

## **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO TÉRMICO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DE UM CONCRETO REFRATÁRIO ALUMINOSO ANTIEROSIVO**

V.M.S. Silva <sup>(1)</sup>, E. M. B. Santos <sup>(1)</sup>, G. C. R. Garcia <sup>(1)</sup>,  
W. S. Resende <sup>(2)</sup>, S. Ribeiro <sup>(1)</sup>

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)  
Estrada Santa Lucrecia s/n, Bairro Mondezir, CEP 12600-970, CP 116, Lorena SP.

<sup>(2)</sup> Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários – IBAR  
Avenida IBAR, 2 , CEP 08559-470 – Poá - SP

[esoly@ppgem.eel.usp.br](mailto:esoly@ppgem.eel.usp.br)

*Refratários são materiais com microestrutura complexa, resistentes a altas temperaturas e usados predominantemente como revestimentos de fornos e equipamentos industriais. Tal microestrutura pode mudar significativamente com a temperatura de tratamento térmico a que é submetida. Neste trabalho foi avaliada a influência da temperatura no comportamento estrutural de um concreto refratário usando-se as seguintes temperaturas de tratamento: 110, 200, 400, 600, 800 e 1000°C. Para tanto foram determinados, através de métodos adequados, a porosidade, a absorção de água, módulo de Young, módulo de ruptura e microestruturas. Foi observado que os módulos elásticos e de ruptura apresentaram um aumento a 400°C, declinando a 600 °C e voltando a subir a 800 °C, o que leva a concluir que as ligações de hidratação se quebram entre 400 e 600 °C, e as ligações cerâmicas começam a se formar entre 600 e 800 °C.*

Palavras-chaves: concreto refratário, módulo de Young, ressonância em barras.

## INTRODUÇÃO

Refratários são materiais com microestrutura complexa e grosseira, resistentes á altas temperatura usados predominantemente como revestimentos de fornos e equipamentos industriais para processamento de outros materiais em elevadas temperaturas. Sua microestrutura é projetada para minimizar os danos por choque térmico, já que esses materiais são usualmente submetidos a abruptas variações de temperatura. Para muitas aplicações a resistência à abrasão também se torna importantíssima. De um modo geral, sua microestrutura é constituída por uma parte mais fina, podendo ter tamanho da até a ordem de nanômetros, a matriz e outra mais grossa formada por agregados de tamanhos de até alguns milímetros<sup>(1-5)</sup>.

A microestrutura de um concreto refratário pode mudar significativamente com o tratamento térmico, mostrando que materiais simplesmente curados têm maiores resistências que os calcinados, e estes menores que os materiais submetidos a temperaturas de tratamento superiores, onde ocorre a sinterização e conseqüentemente ligações cerâmicas mais fortes <sup>(6)</sup>.

As propriedades do concreto a altas temperaturas dependem fortemente da evolução microestrutural e das reações entre constituintes na matriz <sup>(2)</sup>. Basicamente concreto refratário é produzido pela mistura de cimento de aluminato de cálcio, alguns materiais finos, agregados, aditivos e água. A presença de água na mistura causa a formação de uma estrutura firme, que garante inicialmente o endurecimento do concreto e pode variar conforme a temperatura de tratamento a que o concreto é submetido. Tal variação pode mudar as propriedades mecânicas do concreto, bem como a densidade, a distribuição e variação dos poros <sup>(6)</sup>. Pesquisas têm mostrado que materiais submetidos à queima entre 200 e 300 °C apresentam propriedades mecânicas menos fortes do que aqueles que são apenas curados, o que também contribui com o aumento da porosidade causado pela perda de água de hidratação. Conforme a temperatura de tratamento térmico vai aumentando o processo de desidratação aumenta, até que todas percam sua água de hidratação <sup>(1)</sup>. As ligações cerâmicas começam a se formar a uma temperatura em torno de 1000°C, o que atribui uma alta resistência mecânica novamente ao concreto <sup>(6)</sup>.

Para avaliar o comportamento dos refratários submetidos a diferentes temperaturas de tratamento térmico técnicas de medidas de módulos elásticos e de ruptura, vêm sendo utilizados <sup>(2)</sup>. O módulo de elasticidade avalia a resistência do

material a deformação elástica. Quando não há linearidade entre tensão e deformação a determinação desta propriedade se torna peculiar, como no caso do concreto. Este apresenta uma microestrutura heterogênea já citada anteriormente (matriz e agregados) desta forma o módulo de elasticidade do concreto, varia em função das matérias primas e de sua resistência mecânica <sup>(8)</sup>.

Um dos melhores métodos para avaliação do módulo elástico é o método de frequência ressonante, desde que sejam realizados vários testes e que as amostras sejam grandes, de tal forma que o concreto com alto desempenho tende a se comportar de forma mais homogênea <sup>(8)</sup>. Tal técnica permite avaliar a evolução das frequências de ressonância torcionais e flexionais, simultaneamente, o que possibilita observar a influência de fatores como a temperatura de tratamento de forma mais eficiente. Através da determinação de tais frequências e com o auxílio de relações matemáticas podem-se determinar os módulos de Young e de cisalhamento <sup>(9)</sup>.

Esse trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de um concreto refratário aluminoso antierosivo nas temperaturas intermediárias ao início da desidratação, ao início da formação das ligações mecânicas, utilizando medidas de módulo de Young e de módulo de ruptura.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção das amostras foi utilizado concreto refratário convencional aluminoso antierosivo, fornecido pela Indústria Brasileira de Concretos Refratários, IBAR, e água deionizada. A mistura do concreto com 5,5 %m/m de água foi realizada em uma argamassadeira de laboratório com capacidade nominal de 5 litros, aplicando-se as seguintes etapas: 1 minuto de homogeneização a seco a 60 rpm, 2 minutos após a adição rápida da água e 1 minuto de mistura final a 120 rpm. Foram preparados corpos de prova em forma de barras prismáticas, medindo 25 x 25 x 150 mm<sup>3</sup>, para avaliação dos módulos de Young e de ruptura. As amostras foram desmoldadas após as primeiras 24 horas e curadas por 48 horas a partir da moldagem. A cura correu em umidade relativa entre 30 e 60% e temperatura de 25 ° C. Após a cura as amostras foram secas por 48 horas a 110 °C, e foram submetidas a tratamento térmico a 200, 400, 600, 800 e 1000°C por 8 horas com taxa de aquecimento e resfriamento de 2°C/minuto. As amostras tiveram suas bases retificadas para perfeito alinhamento no equipamento de medida de módulo elástico.

As medidas de módulo de Young foram realizadas em um equipamento automatizado, utilizando método de ressonância de barras conforme ASTM C1198-91. Foi realizada uma varredura na frequência de 1 a 30 kHz. para a obtenção dos picos. A identificação dos picos foi realizada por um *software* que calcula o módulo de Young. A determinação do módulo de ruptura foi realizada por ensaio de flexão em três pontos, utilizando uma máquina universal de ensaios MTS com velocidade de carregamento 12,9 N/s e espaçamento entre os roletes de 125 mm. Para avaliar a morfologia microestrutural, as amostras fraturadas e amostras lixadas e polidas foram recobertas com um filme fino de ouro e observadas em microscópio LEO modelo 1450 VP, no modo de elétrons secundários e retroespalhados.

## RESULTADOS

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos de módulo elástico de Young (E), módulo de ruptura (MOR), absorção (A) e porosidade aparente (PA), das amostras tratadas nas temperaturas: 200, 400, 600, 800 e 1000 °C.

Tabela 1. Resultados de módulo elástico, módulo de ruptura, absorção e porosidade aparente em diferentes temperaturas de tratamento.

T(°C)	E (GPa)	MOR (MPa)	A (%)	PA (%)
110	47,39 ± 0,78	8,57 ± 1,05	3,97 ± 0,02	11,59 ± 0,15
200	56,38 ± 3,90	9,94 ± 0,82	4,79 ± 0,04	14,00 ± 0,10
400	62,27 ± 2,31	12,97 ± 0,98	5,51 ± 0,10	16,03 ± 0,25
600	59,69 ± 5,72	12,27 ± 0,48	5,34 ± 0,12	15,54 ± 0,32
800	53,46 ± 1,03	12,59 ± 0,87	4,54 ± 0,05	13,28 ± 0,13
1000	54,25 ± 2,07	14,81 ± 0,75	5,80 ± 0,09	16,75 ± 0,21

A Figura 1 e 2 ilustra o comportamento do módulo de ruptura e de Young, respectivamente, em função das temperaturas estudadas. Pode-se observar que ocorre uma variação do módulo de ruptura à medida que a temperatura é aumentada, em 200°C o módulo foi mais baixo, houve um aumento a 400 °C um pequeno declínio entre 600 e 800°C e voltou a subir a 1000°C. Estes resultados demonstram que as temperaturas de tratamento mais elevadas o módulo de ruptura do concreto aumenta. Em temperaturas mais baixas ocorre a desidratação diminuindo o módulo de ruptura, já em temperaturas mais altas ocorre a formação de ligações cerâmicas que são mais fortes aumentando o módulo de ruptura.

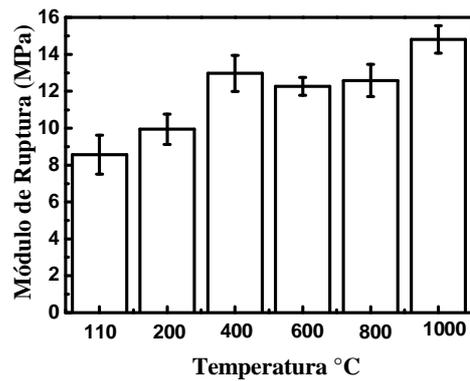


Figura 1 - Módulo de ruptura em função da temperatura de tratamento.

Como pode ser observado na Figura 2 o módulo de Young apresentou um aumento a 400°C, foi diminuindo até 800 °C e não so freu variações significativas entre 800 e 1000°C . A diminuição do módulo de Young em temperaturas mais elevadas pode ser explicada pela geração microtrincas na interface matriz/agregado.

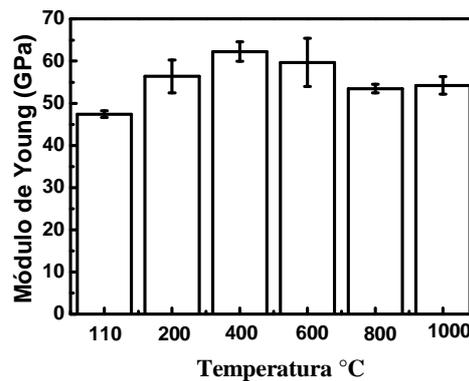


Figura 2 – Módulo de Young em função da temperatura de tratamento.

As Figuras 3 e 4 mostram os resultados de absorção de água e porosidade de um concreto aluminoso antierosivo tratadas nas temperaturas estudadas. Como pode ser observado ocorre um aumento tanto na absorção de água quanto na porosidade entre 400 e 600°C, isso pode ter ocorrido devido à saída da água que aumentou a porosidade, em 800°C ocorre uma diminuição que pode ser em função do início de formação das ligações cerâmicas diminuindo a porosidade e a 1000°C volta a aumentar possivelmente pela formação de microtrincas ao redor do agregado, como pode ser observado na Figura 5 (f). A partir dos resultados mostrados foi possível perceber que o módulo de Young é mais sensível às variações de temperatura de

tratamento que o módulo de ruptura, absorção de água e porosidade, isso pode ser devido aos valores de Young serem maiores ficando mais perceptível.

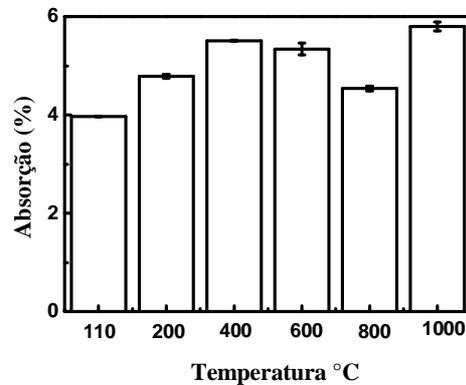


Figura 3 - Absorção de água em função da temperatura de tratamento.

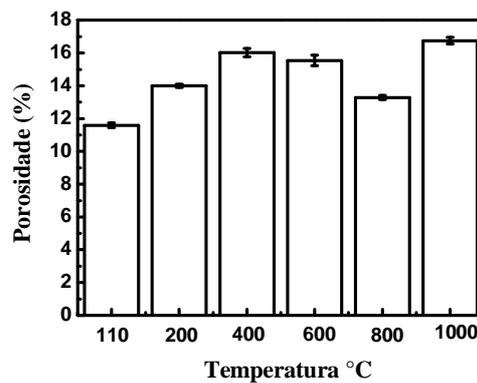


Figura 4 – Porosidade aparente em função da temperatura de tratamento

A Figura 5 mostra as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura de amostras do concreto fraturadas e polidas tratadas a 200, 400 e 1000°C, a ampliação utilizada foi de 500 x, escolhida para uma melhor visualização dos detalhes.

Como pode ser observado nas imagens tanto a matriz quanto o agregado apresentam porosidade. Foi possível observar que na temperatura de 200°C ocorre menos microtrincas que amostra de 400°C e esta por sua vez apresenta menos que tratada a 1000°C, o que justificaria os resultados obtidos de módulo de ruptura e elástico. Além disso, é possível observar que a propagação de trinca ocorre de forma transgranular, uma possível explicação para este efeito é o fato da tendência das partículas menores em se unirem, porém o agregado apresenta um

impedimento para esta união e este efeito pode gerar de tensões trativas que formam as trincas.

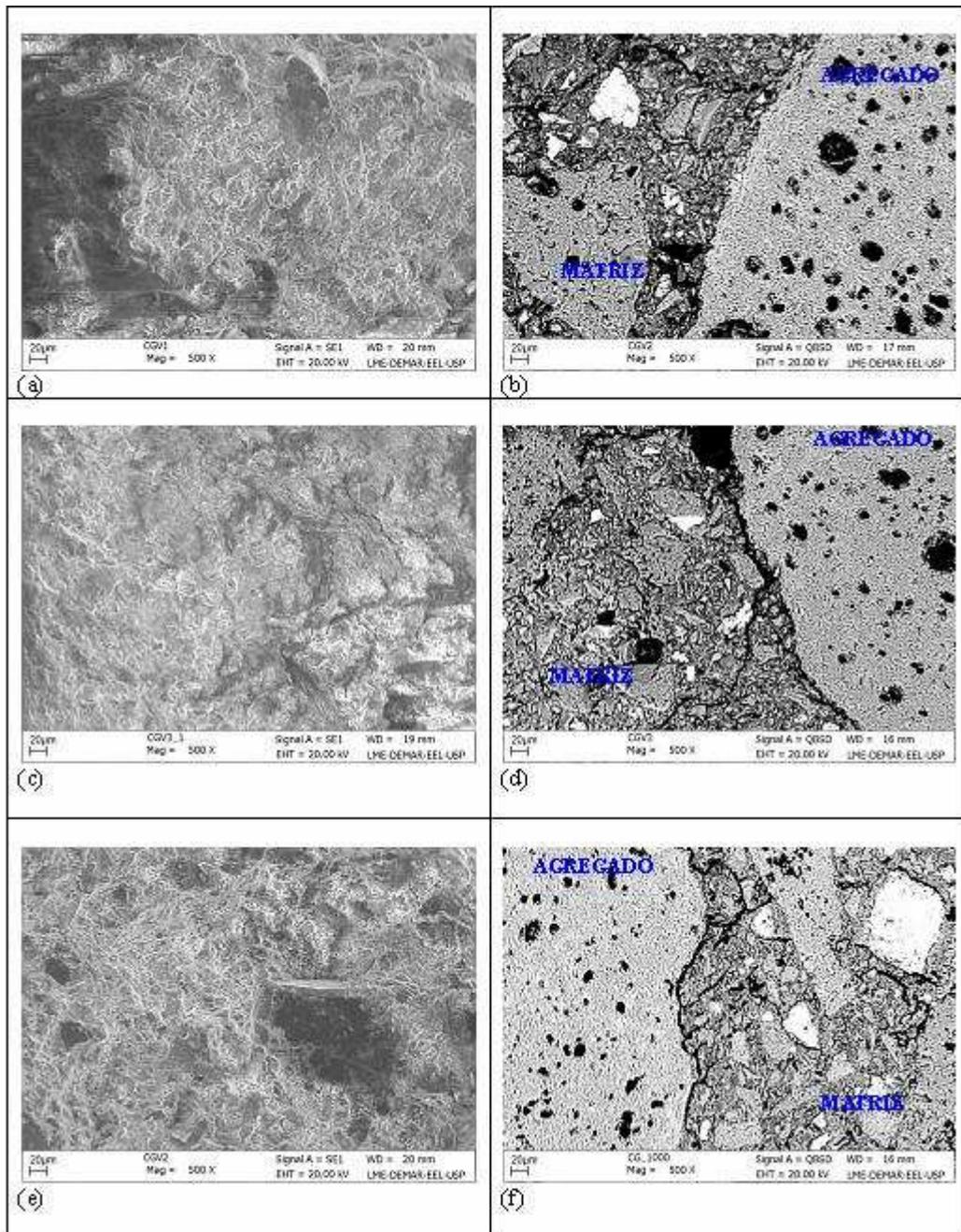


Figura 5 –Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras fraturadas (a), (c) e (e) e polidas (b), (d) e (f) tratadas a 200°C (a) e (b), 400°C (c) e (d) e 1000°C (e) e (f).

## CONCLUSÃO

Conclui-se que ocorre um aumento dos módulos de ruptura, Young, absorção de água e porosidade por volta de 400°C, uma diminuição em 600 °C possivelmente

em função das quebras das ligações devido a desidratação, e um aumento novamente a 1000°C pela formação de ligações cerâmicas. O módulo de Young a 1000°C é menor que entre 400 e 800°C possivelmente pela formação de microtrincas ao redor do agregado. O módulo de Young é mais sensível à variação da temperatura que o módulo de ruptura, absorção de água e porosidade.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro recebido da CAPES, FAPESP processo 07/55964-3, CNPq 302387/2007-2, 135921/2008-2, 140202/2009-9 e À IBAR pela doação do concreto refratário.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LEE, W. E. L.; VIEIRA, W.; ZHANG, S; AHARI, K. G.; SARPOOLACK, H.;PARR, C. Castable refractory concretes. **International Materials Reviews**, v.46, n.3, p 145, 2001.
2. AUVRAI, J. M., GALT, C., HUGER, M.. Evolution of elastic properties and microstructural changes versus temperature in bonding phases of alumina and alumina-magnesia refractory castable. **Journal European Ceramic Society**, v. 27 p. 3489-3496,2007.
3. KAKROUD, M. G., YEUGO-GOGIM, E., GALT, C., HUGER, M., CHOTARD, T. Effect of thermal treatment on damage mechanical behaviour of refractory castable: Comparison between bauxite and andalusite aggregates. **Journal European Ceramic Society**, v. 28, p.2471-2478, 2008.
4. KAKROUD, M. G., HUGER, M., GALT, C., CHOTARD, T. Anisotropic behaviour of andalusite particles used as aggregates on refractory castables. **Journal European Ceramic Society**, v. 29, p. 571-579, 2009.
5. NAZARET, F., MARZAGUI, H, CUTARD, T. Influence of the mechanical behaviour specificities of damaged refractory castables on the Young's modulus determination. **Journal European Ceramic Society**, v. 6, p. 1429-1438, 2006.

6. RIBEIRO, S., RODRIGUES, J. A. The Influence of Microstructure on the Maximum Load and Fracture Energy of Refractory Castables. **Ceramics International**, v. 36, p 263-274, 2010.
7. CARDOSO, F. A., INNOCENTINI, M.D.M., AKIYOSHI, M.M., PANDOLFELLI V.C. Effect of curing time on the properties of CAC bonded refractory castables. **Journal European Ceramic Society**, v. 24 p. 2073–2078, 2004.
8. AGUILAR, M.T.P. SILVA, A.P. CORRÊA, E.C.S. CELTLIN, P. R. Análise da capacidade de deformação do concreto: módulo de Young X módulo de deformação. In: 17º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Foz do Iguaçu, PR, 2006.
9. BRAULIO, M.A.L. RODRIGUES, J. A. Estudo da cura de concreto refratário pela medida da frequência de ressonância de vibração de amostras na forma de barra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49, 2005, São Pedro-SP. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2005.

## INFLUENCE OF THE TEMPERATURE IN THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL BEHAVIOR OF A REFRACTORY CONCRETE ALUMINOUS ANTIEROSIVO

### ABSTRACT

Refractory are material with complex microstructure, resistant at elevated temperatures and used predominantly as coverings of ovens and industrial equipment. Such microstructure can significantly change with the thermal treatment that is submitted. In this work the influence of the temperature in the structural behavior of a refractory concrete was evaluated using the following temperatures: 110, 200, 400, 600, 800 and 1000 °C. Was determined the porosity, the water absorption, Young's and rupture modulus and microstructures. It was observed that the elastic modules and of rupture had gotten an increase 400°C, declining the 600 °C and coming back to go up the 800 °C, what it tak es in them to conclude that the

hydration links break between 400 and 600 °C, and the ceramics start to form between 600 and 800 °C.

Key-words: refractory, castable, Young's modulus, bar resonance.