

# ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO

Pedro Macan Neto (1); Daiane dos Santos da Silva Godinho(2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
(1)[pedro.macan@hotmail.com](mailto:pedro.macan@hotmail.com), (2)[dss@unesc.net](mailto:dss@unesc.net)

## RESUMO

O uso de materiais cimentícios geopoliméricos tem se mostrado uma alternativa que contribui para a minimização do impacto ambiental. O geopolímero é o produto de materiais que quando dissolvidos em soluções alcalinas endurecem devido ao processo de polimerização. As matérias primas para a produção dos geopolímeros são materiais ricos em sílica e alumina, como o metacaulim, material precursor na produção do concreto analisado neste trabalho de conclusão de curso. O concreto é um material que apresenta alterações no seu comportamento quando submetido à altas temperaturas. O óxido de alumínio adicionado ao material precursor dos geopolímeros tende a melhorar suas propriedades mecânicas. Diante deste contexto, este trabalho analisou as propriedades mecânicas e microestruturais do concreto geopolimérico sem adição e com adição de óxido de alumínio, submetidos à altas temperaturas. Foram produzidos 64 corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e altura de 200 mm. Os concretos foram aquecidos às temperaturas de 100°C, 400°C e 800°C. Após o resfriamento dos corpos de prova até a temperatura ambiente, as amostras foram submetidas aos ensaios mecânicos e microestruturais. Ao final foi possível verificar a influência do óxido de alumínio para a melhoria da refratariedade do geopolímero.

Palavras-Chave: *geopolímero, altas temperaturas, óxido de alumínio.*

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira, produtora do cimento Portland, possui grande participação na liberação de gases poluentes causadores do efeito estufa. Caijun Shi, e outros (2011) asseguram que as empresas de cimento estão emitindo 2 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (cerca de 6 a 7% das emissões totais de CO<sub>2</sub> no planeta) no processo. Nesse ritmo, em 2025 a indústria cimenteira estará emitindo CO<sub>2</sub> a uma taxa de 3,5 bilhões de toneladas/ano. Davidovits (2013), cita que para a produção de 1 tonelada de clínquer é gerado 0,95 toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Diante deste contexto, têm sido realizados estudos com objetivo de substituir o concreto de cimento Portland por materiais com propriedades satisfatórias. Caijun Shi, e outros (2011) afirmam que uma linha de estudos visa a produção de um tipo de cimento menos agressivo ao meio ambiente. Este tipo de aglomerante inclui ativação alcalina de materiais com propriedades ricas em alumina e sílica. Palomo, e outros.

(2009) descrevem ativação alcalina como um processo em que, um material rico em sílica e alumina, reage com um composto alcalino, originando uma pasta capaz de aglomerar e endurecer cuja a resistência mecânica e durabilidade são similares ou superiores aos compostos cimentícios tradicionais. Para Pacheco-Torgal e Jalali (2011) os ligantes geopoliméricos aparecem como um produto inovador e alternativo ao cimento tradicional, devido às suas baixas emissões de gases poluentes, o que os torna, em termos ambientais, vantajosos em relação ao cimento Portland. Segundo Menger (2015) o termo geopolímero foi criado por Davidovits em 1979, nos Estados Unidos, para descrever as propriedades químicas de polímeros inorgânicos que ao sofrerem ativação alcalina passam por uma reação de hidratação de aluminossilicatos.

Os geopolímeros podem ser obtidos a partir de uma variedade de fontes de aluminossilicatos, como argilas (caulim), metacaulim e resíduos industriais (cinzas volantes e escória de alto forno), em mistura com fontes de metais alcalinos como hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio. Costa, e outros (2013) mencionam que a razão Si/Al influencia diretamente o tipo de microestrutura formada nos geopolímeros, sendo o Al mais facilmente dissolvido que o Si em meio alcalino.

O designado “Cimento do Futuro” possui outras vantagens em relação ao cimento Portland. Pereira e Dias (2010) afirmam que os geopoliméricos apresentam melhores propriedades de resistência mecânica, resistência química, baixa porosidade e absorção de água, além de alta durabilidade, o que faz com que diminua a incidência de intervenções, além de apresentar menor tempo de cura.

Por outro lado, os geopoliméricos são difíceis de serem moldados devido a sua baixa trabalhabilidade. Costa (2012) afirma que controlar não apenas a composição, mas também a química dos materiais precursores é essencial para as propriedades do geopolímero. Para melhorar suas características, Costa (2012) assegura: [...] para além dos vários ativadores, pode-se juntar ao geopolímero outros materiais como plastificantes, para elevar a sua trabalhabilidade e, conseqüentemente, as suas características mecânicas e de durabilidade.

Para analisar as vantagens térmicas do concreto geopolimérico, deve-se submetê-lo à altas temperaturas. Krivenko e Guziy (2007 apud Costa, 2012) verificaram que o comportamento dos ligantes alcalinos submetidos ao fogo tem um bom desempenho. Torgal e Jalali (2009 apud Fernandes, 2015) acrescentam que só é possível resistir à temperatura de 1000°C com composições bem cuidadas e bem curadas,

necessitando impedir a evaporação para obter resultados físicos melhorados com curas a temperaturas elevadas. Costa (2012) menciona que quando comparados com o concreto convencional, obtido de cimento Portland, os concretos geopoliméricos apresentam uma melhor resistência ao fogo. Osorio (2006) obteve o melhor resultado em cerca de 60% da resistência residual de agregado porcelânicos moídos, sob a temperatura de 900 °C. Vasconcelos (2010 apud Fernandes, 2015) afirma que quando submetidos à altas temperaturas, os geopolímeros tem excelente resistência ao fogo, podendo ser considerados materiais refratários. Pacheco-Torgal, e outros (2011) afirmam que este material é indicado para utilização em obras na qual o risco de incêndio é elevado, como em túneis e em edifícios altos.

Tchakoute Kouamo, e outros (2012) incorporaram teores de 0%, 10%, 20%, 30%, e 40% de óxido de alumínio em geopolímeros a base de metacaulim e cinzas vulcânicas em temperatura ambiente. A adição de  $Al_2O_3$  no metacaulim e na cinza, a uma taxa de 20% e 40% respectivamente, ampliou o grau de geopolimerização na resistência à compressão. Verificou-se um aumento de 18,1% e 32,4% da resistência a compressão, para geopolímeros a base de metacaulim e cinzas vulcânicas, respectivamente. Kamseu, e outros (2010 apud Costa, e outros 2013) observaram uma diminuição da retração total dos concretos a 1000 °C de 17% para 12% e 13% com a inclusão de alumina e sílica, respectivamente.

Neste contexto, este trabalho visa avaliar o comportamento do concreto geopolimérico com adição de óxido de alumínio, quando submetido à altas temperaturas, e analisar suas propriedades mecânicas e microestruturais. Como referência, foram produzidas composições de concreto geopolimérico com metacaulim, o qual foi ativado com hidróxido de sódio e silicato de sódio e composições com adição de óxido de alumínio, para que ambos sejam analisados em temperatura ambiente e altas temperaturas. Ao final foi possível verificar a influência da temperatura nos concretos geopoliméricos, além de poder comparar e averiguar as diferenças que se obtém na composição dos concretos geopoliméricos com 0 % e 5 % de óxido de alumínio quando submetidos à altas temperaturas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o programa experimental da pesquisa com a descrição das principais características dos materiais e métodos utilizados. O procedimento

experimental foi desenvolvido visando analisar diferenças nas propriedades do concreto geopolimérico sem adição (CG) e o concreto geopolimérico com adição de óxido de alumínio (CGA).

## 2.1 Materiais

Para a composição do concreto geopolimérico foi utilizado metacaulim, com fonte de sílica e alumina, obtido através da calcinação do caulim; hidróxido de sódio (NaOH) em escamas, contendo 96 a 98% de pureza; silicato de sódio; óxido de alumínio; agregado graúdo e agregado miúdo.

A tabela 01 apresenta a composição química do caulim.

Tabela 01 – Composição química do Caulim

Análise Química	
Elemento	Quantidade (%)
SiO <sub>2</sub>	46,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,59
CaO	-
K <sub>2</sub> O	0,61
MgO	0,17
Na <sub>2</sub> O	0,18
MnO	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
TiO <sub>2</sub>	-
SrO	-
P. F	13,44

Fonte: Colorminas Colorifício e Mineiraç o, 2017.

Com a an lise qu mica da tabela 01 pode-se constatar que a composi o   t pica de um caulim comercial. A rela o 2SiO<sub>2</sub> para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na composi o caracter stica   aproximadamente 1,18 enquanto na amostra, tabela 01,   de 1,25.

Para a composi o do CG e CGA foi utilizado brita n.0 com D<sub>m x</sub> = 9,5 mm e areia m dia com D<sub>m x</sub> = 2,40 mm. Os agregados foram secos em estufa antes da realiza o da concretagem a uma temperatura de 105  C.

## **2.2 Métodos**

Para desenvolvimento da pesquisa, foram adotadas as seguintes etapas: Calcinação do caulim, análise mineralógica por difração de raios-X, ensaios térmicos de termogravimetria e análises térmicas diferenciais, moldagem dos corpos de prova (cps) geopoliméricos, cura dos concretos geopoliméricos, aquecimento dos corpos de prova, análise da perda de massa, ensaios de resistência a compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

As atividades deste trabalho experimental foram desenvolvidas no Parque Científico e tecnológico (i-parque), pertencente a Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

### **2.2.1 Calcinação do caulim**

A produção do metacaulim foi realizada através da desidroxilação do caulim, por meio da calcinação realizada em um forno elétrico que suporta até 1350°C fornecido pela refracol. O caulim foi colocado em caixas circulares de cordierita, com diâmetro de 300 mm x 130 mm de altura, que suportam temperaturas de até 1250°C. As caixas foram dispostas no forno de maneira piramidal para que o calor pudesse entrar mais facilmente nas caixas mais desfavoráveis. O forno foi aquecido à uma temperatura de 900°C e a calcinação foi realizada em um período total de 14 (quatorze) horas, do qual, ao chegar na temperatura de 900°C foi mantido por 1 (uma) hora de patamar. O período total se caracteriza pelo tempo de aquecimento até chegar na temperatura desejada, 1 hora de patamar a 900°C e conseqüentemente o esfriamento do forno industrial. Segundo Andriolo (1986 apud Medina 2011) em temperaturas maiores que 900°C o metacaulim tende a cristalizar novamente, apresentando pouca atividade pozolânica.

### **2.2.2 Análise mineralógica**

O metacaulim e os corpos de prova de concreto geopolimérico foram analisados por difração de raios-X, no qual, identifica as fases cristalinas e permite a quantificação das fases cristalinas e amorfas dos materiais.

Os resultados foram apresentados em forma de gráficos, cujas variáveis são o ângulo  $2\theta$  no eixo horizontal e a intensidade dos picos difratados no eixo vertical. Para a realização do ensaio os corpos de prova foram fracionados em pedaços menores e depois moídos para que se obtivesse material fino, passante na peneira  $200\mu\text{m}$ . Para realizar esse ensaio foi utilizado o equipamento SHIMADZU LAB X modelo XRD-6000, ângulo de varredura de  $3$  a  $80^\circ$  em  $2\theta$  e velocidade de  $2^\circ/\text{min}$ .

### 2.2.3 Ensaio térmicos

Para o metacaulim foi feita análise termogravimétrica (TGA), uma técnica em que é analisada a mudança de massa em função da temperatura.

Também foi feita análises térmicas diferenciais (DTA), à medida que as amostras sofrem aquecimento a DTA permite o acompanhamento das temperaturas que se iniciam os processos térmicos de forma a caracterizá-los como endotérmico e exotérmico durante as transições de fase ou reações.

Para realizar esses ensaios foi utilizado o equipamento TA instrument, modelo Q600 simultaneous TGA/DTA, nas condições de ensaio de atmosfera de ar sintético, no intervalo de temperatura de  $20$  a  $1000^\circ\text{C}$  e taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ .

### 2.2.4 Elaboração do concreto geopolimérico

Com os materiais definidos foram moldados os corpos de prova cilíndricos de  $10$  cm de diâmetro por  $20$  cm de altura. Segundo NBR 5738 (ABNT, 2003) os corpos de prova devem ter altura igual ao dobro do diâmetro, visto que o diâmetro deve ser de  $10$ ,  $15$ ,  $20$ ,  $25$ ,  $30$ ,  $35$ ,  $40$  ou  $45$  cm. Para este trabalho foram confeccionados  $64$  corpos de provas cilíndricos (sendo  $32$  CG e  $32$  CGA). Os moldes de corpos de prova foram preenchidos com concreto geopolimérico, conforme traços obtidos na tabela 02.

Tabela 02 – Traço CG e CGA

Especificações	CG	CGA
<b>Traço</b>	1:0,089:1,2:3,8:1,2 (MK:NaOH:Silicato:Areia:Brita)	1:0,089:1,2:3,8:1,2 (MK:NaOH:Silicato:Areia:Brita)
<b>Relação a/alg.</b>	0.75	0.75
<b>Aditivo</b>	-	5% Óxido de Alumínio

Fonte: Do Autor, 2017.

A composição de concreto geopolimérico sem adição obteve a relação molar, apresentada na tabela 03.

Tabela 03- Relação Molar da Mistura do Concreto Geopolimérico Sem Adição.

<b>Composição</b>	
<b>SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>3,2</b>
<b>Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>0,46</b>
<b>Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub></b>	<b>0,14</b>
<b>Na<sub>2</sub>OSiO<sub>2</sub>/NaOH</b>	<b>1,6</b>
<b>H<sub>2</sub>O/MK (g/g)</b>	<b>0,75</b>

Fonte: Pelisser et al, 2013.

Segundo Duxson, e outros (2005 apud Vassalo, 2013) as melhores propriedades dos geopolímeros obtidos em função das razões de SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são na média de 3,0 a 3,8. Em experimentos com diferentes proporções foram encontrados resultados de sistemas de baixa resistência. Os autores ressaltam que essa relação é válida apenas para o metacaulim como material precursor na mistura.

Após determinação e pesagem dos materiais, foram moldados os corpos de prova geopoliméricos. O hidróxido de sódio em escamas foi dissolvido no silicato de sódio, logo após foi misturado com o metacaulim, em um misturador mecânico, para que ocorresse ativação alcalina. Quando a pasta se encontrava bem homogênea era acrescentado agregado miúdo e depois agregado graúdo para a formação do CG. A produção do CGA seguiu o mesmo modelo do CG, porém, o metacaulim foi acrescentado da adição de óxido de alumínio antes da ativação alcalina.

### 2.2.5 Cura dos concretos geopoliméricos

Após a concretagem, os corpos de provas foram curados em estufa com temperatura controlada de 60°C por 24 horas. Método justificado por Davidovits (1999), Hardjito e outros (2004 apud Vassalo, 2013) no qual mostram que a cura ótima dos corpos de prova geopoliméricos ocorrem a 60°C. Em seguida, os corpos de prova geopoliméricos foram desmoldados e permaneceram em cura ambiente até as idades dos ensaios mecânicos e microestruturais.

### 2.2.6 Aquecimento dos corpos de prova

Para o aquecimento dos corpos de prova foram analisadas as recomendações de RILEM TC129 MHT (2000). Os corpos de prova foram aquecidos em níveis de temperatura de 100, 400, 800°C, utilizando o forno mufla e aplicando uma taxa de aquecimento 3 °C/min. RILEM TC 129MHT (2000) indica que a taxa de aquecimento para corpo de prova de diâmetro 100mm, deve ser de 3°C/min.

### 2.2.7 Análise da perda de massa

Os corpos de prova de concreto geopolimérico foram analisados quanto a sua perda de massa após serem submetidos à altas temperatura. Para análise da perda de massa os resultados obtidos foram feitos conforme equação 1.

$$pm = \frac{m1 - m2}{m2} * 100$$

(Equação 1)

Onde:

pm = é a perda de massa do corpo de prova (%);

m1 = massa do corpo de prova (g), antes do aquecimento;

m2 = massa do corpo de prova (g), após aquecimento;

### 2.2.8 Resistência à Compressão Axial

As resistências após a exposição dos corpos de prova à altas temperaturas foram determinadas através de ensaios de resistência à compressão axial. Os cps foram colocados em uma prensa hidráulica da marca EMIC modelo PC200I, com suporte máximo de 2000 kN ligada a um computador com o software TESC – Test Script, que concede recursos para a leitura e obtenção dos resultados. O procedimento para o ensaio e o cálculo da Compressão Axial em corpos cilíndricos foram feitos conforme NBR 5739 (2007).



## 2.2.9 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral foram utilizados os mesmos equipamentos do ensaio de compressão axial, porém foi acoplado à prensa um par de placas metálicas retangulares para suprir o tamanho do corpo de prova. O procedimento para o ensaio e o cálculo da tração por compressão diametral foram feitos conforme NBR 7222 (2011).

### 2.2.10 Módulo de Elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade foi utilizado uma prensa servo-hidráulica da marca EMIC modelo PC200CS, com capacidade de 2000 kN acoplada a um computador com software TESC – Test Script. O procedimento para o ensaio e o cálculo do módulo de elasticidade foram feitos conforme NBR 8522 (2008).

### 2.2.11 Matriz experimental da pesquisa

A matriz experimental desta pesquisa pode ser vista na tabela 04.

Tabela 04 – Matriz Experimental

Variáveis	Descrição
Concretos	CG / CGA
Temperatura de Exposição (°C)	23/100/400/800
Taxa de Aquecimento (°C/min)	3
Ensaio Mecânicos	$f_c / f_{ct,sp} / E_c / p_m$
Ensaio Microestruturais	DR-X / TG / DTA
<b>Amostras para ensaio</b>	
32 CPs CG(6/variável) + 2 reservas + Cura Ambiente (78 dias)	
32 CPs CGA (6/variável) + 2 reservas + Cura Ambiente (78 dias)	

Fonte: Do Autor, 2017.

Onde;

$f_c$ = Compressão Axial;

$f_{ct,sp}$ = Resistência à Tração por Compressão Diametral;

$E_c$ = Módulo de Elasticidade;

$p_m$ = Perda de Massa

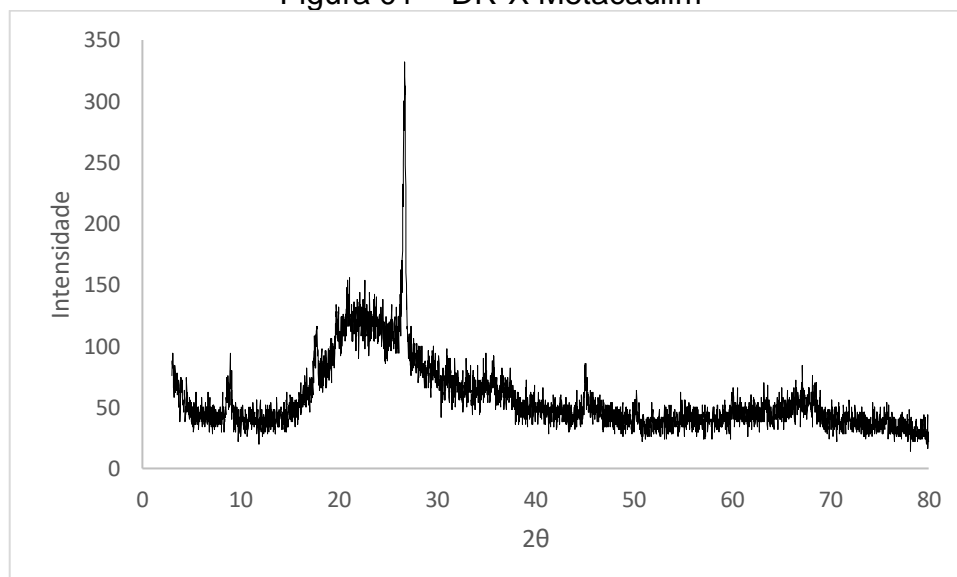
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com os métodos descritos no capítulo anterior e suas respectivas análises.

#### 3.1 Análise mineralógica

A quantificação das fases cristalinas e amorfas do metacaulim utilizado como material precursor apresentado na figura 01 mostra uma amostra basicamente amorfa que possui um halo amorfo para  $2\theta$  entre  $15^\circ$  e  $30^\circ$ , proveniente de uma alta quantidade de argilos-minerais calcinados. Constata-se na figura 01 que o mesmo apresenta picos característicos de  $\text{SiO}_2$  livre cristalina. Após a calcinação a  $900^\circ\text{C}$  a água de constituição foi evaporada dando origem ao material metacaulim, feito comprovado pelo difratograma de raios-x, apresentado na figura 01.

Figura 01 – DR-X Metacaulim



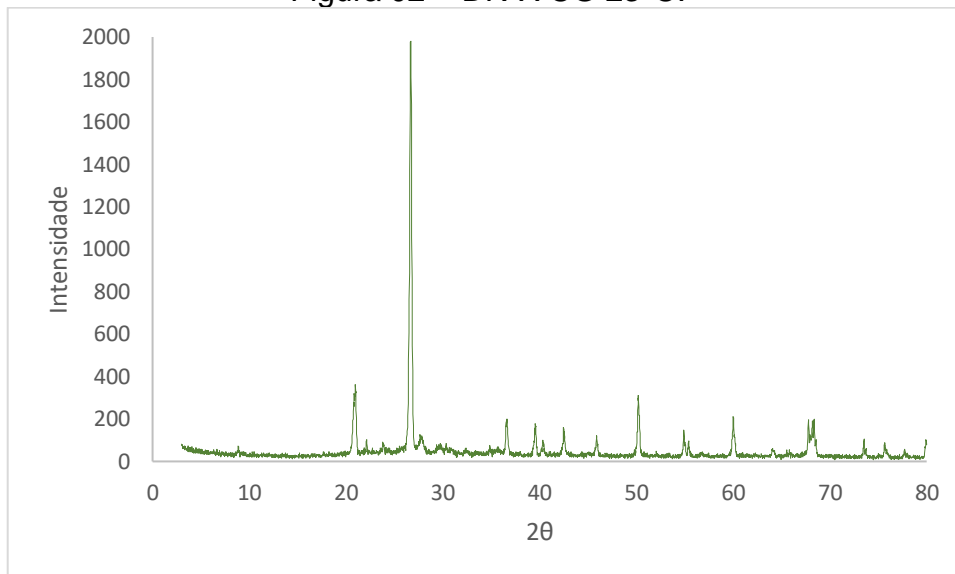
Fonte: do autor, 2017

Nas figuras 02 e 03 são apresentados os difratogramas de raios X para a composição do CG e CGA, ao qual foram analisados em temperatura ambiente.

Para as amostras analisadas foram verificados por meio de seus respectivos difratogramas, picos característicos de quartzo. Esse mineral já estava presente no material precursor, logo, não é produto de síntese. Ambas as misturas mostram

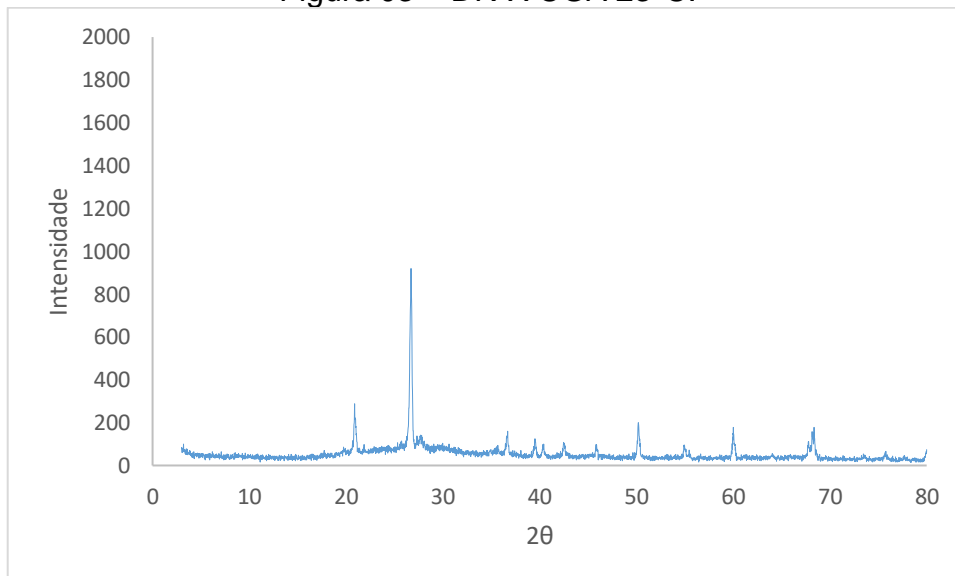
predominantemente estrutura amorfa, com picos de cristalinidade. Para o difratograma do CGA o pico de quartzo foi atenuado pela metade em relação ao CG.

Figura 02 – DR-X CG 23°C.



Fonte: do autor, 2017

Figura 03 – DR-X CGA 23°C.



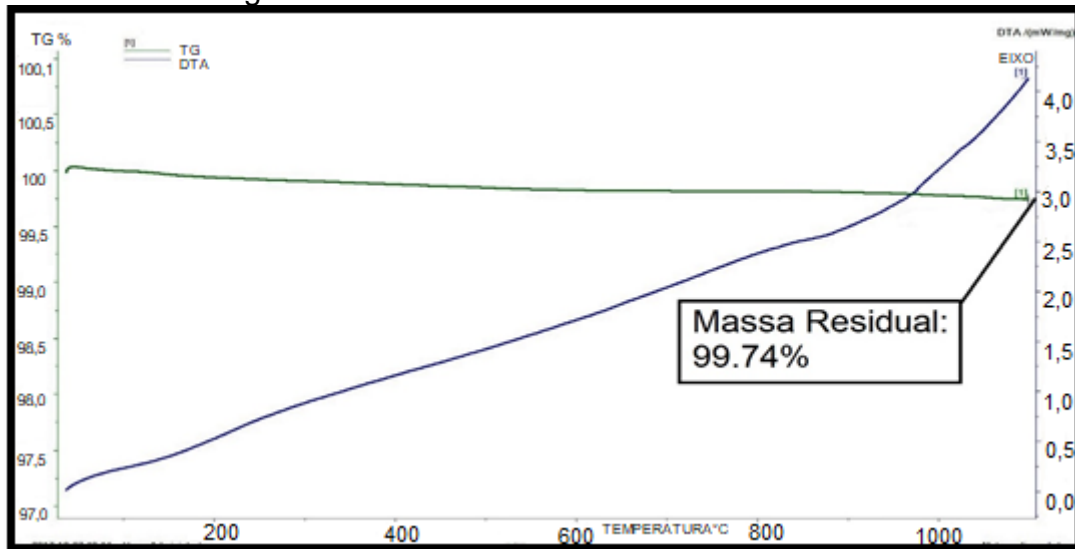
Fonte: do autor, 2017.

### 3.2 Ensaios térmicos

Na figura 04 se apresenta a análise térmica TG/DTA do metacaulim. Observa-se que não ocorre perda de massa, o que dá garantia de que o processo de calcinação foi eficiente e transformou toda a caulinita para metacaulinita.

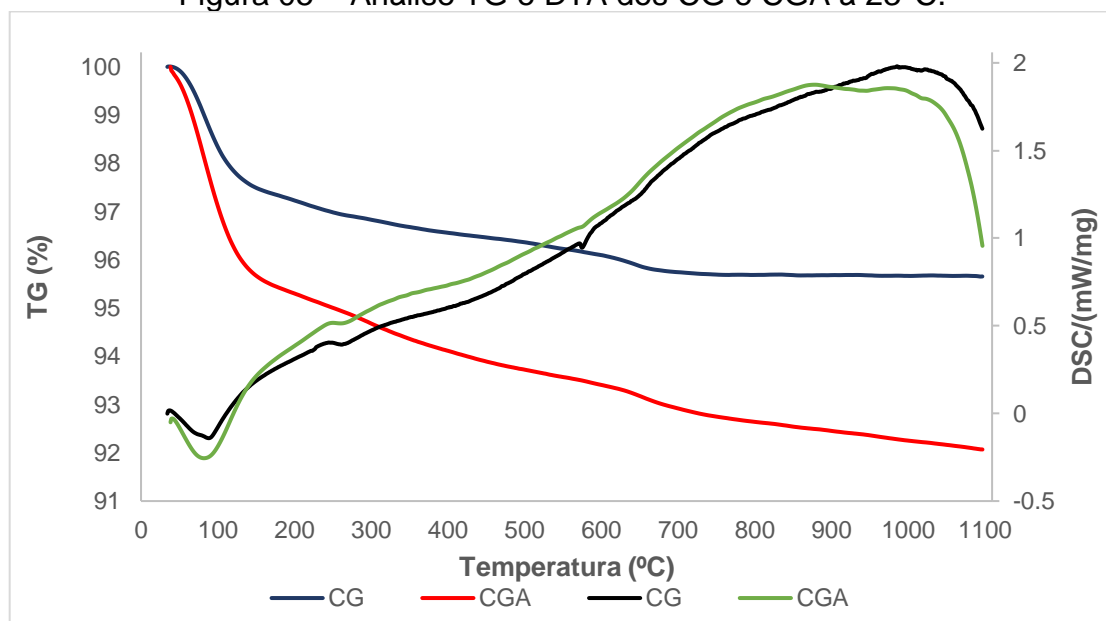
Na figura 05 se apresenta a análise térmica obtida dos corpos de prova CG e CGA à 23°C. Ocorre uma acentuada perda de massa com um correspondente pico endotérmico ao redor de 100°C, o que deve ser a perda de água absorvida na superfície da partícula. A perda de massa mais acentuada no CGA do que no CG até 100°C indica uma possível diferença de umidade entre as amostras.

Figura 04 – Análise TG e DTA do metacaulim.



Fonte: do autor, 2017

Figura 05 – Análise TG e DTA dos CG e CGA à 23°C.



Fonte: do autor, 2017

A 573°C ocorre um pequeno pico endotérmico que indica a transformação de quartzo alfa para quartzo beta. A pequena intensidade é devido a baixa quantidade de quartzo

livre, o que foi anteriormente observado no difratograma de raios X. Ao redor de 650-700°C ocorre a perda de massa ocasionada pela quebra do carbonato de cálcio  $\text{CaCO}_3$  originando  $\text{CaO} + \text{CO}_2$  que é liberado.

### 3.3 Análise da perda de massa

A tabela 05 apresenta os resultados da perda de massa, em percentual, obtidos após o ensaio na temperatura ambiente e após o aquecimento às temperaturas de 100°C, 400°C e 800°C.

Tabela 05 – Perda de Massa

Concreto	Temperatura (°C)	Perda de massa das amostras (%)					
<b>Geopolimérico Sem Adição</b>	23	-	-	-	-	-	-
	100	0.141	0.229	0.147	0.146	0.164	0.146
	400	6.166	6.007	5.996	6.470	5.767	5.122
	800	8.826	8.615	8.879	9.214	8.285	8.898
<b>Geopolimérico Com Adição</b>	23	-	-	-	-	-	-
	100	0.200	0.175	0.214	0.139	0.199	0.214
	400	6.166	6.051	5.446	5.685	5.490	6.485
	800	7.614	7.697	7.777	7.858	7.539	7.994

Fonte: Do Autor, 2017.

Observa-se que, em média, aos 100°C os cps CG apresentam uma menor perda de massa, porém, com temperaturas mais elevadas, de 400°C e 800°C, os cps CG começaram a apresentar maior perda de massa em relação ao CGA.

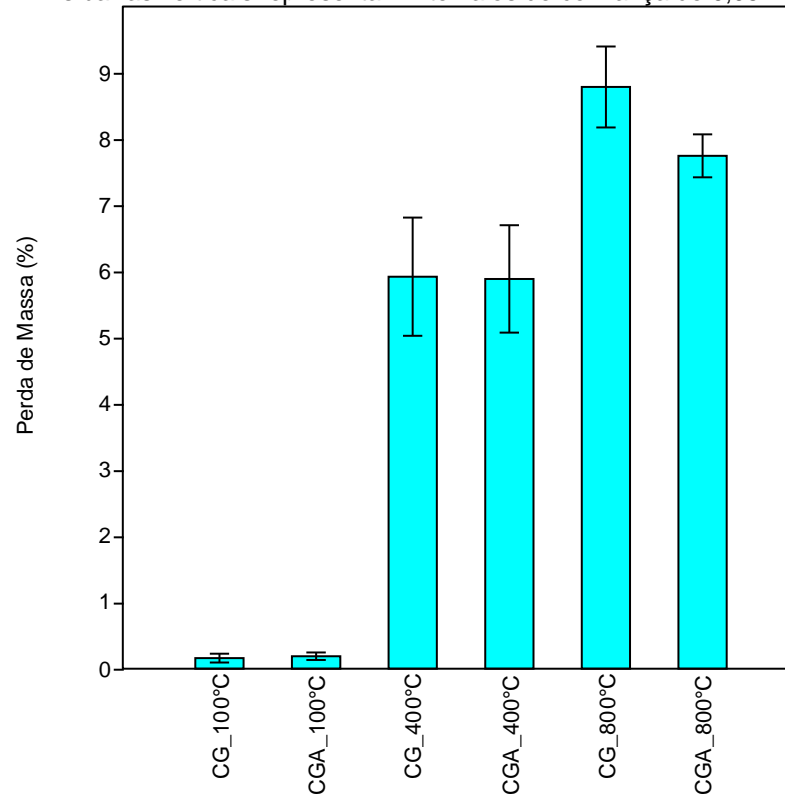
Para verificar se os valores de perda de massa são diferentes entre cada tipologia e temperatura, aplicou-se uma análise estatística de variância (ANOVA) com nível de confiança de 95%, ou seja, para um fator ser significativo deve-se obter  $p_{value} < 0,05$ .

A Figura 06 ilustra os resultados obtidos na ANOVA para a variável percentual de perda de massa, onde pode-se observar que as diferentes temperaturas e tipologias de concretos geraram perdas de massa estatisticamente diferentes com  $p_{value} < 0,05$ .

Analisou-se estatisticamente os dados presentes na Figura 06, correspondente ao gráfico de barras para os valores de perda de massa. Os valores  $p_{value}$  da análise de variância (ANOVA)  $< 0,05$  confirmaram, com 95% de probabilidade, a existência de pelo menos uma diferença estatisticamente significativa entre as médias, chegando, através do ensaio de Tukey na relação apresentada na Tabela 06.

Figura 06 – Gráfico de barras para os resultados de perda de massa.  
Current effect:  $F=994,5$ ,  $p=2,28 \cdot 10^{-32}$

As barras verticais representam intervalos de confiança de 0,95



Fonte: do autor, 2017

Tabela 06 – Análise Tukey para os resultados de perda de massa.

Grupo	Média da Perda de Massa (%)	Letra
<b>CG 100°C</b>	0.16	a
<b>CGA 100°C</b>	0.19	a
<b>CG 400°C</b>	5.92	b
<b>CGA 400°C</b>	5.89	b
<b>CG 800°C</b>	8.79	d
<b>CGA 800°C</b>	7.75	c

Fonte: Do Autor, 2017.

Onde médias seguidas pela mesma letra não diferem de si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5 %.

Verifica-se na tabela 06 que o CG e CGA não apresentam resultados estatisticamente diferentes nas temperaturas de 100°C e 400°C quando comparados na mesma temperatura. Para 800°C houve uma diferença estatística entre o CG e CGA. O gráfico de barras, visto na figura 06, mostra que o CGA a 800°C se comporta melhor que o CG, visto que apresenta uma menor perda de massa e amplitude entre os cps analisados. Quando analisados em diferentes temperaturas, o teste de Tukey mostra

que os grupos de amostras se comportam diferentes. Os resultados mostram que para ambas tipologias as perdas de massa foram crescentes com o aumento da temperatura.

### 3.4 Resistência à Compressão Axial

Os resultados médios obtidos para a Resistência à Compressão Axial dos corpos de prova, em diferentes temperaturas, estão ilustrados na tabela 07.

A tabela 07 permite observar que, ambos os concretos apresentam alterações na resistência à Compressão Axial após exposição à altas temperaturas. Porém, o CG apresenta um aumento de resistência até a temperatura de 100°C, já o CGA melhorou suas características até temperaturas de 400°C. Kelly e Yao (2014, apud Fernandes 2015), obtiveram aumento de resistência do geopolímero após ação de altas temperaturas até o patamar de 400°C. Esse aumento é caracterizado pela nova geopolimerização que o material sofre quando exposto à altas temperaturas.

Tabela 07 – Resistência Média à Compressão Axial.

Concreto	Temperatura (°C)	fcm (Mpa)
<b>Geopolimérico Sem Adição</b>	23	16.27
	100	24.73
	400	12.50
	800	6.60
<b>Geopolimérico Com Adição</b>	23	5.30
	100	7.53
	400	9.53
	800	3.90

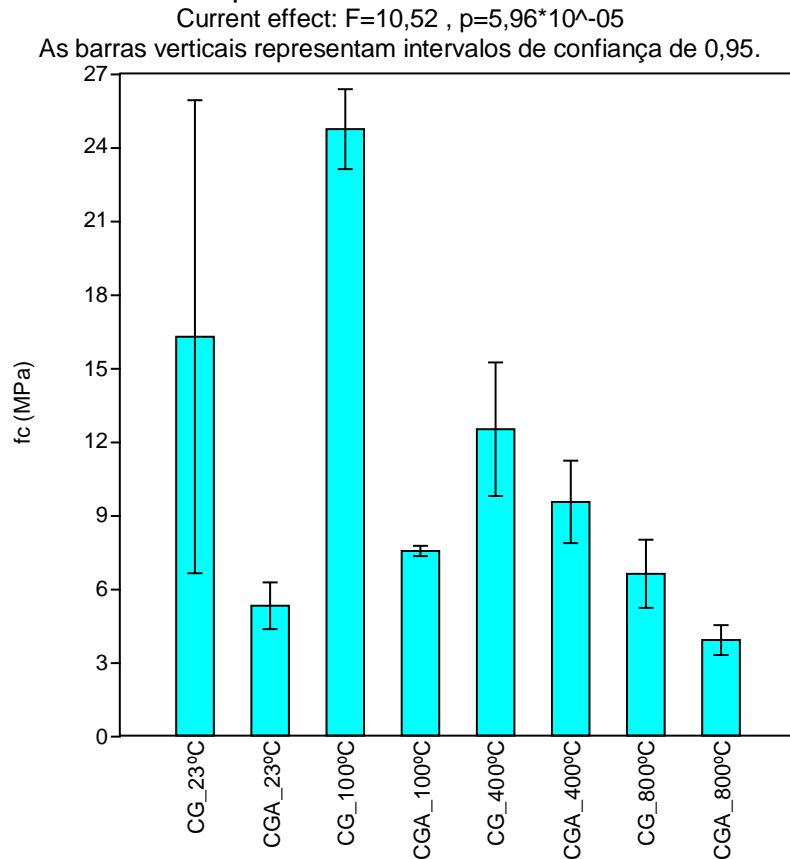
Fonte: Do Autor, 2017.

A Figura 07 ilustra os resultados obtidos na ANOVA para a variável percentual de resistência à Compressão Axial, onde pode-se observar que as diferentes temperaturas e tipologias de concretos geraram resistências à Compressão Axial estatisticamente diferentes com  $p_{value} < 0,05$ .

Analisou-se estatisticamente os dados presentes na Figura 07, correspondente ao gráfico de barras para os valores de Resistência à Compressão Axial. Os valores  $p_{value}$  da análise de variância (ANOVA)  $< 0,05$  confirmaram, com 95% de probabilidade, a

existência de pelo menos uma diferença estatisticamente significativa entre as médias, chegando, através do ensaio de Tukey na relação apresentada na Tabela 08.

Figura 07 – Gráfico de barras para os resultados de resistência à compressão axial.



Fonte: do autor, 2017

Tabela 08 – Análise Tukey para os Resultados de Resistência à Compressão Axial.

Grupo	Média das Resistências à Compressão Axial (MPa)	Letra
<b>CG 23°C</b>	16.27	a
<b>CGA 23°C</b>	5.30	b
<b>CG 100°C</b>	24.73	a
<b>CGA 100°C</b>	7.53	ab
<b>CG 400°C</b>	12.50	ab
<b>CGA 400°C</b>	9.53	ab
<b>CG 800°C</b>	6.60	ab
<b>CGA 800°C</b>	3.90	b

Fonte: Do Autor, 2017.

Onde médias seguidas pela mesma letra não diferem de si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5 %.



Verifica-se na tabela 08 que os CG 23 °C e CG 100 °C apresentam diferença estatística em relação ao CGA 23°C e CGA 800°C, tendo uma resistência superior a estes dois, porém com uma maior amplitude em relação à mediana. As outras tipologias podem se comportar estatisticamente iguais em relação aos dois grupos indicados pela letra a e b da tabela 08. Os CGA 23 °C e CGA 800 °C se comportam estatisticamente iguais entre si, ao nível de significância de 5 %, e tiveram os piores resultados de Resistência à Compressão Axial.

### 3.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados médios obtidos para a Resistência à Tração por Compressão Diametral dos corpos de prova, em diferentes temperaturas, são vistos na tabela 09.

A tabela 09 permite observar que, ambos os concretos apresentam alterações na Resistência à Tração por Compressão Diametral após exposição à altas temperaturas. O CG a 800 °C não foi possível fazer o ensaio devido aos corpos de prova estufarem com a temperatura, já os corpos de prova CGA ficaram em condições de ensaio.

Tabela 09 – Resistência Média à Tração por Compressão Diametral.

Concreto	Temperatura (°C)	Fctm (Mpa)
<b>Geopolimérico Sem Adição</b>	23	1.11
	100	1.09
	400	2.93
	800	-
<b>Geopolimérico Com Adição</b>	23	0.6
	100	0.78
	400	1.33
	800	0.51

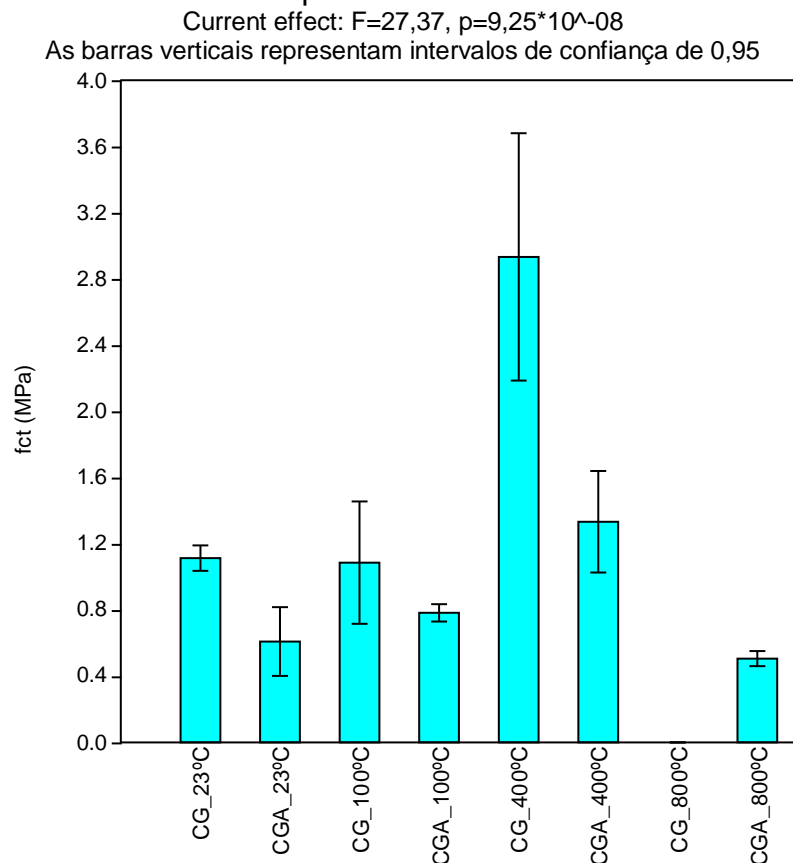
Fonte: Do Autor, 2017.

A Figura 08 ilustra os resultados obtidos na ANOVA para a variável percentual de Resistência à Tração por Compressão Diametral, onde pode-se observar que as diferentes temperaturas e tipologias de concretos geraram Resistências à Tração por Compressão Diametral estatisticamente diferentes com  $p_{value} < 0,05$ .

Analisou-se estatisticamente os dados presentes na Figura 08, correspondente ao gráfico de barras para os valores de resistência à tração por compressão diametral.

Os valores  $p_{value}$  da análise de variância (ANOVA)  $<0,05$  confirmaram, com 95% de probabilidade, a existência de pelo menos uma diferença estatisticamente significativa entre as médias, chegando, através do ensaio de Tukey na relação apresentada na Tabela 10.

Figura 08 – Gráfico de barras para os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral.



Fonte: do autor, 2017

Tabela 10 – Análise Tukey para os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral.

Grupo	Média da Tração por Compressão Diametral (Mpa)	
<b>CG 23°C</b>	1.11	b
<b>CGA 23°C</b>	0.60	b
<b>CG 100°C</b>	1.09	b
<b>CGA 100°C</b>	0.78	b
<b>CG 400°C</b>	2.93	a
<b>CGA 400°C</b>	1.33	b
<b>CGA 800°C</b>	0.51	b

Fonte: Do Autor, 2017.

Onde médias seguidas pela mesma letra não diferem de si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5 %.

Verifica-se que o CG 400°C apresenta diferença estatística em relação as outras tipologias, tendo uma resistência superior, porém com uma maior amplitude em relação à sua mediana. Para os outros grupos o comportamento das tipologias não difere entre si.

### 3.6 Módulo de Elasticidade

Os resultados médios obtidos para Módulo de Elasticidade dos corpos de prova, em diferentes temperaturas, são ilustrados na tabela 11.

A tabela 11 permite observar que, ambos os concretos apresentam alterações no Módulo de Elasticidade após exposição à altas temperaturas. O CG a 800 °C não foi possível fazer ensaio devido aos corpos de prova estufarem com a temperatura, já os corpos de prova CGA ficaram em condições de ensaio.

A Figura 09 ilustra os resultados obtidos na ANOVA para a variável percentual Módulo de Elasticidade, onde pode-se observar que as diferentes temperaturas e tipologias de concretos geraram resistências estatisticamente diferentes com  $p_{value} < 0,05$ .

Tabela 11 – Módulo de Elasticidade Médio.

Concreto	Temperatura (°C)	Ecm (Gpa)
<b>Geopolimérico Sem Adição</b>	23	3.02
	100	1.58
	400	12.42
	800	
<b>Geopolimérico Com Adição</b>	23	1.58
	100	4.00
	400	6.01
	800	1.05

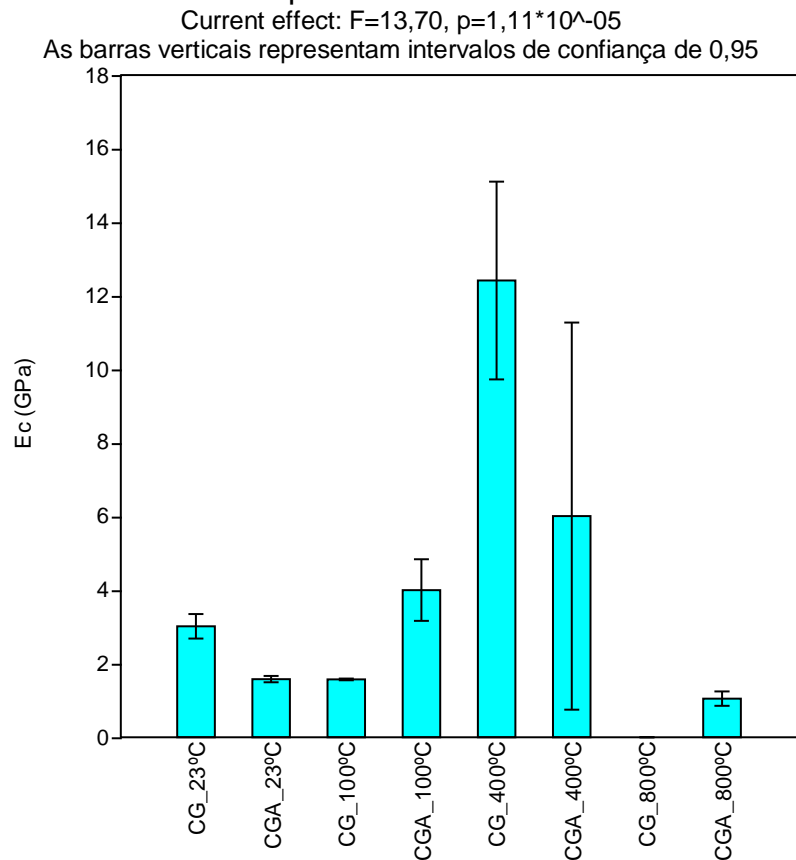
Fonte: Do Autor, 2017.

Analisou-se estatisticamente os dados presentes na Figura 09, correspondente ao gráfico do de barras para os valores do Módulo de Elasticidade. Os valores  $p_{value}$  da análise de variância (ANOVA)  $< 0,05$  confirmaram, com 95% de probabilidade, a existência de pelo menos uma diferença estatisticamente significativa entre as médias, chegando, através do ensaio de Tukey na relação apresentada na Tabela 12.

Onde médias seguidas pela mesma letra não diferem de si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5 %.

Verifica-se na tabela 12 que o CG 400°C apresenta diferença estatisticamente significativa em relação as outras tipologias, tendo uma resistência superior. O CGA 400°C apesar de ter uma resistência superior apresentou uma maior amplitude, visto na figura 09, em relação à sua mediana, o que não diferiu das outras tipologias ao nível de significância.

Figura 09 – Gráfico de barras para os resultados de módulo de elasticidade.



Fonte: do autor, 2017

Tabela 12 – Análise Tukey para os resultados de Módulo de Elasticidade.

Grupo	Média dos Módulos de Elasticidade (Gpa)	
<b>CG 23°C</b>	3.02	b
<b>CGA 23°C</b>	1.58	b
<b>CG 100°C</b>	1.58	b
<b>CGA 100°C</b>	4.00	b
<b>CG 400°C</b>	12.42	a
<b>CGA 400°C</b>	6.01	b
<b>CGA 800°C</b>	1.05	b

Fonte: Do Autor, 2017.

#### 4. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi analisado a influência da adição de óxido de alumínio, em 4 níveis de temperaturas, nas propriedades microestruturais e mecânicas do concreto geopolimérico. Foram analisadas as seguintes propriedades do concreto: difração de raios X, termogravimétrica, análises térmicas diferenciais, perda de massa, compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

- A análise de DR-X do metacaulim, mostrou uma amostra com muitos ruídos e um pico de cristalinidade no quartzo. Os ruídos indicam a presença de grãos no metacaulim, o que pode ter acarretado a baixas resistências. O pico de quartzo é comum nos caulins do Brasil, que estão contaminados pelo quartzo.
- A análise termogravimétrica mostrou que a transformação do caulim para metacaulim através da calcinação foi eficiente e satisfatória para o uso do material precursor deste trabalho. Pode-se identificar pela termogravimetria uma maior perda de massa do CGA até 100 °C, ficando mais atenuada que o CG quando aumentou a temperatura, fato comprovado pela análise de perda de massa dos corpos de prova, pesados em balança, posteriormente.
- Quando analisada a perda de massa, o CGA apresentou uma maior resistência ao fogo em temperaturas de 400°C e 800°C em relação ao CG, mostrando que o óxido de alumínio tem propriedades satisfatórias em situações de incêndio.
- A Resistência à Compressão Axial mostrou que os CG são mais resistentes que o CGA em todos os níveis de temperatura. Porém analisando a influência da temperatura em cada concreto, viu-se que, o CG ganhou resistência até a temperatura de 100°C, já o CGA obteve acréscimo de resistência até os 400°C.
- Para Resistência à Tração por Compressão Diametral foi observado que a maior resistência para ambos os concretos foi a 400°C.
- O Módulo de Elasticidade mostrou que para ambos os concretos as melhores características foram à temperatura de 400°C. Para o CGA a resistência foi crescente até 400°C, já o CG obteve um decréscimo a 100°C e voltou a ter sua maior resistência a 400°C.

## 5. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Aumentar as porcentagens de óxido de alumínio na mistura com o material precursor.
- ✓ Analisar em diferentes temperaturas.
- ✓ Analisar as características em tempos de curas menores.
- ✓ Calcinar o caulim em outras temperaturas.
- ✓ Ativar a mistura com outros ativadores alcalinos.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova: Rio de Janeiro. ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: Rio de Janeiro. ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: Rio de Janeiro. ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

COSTA, António Filipe Martins. **Utilização de Geopolímeros para Protecção de Betão: Resistência a altas temperaturas**. 2012. 71 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2012.

COSTA, D.L.; BEZERRA, I.M.T.; MENEZES, R.R.; NEVES, G.A. **Estudo da adição de alumina em corpos geopoliméricos a base de metacaulim**. Curso de Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement, a review**, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2013. Disponível em: <http://www.geopolymer.org/library/technical-papers/21-geopolymer-cement-review-2013>, acesso outubro/2017.

FERNANDES, Murilo Alexandre. **Análise de propriedades mecânicas residuais em concreto convencional e concreto geopolimérico submetido à altas temperaturas**. 2015. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

MEDINA, Engler Apaza. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MENGER, Manuela Hoffmann. **Análise da aderência entre compósitos de cimento portland e geopolimérico**. 2015. 18 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

OSÓRIO, Paulo Dias Lopes. **Concepção de um Saferoom Anti-Tornado em Betão Geopolimérico**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2006.

PALOMO, A.; RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; **Cementos de bajo impacto ambiental: activación alcalina de aluminosilicatos**. X Congreso Latino Americano de Patología y XII Congreso de Calidad en la Construcción. CONPAT 2009. Valparaíso-Chile, 2009.

PELISSER, Fernando. MICHEL, Milton Domingos; GUERRINO, Erick Leite; MENGER, Manuela Hoffmann. Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials, vol 49** (2013), p. 547-553, maio./ago.2013.

PEREIRA, Juran Ruan Gonçalves. DIAS, Fabrício Moura. **Concreto polimérico: Uma alternativa para a construção civil**. UnilesteMG, Minas Gerais, 2010.

RILEM TC 129 MHT: **Test Methods for Mechanical properties of concrete at high temperatures**, Part 9: Shrinkage. 2000.

SHI, Caijun; JIMÉNES, A. Fernández. PALOMO, Angel. **New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement**. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University. 2011.

Tchakoute Kouamo, H., Elimbi, A., Mbey, J. A., Ngally Sabouang, C. J., Njopwouo, D. **The effect of adding alumina-oxide to metakaolin and volcanic ash on geopolymer products: A comparative study**. Construction and Building Materials, v. 35, p. 960-969, 2012.

TORGAL, Fernando. Pacheco; JALALI, Said. **A Sustentabilidade Dos Materiais De Construção**. Guimarães, Portugal: TecMinho, 2011. 460 p.

VASSALO, Érica Antunes de Souza. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. 2013. 104 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte.