

ESTUDO DO EFEITO DA TEMPERATURA EM CONCRETO ÁLCALI- ATIVADO À BASE DE METACAULIM COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO

Filipe Cancellier da Costa (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) filipecancelliercosta@gmail.com, (2) dss@unesc.net

RESUMO

Tendo em vista o crescente estudo de materiais inovadores para reduzir os impactos causados pela construção civil ao meio ambiente e melhor atender suas diretrizes de projeto, este trabalho visou avaliar o uso de concreto produzido a base de cimento geopolimérico com adição de 10% de óxido de alumínio elevado a altas temperaturas gerando um comparativo direto com um concreto referência com 0% de adição de óxido de alumínio. Foram realizados, após o aquecimento, ensaios de compressão axial, perda de massa, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral, em corpos de prova cilíndricos de dimensão $\varnothing 10 \times 20$ cm, afim de avaliar sua resistência mecânica quando elevados a diferentes níveis de temperatura. O material também foi submetido ao ensaio de difração de Raios X e termogravimetria para entender os efeitos das variações térmicas na sua microestrutura. A adição de alumina não obteve grandes diferenças do concreto referência quando analisado a resistência mecânica do corpo. A adição de alumina no concreto geopolimérico ajudou a manter o corpo mais uniforme, o que pode ter influenciado a obtenção de um valor de 24,22 % superior ao módulo de elasticidade do concreto referência a temperatura de 400°C. Os resultados microestruturas mostraram que reações intermoleculares ainda estavam ocorrendo nas amostras o que pode ter influenciado variações obtidas nos ensaios. Também o ensaio de DRX evidenciou que o composto adquiriu grande cristalinidade quando foi elevado a altas temperaturas.

Palavras-chave: Concreto Geopolimérico, Aumento de temperatura, Óxido de alumínio.

1. INTRODUÇÃO

O concreto para construção civil é um material extremamente importante, pois é utilizado em vários elementos estruturais projetados. Existem inúmeros tipos de concreto com variados níveis de resistência, dentre esses tipos, existe o concreto álcali ativado. O termo álcali ativado também pode ser conhecido como geopolímero, criado pelo pesquisador Francês Joseph Davidovits em 1979.

Os materiais geopoliméricos possuem vasto potencial de uso na construção civil, substituindo o cimento Portland tradicional, além disso são mais sustentáveis, devido ao uso de insumos de resíduos. Os geopolímeros podem ser utilizados em várias áreas conforme Davidovits (2013, p. 01) alega:

O cimento geopolimérico é um material inovador e uma alternativa real ao Cimento Portland para uso em infraestrutura de transporte, construção civil e aplicações marítimas. Baseia-se em materiais naturais minimamente processados ou subprodutos para reduzir significativamente a sua emissão de carbono, sendo também resistente para problemas de durabilidade que podem flagelar concretos convencionais.

O aumento no desenvolvimento de novos produtos cria uma ampla parcela de resíduos que são gerados ao final dos processos de fabricação, materiais estes que devem ser eliminados corretamente ou reutilizados. A maioria desses materiais pode ser reutilizada para a fabricação de geopolímeros conforme Kuhnen (*et al.* 2011, p. 01) revelam:

Os geopolímeros apresentam propriedades cimentícias com bom potencial para uso na construção civil. Podem ser formados utilizando matérias-primas naturais ou resíduos industriais de várias fontes, desde que os resíduos sejam ricos em alumínio silicatos amorfos ou semicristalinos ou tenham passado por tratamento térmico, tornando-os reativos e adequados à ativação alcalina.

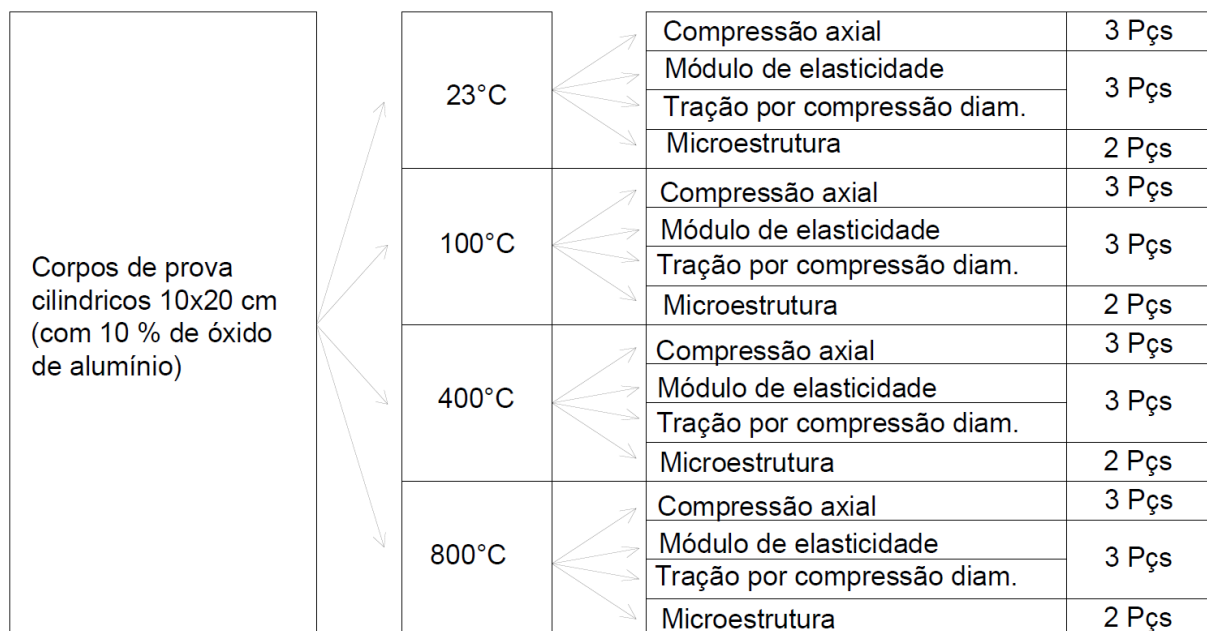
A resistência a altas temperaturas do concreto geopolimérico vem sendo estudada por diferentes autores, e o acordo geral entre eles é que os geopolímeros apresentam melhor resistência ao calor quando comparado ao cimento Portland. Estudos anteriores de Davidovits (*et al* 1991 apud PROVIS, J; DEVENTER, J.2009, p.183) mostram que “geopolímeros tem uma grande resistência a altas temperaturas quando preparados com silicato de sódio, silicato de potássio e metacaulim...”. O material estudado por este trabalho é o concreto geopolimérico a base de metacaulim com adição de óxido de alumínio. O presente estudo visa avaliar o comportamento de corpos de prova de concreto álcali ativado e compará-los com corpos de prova moldados com a adição de 10 % óxido de alumínio, após os mesmos serem expostos individualmente a diferentes níveis de temperaturas, simulando assim uma real situação de incêndio. O objetivo geral é determinar a influência da temperatura nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto geopolimérico quando submetido a altas temperaturas. Para atingir este objetivo foram moldados corpos de prova em concreto geopolimérico com adição de

10% de óxido de alumínio (CPG), ou alumina como também é conhecido. Utilizando também dados de concreto referência sem adição de alumina (CPP) para gerar um comparativo. Os corpos de prova (CPs) foram submetidos ao processo de cura com prazo de 66 dias, eles foram aquecidos a diferentes níveis de temperatura (100°C, 400°C, 800°C), para posteriormente iniciar os ensaios mecânicos e microestruturais. Foram testados os CPs, a fim de analisar sua resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, tração por compressão diametral, perda de massa, termogravimetria (TGA) e difração de raios x (DRX). Com o término dos ensaios foi realizado uma análise estatística entre os resultados obtidos entre os concretos álcali ativados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do procedimento experimental foram definidos os quantitativos de CPs para a elaboração de cada ensaio como pode ser verificado na Figura 01 que ilustra o resumo experimental. O ensaio de tração por compressão diametral utilizou os corpos de prova ensaiados para módulo de elasticidade, isso foi possível porque o ensaio de módulo não é destrutivo.

Figura 01 – Fluxograma dos ensaios.



Fonte: Autor, 2017.

2.1 Materiais

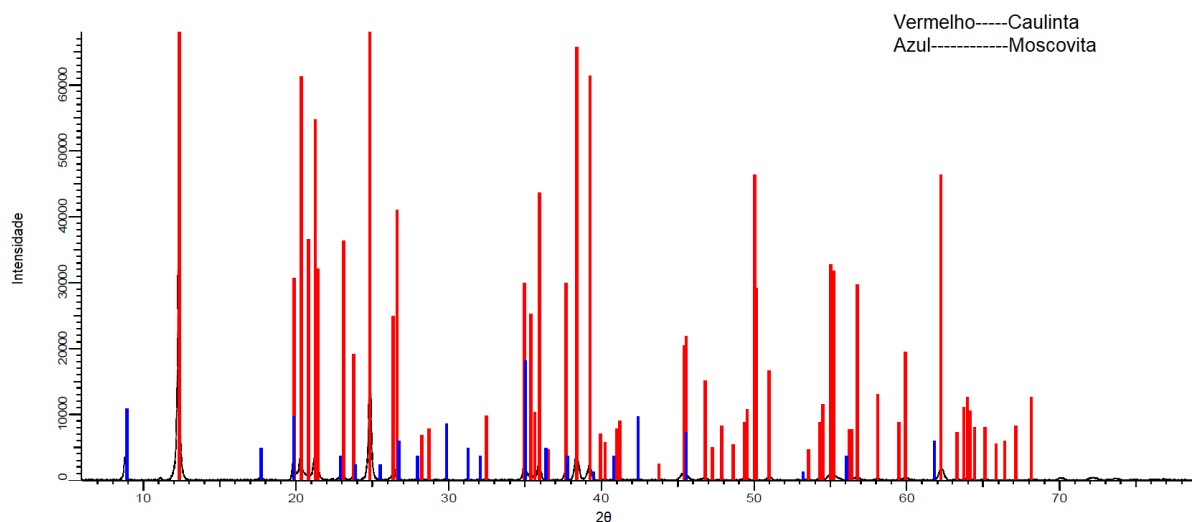
O caulim obtido para o desenvolvimento desse trabalho foi submetido ao ensaio de DRX para avaliar sua composição anteriormente aos ensaios. Os dados obtidos no ensaio estão dispostos na Tabela 01 e Figura 02.

Tabela 01 – Análise química caulim.

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: Autor, 2017.

Figura 02 – Análise DRX caulim.

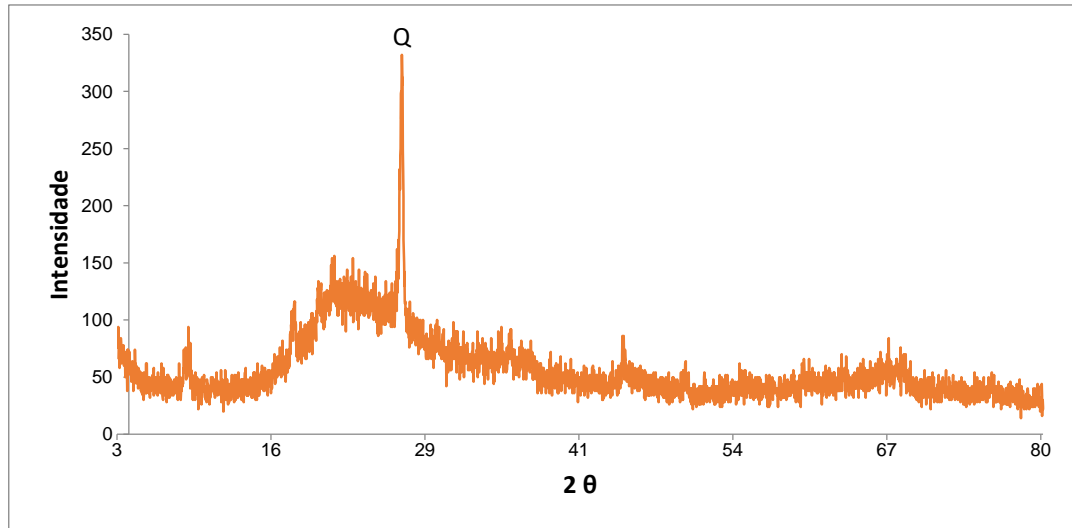


Fonte: Autor, 2017.

O caulim fornecido, para poder ser utilizado na mistura do concreto precisou passar pelo processo de calcinação para se transformar em metacaulim (MK). Para o processo de calcinação foi utilizada uma mufla com capacidade calorífica de 1350°C. Todo o material foi colocado no interior da mufla em recipientes circulares com camada de caulim de aproximadamente 8,5 cm de espessura. Quando atingido o patamar de 900°C, foi estabilizada a temperatura por 1 hora para então iniciar o resfriamento do material. Foi efetuada uma análise DRX sobre o metacaulim onde

pode-se determinar suas fases cristalinas. O ensaio foi realizado em um difratômetro de raio-x da marca SHIMADZU modelo XRD-6000. A Figura 03 ilustra o resultado obtido.

Figura 03 – Análise DRX metacaulim.



Fonte: Autor, 2017.

O pico de maior intensidade próximo ao 2θ de 29 mostra uma elevada quantidade de quartzo na amostra, mas em relação aos outros picos o material se mantém amorfo. O hidróxido de sódio em escamas (NaOH), habitualmente chamado de soda caustica, e o silicato de sódio (Na_2SiO_3) com 63 % de H_2O tiveram a função de ativadores alcalinos na mistura. A tabela 02 demonstra a relação molar do concreto álcali ativado.

Tabela 02 – Relação molar do geopolímero.

Composição	
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,2
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,46
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,14
$\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$	1,6
$\text{H}_2\text{O}/\text{MK}$ (g/g)	0,75

Fonte: PELISSER *et al*, 2013.

Para a utilização de agregados foi utilizada areia média como agregado miúdo, com dimensão máxima de 2,4 mm e brita 0 como agregado graúdo com dimensão máxima de 9,5 mm. O óxido de alumínio utilizado como adição a mistura neste trabalho, possui um grau de pureza de 94 %.

2.2 Métodos

Os traços para efetuar as misturas dos compostos geopoliméricos de referência e com 10% de alumina são mostrados nas Tabelas 3 e 4 respectivamente.

Tabela 3: Traço Geopolímero 0%.

Materiais	Traço
Metacaulim	1
Silicato	1,2
Agregado Miúdo	3,8
Agregado Graúdo	1,2
Hidróxido	0,0899
Alumina	0

Fonte: KELLER, T.A, 2015.

Tabela 4: Traço Geopolímero 10%.

Materiais	Traço
Metacaulim	1
Silicato	1,2
Agregado Miúdo	3,8
Agregado Graúdo	1,2
Hidróxido	0,0899
Alumina	0,1

Fonte: Autor, 2017.

Foi utilizado para fazer a mistura um misturador mecânico pequeno. Ao iniciar a mistura da argamassa foi adicionado o hidróxido de sódio dissolvido em silicato de sódio, então foi adicionado o metacaulim logo em seguida juntamente com o óxido de alumínio. Ao observar que a massa estava homogênea era então adicionado o agregado miúdo. Foi adicionado em poucas quantidades para melhor mistura do material. Após estar com a massa homogênea novamente foi adicionado o agregado graúdo. O concreto estava finalizado quando a argamassa conseguia envolver completamente o pedrisco. O tempo total do processo levou em média 7 minutos por mistura, e para cada mistura efetuada eram possíveis moldar 5 corpos de prova, isso devido as limitações do equipamento de mistura. O concreto então foi colocado de forma manual nas formas, previamente limpas e untadas com desmoldante. Todos os 32 CPs foram então colocados na estufa por um período de 48 horas a temperatura de 60°C, para receber uma pré-cura. Após retirados da estufa os CPs foram desmoldados e ficaram expostos ao ambiente do laboratório durante 64 dias. Os corpos de prova em concreto geopolimérico com 66 dias de idade foram submetidos a diferentes níveis de temperatura, conforme Figura 1, aquecidos em mufla modelo CT_095 da marca Servitech com dimensões internas de 480x530x530mm aplicando uma taxa de aquecimento de 3°C/min, conforme Rilem TC129 MHT (2000 apud SILVA, 2009) recomenda que a taxa de aquecimento para concreto material seja de 3 °C/min. Foram atingidas as temperaturas de: 100°C,

400°C e 800°C. Para cada taxa de aquecimento foram utilizados 8 CPs. Para cada aquecimento foi apenas atingido a temperatura de ensaio e desligado a mufla para que resfriasse normalmente.

2.2.1 Compressão axial

A Resistência de Compressão Axial dos CPs foi obtida conforme orientação contida na norma ABNT NBR 5739 (2007), onde foi aplicado um carregamento axial, ao corpo de prova, com velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s constante até o seu rompimento. Para isso foi utilizada uma prensa da marca EMIC modelo PCS200I com capacidade máxima de carga de 2000 KN que utiliza o software TESC - Test Scriptonde. Para cada ensaio foram rompidos a quantidade de 3 CPs para cada temperatura de exposição.

2.2.2. Módulo de Elasticidade

A obtenção do Módulo de Elasticidade foi efetuada conforme descrito na norma ABNT NBR 8522 (2008), utilizando a metodologia A, onde foram realizadas leituras de deformação na tensão equivalente a 0,5 MPa e na tensão limite superior de 30 % do valor obtido das mesmas. Foi utilizada uma prensa da marca EMIC modelo PCS200CS com o auxílio de um extensômetro eletrônico para verificar a deformação lenta que ocorreu, ele foi posicionado em uma linha de auxílio feita no entorno do corpo de prova, na medida de 5 cm das extremidades em direção ao centro do CP, e posteriormente foi preso com tiras elásticas.

2.2.3 Tração por Compressão Diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi efetuado de acordo com a norma ABNT NBR 7222 (2010). Foram produzidas hastes em madeira com dimensões de 20x1,5x0,3 cm para serem presas ao corpo do CP, ao longo de seu comprimento longitudinal, e impedir que o mesmo rotacione durante o ensaio. Foi então aplicada uma carga de forma manual inicialmente para manter o corpo de prova em posição para o ensaio, sem que o mesmo viesse a se mover. A carga foi aplicada com uma

velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ Mpa/s até que os corpos de prova viessem a romper ao longo do plano diametral.

2.2.4 Perda de Massa

Para avaliar a perda de massa dos CPs durante o seu aquecimento, foi retirada a massa antes do aquecimento e 24 horas após o aquecimento. Para quantificar a variação de massa foi efetuado o cálculo disposto na Equação 1:

Equação 1:

$$pm = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) \times 100$$

Onde:

pm= perda de massa do corpo de prova, em %.

m1= massa obtida antes do aquecimento, em Kg

m2= massa obtida após o aquecimento, em Kg

2.2.5 Difração de Raios-x (DRX)

Dentre vários processos para caracterização de materiais a Difração de Raios X é a mais indicada para a determinação das fases cristalinas dos materiais cerâmicos. Isto se dá pois, os átomos da maioria dos sólidos se ordenam em planos cristalinos e a separação entre eles é da mesma ordem dos comprimentos ondas dos raios x. Foram incididos feixes de raios X sobre as amostras para gerar a difração necessária para o ensaio. A Difração de Raios X ocorre segundo a lei de Bragg (Equação 2), a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram.

Equação 2:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Onde:

n: número inteiro

λ : comprimento de onda dos raios X incidentes

d: distância interplanar

θ : ângulo de difração

2.2.6 Termogravimetria (TGA)

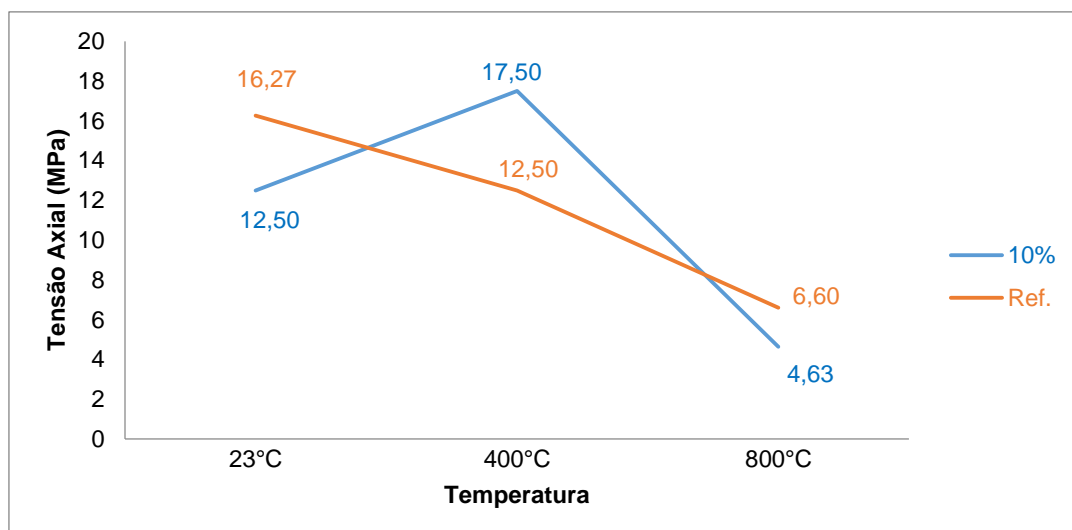
O ensaio TGA gera uma análise destrutiva do material, o qual deve ser moído e passar através da peneira com abertura de 0,075 mm. O ensaio visa avaliar uma amostra ao sofrer variações térmicas ou quando deixado em ambiente com temperatura e ambientes controlados. Tem-se como principal foco analisar em temperaturas variadas, e perda ou agregação de massa do material analisado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resistência à Compressão Axial

Os resultados obtidos no ensaio de compressão estão dispostos na Figura 04, onde é possível analisar um ganho de 28,57 % de resistência à temperatura de 400°C com o concreto com adição de 10 % de alumina em relação ao concreto referência.

Figura 04: Resultado do ensaio de compressão axial.



Fonte: Autor, 2017.

Pode-se observar que o composto com alumina possui uma menor resistência em relação ao referência a 23°C, de 23,17 %. O aumento de 28,57 % de resistência do composto com 10 % de adição de óxido de alumínio em relação ao referência á 400°C pode ser explicado pelo fato da característica refratária da alumina e da temperatura ter acelerado as reações de geopolimerização resultando em um ganho considerável de resistência que vai de encontro com o que foi previamente observado por (Pan *et al.* 2010), onde as resistências observadas nos CPs aquecidos de geopolímero aumentaram quando a temperatura elevou de 290 para 520°C, atingindo a maior resistência a 520°C, onde foi tido quase o dobro da sua resistência inicial à temperatura ambiente. A queda da resistência em temperaturas além de 400°C pode ter influencia do fato da grande evaporação de água do CP gerando assim tensões internas e criando fissuras e estufando o corpo de prova o deformando-o, conforme (Provis *et al.* 2009) relata que a liberação de moléculas de água da estrutura do geopolímero da lugar a formação de defeitos estruturais como porosidade e rachaduras. Devido a isso os CPs ficaram aparentemente sem água em seu corpo e sua resistência decaiu 73,54 % a 800°C. Notou-se que os CPs com concreto referência sofreram maior deformação do corpo do que os com 10 % de alumina, o que indica que o óxido de alumínio deixa o composto mais resistente ao calor e deformações impostas por ele. Foi gerado uma análise estatística de variância (ANOVA), dos compostos com um nível de confiança de 95% ou seja $p > 0,05$. O teste indicou que existem variações significativas quando comparados os dois compostos, pois gerou um resultado de $p = 0,0387$, o que indica que ao menos uma amostra entre as analisadas é diferente estatisticamente. Para auxiliar a ANOVA foi feito o teste de Tukey (Tabela 05).

Tabela 05: Teste de Tukey – Compressão Axial.

	Geo. 10% alumina			Geo. Referência		
	23°C	400°C	800°C	23°C	400°C	800°C
23°C	0,00	5,00	7,87	3,77	0,00	5,90
400°C		0,00	12,87	1,23	5,00	10,90
800°C			0,00	11,63	7,87	1,97
23°C				0,00	3,77	9,67
400°C					0,00	5,90
800°C						0,00

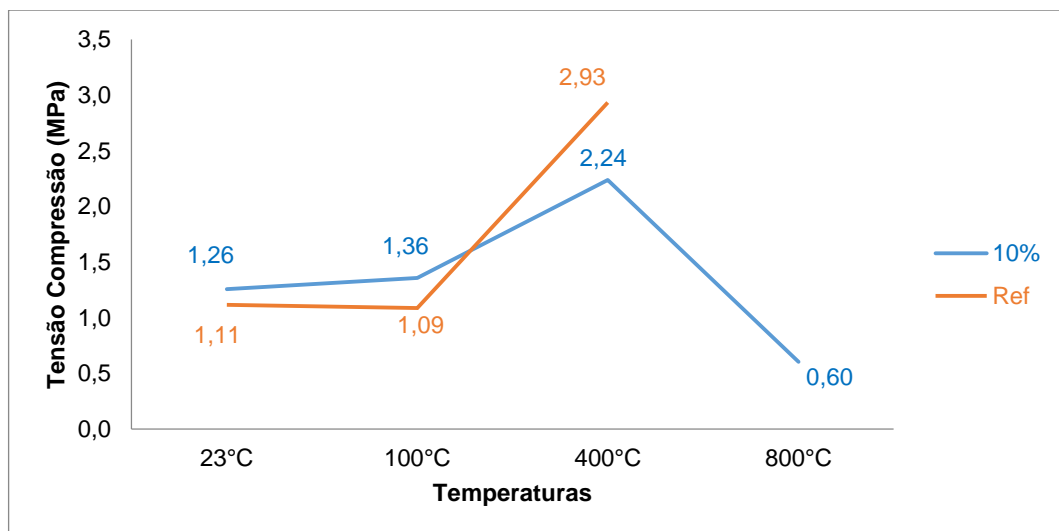
Fonte: Autor, 2017.

Este teste evidencia quais valores obtidos são diferentes entre as amostras. Pela análise da Tabela 05 os valores de 400°C e 800°C entre o composto com adição de alumina se mostraram diferentes. Os valores de 800°C do composto CPG são diferentes dos valores de 23°C do concreto referência.

3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Figura 05 ilustra os resultados obtidos no ensaio de Tração por Compressão Diametral.

Figura 05: Resultado do ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: Autor, 2017.

Em relação ao concreto referência, não foi possível obter os resultados deste ensaio a temperatura de 800°C, pois o mesmo teve sua forma geométrica muito afetada, se tornando inviável fazer o teste.

A resistência à tração do CP com adição de alumina em temperatura ambiente se mostra 11,90 % superior que o concreto sem adição de alumina, este resultado também é observado à temperatura de 100°C onde é 19,85 % superior. Quando elevados à temperatura de 400°C os dois compostos se mostraram mais resistentes do que nas temperaturas inferiores. O concreto com adição de alumina teve 39,29 % de ganho de resistência enquanto o concreto referência teve 62,80 % de ganho de resistência. Ao que se percebe a temperatura elevada acelerou as ligações intermoleculares das amostras intensivando sua rigidez estrutural (Duxson *et al.*, 2006). Ainda da temperatura de 400°C é evidente que o concreto com 10 % de

alumina possui resistência de 23,55 % inferior ao referência. Isso mostra que a alumina não gerou efeitos significativos contra forças de tração. Quando elevado a temperatura de 800°C o concreto com alumina sofreu perda de 73,21 % de resistência, o que pode ter ocorrido devido ao fato de os CPs estarem porosos, com microfissuras e deformados devido a alta temperatura de exposição (Saavedra et al. 2017). Foi gerado uma análise estatística de variância (ANOVA), do composto com adição de alumina em relação ao referência com um nível de confiança de 95% ou seja $p > 0,05$. Os valores referentes à temperatura de 800°C não foram levados em consideração nesse teste, pois não havia dados do concreto referência. O teste ANOVA indicou que existem variações significativas quando comparados os dois compostos, pois gerou um resultado de $p = 0,0017$, o que indica que ao menos uma amostra entre as analisadas é diferente estatisticamente. Para auxiliar a ANOVA foi realizado o teste de Tukey para evidenciar quais valores obtidos são diferentes entre as amostras. Pela análise da Tabela 06, que mostra os resultados do teste, é possível analisar que os resultados em amarelo mostram que os valores obtidos por ambas as amostras à temperatura de 400°C são estatisticamente diferentes das demais temperaturas com exceção do concreto CPG que a temperatura de 400°C e 100°C são semelhantes, e os valores de 400°C entre as amostras com e sem adição de alumina também são iguais estatisticamente.

Tabela 06: Teste de Tukey – Tração por Compressão Diametral.

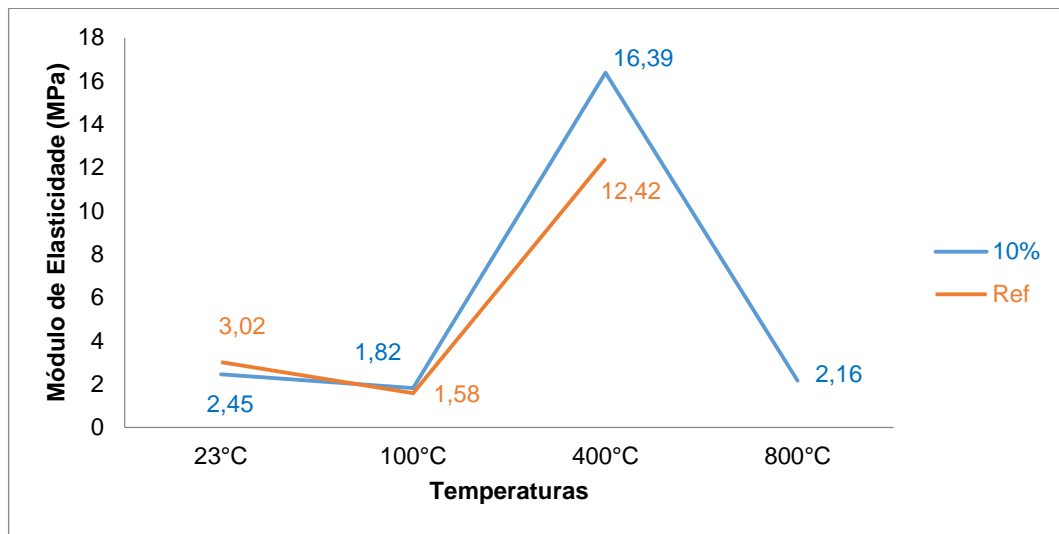
	Geo. 10% alumina			Geo. Referência		
	23°C	100°C	400°C	23°C	100°C	400°C
23°C	0,00	0,10	0,98	0,14	0,17	1,68
100°C		0,00	0,88	0,24	0,27	1,58
400°C			0,00	1,12	1,15	0,70
23°C				0,00	0,03	1,82
100°C					0,00	1,85
400°C						0,00

Fonte: Autor, 2017.

3.3 Módulo de Elasticidade

Na Figura 06 estão os resultados obtidos no ensaio de Módulo de Elasticidade. A temperatura de 800°C não há dados para o concreto referência, pois o mesmo teve sua forma muito alterada se tornando inviável fazer o ensaio.

Figura 06: Resultado do ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Autor, 2017.

A temperatura ambiente, o concreto com alumina possui um módulo de 18,87 % inferior ao concreto referência. A 100°C seu módulo de elasticidade se torna 13,19 % superior ao composto sem alumina, o que mostra que a alumina adicionada possivelmente ajudou a conservar mais as características do concreto mantendo-o mais estável (Ramli et al. 2015). A temperatura de 400°C foi o patamar que ambas as amostras tiveram seus maiores módulos, onde houve um ganho de 88,90 % do concreto com adição de óxido de alumínio e um ganho de 87,28 % do concreto referência. Ainda assim o concreto CPG se mostrou 24,22 % maior sob a temperatura de 400°C em relação ao composto de referência. O concreto com óxido de alumínio volta a reduzir seu módulo ao chegar a temperatura de 800°C ficando entre o valor atingido entre 23°C e 100°C, o composto perdeu 86,82 % em relação à temperatura de 400°C. Foi gerado uma análise estatística de variância (ANOVA), do composto com adição de alumina em relação ao referência com um nível de confiança de 95 % ou seja $p > 0,05$. Os valores referentes à temperatura de 800°C não foram levados em consideração nesse teste, pois não havia dados do concreto referência. O teste ANOVA indicou que existem variações significativas quando comparados os dois compostos, pois gerou um resultado de $p = 4,17 \times 10^{-7}$, o que indica que ao menos uma amostra entre as analisadas é diferente estatisticamente. Para auxiliar a ANOVA foi realizado o teste de Tukey para evidenciar quais valores

obtidos são diferentes entre as amostras. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 07.

Tabela 07: Teste de Tukey – Módulo de Elasticidade.

	Geo. 10% alumina			Geo. Referência		
	23°C	100°C	400°C	23°C	100°C	400°C
23°C	0,00	0,64	13,94	0,57	0,88	9,96
100°C		0,00	14,57	1,20	0,24	10,60
400°C			0,00	13,37	14,81	3,97
23°C				0,00	1,44	9,40
100°C					0,00	10,84
400°C						0,00

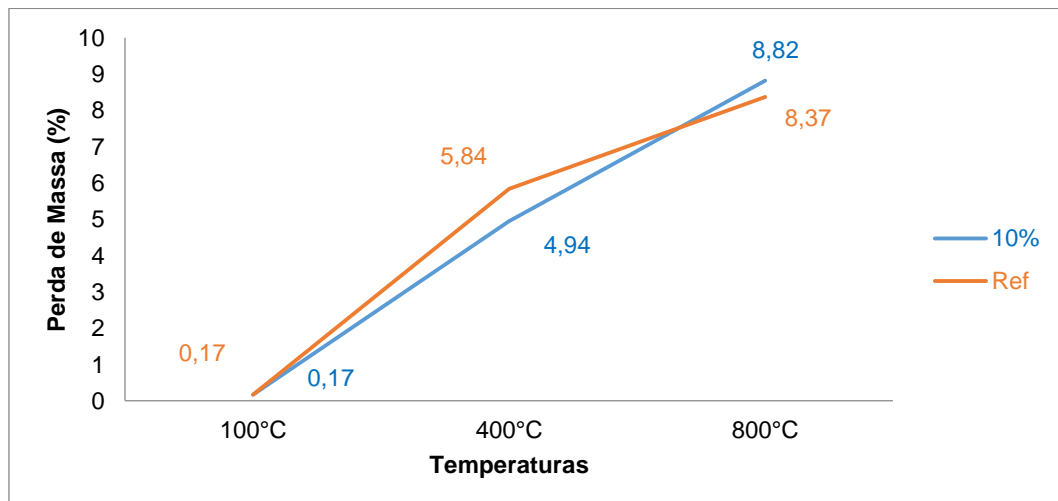
Fonte: Autor, 2017.

Pela análise da tabela 07 é possível verificar que os resultados em amarelo mostram que os valores obtidos por ambas as amostras à temperatura de 400°C são estatisticamente diferentes de todas as outras temperaturas, o que é explicado pela grande alteração de módulo ocorrida nessa temperatura.

3.4 Perda de Massa

Referente a perda de massa, as pesagens dos CPs mostraram uma leve diferença entre a amostra analisada com 10 % de alumina em relação ao concreto referência. Os resultados obtidos no ensaio estão dispostos na Figura 07.

Figura 07: Resultado do ensaio de perda de massa.



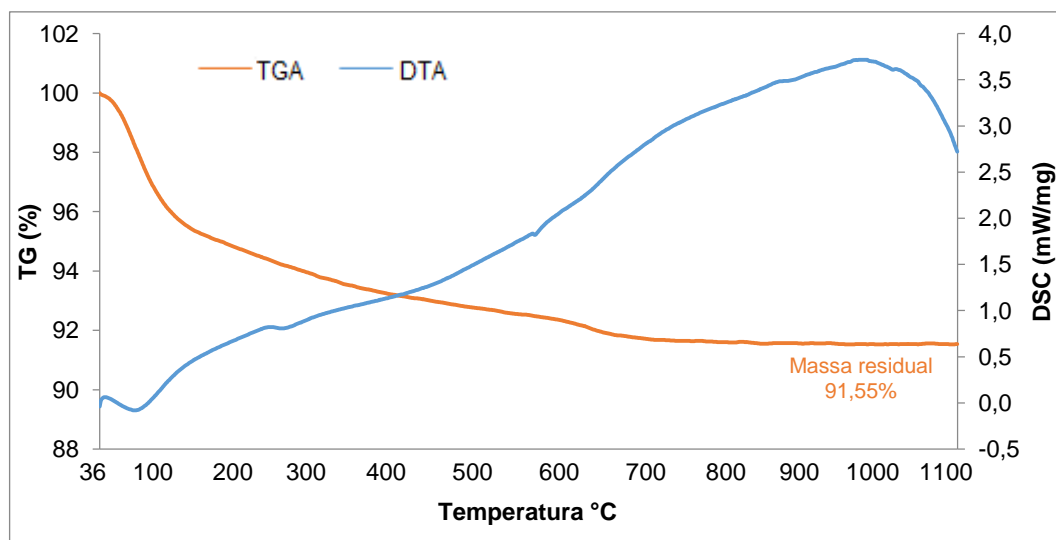
Fonte: Autor, 2017.

É possível notar que a temperatura de 100°C, os CPs com adição de óxido de alumínio não tiveram diferença na perda de massa em relação ao CPP, no entanto a temperatura de 400°C foi obtido um valor de 0,90 % a mais de perda no concreto referência quando comparado ao com adição de alumina. Referente a temperatura de 800°C o composto com alumina perdeu 0,45% a mais de massa em relação ao referência. Os resultados vão de acordo com o observado por (Mane *et al.* 2012) onde afirma que os geopolímeros geralmente sofrem pequenas expansões na temperatura de 100°C, mas começam a sofrer uma real deformação e perda de massa quando elevados além das temperaturas de 200°C e 300°C. O concreto com adição de alumina possui uma perda de massa mais uniforme em relação ao referência. Isso pode evidenciar o fato de que a alumina adicionada deixou os corpos de prova mais homogêneos.

3.5 DTA / TGA e DRX

Os resultados obtidos dos ensaios de DTA / TGA feitos sobre a amostra de 23°C de concreto com 10% de alumina estão disposto na Figura 08

Figura 08: Resultado dos ensaios de DTA / TGA.



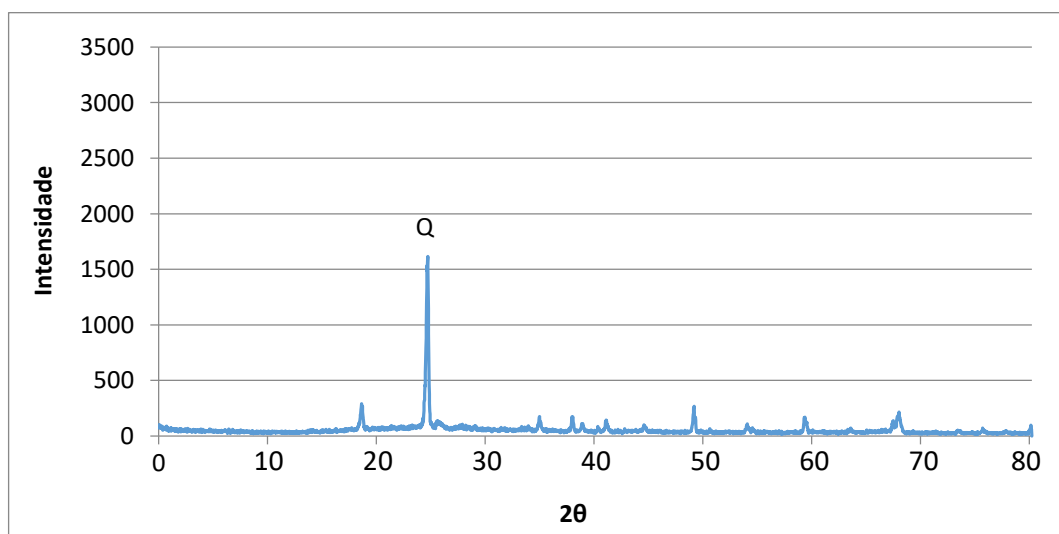
Fonte: Autor, 2017.

É possível perceber uma perda de massa de 4,5% inicialmente, no intervalo de temperatura de 36 até 100°C, seguido por um grande pico endotérmico (DTA), relativo a perda de água inicial adsorvida ao composto (Selmani, S. *et al* 2017). O

material sofre uma perda de massa menos acentuada de 3,5% no intervalo de temperaturas de 100°C à 800°C (Duxson *et al.*, 2006). A perda de massa tendeu a se estabilizar após o patamar de 700°C, tendo uma variação de perda de 0,45% de massa após essa temperatura, até o fim do ensaio. Sobre o eixo de DSC é mostrado que a amostra sofre uma elevação constante indicando uma reação exotérmica, o que pode ser atribuído a reações ocorridas com o metacaulim ainda não reagido. Ao final, a temperatura próxima de 1000°C, a amostra, sofre um grande pico exotérmico, indicando uma possível reorganização estrutural. Este pico também pode indicar a formação da mulita, também derivada da reação de metacaulim ainda não reagido (Duxson *et al.*, 2006). O resultado do ensaio indica principalmente que ainda existem reações químicas para ocorrer entre o metacaulim utilizado e os ativadores alcalinos. Isto pode ter causado a baixa resistência obtida do concreto geopolimérico, uma vez que ao que indica sua cura ainda não estava completa devido a reações que ainda deveriam ser estabelecidas.

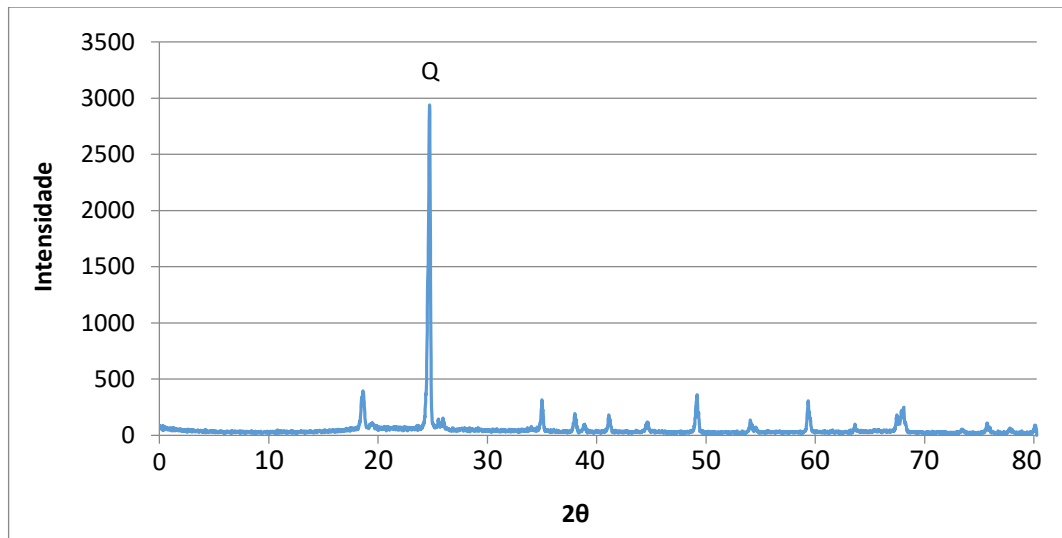
No ensaio de DRX foram ensaiadas duas amostras de diferentes temperaturas de concreto com 10 % de alumina. As figuras 9 e 10 ilustram os resultados obtidos. É possível verificar a existência de um grande pico de quartzo nas duas amostras que se dá no intervalo 2θ de 20 à 30. É possível notar que esse pico tem aumento de 81,93 % da temperatura de 23°C para 800°C, mostrando que quanto mais elevada à temperatura o material se torna mais cristalino.

Figura 09: Resultado do ensaio de DRX - 23°C.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 10: Resultado do ensaio de DRX - 800°C.



Fonte: Autor, 2017.

Devido à baixa interação das moléculas de aluminossilicatos e sílica, não ocorreu a síntese da matriz zeolita no composto que tem como características sua elevada resistência mecânica e a altas temperaturas (Rigo *et al.* 2009).

4 CONCLUSÕES

Diante dos ensaios realizados é possível concluir que a resistência à compressão em altas temperatura não sofre influencia significativa pela adição de alumina no corpo, apenas resistência superior quando exposto a temperatura de 400°C, o que se deve a característica refratária da alumina. Sobre sua resistência a tração de forma geral o óxido de alumínio não teve grande influencia para a resistência obtida se mostrando com valores inferiores ao concreto referência a altas temperaturas. A capacidade de deformação do corpo com adição de alumina é superior 24,22 % que o concreto referência á temperatura de 400°C, evidenciando que a alumina se mostrou capaz de conservar mais as características físicas do composto. Diante dos resultados da perda de massa do corpo é possível afirmar que o composto com adição de alumina e o referência sofreram diferenças mínimas com menos de 1 % de variação, o que indica que o óxido de alumínio não teve influencia na perda de massa. É importante salientar que a alumina conteve as deformações geradas pelas altas temperaturas no corpo de prova, em relação ao referência que devido a alta deformação inviabilizou alguns ensaios. A analise estatística de variância mostrou

que existem valores que se diferenciam dos outros, possivelmente pelo motivo de cada amostragem ser feita separadamente com geração de 5 CPs por mistura, o que gerou variações nos testes. Quanto a análise microestrutural da amostra, o teste de DTA / TGA verificou que ainda existiam reações químicas para ocorrer o que poderia gerar um aumento de resistência do composto, o que também pode evidenciar o fato do tempo de cura para composto geopolimérico não ter sido ideal. Os resultados dos ensaios de DRX mostraram que o grande pico de quartzo obtido primeiramente á 23°C continuou a elevar sua intensidade conforme a temperatura foi aumentando indicando uma estrutura cada vez mais cristalina com o acréscimo de temperatura.

4.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Utilização de metacaulim comercial e utilização de corpos de prova menores de Ø5x10cm, com utilização somente de argamassa para gerar uma análise de variações de porcentagem de adição de alumina em altas temperaturas.
- Estudo de ensaios, em vigas de concreto geopolimérico, voltados para análise de tração com armadura de aço.
- Estudo de aderência de aço ao concreto geopolimérico com diferentes tempos de cura.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio**. Rio de Janeiro 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação - Método de ensaio**. Rio de Janeiro 2003.

ALBERS, A. P. F. et al .**Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. *Cerâmica*, São Paulo.2002 , v. 48, n. 305, p. 34-37.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement. 4. ed.** França: Institut GÉOPOLYMÈRE, 2013. 11 p.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materials**, 1991. In: PROVIS, J; DEVENTER, **Geopolymers, Structure, processing, properties and industrial applications**. Estados Unidos: Ed. Woodhead, 2009. p. 454.

DUXSON, P. LUKEY, G.C. VAN DEVENTER. J.S.J. **Thermal evolution of metakaolin geopolymers: part 1 - physical evolution** . in Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 352 (2006), pp. 5541-5555

KUHNEN, et al. **Geopolymer synthesized from bottom coal ash and calcined paper sludge**. Florianópolis: ELSEVIER, 2013. 06 p.

KELLER, T.A. **Análise Experimental da Deformação Lenta do Concreto com Cimento Álcali Ativado**, Criciúma, Univ. do Extremo Sul Catarinense, 2015, 20p.

MANE, S. JADHAV, H.S. **Investigation of Geopolymer Mortar and Concrete Under High Temperature**, Uran Islampur, Rajarambapu Institute of Technology, 2012. 7p.

PELISSER F., E.L. GUERINO, M. MENGER, M.D. MICHEL, J.A. LABRINCHA, **Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers**, In Construction and Building Materials, Volume 49, 2013, Pages 547-553, <http://www.sciencedirect.com>

PAN, Z, SANJAYAN J. G. (2010), **Stress–strain behaviour and abrupt loss of stiffness of geopolymer at elevated temperatures**. Cement and Concrete Composites, V. 32, No. 9, pp.657–64.

PROVIS, J., VAN DEVENTER, J. (2009), **“Geopolymers: structure, processing properties and industrial applications”**. (Sawston, Cambridge UK: Woodhead Publishing Ltd)., p. 441.

RAMLI, M., Ken, W., Ban, C. **An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products**. 2015. V. 77, p370-395.

RIGO, R.T. PERGHER, S, B, C. PETKOWICZ, D, I. SANTOS, J, H, Z. **Um Novo Procedimento de Síntese da Zeólita a Empregando Argilas Naturais**. Rio Grande do Sul, UFRGS. 2009.

SAAVEDRA .W,G,V. GUTIÉRREZ, R,M. **Performance of geopolymer concrete composed of fly ash after exposure to elevated temperatures**. Cali, Universidad del Valle, 2017, p229-235.

SILVA, D,S. **Propriedades Mecânicas Residuais Após Incêndio de Concretos Usados na Construção Civil na Grande Florianópolis**. 2009. 102p. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

SELMANI, S. SDIRI, A. BOUAZIZ, S. JOUSSEIN, E. ROSSIGNOL, S. **Effects of metakaolin addition on geopolymer prepared from natural kaolinitic clay**, In Applied Clay Science, Volume 146, 2017.