

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS, ENGENHARIAS E
TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS – PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

PATRÍCIA MONTAGNA ALLEM

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETO
GEOPOLIMÉRICO COM O USO DE FIBRAS DE AÇO**

Dissertação de Mestrado - DM
apresentado ao Programa de Pós-
Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como
requisito à obtenção do título de
Mestre em Ciência e Engenharia de
Materiais, da Universidade do
Extremo Sul Catarinense - UNESC.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Elias
Allievi Frizon

**CRICIÚMA
2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

A428a Allen, Patrícia Montagna.

Avaliação do desempenho mecânico de concreto geopolimérico com o uso de fibra de aço. / Patrícia Montagna Allen ; orientador: Tiago Elias Allievi Frizon – Criciúma, SC : Ed. do Autor, 2016.

89 p. : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2016.

1. Metacaulim – Resistência mecânica. 2. Concreto geopolimérico – Propriedades mecânicas. 3. Vigas de concreto – Desempenho. 4. Fibras de aço. I. Título.

CDD. 22. ed. 620.136

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla – CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

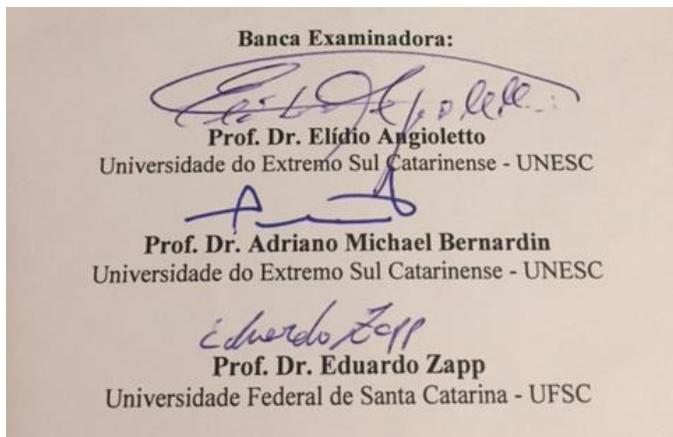
PATRICIA MONTAGNA ALLEM

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETO
GEOPOLIMÉRICO COM O USO DE FIBRAS DE AÇO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais na área de Ciência e Engenharia de Materiais no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense.

Criciúma, 11 de outubro de 2016.

BANCA EXAMINADORA



Dedico esta Dissertação de Mestrado aos meus Pais pelo incentivo e empenho na minha formação educacional Emilio Aiub Allem e Miriam Lebsa Montagna, a minha irmã, Elise Allem, que mesmo longe, estará sempre no meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço também a todos que direta ou indiretamente ajudaram na elaboração deste trabalho, em especial:

Ao meu orientador Prof. Dr. Tiago Elias Allievi Frizon por me auxiliar no término desta dissertação. Aos Prof. Dr. Bruno do Vale Silva e Prof. Dr. Fernando Pelisser, por toda a ajuda na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Msc. Alexandre Vargas pelo incentivo e apoio.

Ao meu namorado Franck Felix, por me inspirar em todos os momentos.

Toda a equipe do laboratório LMCC e LEE da UNESC, pela dedicação e empenho, mesmo com todas as dificuldades e imprevistos, para realização deste trabalho.

A Secretária do PPGCEM, Vivian, por todo apoio e eficiência em resolver e agilizar processos burocráticos do programa.

A secretária do curso de engenharia civil Gisele.

A empresa Esmalglass pelo fornecimento do material para a pesquisa.

Aos colegas, Tchesare Keller e Augusto Wanderlind.

A todos os colegas da turma de Mestrado de 2014/1.

“A nossa felicidade será naturalmente proporcional em relação à felicidade que fizermos para os outros.”

Allan Kardec

RESUMO

O cimento Portland, largamente utilizado na construção civil no Brasil é um grande gerador de poluentes. Sua produção consome 2% de toda a energia global, e é responsável por 5% da emissão de dióxido de carbono (CO₂) de todo o mundo. Essas emissões contribuem em grande parte para o aumento do efeito estufa. Nos últimos anos, o rápido crescimento em pesquisas e desenvolvimento de materiais a base de geopolímeros, indica que o uso de geopolímero mostra um caminho para a redução do impacto ambiental na comparação deste material com o cimento Portland, visto que a produção deste material geopolimérico demanda de menor energia e emite menor quantidade de agentes poluentes ao meio ambiente. Este trabalho apresenta o metacaulim, como uma alternativa de aglomerante em substituição ao cimento Portland para a utilização em elementos estruturais de concreto armado. O resultado obtido mostra que este aglomerante apresenta características de resistência muito semelhantes ao cimento Portland quando em sua substituição. Como resultados complementares, esta pesquisa testou a adição de macrofibras nas concentrações de 10 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³ no intuito de incrementar a resistência. Quando adicionadas macrofibras de aço no concreto geopolimérico, a resistência a tração apresentou incremento significativo quando utilizadas na quantidade de 30Kg/m³. Quanto a tenacidade, todas as amostras apresentaram maiores valores, confirmando que as fibras formam uma rede de sustentação as peças após o rompimento. De modo geral, pode-se concluir que o aglomerante Metacaulim pode ser um concorrente ao cimento Portland, carecendo ainda de estudos e normas para viabilizar a sua aplicação direta. A adição de fibras de aço neste material também apresenta-se como uma alternativa no ganho de tenacidade e resistência a tração.

Palavras-chave: Concreto geopolimérico. Metacaulim. Macrofibras de aço. Fibras de aço. Macrofibras.

ABSTRACT

Portland cement, widely used in civil construction in Brazil is an enormous pollutant generator. Its production consumes 2% of entire global energy, and it is responsible for 5% of carbon dioxide emissions (CO₂) from around the world. These emissions greatly contribute to increasing the greenhouse effect. In recent years, the rapid growth in research and material development of geopolymers base indicates that the geopolymer is an alternative to reduce the environmental impact in comparison to material with Portland cement . The production of geopolymer materials demand less energy and emits less polluting agents to the environment compared with Portland Cement. This research presents the metakaolin, as a binder alternative to replace the Portland cement for use in structural elements of reinforced concrete. The result shows that this agglomerate has a very similar resistance to Portland cement. As additional results, this study aims to evaluate the use of macrofiber, in different concentrations (10 kg/m³), (20 kg/m³) and (30 kg/m³) in geopolymer concrete. The addition of steel macrofibers showed the tensile strength significantly increase if used in quantity 30 kg/m³. The tenacity, in all samples showed higher values, confirming that fibers form a support network as parts after the breakup. In general, it can be concluded that the metacaolim can be a substitute for Portland cement, still lacking studies and standards to make it a commercial material. The addition of steel fibers in this material is presented as an alternative to gain toughness and resistance to traction.

Keywords: Geopolymer concrete Metakaolin. Steel macrofibers. Steel fibers. Macrofibers.

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Área
A/C	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP-I	Cimento Portland tipo um
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
HR	Umidade Relativa
M	Metro
MEV	microscópio eletrônico de varredura
PDM	Projeto de Dissertação de Mestrado
PPGCEM Materiais	Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
SENAI	Serviço Nacional da Indústria
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Unidade estrutural das Caulinitas.	36
Figura 2 - Reação álcalis-agregado (expansão em mm/m).....	45
Figura 3 - Macrofibras de aço.	47
Figura 4 –Compatibilidade dimensional das fibras.	49
Figura 5 – Organograma do planejamento experimental.	52
Figura 6 -Armaduras das vigas de 12 x 25 x 250cm. (Unidades em cm).	53
Figura 7 - Representação esquemática do equipamento utilizado no ensaio das vigas.	54
Figura 8 – Modelo e instrumentação do ensaio de viga com concreto geopolimérico.....	54
Figura 9 - Ferragem das vigas de 12 x 20 x 160cm. (Unidades em cm).	56
Figura 10 - Aspecto da armação e forma das vigas.....	57
Figura 11 - Moldagem das vigas sem adição de fibras de concreto geopolimérico.....	57
Figura 12 - Posicionamentos dos LVDT's e SG's ao longo da viga.	58
Figura 13 - Foto do equipamento montado para o ensaio de resistência a flexão.....	59
Figura 14 - Representação esquemática dos pontos de aplicação de carga.	60
Figura 15 - Detalhe da prensa eletromecânica – EMIC – DL 10000	60
Figura 16 - Ruptura no ensaio de tração.....	67
Figura 17 - Vigas 10x10x35cm sem adição de fibras de aço (A), com adição de 10Kg/m ³ de fibra de aço (B), com adição de 20Kg/m ³ de fibra de aço (C) e com adição de 30Kg/m ³ de fibra de aço (D).	70
Figura 18 - Equipamento EMIC PC200.	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Emissões de CO ₂ na produção de 1t de concreto geopolimérico	33
Gráfico 2 - Emissões de CO ₂ na produção de 1t de concreto tradicional	33
Gráfico 3 - Demanda energética na produção de 1t de concreto geopolimérico.....	34
Gráfico 4 - Demanda energética na produção de 1t concreto tradicional	34
Gráfico 5 - Gráfico de comparação (Resistência x Temperatura) entre geopolímeros de cura a baixas temperaturas e geopolímeros sem tratamento prévio.....	44
Gráfico 6 - Representação gráfica da deflexão x carga de corpos de prova com diferentes concentrações de fibras. 20 Kg/m ³ , 30Kg/m ³ e 40Kg/m ³	48
Gráfico 7 - Comparativo entre as resistências de duas vigas, moldadas em concreto com cimento Portland e concreto geopolimérico.	64
Gráfico 8 - Deformações em função da carga (Viga com cimento Portland).....	65
Gráfico 9 - Deformações em função da carga (Viga com concreto geopolimérico).	66
Gráfico 10 - Comparativo do ensaio de tração entre as várias amostras com e sem fibras.....	71
Gráfico 11 - Gráfico da tenacidade em função da adição de diversas concentrações de fibras.	74
Gráfico 12 - Resultados com 95% de confiança do ensaio de compressão de material geopolimérico com e sem adições de fibras de aço.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de fibras e características.....	49
Tabela 2 -Traços do concreto convencional e concreto geopolimérico.	53
Tabela 3 - Composição das diferentes vigas de concreto geopolimérico.	56
Tabela 4 - Resultados de deslocamento máximos antes e após ruptura.	67
Tabela 5 - Resultados de rompimento a flexão das diversas amostras de vigas de concreto geopolimérico.....	73
Tabela 6 - Resultados de Cargas máximas e Tensões máximas para os diversos corpos de prova.....	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1 CONCRETO GEOPOLIMÉRICO.....	30
3.1.1 Comparativo entre emissões de CO₂ de concreto geopolimérico e concreto Portland	30
3.1.2 Cimento Geopolimérico	30
3.1.3 Impactos Ambientais Gerados Na Fabricação Do Concreto Geopolimérico	31
3.1.4 Normatização	34
3.1.5 Caulim	35
3.1.6 Metacaulim	36
3.1.7 Sílica Ativa	37
3.1.8 Usos de Metacaulim	39
3.1.9 Vantagens do uso de Metacaulim	39
3.2 USO DE GEOPOLÍMERO	39
3.2.1 Química dos Sistemas Geopoliméricos	40
3.2.2 Geopolímeros	41
3.2.2.1 Estrutura e propriedades dos Geopolímeros.....	42
3.2.2.2 Cimentos Geopoliméricos e Reações Álcalis-Sílica (RAS)	44
3.3 CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS	46
3.3.1 Fibras de aço	48
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	51
4.1 MATERIAIS	52
4.2 ENSAIOS COM VIGAS DE 12 X 25 X 250 CM.....	53
4.3 ENSAIOS COM VIGAS DE 12 X 20 X 160 CM.....	55
4.4 ENSAIOS COM CORPOS DE PROVA DE 10 X 10 X 30 CM.....	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1 VIGAS 12 X 20 X 250 CM.....	63
5.2 VIGAS 12 X 20 X 160 CM.....	67
5.3 CORPOS DE PROVA 10 X 10 X 35 CM.....	69
5.3.1 Tenacidade em vigas de 10 x 10 x 35 cm	72
5.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS DE DIMENSÃO 10 X 10 X 35CM.....	74
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
7 TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem papel fundamental para a realização dos objetivos globais de desenvolvimento sustentável. A questão ambiental na atividade da construção civil e na gestão de edifícios públicos e privados ganhou relevância nos últimos anos.

Materiais reciclados, materiais produzidos com baixo impacto ambiental, assim como processos construtivos que ocasionem baixos danos ao meio ambiente e pouca ou nenhuma emissão de carbono e gases estufa na atmosfera ganharam maior visibilidade no cenário atual. Dessa forma, adequar-se ao contexto de desenvolvimento sustentável é imprescindível para o futuro do setor (JOHN, 2000).

Segundo Davidovits (1994), a produção de uma tonelada de clínquer de cimento Portland [...], equivale a 0,95 toneladas de dióxido de carbono. Por isso, o atual cenário tecnológico aliado à sustentabilidade, vem contribuindo com linhas de pesquisas, que visam o desenvolvimento de novos materiais cimentícios derivados de matérias primas, com o objetivo de reduzir em longo prazo a emissão de CO₂, gerando tentativas de se minimizar impactos ambientais. Parece, portanto, evidente o interesse de promover o desenvolvimento de sistemas ligantes alternativos que, cumprindo os mesmos objetivos de desempenho, permitam o alívio da pressão sobre o Ambiente e possam integrar uma gama de materiais constituintes (agregados) mais vasta e menos exigente (PINTO, 2006).

Os cimentos geopoliméricos surgem como uma alternativa inovadora e bastante promissora, uma vez que, comparados com o cimento Portland, sendo produzidos a partir de resíduos, apresentam baixas emissões e elevada durabilidade (COSTA, 2012).

Em 1978, Joseph Davidovits introduziu o termo “geopolímero”, tendo patenteado o produto das suas investigações sobre a polimerização do metacaulim. Nematollahi, Sanjayan e Shaikh (2014) diz que o geopolímero é sintetizado a partir de materiais de origem geológica (por exemplo, metacaulim) ou sub-produtos industriais, tais como cinzas volantes e escórias que são ricos em sílica e alumina com ativadores alcalinos elevados. Conforme Pinto (2004), em termos gerais, todos os materiais que tenham sofrido um tratamento térmico na sua gênese são potencialmente aptos para a ativação alcalina: pó de tijolo, vidro moído, materiais cerâmicos, escombros de concreto, cinzas de queima (carvão ou nafta) ou incineração, cinzas vulcânicas, escórias de alto-forno, metacaulins [...]. É enorme a variedade de produtos que podem ser

utilizados nesta reação base, o que encontra explicação no fato de serem os aluminossilicatos o grupo de compostos predominante na litosfera.

Os geopolímeros são resistentes em contato com ácidos ou com fogo, possuem propriedades zeolíticas, são de grande utilidade para contenção de resíduos tóxicos e endurecem rapidamente a baixas temperaturas. (DAVIDOVITS, 2002 apud SANTA, 2012).

As fontes de produção do clínquer são preservadas, e há menor consumo de energia e emissão de dióxido de carbono (MIRANDA, 2005). Portanto, através da geopolimerização são desenvolvidas características parecidas às do cimento Portland, com o diferencial de apresentar benefícios econômicos e ambientais, decorrentes do emprego de resíduos industriais e confecção de cimento alternativo.

Dentro desse contexto, o estudo de novos materiais e opções construtivas que propiciem menor impacto ambiental e mantenham as resistências mecânicas apropriadas se faz necessário. Este trabalho vem ao encontro desta carência e apresenta o caulim, ou metacaulim, como uma alternativa como aglomerante em substituição ao cimento Portland para a utilização em elementos estruturais de concreto armado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho do metacaulim como aglomerante, com e sem o uso de fibras de aço, em vigas de concreto armado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a resistência do metacaulim como substituto ao cimento em estruturas de concreto;
- Avaliar a resistência do metacaulim como substituto ao cimento em estruturas de concreto com e sem a adição de fibras de aço;
- Comparar o comportamento do concreto produzido com metacaulim misturado a diversas concentrações de macrofibras de aço (10kg/m^3 , 20kg/m^3 e 30kg/m^3).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Joseph Davidovits, em seus livros “*Why the Pharaohs built the pyramids with the fake stones*” – “*Porque os faraós construíram as pirâmides com pedras falsas*” – 2009 Institut Gèopolimère França e “*The Pyramids: An Enigma Solved*” – “*As Pirâmides: Um Enigma Solucionado*” – 1988 Dorset Press USA, ainda não disponíveis em português, descrevem o método de construção das pirâmides do Egito descrevendo que as mesmas teriam sido construídas com blocos de concreto, feitos com material geopolimérico. Ao contrário do que se afirmava anteriormente, as pedras que formam as pirâmides teriam sido moldadas com uma mistura de material calcário (pedregulhos de calcário caulinitico oriundos de Gizé com NaOH, produzido pela mistura de cal ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), barrilha (Na_2CO_3) e água) e não pedras calcárias. Essa hipótese é bem suportada, primeiramente pela caracterização microestrutural dos blocos das pirâmides que apresentou resultados bastante similares aos dos geopolímeros de hoje em dia, além disso o material geopolimérico apresenta encolhimento apreciavelmente pequeno, o que possibilitaria moldar os blocos em seu lugar definitivo, sem necessidade de transportá-los (DAVIDOVITS; MORRIS, 1988). Geopolímeros, estudados inicialmente por Davidovits são argilas de estrutura amorfa. Este material cura rapidamente em temperatura ambiente, atingindo resistência mecânica e resistência ao fogo. Devido a estas propriedades, este material se torna um forte candidato a substituto do cimento Portland na construção de estruturas. Nos estudos de Aredes (AREDES; KLEIN; PAWLIK, 2012), concluiu-se que apesar do material curar bem a temperatura ambiente, atingindo boa resistência a compressão, a temperatura ideal de cura seria de 65°C, por aproximadamente 1 (uma) hora. A cura a esta temperatura, atingiria a maior capacidade de resistência a compressão do material.

A inclusão de fibras como fibras de carbono, de aço, entre outras no seu traço, pode ainda acrescentar uma resistência extra.

O geopolímero é considerado a terceira geração de aglomerantes, antecedido pelo cal e pelo cimento Portland. O termo “geopolímero” é utilizado para descrever a fase amorfa do álcali aluminosilicato comumente utilizado para “polímeros inorgânicos”, “cimentos alcali-ativados”, “geocimentos”, “hidrocerâmicas” e etc. Apesar da vasta nomenclatura, todos estes termos descrevem materiais sintetizados utilizando a mesma fórmula química (SINGH et al, 2015).

3.1 CONCRETO GEOPOLIMÉRICO

O concreto geopolimérico pode utilizar como matéria-prima qualquer material inorgânico constituído por sílica e alumina e que tenha sido sujeito a um tratamento térmico que torne o material amorfo. Os estudos de Joseph Davidovits recomendam, no entanto, que se respeitem determinadas proporções atômicas, para se obterem resultados ótimos tanto a nível mecânico quanto em função da durabilidade. Podem, desta forma, ser utilizadas como matérias-primas para os ligantes geopoliméricos, cinzas, escórias, ou até mesmo resíduos de minas e pedreiras, mesmo contendo metais alcalinos.

Algumas vantagens que devem ser destacadas, segundo Shadnia, Zhang e Peiwen (2015), são a rápida obtenção de resistência mecânica, sua baixa retração, alta resistência ao fogo e baixo consumo energético na sua obtenção.

3.1.1 Comparativo entre emissões de CO₂ de concreto geopolimérico e concreto Portland

A fabricação do clínquer para cimento Portland produziu, em 2014, 5% de toda a emissão de CO₂ produzida pelo ser humano, valor que pode chegar a 6% de todas as emissões em 2015, conforme Borges et al. (2014).

Segundo Borges et al. (2014), comparando-se o consumo energético na fabricação do concreto geopolimérico e o consumo energético para a fabricação de concreto com cimento Portland de desempenho semelhante, o consumo referente ao geopolímero é 45,8% menor que o na produção do concreto de cimento Portland. Com relação às emissões de CO₂, o concreto geopolimérico reduz as emissões em 72,4%, em comparação ao concreto tradicional de cimento Portland CII. Assim, o primeiro se mostra uma alternativa a ser considerada, na produção de materiais de construção de menor impacto ambiental.

3.1.2 Cimento Geopolimérico

Os cimentos geopoliméricos são alumino silicatos álcalis ativados, ou seja, consistem de um ou mais materiais constituídos por SiO₂ e Al₂O₃ em proporções suficientes e em forma reativa (como cinzas, argilas ativas, pozolanas e escórias), misturados a uma solução alcalina aquosa ativadora, contendo, por exemplo, hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio ou potássio.

Aredes, Klein e Pawlik (2012), descreve que o mecanismo de geopolimerização inicia com a dissolução de sílica e alumina simultaneamente em uma superfície de partículas não solúveis, posteriormente estas partículas reagem formando um gel, gerando uma estrutura geopolimérica forte.

O cimento geopolimérico também chamado de polímero inorgânico, possui vantagens ecológicas e físico-químicas quando comparado ao cimento Portland. As vantagens ecológicas se tornaram evidentes com a possibilidade de serem produzidos à temperatura ambiente (ou até 80 °C) sem aparente liberação de CO₂ na atmosfera. As características físico-químicas garantem propriedades especiais, tais como rápido desenvolvimento de resistência mecânica e excelente durabilidade química. Segundo Davidovits (1994), o cimento geopolimérico com cura à temperatura ambiente pode adquirir resistência à compressão de 20 MPa em 4 h a 20°C. Dependendo ainda das condições de síntese e cura, esses materiais podem atingir valores de resistência à compressão de 70 a 100 MPa (TEIXEIRA PINTO, 2004).

Pode-se destacar algumas propriedades dos geopolímeros:

(a) Não geram reação expansiva do tipo álcali-agregado, comum a concretos de cimento Portland preparados a partir de agregados miúdos potencialmente reativos (DAVIDOVITS, 1994) mantendo a inércia química em relação a algumas patologias comuns aos produtos à base de cimento Portland;

(b) Possuem resistência às altas temperaturas, permitindo o desenvolvimento de estruturas mais resistentes à ação do fogo (KONG; SANJAYAN, 2010), e materiais refratários de baixo custo.

(c) Apresentam baixa permeabilidade, favorecendo sua aplicação na imobilização de resíduos tóxicos e radioativos (GIANNOPOULOU; PANIAS, 2007);

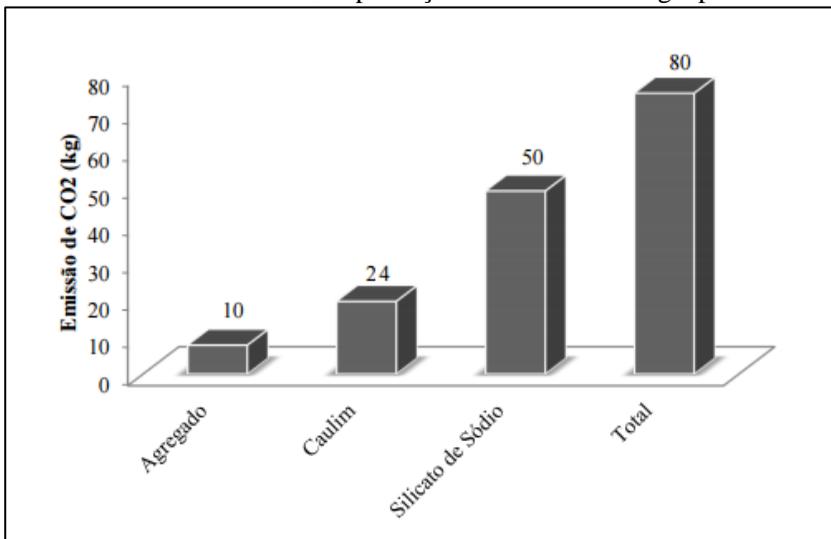
(d) Apresentam alta durabilidade química (BAKHAREV, 2005). Desta forma sua aplicação em concreto e argamassas em substituição ao cimento Portland é uma alternativa interessante devido a seu grande potencial ecológico e alto desempenho físico-químico.

3.1.3 Impactos Ambientais Gerados Na Fabricação Do Concreto Geopolimérico

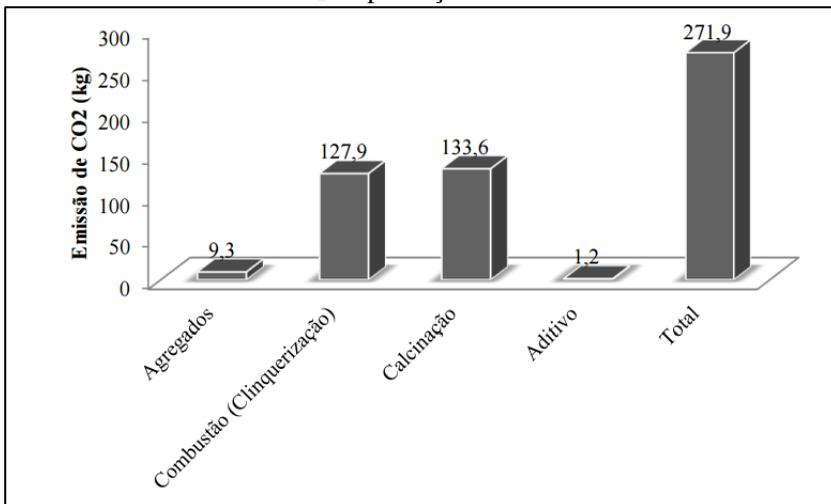
O geopolímero estudado neste trabalho é obtido a partir da queima do caulim, obtendo-se o metacaulim, hidróxido de sódio e silicato de sódio. Nesta etapa ocorre uma reação exotérmica, que resulta em um material aglomerante. A esta matriz podem ser misturados os mesmos

tipos de agregados utilizados na produção de argamassas e concretos de cimento Portland. O produto resultante será uma argamassa geopolimérica ou concreto geopolimérico. As emissões de CO_2 no processo produtivo do concreto geopolimérico estão relacionadas à obtenção de suas matérias-primas: ocorrem emissões no processo produtivo do metacaulim e do silicato de sódio; em ambos o CO_2 é proveniente da queima de combustíveis fósseis para fornecimento de calor.

Como descreveu Borges et al. (2002), o cimento Portland é um grande emissor de poluentes. Sua produção consome 2% de toda a energia global, e é responsável por 5% da emissão de dióxido de carbono (CO_2) de todo o mundo (na produção de uma tonelada de clínquer, é produzida uma tonelada de CO_2). Abaixo, podemos fazer um comparativo entre emissões poluentes e demanda energética entre os concretos geopoliméricos e os concretos produzidos a partir de cimento Portland. Notadamente, as emissões na produção dos concretos geopoliméricos (Gráfico 1) são menores que na produção dos concretos de cimento Portland (Gráfico 2), assim como, ainda em benefício do meio ambiente, a demanda energética na produção do concreto geopolimérico (Gráfico 3) é menor que na produção do concreto convencional de cimento Portland (Gráfico 4).

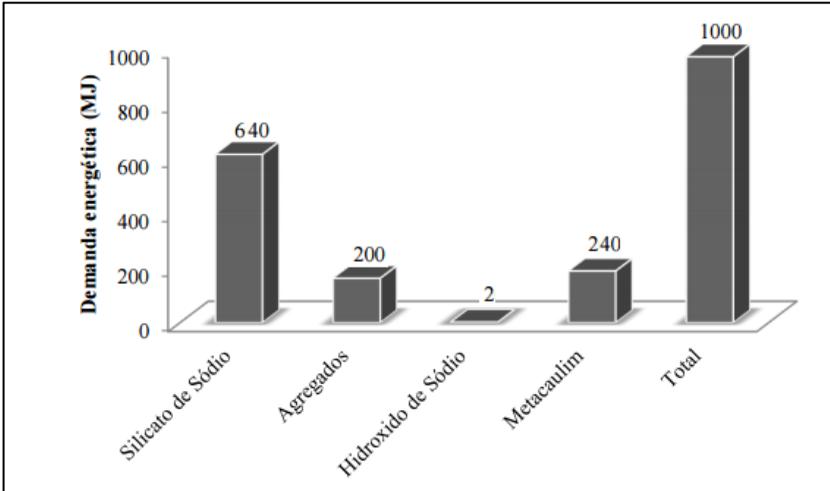
Gráfico 1 - Emissões de CO₂ na produção de 1t de concreto geopolimérico

Fonte: Borges et al. (2014).

Gráfico 2 - Emissões de CO₂ na produção de 1t de concreto tradicional

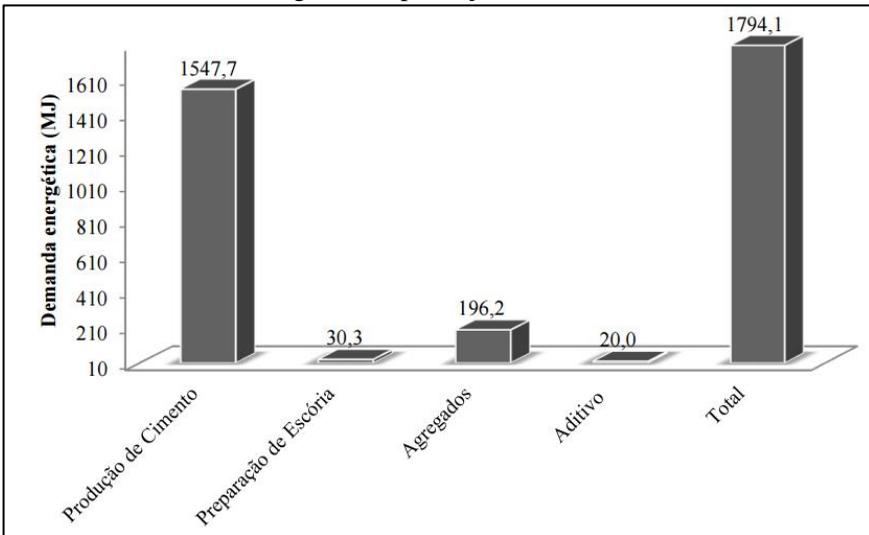
Fonte: Borges et al. (2014).

Gráfico 3 - Demanda energética na produção de 1t de concreto geopolimérico



Fonte: Borges et al. (2014).

Gráfico 4 - Demanda energética na produção de 1t concreto tradicional



Fonte: Borges et al. (2014).

3.1.4 Normatização

O uso do concreto geopolimérico ainda carece de normatização específica que garanta a correta aplicação para garantia da resistência mecânica e durabilidade. A normalização é importante até mesmo para garantir a segurança dos envolvidos no processo, haja vista que as soluções empregadas na produção do geopolímero são alcalinas e, portanto, podem provocar queimaduras na pele dos operários, enquanto o concreto se encontra no estado fresco (mistura, lançamento do concreto). Equipamentos de proteção individual são essenciais nesta etapa, luvas e óculos de segurança são essenciais na produção do concreto. Por isso, é de se esperar que o maior controle na produção de geopolímeros limitará seu uso à pré-fabricação (BORGES; MELO; LIMA, 2012), pois no ambiente fabril podem-se tomar mais cuidados no preparo e moldagem dos elementos de concreto, o que, às vezes, foge do controle nos canteiros de obra. Ainda há muito caminho a ser percorrido para que estes novos ligantes possam substituir, em parte, o cimento Portland na produção de concretos, ainda que os estudos de análise de ciclo de vida indiquem o grande potencial deles para a redução do impacto ambiental como materiais de construção civil.

Na produção do concreto geopolimérico, identificou-se que o maior contribuinte para as emissões de CO₂ e consumo energético durante o processo produtivo é a produção do silicato de sódio, o que já havia sido mostrado por Habert, D'Espinose de Lacaillierie e Roussel (2011). A utilização de materiais alternativos nesse tipo de concreto pode reduzir ainda mais os impactos ambientais do concreto geopolimérico.

3.1.5 Caulim

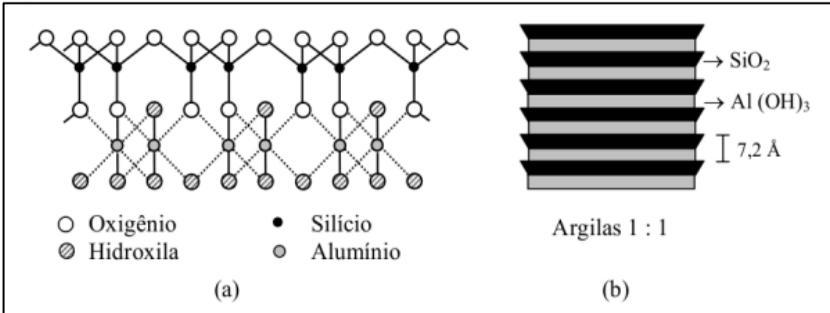
O caulim é produzido a partir da extração de jazida e posteriormente beneficiado, para obter a caulinita Al₂Si₂O₅(OH)₄. Após passar por um processo de secagem, inicia-se a etapa da calcinação, produzindo Al₂Si₂O₇.

A etapa seguinte é a moagem, atingindo uma área específica aproximadamente igual a 6.000 cm²/g. Em seguida é processada a etapa final onde realiza-se a micronização e separação granulométrica, alcançando a matéria prima inicial uma área superficial específica próxima de 220.000 cm²/g (GABRICH, 2008).

Segundo Santos (1989), a unidade estrutural básica das caulinitas é constituída de uma camada de tetraedros de sílica e de uma camada de octaedros de gipsita, onde as hidroxilas desta são, parcialmente, substituídas pelos oxigênios dos vértices dos tetraedros da camada de

sílica. Logo, o plano comum das duas camadas é constituído por átomos de oxigênio e hidroxilas, sendo a ligação entre elas iônica. A unidade estrutural das caulinitas, sob o ponto de vista iônico, é neutra e esta representada na Figura 1.

Figura 1 - Unidade estrutural das Caulinitas.



Fonte: Santos (1989).

A estrutura das caulinitas é formada pelo empilhamento destas unidades, sendo a união entre o plano de hidroxilas de uma unidade com o plano de oxigênio de outra unidade feita por ligações de hidrogênio. Frequentemente, as caulinitas são constituídas de 6 unidades estruturais, que podem ser vistas na Figura 1 a e b.

As ligações de hidrogênio são fracas, mas suficientemente fortes para evitarem a penetração da água entre as unidades estruturais. Por esta razão, as caulinitas apresentam pequena expansão, difícil dispersão na água e baixa plasticidade. Como as valências livres estão apenas nas extremidades, às capacidades de adsorção de água e de permuta catiônica é pequena. As caulinitas são as argilas de maiores dimensões. O comprimento varia entre 0,3 e 4 microns e a espessura, entre 0,05 e 2 microns (SANTOS, 1989).

3.1.6 Metacaulim

Segundo Gabrich (2008) metacaulim é um material pozolânico, é a forma desidroxilada da caulinita. O material cru, utilizado no processo de produção do metacaulim é a argila caulinitica.

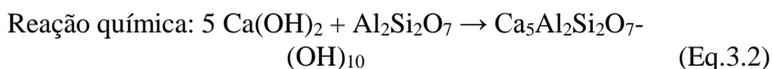
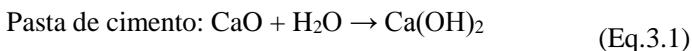
O caulim é uma argila branca e fina, comumente utilizada na produção de porcelanas.

O metacaulim ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) é obtido pela queima da argila caulinitica, a uma temperatura de 500 a 800 graus Celsius. Quando o

material atinge a temperatura de 100 a 200 graus Celsius, perde a maior parte da água absorvida. Ao atingir a temperatura entre 500 e 800 graus, a caulinita é calcinada e ocorre perda de água por um processo denominado desidroxilação.

A desidroxilação do caulim para o metacaulim é um processo endotérmico, que consome grande quantidade da energia que é necessária para romper as ligações químicas da hidroxila. Transformada a caulinita em metacaulinita, tem-se uma estrutura cristalina com duas dimensões. O metacaulim reage com o hidróxido de cálcio livre da pasta de cimento, formando compostos mais estáveis quimicamente, aumentando assim a resistência mecânica do concreto (GABRICH, 2008).

As equações 3.1 e 3.2 demonstram este processo:



As reações químicas iniciam-se após o fim da pega do cimento, terminando quando todo o metacaulim da mistura reagir com o hidróxido de cálcio livre na pasta.

Medeiros e Helene (2003) apresentaram em suas pesquisas uma grande diferença entre as densidades do cimento Portland e o metacaulim. A substituição de cimento Portland, mais denso, por metacaulim, menos denso, produzirá um concreto fresco de menor densidade, resultando na redução do consumo de aglomerantes.

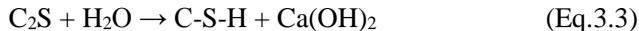
Para a produção da pozolana (aglomerante), a hidroxilação precisa ser alcançada, sem um superaquecimento. O material precisa “cozinhar”, mas até um certo ponto para que não ocorra uma queima acima do esperado, desta forma será produzido um material altamente pozolânico e amorfo. Caso haja superaquecimento, pode ocorrer a cristalização, formando a mulita, material refratário não reativo.

O metacaulim reage com Ca(OH)_2 produzindo silicato de cálcio hidratado (CSH) gel, em temperatura ambiente. O metacaulim também contém alumina que reage com CH produzindo outras fases de alumina. (SIDDIQUE; KHAN, 2011).

3.1.7 Sílica Ativa

Segundo os estudos a sílica ativa possui estrutura amorfa, com 85% a 98% de SiO₂, e elevada finura, pois o tamanho de suas partículas varia entre 0,1 a 0,2 mm e seu formato é esférico. Malhotra enfatiza ainda que a sílica ativa pode ser usada em duas diferentes situações, como substituto do cimento Portland para obter redução na quantidade do mesmo ou como adição para melhorar as propriedades do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido. A sílica ativa é um subproduto resultante do processo de obtenção do ferro silício e silício metálico. No forno elétrico, carregado com quartzo (SiO₂) e redutores (C), é gerado um gás (SiO) que ao sair deste, oxida-se formando a sílica amorfa (SiO₂), que é captada em filtros de manga e em seguida armazenada em silos pressurizados para densificação.

Devido ao seu alto teor de SiO₂ e elevada finura, o seu diâmetro é 100 vezes menor que o do cimento, a sílica ativa age ativamente de duas formas no concreto, ou seja, química e fisicamente. A sílica ativa reage com o hidróxido de cálcio livre da pasta de cimento, formando compostos mais estáveis quimicamente, aumentando assim a resistência mecânica do concreto. Esse processo pode ser representado pelas equações 3.3, 3.4 e 3.5 (GABRICH, 2008).



A sílica ativa é considerada uma pozolana muito reativa com grande capacidade de incorporação de íons, especialmente íons alcalis. Comparando-se a superfície específica da sílica ativa com a do cimento, verificam-se valores de 20.000m²/kg para a sílica e entre 350 a 600m²/kg para o cimento. A sílica ativa também age ativamente no concreto através do “efeito filler”, agindo de forma homogênea e preenchendo todo o espaço disponível, aumentando a coesão, promovendo o preenchimento dos vazios, reduzindo a exsudação e a segregação. A sílica ativa proporciona um grande refinamento na zona de transição da pasta de cimento hidratado com o agregado através dessas destas ações químicas e físicas.

3.1.8 Usos de Metacaulim

O uso de metacaulim tornou-se abundante em concretos com resistências acima de 40 MPa, concretos expostos em ambientes agressivos e ainda em concretos de alta performance. O uso deste material reduz o tamanho dos poros na pasta cimentícia e transforma partículas finas em poros descontínuos, reduzindo assim a permeabilidade do concreto substancialmente além de aumentar a resistência a flexão e compressão, reduz permeabilidade a água e eflorescência. O metacaulim também reduz o calor de hidratação controlando melhor a fissuração:

- Em concreto de alta performance, alta resistência e baixo peso;
- Pré-moldados para usos arquitetônicos, civis, industriais e outros fins estruturais específicos;
- Materiais de fibrocimento,
- Concretos reforçados com fibra de vidro;
- Argamassas, estuques, materiais para piscinas;

3.1.9 Vantagens do uso de Metacaulim

Várias são as características que acrescentam a este material destaque se comparado com outros aglomerantes, entre elas:

- Maior trabalhabilidade;
- Aumento da força de compressão;
- Aumento das forças de tensão e flexão;
- Aumento da durabilidade;
- Redução da permeabilidade;
- Aumento da resistência ao ataque químico;
- Redução da reatividade álcali-sílica (ASR);
- Redução da retração devido ao empacotamento das partículas;
- Redução do potencial de eflorescência.

3.2 USO DE GEOPOLÍMERO

Segundo Behzad, Jay e Faiz (2014), diversos grupos ao redor do mundo tem dispendido tempo no estudo do uso do geopolímero como composto sustentável, sua produção demanda menor quantidade de energia e as emissões químicas são menores.

Estudos prévios mostram que a idade do concreto não tem efeito considerável em resistência quando utilizado o geopolímero. O tempo de aproximadamente 3 dias da resistência de compressão de um geopolímero

equivale aos 28 dias do concreto com cimento Portland. (BEHZAD; JAY; FAIZ, 2014).

Helene e Terzian (1992) descreve que [...] as construções devem ser utilizadas durante períodos longos - em geral mais de cinquenta anos para edificações e mais de duzentos para barragens e obras de arte. A durabilidade das estruturas também é uma forma de economia de energia pois não exige demolições e reconstruções com o passar dos anos.

O desenvolvimento tecnológico dos materiais e das técnicas construtivas vem transformando as estruturas de concreto armado mais esbeltas, ou seja, o aproveitamento de espaço precisa ser otimizado, principalmente em grandes centros urbanos.

Swamy (1969) da Universidade de Sheffield, referia que [...] a pesquisa de ligantes alternativos ou a substituição dos materiais dos cimentos, constitui um desafio ao desenvolvimento global. De um ponto de vista econômico, tecnológico e ambiental, a substituição destes materiais cimentícios tem uma importância crucial no futuro da indústria da construção.

3.2.1 Química dos Sistemas Geopoliméricos

Como descrito por Davidovits e Morris (1988) foi em 1978 que se começou a entender as semelhanças das condições hidrotérmicas que regem a síntese dos plásticos fenólicos (orgânicos) e dos minerais feldspatóides e zeólitos. Os dois processos, requerem altos valores de pH, elevada concentração alcalina, pressão atmosférica e temperaturas inferiores a 150°C. Considerando estas semelhanças, Davidovits desenvolveu um programa experimental de investigação que levou à formulação de compostos inorgânicos de base polimérica, como produto identificou propriedades cimentícias e elevadas condições de estabilidade. A partir daí, definiu estes produtos como “geopolímeros” e criou uma nomenclatura para os classificar e justificar do ponto de vista da sua estrutura química.

Ao identificar tais produtos como geopolímeros, Davidovits procurou mostrar como foi possível transferir para o domínio dos materiais inorgânicos, como as argilas, caulinitas, escórias e aluminossilicatos em geral, os processos tecnológicos da polimerização orgânica, produzindo a baixa temperatura materiais dotados de características similares a outros que existem na Natureza, em particular os materiais zeolíticos e feldspatóides, como rigidez, resistência mecânica, inércia química e estabilidade.

Os alumino silicatos foram os materiais de partida utilizados, sendo por isso natural que a nomenclatura proposta traduzisse essa origem. O termo poli-sialato foi introduzido para caracterizar a rede de tetraedros de SiO_4 e AlO_4 que, ligados alternadamente e compartilhando todos os oxigênios dos vértices, constituem a matriz química dos geopolímeros.

A presença dos cátions Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ e outros, é indispensável para equilibrar as cargas negativas do Al^{3+} , em coordenação IV com o oxigênio, tornando portanto a estrutura eletricamente neutra. A Equação (3.2.1) empírica geral pode escrever-se assim (DAVIDOVITS; MORRIS, 1988):



Onde,

M – é um cátion (Na^+ , K^+ , ou Ca^{2+})

n – é o grau de polimerização

z - é igual a 1, 2 ou 3

w – é o grau de hidratação

3.2.2 Geopolímeros

Geopolímeros são polímeros obtidos por policondensação e tomam formas diferenciadas, curando rapidamente a baixa temperatura (algumas horas a 30°C , poucos minutos a 85°C e ainda mais rapidamente se sob ação de micro-ondas).

Trabalhos realizados por Palomo et.al. (1999) demonstram que a temperatura e o tempo de cura direcionam o comportamento mecânico dos geopolímeros fabricados à base de cinzas volantes, pois com o aumento da temperatura e do tempo de exposição a essa temperatura, os geopolímeros melhoram as resistências à compressão simples.

Hardjito (2004) concorda com os dados acima mas afirmam que não se verificam ganhos significativos para além dos 60°C nem das 48 horas de exposição. A reação, a que se pode chamar geosíntese, manifesta-se em abundância na natureza e baseia-se na capacidade do alumínio induzir, por ativação alcalina, alterações químicas e cristalográficas numa estrutura de matriz silicosa. De um ponto de vista estrutural e numa abordagem simples, consiste na transformação, num tempo muito curto, de uma estrutura plana como é a da caulinita.

Ainda não existem estudos sobre o endurecimento do geopolímero, mas o tipo de estrutura que se obtém é estável e confere durabilidade ao

material, diferentemente dos produtos de hidratação do cimento Portland, que, não existindo livremente na natureza, têm um potencial de combinação/alteração relativamente elevado, degradando-se posteriormente. De um modo geral, todos os materiais contendo sistemas de aluminosilicatos (desde resíduos de construção, escórias, cinzas volantes, pozolanas, até materiais puros como a argila, a caulinita ou o metacaulim) podem ser sujeitos a processos de geopolimerização, como de resto tem sido provado por diversos investigadores (Davidovits, Van Jaarsveld, Palomo, entre outros). Todavia, a grande maioria destes estudos tem sido feita numa base de escolha perfeitamente arbitrária, sem ter em linha de conta a mineralogia e a paragénesese dos mesmos materiais. Consequentemente, não é possível dispor ainda de um conhecimento genérico da propensão dos alumino-silicatos para a geopolimerização, a despeito da apreciável informação já existente sobre a solubilidade de materiais específicos em meios fortemente alcalinos (DAVIDOVITS, 2008).

3.2.2.1 Estrutura e propriedades dos Geopolímeros

A caulinita é um filo-silicato, formada por folhas tetraédricas de sílica e folhas octaédricas de gipsita (onde o íon coordenado é o alumínio).

Cada unidade de sílica $(\text{SiO}_4)_4$ compartilha três oxigênios, formando uma camada hexagonal. A organização do tipo 2:1 é característica da illita e da montmorilonita. Na illita a ligação entre lâminas é feita por íons de potássio, enquanto que na montmorilonita são moléculas de água que podem (ou não) ocupar esse lugar (DAVIDOVITS, 2008).

Normalmente, num cristal de caulinita existem 40 a 50 camadas estruturais. A análise por Raios X que mostra o espaçamento entre duas camadas consecutivas é da ordem dos 7 \AA (distância basal). Essas duas camadas são ligadas por meio de ligações de hidrogênio entre átomos O_2^- e grupos OH^- de planos atômicos justapostos. Por outro lado, a distância entre os vértices livres das folhas de sílica é da mesma ordem de grandeza da distância entre dois oxigênios ou duas hidroxilas dos octaedros da lâmina de gipsita, pelo que ambas as folhas se podem ligar formando uma unidade que se conhece pelo nome de “unidade tipo caulinita”.

A caulinita contém alguns átomos de cálcio, magnésio, ferro, cobre ou cromo substituindo átomos de alumínio, o que provoca pequenas modificações de cor, de consistência ou de clivagem. A desidroxilação do caulim provoca alterações estruturais na caulinita, em particular na coordenação dos átomos de alumínio.

Devido ao efeito da temperatura, as hidroxilas OH, situadas no centro de cada octaedro, unem-se de duas em duas, liberando uma molécula de água e em seu lugar resta uma molécula de oxigênio. Desta forma a estrutura semicristalina da caulinita é quebrada facilitando a reação de ativação alcalina.

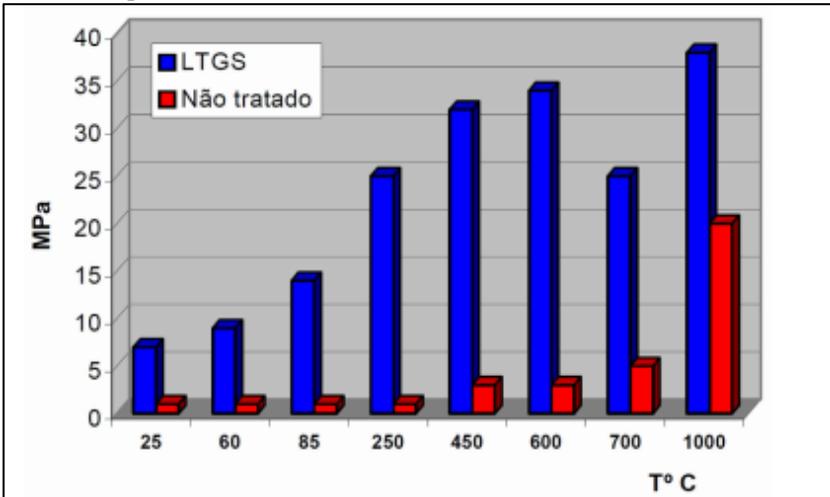
Assim os ânions tetraédricos de SiO_4 e AlO_4 vão, alternadamente, ligar-se, compartilhando todos os oxigênios dos vértices, transformando-se numa estrutura espacial. Este comportamento deve-se à ativação alcalina.

Davidovits (2008) desenvolveu e definiu reações de geossíntese, evidenciando a melhoria das características do produto final, controlando a temperatura, otimizando os fatores de controle da reação.

A reação de geossíntese é baseada na capacidade que o alumínio tem de induzir em certas condições alterações químicas e cristalográficas na estrutura da sílica, manifesta-se na natureza em grande abundância, embora em condições hidrotérmicas mais moderadas e necessitando, por isso, de um tempo muito mais longo para a sua conclusão (pelo menos 55% dos materiais constituintes da crosta terrestre são formados por sialatos e siloxo-sialatos, representando a sílica livre ou o quartzo apenas 12%).

O Gráfico 5 mostra a evolução da resistência mecânica do produto de uma reação elementar de geopolimerização de solos argilosos à temperatura ambiente, quando se varia a temperatura até valores da ordem dos 1000°C . Importante observar a evolução da mesma resistência num produto obtido por cura convencional de caulins não ativados. O termo LTGS (Figura 06) significa Low Temperature Geopolimeric Setting (Geopolímero de cura a baixa Temperatura) (DAVIDOVITS, 2008).

Gráfico 5 - Gráfico de comparação (Resistência x Temperatura) entre geopolímeros de cura a baixas temperaturas e geopolímeros sem tratamento prévio.



Fonte: Davidovits (2008).

Os catalisadores alcalinos NaOH ou KOH, possibilitam a reação entre os componentes minerais, proporcionando aproximação e consequente empacotamento.

3.2.2.2 Cimentos Geopoliméricos e Reações Álcalis-Sílica (RAS)

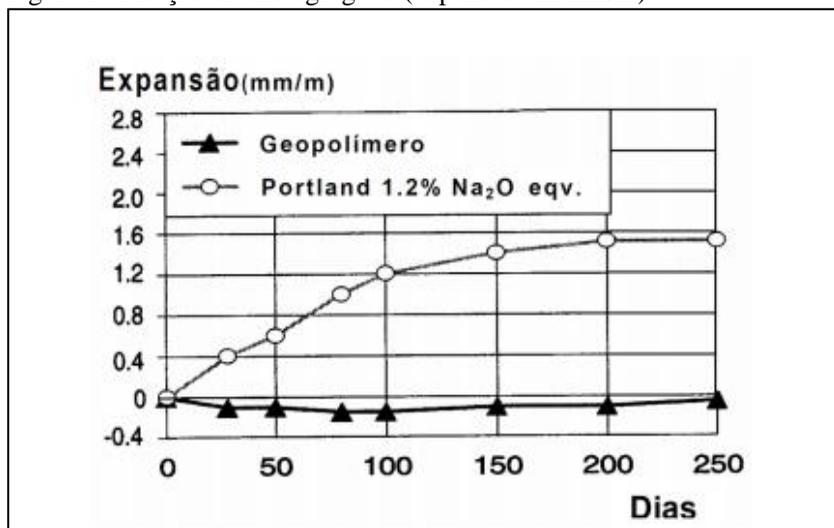
As substâncias alcalinas (ricas essencialmente em sódio e/ou potássio) são consideradas propulsoras de reações álcalis-sílica de consequências prejudiciais no comportamento e durabilidade dos concretos. Essas reações formam um gel silicatado que, ao absorver água se expande, podendo originar fissuras. Originadas estas fissuras, maior é a incidência de umidade e consequentemente mais absorção de água e fissuração, gerando um ciclo contínuo.

Em consequência, uma das principais preocupações dos fabricantes de cimentos tem consistido em limitar, a um valor considerado inócuo, a percentagem de matérias alcalinas nos compostos de base do fabrico do cimento Portland. Assim, várias normas regulamentares impõem o limite máximo de 0.6% à presença de substâncias alcalinas no cimento, percentagem essa que é expressa em óxido de sódio, Na₂O.

Ainda assim, estudos conduzidos por Mehta (1981), Davis et.al. (1935), Mindless e Young (1981) e outros ainda, mostraram que a adição de pozolanas alcalinas naturais (aluminos-silicatos potássicos ou sódicos) reduzem significativamente o potencial de reação álcalis-sílica de cimentos com elevado teor de álcalis. Sersale e Frigione (1987) foram mais longe, ao juntarem minerais do tipo zeolítico (chabazita e phillipsita) aos cimentos e eliminando (segundo eles) totalmente a RAS (Reações Álcalis-Sílica). Também Talling e Brandstetr (1989) e Metso (1982) apresentaram conclusões sobre a não existência de RAS em concretos e argamassas exclusivamente fabricados com ligantes obtidos por ativação alcalina de escórias de alto-forno. Jones, Walters e Kostuch. (1992), afirmam ter eliminado totalmente a possibilidade de Reações Álcalis-Sílica, RAS, em concretos fabricados com agregados reativos e cimento do tipo Portland, ao substituírem até 25% de cimento por metacaulim, sem com isso verificarem qualquer redução na resistência à compressão dos concretos assim fabricados.

A Figura 2 mostra o cimento geopolimérico com praticamente 1.2% de conteúdo alcalino sem expansão deletéria com os inertes. (Resultados do ensaio de expansão por RAS, de acordo com ASTM C227).

Figura 2 - Reação álcalis-agregado (expansão em mm/m).



Fonte: Sussekind (1980).

As reações álcalis-sílica podem ser explicadas como situações em que os álcalis do cimento, depositados em solução nos poros, reagem com certas formas de sílica presentes nos agregados que se utilizam nos concretos. Desta forma formam na superfície dos mesmos um gel silicatado que, ao absorver água, aumenta consideravelmente de volume. O aumento do volume pode originar o desenvolvimento de tensões internas nos concretos, superiores à capacidade resistente destes, provocando fissuração. O concreto fissurado tem seu comportamento mecânico afetado e torna-se mais permeável à água.

Toda a sílica é potencialmente reativa. Mehta (1994) com base em estudos ordenaram silicatos por ordem decrescente de reatividade, mostrando que os materiais de mais alta reatividade são os que apresentam estruturas amorfas ou muito pouco cristalinas: opala, obsidiana, cristobalita, tridimita, e o menos reativo foi o quartzo metamórfico, por ser também a forma mais ordenada da sílica.

As RAS iniciam suas reações na superfície dos agregados, mas os íons ativos presentes como o hidroxilo OH^- , Na^+ , K^+ ou mesmo Ca^{2+} podem mais facilmente penetrar numa estrutura pouco cristalina e por isso mais aberta.

As RAS são basicamente fenômenos multifásicos, sendo que três fases são claramente distinguidas:

(a) primeira etapa: dissolução da sílica, pelo ataque das hidroxilas (OH^-) às ligações siloxano Si-O-Si , acontece a quebra e formam-se grupos silanol do tipo Si-OH . Estes, juntamente com os já existentes no concreto, reagem em segunda fase;

(b) as hidroxilas, novamente, dão origem a materiais do tipo Si-O , que repolimerizados por sua vez, formam monômeros, dímeros, trímeros, etc.

Assim, as cargas negativas destes atraem então cátions do tipo alcalino (Na^+ , K^+) e alcalino-terrosos como o Ca_2^+ , que assim integram a formação de um gel silicatado alcalino, no primeiro caso, ou estruturas do tipo C-S-H, no segundo.

3.3 CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS

O concreto possui uma série de características que lhe garantem o posto de material estrutural mais utilizado no mundo. Apesar disso, este material possui uma série de limitações, como o comportamento marcadamente frágil e a baixa capacidade de deformação apresentada antes da ruptura quando o material é tracionado. Além disso, a sua resistência a tração é muito reduzida quando comparada a sua resistência

à compressão em função da suscetibilidade do material às fissuras e microfissuras que podem ocorrer em seu interior (FIGUEIREDO; CECCATO; TORNERI, 2007).

Ainda, segundo Figueiredo, Ceccato e Torneri. (2007) a adição de fibras, na quantidade e teor adequados, acabam por alterar o caráter frágil do concreto. As fibras servem como pontes de resistência e transferência de tensões causadas pelas fissuras, diminuindo assim a velocidade de propagação das mesmas. O concreto passa a ter um comportamento pseudo-dúctil.

As fibras utilizadas em concreto podem ser de diferentes materiais: aço, polipropileno, vidro, etc, e de diferentes tamanhos. Podemos classificar as fibras em fibras curtas, longas, macrofibras e microfibras. Na Figura 3 visualiza-se diferentes tamanhos de fibras de aço. As macrofibras de aço, utilizadas neste estudo, são as maiores da foto, com 5cm de comprimento.

Levando-se em consideração a atuação da fibra como ponte de transferência de tensão ao longo da fissura, pode-se deduzir que quanto mais pontes de transferência forem introduzidas no concreto, melhor será a distribuição de forças reduzindo a fissuração.

Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000) ainda salienta que os concretos com fibras podem ser definidos como compósitos, ou seja, materiais constituídos de, pelo menos, duas fases principais: O próprio concreto (denominado matriz) e as fibras (reforço do compósito).

As fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a maior dimensão da sua seção transversal.

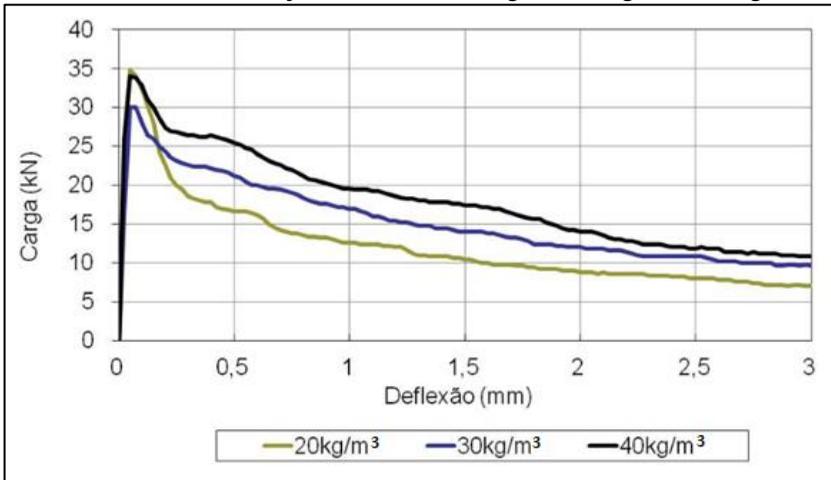
Figura 3 - Macrofibras de aço.



Fonte: Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000).

No Gráfico 6 é possível visualizar o efeito que as diferentes adições percentuais de fibras e a variação de capacidades de cargas.

Gráfico 6 - Representação gráfica da deflexão x carga de corpos de prova com diferentes concentrações de fibras. 20 Kg/m³, 30Kg/m³ e 40Kg/m³.



Fonte: Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000).

3.3.1 Fibras de aço

Em 1990 surgiram as primeiras fibras poliméricas no mercado internacional, as quais eram originalmente utilizadas em concreto projetado. Atualmente, existem no mercado brasileiro uma gama enorme de fibras disponíveis. As fibras escolhidas foram concebidas para reforço estrutural. A composição do material da fibra irá definir seu módulo de elasticidade e resistência mecânica, estas duas características são fundamentais para a definição da função que a fibra exercerá sobre o concreto (FIGUEIREDO; NUNES; TANESI, 2000).

O concreto apresenta uma grande dificuldade em interromper a propagação de fissuras quando é submetido à tração. Quando as fissuras são transversais à direção principal de tensões, a área disponível para suporte de carga é reduzida e aumenta a tensão nas extremidades das fissuras (Figura 4). Assim a ruptura de tração acontece pela junção de várias pequenas fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Logo, o trabalho que a fibra pode realizar sobre a transferência de tensão pode restringir a propagação destas fissuras.

A Tabela 1 apresenta diferentes tipos de fibras com seus respectivos diâmetros, densidades, módulos de elasticidade, resistência a tração e deformação.

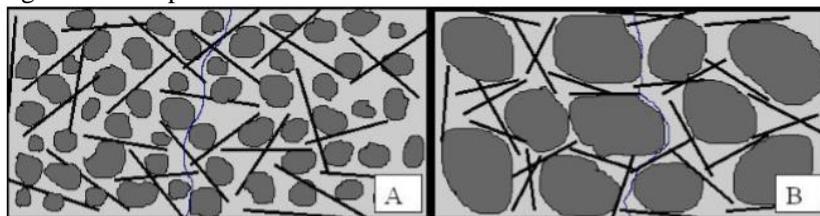
Tabela 1 – Tipos de fibras e características.

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Náilon	–	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	–	1,2	10	0,3-0,5	–
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Poliétileno	–	0,95	0,3	$0,7 \times 10^{-3}$	10
Fibra de madeira	–	1,5	71	0,9	–
Sisal	10-50	1-50	–	0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)	–	2,50	10-45	3,7	0,02

Fonte: Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000).

A seguir podemos visualizar na Figura 4, a compatibilidade dimensional das fibras, onde se apresenta que para ser compatível, as fibras devem ter dimensão pelo menos três vezes maior que as partículas da matriz. A Figura 4 (A) apresenta os agregados graúdos na dimensão compatível com o uso da fibra, desta forma o caminho normal da fissuração é interrompido pela fibra, criando uma rede de resistência. Na Figura 4 (B), o agregado graúdo tem a dimensão semelhante à da fibra, assim, a adição de fibras pouco colabora com o aumento da resistência a fissuração (FIGUEIREDO; NUNES; TANESI, 2000).

Figura 4 –Compatibilidade dimensional das fibras.



Compósito A: compatibilidade dimensional entre fibra e matriz.

Compósito B: incompatibilidade dimensional entre fibra e matriz.

Fonte: Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente trabalho consistiu em avaliar o desempenho de vigas de concreto geopolimérico adicionadas de fibras de aço do tipo A-II em diferentes proporções.

Com o intuito de se comparar o desempenho entre vigas de concreto com cimento Portland e vigas com concreto geopolimérico, foram moldados protótipos de vigas para verificação das resistências mecânicas.

Primeiramente foram fabricados dois modelos de vigas, uma com concreto convencional e outra com concreto geopolimérico com dimensões 12 x 25 x 250 cm. A fabricação destas vigas visava comparar o desempenho do uso do concreto geopolimérico em comparação com o concreto de cimento Portland.

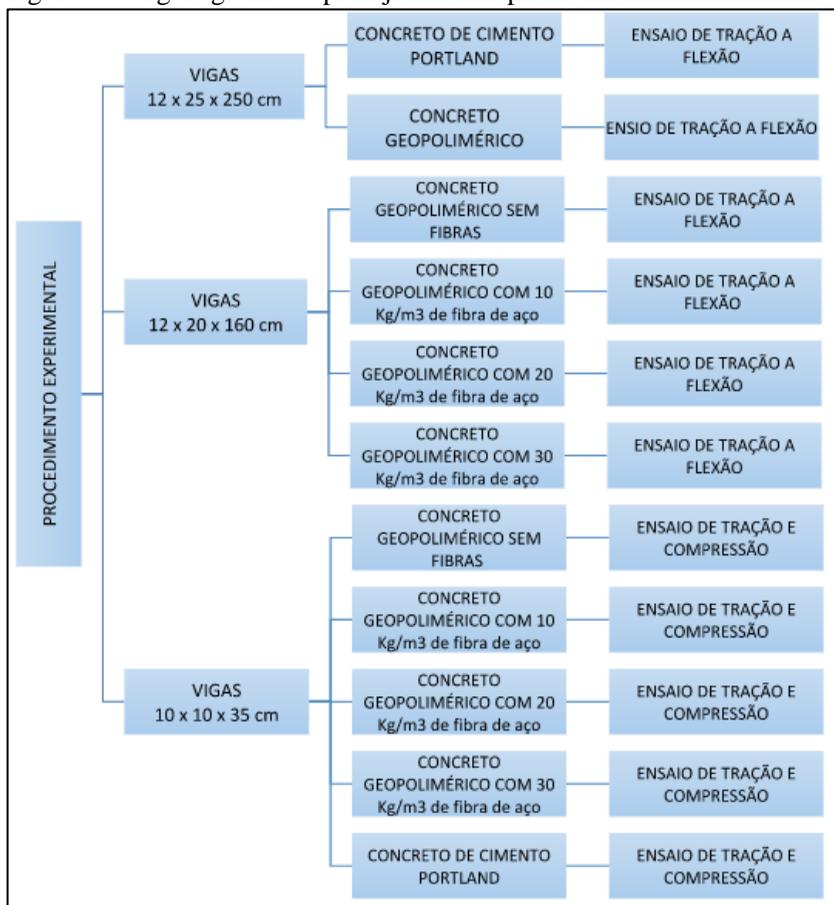
Posteriormente, foram fabricadas 4 vigas, em escala reduzida, com dimensões de 12 x 20 x 160 cm, sendo uma unidade moldada sem o uso de fibras de aço, e as demais com adição de fibras de aço nas proporções de 10Kg/m³, 20 Kg/m³ e 30Kg/m³.

Por fim, foram moldados 15 corpos de prova, com dimensões de 10x10x350 cm seguindo a norma ASTM1609 (2012).

Destas 15 amostras, 3 foram moldadas com concreto geopolimérico sem o uso de fibras, 3 unidades com concreto geopolimérico com 10Kg/m³, 3 unidades com concreto geopolimérico com 20Kg/m³, 3 unidades com concreto geopolimérico com 30Kg/m³ e também 3 unidades foram moldadas com concreto convencional utilizando-se cimento Portland.

O organograma pode ser visualizado na Figura 5, como todas as amostras ensaiadas neste trabalho.

Figura 5 – Organograma do planejamento experimental.



Fonte: Autor (2016).

4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nos ensaios e os traços para concreto produzido com cimento Portland e concreto produzido com metacaulin estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 -Traços do concreto convencional e concreto geopolimérico.

Materiais	Composição Geo (em massa)	Materiais	Composição Ref (em massa)
Cimento Gepolimérico ¹	1	Cimento Portland	1
Relação a/c	0,75	Relação a/c	0,4
Areia	3,8	Areia	2,3
Brita	1,2	Brita	2,7
Areia + Brita	5	Areia + Brita	5

¹ As composições de cimento com uma razão geopolimérica: $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O} = 6,94$; $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 = 3,20$; $\text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3 = 0,46$; $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 / \text{NaOH} = 1,60$

Fonte: Pelisser et al. (2013)

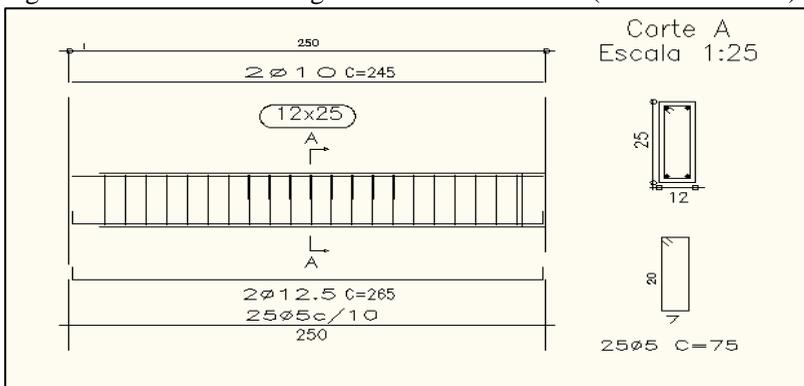
4.2 ENSAIOS COM VIGAS DE 12 X 25 X 250 CM.

Primeiramente foram fabricadas duas vigas com dimensões semelhantes a vigas de edificações de médio porte, o intuito foi verificar a diferença entre uma viga de concreto Portland com uma viga de concreto geopolimérico sem adições de fibras.

Esta primeira etapa do trabalho visa comparar as resistências entre uma viga de concreto fabricada com o uso de cimento Portland e uma viga confeccionada em concreto geopolimérico com o uso do metacaulim.

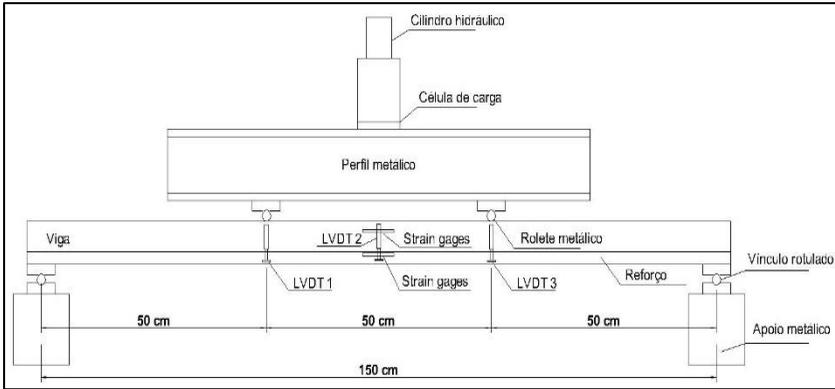
A Figura 6 apresenta as dimensões da ferragem utilizada para as vigas (concreto de cimento Portland e concreto de metacaulim, com dimensões de 12 x 25 x 250cm). O equipamento utilizado neste ensaio está representado da Figura 7.

Figura 6 -Armaduras das vigas de 12 x 25 x 250cm. (Unidades em cm).



Fonte: Autor (2015).

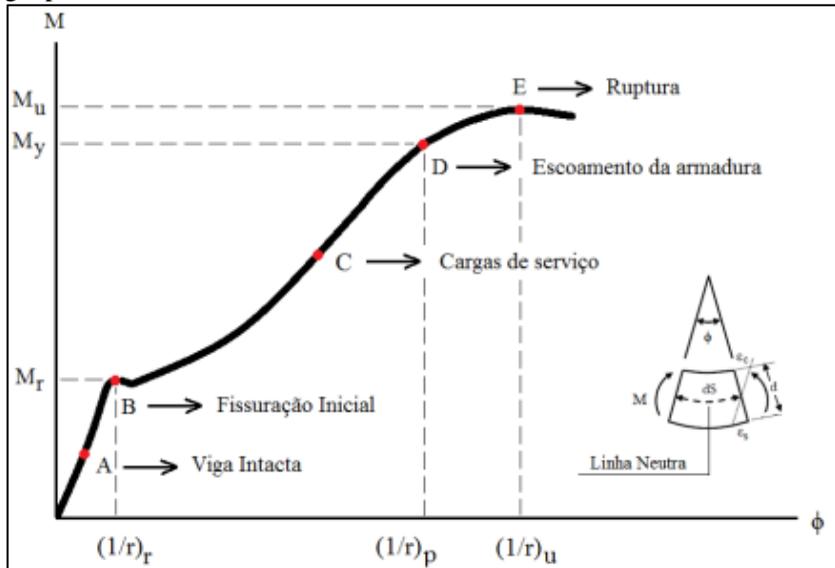
Figura 7 - Representação esquemática do equipamento utilizado no ensaio das vigas.



Fonte: Autor (2015).

Para a avaliação das vigas utilizou-se o modelo de análise do comportamento mecânico conforme recomendações de ensaio proposto por Leonhart e Walther (SUSSEKIND, 1980), como ilustra a Figura 8.

Figura 8 – Modelo e instrumentação do ensaio de viga com concreto geopolimérico.



Fonte: Sussekind (1980).

Pode-se traçar então a linha elástica da viga através das curvas de carga x deslocamentos verticais, obtida com os LVDTs posicionados ao longo do comprimento. Com os valores de deformação será possível ter uma melhor compreensão das fases de deformação que dividem os limites dos Estádios em valores de momento fletor de fissuração (M_r) e momento fletor de plastificação (M_y) e momento último ou de ruptura (M_u). Desta forma é possível caracterizar um modelo para o fenômeno de mudança de Estádios de deformação de uma viga de concreto geopolimérico pela da observação da relação entre o momento fletor e a curvatura formada na seção transversal da viga, como ilustra a Figura 9. Além de mapear o desenvolvimento das fissuras e a forma de ruptura.

Para caracterizar o comportamento das vigas, observou-se a relação entre a carga e a curvatura “ ϕ ”, formada na seção transversal da viga, que leva em consideração as deformações específicas obtidas pelos extensômetros elétricos (straingages) no aço e concreto (Equação 4.1.1)

$$\phi = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{d} \quad (\text{Eq. 4.1.1})$$

Onde: ϕ é a curvatura da seção transversal; ε_s é a deformação no aço; ε_c é a deformação na parte de concreto mais comprimida da seção transversal; d é a altura útil da viga.

4.3 ENSAIOS COM VIGAS DE 12 X 20 X 160 CM.

A segunda etapa do trabalho, contempla a concretagem e ensaio de vigas em concreto geopolimérico de menor porte, medindo 12 x 20 x 160cm.

A tabela 3 apresenta as características das vigas moldadas. Foram moldadas 4 unidades de vigas de concreto geopolimérico com medidas de 12 x 20 x 160cm sem adição e com diferentes adições de fibras.

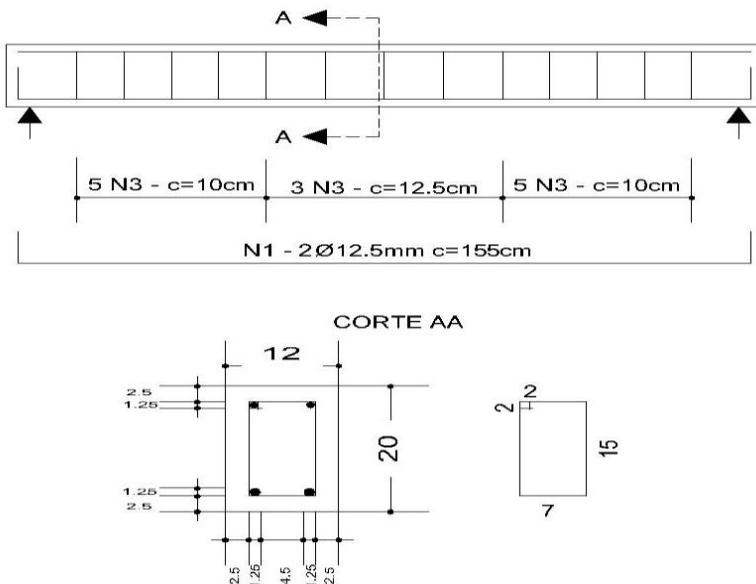
Tabela 3 - Composição das diferentes vigas de concreto geopolimérico.

MODELO	COMPOSIÇÃO
Viga 01	Concreto geopolimérico
Viga 02	Concreto geopolimérico com adição de 10Kg/m ³ de fibras de aço
Viga 03	Concreto geopolimérico com adição de 20Kg/m ³ de fibras de aço
Viga 04	Concreto geopolimérico com adição de 30Kg/m ³ de fibras de aço

Fonte: Autor (2015).

As mesmas foram ensaiadas seguindo os mesmos procedimentos dos ensaios com as vigas de 12 x 25 x 250cm.

Figura 9 - Ferragem das vigas de 12 x 20 x 160cm. (Unidades em cm).



Fonte: Autor (2015).

Figura 10 - Aspecto da armação e forma das vigas.



Fonte: Autor (2015).

As vigas foram concretadas e vibradas com auxílio da mesa vibratória. Após a concretagem foram curadas ao ar livre, em área coberta, mostrado na Figura 11.

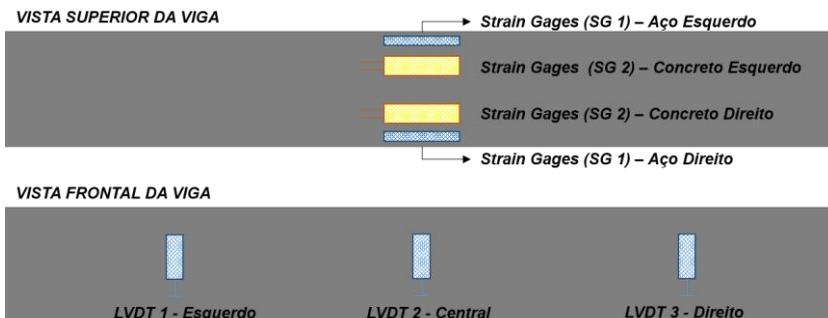
Figura 11 - Moldagem das vigas sem adição de fibras de concreto geopolimérico.



Fonte: Autor (2015).

Na sequência as vigas foram posicionadas sob um pórtico metálico de reação e a carga foi aplicada mediante um cilindro hidráulico de controle elétrico com capacidade de 500 kN, os valores de carga foram registrados por meio de uma célula de carga disposta entre o cilindro hidráulico e a viga de distribuição (perfil I - metálica). Foram avaliados os deslocamentos verticais em 03 pontos (LVDT 1, LVDT 2, LVDT 3) ao longo do comprimento da viga com a utilização de transdutores indutivos de deslocamentos (LVDT - Linear Variable Differential Transformes). As deformações foram monitoradas através de extensômetros elétricos (Strain Gages) colocados nos materiais em pontos estratégicos de deformação: no concreto e na armadura de flexão, como mostra o croqui da Figura 12. Os equipamentos foram conectados ao sistema de aquisição de dados Quantum X® com interface com o software Catman Easy®, ambos da HBM®.

Figura 12 - Posicionamentos dos LVDT's e SG's ao longo da viga.



Fonte: Deghenhard (2015).

A Figura 13 apresenta a viga no suporte sob o pórtico de carga e a montagem de sensores para acompanhamento da ruptura.

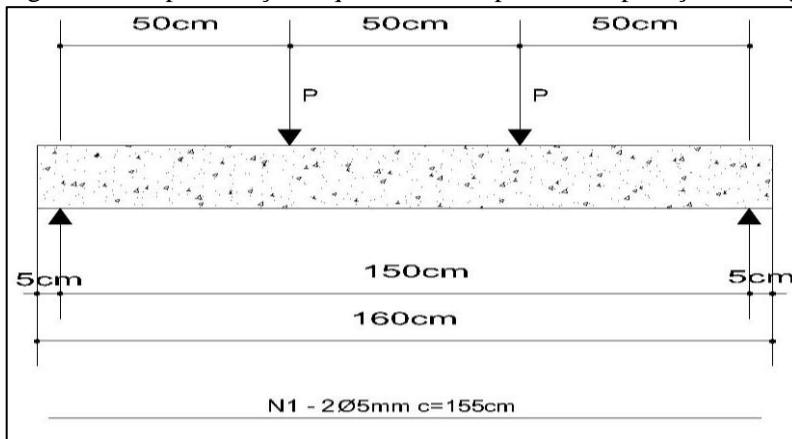
Figura 13 - Foto do equipamento montado para o ensaio de resistência a flexão.



Fonte: Autor (2015).

Na Figura 14, apresenta-se os pontos onde a carga foi aplicada.

Figura 14 - Representação esquemática dos pontos de aplicação de carga.



Fonte: Autor (2015).

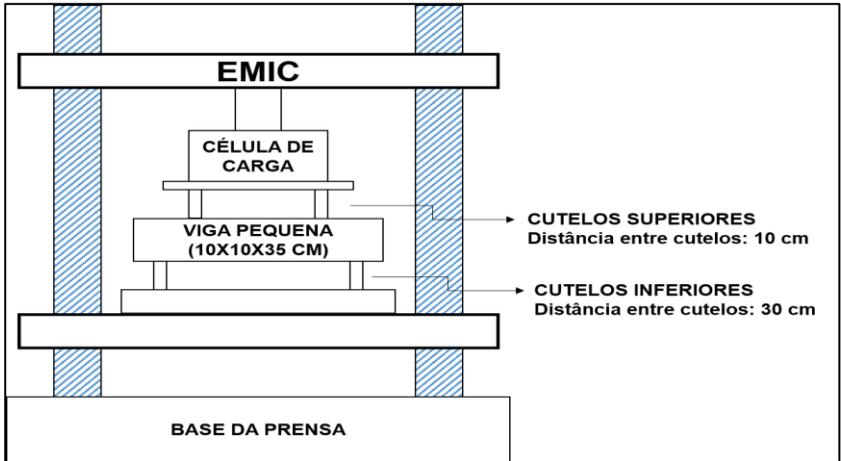
4.4 ENSAIOS COM CORPOS DE PROVA DE 10 X 10 X 30 CM.

Como confirmação dos resultados obtidos nos ensaios de vigas com dimensões 12 x 20 x 160 cm, foram moldadas 15 corpos de prova prismáticos de concreto geopolimérico com diferentes concentrações de fibras de aço. Os ensaios de caracterização do concreto foram realizados no LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC, localizado no I-Parque.

Os ensaios de flexão a 3 pontos, demonstrados no croquis da Figura 21, foram executados através de uma prensa eletromecânica, micro processada, da marca EMIC de modelo DL10000 com uma capacidade de carga de 100 KN junto ao computador com software TESC - Test Script, que fornece recursos para a leitura e obtenção dos resultados, seguindo a norma regulamentadora ABNT NBR 12142 (2010), que diz:

- A distância entre apoios e pontos de aplicação de força deve permanecer constante durante o ensaio;
- A força deve ser aplicada normalmente à superfície do corpo de prova, evitando excentricidade;
- A direção das reações deve ser mantida paralela à direção da força durante todo o ensaio;
- A força deve ser aplicada de forma gradual e uniforme, evitando choques.

Figura 15 - Detalhe da prensa eletromecânica – EMIC – DL 10000



Fonte: Autor (2015).

5 RESULTADOSE DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados do programa experimental detalhado no capítulo anterior, correlacionando-os com o que apresenta a literatura da área.

A ordem da apresentação dos resultados foi definida de forma a facilitar a compreensão do leitor.

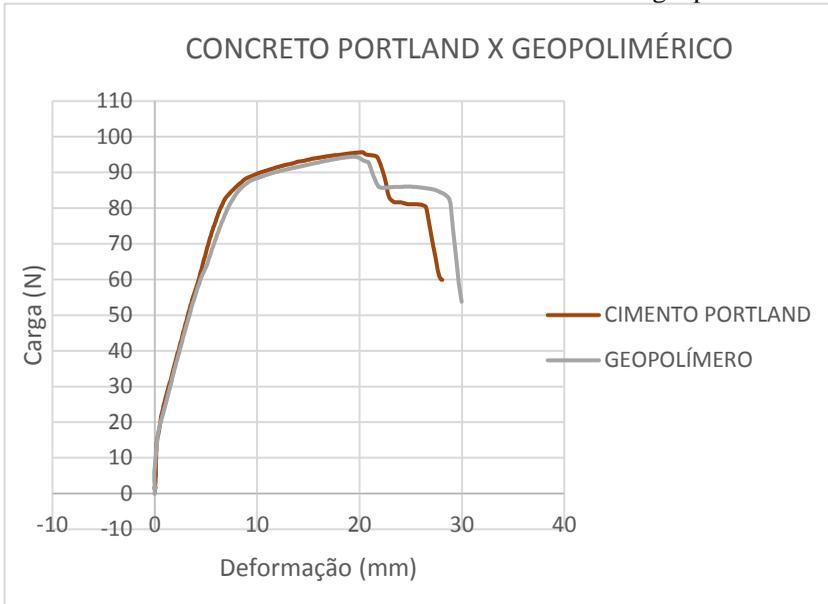
5.1 VIGAS 12 X 20 X 250 CM

As primeiras amostras ensaiadas foram as vigas de maior porte. Medindo 12 x 20 x 250 cm, foram moldadas duas amostras para comparação direta entre um elemento em concreto Portland e um elemento em concreto geopolimérico.

As vigas foram curadas por 90 dias, ao ar livre, sem qualquer dispositivo de aquecimento ou umidificação.

Conforme resultados da Gráfico 7, é possível verificar-se que as amostras em concreto de cimento Portland e concreto geopolimérico apresentaram resistências e deslocamentos máximos muito semelhantes, apontando para um comportamento de mesmas resistências a flexão. Tal fato já era esperado e corrobora com dados presentes na literatura, apresentando o aglomerante Metacaulim como similar ao cimento Portland (SWAMY, 1982).

Gráfico 7 - Comparativo entre as resistências de duas vigas, moldadas em concreto com cimento Portland e concreto geopolimérico.



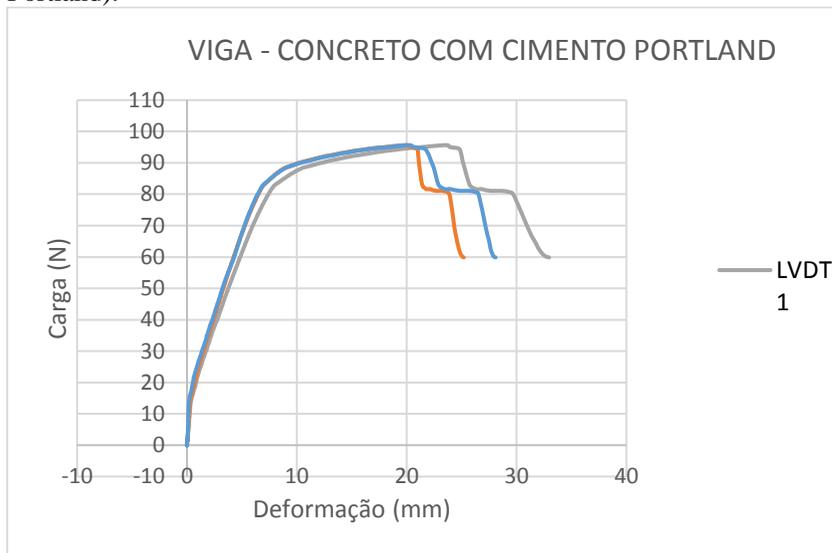
Fonte: Autor (2015).

Pode-se verificar na representação gráfica do Gráfico 7 que independentemente da posição dos LVDTs, o comportamento Tensão x Deformação da viga é bastante uniforme em todas os pontos medidos. Davidovits já trabalhou com resultados similares, onde o comportamento de ambos materiais teve a mesmo comportamento, apontando o concreto geopolimérico como candidato a substituição mesmo que parcial do concreto com cimento Portland.

Observou-se ainda que a fase elástica de ambos materiais aconteceu até uma deformação média de 7,5mm, suportando aproximadamente 85 N. Entre os 7,5mm e 20 mm, após o limite de escoamento, as amostras apresentaram comportamento fissurado, chegando até a ruptura em 20mm de deformação, resistindo uma carga de 95 N. As fases na amostra de concreto geopolimérico e na amostra de concreto produzido a partir de cimento Portland mostraram-se muito semelhantes.

A Gráfico 8 apresenta as deformações em função da carga em uma viga de Cimento Portland. A carga máxima admitida nesta amostra foi de 95,66 N.

Gráfico 8 - Deformações em função da carga (Viga com cimento Portland).

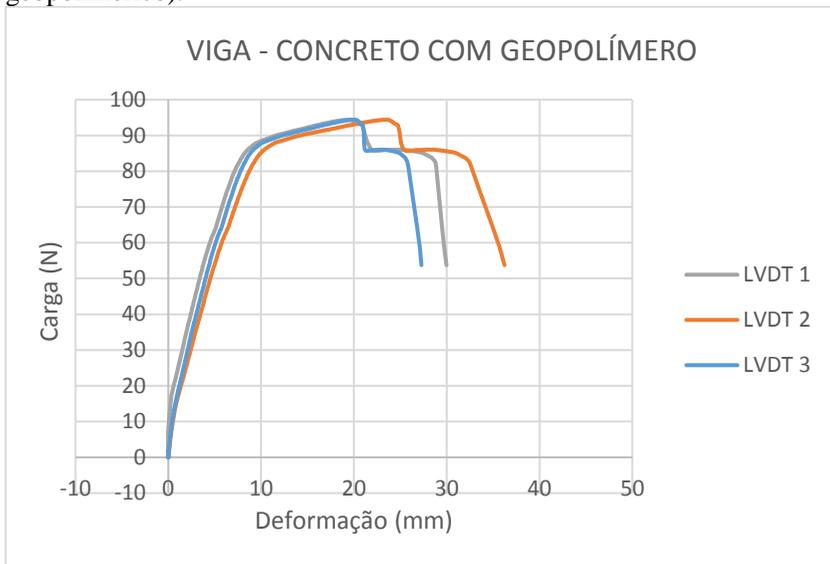


Fonte: Autor (2015).

Esta amostra foi moldada como modelo de comparação, visto que este comportamento é vastamente conhecido na literatura (YANG; CHANGIN; BYUNG-SUK, 2009). A carga máxima média foi atingida em 96,5 N, e os deslocamentos variam em função do posicionamento dos LVDTs ao longo da viga (centro e posições intermediárias entre extremidade e centro). Estes valores servirão como base para os comparativos com as demais amostras de concreto geopolimérico. O comportamento elástico manteve-se até a carga de escoamento de 82,2 N, ponto onde o material inicia a fase de estrição, e segue deformando de forma permanente até o ponto de ruptura, que aconteceu com a carga máxima de 96,5 N.

No Gráfico 9 se apresenta o comportamento dos LVDTs numa amostra de concreto geopolimérico.

Gráfico 9 - Deformações em função da carga (Viga com concreto geopolimérico).



Fonte: Autor (2015).

Na amostra de concreto geopolimérico, pode-se verificar na representação gráfica que a resistência máxima média atingida foi de 96,7 N·valor este muito próximo ao apresentado no ensaio da viga de concreto a partir de cimento Portland. Ainda é possível verificar o comportamento elástico, que mantém o material sob este regime até o ponto de escoamento, que acontece quando a carga de 87,6 N é atingida. A partir deste ponto, o material entra em regime plástico, adquirindo deformação permanente.

As duas amostras de vigas com dimensões de 12 x 20 x 250 cm de tamanho grande, de concreto Portland e concreto geopolimérico apresentaram valores elevados de resistência entre 90 e 100 N/m², e as amostras suportaram deslocamentos na linha média de 28mm e 30 mm respectivamente antes de colapsar.

Estes comportamentos semelhantes, entre concreto de cimento Portland e concreto com cimento Geopolimérico indicam que a substituição do aglomerante cimento Portland pelo geopolimérico é viável (PELISSER et al, 2013).

5.2 VIGAS 12 X 20 X 160 CM

Para o ensaio de tração a flexão nas vigas de 12 x 20 x 160 cm, repetiu-se o modelo utilizado para a vigas de 12 x 20 x 250 cm.

A ruptura da viga de concreto confeccionada a partir de cimento Portland pode ser visualizada na Figura 16. Com atenção aos detalhes ao posicionamento das fissuras.

Figura 16 - Ruptura no ensaio de tração.



Fonte: Autor (2015).

Os ensaios de ruptura das vigas de tamanho 12 x 20 x 160 cm apresentaram resultados esperados, considerando-se a resistência a tração x deformação.

Tabela 4 - Resultados de deslocamento máximos antes e após ruptura.

Amostras	Carga máx. (Kg)	Deslocament o máximo antes da ruptura (mm)	Deslocament o máximo após ruptura (mm)
VIGA SEM FIBRA DE AÇO (REFERÊNCIA)	7233,45	6,22	0
VIGA COM 10Kg/m ³ DE FIBRA DE AÇO	5285,58	9,53	15,45
VIGA COM 20Kg/m ³ DE FIBRA DE AÇO	6855,45	12,31	36,41
VIGA COM 30Kg/m ³ DE FIBRA DE AÇO	9753,34	19,66	37,25

Fonte: Autor (2016).

Conforme mostrado na Tabela 4 verifica-se que a amostra produzida sem a adição de fibras de aço, atingiu 7.233,45Kg antes do rompimento, apresentando deformação máxima de 6,22mm no centro da viga antes da ruptura.

Adicionando-se 10Kg/m³ de fibras de aço, a viga amostra apresentou menor resistência a tração, recebendo o máximo de 5.285,58Kg antes do rompimento, porém aceitou uma maior deformação antes da ruptura, 9,53mm.

A adição de 20Kg/m³ de fibras de aço na mistura, aumentou a capacidade de carga, atingindo 6.855,45Kg e flecha de 12,31mm antes de romper.

Com 30Kg/m³ de fibras de aço, a carga antes da ruptura foi de 9.753,34Kg e deslocamento antes de rompimento de 19,66mm.

Analisando o conjunto de resultados, percebe-se que as fibras, aumentaram o deslocamento máximo das amostras, pois formam uma ponte de ligação não permitindo que o material se rompa de forma brusca. Quanto maior foi o incremento das fibras, maiores foram os deslocamentos observados. A amostra sem a adição de fibras, rompeu-se de forma imediata, partindo-se em duas partes no momento do colapso.

Ainda é possível perceber que existe um ponto ótimo, a partir do qual a quantidade de fibras presentes passa a auxiliar no aumento da resistência a flexão. Tal efeito ocorre porque a interação fibra-matriz passa a ser preponderante sobre outros efeitos (SALVADOR, 2013).

Verifica-se que as curvas obtidas neste procedimento de ensaio apresentam boa proximidade com as curvas obtidas pela norma ASTM C1609. Com o aumento da dosagem de fibras, a carga que a amostra suporta é maior.

Apesar da adição da fibra gerar um acréscimo de suporte a ruptura, visto que a amostra não se rompe de imediato, o comportamento frágil não é alterado. Para Figueiredo (2005), no concreto simples uma fissura representa uma barreira à propagação de tensões, o que causa uma concentração de tensões na extremidade da fissura. O trabalho de ponte de transferência de tensão de tração que a fibra realiza através das fissuras no concreto é um mecanismo muito interessante de aumento de energia associada à ruptura do material e à restrição à propagação das fissuras. Num determinado instante a concentração de tensões causa a ruptura da matriz, o que leva a uma extensão da fissura, sendo este um processo contínuo até a ruptura completa do concreto, mantendo, porém, mesmo com a adição da fibra um comportamento frágil. De modo que não se pode contar com nenhuma capacidade resistente do concreto fissurado

5.3 CORPOS DE PROVA 10 X 10 X 35 CM

Como comprovação aos ensaios realizados com vigas de dimensões 12 x 20 x 160 cm, foram moldadas vigas com tamanho reduzido para comparativos entre os percentuais de adição de fibras de aço.

O ensaio mecânico a flexão por 04 pontos submeteu o material a um esforço de carga pré-determinada. As propriedades são especialmente úteis para controle de qualidade e para a especificação de materiais. A partir de uma barra retangular moldada simetricamente biapoada, a carga prevista é aplicada nos terços médios do corpo de prova, de acordo com a Figura 24. As vigas de tamanho reduzido foram ensaiadas até o colapso, sem fibras e com as diferentes composições de fibras.

Verificou-se que as amostras sem fibras no momento do rompimento, partiram-se, enquanto as demais amostras, com adições variadas de fibras, apesar de rompidas, ainda permaneceram unidas.

Os melhores níveis de resistência ocorreram nas amostras com 30Kg/m^3 , porém esta adição de fibras não apresentou comportamento linear. A resistência até o ponto de colapso teve resultados que apontaram uma diminuição da resistência da tração com o incremento de fibras até o ponto de 20Kg/m^3 , porém quando a adição chegou próxima de 30Kg/m^3 , as amostras apresentaram um significativo aumento de resistência. Percebe-se que o ganho de carga resistida proporcionado pela fibra é mais intenso para a fase pós ruptura, onde sua atuação é fundamental, dado que é o único elemento atuando na transferência de tensões ao longo das fissuras que já seccionaram as amostras ao longo de todo o seu comprimento. Este comportamento pode ser visto na Figura 26.

É visível a diferença entre as amostras com fibras e a amostra sem a adição. Enquanto as amostras com adições variadas de fibras, mesmo colapsadas, mantiveram-se na posição horizontal e não caíram do suporte do ensaio Figura 17 – B, C, D), as amostras sem fibras, devido ao comportamento frágil do concreto, e sem o aço para suportá-las na posição horizontal, partiram-se em duas partes (Figura 17 - A).

Figura 17 - Vigas 10x10x35cm sem adição de fibras de aço (A), com adição de 10Kg/m³ de fibra de aço (B), com adição de 20Kg/m³ de fibra de aço (C) e com adição de 30Kg/m³ de fibra de aço (D).



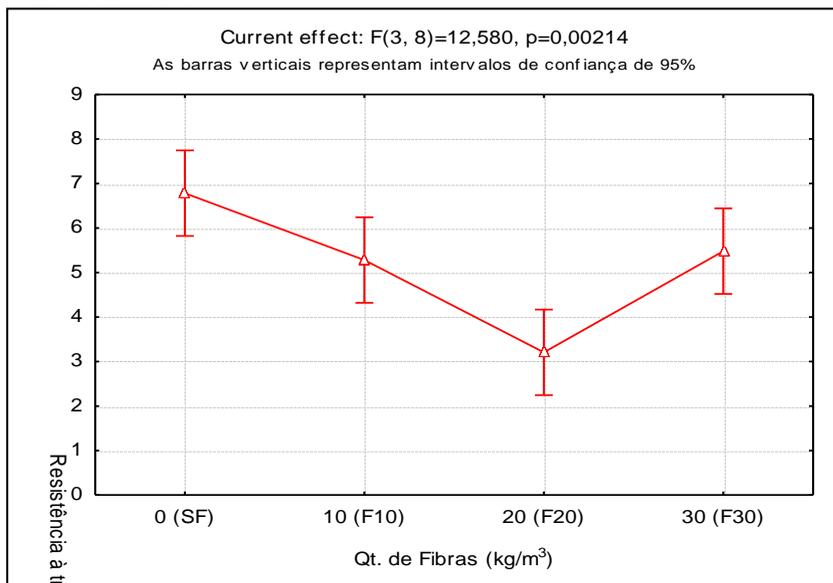
Fonte: Autor (2015).

O ensaio de tração a flexão está demonstrado no Gráfico 10. Para analisar estatisticamente os resultados aplicou-se uma análise de variância

(ANOVA). Essa análise mostrou que a carga para ruptura forneceu valores estatisticamente iguais ($p > 0,05$) entre todos os grupos, com um nível de confiança de 95%.

Verificou-se, confirmando resultados de outros trabalhos semelhantes (SALVADOR, 2013), que a tenacidade aumenta com o incremento da quantidade de fibras. Como a adição de fibras limitou-se ao valor de 30Kg/m^3 , não se pode avaliar o ponto ótimo desta adição.

Gráfico 10 - Comparativo do ensaio de tração entre as várias amostras com e sem fibras.



Fonte: Autor (2016).

Observa-se o comparativo da resistência a tração na flexão em função da adição de diferentes percentuais de fibras. O comportamento não é linear, nota-se que ao se adicionar uma quantidade próxima a 20Kg/m^3 de fibras de aço, a resistência a tração na flexão reduz, mas com o incremento desta adição, volta apresentar valores de maior resistência.

Como a fibra de aço possui resistência maior que a da matriz, a interface de contato entre elas acaba levando a falhas. A interação de uma fissura que está se propagando na matriz com uma fibra no caminho de propagação pode resultar na microfissuração da matriz nas regiões ao redor da fibra. A transferência de tensão da matriz para a fibra acontece por atrito, ocasionando a quebra na interface. Este é o motivo que faz com

que as fibras tenham um comportamento *slip-softening* (BENTUR; MINDNESS, 2007). Uma explicação para tal fenômeno pode ser atribuída a uma excessiva concentração de microfissuras na interface matriz- fibra, porém quando a adição alcança a marca de 30Kg/m³, o comportamento do excesso de aço, altera a característica, aumentando a resistência.

Em análise ao Gráfico 10 pode-se observar os dados no rompimento do grupo de amostras referência, sem fibras. As amostras atingiram resistências médias entre 5,9 e 7,8 MPA. As amostras sem fibras, apresentaram uma boa resistência a flexão, devido à forte estrutura do concreto geopolimérico. Esta resistência é apontada nos estudos de Aredes, Klein e Pawlik (2012), onde é mostrado que o mecanismo de geopolimerização inicia com a dissolução de sílica e alumina formando um gel que resulta numa estrutura geopolimérica forte.

Os dados no rompimento do grupo de amostras com adição de 10Kg/m³ apontaram resistências menores que as amostras de referência, sem fibras, atingindo médias de 4,2 a 6,1 MPA, porém, notadamente, as mesmas, continuam resistindo a tensão, sem o colapso total até a deformação máxima permitida neste trabalho. Este comportamento de menor resistência, pode ter ocorrido devido a interface das fibras com o concreto geopolimérico, ocasionando microfissuras internas que fragilizaram a estrutura internamente.

Da mesma forma, que aconteceu com o grupo de amostras com adição de 10Kg/m³ as amostras com adição de 20Kg/m³ atingiram resistências menores que as amostras de referência. As médias com esta adição apresentaram resistências a tração entre 2,1 e 4,1 MPA.

No entanto, as amostras com 30Kg/m³ apontaram resistência maior que as amostras com adições de 10 Kg/m³ e 20 Kg/m³, porém ainda menor que o grupo de referência, sem fibras.

5.3.1 Tenacidade em vigas de 10 x 10 x 35 cm

Aplicadas as cargas máximas, verificou-se que as amostras com fibras apresentaram maior tenacidade em comparação com as amostras sem adição. Nos resultados de tração a flexão, porém, as amostras com as diversas adições de fibras apresentaram resultados inferiores às das amostras sem adições.

A quantidade de fibras adicionadas na mistura aponta ligação direta entre adição de fibra x tenacidade. Quanto maior a adição de fibras, mais tenaz apresenta-se o concreto, conforme Tabela 5.

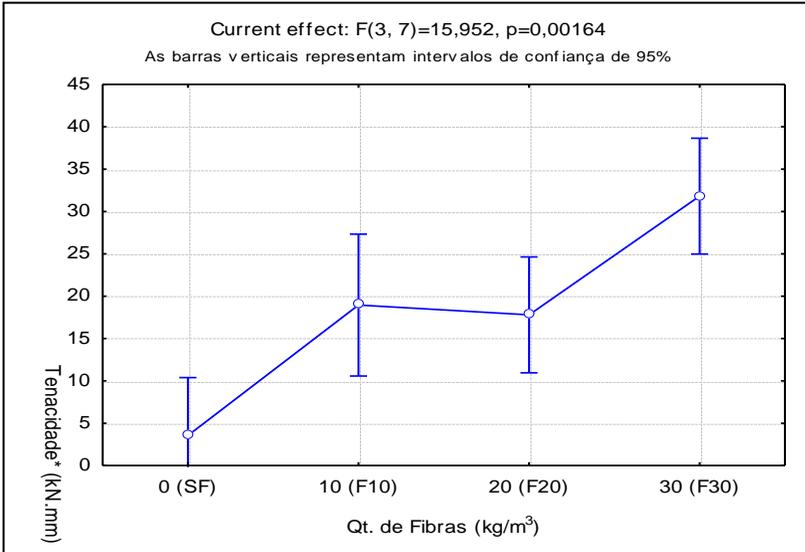
Tabela 5 - Resultados de rompimento a flexão das diversas amostras de vigas de concreto geopolimérico.

Tipologia	Carga máxima (kN)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Tenacidade (kN.mm)
SF	15,34	6,9	3,01
SF	15,29	6,88	3,60
SF	14,6	6,57	4,03
F10	10,82	4,87	15,79
F10	11,76	5,29	*
F10	12,62	5,68	22,11
F20	7,73	3,48	15,31
F20	6,18	2,78	15,88
F20	7,46	3,36	22,19
F30	9,61	4,32	22,70
F30	15,37	6,92	35,52
F30	11,56	5,2	37,22

Fonte: Autor (2016).

Para analisar estatisticamente os resultados aplicou-se uma análise de variância (ANOVA), como mostra a Gráfico 11. Essa análise mostrou que a tenacidade aumenta com a adição de fibras significativamente, visto que os resultados forneceram valores estatisticamente iguais ($p > 0,05$) entre todos os grupos, com um nível de confiança de 95%. Deste modo, pode-se dizer que as macrofibras contribuíram para o acréscimo da tenacidade, incrementando a média das amostras em até 10x.

Gráfico 11 - Gráfico da tenacidade em função da adição de diversas concentrações de fibras.



Fonte: Autor (2016).

5.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS DE DIMENSÃO 10 X 10 X 35CM

Após realizados os testes de resistência a tração, foram executados testes de resistência a compressão em CPs de 10 x 20cm.

O equipamento utilizado foi a EMIC PC200, célula TRD 30.

Foram ensaiados 3 CPs de cada grupo de amostras. Sem fibras, com 10Kg/m³ de fibras, com 20Kg/m³ de fibras, com 30Kg/m³ de fibras e CPs em concreto Portland.

A Figura 18 apresenta o equipamento EMIC PC200 utilizado para o ensaio.

Figura 18 - Equipamento EMIC PC200.



Fonte: Autor (2016).

A Tabela 6 mostra que os ensaios de compressão dos CPs sem fibras de aço e os CPs em concreto Portland caracterizam-se por maiores resistências a compressão. Porém quanto a resistência a tensão máxima, os CPs em concreto Portland apresentaram melhor desempenho.

Tabela 6 - Resultados de Cargas máximas e Tensões máximas para os diversos corpos de prova.

Corpos de prova com concreto geopolimérico – SEM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO		
Corpos de prova	Carga Máxima (KN)	Tensão Força máxima (MPA)

CP1	514,7	65,5
CP2	326	41,5
CP3	453,9	57,8

AMOSTRAS GEOPOLIMÉRICAS - COM 10 Kg/m³ DE FIBRAS DE AÇO

Corpos de prova	Força Máxima (KN)	Tensão Força máxima (MPA)
CP1	309,2	39,4
CP2	321	40,9
CP3	292,5	37,2

AMOSTRAS GEOPOLIMÉRICAS - COM 20 Kg/m³ DE FIBRAS DE AÇO

Corpos de prova	Força Máxima (KN)	Tensão Força máxima (MPA)
CP1	197,2	25,1
CP2	204,9	26,1
CP3	200,1	25,5

AMOSTRAS GEOPOLIMÉRICAS - COM 30 Kg/m³ DE FIBRAS DE AÇO

Corpos de prova	Força Máxima (KN)	Tensão Força máxima (MPA)
CP1	256,9	32,7
CP2	559,3	71,2
CP3	231,4	29,5

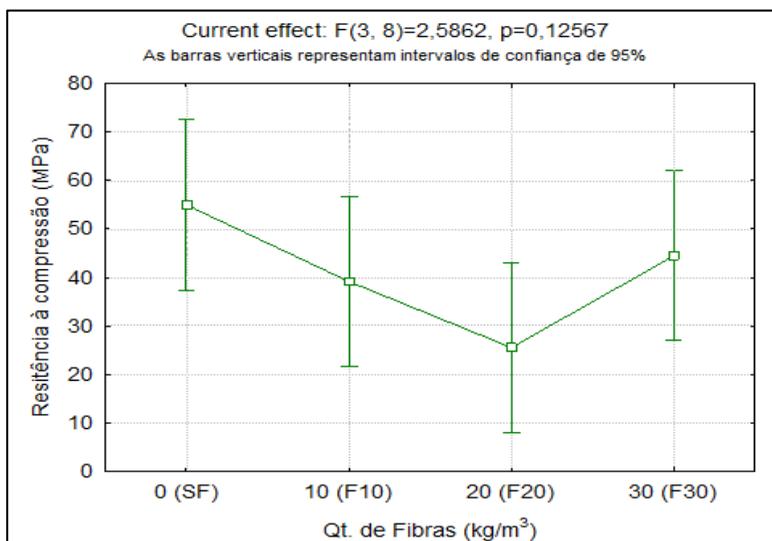
AMOSTRAS COM CIMENTO PORTLAND

Corpos de prova	Força Máxima (KN)	Tensão Força máxima (MPA)
CP1	402,1	51,2
CP2	421,9	53,7
CP3	578,8	73,7

Fonte: Autor (2016).

Repetindo o comportamento que as amostras sem fibras de aço apresentaram melhores resistências de tração a flexão, o concreto geopolimérico sem a adição de fibras também apresentou resultados superiores às amostras com as diferentes proporções de fibras no teste de resistência a compressão. No trabalho de Yang, Changin e Byung-Suk (2009), o uso de fibras em concreto de alto desempenho também apresentou aumento significativo de tenacidade, além disso, Yang também demonstrou que as fibras controlam a propagação de fissuras.

Gráfico 12 - Resultados com 95% de confiança do ensaio de compressão de material geopolimérico com e sem adições de fibras de aço.



Fonte: Autor (2016).

Para os ensaios de compressão axial, pode-se observar através da Figura 30, que as amostras sem adição de fibras obtiveram melhores resultados. Este comportamento, segue a linha de pesquisa de Bentur e Mindness (2007), onde a interface do concreto com as fibras cria uma zona de microfissuração, reduzindo a resistência.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Referente ao estudo realizado pode-se chegar as seguintes conclusões:

- As vigas de maiores dimensões ensaiadas, 12 x 20 x 250 cm, concretadas em concreto de cimento Portland e em concreto com geopolímero, resistiram a cargas máximas antes do rompimento de 95,66 KN e 94,40 KN respectivamente. Mostrando-se bastante semelhantes em suas resistências a tração.

- As vigas de maiores dimensões ensaiadas, 12 x 20 x 250 cm, também apresentaram resultados de deformação máxima no centro da viga bastante semelhantes. A viga em concreto com cimento Portland deformou o máximo de 20,27mm no momento de maior carga aplicada e a viga em concreto geopolimérico apresentou 19,99mm na aplicação de maior carga.

- As vigas de dimensões 12 x 20 x 160cm, apresentaram comportamento diverso quando incrementadas com fibra de aço. A amostra sem fibra resistiu a uma carga maior que as amostras com adição 10 e 20 Kg/m³ de fibras de aço. Já a amostra com 30 Kg/m³ de fibras de aço apresentou maior resistência a tração.

- Conforme o esperado, as amostras com adição de fibras de aço, em todas as proporções, apresentaram maior tenacidade. Isto deve-se ao fato de que as fibras mantem a estrutura como uma rede de sustentação mesmo após o colapso.

- O grupo de amostras das vigas de 10 x 10 x 35 cm, confirmaram o comportamento das vigas maiores. Apresentando maior resistência na viga sem adição de fibras de aço quando comparada as amostras com 10 e 20Kg/m³ de fibras de aço. Porém, a amostra 30 Kg/m³ de fibras de aço, também em escala reduzida mostrou-se a mais resistente entre todas.

- As fissuras das vigas pequenas (10x10x35 cm), evidenciam que o grupo sem adição de fibras teve comportamento frágil, levando de forma brusca a ruptura dos protótipos (como esperado), já os grupos com adições de 10, 20 e 30 Kg/m³ de fibras de aço apresentaram comportamento com menor fissuração, mostrando que as fibras de aço atuaram como ponte de transferência dos esforços como indica Martineau e Agopyan (2002);

- Nas vigas 10 x 10 x 35 cm observa-se que os comportamentos entre os grupos foram similares quanto as cargas últimas e nas cargas de serviço, porém as amostras com adição de fibras mantiveram a estrutura

estável antes do colapso devido a ligação das fibras. Deste modo, pode-se dizer que as macrofibras contribuíram para o acréscimo de tenacidade.

- A retração e a fluência são pouco afetadas pela adição das fibras de aço. Como este comportamento está associado ao movimento dos fluidos dentro do concreto, quer seja polimérico ou a partir de cimento Portland, a fibra representa pouca ou nenhuma restrição quando o concreto permanece não fissurado, dependendo da quantidade de adição. Deve-se ressaltar o fato de que as fibras restringem a propagação das fissuras no concreto. Como consequência direta disso, tem-se um aumento da resistência à entrada de agentes agressivos, aumentando a durabilidade da estrutura (CHANVILLARD; AITCIN; LUPIEN, 1989).

- Nas amostras que foram ensaiadas em ensaios de compressão, observou-se que os CPs sem fibras em concreto geopolimérico apresentaram maiores resistências.

7 TRABALHOS FUTUROS

Com relação a trabalhos futuros sugere-se:

- Realizar experimentos propiciando a amostras de vigas em concreto geopolimérico exposição em ambientes agressivos, como maresia e ácidos;
- Estudar o comportamento do concreto geopolimérico em situações de fogo intenso;
- Testar a resistência do concreto geopolimérico com poucas horas de cura;
- Estudar o comportamento da interface entre fibra de aço e concreto geopolimérico;
- Adicionar diferentes percentuais de fibras em vigas de concreto geopolimérico visando aumentar o tempo e a deformação antes da ruptura total.
- Estudar o comportamento de diferentes misturas com cimento Portland e Metacaulin a fim de atingir uma mistura de concreto ótima.
- Estudar o comportamento da adição de Metacaulin em pastas e argamassas.
- Adicionar novas fibras e reforços em vigas de concreto geopolimérico, visando aumentar a resistência dos elementos.
- Aumentar/Diminuir a proporção de fibras empregadas no concreto geopolimérico, a fim de alcançar ganhos em resistência mecânica e tenacidade.

REFERÊNCIAS

AREDES, S.; KLEIN, B.; PAWLIK, M.. The removal of arsenic from water using natural iron oxide minerals. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 29-30, p.208-213, jul. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto –Preparo, controle e recebimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014.

ASTM 1609 – **Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete** (Using Beam With Third-Point Loading), 2012.

ASTM C 227-90. **Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar Bar Method)**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. USA.

BAKHAREV, T. **Geopoliméric Materials prepared using class Fly ash and elevated temperature curing**. Cement and Concrete Research, 2005.

BEHZAD, N.; JAY, S.; FAIZ, U. A.S. **Influence of the type of activator combinations on the deflection hardening behavior of geopolymer composites**, International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites, Dordrecht, The Netherlands, 2014.

BENTUR, A.; MINDNESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites**. United Kingdom: Elsevier, 2007.

BORGES, J. U. A. Análise do comportamento de vigas de concreto de alto desempenho por meio da mecânica da fratura. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Área de concentração: Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

BORGES, P. H. R. et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014.

BORGES, P. H. R.; MELO, V. S.; LIMA, S. M. Z. Geopolymer concrete With recycled glass: na alternative material for pre fabricated elements. In: IAHS WORLD CONGRESS ON HOUSING SCIENCE, Istanbul, 2012. Istanbul Technical University, 2012.

CHANVILLARD, G.; AITICIN, P. C.; LUPIEN, C. Field Evaluation of steel fiber reinforced concrete overlay with various bonding mechanisms. Transportation Reserch Board, 1989.

COSTA, A. F. M. Utilização de geopolímeros para Protecção de Betão: Resistência a altas temperaturas. Tese (Doutorado) – Curso de engenharia civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2012.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Material polymeric New Materials, Journal of Thermal Analysis, 1991.

DAVIDOVITS, J. Properties of Geopolymer Cements. Geopolymer Institute, Alkaline Cements and Concretes, KIEV Ukraine, 1994.

DAVIDOVITS, J. Global Warming Impact on the cement and aggregates Industries, World Resource Review, 1994.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry and Applications, 2nd edition, Geopolymer Institute, 2008.

DAVIDOVITS, J.; MORRIS, M.. The Pyramids, an Enigma Solved , Ed. Dorset Press, New York. 1988.

DAVIS, R. E. et al. **Properties of Mortar sand concretes containing Portland-pozzolan Cement sort land-pozzolan Cements**, Proceedings of the Journal of A.C.I., 1935.

DEGHENHARD, C.C.. **Análise experimental da capacidade portante em vigas de concreto armado com reforço de fibras de aço na face tracionada**. 2015. 89 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2015.

DUXSON, P; FERNÁNDEZ-JIMÉNES, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C; PALOMO, A; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymer Technology: the current state of the art**. University of Melbourne. Melbourne, Australia, 2006.

FIGUEIREDO, E.P. **Inspeção e diagnóstico de estrutura com problemas de resistência, fissuras e deformações**. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. 1 ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 985-1015, 2005.

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R.; TORNERI, P. **Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço**. IBRACON. São Paulo 2007.

FIGUEIREDO, A. D.; NUNES, N.L.; TANESI, J. **Mix design analysis on fiber reinforced concrete**. In: Fifth international rilem symposium on fibre-reinforced concretes, Lyon, Fibre-Reinforced Concretes (FRC). 2000.

GABRICH, M.F. **Estudo da influência das adições minerais no comportamento do concreto sob a ação do fogo**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

GIANNOPOULOU, I.; PANIAS, D. **Structure, Design and Applications of Geopolymeric Materials** - 1 National Technical University of Athens, School of Mining and Metallurgical Engineering, Laboratory of Metallurgy, 9 Heroon Polytechniustr., Zografos Campus, 15780, Athens: Greece, 2007.

HABERT, G.; D'ESPIROSE DE LACAILLERIE, J. B.; ROUSSEL, N. **A. Environmental Evaluation of Geopolymer Based Concrete Production: reviewing current research trends.** Journal of Cleaner Production, 2011.

HARDJITO, D. **Developments in Mechanic soft Structures & Materials: Proceedings of the 18th.** Hong Haa, 2004.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e Controle do Concreto.** PINI, 1992.

YANG, I. H.; CHANGIN, J.; BYUNG-SUK, K. **Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending.** South Korea, 2009.

JOHN, V. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** São Paulo, 2000.

JONES, T.R.; WALTERS, G.V.; KOSTUCH, J.A.. **Role of Metakaolin in Suppressing ASR in Concrete Containing Reactive Aggregate and Exposed to Saturated NaCl Solution.** Proceedings of the 9th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete 1992.

KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G. **Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete.** Cement and Concrete Research, 2010.

MARTINEAU, P.; AGOPYAN, V. **Compósitos: material inovador.** Conferência Magma I, In: Arquimacom . São Paulo, 2002.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. **Migração de Íons Cloretos no Concreto - Influência da Consistência, Relação água / Cimento e Consumo de Cimento.** Revista IBRACON 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 3a Ed. Pini, São Paulo. 2008.

MEHTA, P.K. **Mineral Admixtures for Concrete – An Overview of mixtures for Concrete – An Overview of Recent Developments,**

Proceedings of an Engineering Foundation Conference, University of New Hampshire, ASCE, 1994.

METHA, P. K. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1994.

MEHTA, P.K. **Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin Earth**. Cement Concrete Research, 1981.

METSO, J. **The Alkali Reaction of Alkali- The Alkali Reaction of Alkali-Activated Finnish Blast Furnace Slag, Silicates Industriels**, 1982.

MINDLESS, S.; YOUNG, J.F. **Concrete**. Ed. Prentice Hall, New Jersey, 1981.

MIRANDA, J.M. et al. Corrosion resistance in activated fly ash mortars. **Cement and Concrete Research**, n. 35, p. 1210-1217. 2005

NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J.; SHAIKH, F.U.A. Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 70, n. 15, p. 54-64, nov. 2014.

PACHECO, L. S. **Comparativo da Emissão de Gás Carbônico e Consumo Energético na Produção dos Concretos Convencional e Geopolimérico**. Belo Horizonte. Monografia (Curso de Engenharia de Produção Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PALOMO, A. et al. **Alkali-activated fly ashes A cement for the future**, Institute (CSIC), Materials Research Laboratory, The Pennsylvania State University, USA ,1999.

PELISSER F. et al. **Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers**. Construction and Building Materials, 2013.

PINTO, A. T. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Portugal: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2006.

QUININO, U. C. M. **Investigação Experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras.** Tese de doutorado. UFRGS, Porto Alegre, RS, 2015.

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

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras.** Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, 2013.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas.** Vol. 1. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

SERSALE, R.; FRIGIONE, G. **Portland Zeolite Cement for Minimizing Alkali-Aggregate Expansion,** Cement Concrete Research. 1987.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary Cementing Materials** Springer, 2011.

SHADNIA, R.; ZHANG, L.; PEIWEN, L. Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM. **Construction And Building Materials,** [s.l.], v. 84, p.95-102, jun. 2015

SINGH, N.D. Evolution. Fruit flies diversify their offspring in response to parasite infection. **Science,** [s.l.], v. 14, n. 349, p. 747-750, 2015.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de análise estrutural Volumes I e II,** Estruturas Isostaticas, Editora Globo, 1980.

SWAMY, R. N. **Cement Replacing Materials Cement Replacing Materials,** Editor R. N. Swamy, Glasgow-Surrey University Press, Concrete Technology and Design 1982.

TALLING, B.; BRANDSTETR, J. **Present State and Future of Alkali activated Slag Concretes,** 3rd Intern. Conf. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, 1989.

TEIXEIRA PINTO, A. **Sistemas Ligantes Obtidos Por Ativação Alcalina do Metacaulino**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2004.

JAARSVELD, J. G. S.; DEVENTER, V. J.; LORENZEN, L. **The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilize Toxic Metals - Part I: Theory and Applications and Applications**. Minerals Engineering, 1996.