

METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ÂNCORAS CERÂMICAS REFRAATÁRIAS UTILIZANDO A TÉCNICA DE ULTRASSOM*

Lucas Antunes Orsini¹
Danilson Gonçalves de Melo e Silva²
Alamar Kasan Duarte³

Resumo

O objetivo do presente trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia de manutenção preventiva que permita estimar a vida útil de âncoras refratárias, mensurada através da evolução do seu módulo de elasticidade com o tempo de operação. Para este trabalho, amostras desses materiais foram submetidas a variações bruscas de temperatura, provocando uma degradação em sua resistência mecânica. Este fato foi avaliado através da alteração do seu módulo de elasticidade, medida indiretamente através da técnica de ultrassom. Posteriormente estes valores foram comparados ao histórico de vida útil das âncoras cerâmicas, de modo a obter um critério que permita prever o seu tempo em serviço. Concluiu-se que a técnica de ensaio de resistência ao choque térmico, aliada às medições ultrassônicas, pode ser adotada para estimar a vida útil de âncoras refratárias.

Palavras-chave: Âncoras Refratárias; Previsão de Vida Útil; Resistência ao Choque Térmico; Manutenção Preventiva.

METHODOLOGY FOR REFRACTORY CERAMIC ANCHORS LIFE TIME PREDICTION BY USING ULTRASOUND TECHNIQUE

Abstract

The aim of this work is to develop a method of preventive maintenance to estimate refractory anchors lifetime measured indirectly by the evolution of its Young's modulus with the time in operation. In order to achieve it, thermal shock resistance tests were performed in some samples causing degradation in its mechanical resistance evaluated by the change in its modulus of elasticity as measured by the ultrasound technique. Later these values were compared with the historic of ceramic anchors lifespan in order to obtain a criterion for predict its lifetime in service. It was concluded the technique of thermal shock resistance allied with ultrasonic technology could be used to predict anchors lifetime.

Keywords: Refractory Anchors; Lifetime Prediction; Thermal Shock Resistance; Preventive Maintenance.

¹ Estudante de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Tecnologia e Engenharia de Processos, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Químico, Doutor, Engenheiro, Tecnologia e Engenharia de Processos, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, Doutor, Engenheiro, Materiais Refratários, Yamagata Consultoria, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento e a determinação das propriedades elásticas são de grande importância para o entendimento da limitação da vida útil de cerâmicas refratárias. Estas propriedades são fundamentais para o projeto, desenvolvimento e controle de qualidade destes materiais. Os seus valores sofrem alterações conforme a composição, o processamento e o dano ocasionado ao produto. As principais propriedades que caracterizam a rigidez elástica dos materiais são o módulo de Young, o módulo de cisalhamento e a razão de Poisson. Estas propriedades são importantes na determinação da resistência ao dano por choque térmico e na previsão da vida útil das âncoras refratárias, objeto do presente trabalho. O módulo de Young é um parâmetro mecânico que indica a rigidez de um material sólido, podendo ser definido pela lei de Hooke conforme Equação 1.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Onde:

- σ é a tensão (Pa)
- E é o módulo de elasticidade ou módulo de Young (Pa)
- ε é a deformação específica (adimensional)

Essa lei descreve matematicamente o comportamento experimental de determinados materiais, nos quais a deformação (ε) é proporcional à tensão (σ). Quando esta tensão axial (σ) é aplicada em um corpo gerando uma deformação elástica, surge uma razão negativa entre as tensões lateral e axial, a qual é definida como razão ou coeficiente de Poisson (ν), segundo a Equação 2.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2)$$

Onde:

- ν é o coeficiente ou razão de Poisson (adimensional)
- ε é a deformação específica (adimensional)

Para materiais isotrópicos, isto é, aqueles que apresentam as mesmas propriedades físicas independente da direção cristalográfica, os módulos de cisalhamento e elasticidade estão correlacionados entre si e com o coeficiente de Poisson, de acordo com a Equação 3.

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3)$$

Onde:

- ν é o coeficiente ou razão de Poisson (adimensional)
- E é o módulo de elasticidade ou módulo de Young (Pa)
- G é o módulo de cisalhamento (Pa)

Os métodos de análise do módulo de elasticidade podem ser divididos em duas classes: métodos estáticos e métodos dinâmicos. Os métodos estáticos consistem em solicitar mecanicamente um corpo por meio de aplicação de tensão, podendo ser

de tração, compressão, flexão ou torção, com baixas velocidades de aplicações de carga, gerando assim um diagrama de tensão-deformação. Os ensaios mais usuais em cerâmicas refratárias são os de compressão ou flexão, sendo importante salientar que na ausência de linearidade do comportamento dos materiais, o método estático é apenas uma aproximação grosseira do módulo de Young.

Dentre as técnicas experimentais dinâmicas de contato podem-se destacar a de pulso-eco, a de ressonância, a Tandem e a por transparência. Na primeira técnica, o cabeçote age como emissor e receptor, sendo mantido somente em um lado da peça de ensaio. Este ensaio é muito utilizado em materiais metálicos. Já no método de ressonância, a frequência fundamental de ressonância do elemento estrutural (prismático ou cilíndrico) é obtida por meio de vibrações longitudinais, transversais ou torcionais. Esta prática se tornou obsoleta, sendo substituída pela anterior. Na técnica Tandem empregam-se dois cabeçotes angulares, geralmente de 45°, unidos por uma haste para a execução do ensaio. Por fim, tem-se a técnica por transparência, na qual se utilizam dois cabeçotes, um emissor da energia ultrassônica e o outro receptor, que percorre a amostra avaliada. (1)

A utilização de ensaios de ultrassom como técnica preditiva é bastante consolidada para metais, mas ainda ocorre em estágio experimental para materiais cerâmicos. Todavia, resultados satisfatórios vêm sendo obtidos. Modelos teóricos aplicados através de simulações computacionais demonstraram a possibilidade de se medir as propriedades de colunas de concreto por meio das técnicas de pulso-eco e de transparência. (2) Além disso, foi demonstrado que por meio da técnica de ultrassom por transparência é possível medir a tensão de escoamento em concretos. (3)

A ideia de correlacionar a vida útil de um material cerâmico com a sua velocidade de ultrassom foi estudada para concretos devido à necessidade de se avaliar o nível de degradação com o tempo e concluiu-se que a velocidade ultrassônica medida tanto através de ondas transversais (usadas na técnica de pulso-eco) como de ondas longitudinais (usadas na técnica de transparência) está relacionada à resistência à compressão deste material. (4) Como esta resistência diminui ao longo do tempo de vida do material, conclui-se que é possível encontrar uma relação entre a vida útil de um material e a sua velocidade de propagação do ultrassom.

Teoricamente, foi determinada uma relação entre a velocidade de ultrassom em um material cerâmico e o seu módulo de elasticidade dinâmico. (5) Portanto, uma vez que a velocidade de ultrassom está correlacionada à vida útil de um material e também ao seu módulo de elasticidade, verificou-se a possibilidade de se desenvolver uma metodologia de manutenção preventiva que permita estimar a vida útil de âncoras refratárias através da medição da evolução ao longo do tempo do seu módulo de elasticidade por meio da velocidade ultrassônica. Além disso, já foi estudado que a velocidade de ultrassom em materiais refratários diminui com o aumento do número de ciclos de choque térmico. (6) Por este motivo, este trabalho optou pela análise da variação do módulo de elasticidade, relacionado à velocidade ultrassônica no material, em função do número de ciclos de choque térmico.

Este trabalho optou, também, pela utilização do método da transparência para medição da velocidade de ultrassom e conseqüentemente para a determinação do módulo de elasticidade por ser uma prática consolidada no meio científico para materiais refratários. Através desta técnica, em conjunto com a realização de ensaios de choque térmico, foi possível correlacionar os resultados obtidos com o histórico de vida útil de âncoras refratárias instaladas em fornos de reaquecimento, permitindo o desenvolvimento de uma metodologia a ser utilizada na previsão do tempo de serviço dos materiais citados no desenvolvimento deste estudo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

O lote de âncoras cerâmicas analisado no presente estudo foi composto por âncoras a serem instaladas em um forno de reaquecimento. A especificação técnica dessas âncoras é dada na Tabela 1.

Tabela 1. Especificação técnica das âncoras cerâmicas

Característica	Unidade	Zona de Aquecimento	Zona de Encharque
Análise Química	-	Ligado a fosfato e queimado	Ligado a fosfato e queimado
Classe	-	60,0% de Al ₂ O ₃	70,0% de Al ₂ O ₃
Al ₂ O ₃	%	> 60,0	> 70,0
SiO ₂	%	28,0	20,0
Fe ₂ O ₃	%	< 1,70	< 1,70
TiO ₂	%	< 2,40	< 2,40
Na ₂ O	%	< 0,40	< 0,30
K ₂ O	%	< 0,60	< 0,40
P ₂ O ₅	%	> 2,00	> 2,00
Massa específica aparente	g/cm ³	> 2,40	> 2,50
Porosidade aparente	%	< 20,0	< 20,0
Resistência à compressão a frio	MPa	70 a 120	70 a 120
Resistência à flexão a quente (1200 °C x 60 min)	MPa	> 7,0 (3 pontos)	> 7,0 (3 pontos)
Resistência ao choque térmico (1000 °C x água)	Ciclos	> 30,0	> 30,0

O primeiro passo na elaboração da metodologia para previsão da vida útil de âncoras refratárias foi a avaliação da integridade física das âncoras a serem instaladas. Para isso, foi adotada a técnica de ultrassom com base na norma BS EN 12504-4-2004. (7) Utilizou-se o método direto de inspeção com o equipamento V-Meter MK IV – NDT da James Instruments, cabeçotes de 150 kHz e o gel Mercur como acoplante. As medições das velocidades sônicas foram realizadas posicionando cada um dos transdutores (um emissor e um receptor) nas faces opostas (cabeça e base) até que fossem obtidos resultados estáveis da velocidade de propagação do ultrassom.

Uma vez feita essa inspeção, foram identificadas cinco âncoras defeituosas de um total de 664, quatro por apresentarem resultados instáveis de velocidade e uma por estar abaixo da faixa de aceitação, definida como sendo a diferença da média de velocidades mensuradas para todas as âncoras e do desvio padrão encontrado. As âncoras com defeito estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Âncoras defeituosas

Posição	Lote	Número	Velocidade de Ultrassom	Faixa de Aceitação
Teto	2 (160 peças)	136	Variável	> 3250 m/s
Teto	2 (160 peças)	145	Variável	> 3250 m/s
Teto	3 (116 peças)	243	Variável	> 3250 m/s
Parede	4 (128 peças)	29	3162 m/s	> 3250 m/s
Parede	4 (128 peças)	53	Variável	> 3250 m/s

Em seguida, foram retirados corpos de prova de 50 mm por 50 mm de uma âncora sem defeitos (aprovada) e também das cinco âncoras defeituosas (rejeitadas). Todas as âncoras foram cortadas em duas metades e, para cada metade, foram retirados dois corpos de prova de cada região da âncora, identificadas por cabeça (Ca), centro (Ce) e base (Ba), totalizando 12 corpos de prova por âncora (Figura 1). Estes corpos de prova (Figura 2) foram submetidos ao ensaio de resistência ao choque térmico, sendo aquecidos até 1000 °C e então resfriados subitamente em água corrente até a temperatura ambiente em cada ciclo. O módulo de elasticidade de cada amostra foi encontrado para 0, 2, 6 e 10 ciclos de choque térmico. O seu valor foi definido por meio da Equação 4, que correlaciona a velocidade ultrassônica com o módulo de elasticidade dinâmico. (5)

$$E = \rho \cdot V_L^2 \cdot \left[(1 + \mu) \cdot \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} \right] \quad (4)$$

Onde:

- E é o módulo de elasticidade da amostra (Pa)
- ρ é a densidade da amostra (kg/m³)
- V_L é a velocidade de propagação do ultrassom na amostra (m/s)
- μ é o Coeficiente de Poisson (adimensional)

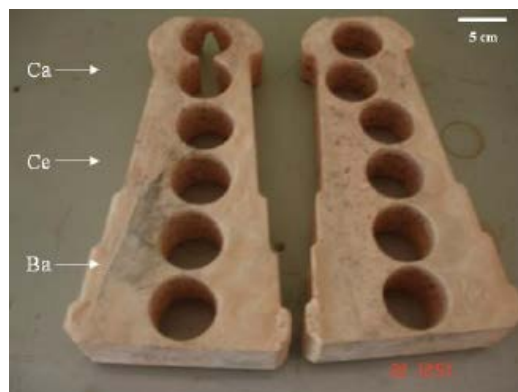


Figura 1. Locais de retirada das amostras.



Figura 2. Amostras das âncoras.

Com base no histórico de vida útil de âncoras refratárias de fornos de reaquecimento de indústrias siderúrgicas, assumiu-se uma correlação linear entre a resistência ao choque térmico e a expectativa de vida da âncora. Desta maneira, comparando-se os resultados da resistência ao choque térmico da âncora aprovada com os valores das âncoras rejeitadas pelos critérios de aceitação foi possível prever a vida útil de todos os materiais avaliados.

2.2 Resultados

Através dos dados obtidos pela Equação 4, foi possível correlacionar o número de ciclos térmicos ao módulo de elasticidade (Figura 3) por meio da Equação 5. As amostras utilizadas foram de uma âncora nova e aprovada pelo critério de aceitação.

$$E = -0,077n + 22 \quad (5)$$

Onde:

- E é o módulo de elasticidade da amostra (GPa)
 n é o número de ciclos de choque térmico (adimensional)

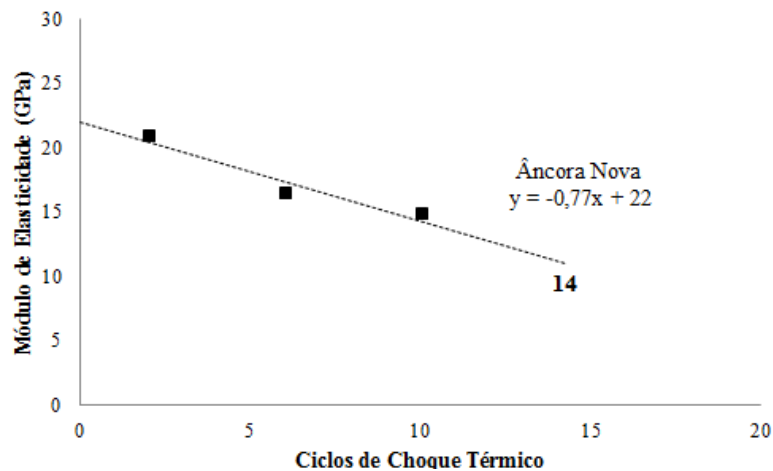


Figura 3. Módulo de elasticidade de uma âncora aprovada pelo critério de aceitação em função do número de ciclos térmicos.

A curva inicial de choque térmico (antes do uso) será usada como padrão, onde se aceita como final da vida útil um módulo de elasticidade residual de 50%. Através da análise do histórico de vida útil de âncoras refratárias, determinou-se que uma âncora aprovada pelo critério de aceitação tem uma vida estimada de 15 anos. Desta maneira, considera-se que um ano de serviço da âncora corresponde a aproximadamente um ciclo térmico. O mesmo procedimento foi repetido nas âncoras rejeitadas. Os resultados médios das amostras estão descritos na Figura 4 e também na Tabela 3.

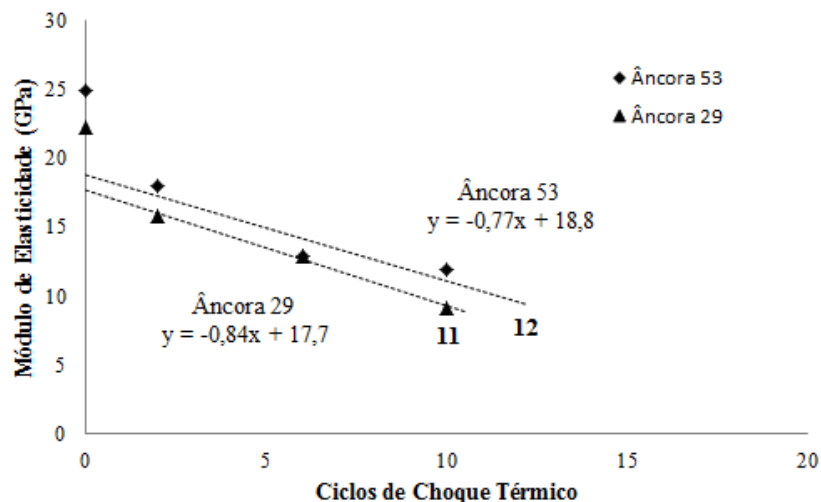


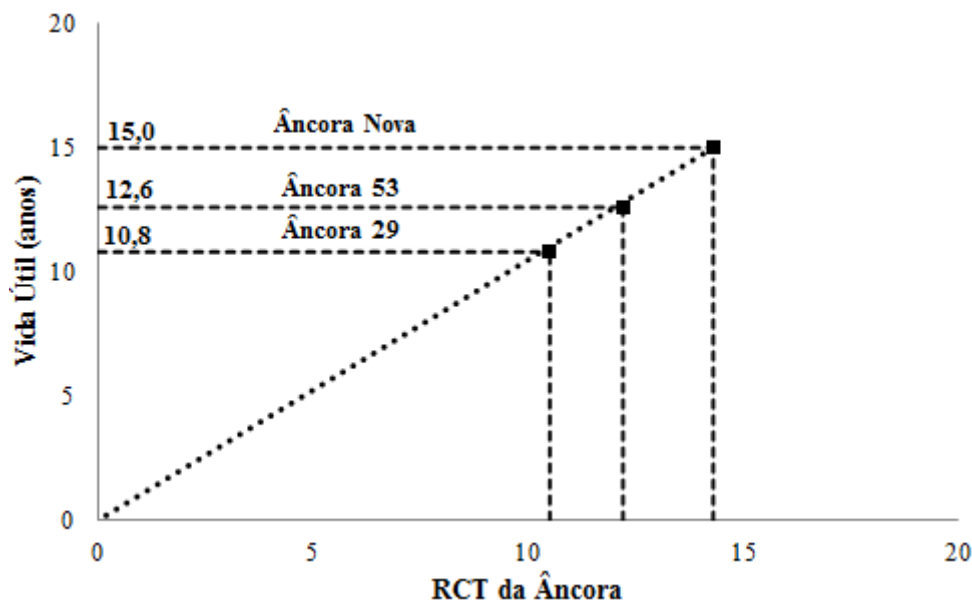
Figura 4. Módulo de elasticidade das âncoras defeituosas em função do número de ciclos térmicos.

Tabela 3. Módulo de elasticidade das âncoras defeituosas em função do número de ciclos térmicos

Posição	Número	Módulo de Elasticidade (0 Ciclos)	Módulo de Elasticidade (2 Ciclos)	Módulo de Elasticidade (6 Ciclos)	Módulo de Elasticidade (10 Ciclos)
Teto	136	20,1 GPa	0,0 GPa	0,0 GPa	0,0 GPa
Teto	145	21,3 GPa	0,0 GPa	0,0 GPa	0,0 GPa
Teto	243	29,1 GPa	0,0 GPa	0,0 GPa	0,0 GPa
Parede	29	22,3 GPa	15,8 GPa	12,9 GPa	9,1 GPa
Parede	53	24,9 GPa	18,0 GPa	12,9 GPa	11,9 GPa

As âncoras de teto apresentaram módulo de elasticidade com valor 0 GPa após serem submetidas a dois ciclos térmicos, o que indica a ocorrência de fratura catastrófica. Já as âncoras de parede apresentaram melhor comportamento, o que pode ser explicado por apresentarem defeitos internos menos severos.

Partindo da consideração que uma âncora nova pode ser submetida a aproximadamente 14 ciclos e tem uma vida estimada de 15 anos, foi possível prever a vida útil das âncoras 29 e 53 por meio de uma relação linear (Figura 5). A vida útil da âncora 53 foi estimada em 12,6 anos e a da âncora 29 em 10,8 anos.

**Figura 5.** Vida útil das âncoras defeituosas em função do número de ciclos térmicos.

2.3 Discussão

O uso da metodologia para previsão da vida útil de âncoras refratárias utilizando o ensaio de resistência ao choque térmico aliado à técnica de ultrassom permitiu comparar o tempo de serviço de âncoras defeituosas como de âncoras novas. Esta previsão é de grande importância, pois demonstra que, caso as âncoras rejeitadas pelo critério de aceitação fossem instaladas, provavelmente estas iriam falhar antes do período determinado, o que poderia causar paradas não programadas.

Outra aplicabilidade importante deste método é que, ao estimar a vida das âncoras, é possível prever quando o revestimento deve ser trocado, o que reduz o número de paradas não programadas e, conseqüentemente, o risco de segurança dos trabalhadores e prejuízos financeiros decorrentes da perda de produtividade.

Foi possível determinar que as âncoras que apresentaram trincas internas em uma maior proporção provavelmente iriam falhar em menos de dois anos. Também

foram previstos tempos de serviço de 12,6 anos para a âncora 53 e 10,8 anos para a âncora 29.

Uma limitação relevante deste método é a necessidade da realização de ensaios destrutivos ao longo da campanha do equipamento, ou seja, é preciso retirar amostras das âncoras, danificando-as permanentemente. Isto se faz necessário com o objetivo de se desenvolver um histórico, com informações referentes aos resultados de resistência ao choque térmico juntamente a técnica de ultrassom. Desta maneira, em médio prazo seria possível correlacionar esses parâmetros e obter uma estimativa razoável da vida útil das âncoras, sem que para isso fosse necessário a realização de ensaios destrutivos.

Cabe ressaltar que os dados históricos de referência de vida útil das âncoras refratárias foram utilizados apenas para demonstrar a possibilidade de desenvolvimento de uma técnica semiquantitativa de manutenção preventiva para fornos de reaquecimento. A metodologia descrita neste documento não enfatizou uma determinada zona (pré-aquecimento, aquecimento ou encharque) e/ou uma região pré-definida (parede ou teto) e/ou mesmo as condições operacionais do equipamento, para prever a real vida útil das âncoras refratárias.

3 CONCLUSÃO

O presente trabalho concluiu que, através do ensaio de resistência ao choque térmico aliado à técnica de ultrassom, é possível determinar a vida útil de âncoras refratárias por meio de uma relação com o seu histórico em serviço. Tal metodologia permite uma melhor programação das paradas do forno, evitando que os revestimentos sejam substituídos com muita antecedência e/ou tardiamente. Além disso, este método permite evitar que âncoras defeituosas sejam instaladas nos equipamentos industriais, evitando futuros problemas de segurança para os trabalhadores e também de produtividade dos fornos. Como melhorias futuras, pode-se citar a possibilidade de relacionar grandes volumes de dados a respeito da previsão da vida útil com os defeitos encontrados, de modo a possibilitar a estimativa da vida sem a necessidade de se utilizar técnicas destrutivas. Além desse ponto de melhoria, sugere-se desenvolver a técnica de pulso-eco, comumente utilizada para materiais metálicos.

Agradecimentos

À Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., pelo incentivo à pesquisa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- 1 Martin CG. Ultrassom. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção; 2012.
- 2 Roa-Rodriguez G, Aperador W, Delgado A. Simulation of non-destructive testing methods of ultrasound in concrete columns. International Journal of Electrochemical Science. 2013; 8(11): 12226-12237.
- 3 Lin J, Zhao MJ, Wu D. Method for non-destructively measuring working stress of concrete. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2014; 19(C): 657-666.
- 4 Kobori O, Taniguchi Y, Udagawa Y, Hirano M. Aged concrete strength and propagation velocity ratio of longitudinal and transverse wave. In: Anais da 16th World Conference on NDT, 2004; Montreal, Canadá.

- 5 Costa RM. Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV [tese]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG; 2004.
- 6 Boccaccini DN, Romagnoli M, Kamseu E, Veronesi P, Leonelli C, Pellacani GC. Determination of thermal shock resistance in refractory materials by ultrasonic pulse velocity measurement. Journal of the European Ceramic Society. 2007; 27(2): 1859-1863.
- 7 British Standard. BS EN 12504-4:2004: Testing concrete – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. London, Reino Unido, 2004, 18p.