escória de alto forno), estudos recentes apresentam novas fontes de materiais, que são mostrados por PROVIS *et al.* (2015) e descritos a seguir:

- Escória de Silício-Manganês: consiste em partículas irregulares amorfas e porosas, com menores teores de cálcio que as escórias de alto forno, reduzindo sua reatividade em comparação com a mesma. Em estudos com essa escória moída e ativada alcalinamente com hidróxido de sódio, Kumar *et al.* (2013) obtiveram pastas de cimento com resistência de 101MPa na idade de 28 dias curadas à $27\pm 2^\circ\text{C}$. No entanto, foi destacado que é importante a moagem dessa escória com alta energia, pois a mesma moída em moinhos de bola com energia regular apresentou resistência três vezes menor.

- Rejeito de carvão: é um material que normalmente é desperdiçado durante a escavação e lavagem do carvão, sendo um aluminossilicato natural que contém na sua composição, principalmente, caulim, quartzo e feldspato. Cimentos álcali-ativados podem ser produzidos utilizando esse rejeito amorfo com alto teor de aluminossilicato em combinação com ativadores químicos, como os elaborados por Zhang *et al.* (2004) *apud* Provis *et al.* (2015), que obtiveram resistência de 42,5MPa após 24h de cura à 90°C , em amostras de pastas de rejeitos de carvão calcinadas ativadas com silicato de sódio.

- Lama vermelha: também conhecida como resíduo de bauxita, é um resíduo gerado durante a extração de alumina a partir de minérios de bauxita. Na sua composição, apresenta principalmente SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , com fases de quartzo, zeólitas contendo sódio e cálcio, assim como argila, hematita e outros. He *et al.* (2013) utilizando lama vermelha e cinzas de casca de arroz, prepararam um cimento álcali-ativado com resistência à compressão de até 20,5 MPa, sendo que a cura prolongada aumentou a resistência à compressão e módulo de Young, mas reduziu a ductilidade.

- Cinzas de carvão: é um subproduto da combustão do carvão que é recolhido na parte inferior dos fornos que o queimam para geração de calor, geração de energia, etc. O mesmo processo é utilizado para obtenção da cinza volante, mas a mesma é recolhida no topo dos fornos. A cinza do carvão tende a ser um material mais grosseiro que a cinza volante, contendo menos vidro, sendo necessária a moagem antes da utilização e gerando materiais menos

resistentes. A morfologia, tamanho de partícula, propriedades de superfície e o conteúdo da fase amorfa influenciam na capacidade desses materiais de reagirem quando ativados e, como possuem reatividade inferior ao cimento Portland, não são utilizados como composição, sendo sua principal utilização em laboratórios.

- Cinzas da casca de arroz: é um resíduo gerado através da queima da casca de arroz para geração de eletricidade ou outros fins, apresentando como principal componente a sílica (90-95%). É um material predominantemente amorfo com algumas fases cristalinas, com o carbono residual como impureza principal. A sílica amorfa presente nessas cinzas é reativa, possibilitando seu uso como uma pozolana, mas no caso de cimentos álcali-ativados necessita de uma fonte secundária de Al pois o teor desse elemento é baixo. Outra utilização é para a produção de silicato de sódio, como desenvolvido por Bernal *et al.* (2012), que utilizou a cinza da casca de arroz e uma solução aquosa de NaOH, sendo que o silicato resultante apresentou desempenho equivalente ou melhor, quando comparado a um silicato comercial, mas com os mesmos benefícios ambientais e financeiros.

- Resíduos cerâmicos: são produzidos na demolição de edifícios de alvenaria ou como subprodutos na produção de porcelana e louças. Os principais materiais constituintes são SiO_2 e Al_2O_3 , com as principais fases sendo cristalinas e uma fase vítrea. Seu processo de reação, quando ativados alcalinamente, pode ser comparado ao do metacaulim, apesar de esses resíduos cerâmicos apresentarem uma reatividade não tão elevada, pois sua queima se dá a uma temperatura mais alta, alterando sua estrutura.

2.1.5 Propriedades dos cimentos álcali-ativados

Em vários estudos, esses materiais destacam-se por excelentes características, como pequena retração na cura, baixa fluência, resistência excelente ao ataque de sulfatos, boa resistência aos ácidos (RANGAN, 2010), maior durabilidade, propriedades resistentes ao calor (BAKHAREV, 2005). Alcançam fácil e rapidamente valores de resistência mecânica, valores muito baixos de permeabilidade (PINTO, 2004), baixa expansão álcali-agregado, resistência à corrosão (KOMNITSAS, 2007), e ainda os materiais geopoliméricos permitem obter compósitos dotados de elevada flexibilidade conjuntamente com todas as outras propriedades (PINTO, 2006).

No que diz respeito à durabilidade, é destacado que a utilização generalizada dos geopolímeros é limitada devido à falta de estudos científicos detalhados sobre a durabilidade desse material a longo prazo. Mas sua durabilidade é fortemente dependente da nano e microestrutura dos produtos de reação, que é função do tipo de material fonte utilizado, natureza e concentração do ativador alcalino. Um dos principais fatores que determinam a penetração de ácidos e sais é a porosidade do gel formado na hidratação, podendo modificar os mecanismos químicos que podem levar à deterioração destes cimentos quando expostos à ambientes agressivos (PERERA (2004) *apud* KOMNITSAS (2007); PROVIS e BERNAL (2014)).

Davidovits (1994) *apud* Rashad (2013), estudou a resistência à corrosão por ácidos de vários cimentos diferentes em 5% de H_2SO_4 e HCl, indicando que cimentos álcali ativados apresentaram melhor resistência (com perda de massa de 5-8%) do que os outros cimentos (cimento de aluminato de cálcio apresentou perda de massa de 30-60%, por exemplo). Ao mesmo tempo, argamassas de metacaulim imersas em ácido sulfúrico por um longo período de tempo (de 7 à 270 dias), sofreram pouco efeito negativo da solução sobre o desenvolvimento da sua microestrutura e resistência, enquanto que amostras com mais de 90 dias tiveram um acréscimo na resistência à flexão.

A imersão de amostras de CAA em Na_2SO_4 favorece a evolução estrutural dos produtos de reação a aumento das fases de ligação, sem qualquer efeito negativo no material, enquanto que a exposição à $MgSO_4$ promove a destruição dos principais produtos de reação, sendo necessário cuidado com cimentos álcali-ativados em ambientes ricos em sulfato. A carbonatação nesses materiais está diretamente ligada à sua permeabilidade, que é reduzida quando comparada à concretos convencionais de cimento Portland. Em estudos realizados em laboratório, com ensaios de carbonatação naturais, amostras de CAA apresentaram uma profundidade de carbonatação de 1,7mm após sete anos, o que é baixo quando comparados à concretos de cimento Portland onde foram detectadas profundidades de carbonatação entre 2 e 10 mm após um ano, mas em ensaios de carbonatação acelerados, induzem uma rápida decomposição desse material (KOMNITSAS, 2007).

Em estudos realizados por Pelisser (2013), foram desenvolvidas pastas e argamassas de cimento álcali-ativado, composto por metacaulim e ativado com silicato de sódio e hidróxido de sódio. As amostras de pasta apresentaram resistência à compressão satisfatória (64 MPa na idade 7 dias), resultados de módulo de elasticidade e dureza (aproximadamente 10 GPa e 0,40 GPa) próximos aos resultados obtidos

para o cimento Portland hidratado e silicato de cálcio hidratado. Quando desenvolvidos os traços de argamassa (1:3, 1:4 e 1:5), apresentaram resistência à compressão de 60 MPa, 58 MPa e 56 MPa, respectivamente, e módulo de elasticidade de 24 GPa, 27 GPa e 31 GPa, semelhantes aos valores obtidos para argamassas de cimento Portland da mesma classe de resistência. Esses resultados mostram o desempenho satisfatório de um CAA, ficando evidente seu potencial de utilização quando comparado ao cimento Portland.

2.2 Adição de fibras e Microfibras no geopolímero

As fibras e microfibras são incorporadas frequentemente nas matrizes cimentícias hodiernamente, à fim de agirem como reforço às cargas de tração. Os compósitos reforçados com fibras vêm ocupando espaço na indústria automotiva e naval, uma vez que apresentam melhores propriedades que os materiais tradicionais. Geopolímeros são materiais dotados de elevada flexibilidade, mas tal propriedade pode ser melhorada com a adição de fibras e microfibras à sua matriz.

As microfibras aumentam a resistência do material, mas também influenciam diretamente nas propriedades do estado fresco, trabalhabilidade e escoamento. Sendo assim, é necessária a adoção de um teor ótimo de adição de fibras, para alcançar o desejado aumento das resistências mecânicas e garantir simultaneamente a fluidez. Isso se torna mais significativo em baixas relações de água/aglomerante e com maior dosagem de pasta, pois torna a mistura mais viscosa. Para garantia de tal trabalhabilidade, a quantidade de água tem que ser aumentada na mistura, mas o aumento da demanda reduz a resistência do concreto (GHAFARI, COSTA E JÚLIO, 2014). Além disso, o alinhamento das fibras e orientação são muito dependentes da fluidez da mistura, que também determina o risco de segregação e deformabilidade (STÄHLI (2008) *apud* GHAFARI, COSTA E JÚLIO (2014)).

A adição de fibras aos compósitos proporciona uma maior resistência à fratura em matrizes mais frágeis, uma vez que as fibras atuam nas microfissuras, diminuindo o aparecimento e espessura das mesmas. Além disso, se as fibras estiverem uniformemente dispersas e com boa aderência à matriz, têm a capacidade de transferir cargas de modo que as microfissuras não se propaguem através de outras áreas. A eficiência das microfibras nas microfissuras está diretamente ligada à dispersão das mesmas na matriz, uma vez que a aglomeração diminui a adesão na interface microfibras-matriz, diminuindo consequentemente a resistência (ALOMAYRI, 2017).

Entre as principais vantagens dessa incorporação, estão o aumento a resistência dos compósitos, através da absorção de energia (microfibras absorvem grande parte da carga e deformação), resistência à deformação, redução do aparecimento de fissuras (as microfibras atuam como ponte entre as microfissuras), diminuição de espessura, aumento da ductibilidade (presença de microfibras exige uma força maior para puxar e quebrar as fibras, aumentando a resistência do material) (KORNIEJENKO, 2016).

Entre tantos tipos de fibras que podem ser utilizadas, as principais são: fibras naturais (bambu, juta, sisal, casca de coco, linho, madeira, etc.), fibras de vidro, fibras de carbono, fibras de metal (alumínio e aço) e fibras sintéticas (nylon, polietileno, polipropileno, etc.). O uso de fibras naturais necessita especial atenção, pois o contato com meio alcalino pode provocar degradação e comprometimento do comportamento do material, o que já não ocorre com uso de fibras de metal e sintéticas, por serem materiais inertes.

A adição de fibras naturais em geopolímeros é uma solução inovadora e cada vez mais em evidência. Em seus estudos, Korniejenko (2016) estudou o efeito nas propriedades mecânicas de um geopolímero de cinzas volantes quando incorporadas fibras de algodão, sisal, rafia e coco, todas no teor de 1% em massa do composto e comparadas à uma composição sem microfibras. As fibras de algodão possuem comprimento de 30mm e diâmetro de 1mm; as de sisal 3mm e 0,5mm; as de rafia 3mm e 1mm; as de coco 3mm e 0,5mm. Através das análises de microscopia eletrônica de varredura, foi possível observar que as fibras naturais são menos aderentes à matriz que as fibras artificiais como as de vidro ou carbono, por exemplo, mas se distribuem de maneira uniforme, sendo que, em casos de aglomeração, as propriedades mecânicas são prejudicadas. As matrizes contendo fibras de sisal se mostraram mais densas, semelhantes às matrizes contendo fibras artificiais, enquanto que na presença das outras fibras apresentaram pequenos espaços vazios. Nos resultados de resistência à flexão, foram revelados acréscimos de 5,4% e 6,3% para as matrizes contendo fibra de algodão e sisal, respectivamente, enquanto que as fibras de coco e rafia provocaram decréscimo na resistência de 5,4% e 82%, que foi possível concluir a semelhança entre os efeitos das fibras de algodão, sisal e coco. Nos testes de resistência à compressão, os resultados melhoraram na presença de microfibras de coco, algodão e sisal, com acréscimos de 26,5%, 14,7% e 1,5% respectivamente, e declínio com microfibras de rafia, de 44,9%. O decréscimo nos resultados tanto de resistência à flexão quanto compressão, com a presença das fibras de rafia, se deve à

falta de adesão entre matriz e fibra. Foi possível concluir que o desempenho das microfibras naturais de coco, sisal e algodão na matriz de geopolímero é relativamente satisfatória, apesar de apresentar menos aderência que microfibras artificiais. Com isso, é possível constatar a eficiência desse compósito em termos ecológicos, apesar de ser necessário um estudo maior nas propriedades mecânicas devido à falta de adesão das fibras à matriz.

Ao utilizar microfibras de vidro, Alomayri (2017) visou melhorar as propriedades mecânicas de uma pasta de geopolímero. Para isso adicionou diferentes teores (0, 1, 2 e 3% em massa) utilizando cinza volante ativada alcalinamente com silicato de sódio e hidróxido de sódio. Nas análises de microscopia eletrônica de varredura, foi possível observar boa aderência das microfibras nas pastas, estando bem aderidas, reduzindo o aparecimento de fissuras através da absorção e dissipando a energia de deformação, isso nos teores de 1% e 2%, enquanto há aglomeração de fibras e enfraquecimento da matriz no teor de 3%. Nos resultados de resistência à flexão, os teores de 1% e 2% apresentaram aumento quando comparados à pasta sem adição (25% e 70% respectivamente), esse acréscimo na resistência foi menor no teor de 3% mas, mesmo assim, superior à referência. Durante os ensaios de resistência à flexão de três pontos, o autor observou que, com a adição das microfibras, a matriz de geopolímero não se separa em dois pedaços porque as microfibras absorvem parte da força e aumentam a capacidade de suporte após o aparecimento da primeira fissura. Nos ensaios de resistência à compressão, o teor de 2% de adição em massa apresentou os melhores resultados, com aumento de 89% em relação ao geopolímero de referência, devido à três fatores principais: efeito de enchimento que as microfibras proporcionam na matriz, preenchendo vazios e tornando-a densa; a capacidade das microfibras de atrasar o desenvolvimento de fissuras, com maior absorção de energia levando a uma maior capacidade de carga; e, boa dispersão das microfibras e boa adesão na matriz. A resistência à compressão diminuiu no teor mais alto que 2% de adição (3%), devido à aglomeração de microfibras, que tende a deixar micro vazios na matriz e propiciar enfraquecimento da adesão microfibras-matriz. Quando verificado o módulo de elasticidade, o autor observou acréscimo nos teores de 1% e 2% de adição de microfibras em relação à referência, com acréscimo de 16% e 40%, respectivamente. No teor mais elevado de adição (3%), houve pequena queda em relação ao teor de 2%, devido à má distribuição e baixa adesão das microfibras na composição, possivelmente por incorporação de bolhas de ar durante o processo de mistura que resultam em vazios no estado endurecido.

Além disso, durante os ensaios, foi possível observar uma maior capacidade de deformação nas amostras contendo microfibras, com maior suporte de carga após o aparecimento das primeiras fissuras. Durante o carregamento, as amostras apresentam linearidade no gráfico, quando não há presença de microfibras. As amostras apresentam ruptura brusca, quando há adição, a mudança do gráfico para regime não linear indica melhoria nas propriedades mecânicas do compósito, com capacidade de carga maior mesmo com o aparecimento de múltiplas fissuras. Com todos os resultados, foi estabelecido como teor ótimo de adição 2% em massa, nesse caso, por apresentar melhor adesão entre matriz e microfibras, melhoria na resistência à fratura, aumento da resistência à compressão (+89%), módulo de elasticidade (+40%) e resistência à flexão (70%), quando comparados à pasta não reforçada. Nos teores mais elevados, há baixa dispersão das microfibras e aglomeração na matriz de geopolímero, criando zonas de transição enfraquecidas pela presença de micro vazios.

As fibras de polipropileno não prejudicam a resistência à compressão do geopolímero, mas são responsáveis por um mau desempenho desse compósito à flexão em comparação com as de aço, como consequência de sua fraca adesão à matriz de geopolímero, propiciando a extração de fibras sem capacidade de carga significativa (BHUTTA *et al.*, 2017). Ainda assim, a utilização de fibras sintéticas possibilita a destinação de um material que poderia se tornar resíduo, como Puertas *et al.* (2003), que utilizaram fibras de polipropileno com 12mm de comprimento em três matrizes de geopolímero diferentes, a primeira composta de escória granulada de alto forno, a segunda composta de cinzas volantes e a terceira sendo uma combinação dos dois materiais, todas ativadas alcalinamente com silicato de sódio e hidróxido de sódio. Para avaliar os efeitos da adição das microfibras nessas matrizes, foram adicionados dois teores em volume de argamassa, 0,5% e 1%, em amostras prismáticas de 4x4x16cm (largura x altura x profundidade). Os resultados mostraram que a natureza da matriz cimentícia é o fator mais importante para desenvolvimento da resistência, mais do que a presença de fibra e sua quantidade, pois o material fonte (nesse caso a cinza volante e a escória) influencia na aderência entre matriz e fibra. Nesse caso, não foram observadas melhoras nas propriedades de módulo de elasticidade. A incorporação de fibras de polipropileno não influencia positivamente o comportamento mecânico das argamassas compostas de escória, mas apresenta melhora da resistência à fratura em todos os casos, com maior capacidade de carga pós fissuração.

As microfibras metálicas podem ser incorporadas aos geopolímeros para melhorar suas propriedades de resistência à flexão, tração e ductilidade, uma vez que não sofrem problemas de degradação em meio alcalino e no geral, apresentam boa aderência fibra-matriz. Sua inclusão em compósitos de cimento Portland, aumenta significativamente sua resistência ao cisalhamento e ao aparecimento de fissuras, pois as microfibras absorvem parte da tensão de tração. Sendo assim, após o aparecimento das primeiras fissuras, o compósito ainda é capaz de absorver uma tensão adicional (NG, AMIN e FOSTER, 2013; SNOECK e DE BELIE, 2015). O comportamento elástico do material não é afetado com teores muito baixos de fibras. No entanto, o comportamento pós fissuração pode ser substancialmente modificado, com aumento de resistência, tenacidade e durabilidade do material (BERNAL *et al.*, 2010). Entretanto, como existem diversas tipologias de fibras de aço, pode-se dizer que as principais diferenças estão no fator de forma (relação entre comprimento e diâmetro) e na geometria das fibras e, na caracterização entre macrofibras e microfibras que, de modo geral, servem para reduzir a macrofissuração e micro fissuração, respectivamente (SUKONTASUKKUL *et al.*, 2018). As microfibras se dispersam mais facilmente dentro da matriz, com menos aglomeração do que as macrofibras.

Em sua pesquisa, Vijai, Kumutha e Vishnuram (2012), estudaram o efeito de adição de fibras metálicas de 35mm (fator de forma de 70) em três teores (0,25%, 0,50% e 0,75% em volume de concreto) em um geopolímero composto por 90% de cinzas volantes e 10% de cimento Portland, com ativação alcalina por hidróxido de sódio e silicato de sódio. Foram analisadas as propriedades mecânicas, como densidade, resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão. Quando comparados à amostras sem a adição de fibras, os corpos de prova com as fibras apresentaram resistências mais elevadas, tais como: aumento de 11%, 13% e 24% na compressão para os teores de adição em volume de concreto de 0,25%, 0,50% e 0,75% respectivamente; na tração, aumentos de 1%, 18% e 24% respectivamente; e, na flexão aumentos de 3%, 34% e 44%. Os resultados são atribuídos à boa aderência das fibras metálicas à matriz de geopolímero, atuando como ponte nas fissuras e absorvendo parte da tensão aplicada.

Nos estudos realizados por Ng, Amin e Foster (2013), foram utilizados dois tipos de fibras metálicas (ambas com fatores de forma de 65), com teores de 0, 0,5, 1,0 e 1,5 % para as fibras de 35 mm e 1,5% para as fibras de 13mm, com teores adicionados em volume em vigas de geopolímero à base de cinza volante e escória, ativados alcalinamente

com hidróxido de sódio e silicato de sódio. Além das vigas, foram moldados corpos de prova cilíndricos para determinação de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Quando ensaiadas as amostras, as que continham microfibras apresentaram resultados inferiores às que sem microfibras, tanto para compressão quanto para módulo de elasticidade. Os autores constataram nos ensaios de flexão realizados nas vigas, que a carga para provocar fissuras e a carga máxima suportada aumenta de acordo com o aumento de concentração de fibra, assim como as fissuras se propagam com uma taxa maior em amostras com quantidades inferiores de fibras e as vigas com menor concentração apresentaram fissuras mais abertas. Além disso, constataram que as fibras menores e retas (nesse caso 13mm) proporcionam maior compacidade a matriz, reduzindo o número e abertura das fissuras, por atuarem mais diretamente no plano de fissuração.

As fibras de aço possuem alta resistência e rigidez, o que permite sua utilização em sistemas híbridos com fibras de polipropileno, uma vez que essas possuem baixa rigidez e alta flexibilidade, produzindo uma queda de resistência após a primeira fissuração. Nos seus estudos, Sukontasukkul *et al.* (2018) utilizaram um sistema híbrido de fibras (fator de forma 85) adicionadas a um cimento álcali ativado composto por cinza volante e sílica. O teor inicial de adição foi de 1% em volume de fibras de polipropileno, depois sendo substituído gradativamente à cada 0,2% por fibras de aço até a substituição completa e, por último, outro sistema de adição gradativa, em que no final totaliza 2% de fibras, todos os teores em relação ao volume de concreto. A resistência à compressão aumentou em ambos os casos conforme foram adicionadas as fibras de aço, de 35MPa para 60 MPa no caso da substituição da fibra de polipropileno pela fibra de aço (aumento de 73%), e de 35 MPa para 73 MPa no caso da adição (acréscimo de 108%), devido à presença de sílica na mistura que aumenta a aderência entre as fibras e a matriz. Nos teores contendo apenas fibra de polipropileno, houve redução da resistência à compressão, devido à uma fraca compactação e presença de vazios dentro da amostra, decorrente da grande quantidade de fibras que dificultam uma correta compactação e acomodação das fibras na matriz. Os resultados de resistência à flexão apresentaram a mesma tendência de aumento, com acréscimo de 85% no caso da adição de fibras de polipropileno, 169% no caso da substituição e 199% no caso do sistema híbrido, utilizando as duas fibras. Tais resultados se devem à boa aderência das fibras à matriz, atuação como ponte nas fissuras, com melhora da tenacidade e suporte de carga após a primeira fissuração. O trabalho destacou a importância do limite máximo de fibras a ser

utilizado, uma vez que altos teores de adição na matriz cimentícia podem ocasionar dificuldade em misturar, uma má compactação e consequentemente, distribuição não uniforme das fibras e aumento do volume de vazios. Os autores concluíram também que a substituição das fibras de polipropileno por fibras de aço se mostrou mais eficaz na melhora das propriedades mecânicas do material, evidenciando a vantagem da utilização das fibras metálicas.

A utilização de fibras de aço no concreto visa aumentar principalmente a tenacidade pós-pico, em virtude da aderência das fibras à matriz cimentícia e melhorar o comportamento frágil do concreto. Para os materiais cimentícios reforçados com fibras, a tenacidade ou a deformação são considerados um método mais apropriado para apresentar o desempenho da fibra, do que parâmetros como a resistência à compressão, a força de flexão ou modo de ruptura.

Diante do que foi exposto, nesse trabalho buscou-se avaliar a influência nas propriedades mecânicas da adição de microfibras metálicas em um geopolímero composto por metacaulim e resíduo do polimento de placas cerâmicas, à fim de desenvolver um material com desempenho satisfatório.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

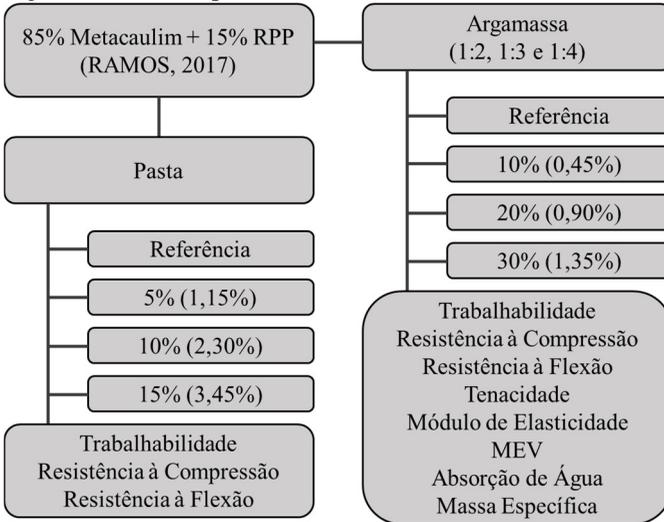
Nesse capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos para preparação e os ensaios utilizados nesta pesquisa.

Considerando os resultados obtidos por Ramos (2017), que estudou o efeito do resíduo cerâmico em cimento geopolimérico, foi utilizada neste trabalho uma composição de 85% MK e 15% RPP (além dos ativadores silicato e hidróxido de sódio), devido ao melhor desempenho mecânico atingido. Como variáveis principais foram avaliadas a concentração das fibras e a composição de argamassa. Como complemento, foi verificado o desempenho das fibras aplicadas em pastas. Nas composições das pastas, foram utilizadas as concentrações de microfibras de 0%, 5%, 10% e 15% (em massa de aglomerante, que correspondem a 1,15%, 2,3% e 3,45% em volume de pasta). Nas composições de argamassa - considerando a plasticidade verificada nas pastas - foram adotadas as concentrações de 0, 10%, 20% e 30% (em relação à massa de cimento, que correspondem à 0,45, 0,90 e 1,35%, respectivamente, em relação ao volume da argamassa). Foram utilizadas três composições de argamassa (1:2, 1:3 e 1:4, cimento:areia padrão brasileira, em massa). Este projeto experimental, com os respectivos ensaios realizados, pode ser observado na Figura 5.

Foram moldados dois tipos de amostras no caso das pastas, cilíndricas medindo $\varnothing 20\text{mm} \times 40\text{mm}$ e prismáticas medindo $2 \times 2 \times 10\text{cm}$ (largura \times altura \times profundidade), com três replicações para cada tipologia de amostra. No caso das argamassas, foram moldadas amostras prismáticas medindo $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ (largura \times altura \times profundidade), com três replicações para cada tipologia de amostra.

Como ensaios preliminares, foram realizados testes de compressão e flexão nos corpos de prova pequenos ($2 \times 2 \times 10\text{cm}$ e $\varnothing 20\text{mm} \times 40\text{mm}$) e nos maiores ($4 \times 4 \times 16\text{cm}$ e $\varnothing 5 \times 10\text{cm}$) para verificar se o tamanho das microfibras favoreceria seu possível alinhamento utilizando corpos de prova com estas dimensões. Foi verificado que a média de resistência à flexão para os corpos de prova de $2 \times 2 \times 10\text{cm}$ foi de 10,9 MPa e para os corpos de prova de $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ foi de 11,1 MPa. Análise estatística – realizada por ANOVA – mostrou não haver diferença significativa nos resultados obtidos. Dessa maneira, o procedimento experimental adotado foi mantido, utilizando corpos de prova menores para as pastas e os maiores para as argamassas, como forma de otimizar o consumo dos materiais.

Figura 5: Modelo experimental adotado.



3.1 MATERIAIS

3.1.1 Metacaulim

O metacaulim utilizado no estudo foi produzido à partir da calcinação em laboratório do caulim, em uma mufla da marca Linn Elektro Therm GmbH, modelo KK260, que atinge a temperatura máxima de 1340 °C. O processo de calcinação foi fixado com uma taxa de aquecimento de 10°C/min até 900°C, mantendo nessa temperatura com patamar de uma hora, e posterior resfriamento lento natural.

3.1.2 Resíduo do polimento de placas cerâmicas

O resíduo do polimento do porcelanato foi coletado na empresa Poligress Porcelanato. Sua composição química e granulometria podem ser verificadas nas Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente. Esse resíduo já foi caracterizado por Steiner et al. (2015), sendo seco em estufa depois de coletado na forma úmida, destorroado e peneirado para melhorar a homogeneidade do material.

Tabela 2: Composição química do RPP.

Elementos	Típico (%)
SiO₂	66,7
Al₂O₃	20,40
Na₂O	3,05
CaO	2,41
K₂O	2,36
Fe₂O₃	1,67
MgO	1,10

Fonte: Steiner *et al.*, 2015.

Tabela 3: Granulometria do RPP.

Diâmetro das partículas (Ø)	
Ø a 10%	2,05 µm
Ø a 50%	10,10 µm
Ø a 90%	31,87 µm
Ø médio	13,74 µm

Fonte: Steiner *et al.*, 2015.

3.1.3 Ativadores alcalinos

Como ativadores alcalinos foram utilizados o silicato de sódio (SS) e o hidróxido de sódio (NaOH). O primeiro foi fabricado pela empresa Manchester, cujas propriedades químicas estão apresentadas na Tabela 4. O NaOH foi adquirido da empresa Neon, tem grau de pureza de 98%, no formato de micro pérolas.

Tabela 4: Propriedades químicas do silicato de sódio.

Elemento	Faixa (%)
SiO₂	27,5 – 30
Na₂O	8,20 – 8,90
H₂O	64,3 – 61,1

Fonte: Manchester Chemical, 2016.

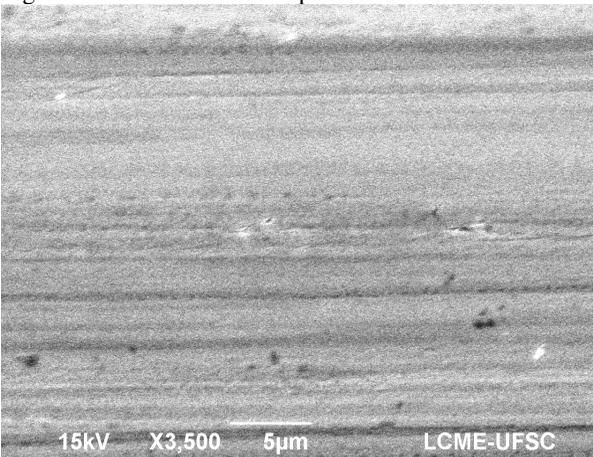
3.1.4 Microfibras metálicas

As microfibras utilizadas apresentam dimensões de 13mm x 200µm (Figura 6), fator de forma igual a 65, e, denominação comercial OL 13/.20 (fabricante Arcelor Mittal / Dramix®). Na figura 7 pode ser observada uma micrografia da superfície da microfibra, mostrando que não é totalmente lisa. Análise química (EDS), realizada em dois locais, mostram a presença de Zn, Cu e Fe nos percentuais aproximados de 75%, 20% e 5%, respectivamente.

Figura 6: Microfibras utilizadas.



Figura 7: MEV mostrando superfície da microfibra.



3.1.5 Areia

Para as misturas de argamassa foi utilizada areia padrão brasileira produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas(IPT) (), composta pelas quatro faixas granulométricas (0,15mm, 0,3mm, 0,6mm e 1,2mm).

3.2 Procedimento de Mistura

O procedimento de mistura das argamassas foi realizado na seguinte sequência: i) preparo da solução ativadora, misturando o silicato de sódio e o NaOH em um agitador mecânico por 2 minutos; ii) mistura da solução ativadora com o metacaulim e RPP (previamente misturados por 2 min) em um agitador mecânico durante 4 minutos (marca Tedemix, modelo ML-03, rotação de 1200rpm); iii) adição da areia e mistura durante mais dois minutos; iv) adição e mistura das microfibras por mais 2 minutos.

Durante o processo de mistura do hidróxido de sódio no silicato de sódio, há aquecimento dessa solução, essa temperatura é controlada com termômetro e esperado o resfriamento natural até a temperatura de 23°C, para que a temperatura elevada nessa mistura não interfira no processo de reação quando misturado o pó ao líquido.

A moldagem das amostras foi feita em camadas, de modo que houvesse boa compactação e dispersão das microfibras. Após isso, as amostras foram vedadas e curadas em estufa à 23°C, até a data de ruptura.

3.3 Caracterização

Nos subitens a seguir são especificados os ensaios realizados e as especificações normativas.

3.3.1 Consistência

Para medida da consistência foi realizado o ensaio de mini abatimento (ensaio de Kantro) nas pastas e Índice de Consistência (ABNT NBR 13276:2002) nas argamassas. O ensaio de Kantro é também conhecido como mini slump, e apesar de não ter uma referência normativa, é frequentemente utilizado em pesquisas.

3.3.2 Difração de Raios X

As medidas de Difração de Raios X (DRX) do metacaulim foram realizadas em um difratômetro MiniFlex II, da Rigaku, disponível no NanotecLab da UFSC. O equipamento opera com ânodo de cobre ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$), 30 kV e corrente de 15 mA. A varredura será realizada no intervalo de 3° a 90° (2 θ), com taxa de 3°/min.

3.3.3 Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

Os valores de absorção de água, índice de vazios e massa específica das amostras de diferentes traços foram determinados segundo o que preconiza a norma ABNT NBR 9778 (2005), com a verificação de peso seco, submerso, saturado e após 5h em estado de ebulição.

3.3.4 Resistência à compressão nas amostras cilíndricas

Os ensaios de compressão nas amostras cilíndricas, corpos de prova Ø20x40mm, foram realizados nas amostras de pastas na idade de 28 dias, sendo retificadas as amostras em uma cortadeira metalográfica, da marca Bluehler, com um disco de corte diamantado.

As amostras foram ensaiadas no Nanotec, em uma prensa universal da marca Instron, modelo 5569, com uma escala de velocidade de 0,005 a 5mm/min, de acordo com o que estabelece a norma ASTM C-1231 (2010), que determina uma taxa de carregamento de 0,50 MPa/s, calculando a resistência à compressão das amostras pela Equação 2:

$$R_c = \frac{F_c}{A_{cp}} = \frac{F_c}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

- R_c: resistência à compressão;
- F_c: carga de ruptura compressiva;
- A_{cp}: área do corpo de prova;
- d: diâmetro.

3.3.5 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico foi realizado nas amostras prismáticas, em um equipamento da marca Sonelastic® da ATCP Engenharia, disponível no Nanotec, sendo um ensaio não destrutivo que determina o valor de módulo a partir de frequências naturais adquiridas através da técnica de excitação por impulso, e baseia-se na norma ASTM-E1876 (1999).O equipamento é direcionado para amostras de tamanho pequeno com comprimento entre 20 e 100mm, e é composto por captadores (unidirecional pedestal CA-EL-

SB), suportes (SB-AP) e pulsador (manual PM-HL). O método de ensaio consiste em um pequeno impacto na extremidade do corpo de prova, sendo que há um captador acústico localizado no ponto médio do comprimento da amostra, para captação do sinal.

Esse sinal obtido passa por um processamento de FFT (*Fast Fourier Transform*) para obter os picos de frequências naturais de vibração. A resposta acústica é resultado do impacto no corpo de prova e é originada pelas frequências naturais de vibração. Sendo que essas dependem da massa, geometria, dimensões e principalmente do módulo de elasticidade de cada corpo de prova (ATCP Engenharia Física, 2014).

O modo de vibração utilizada nesse ensaio foi o de vibração flexional, pois permite o cálculo do módulo de elasticidade a partir do uso de uma razão de Poisson, que pode ser calculado pela Equação 3, para corpos de prova com seção retangular:

$$E = 0,9465 \left(\frac{mff^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T1 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

- E: módulo de elasticidade (GPa);
- m: massa (g);
- L: comprimento (mm);
- b: largura (mm);
- t: espessura (mm);
- ff: frequência de ressonância fundamental flexional (Hz);
- T1: fator de correção para o modo fundamental flexional, que depende da razão de Poisson (μ) e da razão de aspecto da barra, dado por:

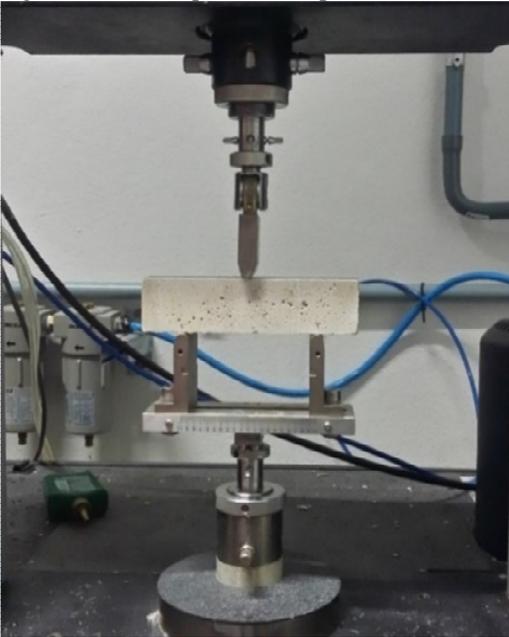
$$T1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L} \right)^4 - \left[\frac{8,340 \cdot (1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \cdot \left(\frac{t}{L} \right)^4}{1,000 + 6,338 \cdot (1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \cdot \left(\frac{t}{L} \right)^2} \right]$$

Equação 4

3.3.6 Resistência à Tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão (ensaio destrutivo) foi realizado nas amostras prismáticas (Figura 8) das pastas e argamassas após a realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, em uma prensa universal da marca Instron, modelo 5569, com uma escala de velocidade de 0,005 a 5mm/min, disponível no Nanotec. Seguindo as normativas estabelecidas na NBR 12142 (2010), com uma velocidade de carregamento de 0,9 à 1,1 MPa/min, sendo que o cálculo da resistência depende do local de ruptura da amostra.

Figura 8: Amostra posicionada para ensaio de flexão.



3.3.7 Resistência à compressão nas amostras prismáticas

Após a realização do ensaio de tração na flexão, foram realizados ensaios de compressão nas duas partes provenientes do primeiro ensaio, conforme apresentado na Figura 9, de acordo com as especificações da

ABNT NBR13279 (2005), sendo ensaiadas em uma prensa Shimadzu, modelo UH-2000kN.

Figura 9: Amostra posicionada para ensaio de compressão



3.3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

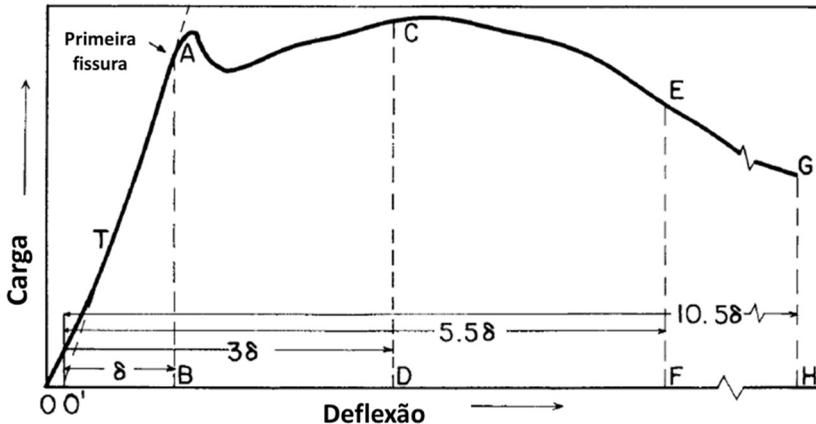
O ensaio de MEV consiste em uma emissão de feixes de elétrons em taxas de varrimentos definidas, com o objetivo de formar imagens tridimensionais da superfície do material ensaiado. O procedimento foi realizado nas fibras e nas amostras de argamassa com maior teor de microfibras, para observar a característica entre a interface pasta-fibra. O equipamento utilizado é da marca Shimadzu®, modelo *SSX-550*, e as amostras após retificadas tiveram as superfícies recobertas por uma camada de ouro, com espessura entre 10 à 20 nm, para aumentar a condutividade elétrica superficial, uma vez que são amostras não condutoras.

3.3.9 Tenacidade

Para cálculo da tenacidade nas argamassas e contribuição das microfibras nessa propriedade do material, foi utilizado como parâmetro a ASTM C 1018, que regulamenta o cálculo de tenacidade para concretos, uma vez que não há norma específica para argamassas.

Conforme o especificado pela norma, os índices de tenacidade do material são calculados através da divisão do valor obtido para área abaixo da curva para determinado valor de fissura pelo valor da área abaixo da curva da primeira fissuração (δ). Os índices I_5 , I_{10} e I_{20} são calculados através da relação entre a área de $3x\delta$, $5,5x\delta$ e $10,5x\delta$ (respectivamente), com a área da primeira fissuração, conforme ilustra a Figura 10. A obtenção de valores de ordem 5 para I_5 , 10 para o I_{10} , e assim por diante, indicam que o material possui comportamento elasto-plástico ideal, são valores adimensionais que permitem avaliar o comportamento do conjunto fibra e matriz.

Figura 10: Curva carga x deslocamento da ASTM C 1018.



Fonte: Adaptado de ASTM C 1018.

Com os resultados obtidos para o índice de tenacidade (I), são calculadas as relações de tenacidade de acordo com o que preconiza a norma ASTM C 1018, pela Equação 5. Um material elasto-plástico perfeito apresentará relações de tenacidade da ordem de 100.

$$R_{a,b} = \frac{100}{b-a} \times (I_b - I_a)$$

Equação 5

Onde:

$R_{a,b}$ = relação de tenacidade entre os índices com referência “a” e “b”.

I_a e I_b = índices de tenacidade com referência “a” e “b”.

3.3.10 Análise Estatística dos Resultados

Para compreensão dos resultados obtidos, foi realizada análise de variância (ANOVA), de maneira a determinar se as variações e os efeitos são significativos. Para tal, foi utilizado o programa *Statistica 7.0* da Statsoft®.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

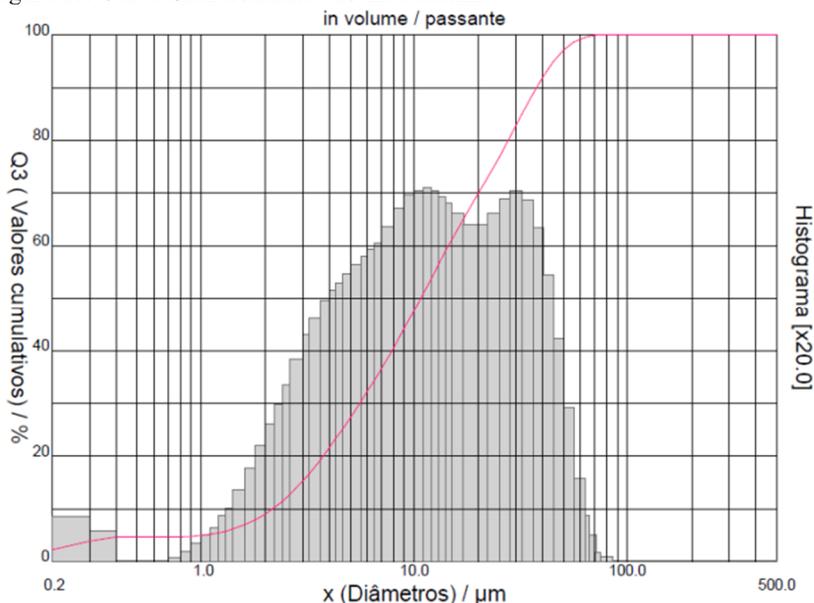
4.1 Caracterização do Metacaulim

O metacaulim obtido no processo de calcinação anteriormente descrito, foi caracterizado através de espectrometria de fluorescência de raios-X (Tabela 5), determinação da distribuição granulométrica (Figura 11) e da difratometria de raios-X (Figura 12).

Tabela 5: Propriedades químicas do Metacaulim

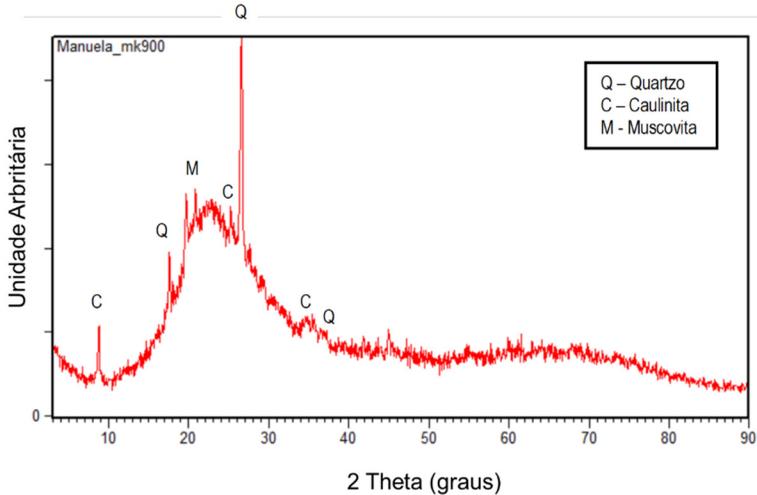
Elemento	Teor (%)
SiO₂	53,90
Al₂O₃	44,37
Fe₂O₃	0,31
K₂O	0,67
MgO	0,05
P₂O₅	0,02
TiO₂	0,01
Perda ao fogo	0,59

Figura 11: Curva Granulométrica do metacaulim.



Na difratometria de raios-X, foram identificados quartzo, caulinita e muscovita, com picos de cristalinidade e um halo amorfo entre 20 e 30° (Figura 12).

Figura 12: DRX da amostra de Metacaulim.

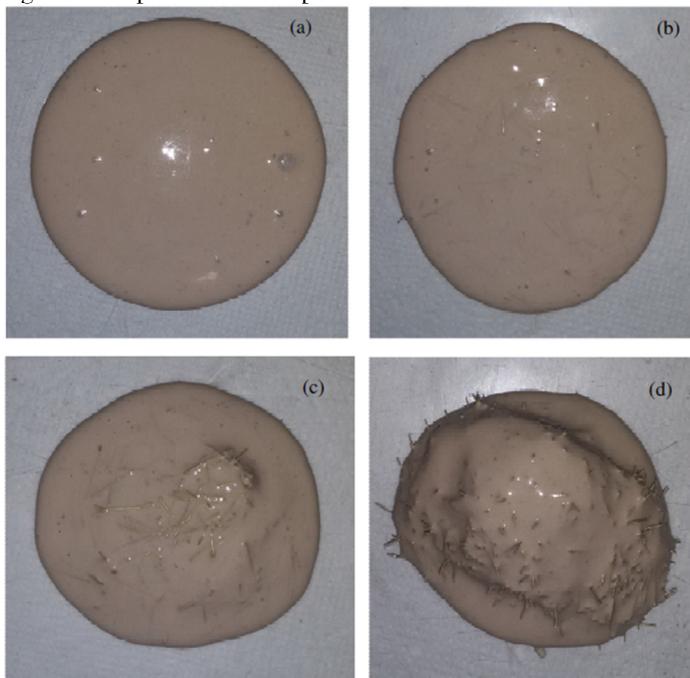


4.2 Pastas com Microfibras Metálicas

As microfibras metálicas foram aplicadas inicialmente em pastas de cimento álcali ativado, com objetivo de verificar seu comportamento, quanto à dispersão e seu potencial para alteração das propriedades mecânicas.

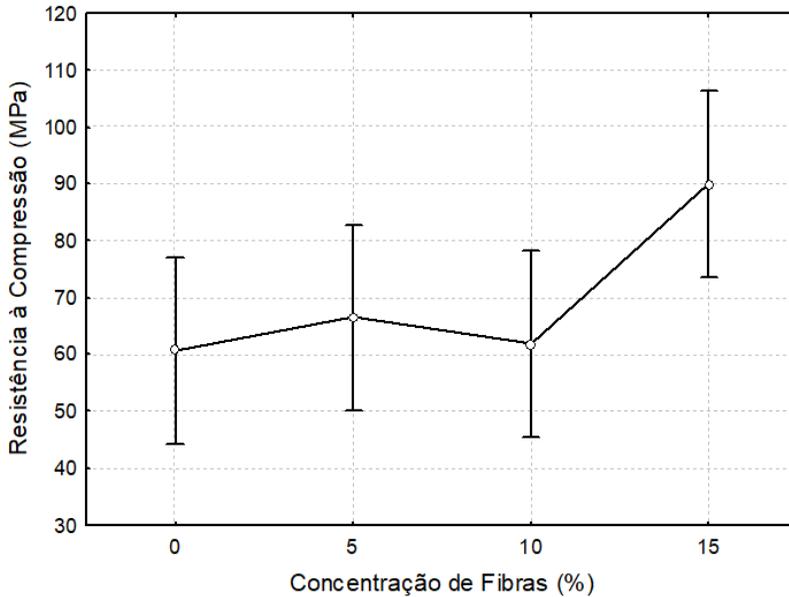
Considerando a concentração das fibras na consistência das pastas, pode-se verificar uma redução no espalhamento (mini slump) quando é aumentada a concentração de fibras (Figura 13). As amostras apresentaram espalhamento médio de 91mm (a), 89mm (b), 81mm (c) e 67mm (d) para a pasta de referência e com os teores de 5%, 10% e 15% de microfibras, respectivamente.

Figura 13: Espalhamento das pastas no estado fresco.



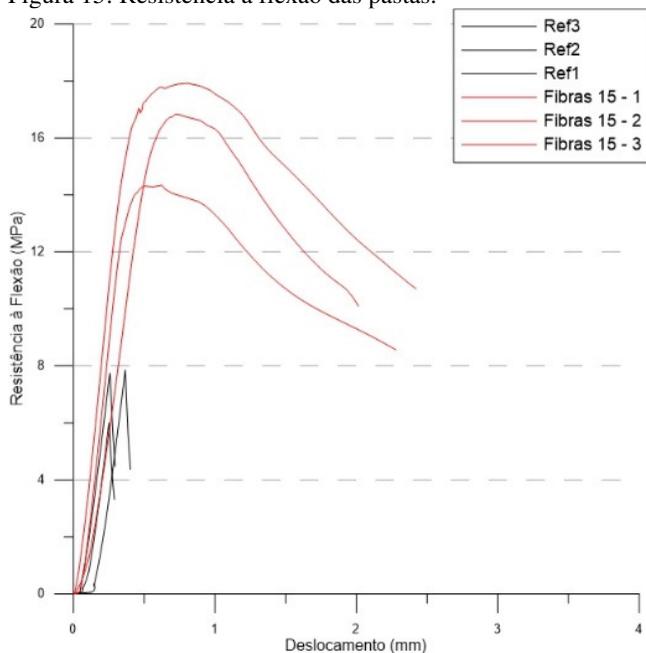
Considerando o comportamento mecânico à compressão axial (Figura 14), pode-se verificar que a fibra metálica pouco influencia nas adições de 5% e 10% (1,15% e 2,30% em volume, respectivamente), sendo que na maior adição, de 15% em massa (3,45% em volume), o aumento de resistência foi de aproximadamente 48% em relação à referência sem microfibras. Segundo Mehta e Monteiro (2014) o acréscimo de fibras de aço no concreto em teores inferiores a 2% em volume, exerce pouca influência na resistência à compressão. No entanto para concretos de alta resistência, é verificado aumento na resistência à compressão para concentração de 0,5% de microfibras (Su et al., 2016). Para Su et al. (2016) ao utilizarem o teor máximo de 2,5% de microfibras de aço, de dois tipos, com fator de forma de 50 (6 mm×0,12 mm) e 125 (15 mm×0,12 mm), atingiram uma resistência à compressão de 114 MPa e 145 MPa, respectivamente.

Figura 14: Resistência à compressão das pastas.



Considerando a resistência à flexão, medida apenas na pasta de referência e na concentração máxima das fibras (melhor resultado à compressão), foi verificado um aumento significativo na resistência à flexão, de aproximadamente 8 MPa para 16 MPa (Figura 15). Este aumento da resistência à flexão é provocado pela resistência à propagação de fissuras provocadas pelas fibras, e, dependem da aderência fibra-matriz e da sua geometria.

Figura 15: Resistência à flexão das pastas.



4.3 Argamassas com Microfibras Metálicas

4.3.1 Consistência

Pode ser verificado na Figura 16- ensaio de *flowtable* com 30 quedas – para composição de argamassa 1:4 (aglomerante:areia) com o teor de 30% em massa de microfibras (1,35% em volume), um espalhamento médio de 26 cm. Esta plasticidade é considerada adequada para aplicação de argamassas, garantindo uma adequada compactação das amostras, sendo que nos outros traços 1:2 e 1:3, com teor de 30% de microfibras, apresentou espalhamento médio de 23cm e 24cm, respectivamente.

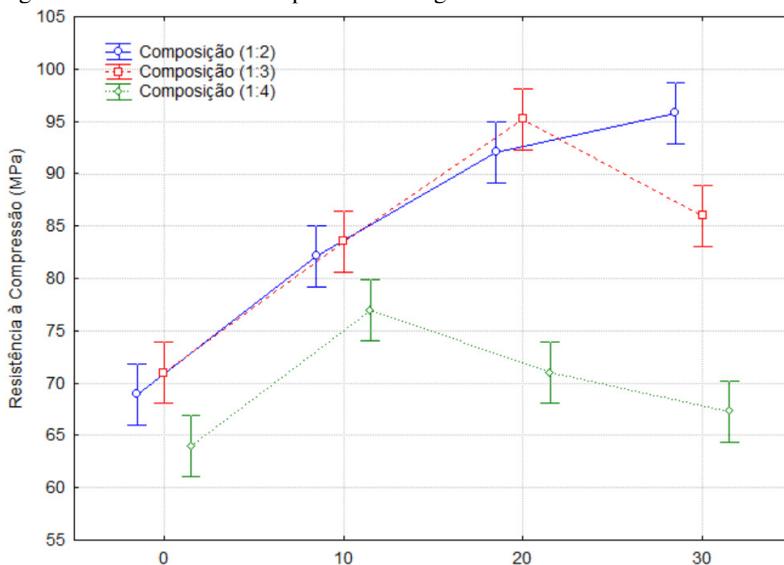
Figura 16: Ensaio de *flowtable* em argamassa (1:4) com 30% de microfibras.



4.3.2 Resistência à compressão

Nas argamassas, foi observado um comportamento mecânico muito próximo ao observado nas pastas (Figura 17), com um aumento significativo da resistência nos teores de 10% (0,45 em volume) e 20% (0,90% em volume) de fibras e um comportamento constante para concentração de 30% de fibras (1,35% em volume). Este aumento foi de aproximadamente 15% e 25% para os teores de fibras de 10% e 20%, atingindo resistências de 83 MPa e 95 MPa, respectivamente. As composições 1:2 e 1:3 apresentaram resultados muito próximos, já a composição 1:4 mostrou resultados de resistência um pouco inferiores. A menor influência da concentração do cimento geopolimérico em composições de argamassas e concretos, é uma de suas características, pois devido a sua maior resistência à tração e aderência, tem menor influência da concentração de agregados (UEN *et al.*, 2012; TEMMUJING *et al.*, 2010).

Figura 17: Resistência à compressão das argamassas.



O acréscimo de resistência se deve ao efeito de compacidade da matriz cimentícia com a presença de fibras, confirmando o que já foi constatado por Sukontasukkul *et al.* (2018), que apresentou acréscimo nas resistências de 35 para 60 MPa, coerentes com os observados por Vijai, Kumutha e Vishnuram (2012) que no melhor caso obtiveram acréscimo de 24%. As microfibras preenchem possíveis vazios na matriz, e absorvem parte da tensão e deformação aplicada ao material.

Pode ser verificada na Tabela 6, a análise estatística por análise de variância (ANOVA), sendo verificado no valor p , o efeito significativo das variáveis em análise.

Tabela 6: ANOVA para os resultados de resistência à compressão.

Variável	SQ	gL	MQ	Teste F	P-value
Concentração de Fibras (%)	1717,1	3	572,4	95,41	0,0000 00
Composição	1691,4	2	845,7	140,97	0,0000 00
Concentração de Fibras (%) * Composição	754,5	6	125,7	20,96	0,0000 00
Erro	144,0	24	6,0		

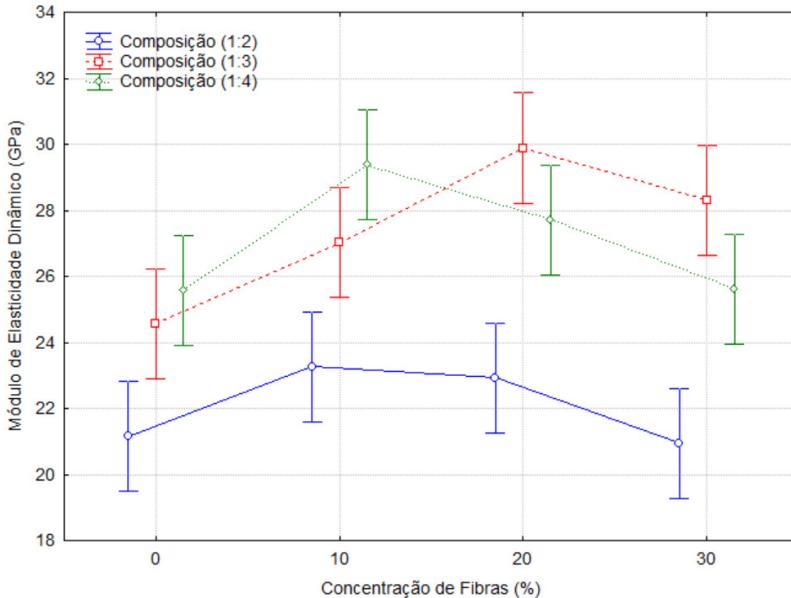
SQ: Soma dos Quadrados; gL: graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados.

Fonte: Statistica 7.0.

4.3.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Os resultados do módulo de elasticidade dinâmico (Figura 18) mostram o mesmo comportamento dos resultados de resistência à compressão, ou seja, apresentam uma tendência de aumento até o teor de 20%. A tendência de aumento do módulo de elasticidade, pode ser explicada, pela utilização de um material – as microfibras metálicas – com maior módulo de elasticidade, com valores aproximados de $178,2 \pm 2,55$ GPa (CESARI, PELISSER E MICHEL, 2017), e, seu decréscimo, associado à presença de eventual microporosidade, durante a compactação com maiores concentrações de fibras, devido à possível aglomeração e presença de vazios, que dificultam uma correta acomodação das fibras na matriz (SUKONTASUKKUL *et al.* (2018)).

Figura 18: Módulo de Elasticidade Dinâmico das argamassas.



Os resultados foram analisados estatisticamente (ANOVA), sendo verificado no valor p , o efeito significativo das variáveis em análise (Tabela 7).

Tabela 7: ANOVA para os resultados de módulo de elasticidade.

Variável	SQ	gL	MQ	Teste F	p-value
Concentração de Fibras (%)	55,9	3	18,6	9,53	0,000251
Composição	216,4	2	108,2	55,34	0,000000
Concentração de Fibras (%) * Composição	32,6	6	5,4	2,78	0,033696
Erro	46,9	24	2,0		

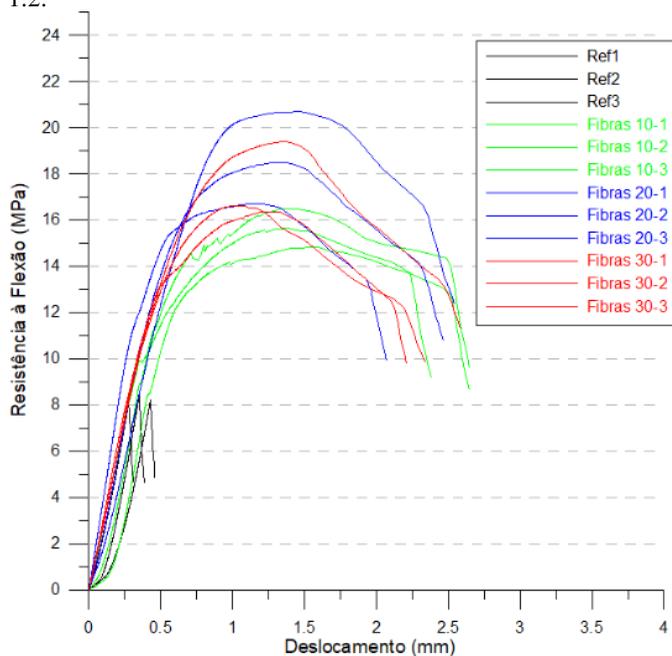
SQ: Soma dos Quadrados; gL: graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados.

Fonte: Statistica 7.0.

4.3.4 Resistência à tração na flexão

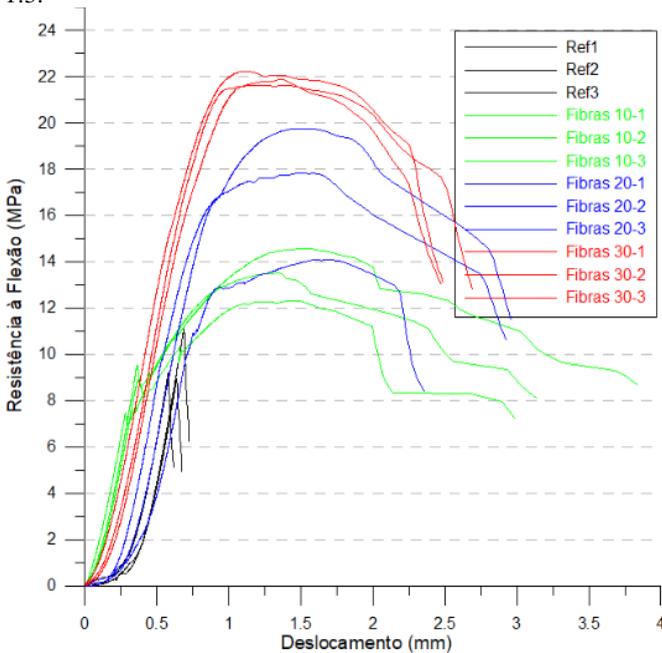
Os resultados de resistência à tração na flexão das argamassas mostraram acréscimo com a adição de microfibras quando comparados à referência (8,2 MPa). No traço 1:2, apresentado na Figura 19, a resistência apresentou aumento de 72% (14,1 MPa), 98% (16,20 MPa) e 77% (14,5 MPa) nos teores de 10%, 20% e 30%, respectivamente.

Figura 19: Resistência à Flexão *versus* Deslocamento das argamassas do traço 1:2.



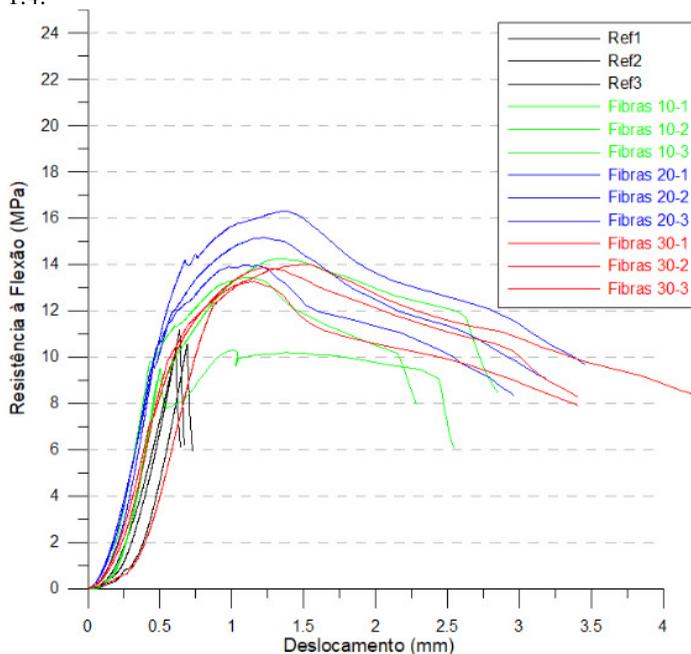
Quando adicionadas as microfibras no traço 1:3, o teor de 10% apresentou pequeno acréscimo no resultado (+4%), enquanto que nos teores maiores de 20 e 30% esse ganho na resistência foi maior (+52% e +103%, respectivamente), como pode ser observado na Figura 20. Os valores médios de resistência à flexão para a referência e os três teores são de 9,7 MPa, 10,1 MPa, 14,8 MPa e 19,8 MPa, respectivamente.

Figura 20: Resistência à Flexão *versus* Deslocamento das argamassas do traço 1:3.



No último traço (1:4), nos teores de 10% e 30% não houve aumento significativo na resistência à flexão, mas apresentou aumento da capacidade de deformação após o aparecimento das primeiras fissuras (Figura 21). O teor de 20% apresentou um pequeno acréscimo de 7,9% na resistência. Os valores médios de resistência à flexão para a referência e os três teores são de 10,6 MPa, 10,8 MPa, 11,5 MPa e 10 MPa, respectivamente.

Figura 21: Resistência à Flexão *versus* Deslocamento das argamassas do traço 1:4.



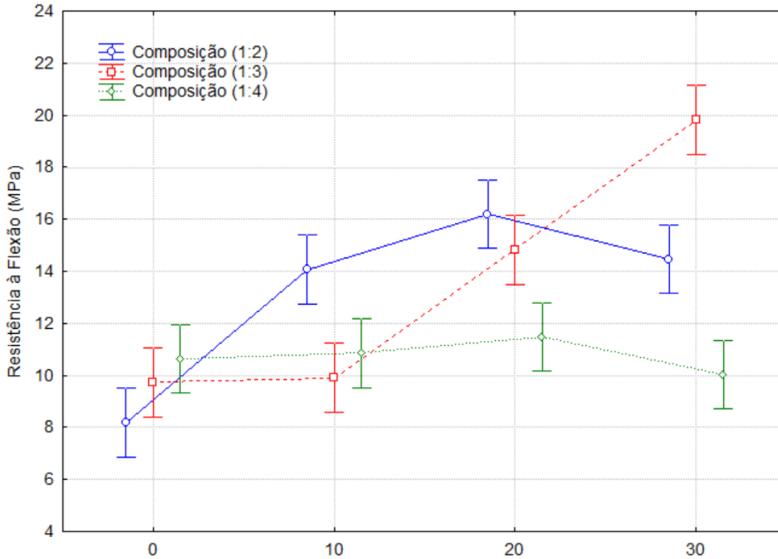
Na Tabela 8, pode ser observado um resumo percentual dos aumentos da resistência à flexão, para as três composições utilizadas.

Tabela 8: Variação nas resistências à flexão nos três traços de argamassa.

Composição	0% fibras	10% fibras	20% fibras	30% fibras
1:2	100%	172 %	198%	177%
1:3	100%	104 %	152%	203%
1:4	100%	102 %	108%	94 %

Na Figura 22 podem ser observados os resultados médios da resistência à flexão, onde verifica-se um maior aumento até a concentração de 20% de fibras, e um comportamento mais variável considerando o teor máximo empregado (ao menos no traço 1:4). O decréscimo nos teores mais elevados de adição de microfibras nos traços 1:2 e 1:4 pode ser atribuído à possível aglomeração de microfibras na matriz e problemas na compactação das amostras.

Figura 22: Comparativo das resistências à flexão das argamassas.



Os resultados obtidos são condizentes com os já encontrados por outros autores, como Vijai, Kumutha e Vishnuram (2012), que obtiveram um aumento de 44% em seu melhor resultado, quando adicionaram um teor de 0,75% de microfibras metálicas (fator de forma 70) em um geopolímero composto por 90% de cinzas volantes e 10% de cimento Portland, atingindo no melhor resultado de resistência à flexão 8,4 MPa. Além disso, em seus estudos, Bernal *et al.* (2010), utilizando fibras de aço em um geopolímero de escória de alto forno, elevaram a resistência de tração à flexão de 5,80 para 8,86 MPa na idade de 28 dias, com incremento de 53%, comparando um teor de adição de 2% de fibras à referência, sendo microfibras de aço com fator de forma 25. Concomitante a isso, os resultados obtidos no presente estudo apresentaram um incremento de resistência próximos à 100% em alguns casos, mostrando desempenho satisfatório das adições de microfibras.

Em análise estatística realizada utilizando análise de variância (ANOVA), foi avaliado o efeito significativo de duas variáveis, bem como o efeito de interação entre elas, a concentração de microfibras e a composição (Tabela 9).

Tabela 9: ANOVA para os resultados de resistência à flexão.

Variável	SQ	gL	MQ	Teste F	p-value
Concentração de Fibras (%)	158,569	3	52,586	42,599	0,000000
Composição	56,902	2	28,451	22,930	0,000003
Concentração de Fibras (%) * Composição	160,384	6	26,731	21,543	0,000000
Erro	29,779	24	1,241		

SQ: Soma dos Quadrados; gL: graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados.

Fonte: Statistica 7.0.

As composições contendo microfibras têm maior capacidade de suporte de carga e maior deformação após a propagação de fissuras (Figura 23), pois as fibras, quando incorporadas à matriz cimentícia, absorvem parte da tensão de tração e o compósito ainda é capaz de absorver uma tensão adicional.

As amostras de referência apresentam ruptura brusca, uma vez que na ausência de microfibras não apresentam fissuração precedente, ocorrendo a deformação seguida de ruptura (Figura 24), tal comportamento já havia sido observado por Alomayri (2017). Fibras agem como ponte de transferência de tensão através das fissuras, possibilitando que o concreto apresente maiores deformações na carga de pico, bem como tenha maior capacidade de carga pós-fissuração, ou seja, há aumento da ductilidade e da resistência residual à tração do material (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 23: Amostra com 30% de microfibras depois de rompida.

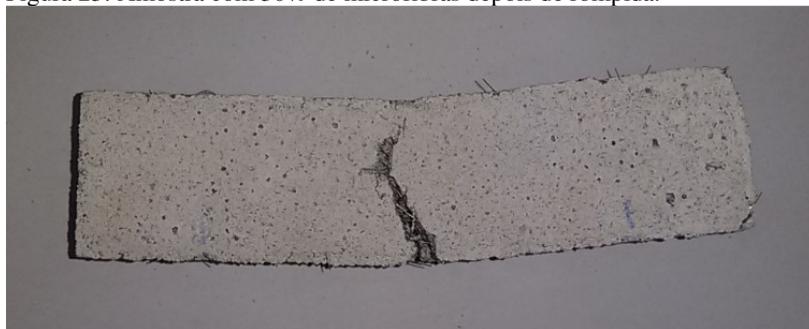


Figura 24: Amostra de referência depois de rompida.



São apresentadas nas Figura 25, Figura 26 e Figura 27, as curvas médias de resistência à flexão *versus* deslocamento, para os três traços (1:2, 1:3 e 1:4), em que é possível observar a capacidade de suporte da carga após as primeiras fissuras e melhora do desempenho das amostras com adição de microfibras metálicas.

Figura 25: Curva Média Resistência à Flexão *versus* Deslocamento traço 1:2

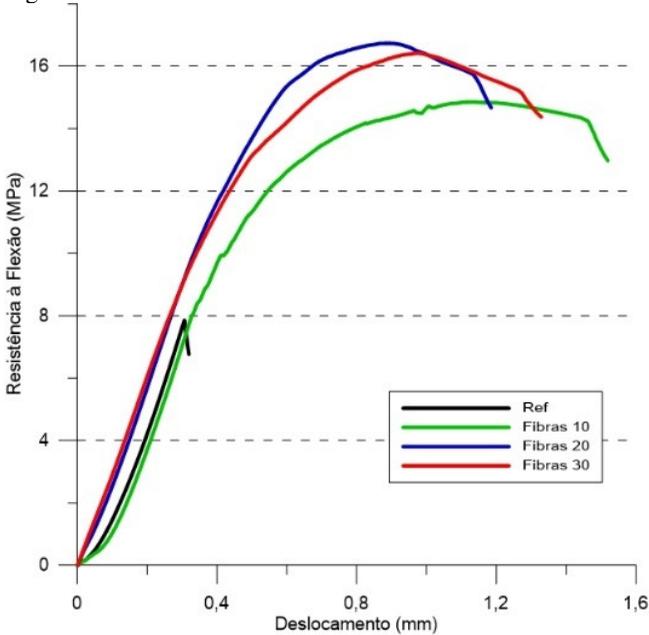


Figura 26: Curva Média Resistência à Flexão versus Deslocamento traço 1:3

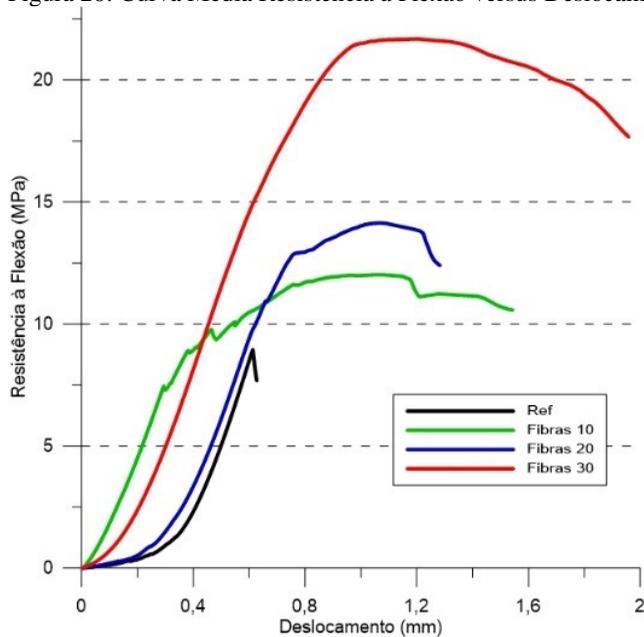
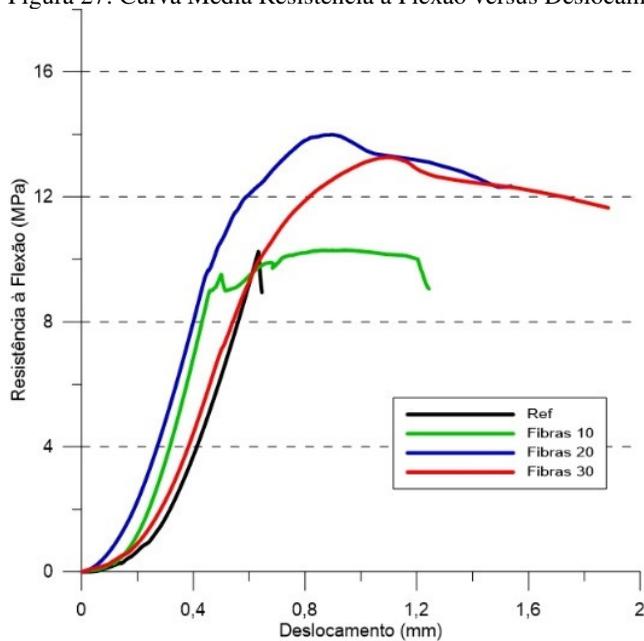


Figura 27: Curva Média Resistência à Flexão versus Deslocamento traço 1:4



Complementarmente, a resistência à flexão, considerando as curvas de carga *versus* deslocamento, foi calculada a tenacidade das composições em análise, como pode ser verificado na Tabela 10.

Na análise da tenacidade do material, foi determinada a primeira fissuração (δ) e determinada a área da curva abaixo dela bem como das áreas subsequentes, conforme já foi apresentado na Figura 10. Como base para o cálculo, foram utilizados os dados das curvas de carga *versus* deslocamento, já apresentados nas Figuras 18, 19 e 20. A partir dos dados disponíveis, foram calculados os índices I_5 , I_{10} e $R_{5,10}$ que estão apresentados na Tabela 10. Nos casos em que não houve longa deformação, não foi possível calcular o I_{10} e os índices posteriores, assim como nas amostras de referência que apresentaram ruptura brusca na primeira fissuração.

Com os resultados obtidos, é possível concluir que a presença da microfibrilha influencia no comportamento do material, sendo que nos teores de 30% nos três traços o comportamento está mais próximo do elasto-plástico pois, apresentam valores mais próximos de 5 e 10 para os índices I_5 e I_{10} , respectivamente, sendo considerado esse o teor ótimo de adição. Os benefícios proporcionados à tenacidade do material pela adição da microfibrilha na matriz são coerentes com os encontrados na literatura, pois o desenvolvimento mecânico está sujeito à contribuição do alto módulo de elasticidade das fibras de aço (Bernal *et al.*, 2010).

Tabela 10: Cálculo dos índices de tenacidade.

Amostras			Áreas				Índices		
Traço	TF	CP	δ	OAB (δ)	OACD (3δ)	OAEF (5,5 δ)	I 5	I 10	R 5,10
1:2	10	CP1	0,4231	1,2363	12,2672	26,2143	9,922511	21,203834	225,626466
	10	CP2	0,4575	2,2231	15,8216	30,3499	7,116909	13,652062	130,703072
	10	CP3	0,3334	1,6032	10,1375	22,7178	6,323291	14,170284	156,939870
	20	CP1	0,348	1,6995	12,5745	27,995	7,398941	16,472492	181,471021
	20	CP2	0,54169	3,43997	23,4397	-	6,813926	-	-
	20	CP3	0,33475	2,154	12,4863	25,1619	5,796797	11,681476	117,693593
	30	CP1	0,30881	1,4	10,0222	21,9895	7,158714	15,706786	170,961429
	30	CP2	0,38338	2,1383	14,6259	31,5511	6,839966	14,755226	158,305196
	30	CP3	0,30369	1,4306	9,6251	21,3443	6,728016	14,919824	163,836153
1:3	10	CP1	0,39831	1,0516	11,2313	24,3622	10,680202	23,166793	249,731837
	10	CP2	0,46887	2,4279	16,3588	34,2432	6,737839	14,104041	147,324025
	10	CP3	0,26475	1,0097	7,1092	16,8624	7,040903	16,700406	193,190056
	20	CP1	0,34994	1,7195	12,6732	27,995	7,370282	16,280896	178,212271
	20	CP2	0,54425	3,4741	23,4397	-	6,746985	-	-
	20	CP3	0,32694	2,0624	12,1278	25,1619	5,880431	12,200301	126,397401
	30	CP1	0,36144	1,9185	12,5658	26,2136	6,549805	13,663591	142,275736
	30	CP2	0,45494	2,9724	18,5965	37,3423	6,256392	12,563013	126,132418
30	CP3	0,37881	2,1936	13,1943	26,9981	6,014907	12,307668	125,855215	
1:4	10	CP1	0,50187	2,0021	15,6065	31,4349	7,795065	15,700964	158,117976
	10	CP2	0,44837	2,1964	15,4684	33,0705	7,042615	15,056684	160,281370
	10	CP3	0,34125	1,6784	10,3911	22,7178	6,191075	13,535391	146,886320
	20	CP1	0,34556	1,6746	12,3887	27,995	7,398005	16,717425	186,388391
	20	CP2	0,55625	3,636	24,9277	-	6,855803	-	-
	20	CP3	0,292	1,6671	10,2951	21,7547	6,175454	13,049427	137,479455
	30	CP1	0,31137	1,4238	10,0904	21,9895	7,086950	15,444234	167,145667
	30	CP2	0,38888	2,1985	15,0205	31,5512	6,832158	14,351239	150,381624
	30	CP3	0,30189	1,4723	9,5486	21,3443	6,485499	14,497249	160,235006

1.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para análise da microestrutura, foi escolhida uma amostra de argamassa com teor de 30% de microfibras do traço 1:3, que apresentou melhor resultado à flexão (20MPa). Nas Figuras 28 e 29 é possível observar a interface microfibras/pasta e na Figura 30 a microestrutura microfibras-matriz cimentícia vista em corte.

Figura 28: Microscopia eletrônica de varredura da interface microfibras-pasta.

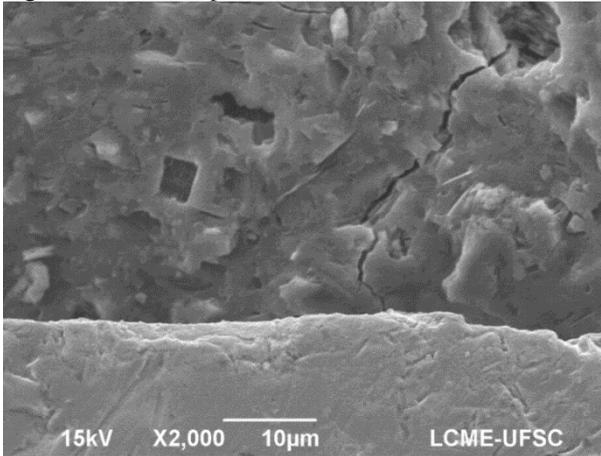


Figura 29: MEV da interface fibra/matriz.

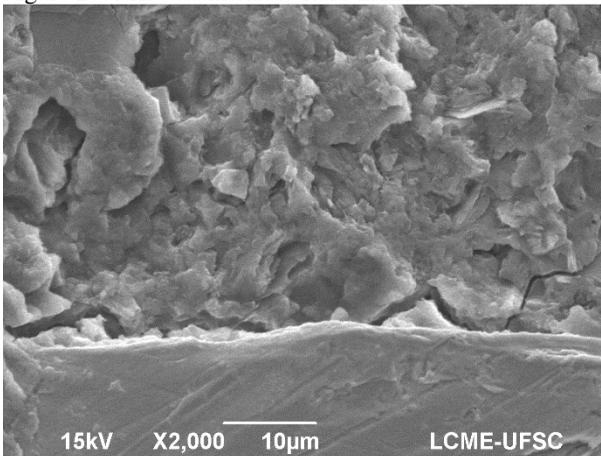
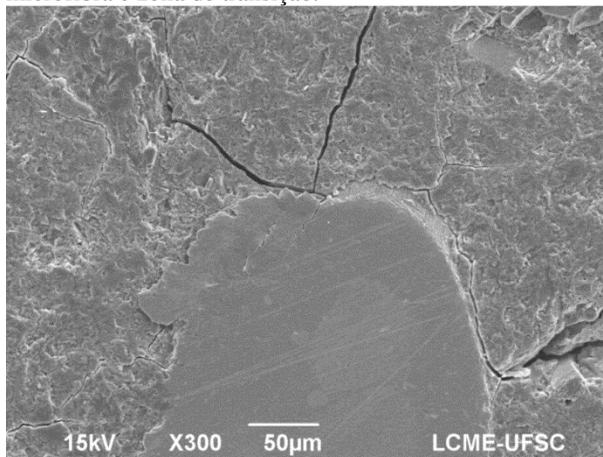


Figura 30: Microscopia eletrônica de varredura da sessão transversal da microfibrã e zona de transiçãõ.

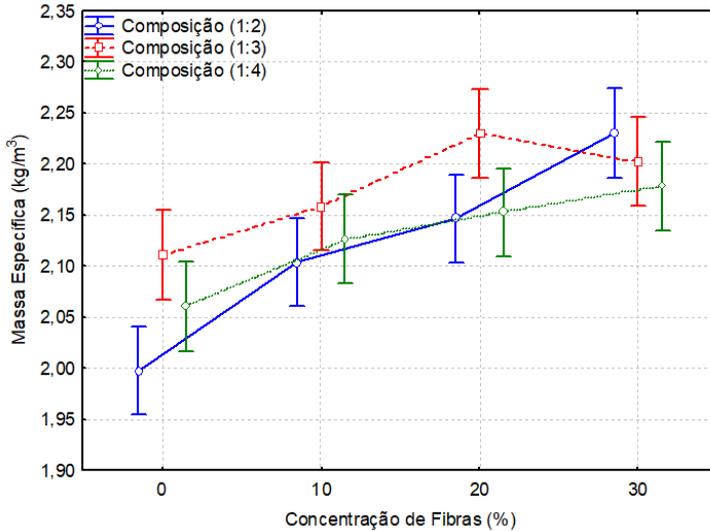


Como observado nas figuras, a microfibrã apresenta boa aderência na zona de transição com a pasta, e a matriz cimentícia se mostra compacta, fatores que justificam o bom desempenho obtido na resistência à tração na flexão nesse tipo de amostra. É possível notar uma pequena fenda próxima a microfibrã, resultado semelhante foi encontrado por Puertas *et al.* (2006), e pode ser explicado pelo processo de reação que controla a secagem e endurecimento das matrizes alcalinas, onde uma pequena retração justifica o aparecimento de tal fenômeno. Além disso, nos seus estudos Xu, Deng e Chi (2017), quando utilizaram microfibrãs metálicas em uma matriz de cimento Portland, constataram uma alta porosidade na interface de ligação da fibra e matriz, devido à reação da água com o metal, apresentando oxidação na superfície, o que não acontece com as microfibrãs quando incorporadas à matriz de geopolímero, pois apresentam interface densa e compacta.

1.2.2 Absorção de Água e Massa Específica

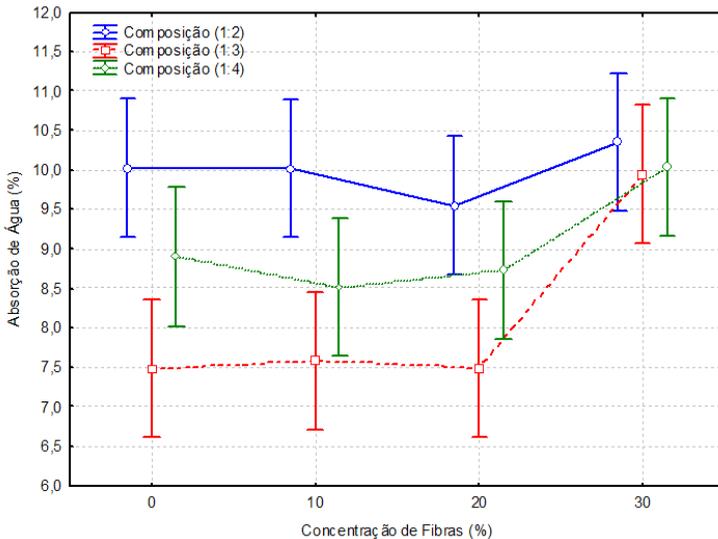
Na massa específica, foi possível observar um acréscimo no teor de 30% de microfibrã em todos os traços quando comparados à referência, conforme observado na Figura 31, que está relacionado ao fato da massa específica do aço ser superior à dos outros materiais da composição. Os aumentos foram de 11%, 4,7% e 5,3% para os traços 1:2, 1:3 e 1:4, respectivamente.

Figura 31: Massa específica das argamassas



Nos resultados obtidos para a absorção de água do material apresentados na Figura 32, o aumento no teor de 30% em todos os traços se deve à presença de maior quantidade de microfibras, o que dificulta a compactação das amostras, aumentando a incorporação de ar na matriz e propiciando maior porosidade no material.

Figura 32: Absorção de água nas argamassas



A absorção de água é uma propriedade importante na característica de durabilidade do material, pois movimentação de íons em seu interior pode comprometer sua resistência. Em geral os resultados se mostraram equivalentes aos encontrados por Bernal *et al.* (2010), os valores de absorção abaixo de 10% são considerados aceitáveis como parâmetros de compactação e durabilidade.

5 CONCLUSÕES

A partir da pesquisa, foi possível avaliar o desempenho mecânico de uma composição de geopolímero (contendo metacaulim e resíduo do polimento de placas cerâmicas), com adição de diferentes teores de microfibras de aço.

O efeito da adição das fibras no estado fresco é um fator importante a ser considerado, uma vez que provoca aglomeração na mistura e dificuldade de compactação, explicando a importância de serem respeitados os limites de utilização. Nos teores mais elevados nas misturas de pastas, houve aglomeração, que compromete a boa compactação e espalhamento na matriz, sendo esse efeito corrigido nas argamassas.

Os resultados de compressão confirmam a melhora da compacidade da matriz quando há adição de microfibras, apresentando resultados elevados em relação à referência, atingindo alta resistência (95MPa) em dois traços (1:2 – 30% e 1:3 – 20%). Quando comparados à referência, esse acréscimo na resistência é de 39% (traço 1:2 no teor de 30%) e 34% (traço 1:3 no teor de 20%). No traço 1:4 em que a quantidade de areia é maior, a resistência apareceu inferior aos outros dois traços, pela maior presença de material inerte e dispersão das microfibras na matriz mais dificultada.

A eficácia da incorporação e aderência de microfibras na matriz cimentícia é significativa no comportamento de flexão do material, influenciando diretamente em sua resistência pós-fissuração, uma vez que a compacidade da mesma melhora o desempenho pós pico de fissuração e capacidade de absorção de tensões na propagação de fissuras, quando comparadas às referências sem microfibras. Nos melhores traços, os acréscimos na resistência à flexão, quando comparados à referência sem microfibras, chegaram a 104% no teor de 30% no traço 1:3 (aumento de 9,7 MPa para 19,8 MPa) e 100% no teor de 20% de microfibras no traço 1:2 (aumento de 8,1 MPa para 16,2 MPa).

Estes resultados permitiram constatar o bom desempenho do geopolímero com microfibras metálicas, importante característica para uso desse material no setor da construção civil, além de comprovar o que já havia sido observado por outros autores, sobre a eficiência das microfibras metálicas em concreto de cimento Portland.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a pesquisa, alguns pontos relevantes foram observados, e o estudo dos mesmos é importante para caracterização completa do material estudado. Alguns dos fatores que podem motivar aplicações futuras:

- Análise mais detalhada da interface microfibras-pasta;
- Influência do tratamento superficial das microfibras na matriz cimentícia;
- Interferência nas características mecânicas do geopolímero com microfibras metálicas quando submetido à diferentes tipos de cura;
- Ataques com diferentes ácidos e sua influência nas propriedades do geopolímero;
- Desenvolvimento e caracterização de uma peça estrutural, para avaliação do comportamento;
- Influência da utilização de um sistema híbrido de fibras nas características de uma matriz de geopolímero.

REFERÊNCIAS

ALOMAYRI, T. The microstructural and mechanical properties of geopolymer composites containing glass microfibres. **Ceramics International**. v. 43, p. 4576-4582, 2017.

_____. **ASTM C-1231**: standard practice for use of unbonded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto: determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ATCP ENGENHARIA FÍSICA. Impulse Excitation Technique [Técnica de excitação por impulso]. **ATCP Engenharia Física, 2014**. Disponível em: <http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/sonelastic/tecnica-excitacao-impulso.html>. Acesso em: 21 Março 2016.

BAKHAREV, T. Resistance of geopolymer materials to acid attack. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 657 – 670, 2005.

BARBOSA, V.F.F.; MACKENZIE, K.J.D.; THAUMATURGO, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials**. v.2, p. 309-317, 2000.

BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; TRAUMATURGO, C. **Synthesis and Characterization of Sodium Polysialate Inorganic Polymer Based on Alumina and Silica**. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE GEOPOLYMÉRE, InstitutGéopolymère, Saint-Quentin, France and I.N.S.S.E.T. Université de Picardie, Saint-Quentin, France, 4, p. 65-78, 1999.

BEHERA, P.; BAHETI, V.; MILITKY, JIRI.; NAEEM, S. Microstructure and mechanical properties of carbono microfiber reinforced geopolymers at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**. v. 160, p.733-743, 2018.

BERNAL, S.A.; RODRÍGUEZ, E.D.; GUTIÉRREZ, R.M., PROVIS, J.L.; DELVASTO, S. Activation of metakaolin/slag blends using alkaline solutions based on chemically modified silica fume and rice husk ash. **Waste Biomass Valor.** v. 3, p. 99-108, 2012.

BERNAL, S.; GUTIERREZ, R.; DELVASTO, S.; RODRIGUEZ, E. Performance of na alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. **Construction and Building Materials.** v.24, p. 208-214, 2010.

BONDAR, D.; LYNSDALE, C.J.; MILESTONE, N.B.; HASSANI, N.; RAMEZANIANPOUR, A.A. Effect of heat treatment on reactivity-strenght of alkali-activated natural pozzolans. **Construction and Building Materials.** v. 25, p. 4065-4071, 2011.

BHUTTA, A.; BORGES, P.H.R.; ZANOTTI, C.; FAROOQ, M.; BANTHIA, N. Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers. **Cement and Concrete Composites.** v. 80, p. 31-40, 2017.

CESARI, Vanessa Fernandes.; PELISSER, Fernando.; MICHEL, Milton Domingos. Estudo das propriedades mecânicas da zona de transição em materiais cimentícios de alto desempenho com microfibras metálicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59, 2017, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Ibracon, 2017.

CHOI, Y., YUAN, R.L. Experimental relationship between splitting tensile strenght and compressive strenght of GFRC and PFRC. **Cement and Concrete Research.** v. 35, p. 1587-1591, 2005.

DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVITS, M.; DAVIDOVITS, N. **Process for obtaining a geopolymeric alumino-silicate and products thus obtained:** US n. P: 5342595, 1994.

DAVIDOVITS, Joseph et al. Long Term Stability of Radioactive Residues Solidified by Geopolimère. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM CONDITIONING OF RADIOACTIVE OPERATIONAL DECOMMISSIONING WASTES. Hamburgo, Março, 1999.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry e Aplication. Institute Geopolymere,** 2º edição, Cap. 1, Pag. 7-19, 2008.

_____. **Mineral polymers and methods of making them:** US n. P: 4349386, 1982.

_____. **Geopolymer Chemistry and Properties.** Vol 1, 1988, p 25-48.

_____. Geopolymer chemistry and applications. **Geopolymer Institute**, 2008. ISBN 2951482019.

_____. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

_____. **Method for obtaining a geopolymeric binder allowing to stabilize, solidify and consolidate toxic or waste materials:** US n. P: 5349118, 1994.

_____. **Synthetic mineral polymer compound of the silico aluminates family and preparation process:** US n. P: 4472199, 1984.

ERDOGAN, S.T. Inexpensive intumescente alkali-activated natural pozzolan pastes. **Journal of the European Ceramic Society.** v. 35, p. 2663-2670, 2015.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1204-1209, 2005.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; SOBRADOS, I.; SANZ, J. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes, **Microporous Mesoporous Materials**, v. 91, p. 111-119, 2006.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com fibras.** Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações, São Paulo, Ed. Geraldo Cechella Isaia, IBRACON, p.1194-1225, 2005.

GHAFAARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E. RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers. **Construction and Building Materials.** v. 66, p. 375-383, 2014.

GRANIZO, M.L.; BLANCO-VARELA, M.T.; MARTINEZ-RAMIREZ, S.; Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. **Journal of Materials Science**. v. 2007; 42: 2934–43.

GRIM, R.E. **Applied clay mineralogy**. New York: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., 1962.

HE, J.; JIE, Y.; ZHANG, J.; YU, Y. ZHANG, G. Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. **Cement & Concrete Composites**. v. 37, p. 108-118, 2013.

HE, P.; WANG, M.; FU, S.; JIA, D.; YAN, S.; YUAN, J.; XU, J.; WANG, P.; ZHOU, Y. Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer. **Ceramics International**. V. 42, p. 14416-14422, 2016.

JACOBY, Pablo Cardoso; PELISSER, Fernando. **Utilização do resíduo do polimento de porcelanato na produção de materiais cimentícios**. Livro Prêmio Odebrecht, 2011, p. 31. Disponível em: <<http://www.premioodebrecht.com/livros/brasil/2011/files/assets/basichtml/page31.html>>. Acesso em: 26 abr. 2013.

KORNIEJENKO, K.; FRACZEK, E.; PYTLAK, E.; ADAMSKI, M. Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers. **Procedia Engineering**. V. 151, p. 388-393, 2016.

KUMAR, S.; GARCÍA-TRIÑANES, P.; TEIXEIRA-PINTO, A.; BAO, M. Developmente of alkali activated cement from mechanically activated silico-manganese (SiMn) slag. **Cement & Concrete Composites**. v.40, p. 7-13, 2013.

LANCELLOTTI, I.; CATAURO, M.; PONZONI, C.; BOLLINO, F.; LEONELLI, C. Inorganic polymers from alcali activation of metakaolin: Effect of setting and curing on structure. **Journal of Solide State Chemistry**. v. 200, p. 341-348, 2013.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. **Cement and Concret Research**. v. 40, p. 1341-1349, 2010.

LI, V.C.; MISHRA, D.K.; WU, H. Matrix design for pseudo-strain-hardening fiber reinforced cementitious composites. **Materials and Structures**. v. 28, p. 586-595, 1995.

MCLELLAN, B.C.; WILLIAMS, R.P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A. CORDER, G.D. Costs and carbón emissions for geopolimer pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**. v. 19, p. 1080-1090, 2011.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2º Edição (português). São Paulo, IBRACON, 2014.

NG, T. S.; AMIN, A.; FOSTER, S. J. The behaviour of steel-fibre-reinforced geopolimer concrete beams in shear. **Concrete Research**. v.65, p. 308-318, 2013.

OHNO, M.; LI, V.C. A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolimer composites. **Construction and Building Materials**. v. 57, p. 163-168, 2014.

OLIVEIRA, Luiz A. P.; ALVES, Paula C. P.; DIAS, Sérgio M.M. **Desempenho de Argamassas de Revestimentos com Incorporação de Fibras de Plásticos Reciclados**. DECA – UBI. Portugal.

PAIVA, P.R.P.; MONTE, M.B.M.; FALCÃO, G.F. Modificação Química do Caulim pelo Método de Intercalação. In: XXI ENTMMME – Encontro Nacional de Tratamento de Minérios & Metalurgia Extrativa, Natal – RN, 2005.

PALOMO, A.; ALONSO, S.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; SOBRADOS, I.; SANZ, J. Alkaline activation of fly ashes. A 29Si NMR study of the reaction products, **Journal of the American Ceramic Society**. v. 87, n. 6, p. 1141-1145, 2004.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M.w.; BLANCO, M.t. Alkali-Activated Fly Ashes a Cement for the Future. **Cement and Concret**, Elsevier A cience Ltda, p. 1323-1329, 1999.

PELISSER, F.; MICHEL, M. D.; GUERRINO, E. L.; MENGER., M. H. Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 547-553, 2013.

PELISSER, F.; STEINER, L.R.; BERNADIN, A.M. Recycling of Porcelain Tile Polishing Residue in Portland Cement: Hydration Efficiency. **Environmental science e technology**. v. 4, n. 46, p. 2368-2374, 2012.

PINTO, A. T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, p. 92. 2006.

PROVIS, J.L.; PALOMO, A.; SHI, C. Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**. v. 78, p. 110-125, 2015.

PROVIS, J. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**. v. 47, 11–25, 2013.

PUERTAS, F.; AMAT, T.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; VÁZQUEZ, T. Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. **Cement and Concrete Research**. v. 33, p. 2031-2036, 2003.

PUERTAS, F.; GIL-MAROTO, A.; PALACIOS, M.; AMAT, T. Morteros de escoria activada alcalinamente reforzados con fibra de vidrio AR. Comportamiento y propiedades. **Materiales de Construcción**. v.56, p. 79-90, 2006.

PURIFICAÇÃO, E.B. **Estudo do uso de agregados reciclados de concreto e substituição do cimento por resíduo de polimento de porcelanato na produção de piso intertravado de concreto**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2009. 104p

RAMOS, G.A. **Cimento Geopolimérico contendo resíduo do polimento de placas cerâmicas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017. 116p.

RASHAD, A.M. Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer. **Construction and Building Materials**, v. 41, p.751-765, 2013.

REDDY, M.S.; DINAKAR, P.; RAO, B.H. A review of the influence of source material's oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete. **Microporous and Mesoporous Materials**. V. 234, p. 12-23, 2016.

RYU, G.S.; LEE, Y.B.; KOH, K.T.; CHUNG, Y.S. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. **Construction and Building Materials**. v. 47, p. 409-418, 2013.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas – 2ª edição revisada e ampliada**. Editora Edgard Blücher Ltda. Vol. 1, 1989. 340p.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**. v. 41, p. 750-763, 2011.

SHI, C., XIE, P. Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars. **Cement and Concrete Research**. v. 28, n. 6, p. 887-896, 1998.

SNOECK, D.; DE BELIE, N. From straw in bricks to modern use of microfibers in cementitious composites for improved autogenous healing – A review. **Construction and Building Materials**. v. 95, p.774-787, 2015.

SONGPIRIYAKIJ, S.; KUBPRASIT, T.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Compressive strength and degree of reaction of biomass – and fly ash-based geopolymer. **Construction and Building Materials**. V.24, p. 236-240, 2010.

SOUZA, P.S.L. **Verificação da Influência do uso de Metacaulim de Alta Reatividade nas Propriedades Mecânicas do Concreto de Alta Resistência**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2003. 203p.

STEINER, L. R. **Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como material cimentício suplementar**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da UNESC. Florianópolis, 2014. 135p.

SU, Y., LI, J., WU, C. WU, P. LI, Z-X. Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC. **Construction and Building Materials** 114, 708–718, 2016.

SUKONTASUKKUL, P.; PONGSOPHA, P.; CHINDAPRASIRT, P.; SONGPIRIYAKIJ, S. Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer. **Construction and Building Materials**. v. 161, p. 37-44, 2018.

TEMUJIN, J.; RIESSEN, A-V.; MACKENZIE K J D. Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials** 2010; 24: 1906-1910.

TURNER LK, COLLINS FG. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**. v. 2013; 43:125-130.

UENG, T-H.; LYU, S-J.; CHU, H-W.; LEE, H-H.; WANG, T-T. Adhesion at interface of geopolymer and cement mortar under compression: An experimental study. **Construction and Building Materials** 2012; 35: 204–210.

VAN DEVENTER JSJ, PROVIS JL, DUXSON P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. **Minerals Engineering**. v. 2012; 29:89–104.

VIJAI, K.; KUMUTHA, R.; VISHNURAM, B. G. Effect of inclusion of steel fibres on the properties of geopolymer concrete composites. **Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)**. v. 13; p. 381-389, 2012.

XU, H.; VAN DEVENTER, J.S.J. The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**. v. 59, p. 247-266, 2000.

XU, L.; DENG, F.; CHI, Y. Nano-mechanical behavior of the interfacial transition zone between steel-polypropylene fiber and cement paste. **Construction and Building Materials**. v. 145, p. 619-638, 2017.

YUNSHENG, Z.; WEI, S.; ZONGJIN, L.; XIANGMING, Z.; EDDIE; CHUNGKONG, C. Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. **Construction and Building Materials**. v. 22, p. 370-383, 2008.

APÊNDICE A – Resultados Obtidos

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão, nas três replicações para cada tipologia de amostra, bem como a média e o desvio padrão. Os dados supracitados foram utilizados para elaboração dos gráficos apresentados no presente trabalho.

Tabela 1: Resultados obtidos nos ensaios nas três replicações para cada tipologia de amostra.

Traço	Resistência à Compressão				Módulo de Elasticidade Dinâmico				Resistência à Tração na Flexão				
	REF	10% MF	20% MF	30% MF	REF	10% MF	20% MF	30% MF	REF	10% MF	20% MF	30% MF	
1:2	68,13	79,47	89,43	94,05	21,04	23,66	23,01	22,36	8,07	14,19	18,21	13,52	
	69,32	83,03	92,72	95,08	22,19	22,44	22,19	19,91	8,42	13,38	14,69	15,83	
	69,35	83,93	94,03	98,28	20,21	23,69	23,57	20,56	7,84	14,64	15,69	14,06	
	68,93	82,14	92,06	95,80	21,15	23,26	22,92	20,94	8,11	14,07	16,20	14,47	Média
	0,6959	2,3585	2,37	2,2058	0,9943	0,7132	0,6941	1,2692	0,2921	0,6385	1,8139	1,2083	D.P.
1:3	69,50	84,95	90,53	83,00	24,37	26,95	30,57	24,08	11,13	11,01	13,25	19,83	
	70,75	82,88	96,55	87,25	23,64	27,71	29,43	29,25	8,93	10,39	16,53	20,33	
	72,78	82,90	98,55	87,78	25,68	26,41	29,67	31,61	9,17	8,94	14,72	19,26	
	71,01	83,58	95,21	86,01	24,56	27,02	29,89	28,31	9,74	10,11	14,83	19,81	Média
	1,6554	1,1894	4,1745	2,6202	1,0337	0,6531	0,601	3,8514	1,2069	1,0624	1,6429	0,5354	D.P.
1:4	61,75	74,68	68,50	64,10	26,39	29,86	28,39	26,37	10,24	12,30	10,69	9,64	
	65,03	75,53	71,98	68,30	26,38	28,84	27,29	25,72	10,52	10,79	11,36	9,83	
	65,15	80,65	72,53	69,58	23,99	29,41	27,46	24,76	11,15	9,47	12,38	10,61	
	63,98	76,95	71,00	67,33	25,59	29,37	27,71	25,62	10,64	10,85	11,48	10,03	Média
	1,9293	3,2295	2,1853	2,8667	1,3828	0,5112	0,5921	0,81	0,4661	1,4161	0,851	0,514	D.P.