

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE CONCRETO RESFRATÁRIO ALUMINOSO ANTIEROSIVO TRATADO À 110, 650 e 1000 °C.

E. M. B, Santos⁽¹⁾, G. C. R, Garcia⁽¹⁾, W. S. Resende⁽²⁾, S. Ribeiro⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de Lorena (EEL)
Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)

Estrada Santa Lucrecia, Bairro Mondezir, CEP 12600-970, CP 116, Lorena SP

esoly@ppgem.eel.usp.br

⁽²⁾ Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários – IBAR

Avenida IBAR, 2 , CEP 08559-470 – Poá - SP

RESUMO

Os módulos de Young e cisalhamento, e a razão de Poisson são importantes na determinação de propriedades mecânicas em projetos de materiais para engenharia. Um dos métodos dinâmicos utilizados para determinar o módulo elástico de materiais cerâmicos é o da ressonância mecânica de barras. Neste trabalho foram determinados os módulos de Young, cisalhamento, razão Poisson e módulo de ruptura em amostras de concreto refratário tratadas termicamente. Comparando as amostras tratadas a 110 e 650°C, observou-se uma diminuição de aproximadamente 6% no módulo de Young e um aumento de 13% e 18 % no módulo de cisalhamento e ruptura, respectivamente. Comparando as amostras tratadas a 110 e 1000 °C, notou-se um aumento de 12% e 18 % no módulo de Young e ruptura, respectivamente e uma diminuição de 7% no módulo de cisalhamento. Em função dos resultados obtidos pode-se concluir que as propriedades estudadas são influenciadas pelas condições de tratamento térmico.

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

INTRODUÇÃO

Refratários são materiais com microestrutura complexa e grosseira, resistentes a altas temperaturas e usados predominantemente como revestimentos de fornos e equipamentos industriais para processamento de outros materiais em elevadas temperaturas. Sua microestrutura é projetada para minimizar danos por choque térmico, já que esses materiais são usualmente submetidos a abruptas variações de temperatura. De um modo geral, sua microestrutura é constituída por uma parte mais fina, podendo ter tamanhos até a ordem de nanômetros, chamada de matriz e outra mais grossa formada por agregados com tamanhos de até alguns milímetros ^(1, 2).

Os concretos refratários são materiais que apresentam pega hidráulica e que geralmente além de serem constituídos de agregados de diferente natureza e aditivos possuem ligantes. O processo de cura tem início quando a água é adicionada à mistura, levando a mudanças químicas e físicas decorrentes da reação cimento-água ⁽³⁾.

Um concreto após a cura, quando submetido à queima, dependendo da temperatura atingida, sofre alterações das fases constituídas durante a cura, bem como variação da composição química, principalmente no tocante à água, pois durante o aquecimento o concreto desidrata. Essas variações promovem uma mudança microestrutural podendo levar a uma melhoria ou diminuição da resistência mecânica do refratário ^(1,4).

Uma série de comportamentos dos concretos refratários relaciona os módulos elásticos, de Young (E) e cisalhamento (G). Diversos métodos e técnicas estão disponíveis para o estudo da mudança no comportamento mecânico, por meio de propriedades elásticas ⁽³⁾.

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica. É uma medida da sua rigidez. Materiais com baixo módulo deformam muito elasticamente quando sujeitos à solicitações mecânicas. Alguns desses materiais são indicados para estruturas previamente projetadas para sofrerem deformação apenas transitória. No entanto, na maioria das aplicações não se deseja a ocorrência de deflexões, ou seja, os materiais devem apresentar alto módulo de elasticidade. A avaliação da rigidez do material é importante tanto durante o processo de montagem/fabricação, quanto durante sua vida útil, para que haja

controle da estabilidade dimensional do componente. No caso dos concretos a determinação dessa propriedade apresenta algumas peculiaridades, pois o módulo de elasticidade é afetado pela natureza, fração volumétrica e características dos constituintes e não obedece a lei de Hooke. A utilização de equações empíricas para avaliar o módulo de elasticidade é aproximada e grosseira, uma vez que a porosidade dos constituintes/propagação de trincas afeta as propriedades, mas não na mesma intensidade ⁽⁵⁾.

Um dos métodos utilizados para a determinação do módulo elástico de concretos refratários é o método da ressonância mecânica de barras, que consiste no estímulo do corpo de prova com frequência variável e tem por objetivo a localização da frequência fundamental e suas harmônicas de vibração natural do corpo, que são suas frequências de ressonância. Através da determinação dessas frequências e por meio de relações matemáticas, podem-se determinar os módulos de Young e de cisalhamento ^(5, 6, 7).

O objetivo desse trabalho foi determinar os módulos de Young, cisalhamento, razão Poisson por ressonância mecânica de barras e módulo de ruptura em amostras de concreto refratário convencional aluminoso antierosivo tratadas termicamente.

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 5,3 %m/m de água foi realizado em uma argamassadeira de laboratório com capacidade nominal de 5 litros, aplicando-se as seguintes etapas: 1 minuto de homogeneização a seco à 60 rpm, 2 minutos após a adição rápida da água e 1 minuto de mistura final à 120 rpm. Foram preparados corpos de prova em forma de barras prismáticas, medindo 25 x 25 x 150 mm³, para avaliação dos módulos de elasticidade, cisalhamento 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 25oC. Após a cura os corpos de prova foram secos por 48 horas a 110oC. Parte das amostras foi apenas secas, parte foram submetidas a tratamento térmico a 650°C e 1000°C por 8 horas com taxa de

aquecimento de 2°C/minuto. As amostras tiveram suas bases retificadas para perfeito alinhamento no equipamento de medida de módulo elástico. As medidas de módulo elástico 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 três primeiros picos de ressonância para o modo de vibração mecânica de torção e de flexão. A identificação dos picos foi realizada por um *software* que calcula em tempo real o módulo de cisalhamento, o módulo de Young e a razão de Poisson. Foram marcados nas amostras os pontos de apoio (0,25* L a partir de cada uma das extremidades) e os pontos de contato do excitador e receptor (0,32*L). As posições do excitador e do receptor são tais que permitem a vibração simultânea flexional e torcional.

As amostras foram analisadas por difração de raios X, em difratômetro Siemens, utilizando radiação Cu-K α , com intervalo angular de 10 a 90°, passo de 0,05°/min. As fases foram identificadas por comparação com as fichas JCPDS, para verificar as possíveis formações e transformações de fases com as temperaturas de tratamentos térmicos que foram submetidas.

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. Os cálculos foram realizados utilizando a equação seguinte ⁽⁸⁾.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (A)$$

Onde:

σ_f é o módulo de ruptura [MPa]

P é a força para fraturar a amostra

L é a distância entre os suportes inferiores[m]

b é a largura da amostra [m]

h é a altura da amostra [m]

Para avaliar a morfologia microestrutural, as amostras fraturadas foram recobertas com um filme fino de carbono e observadas em microscópio LEO modelo 1450 VP, no modo de elétrons secundários.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 mostra os valores obtidos do módulo elástico, cisalhamento Poisson e módulo de ruptura. De acordo com a tabela pode-se observar que não houve variação significativa no módulo de ruptura com a variação de temperatura de tratamento. Porém pode ser observado uma diminuição dos módulos de Young e cisalhamento quando tratada a 650°C com relação as amostras secas a 110°C, e um posterior aumento na temperatura temperatura de 1000°C. Esta variação, embora pequena pode ser atribuída ao rompimento das ligações de hidratação na temperatura de 650°C, que resulta na diminuição das propriedades mecânicas e a formação das ligações cerâmicas de sinterização que ocorrem em temperaturas mais elevadas e aumentam as propriedades mecânicas do concreto.

Tabela 1. Resultados do módulo elástico, cisalhamento Poisson e módulo de ruptura para as temperaturas de tratamento térmico.

| Temperatura de tratamento | Módulo de Ruptura | Módulo de Young | Módulo de Cisalhamento | Poisson |
|---------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|------------|
| 110°C | 7,41 ± 0,69 | 35,38 ± 4,3 | 15,59 ± 1,37 | 0,13±0,046 |
| 650°C | 8,78 ± 0,01 | 33,39 ± 0,54 | 14,55 ± 1,34 | 0,10±0,015 |
| 1000°C | 12,59 ± 0,05 | 39,67 ± 1,34 | 17,61 ± 0,32 | 0,12±0,032 |

As Figuras 1, 2 e 3 mostram os difratogramas de raio X das amostras tratadas nas temperaturas: 110, 650 e 1000°C, respectivamente. De acordo com o estudo preliminar das amostras de concreto aluminoso antierosivo foi possível detectar presença de alumina (coríndon) e possivelmente a presença de tridimita . Isso já era esperado tendo em vista que o concreto utilizado tem em sua composição aproximadamente 80% de alumina. Não foi observada a presença de hidratos em nenhum dos difratogramas talvez isto se deva ao fato da pouca quantidade de cimento do concreto que consequentemente resultou em pouca quantidade de hidratos que não foi detectada pelo equipamento. Um estudo mais aprofundado deverá ser realizado futuramente para chegar a conclusões mais consistentes com relação as fases presentes, com a utilização de outras ferramentas.

Comparando os difratogramas obtidos pode-se observar que não houve transformações de fases nas temperaturas de tratamento utilizadas neste trabalho, desta forma a variação dos módulos de Young e cisalhamento não podem ser atribuídas a transformação de fases.

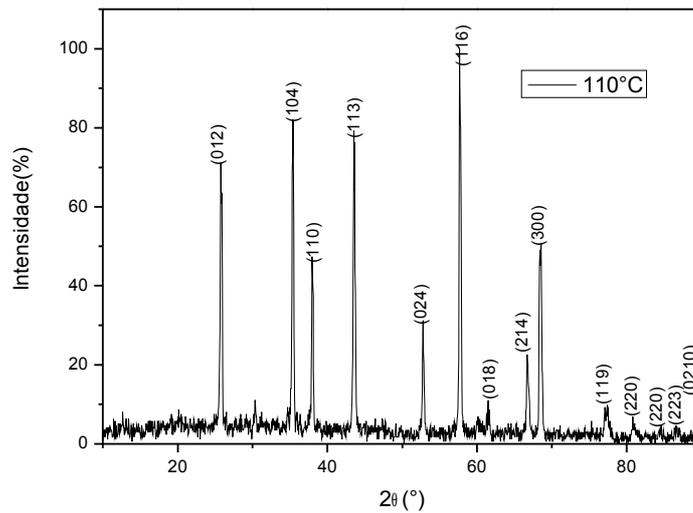


Figura 1. Difratograma de raio X do concreto refratário convencional aluminoso antierrosivo seco a 110 °C.

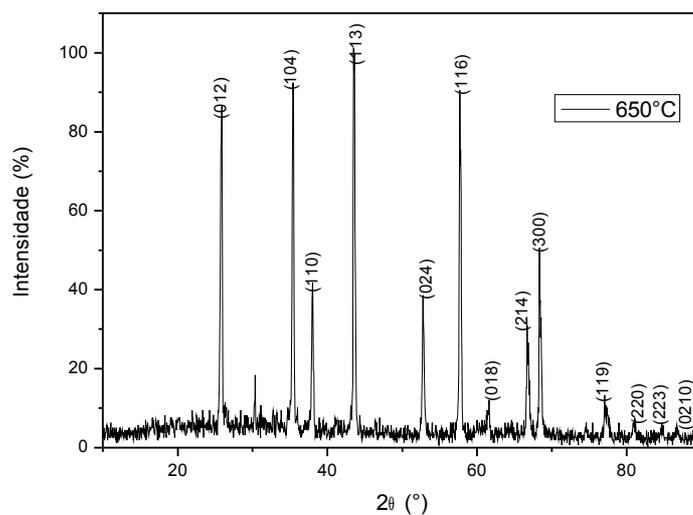


Figura 2. Difratograma de raio X do concreto refratário convencional aluminoso antierrosivo tratado a 650 °C.

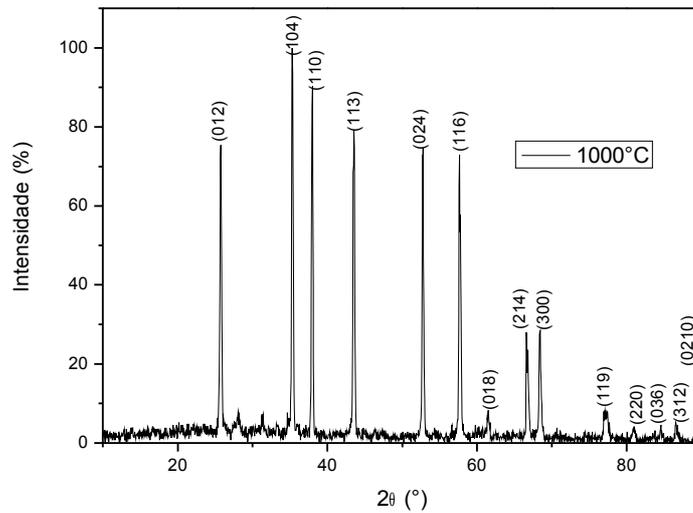


Figura 3. Difratograma de raio X do concreto refratário convencional aluminoso antierosivo tratado a 1000 °C.

A Figura 4 quatro ilustra microestrutura do concreto que é constituída por uma parte mais fina, a matriz e outra mais grossa formada por agregados.

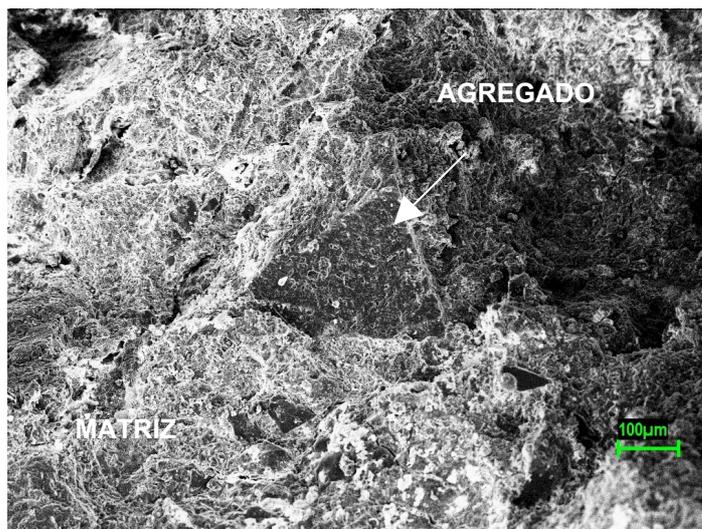


Figura 4. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura do concreto refratário convencional aluminoso antierosivo seco a 110 °C ilustrando as fases presentes no concreto.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam as fotomicrografias obtida por microscopia eletrônica de varredura da região da matriz para as amostras tratadas à 110, 650 e 1000°C, respectivamente. Como se pode observar houve uma variação microestrutural, em conformidade com os resultados obtidos de módulo elástico e com a literatura ⁽⁴⁾.

Na figura 5 podemos observar uma microestrutura de grãos com morfologia esférica e tubular. Na Figura 6, amostra tratada a 650°C, pode-se observar uma mudança nesta microestrutura em relação à amostra apenas seca. Isto pode ser atribuído à quebra das ligações de hidratação o que resultou na diminuição do módulo de Young e de cisalhamento. Na Figura 7, amostra tratada a 1000°C, pode-se observar a formação de grandes agregados com aspecto denso que pode ser atribuído às ligações cerâmicas de sinterização que são formadas nessa temperatura, justificando o posterior aumento nos módulos de Young e de cisalhamento.

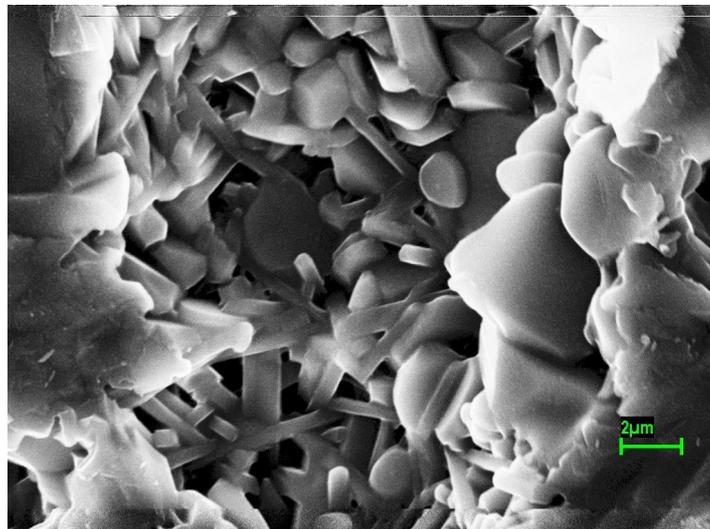


Figura 5. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura do concreto refratário convencional aluminoso antierosivo seco a 110 °C.

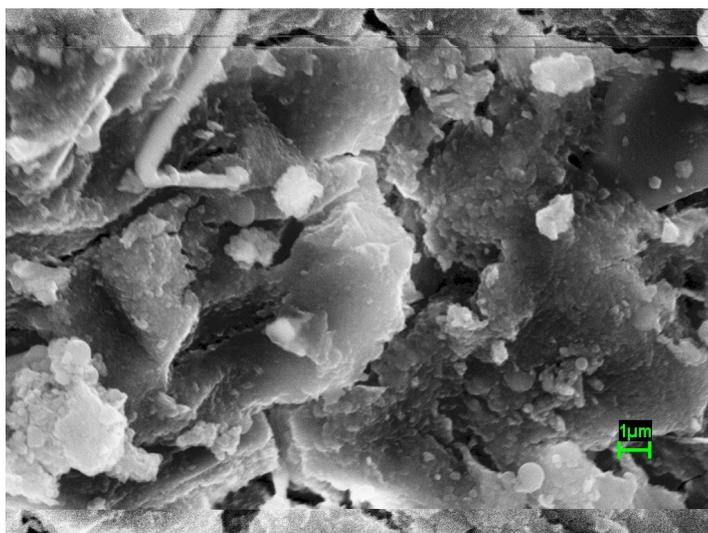


Figura 6. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura do concreto refratário convencional aluminoso antierosivo tratado térmicamente à 650 °C.

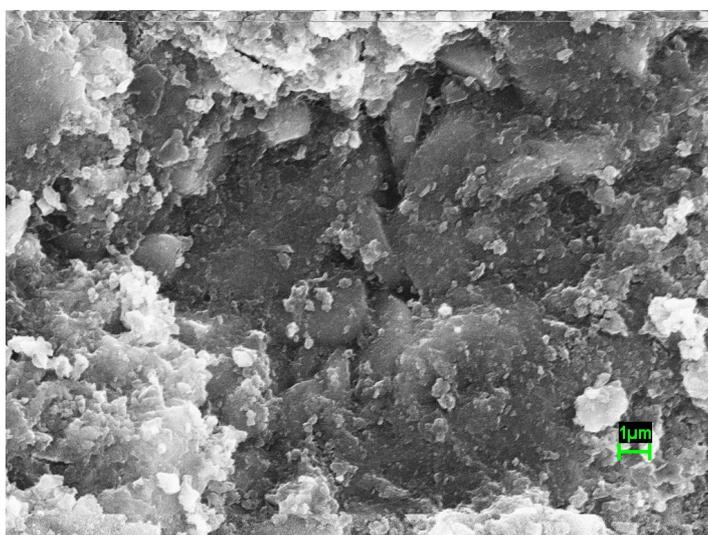


Figura 7. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura do concreto refratário convencional aluminoso antierosivo tratado térmicamente à 1000 °C.

CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a temperatura a temperatura de tratamento térmico influência nas propriedades elásticas do concreto refratário aluminoso antierosivo. Ocorreu uma diminuição dos módulos na temperatura 650°C e um posterior

aumento na temperatura de 1000°C como resultado da quebra dos hidratos formados durante a cura e posterior formação de ligações cerâmicas durante a sinterização.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIA

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. RIBEIRO, S; VIEIRA, J. S. C.; EXPOSITO, C. C. D.; RODRIGUES, J. A. Característica do método da cunha para medida de energia de fratura de materiais cerâmicos. In: 51^o CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, Salvador, BA, 2007. **Anais...** São Paulo, ABC, 2007, p.1-12. Ref. 7-08
3. RODRIGUES, J. A.; BRAULIO, M. A. L. Estudo da cura de concreto refratário pela medida da frequência de ressonância de vibração de amostras na forma de barra. In: 49^o CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, São Pedro, SP, 2005. **Anais...** São Paulo, ABC, 2005, p.1-11. Ref. 8-05
- 4 KAKROUDI, M. G.; YEUGO-FOGAING, E.; GAULT, C.; HOGER, M.; CHOTARD, T. Effect of thermal treatment on damage mechanical behavior of refractory castables: Comparison between bauxite and andalusite aggregates. *Journal of the European Ceramic Society* v. 28, p. 2471-2478, 2008.
- 5 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: 17^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Foz do Iguaçu, PR, 2006

6 RODRIGUES, J.A.; ORTEGA, F. S.; PAIVA, A. E. M; VILLABOIM, E. L. G.;PANDOLFELLI, V. C. Relação entre porosidade e os módulos elásticos de esponjas cerâmicas produzidas via “gelcasting”. **Cerâmica** v.50, n.3, p 209-216,2004

7 PAIVA, A. E. M.; VILLABOIM, E. L.;PILEGGI, R.G.;RAMAL JUNIOR,F.T.; RODRIGUES, J.A.; PANDOLFELLI, V. C. Aplicação da ressonância de barras para estudo da degradação mecânica de concretos refratários afetados por choque térmico. In: 46° CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, São Paulo, SP, 2002. **Anais...** São Paulo, ABC, 2002, p.1-12. Ref. 7-06

8. SANTOS, E. M. B. **Desenvolvimento e caracterização de cerâmicas biocompatíveis a base de zircônia e ítria visando aplicações em próteses**. 2008 120p Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Escola de Engenharia de Lorena, EEL, Lorena.

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE IN THE ELASTIC BEHAVIOR OF
ANTI-EROSIVE HIGH ALUMINA REFRACTORY CONCRETE TREATED 110, 600 e
1000 °C

ABSTRACT

The Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio are important for determining of mechanical properties in materials engineering project. One methods used for obtain the elastic modulus of ceramics materials is the bar resonance. In this work, the Young's and shear modulus, Poisson's ratio and rupture modulus was determined to refractory concretes sample submitted to thermal treatment. Comparing the samples treated at 110 and 650°C, the Young's modulus decrease about 6% while shear and rupture modulus increase 13% and 18 %, respectively. Comparing the samples treated at 110 and 1000 °C, it was noticed increase of 12% and 18 % in the Young's and rupture modulus, respectively and decrease of 7% in the shear modulus. This results show that the properties studied are influenced for thermal treatment condition.

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