

ESTUDO DO EFEITO DA ALTA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM ADIÇÃO DE ALUMINA

Gabriel Benincá (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2);

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) gabriel_beninka@hotmail.com, (2) dss@unesc.net

RESUMO

A minimização dos impactos ambientais tem mobilizado a sociedade, em grande escala, na busca de conceitos sustentáveis. Diante deste contexto diversos pesquisadores buscam novos elementos para diminuir este impacto. Uma alternativa, amplamente estudada nas últimas décadas, consiste no cimento geopolimérico, que é um cimento polimérico inorgânico, também conhecido como polissialato. A presente pesquisa visou analisar o comportamento térmico de concretos geopoliméricos com adição de óxido de alumínio. As amostras foram submetidas à temperatura de 800°C e geraram comparação com amostras que estiveram dispostas à temperatura ambiente, e então foram submetidas ao ensaio de Compressão Axial, Módulo de Elasticidade, Tração por Compressão Diametral para avaliar o comportamento mecânico dos corpos de prova. Para avaliar as alterações que a temperatura gerou na microestrutura do concreto, os mesmos foram sujeitos ao ensaio de Termogravimetria e difração de Raio X. Para a Resistência à Compressão Axial as amostras de concreto geopolimérico com adição de alumina mostraram uma redução de 51% quando submetidas a temperatura de 800°C. Quanto a Resistência à Tração por Compressão Diametral, as amostras expostas à alta temperatura sofreram uma redução de 68,21%. Para o Módulo de Elasticidade também se percebeu uma redução de 81,62% para as amostras expostas a alta temperatura. Quanto ao ensaio de Termogravimetria os resultados obtidos indicam que ainda existem reações para ocorrer entre os ativadores alcalinos e o metacaulim, e pode estar associada há essas reações a baixa resistência obtida do concreto geopolimérico. Os resultados obtidos indicam que ainda existem reações para ocorrer entre os ativadores alcalinos e o metacaulim, e pode estar associada há essas reações a baixa resistência obtida do concreto geopolimérico

Palavras-chave: geopolimérico, altas temperaturas, óxido de alumínio.

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de minimizar os danos ambientais causados pelo crescimento da construção civil, pesquisadores vem buscando alternativas de soluções voltadas para a preservação ambiental. Segundo o WBCSD (World Business Council for Sustainable Development, 2009), o cimento Portland é o segundo material mais utilizado do mundo, ficando atrás apenas da água, e é de extrema importância para a economia mundial. Porém, é um elemento que necessita de uma alta quantidade de energia para produção, e durante este processo ocorre uma grande emissão de gases CO₂. Estima-se que a indústria cimenteira contribui com 5 a 7% de emissão de CO₂ na atmosfera.

Uma alternativa ao cimento Portland, amplamente estudada nas últimas décadas, consiste no cimento geopolimérico, que é um cimento polimérico inorgânico, também conhecido como polissialato. Esse composto apresenta características particulares que revelam o seu grande potencial de aplicação como aglomerante em substituição total ou parcial ao cimento Portland convencional. O termo geopolímero foi criado por Davidovits em 1979, para designar uma classe de materiais obtidos por ativação alcalina de precursores à base de silicatos e aluminatos. A fim de se aliar o baixo custo com a questão da preservação ambiental, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos para incorporar diversos produtos em pastas de cimento, como por exemplo: resíduos industriais e argilominerais (vermiculita, bentonita e diatomita), reduzindo assim o custo final do produto, além da melhoria das propriedades da pasta.

De acordo com vários pesquisadores, os materiais obtidos por ativação alcalina são, em geral, mais resistentes do ponto de vista mecânico e apresentam maior durabilidade. Quanto ao aspecto de poluição ambiental relacionada à sua fabricação, é considerada ecologicamente mais correta, pois emite à atmosfera uma quantidade significativamente menor, quando comparada ao cimento Portland.. Considerado de alto desempenho, tem encontrado aplicações estruturais e refratárias.

Devido a essas características físico-químicas, os geopolímeros garantem propriedades de destaque no estado fresco como: boa trabalhabilidade, boa coesão e acabamento superficial, o que resulta em um ganho rápido de resistência mecânica e dureza superficial (PINTO, 2006).

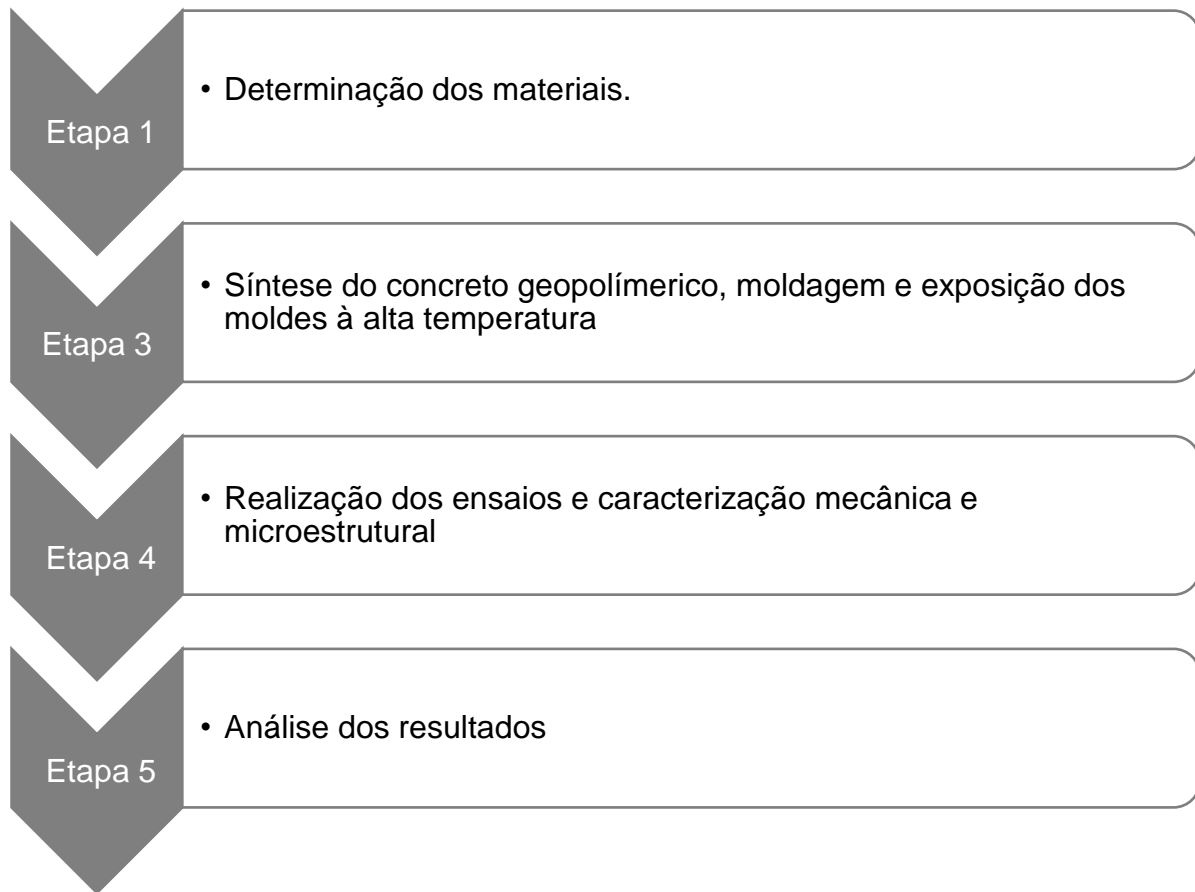
Porém, estudos demonstram que as propriedades dos geopolímeros podem ser afetadas por uma pequena alteração na quantidade de Si e Al disponíveis na reação. Com a adição de Al_2O_3 pode-se esperar um ajuste médio na relação Si/Al no processo final. Além disso, menores razões Si/Al resultam em geopolímeros com maior área superficial (HUANG; MINFANG, 2011). As diferentes formas de síntese dos geopolímeros são baseadas nas composições molares entre os compostos reagentes, que influenciam diretamente nas propriedades do produto final obtido, tais como o teor de umidade, tempo e temperatura. Portanto, uma compreensão completa da reatividade das matérias primas ativadas alcalinamente é importante, principalmente para determinação das composições iniciais de síntese do geopolímero para alcançar as propriedades desejadas (SILVA et al., 2007).

A partir das observações na literatura de dados sobre a influência da adição de alumina em corpos geopoliméricos este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento térmico de concretos geopoliméricos com adição de alumina, analisando as propriedades mecânicas e microestruturais de um concreto geopoliméricos com adição de óxido de alumínio (Al_2O_3). Contribuindo assim para o desenvolvimento de novos materiais de construção, mais eficientes e com menor impacto ambiental.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são descritos os materiais e métodos para produzir o concreto geopolimérico com a adição de alumina na composição, para avaliar o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas e microestruturais, e realizar os ensaios para caracterização das amostras. Assim foi elaborado um planejamento experimental, no qual foi dividido nas seguintes etapas mostradas na Figura 01:

Figura 01 – Etapas da pesquisa.



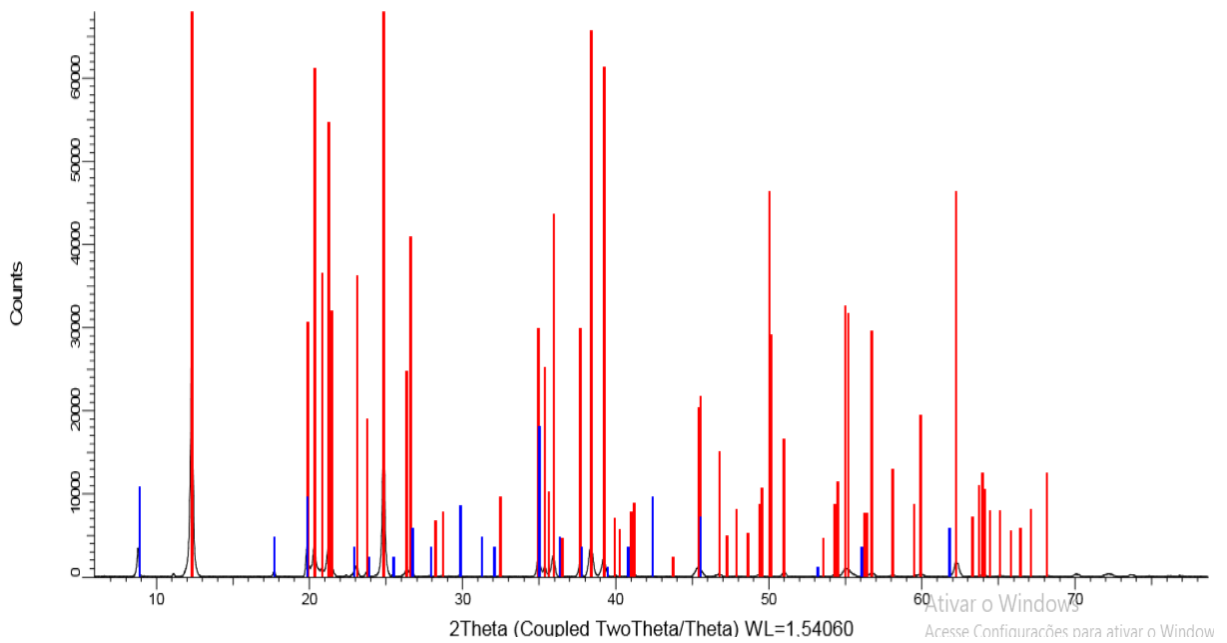
Fonte: Do autor, 2018.

2.1 Materiais

2.1.1 Metacaulim

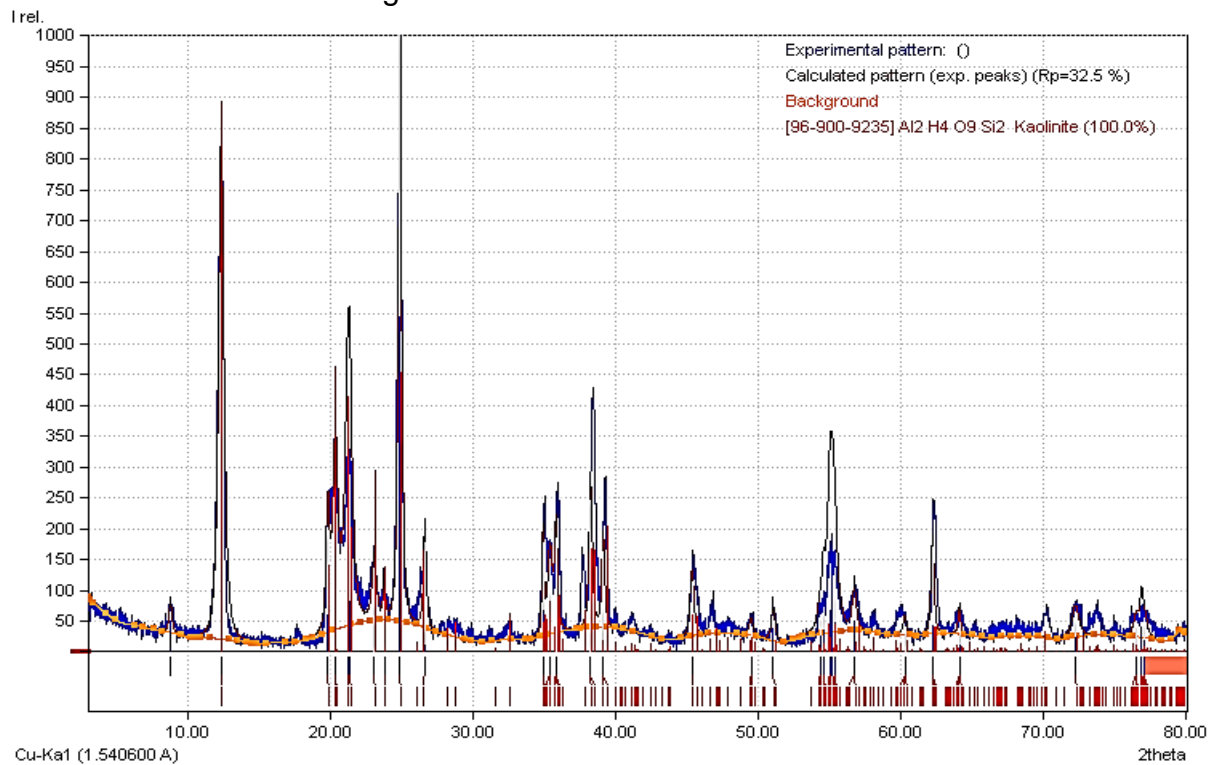
Para obtenção do metacaulim, foi necessário realizar a calcinação do caulim. Para isso o material precisou ser colocado no interior de uma mufla até atingir a temperatura de 900°C e mantido na mesma temperatura por 1 hora, para que depois fosse resfriado. O caulim e o metacaulim posteriormente obtido para o desenvolvimento da pesquisa foi submetido ao ensaio de DRX para analisar a sua estrutura previamente ao início da mistura. Os dados obtidos no ensaio são apresentados nas Figuras 02 e 03:

Figura 02: Análise DRX caulim



Fonte: Autor, 2018.

Figura 03: Análise DRX metacaulim



Fonte: Autor, 2018.

O pico ilustrado próximo ao deg de 27 da figura 03 mostra que há uma grande quantidade de quartzo na amostra, mas os materiais se mantem amorfo em relação aos outros picos. Também é demonstrado a presença da caulinita de formula $Al_2 H_4 O_9 Si_2$, em um total de 254 picos.

2.1.2 Ativadores Alcalinos

Optou-se pelo uso de ativadores compostos com hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), por esses serem de menor custo e mais comumente utilizados. O Hidróxido de sódio utilizado e disposto em formas de escamas e com 99% de pureza. A composição química do Silicato de sódio é apresentada na Tabela 01:

Tabela 01 – Propriedades químicas do silicato de sódio

Elemento	Descrição
SiO ₂	27 – 30%
Na ₂ O	8,0 – 8,7%
H ₂ O	65,1 – 62,3%
Aspecto	Liquido viscoso, incolor
Fórmula	Na ₂ O. 3,3 SiO ₂ .nH ₂ O
Módulo de Sílica	3,1
Densidade	1,370 – 1,400 g/cm ³
Viscosidade a 25°	70 – 200 cps

Fonte: Oregon Química, 2018

2.1.3 Óxido de Alumínio

A alumina Hydrogard GP utilizada na pesquisa foi obtida da Alcoa Corporation, é um tipo de hidróxido de alumínio, desenvolvido especificamente para ser incorporado em sistemas poliméricos como retardante de chama e supressor de fumaça, servindo simultaneamente como material de enchimento, em substituição às cargas minerais convencionais. Na Tabela 02 estão dispostas as características químicas e físicas do óxido de alumínio utilizado neste trabalho.

Tabela 02 – Características Alumina

Características	Típico
Análise Química	
Al ₂ O ₃	64,8
SiO ₂	0,02
Fe ₂ O ₃	0,02
Na ₂ O – Total	0,30
Umidade (100°C)	0,2
Perda ao Fogo (300-1000°C)	34,5
Insolúveis em Ácido	0,10
Análise Física	
Densidade Solta (g/cm ³) (1)	0,7
Densidade Compactada (g/cm ³) (1)	1,3
Peso Específico (g/cm ³)	2,42
Índice de Refração	1,57

Fonte: Alcoa Corporation.

2.1.4 Agregados

Quanto 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.

2.2 Métodos

A tabela 03 demonstra o traço utilizado neste trabalho. Foi pego como referência o traço utilizado por Keller (2015), sendo adicionado a este 10% de alumina:

Tabela 03: Traço (10% Alumina)

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

Fonte: Autor, 2018.

2.2.1 Produção dos corpos de prova

As formas dos corpos de prova foram projetadas e executadas em pvc, de forma manual, sendo utilizados canos de 50 mm e cortados em uma serra de bancada com altura de 10 cm. Também foi feito um corte em cada cano do topo à base para facilitar a desmoldagem do concreto, juntamente com a aplicação de desmoldante e então encaixados em CAP (tampa) de esgoto de 50 mm.

Para fazer a mistura foi utilizado uma argamassadeira. Primeiramente, foi depositado o silicato de sódio em uma bacia, e aos poucos foi sendo despejado o hidróxido de sódio já fazendo uma pré-mistura dos mesmos. Passado um tempo da mistura, foi se formando um gel e percebia-se que a mistura atingia uma temperatura na qual era visível a evaporação do gel. Rapidamente foi despejado na argamassadeira o gel e logo depois todo o metacaulim para não ocorrer perdas pela evaporação. Em seguida foi colocado o óxido de alumínio gradativamente. Depois de a mistura ficar homogênea foi sendo adicionado o agregado miúdo aos poucos, e logo depois o agregado graúdo em pouca quantidade para não travar a argamassadeira. Após perceber a homogeneidade da mistura, o concreto estava pronto. Foi feita a mistura, que correspondeu a 36 corpos de prova.

Após o termino da mistura, foi utilizado uma concha metálica para fazer o enchimento dos corpos de prova de forma manual. Os corpos de prova foram então colocados em uma estufa a 60°C por um período de 48 horas para receber uma pré-cura, retirados da estufa após esse período e foram deixados à temperatura ambiente até atingirem a idade para realização dos ensaios. Ao 25º dia, observou-se que os corpos de prova ainda não apresentavam características que possibilitassem a realização dos ensaios, pois a água permanecia em grande quantidade nos corpos de prova. Dessa forma, optou-se por coloca-los novamente em estufa, por mais 7 dias, e após esse período foi possível observar que as mesmas características se mantiveram. Então se fez necessário fazer a desforma dos corpos de prova e coloca-los novamente em estufa para que ao 42º dia, fosse possível realizar os ensaios.

2.2.2 Aquecimento

Foram colocados 18 corpos de prova em uma mufla da marca Fortelab de modelo ML1300 para aquecimento à 800°C com uma taxa de aquecimento de 3°C/min conforme recomendação de Rilem TC129 MHT (2000 apud SILVA, 2009).

2.2.3 Compressão Axial

A Resistência de Compressão Axial foi obtida conforme especifica a norma ABNT NBR 5739 (2018), ou seja, foi aplicado uma força axial sobre os corpos de prova até o rompimento do mesmo. Para este ensaio foi utilizado uma prensa da marca EMIC, modelo PC200CS com capacidade máxima para 2000KN que utiliza o software TESC. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada temperatura de exposição (ambiente e 800°C).

2.2.4 Tração por Compressão Diametral

O ensaio de Tração por Compressão Diametral foi efetuado conforme a norma ABNT NBR 7222 (2011). Para isso foram utilizadas hastes de madeira com dimensões de 10x0,7x0,3cm para serem presas sobre o corpo de prova, ao longo de seu comprimento, para fazer a distribuição da carga em toda a superfície no ato do ensaio. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada temperatura de exposição (ambiente e 800°C).

2.2.5 Módulo de Elasticidade

O ensaio de Módulo de Elasticidade foi efetuado de acordo com a norma ABNT NBR 8522 (2017). Foi utilizada uma prensa da marca EMIC, modelo PC200CS com auxílio de um extensômetro eletrônico para analisar a deformação lenta que sofreram os corpos de prova.

2.2.6 Termogravimetria (TGA)

O ensaio TGA é uma técnica de análise destrutiva, na qual se monitora e analisa a perda ou agregação de massa à amostra em função da temperatura ou do tempo em um ambiente de temperatura e atmosfera controladas. Para realização do TGA, os corpos de prova precisaram ser moídos e passados por uma peneira 200 mesh, que tem aberturas de 0,075mm para serem dispostos ao ensaio. Os parâmetros para a realização do ensaio foram em ambiente de ar sintético, taxa de aquecimento de 10°C/min. e a temperatura variando de 25 a 1000°C.

2.2.7 Difração de Raios-x (DRX)

O DRX é uma metodologia de caracterização estrutural de materiais, podendo ser empregado para amostras sólidas na forma de pó. A técnica consiste na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, que constituem o feixe difratado. O fenômeno da difração de raios-X ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg (Equação 1). O objetivo do ensaio de DRX é verificar as fases cristalinas presentes na amostra.

Equação 1:

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

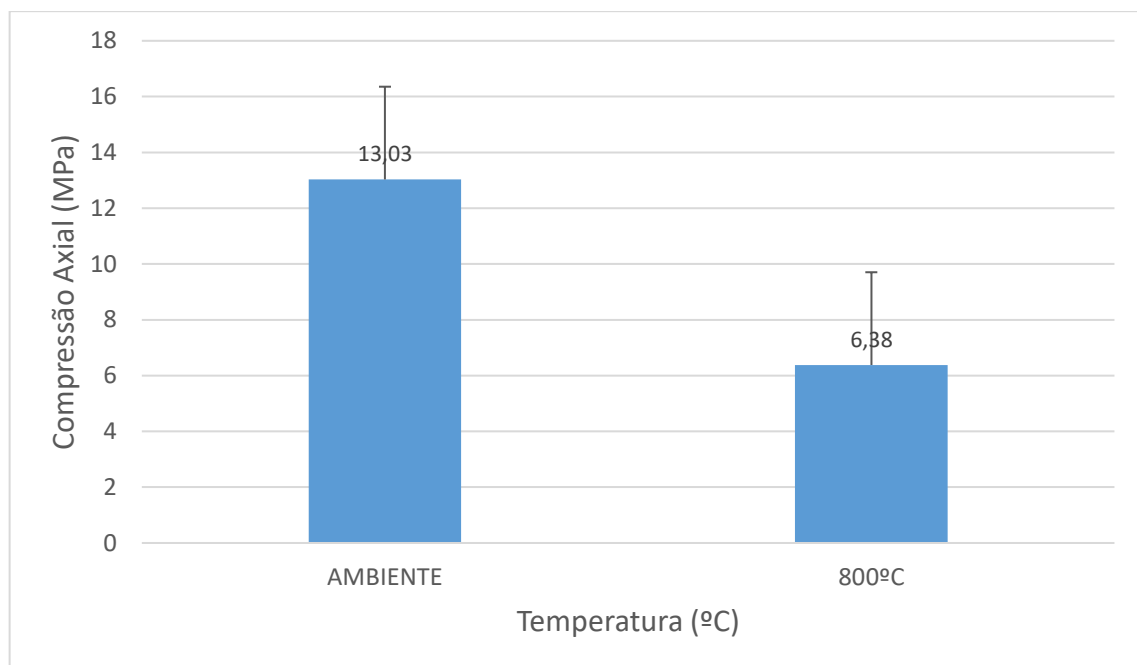
Onde n é um número natural, λ é o comprimento de onda da radiação incidente, d é a distância entre planos atômicos e θ é o ângulo de incidência em relação ao plano considerado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1.1 Compressão Axial

Os resultados obtidos no ensaio de Compressão Axial estão dispostos na Figura 04:

Figura 04: Resultados – Compressão Axial.



Fonte: Do autor, 2018.

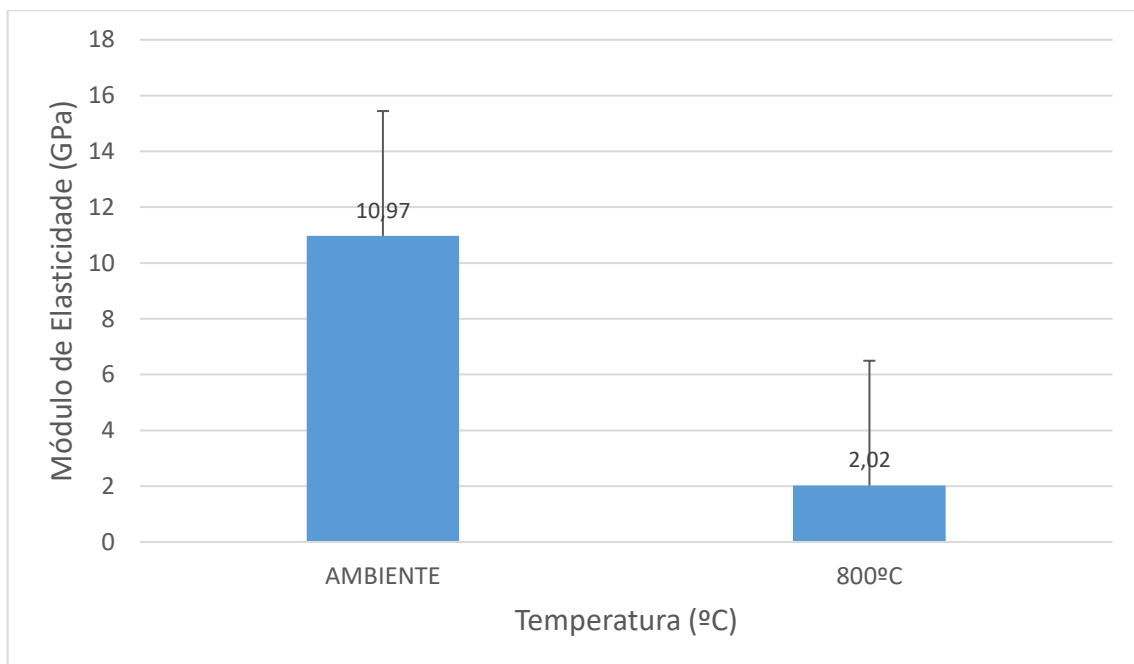
É possível analisar uma perda média de 51% de resistência para a temperatura de 800°C em relação a temperatura ambiente. A redução de resistência para a temperatura de 800°C pode ser associada ao fato da evaporação da água do CP, que pode gerar tensões internas e criar fissuras no corpo de prova. Provis; Van Deventer (2009) afirma que a evaporação de moléculas de água da estrutura reflete na formação de defeitos estruturais, como porosidade e rachaduras. Conforme o estudo feito por (Pan *et al*; (2010), apenas para temperaturas até 520°C é que se pode observar ganhos na resistência, o que se deve à característica refratária da alumina. De acordo com a norma ABNT NBR 15200:2012, a Resistência a Compressão Axial

para estruturas de concreto em situações de incêndio sofre uma redução de 72,50% para a temperatura de 800°C. Desta forma é possível observar que o concreto geopolimérico com adição de alumina apresenta uma menor redução da resistência em função da temperatura se comparado ao concreto de cimento Portland. Foi gerado uma análise estatística de variância (ANOVA), das amostras com uma confiabilidade de 97,50%, que indica que existem variações significativas na comparação das amostras, e atesta que ao menos uma amostra é diferente estatisticamente.

3.1.2 Modulo de Elasticidade

Na Figura 05 fica expresso os resultados obtidos no ensaio de Módulo de Elasticidade:

Figura 05: Resultados – Módulo de Elasticidade.



Fonte: Do autor, 2018.

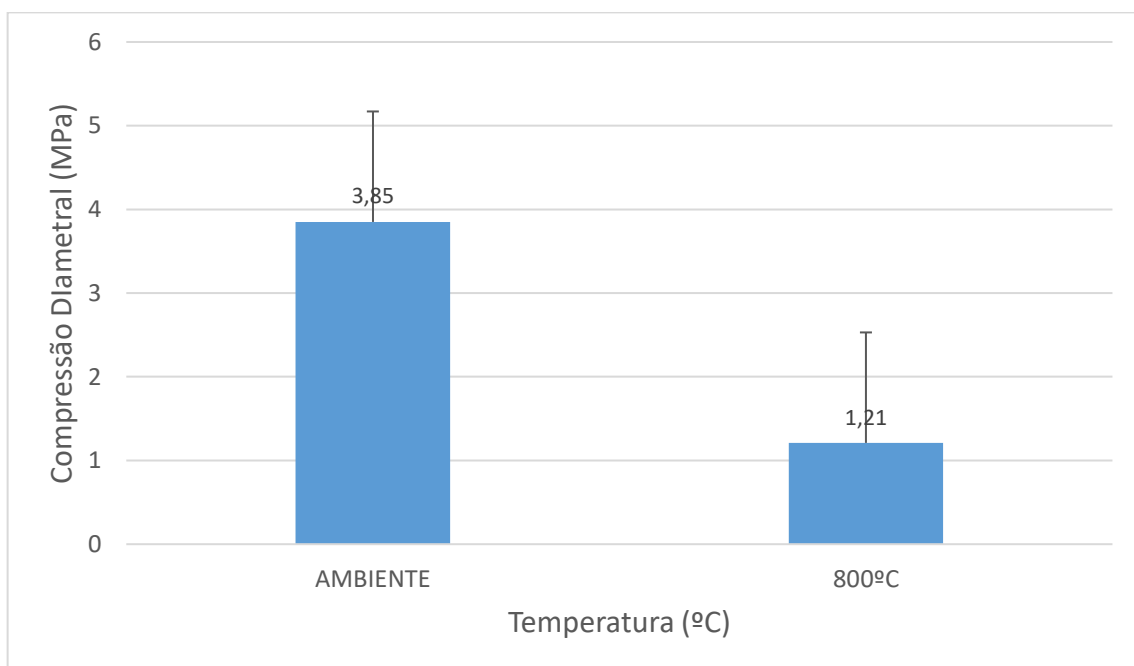
Observa-se uma perda média de 81,58% de resistência para o concreto geopolimérico submetido à temperatura de 800°C em relação à temperatura ambiente. De acordo com a norma ABNT NBR 15200:2012, o Módulo de Elasticidade para estruturas de concreto de cimento Portland em situações de incêndio sofre uma redução de 93,00%

para a temperatura de 800°C. Foi gerado uma análise estatística de variância (ANOVA), das amostras com uma confiabilidade de 98,40%, que indica que existem variações significativas na comparação das amostras, e atesta que ao menos uma amostra é diferente estatisticamente.

3.1.3 Tração por Compressão Diametral

A Figura 06 ilustra os resultados obtidos no ensaio de Tração por Compressão Diametral:

Figura 06: Resultados: Tração por Compressão Diametral



Fonte: Do autor, 2018.

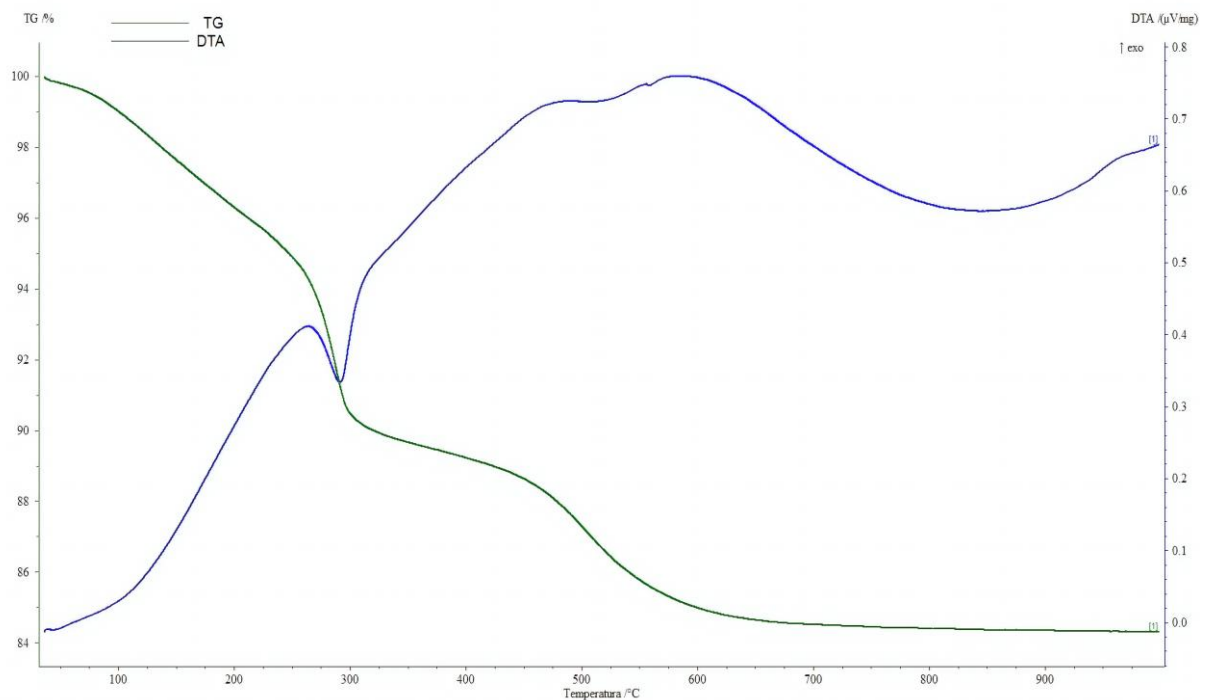
A média das resistências à Tração por Compressão Diametral do corpo de prova em temperatura de 800°C mostrou uma redução de 68,57% comparado ao concreto geopolimérico submetido à temperatura ambiente. Este fato pode ter ocorrido pelo fato de os corpos de prova submetidos à alta temperatura estarem porosos, com microfissuras ou deformados. Foi gerado uma análise estatística de variância (ANOVA), das amostras com uma confiabilidade de 99,88%, que indica que existem

variações significativas na comparação das amostras, e atesta que ao menos uma amostra é diferente estatisticamente.

3.1.4 Termogravimetria (TGA / DTA)

Os resultados obtidos dos ensaios de DTA / TGA feitos sobre a amostra em temperatura ambiente do concreto geopolimérico com 10% de alumina estão dispostos na Figura 07:

Figura 07: Resultados: Termogravimetria



Fonte: Do autor, 2018.

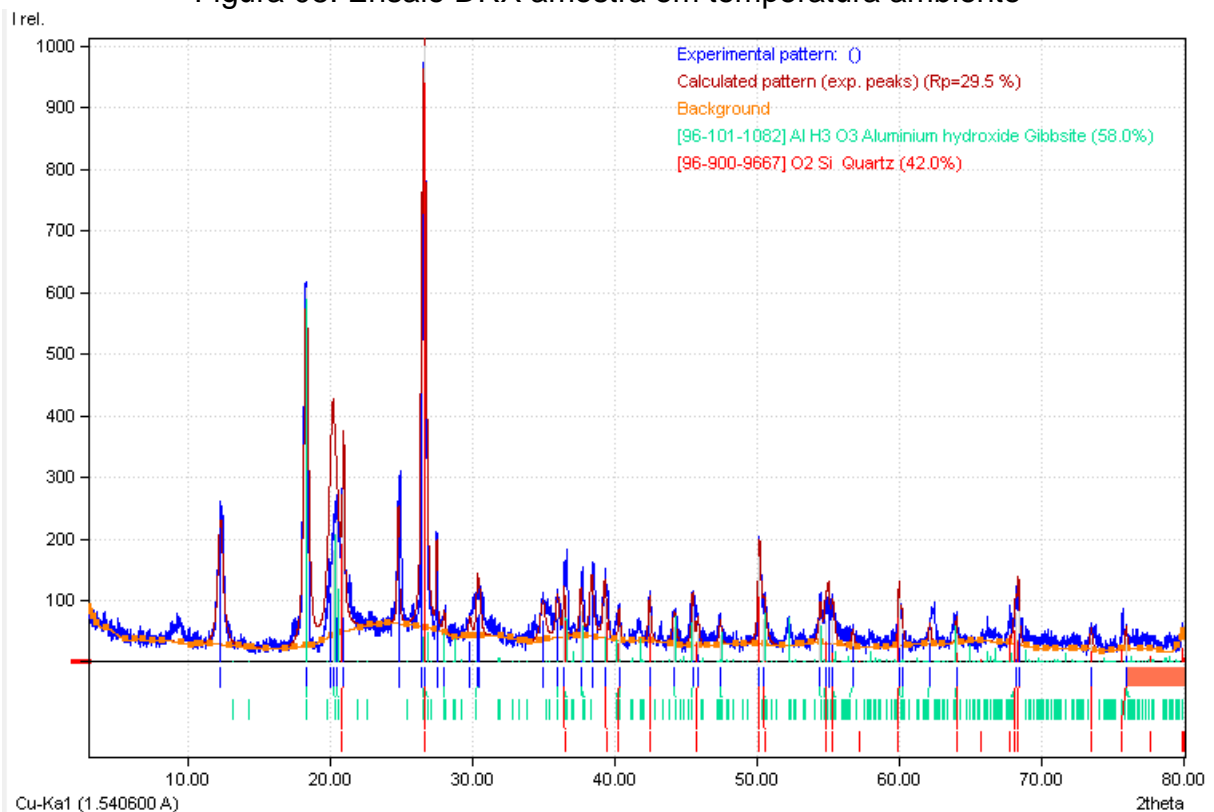
É possível observar uma perda gradual de massa inicial de 5%, para o intervalo de temperatura de 20 à 250°C, correspondente à água de hidratação do geopolímero. Em 275°C há brusca perda de massa de 3,05%, acompanhada de um pico endotérmico no DSC a 300°C. de 300 à 450°C há nova perda gradual de massa de 1,8%. De 450 a 700°C há novamente outra perda gradual de massa de 4,5%, que manifesta uma nova desidratação no geopolímero, onde finalmente o material estabiliza e não demonstra nova perda de massa até o final do ensaio. No DSC há

reação endotérmica a 300°C, que está associada a desidratação, e a 575°C há um pico endotérmico associado a inversão do quartzo de baixa para alta simetria, relacionado ao agregado utilizado. Os resultados obtidos indicam que ainda existem reações para ocorrer entre os ativadores alcalinos e o metacaulim, e pode estar associada há essas reações a baixa resistência obtida do concreto geopolimérico, já que o material precisou passar pela estufa para que a cura ocorresse, e mesmo passando por esse processo, pode ser observado que a cura não estava completa.

3.1.5 Difração de Raios-x (DRX)

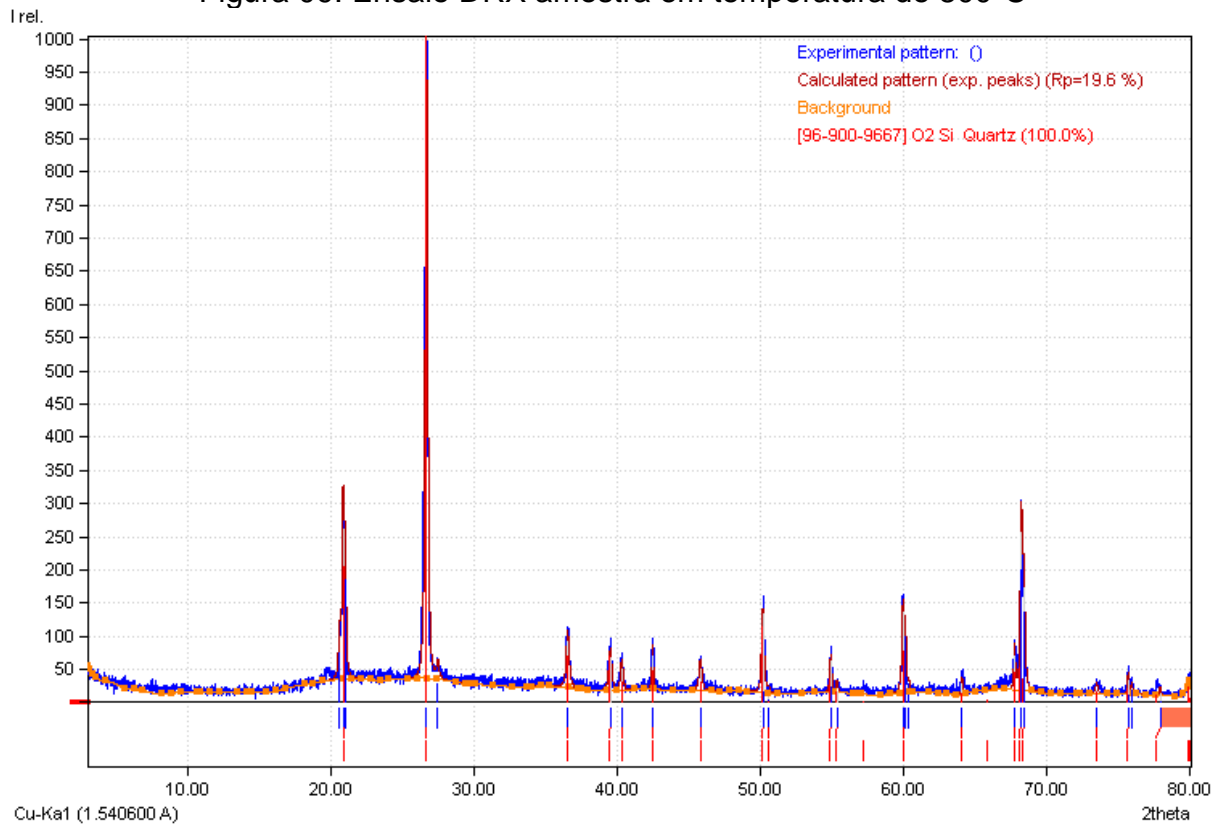
Fica ilustrado nas Figuras 08 e 09, os ensaios de DRX para as amostras em temperatura ambiente e a 800°C.

Figura 08: Ensaio DRX amostra em temperatura ambiente



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 09: Ensaio DRX amostra em temperatura de 800°C



Fonte: Do autor, 2018.

Ambas as amostras demonstram a presença de Quartzo na formula O_2Si . Apenas na Figura 08, que corresponde a amostra em temperatura ambiente é que o ensaio encontra a Gibbsita na formula AlH_3O_3 , que é uma das formas minerais do hidróxido de alumínio que foi utilizado no experimento, em um total de 430 picos. Já na segunda amostra, o ensaio não encontrou a presença do mesmo elemento.

4 CONCLUSÕES

Diante do estudo realizado é possível concluir que resistência à Compressão Axial reduziu 51% para as amostras que foram submetidas à temperatura de 800°C em relação as amostras de temperatura ambiente. Quanto ao ensaio de Tração por Compressão Diametral, analisou-se que a alta temperatura a qual foi exposto o material, foi responsável por criar poros, também microfissuras e deformar os corpos de prova reduzindo assim a resistência em 68,57% em comparação com os de

temperatura ambiente. No ensaio de módulo de elasticidade também se percebeu uma redução de 81,58%. Quanto a análise microestrutural, o ensaio TGA / DTA demonstrou que ainda existem reações químicas para ocorrer nos corpos de prova, pois a cura do mesmo não foi totalmente concluída, o que poderia gerar um aumento na resistência caso chegasse a uma cura ideal para o material. O ensaio DRX demonstrou a presença de quartzo em ambas as amostras analisadas, porém pode ser verificado que na amostra que foi disposta à alta temperatura, não foi encontrado a Gibbsita, que foi encontrada na amostra de temperatura ambiente.

4.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Utilização de outro tipo de forma para a produção dos corpos de prova
- Utilização de metacaulim comercial para refazer o experimento, analisando o comportamento mecânico e microestrutural.
- Substituir a alumina refrataria pela alumina reativa.

REFERÊNCIAS

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 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

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, 2017.

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, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

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

GLUKHOVSKY, V. D. **Soil Silicate Articles and Structures**, Ucrânia, 1967. p. 156.

HUANG, Y., MINFANG, H., **The influence of α -Al₂O₃ addition on microstructure, mechanical and formaldehyde adsorption properties of fly ash-based geopolymer products**. Journal of Hazardous Materials, v. 193, p. 90-94, 2011.

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

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

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>.

PINTO, A. T. Geo-Pol. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Apostila, Vila Real, p. 92, 2006.

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

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

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.

SILVA, P. D. et al. **Kinetics of Geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂**. Cement and Concrete Research, v.37 p. 512-518, 2007