

AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE DIFERENTES CONCRETOS EM ALTAS TEMPERATURAS: PORTLAND X GEOPOLIMÉRICO

Richard Picolo Tramontin (1); Daiane dos Santos Godinho (2)

*UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)richard.tramontin@hotmail.com, (2)dss@unesc.net*

RESUMO

O concreto é um material que apresenta alterações em seu comportamento quando submetido a altas temperaturas. O principal componente do concreto é o cimento Portland, sendo que para a sua fabricação ocorre grande emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Com o intuito de reduzir os impactos ambientais pesquisas tem sido realizadas para o desenvolvimento de novos concretos, como é o caso dos concretos geopolimérico. Perante essas informações o presente trabalho buscou-se analisar as propriedades mecânicas do concreto com cimento Portland e o concreto geopolimérico, sendo ambos submetidos a altas temperaturas. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de (10x20) para ambos os concretos estudados. Os dois concretos estudados foram submetidos a temperaturas de 100 °C, 400 °C e 800 °C. Após o aquecimento dos corpos de prova, ocorreu o resfriamento natural até atingir a temperatura ambiente. As amostras foram submetidas aos ensaios de Compressão Axial, Módulo de Elasticidade e Tração por Compressão Diametral. Os resultados obtidos mostram que a redução das resistências a Compressão do geopolimérico em relação ao Portland são menores quando submetidos a temperatura de 800 °C, porém quando ambos concretos submetidos a temperaturas mais baixas como, 100 °C e 400 °C, o concreto com cimento Portland obteve redução menor. Para o Módulo de elasticidade e tração por compressão diametral a temperatura de 800 °C os corpos de prova com geopolimérico expandiram não podendo ser feito os ensaios. Foram realizados também ensaios térmicos e microestruturais a fim de melhorar e entender os resultados obtidos.

Palavras-Chave: concreto geopolimérico, concreto com cimento Portland, resistência, altas temperaturas.

1. INTRODUÇÃO

Com o enorme avanço da tecnologia e a constante preocupação com o meio ambiente e a sustentabilidade no mundo, foi desenvolvido o protocolo de quioto, que visa diminuir a emissão de gases na atmosfera amenizando cada vez mais o efeito estufa. O grande consumo de cimento Portland tem gerado muitas preocupações em relação a sua produção, visando que uma das etapas mais importantes de sua produção é a clinquerização, no qual requer a queima das matérias-primas (calcário e argilas) a uma temperatura de aproximadamente 1500°C, com alta liberação de CO₂.

(SINDICATO,2011 *apud* BORGES, LOURENÇO, FOUREAUX e PACHECO). Atualmente o desenvolvimento de outros tipos de cimentos, tem sido pesquisado e estão sendo produzidos com diversos tipos de materiais, com o intuito de obter maiores resistências sem agredir o meio ambiente. “Tais limitações manifestam-se não só quanto aos problemas de caráter ambiental com peso considerável em termos da poluição por CO₂, como também do ponto de vista do seu comportamento mecânico e desempenho face às condições químicas do meio envolvente.” (PINTO, 2006, p.2). “O cimento geopolimérico emite 9% de CO₂ a menos que o cimento Portland na sua produção, no qual o cimento Portland ainda contem 100% de OPC como aglutinante”. (PELISSER,2013 *apud* TURNER e COLLINS, 2013, p.1, tradução nossa). Ainda, a produção de 1 tonelada de cimento gera diretamente 0,55 tonelada de CO₂ químico e requer a combustão de combustível a base de carbono gerando um adicional de 0,40 toneladas de CO₂, simplificando 1 tonelada de CO₂ para a produção de 1 tonelada de cimento. (...) Na fabricação do geopolímero, são reduzidas as emissões de dióxido de carbono causadas pelas indústrias de cimento e concreto, de 80 a 90%. (DAVIDOVITS, 1994). O termo “geopolímero” foi patenteado por Davidovits em 1976 nos Estados Unidos, para designar esses cimentos que quando sofrem a ativação alcalina, passam por uma reação de hidratação de aluminos-silicatos. (MENGER, 2015 *apud* DAVIDOVITS, 1988). Apesar do uso comprovado de cimento Portland em argamassa e produção de concreto, o investimento no desenvolvimento de cimentos geopoliméricos está crescendo devido a sua excelente resistência mecânica, durabilidade a longo prazo, baixo encolhimento, ajuste rápido, resistência ao ácido, resistência ao fogo e baixa condutividade térmica. (PELISSER et al, 2013 *apud* RASHAD et al, 2013). Nematollahi (2014) afirma que, o geopolímero é formado a partir de materiais de origem geológica (como por exemplo, metacaulim) ou sub-produtos industriais, tais como cinzas volantes e escórias que são ricos em sílica e alumina com ativadores alcalinos elevados. “Geopolímeros resultam em uma rede tridimensional de alumino-silicato, amorfo com estrutura semicristalina. (PELISSER, 2013 *apud* DAVIDOVITS, 1991, p.1). Estudos foram feitos e Osório (2006), conclui que o concreto geopolimérico resistente bem a temperaturas de 1000 °C. Conforme Costa (2012) o concreto geopolimérico quando comparado com o concreto com cimento Portland, apresentam melhor resistência ao fogo. Mas segundo Torgal e Jalali (2009) só é possível resistir à temperaturas de 1000 °C se os concretos forem bem cuidados e bem curados. Diante do exposto, no presente trabalho busca-

se avaliar a redução das propriedades mecânica de diferentes concretos como os concretos convencionais produzidos com cimento Portland CPIV, em comparação com concretos geopoliméricos ativados a base de metacaulim, sendo ambos submetidos a diferentes níveis de temperatura, 23 °C, 100 °C, 400 °C e 800°C. Após aquecidos os corpos de prova, foram submetidos aos ensaios de resistência a compressão axial, modulo de elasticidade, tração por compressão diametral, além da análise de difração de raio-x (DRX), termogravimetria (TGA), termo-diferencial (DTA) e perda de massa ao fogo. Ao final foram realizadas análises estatísticas de variância ANOVA, para determinar e verificar se as possíveis diferenças são significativas. Entre os grupos de amostras analisadas, foi possível validar ou rejeitar a hipótese da vantagem do concreto geopolimérico em relação ao concreto convencional quando submetidos a altas temperaturas. O estudo visa verificar a redução das propriedades mecânicas avaliando as resistências dos dois concretos e contribuindo para a preservação do meio ambiente na produção do concreto geopolimérico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental foi desenvolvido para avaliar e comparar a influência da temperatura nas propriedades mecânicas do concreto produzido com cimento Portland CP-IV em relação ao concreto geopolimérico em altas temperaturas.

2.1 MATERIAIS

Para a preparação do concreto Geopolimérico primeiramente foi obtido o metacaulim. Para a obtenção do metacaulim foi realizada a desidroxilação do caulim, através da calcinação concretizada em um forno industrial elétrico com capacidade de 1350 °C. O forno foi previamente aquecido a um patamar de temperatura de 900 °C e foi deixado nessa temperatura por 1 hora. Os materiais para a produção do geopolímero foram o agregado graúdo (brita 0), agregado miúdo (areia média), o Silicato de sódio e o Hidróxido de Sódio em escamas. Para a preparação do concreto com cimento Portland foi utilizado agregado miúdo (areia média), agregado graúdo (brita 1), cimento Portland CP-IV e aditivo plastificante. A Tabela 1 ilustra a composição química do caulim adquirido por base da análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de Raio-X.

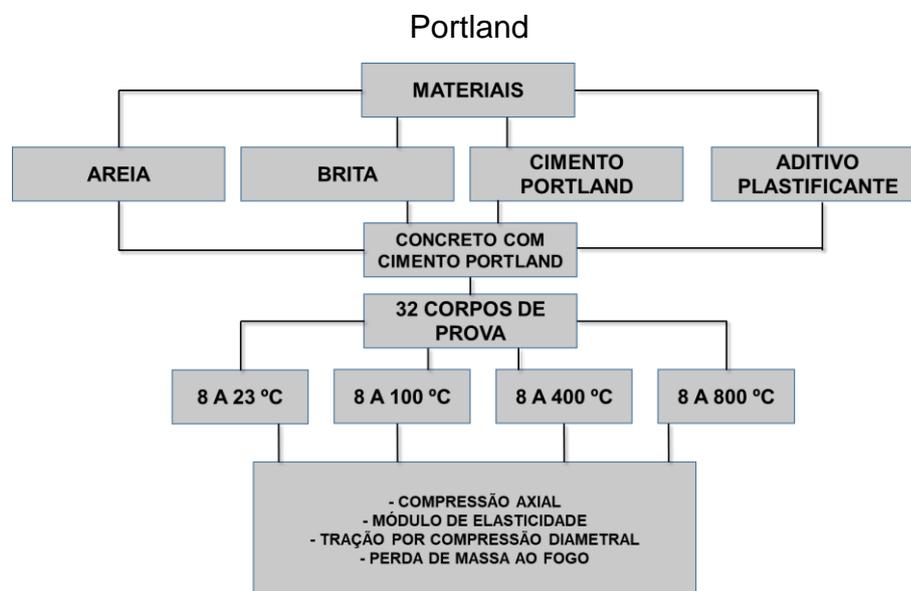
Tabela 1 – Composição química do caulim

Análise Química	
Compostos	Quantidade
SiO ₂	46,84%
Al ₂ O ₃	37,27%
Fe ₂ O ₃	0,59%
K ₂ O	0,61%
MgO	0,17%
Na ₂ O	0,18%
P ₂ O ₅	0,03%
P.F	13,44%

Fonte: Colorminas Colorifício e Mineração, 2017.

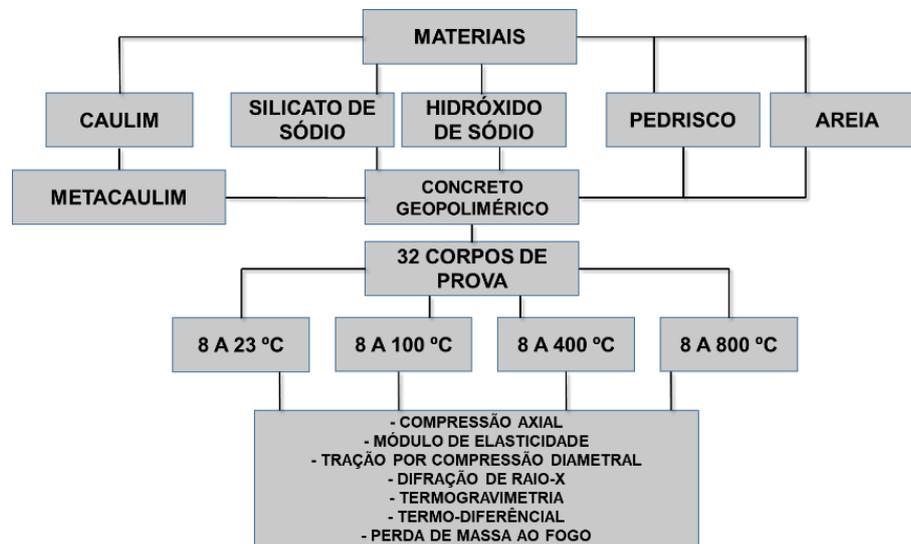
As Figuras 1 e 2 mostram os materiais utilizados juntamente com as temperaturas desejadas e posteriormente os ensaios utilizados.

Figura 1 – Fluxograma do programa experimental para o concreto com cimento



Fonte: autor, 2017.

Figura 2 - Fluxograma do programa experimental para o concreto geopolimérico.



Fonte: autor, 2017.

Foram produzidos 8 corpos de prova para cada temperatura de ensaio, totalizando em um total de 32 corpos de prova produzidos com cimento Portland, no qual para cada temperatura desses 8 corpos de prova 2 eram reservas. Para o concreto geopolimérico foram feitos 32 corpos de provas para as respectivas temperaturas e respectivos corpos de prova de reserva. Ao final foram produzidos 64 corpos de prova. A relação molar da mistura do geopolímero está ilustrada pela Tabela 2.

Os traços utilizados nas misturas dos concretos com cimento Portland e geopolimérico se encontram-se na Tabela 3.

Tabela 2: Relação molar da mistura de geopolímero.

Composição	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,2
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0,46
Na ₂ O/SiO ₂	0,14
Na ₂ OSiO ₂ /NaOH	1,6
H ₂ O/Metacaulim	0,75

Fonte: Pelisser et al, 2013.

Tabela 3 – Materiais e traços utilizados na mistura dos concretos

CONCRETO GEOPOLIMÉRICO	TRAÇO	CONCRETO PORTLAND	TRAÇO
Metacaulim	1	Cimento	1
Hidróxido de Sódio	0,089	Areia	2,3
Silicato de Sódio	1,2	Brita	2,7
Areia	3,8	Água	0,4
Pedrisco (Brita 0)	1,2	Aditivo Plastificante	0,70%

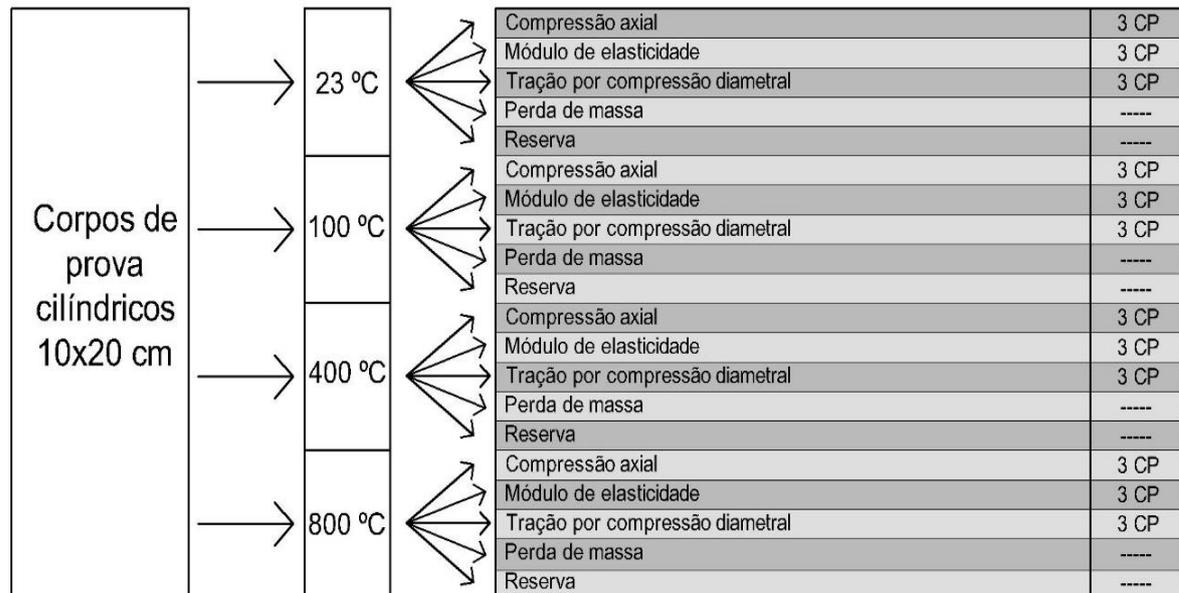
Fonte: autor, 2017.

2.2 MÉTODOS

Para o procedimento de concretagem foi retirado a umidade dos agregados miúdos e graúdos, utilizados para não interferir na relação água/cimento da mistura. De acordo com a ABNT NBR 9939:2011, a secagem dos agregados foi feita por uma estufa em um período de 48 horas a uma temperatura de 105 a 110°C constante. A concretagem dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UNESC. Para a concretagem dos corpos de prova com cimento Portland foi utilizado uma betoneira de 120 litros e para a concretagem dos corpos de prova de concreto Geopolimérico foi utilizado um misturador mecânico (argamassadeira). A mistura do concreto geopolimérico iniciou-se com a preparação da mistura do silicato de sódio com o hidróxido de sódio até que a mistura ficasse homogênea, em seguida foi adicionado metacaulim e misturado até ficar bem consistente formando assim a pasta. Em seguida foi adicionado o agregado miúdo e posteriormente o agregado graúdo sem parar de misturar para não ocorrer a segregação dos agregados e da pasta. Cada misturador mecânico tinha um volume para concretar 7 corpos de prova, portanto foram feitos 5 dosagens para moldar 35 corpos de prova. De acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003), os corpos de prova devem ter a sua altura igual ao dobro do seu diâmetro. As dimensões dos corpos de prova utilizados foram de 10x20 cm (diâmetro x altura). Os 32 corpos de prova com cimento Portland foram submetidos a um processo de cura submersa durante um período de 66 dias. Os 32 corpos de prova de concreto geopolimérico, foram submetidos a um processo de cura em estufa a uma taxa de 60 °C durante um período de 48 horas no Laboratório de Mecânica dos Solos no IPARQUE (LMS). Após a cura em estufa os corpos de prova ficaram em processo

de cura ambiente durante 78 dias. A Figura 3 ilustra a separação dos ensaios e temperaturas desejadas para ambos concretos.

Figura 3 – Fluxograma do programa experimental para o concreto geopolimérico e para o concreto com cimento Portland



Fonte: Autor, 2017.

2.2.1 Aquecimento dos corpos de prova

O aquecimento dos corpos de prova de geopolimérico e Portland foram feitos aos 80 dias após a concretagem. Os corpos de prova foram aquecidos a 4 patamares de temperaturas: 23 °C, 100 °C, 400 °C e 800°C, a uma taxa de aquecimento de 3°C/min de acordo com Rilem TC129 MHT (2000 *apud* SILVA, 2009), mantendo depois o patamar desejado até que a temperatura do interior da mufla alcançasse a temperatura externa. Após o aquecimento dos corpos de prova até o patamar desejado, a mufla foi desligada e permaneceu assim por 24 horas para que ocorresse o resfriamento natural. Em incêndios reais o resfriamento da estrutura se dá por água na grande maioria dos casos. Contudo nesse trabalho não foi possível fazer essa simulação, visando que poderia prejudicar o equipamento utilizado, em razão que a mufla só poderia ser aberta a temperaturas abaixo de 40°C para que não danificasse o seu material cerâmico. O equipamento utilizado no aquecimento foi um forno mufla CT 095 - pequeno (cód. Serv. 19013), com controle digital de temperatura micro

processado, tendo dimensões úteis de (500x470x500) mm e com capacidade de até 1000°C. Para evitar que possíveis lascamentos do concreto danificassem a cerâmica da mufla, foi utilizado uma grade de proteção de aço inoxidável móvel.

2.2.2 Determinação da perda de massa

A perda de massa dos corpos de prova ocorrida durante o ensaio foi determinada pela diferença entre as massas antes do aquecimento e imediatamente após a retirada dos corpos de prova da mufla, empregando-se a equação 1:

$$pm = \left(\frac{m1 - m2}{m2} \right) \times 100$$

Equação (1)

Onde:

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

$m1$ = massa do corpo de prova de referência (kg), antes do aquecimento;

$m2$ = massa do corpo de prova 24 horas depois de ser exposto à altas temperaturas, em (kg);

A balança usada para a pesagem dos corpos de prova foi da marca Marte, modelo AS 5000, com capacidade de 10.000g.

2.2.3 Difração de Raio-X

Para a determinação das características das microestruturais do metacaulim, do caulim e da amostra do corpo de prova do concreto geopolimérico a 23 °C, foi utilizado esse ensaio aos 80 dias após a calcinação do caulim e após o período de cura do concreto geopolimérico. O ensaio de difração de raio-x (DRX) permite identificar sólidos cristalinos, através de picos gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral, informando quais as fases cristalinas se formaram e se podem influenciar nas características próprias dos materiais estudados. O ensaio de difração de raio-x foi feito no laboratório CECAM, pertencente ao Iparque, sendo utilizado o equipamento de marca Shimadzu, modelo LabX XRD-6100.

2.2.4 Análise térmica (TGA/DTA)

A Análise Termo-Diferencial (DTA) foi realizada no LabValora/UNESC e teve como objetivo identificar as mudanças de fases conforme a temperatura variava através do comportamento exotérmico e endotérmico. A Análise Termogravimétrica (TGA) foi realizada também no LabValora/UNESC que teve como objetivo identificar em percentual a perda de massa do corpo de prova de concreto geopolimérico com temperatura de 23 °C e analisar o metacaulim para verificar se o mesmo poderia ser usado para o desenvolvimento do concreto geopolimérico. Para ambos os ensaios foi preciso moer 10 gramas do corpo de prova, ou seja 5 gramas para o TGA e 5 gramas para o DTA até os grãos estarem pequenos o bastante para passar na peneira 200mm. Para o metacaulim não foi preciso moer, pois o diâmetro dos grãos do metacaulim passaram na peneira 200mm. O equipamento utilizado para esses ensaios foi o TA instrument, modelo Q600 simultaneous TGA/TDA, nas condições de ensaio de atmosfera de ar sintético, no intervalo de temperatura de 20 °C a 1100 °C e com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

2.2.5 – Resistência à compressão axial

Os corpos de prova foram submetidos a uma força axial distribuída de maneira uniforme sobre o corpo de prova em toda sua seção transversal, seguindo as orientações da ABNT NBR 5739:2007 para conseguir obter a resistência a compressão axial. Para o devido ensaio foi utilizado os seguintes equipamentos: prensa hidráulica da marca EMIC modelo PC200I, com capacidade máxima de 2000kN, juntamente com um computador utilizando o software TESC – Test Script, que fornece recursos para a obtenção e leitura dos resultados. A carga foi aplicada constantemente até que ocorresse uma queda na força indicada no equipamento, no qual mostrou a ruptura do corpo de prova.

2.2.6 – Módulo de elasticidade

O método do ensaio é determinado pela ABNT NBR 8522:2003 e para o mesmo foram utilizados os seguintes equipamentos: prensa-hidráulica da marca EMIC modelo

PC200CS, com capacidade máxima de 2000KN acoplada a um computador com software TESC – Test Script.

2.2.7 – Resistência à tração por compressão diametral

O equipamento utilizado nesse ensaio foi o mesmo que foi utilizado no ensaio de compressão axial, porém foram acoplados à prensa-hidráulica um par de placas metálicas retangulares. Em seguida, usando como base a ABNT NBR 7222:2011 foi colocado em posição horizontal o corpo de prova, repousando, segundo uma geratriz, sobre a placa inferior da prensa. Verifica-se visualmente a retilidade das geratrizes de contato com ambas as placas e utiliza-se como ligação entre elas duas taliscas de madeira com dimensões de 1x20 cm. A partir de então, a carga de compressão foi aplicada progressivamente, até que ocorresse a ruptura global da amostra no plano vertical diametral.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na presente pesquisa, analisando 4 patamares de temperaturas de aquecimento sendo eles 23 °C, 100 °C, 400 °C e 800°C e analisando a redução das propriedades mecânicas de diferentes concretos, tais como resistência a compressão axial, módulo de elasticidade, compressão por tração diametral, as análises de difração de raio-x, perda de massa e as análises térmicas de termogravimetria (TGA) e termo-diferencial (DTA).

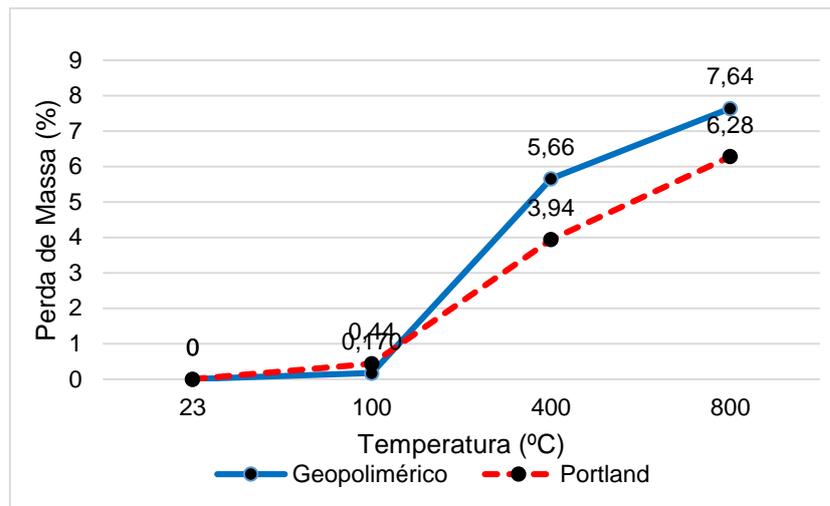
3.1 PERDA DE MASSA

Para a verificar a perda de massa foram analisados 6 corpos de prova para cada temperatura de para cada concreto e feito a média. Ao analisar os valores das perdas de massas dos corpos de prova na temperatura ambiente e após aquecidos às temperaturas de 100 °C, 400 °C e 800°C. As massas iniciais foram obtidas a uma temperatura de 23 °C antes do aquecimento e as finais foram obtidas após a abertura da mufla e posteriormente resfriamento dos corpos de prova. Para verificar se os valores da perda de massa são diferentes entre cada 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 $pvalue \leq 0,05$.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos na ANOVA para a perda de massa, onde observa-se que os traços de concretos obtiveram diferentes resistências com $pvalue=0,00$.

Figura 4 – Resultado das médias das perdas de massa



Fonte: Autor, 2017.

É notável que a perda de massa vai aumentando com o aumento da temperatura, influenciando diretamente na resistência dos corpos de prova. Aos 100 °C a perda de massa dos corpos de prova está relacionada a evaporação de água do silicato de sódio nos corpos de prova com concreto geopolimérico e a evaporação da água nos corpos de prova com cimento Portland. No concreto geopolimérico ocorreu diferença na perda de massa nos níveis de temperaturas, aos 100°C a taxa de evaporação de água é menor que em relação as temperaturas de 400 a 800°C, isso acontece pelo fato do concreto geopolimérico ser mais denso precisando de temperaturas maiores para que a umidade do corpo de prova seja totalmente evaporada, assim com a taxa de 100 °C ocasiona na evaporação da água presente na superfície do corpo de prova, deixando o seu interior ainda úmido. Para os corpos de prova com cimento Portland a perda de massa foi menor na temperatura até 100°C, isso se dá porque no primeiro estágio (até 200 °C), a perda de massa aumenta muito rapidamente com a temperatura e é atribuída à evaporação da água dos capilares, sendo, portanto, um processo totalmente físico. O segundo estágio ocorre quando a temperatura máxima

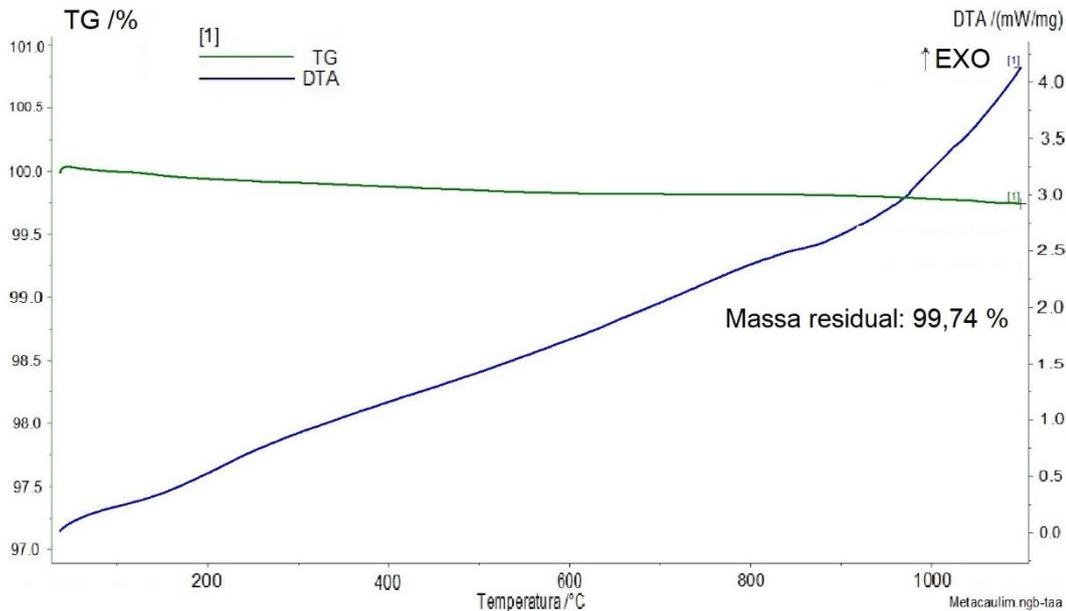
varia entre 200 °C e 400 °C e a perda de massa é promovida principalmente pela evaporação da água do gel de C-S-H, com uma taxa de evaporação bastante reduzida já que a saída de água dos poros intermediários é difícil, caracterizando o segundo estágio como um processo físico-químico. No terceiro estágio (acima de 400 °C), a perda de massa é promovida principalmente pela decomposição da pasta de cimento e dos agregados, representando um processo predominantemente químico (ZHANG, BICANIC 2002 *apud* CASTRO, PANDOLFELLI, 2011). De acordo com Moura (2014, p.48 *apud* Ribeiro, 2012), o geopolimérico é termicamente estável até 250 °C, a partir de 250 °C até 625 °C pode ocorrer uma redução de até 7 % da sua massa.

3.2 ANÁLISE TÉRMICA (TGA/DTA)

Com a análise Termo-Diferencial (DTA) e a análise Termogravimétrica (TGA) foi possível verificar as indicações de mudanças de fase e a perda de massa conforme a temperatura variava para ambas respectivamente. A análise Termogravimétrica (TGA) indica mudança de massa na estrutura em função da temperatura, e a Análise Térmica Diferencial (DTA) registra a diferença de temperatura entre a substância e um material inerte. As análises térmicas permitem observar eventos exotérmicos e endotérmicos, bem como a transição de temperaturas. (SANTA, 2012). Na análise Termogravimétrica do metacaulim pode-se observar uma redução de 0,26% da sua massa tornando-o um material seco com umidade baixa. A análise Termo-Diferencial do metacaulim indica que conforme a temperatura aumenta o estado físico do material vai mudando, aos 950 °C, aproximadamente, ocorre a mudança de fase do material de sólido para líquido, ou seja acontece uma reação endotérmica comprovando o pico elevado na Figura 5. Com a análise Termogravimétrica (TGA) do concreto geopolimérico a 23 °C pode-se observar uma redução na sua massa de 4,35% conforme a temperatura variava de 20 °C a 1100 °C. A perda de massa até 200 °C pode estar relacionada com a água livre nos poros, no qual ocorre devido a desidratação do concreto. No entanto, acima de 200 °C a perda de massa pode estar ligada com a água condensada na geopolimerização. (MOURA, 2014). Na análise Termo-Diferencial (DTA) do corpo de prova geopolimérico com temperatura ambiente, na temperatura 85 °C, aproximadamente, ocorre uma reação endotérmica, provavelmente pela perda de água de umidade. Próximo de 1000 °C ocorreu um

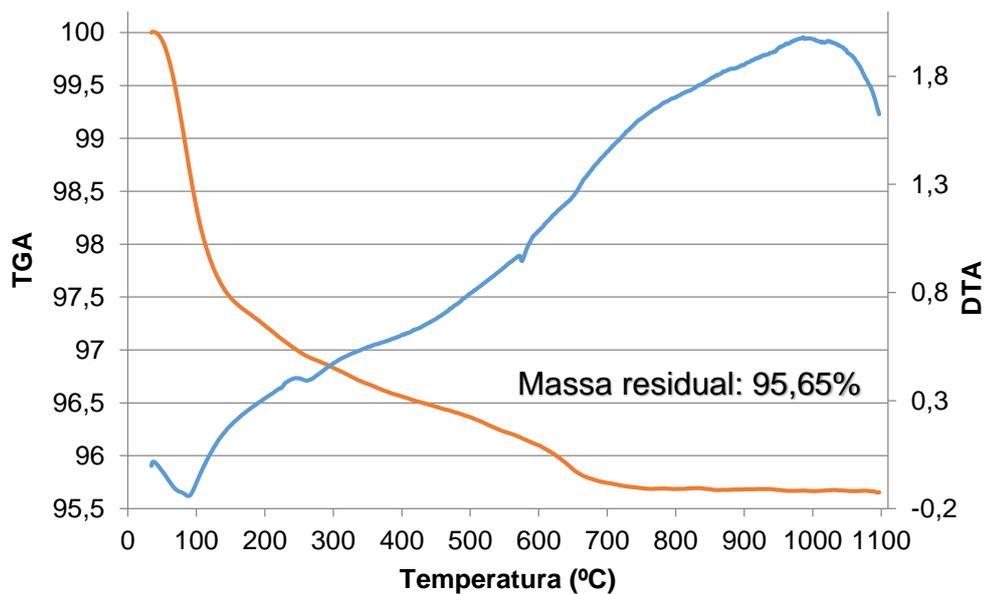
evento exotérmico indicando mudança de fase de sólido para líquido conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 5 – Análise Térmica (TGA/DTA) Metacaulim



Fonte: LabValora, 2017.

Figura 6 – Análise Térmica geopolimérico 23 °C(TGA/DTA)

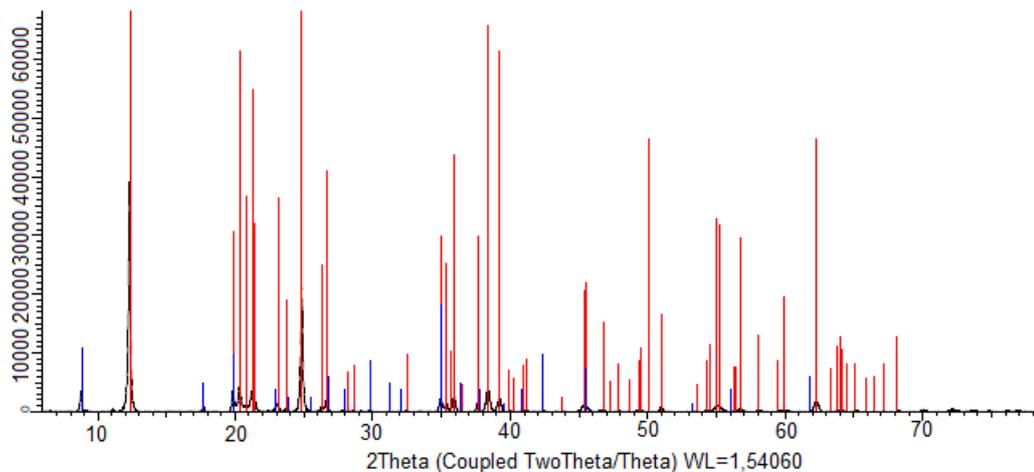


Fonte: LabValora, 2017.

3.3 DIFRAÇÃO POR RAIOS-X (DRX)

Segundo Jailes (2014) para a produção de geopolímeros, a fase amorfa presente na matéria-prima é de suma importância, pois é a fase amorfa que apresenta energia armazenada na estrutura para facilitar a reticulação da mesma. Para que fosse possível ser feito o concreto geopolimérico foi necessário primeiro fazer uma análise de difração de raios-x (DRX) do caulim e do metacaulim após calcinação a 900 °C durante um período de 1 hora. O caulim é uma matéria prima muito encontrada no Brasil e todos estão contaminados por areia. Na difração de raios-x (DRX) do caulim pode-se observar que os picos são maiores e irregulares mostrando ser um material cristalino, no qual os raios incidem no material e voltam rapidamente comprovando os elevados picos no caulim mostrados na Figura 7.

Figura 7 – Difração raios-x (DRX) do Caulim

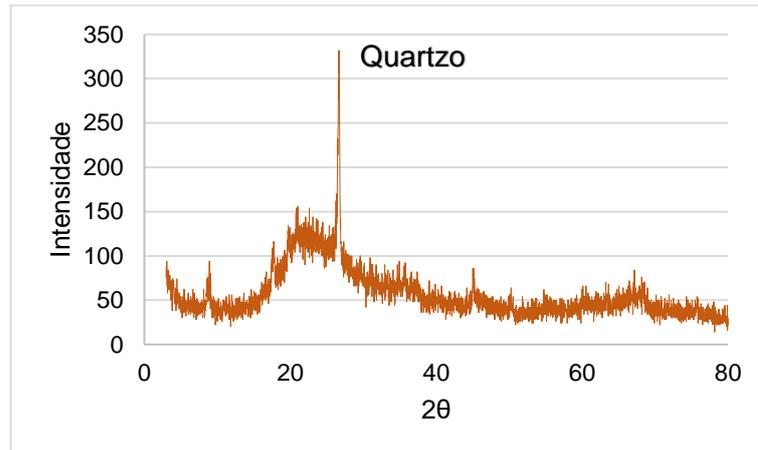


Fonte: Colorminas Colorifício e Mineração, 2017.

Na difração de raios-x (DRX) do metacaulim pode-se observar que os picos são menores e regulares com exceção de um pico cristalino em $2\theta=29$ que indica ser um pico de quartzo, mostrando que o metacaulim possui um halo amorfo o bastante para ser utilizado no concreto geopolimérico como mostra na Figura 8. Para o concreto geopolimérico com temperatura de 23 °C, na difração de raios-x (DRX) pode-se perceber que os picos são elevados e irregulares mostrando ser rico em quartzo e semelhante ao caulim, mostrando que não ocorreu a formação da zeólita componente importante na geopolimerização, ou seja ocorreu problemas na cura. Com isso pode-

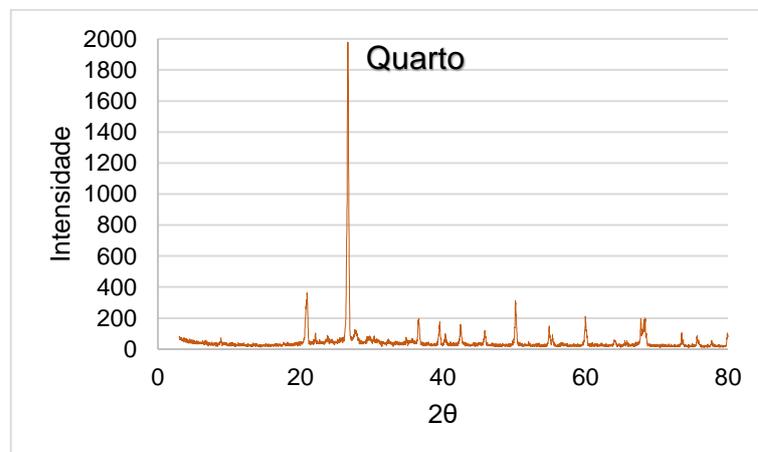
se explicar a baixa resistência a compressão axial, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral. A Figura 9 ilustra a difração de raio-x (DRX) do concreto geopolimérico a 23 °C.

Figura 8 – Difração raio-x (DRX) do Metacaulim



Fonte: Autor,2017.

Figura 9 – Difração de raio-x (DRX) geopolimérico 23 °C



Fonte: Autor, 2017.

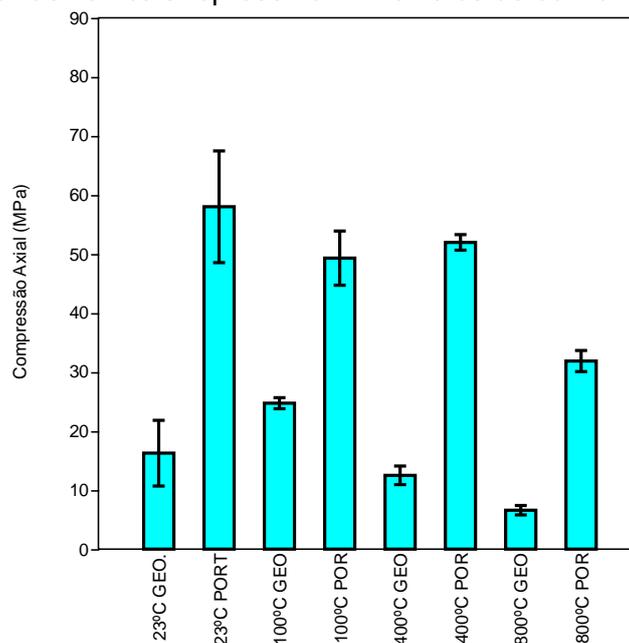
3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

Para o presente ensaio foi possível verificar os valores obtidos de resistência a compressão axial a temperatura ambiente e após o aquecimento dos mesmos aos patamares de temperatura de 100 °C, 400 °C e 800°C, podendo assim verificar qual o percentual de redução de cada um. Para verificar se os valores de resistência a compressão são diferentes entre cada 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 $pvalue \leq 0,05$. A Figura 10 apresenta os resultados obtidos na ANOVA para resistência à compressão, onde observa-se que os traços de concretos obtiveram diferentes resistências com $pvalue=0,00$.

Figura 10 – Resultados da resistência a compressão axial

Current effect: $F = 20,5$, $p = 7,22E-07$
As barras verticais representam intervalos de confiança de 0,95



Fonte: Autor, 2017.

Fazendo uma comparação das resistências em temperaturas distintas para os dois concretos estudados (geopolimérico e com cimento Portland) pode-se verificar que com o aumento da temperatura modificou-se a resistência a compressão axial. Para a faixa de temperatura de 23 °C a 100 °C houve um aumento de 52% e uma redução de 15% na sua resistência em relação aos 23 °C para os concretos geopolimérico e com cimento Portland respectivamente. Para a temperatura 400 °C observou-se uma redução de 23,17% e uma redução de 10,40% na sua resistência em relação aos 23 °C para os concretos geopolimérico e com cimento Portland respectivamente. Para a temperatura de 800 °C ocorreu uma redução de 59,43% e uma redução de 45,06% na sua resistência em relação aos 23 °C para os concretos geopolimérico e com cimento Portland respectivamente. Para o concreto com cimento Portland a redução da resistência com o aumento da temperatura pode estar relacionada com a perda de água de ligação, com o aumento da porosidade e,

portanto, com o aumento da permeabilidade, tornando o concreto cada vez mais susceptível à destruição (CASTRO, PANDOLFELLI, 2011). Conforme Castro Pandolfelli (2011) para ambos os concretos a medida que a temperatura aumenta, a resistência a compressão diminui e a deformação de pico aumenta, ou seja o concreto enfraquece. Analisando os resultados foi possível verificar os seguintes resultados, observou-se que os corpos de prova com cimento geopolimérico a temperatura de 100°C possuem maior resistência a compressão axial em relação as temperaturas de 23 °C, 400 °C e 800 °C, sendo 24,73 MPa. Foi possível identificar que os corpos de prova de concreto geopoliméricos estavam úmidos e ao aquecer a 100 °C foi possível verificar que a cura foi completada, pois a resistência de 24,73 MPa maior que a resistência aos 23 °C, indica que ocorreu perda de água do corpo de prova completando o processo de cura. Para os corpos de prova com concreto com cimento Portland com temperatura de 23°C possui maior resistência a compressão em relação temperaturas de 100 °C, 400 °C e 800 °C, sendo 58,0 MPa. Alguns fatores podem afetar a resistência mecânica dos materiais geopoliméricos, sendo eles: a distribuição do tamanho das partículas, a proporção de dissolução da fase gel, a natureza amorfa da matéria-prima sólida, o grau de cristalinidade, o teor percentual de cálcio na matéria-prima, a relação de dissolução entre Si/Al, a concentração do ativador, entre outros. (SANTA, 2012). A baixa resistência a compressão do concreto geopolimérico pode estar relacionada a cura, pois ao ensaiar os corpos de prova mesmo variando a temperatura até 400 °C, pode-se observar que os corpos de prova estavam úmidos no interior não ocorrendo a geopolymerização dos corpos de prova. Ao ensaiar as amostras a 800 °C verificou-se que o interior não estava úmido, porém aparentava estar totalmente degradada ocasionando em perda de massa elevada justificando a baixa resistência. Complementarmente a ANOVA realizou-se o teste de Tukey e foi observado que para os resultados do geopolimérico são estatisticamente iguais para todas as temperaturas e para o concreto com cimento Portland comparando as temperaturas 23 °C, 100 °C e 400 °C com a 800 °C obteve diferença significativa aos 800 °C nos seus resultados.

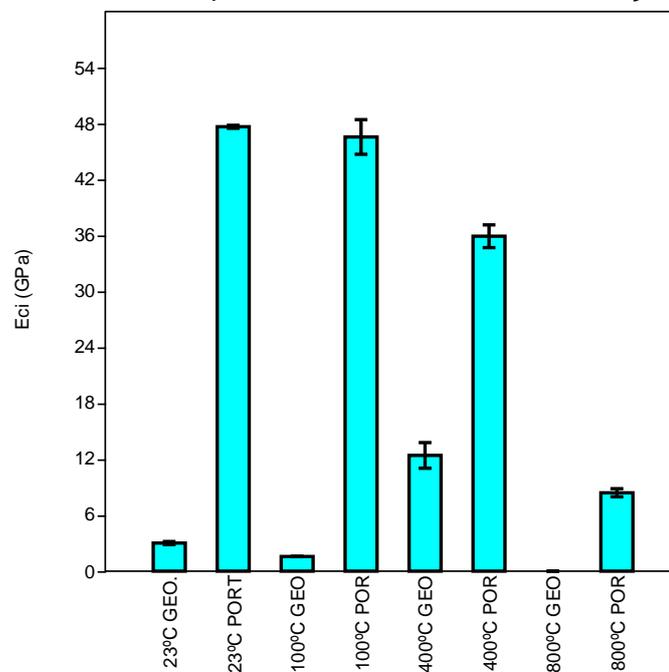
3.5 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo Neville (1997), constantemente o comportamento da estrutura depende do módulo de elasticidade do concreto, sendo por sua vez vigorosamente influenciado

pela temperatura. Pode-se observar na Figura 11 os resultados obtidos do módulo de elasticidade dos corpos de prova com cimento Portland e com geopolimérico após o aquecimento dos mesmos sob os patamares de 100 °C, 400 °C e 800 °C. Para verificar se os valores do módulo de elasticidade são diferentes entre cada 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 $pvalue \leq 0,05$. Os resultados obtidos na ANOVA para o módulo de elasticidade para os dois traços de concretos obtiveram diferentes resultados com $pvalue=0,00$.

Figura 11 – Resultado do Módulo de Elasticidade

Current effect: F= 398,3, p= 6,72E-13
As barras verticais representam intervalos de confiança de 0,95

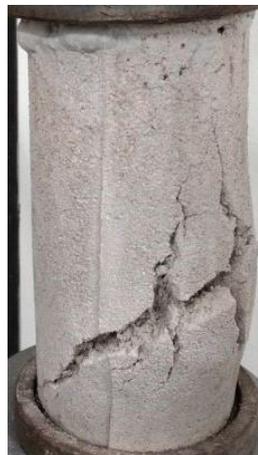


Fonte: Autor, 2017.

Igualmente como no ensaio de compressão axial, também houve uma redução no módulo de elasticidade conforme a temperatura aumentava. Na faixa de temperatura entre 23 °C e 100 °C, observou-se uma redução de 52,22% e uma redução de 2,29% na sua resistência em relação aos 23 °C para o concreto geopolimérico e para o concreto com cimento Portland respectivamente. Para a temperatura de 400 °C ocorreu um aumento de 311,26% e uma redução de 24,62% na sua resistência em relação aos 23 °C para os concretos geopolimérico e concreto com cimento Portland respectivamente. Na temperatura de 800 °C, os corpos de prova de concreto

geopolimérico ao serem retirados da mufla foi verificado que os mesmos haviam inflado, como pode-se observar na Figura 12, não podendo ser feito o ensaio de módulo de elasticidade, pois sua superfície não se encontrava regular para que o extensômetro conseguisse medir corretamente as informações para o ensaio ser feito corretamente. Para o concreto com cimento Portland a 800 °C de temperatura ocorreu uma redução de 82,34% para o módulo de elasticidade. De acordo com Kelly e Yao (2014), em suas pesquisas também obtiveram um aumento na resistência do concreto geopolimérico aos 400 °C e também conforme Kelly e Yao (2014), esse aumento da resistência é caracterizado pela geopolimerização que os corpos de prova sofrem quando expostos à altas temperaturas. Analisando os resultados pode-se verificar que para o concreto geopolimérico a 400 °C de temperatura observou-se a melhor resistência em relação as temperaturas de 23,100 e 800 °C, sendo 12,42 GPa. Para o concreto com cimento Portland a temperatura de 23 °C observou-se a melhor resistência em relação as temperaturas de 100, 400 e 800 °C, sendo 47,65 GPa.

Figura 12 – Corpo de prova com concreto geopolimérico a 800 °C



Fonte: Autor, 2017.

Complementarmente a ANOVA foi realizado o teste de Tukey e foi possível observar estatisticamente que entre as temperaturas de 23 °C e 100 °C para o geopolimérico não houve diferenças significativas, porém a 400 °C ocorre diferença significativa nos resultados obtidos para o concreto geopolimérico. Para o concreto com cimento Portland estatisticamente também não houve diferença significativa para as

temperaturas de 23 °C e 100 °C, porém a 400 °C ocorreu diferença significativa nos resultados obtidos.

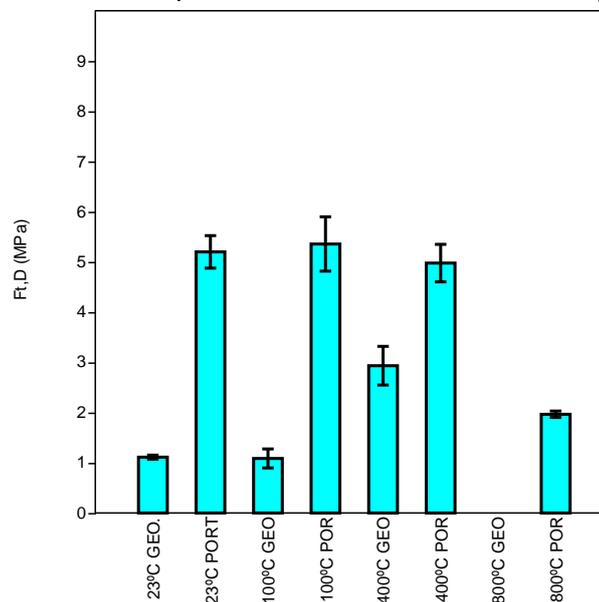
3.6 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Com os ensaios foi possível obter os resultados da resistência à tração por compressão diametral após submeter os corpos de prova a temperaturas de 23 °C, 100 °C, 400 °C e 800 °C. Para verificar se os valores da tração por compressão diametral são diferentes entre cada 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 $pvalue \leq 0,05$. A Figura 13 apresenta os resultados obtidos na ANOVA para a tração por compressão diametral, onde observa-se que os traços de concretos obtiveram diferentes resistências com $pvalue = 0,00$.

Figura 13 – Resultado da tração por compressão diametral

Current effect: $F = 33,85$, $p = 1,13E-06$

As barras verticais representam intervalos de confiança de 0,95



Fonte: Autor, 2017.

Ao analisar a Figura 13 é possível verificar a redução na resistência à tração por compressão diametral, assim como ocorreu na compressão axial. Para a faixa de temperatura de 23 °C a 100 °C houve uma redução de 1,80% e um aumento de 3,07% na sua resistência em relação a temperatura de 23 °C para os concreto geopolimérico

e concreto com cimento Portland respectivamente. Para a temperatura de 400 °C ocorreu um aumento de 168,81% e uma redução de 7,09% na sua resistência em relação aos 23 °C para os concretos geopolimérico e concreto com cimento Portland respectivamente. Para a temperatura de 800 °C para o concreto geopolimérico, assim como no ensaio de módulo de elasticidade, não foi possível realizar o ensaio de tração por compressão diametral, pois os corpos de prova inflaram deixando sua superfície irregular e com fissuras, não podendo ensaiar devido aos resultados que não seriam satisfatórios. Para o concreto com cimento Portland com temperatura de 800 °C ocorreu uma redução 62,12% na sua resistência em relação aos 23 °C. Analisando os resultados foi possível observar que para o concreto geopolimérico aos 400 °C obteve uma maior resistência a tração por compressão diametral de 2,93 MPa e para o concreto com cimento Portland aos 100 °C obteve uma maior resistência a tração por compressão diametral de 5,36 MPa. De acordo com Castro Pandolfelli (2011) o comportamento de concretos expostos às altas temperaturas é bastante distinto da perda gradual normalmente observada para a resistência à compressão. Isto acontece porque uma elevada quantidade de micro e macro-fissuras são produzidas nas amostras em função das incompatibilidades térmicas existentes no interior do concreto. A baixa a tração por compressão diametral do concreto geopolimérico pode estar relacionada a cura, pois ao ensaiar os corpos de prova de 23 °C, 100 °C e 400°C foi observado que os mesmos fissuraram lentamente sem explosões e posteriormente verificado que os corpos de prova estavam úmidos no seu interior. Complementarmente a ANOVA foi realizado o teste de Tukey e pode-se verificar que estatisticamente nas temperaturas 23 °C e 100 °C para o concreto geopolimérico não houve diferenças significativas, porém a 400 °C ocorreu diferença significativa nos resultados obtidos. Para o concreto com cimento Portland estatisticamente não ocorreu diferenças significativas entre as temperaturas de 23 °C, 100 °C e 400 °C.

4. CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa demonstram que os concretos submetidos a elevadas temperaturas perdem gradativamente sua resistência mecânica, com exceção do concreto geopolimérico que aos 100 °C obteve sua maior resistência a compressão axial.

Ocorre também um aumento no módulo de elasticidade e tração por compressão diametral do concreto geopolimérico submetido a temperatura de 400 °C contextualizando com as referências estudadas.

A redução de massa dos corpos-de-prova devido a evaporação de água livre na superfície vai crescendo gradativamente conforme a temperatura vai aumentando, chegando até 7,64% e 6,28% de perda de massa para o concreto geopolimérico e concreto Portland respectivamente.

O ensaio de difração de raio-x (DRX) possibilita o conhecimento de dados importantes para uma melhor análise microestrutural das amostras do caulim, metacaulim e concreto geopolimérico, pois possibilita a identificação de alguns compostos químicos como, quartzo. O DRX também indica dos picos gerados pelos raios mostrando se o material contém um halo amorfo como no caso do metacaulim e se o material é cristalino como verificado no caulim e no concreto geopolimérico.

O ensaio de Termogravimetria (TGA) e Termo-Diferencial (DTA) permite identificar a perda de massa e a mudança de estado físico com o incremento de temperatura até 800 °C. Para o metacaulim possibilitou ter conhecimento que a sua umidade era baixa mostrando ser um material excelente e para o concreto geopolimérico mostrou que até 100 °C a perda de massa foi desprezível e de 100 °C a 800 °C a perda de massa foi de 4,35%. Com o TGA/DTA pode-se confirmar a que a temperatura ideal para a calcinação era até 950 °C, aproximadamente, pois é nesse intervalo de temperatura que o material mudou de fase de sólido para líquido.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Como foi estudado o concreto geopolimérico sem aditivos, indica-se fazer um estudo na área com concreto geopolimérico com adição de óxido de alumina como reagente na composição do geopolímero;
- Testar a aderência do concreto geopolimérico com aço e ensaiar o geopolímero em esforço de flexão;
- Realizar estudo do concreto geopolimérico submetidos as temperaturas de 200 °C, 600 °C e 1000 °C, pois com as temperaturas estudadas neste trabalho obtiveram quase uma reta, pode-se verificar com essas novas temperaturas onde que é o maior pico de resistência do concreto geopolimérico;

- Estudar a possibilidade de adicionar fibra de polipropileno como aditivo reagente na composição do geopolímero;
- Substituição do metacaulim por cinza de olaria, pois ambos estão propícios a ativação alcalina.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

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

_____. **NBR 8522: Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformações e da curva tensão-deformação**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9939: Agregado graúdo: Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

CASTRO, A. L. de; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas: revisão = Polypropylene fibers and their influence on the behavior of concretes exposed to high temperatures: review . **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341 , p.22-31, mar. 2011.

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

DAVIDOVITS, Joseph. Global warming impact on the cement and aggregates industries. **World Resource Review**, Saint-quentin, v. 6, n. 2, p.263-278, 1994.

SILVA, Daiane dos Santos da. **Propriedades Mecânicas Residuais Após Incêndio de Concreto Usados na Construção Civil na Grande Florianópolis**. 2009, 102p. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Univ. Fed. De santa Catarina, Florianópolis.

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.

NEMATOLLAHI, Behzad; SANJAYAN, Jay; SHAIKH, Faiz Uddin Ahmed. Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, vol 70 (2014), p. 54-64, abr./jun. 2014.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do Concreto**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997. p.391.

OSÓRIO, Paulo dias Lopes. **Concepção de um Saferrom Anti-Tornado em Betão Geopolimérico**. Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2006.

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.

PINTO, Amândio Teixeira. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Portugal: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2006, 92 p.

Polypropylene fibers and their influence on the behavior of concretes exposed to high temperatures: review. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, p.22-31, mar. 2011.

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

SANTANA DE MOURA, JAILES. **DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMERO A PARTIR DE CINZA DE OLARIA, REFRATÁRIO DOLOMÍTICO POST-MORTEM E METACAULIM**. MARABÁ: [s.n.], 2014, 57 p.

SARKER, Prabir Kumar; KELLY, Sean; YAO, Zhitong. Effect of Fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. **Materials and Design**, p. 584-592, 2014.

TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, Said. Ligantes geopolimérico: uma alternativa ao cimento Portland. **Revista Ingenium**, v. 114, p. 66-68, nov. 2009.