

METODOLOGIA PARA INSPEÇÃO DE ÂNCORAS REFRATÁRIAS UTILIZANDO A TÉCNICA DE ULTRASSOM*

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

Resumo

O objetivo do presente trabalho consiste na utilização de uma técnica de inspeção de âncoras refratárias através do ensaio de ultrassom, visando determinar um critério para aceitação ou rejeição de lotes. Para este estudo, foi utilizado o método direto de inspeção por ultrassom com cabeçotes de 150 kHz em 664 âncoras refratárias a serem instaladas em um forno de reaquecimento de uma usina siderúrgica. A metodologia permitiu a avaliação dos lotes com base em um plano de aceitação. As peças rejeitadas foram segregadas e avaliadas em laboratório, comprovando a presença de defeitos. Concluiu-se que a técnica de ultrassom pode ser utilizada para a inspeção de âncoras refratárias, evitando possíveis falhas catastróficas no revestimento e paradas não programadas.

Palavras-chave: Ultrassom; Âncoras Refratárias; Manutenção Preventiva.

METHODOLOGY FOR INSPECTION OF REFRACTORY ANCHORS USING THE ULTRASOUND TECHNIQUE

Abstract

The aim of this work is to develop a technique for inspection of refractory anchors using ultrasound equipment in order to figure out a criterion to accept or to reject batches. In this work, it was used the direct method for ultrasound inspection by using transducers of 150 kHz in 664 refractory anchors to be installed in a reheating furnace of a steel plant. This methodology allowed the evaluation of batches based on an acceptance plan. The rejected anchors were evaluated in a selective inspection method in laboratory, proving the existence of defects. It was concluded that the ultrasound technique can be used as an inspection for refractory anchors, avoiding catastrophic failures in the lining and non-planned outages.

Keywords: Ultrasound; Refractory Anchors; 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 objetivo deste trabalho consiste na determinação de uma técnica de inspeção de âncoras refratárias, empregando o ensaio de ultrassom e visando à determinação de um critério para aceitação ou rejeição por lote. Embora muito utilizada na construção civil para análise da integridade estrutural de concretos, esta tecnologia ainda é pouco empregada na análise de materiais refratários pelas indústrias siderúrgicas.

A utilização de novas técnicas de análise de desempenho de materiais refratários é particularmente importante para as usinas siderúrgicas, uma vez que estes materiais estão presentes em praticamente todo o seu processo produtivo. Basicamente, todos os equipamentos dentro de uma usina siderúrgica empregam materiais refratários, tais como altos fornos, panelas de aço e fornos de reaquecimento.

Os fornos de reaquecimento são considerados equipamentos críticos da área da laminação e a sua principal função é a de aumentar a temperatura do aço, na forma de placa, lingote ou tarugo, tipicamente entre 900 °C e 1300 °C, até que este seja suficientemente deformável através do processo de laminação, adquirindo formas, seções e tamanhos desejados. Esses equipamentos estão presentes em usinas integradas, semi-integradas ou até mesmo nas unidades que não possuem aciaria. Esses fornos são revestidos com materiais refratários e podem ser classificados em empurradores, soleira caminhante, viga caminhante e soleira rotativa. (1)

Os fornos de reaquecimento (Figura 1) são compostos por um sistema para enfiar e desenfiar o material, um sistema de suporte e transporte (vigas ou soleira), um sistema para coleta e transporte de gases, parede e/ou teto com queimadores e material refratário revestindo as paredes, o teto e a soleira para proteger a estrutura do forno e confinar os gases quentes em seu interior. Os custos com materiais refratários em um forno de reaquecimento são relativamente baixos quando comparados ao valor total do projeto. Todavia, a sua falha leva à interrupção da produção, o que afeta financeiramente a usina de maneira significativa. O projeto refratário de um forno deve levar em conta as temperaturas máximas internas e externas do forno, o estado de conservação do equipamento, o tempo disponível para se realizar a manutenção, os custos envolvidos e a dificuldade de aplicação. Esses fornos são comumente divididos em três zonas: pré-aquecimento (de 800 °C a 1000 °C), aquecimento (1000 °C a 1200 °C) e encharque (1200 °C a 1300 °C). (2)

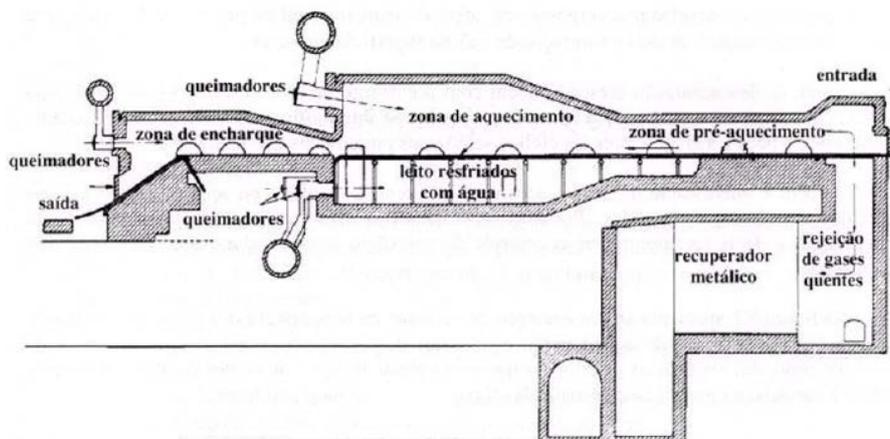


Figura 1. Esquema de forno de reaquecimento. (3)

A vida útil do revestimento refratário dos fornos depende de inúmeros fatores, dentre os quais é possível citar a concepção do projeto, as condições de operação, a qualidade do material instalado, os cuidados durante a etapa de montagem, a frequência da manutenção e o local em que os refratários estão instalados (isto é, teto, soleira ou parede e zonas de pré-aquecimento, aquecimento ou encharque).

A montagem do revestimento das paredes e do teto de fornos de reaquecimento é, em geral, feita com o auxílio de âncoras metálicas ou cerâmicas (Figura 2) que auxiliam na estabilidade da estrutura. As âncoras cerâmicas costumam ser utilizadas em fornos que atingem temperaturas superiores a 1100 °C e cujo revestimento possui espessura superior a 200 mm, como é o caso dos fornos de reaquecimento.

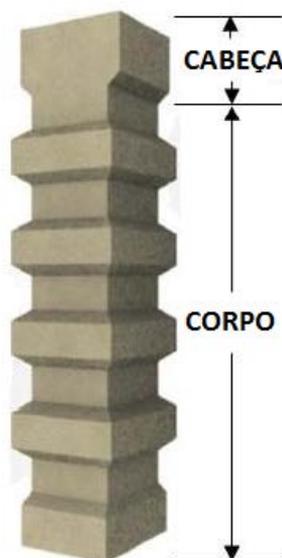


Figura 2. Modelo de âncora cerâmica. (4)

A falha de âncoras refratárias é crítica e pode levar ao comprometimento da estabilidade dos revestimentos refratários. Em casos mais severos, a falha desses componentes pode levar a queda de tetos e paredes, o que possui consequências catastróficas tanto para a segurança dos trabalhadores quanto para a produção. Essas falhas são provocadas por diversos fatores, dentre os quais pode-se citar as oscilações da temperatura interna do forno. Estas variações térmicas geram reduções na resistência mecânica e no módulo de elasticidade das âncoras cerâmicas, podendo ocasionar a sua fratura catastrófica e, conseqüentemente, paradas não programadas no processo produtivo.

Desta forma, por serem componentes críticos, torna-se necessário e imprescindível o desenvolvimento de uma metodologia para avaliar a integridade física das âncoras cerâmicas antes da sua instalação em fornos de reaquecimento. Por este motivo, o objetivo do presente trabalho consiste no desenvolvimento de uma técnica não destrutiva para o controle de qualidade destes materiais refratários.

2 DESENVOLVIMENTO

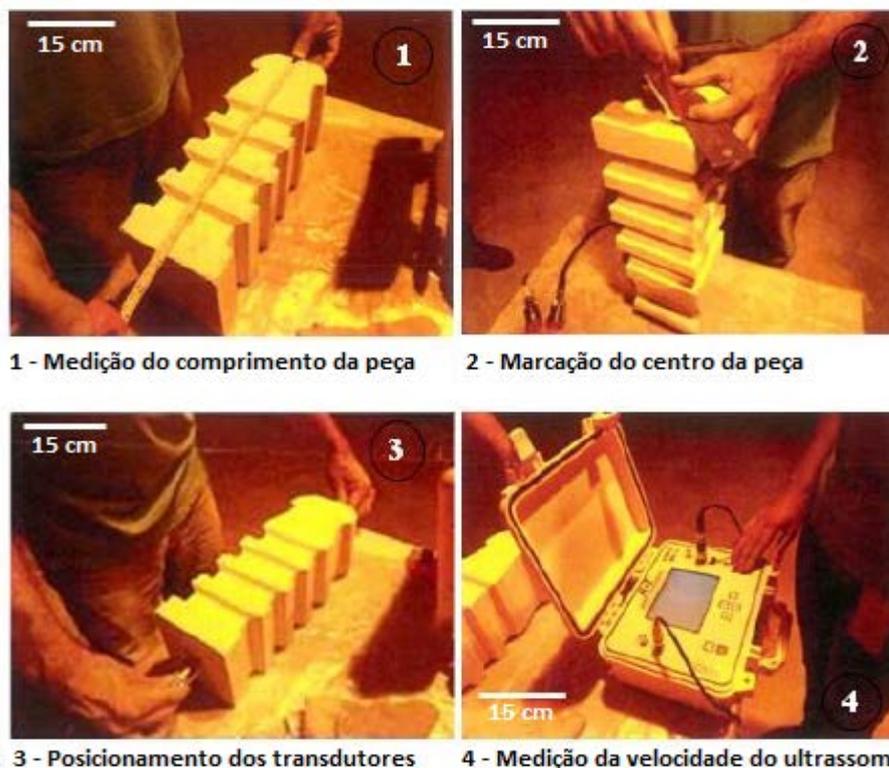
2.1 Materiais e Métodos

O lote de âncoras cerâmicas analisado no presente estudo era 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

A inspeção das âncoras por meio da técnica de ultrassom foi feita com base na norma BS EN 12504-4-2004. (5) Para a realização deste procedimento, utilizou-se o método direto de inspeção com o equipamento V-Meter MK IV – NDT da James Instruments, cabecotes de 150 kHz e o gel Mercur como acoplante (Figura 3). 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.

**Figura 3.** Procedimento utilizado para ensaio por ultrassom.

A partir da medição da velocidade de propagação do ultrassom nas âncoras, foi possível determinar um critério de aceitação/rejeição para os lotes. Este critério foi definido com base na norma ABNT NBR ISO 5022. (6) Como as âncoras são componentes críticos dos fornos, todas as peças foram testadas.

O primeiro passo para utilização do critério é o cálculo do Índice de Qualidade (IQ), que pode ser feito a partir do Limite Superior de Especificação (LSE), isto é, a maior velocidade encontrada (Equação 1) ou a partir do Limite Inferior de Especificação (LIE), isto é, a menor velocidade encontrada (Equação 2).

$$IQ = \frac{(LSE - \bar{X})}{\sigma} \quad (1)$$

$$IQ = \frac{(\bar{X} - LIE)}{\sigma} \quad (2)$$

Onde:

- IQ é o Índice de Qualidade
- \bar{X} é a média aritmética da velocidade medida em todas as âncoras (m/s)
- σ é o desvio padrão da velocidade medida em todas as âncoras (m/s)
- LSE é a maior velocidade medida em todas as âncoras (m/s)
- LIE é a menor velocidade medida em todas as âncoras (m/s)

O próximo passo consiste em utilizar o plano de amostragem simples com um limite unilateral fixado para valores individuais, desvio padrão desconhecido e com um nível de qualidade de aceitação (NQA) de 4% (Tabela 2). Para a definição destas premissas foi-se utilizada à norma ABNT NBR ISO 5022. (6)

Tabela 2. Fator de Aceitação K

Tamanho do Lote		Tamanho da Amostra	Fator de Aceitação (K)
Peças (N)	Massa (t)		
Até 2.000	Até 10	6	0,93
2.001 a 10.000	11 a 50	9	1,08
10.001 a 20.000	51 a 100	18	1,23
20.001 a 40.000	101 a 200	26	1,31
40.001 a 60.000	201 a 300	35	1,36
60.001 a 100.000	301 a 500	44	1,40
Acima de 100.000	Acima de 500	53	1,43

A regra de decisão do critério consiste em aceitar o lote se $IQ \geq K$ e rejeitar se $IQ < K$. É importante ressaltar que esse critério é utilizado para aceitação de lotes, mas a inspeção por meio do ultrassom deve ser feita em todas as âncoras, de modo a descartar as defeituosas. Como o número de peças foi inferior a 2000, o fator de aceitação adotado foi igual a 0,93.

O último e terceiro passo é determinar a velocidade inferior de aceitação (VIE), abaixo da qual as âncoras devem ser descartadas. Este critério foi definido como sendo a diferença da média de velocidades mensuradas para todas as âncoras e do desvio padrão da amostra (Equação 3).

$$VIE = \bar{X} - \sigma \quad (3)$$

Onde:

- VIE é a velocidade inferior de aceitação (m/s)
 \bar{X} é a média aritmética da velocidade medida em todas as âncoras (m/s)
 σ é o desvio padrão da velocidade medida em todas as âncoras (m/s)

Cabe ressaltar que, caso uma âncora inspecionada tenha velocidade acima da velocidade inferior de aceitação, mas apresente algum defeito visualmente detectável, ela também deve ser descartada, sendo ambas as avaliações complementares e imprescindíveis.

2.2 Resultados

Foram testados seis lotes de âncoras refratárias totalizando 664 âncoras divididas em 312 âncoras novas de teto e 352 âncoras novas de parede a serem instaladas em um forno de reaquecimento. Todas as âncoras foram numeradas e inspecionadas por meio da metodologia supracitada. Os dados dos ensaios foram utilizados para obtenção do Índice de Qualidade e definição da aceitação ou não dos lotes de âncoras de teto (Tabela 3) e de parede (Tabela 4).

Tabela 3. Critério de aceitação de lotes de âncoras refratárias de teto

Lote	1	2	3
Número de peças	33	160	119
Fator de Aceitação K	0,93	0,93	0,93
Velocidade média (m/s)	4631	3612	4403
Limite Inferior Mensurado LIE (m/s)	3750	3042	3718
Desvio padrão (m/s)	458	146	459
Índice de Qualidade (IQ)	1,92	3,90	1,49
Critério de Aceitação (IQ ≥ K)	Aceitar	Aceitar	Aceitar

Tabela 4. Critério de aceitação de lotes de âncoras refratárias de parede

Lote	4	5	6
Número de peças	128	100	124
Fator de Aceitação K	0,93	0,93	0,93
Velocidade média (m/s)	3586	3607	3765
Limite Inferior Mensurado LIE (m/s)	3106	3162	3266
Desvio padrão (m/s)	217	234	267
Índice de Qualidade (IQ)	2,31	1,81	1,87
Critério de Aceitação (IQ ≥ K)	Aceitar	Aceitar	Aceitar

Por fim, a velocidade inferior de aceitação (VIE), abaixo da qual as âncoras devem ser descartadas, foi definida como 3250 m/s a partir da Equação 3.

Todos os lotes foram aceitos com base na metodologia. Através da análise individual das âncoras, descartaram-se cinco peças do total de 664 (Tabela 5), quatro delas por apresentarem uma velocidade de ultrassom variável, indicando uma descontinuidade interna, e uma por apresentar a velocidade inferior ao valor especificado nos critérios de aceitação.

Tabela 5. Âncoras descartadas

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)	234	Variável	> 3250 m/s
Parede	4 (128 peças)	29	3162 m/s	> 3250 m/s
Parede	4 (128 peças)	53	Variável	> 3250 m/s

Estas âncoras descartadas foram separadas para análise em laboratório (Figuras 4, 5, 6, 7 e 8) e foram cortadas na dimensão do comprimento. Esta análise apontou a presença de defeitos e descontinuidades internas, comprovando a suspeita de que possuíam problemas de integridade e que, portanto, deveriam ser descartadas.

**Figura 4.** Âncora de teto 136.**Figura 5.** Âncora de teto 145.



Figura 6. Âncora de teto 243.



Figura 7. Âncora de parede 29.

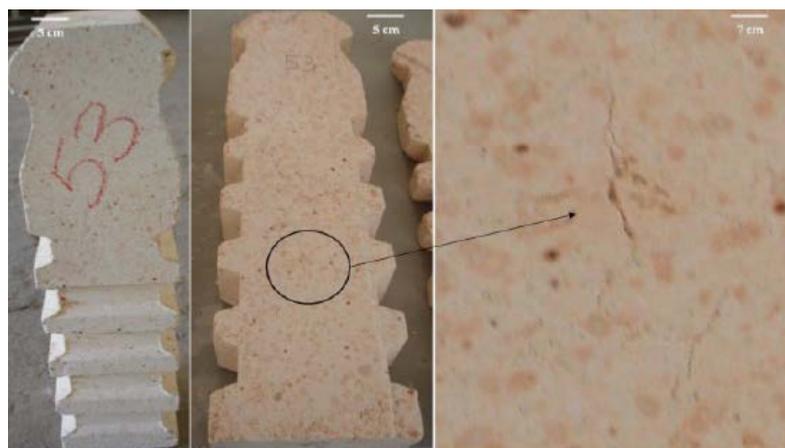


Figura 8. Âncora de parede 53.

2.3 Discussão

O uso da técnica de inspeção por ultrassom em âncoras refratárias a serem utilizadas em fornos de reaquecimento permitiu a aceitação/rejeição dos lotes, através da identificação de defeitos internos, atingindo o objetivo inicial do trabalho.

Esta identificação é de fundamental importância para que sejam instalados somente materiais em boas condições, evitando a falha prematura das âncoras e a consequente desestabilização do revestimento refratário.

Além disso, foi possível provar que a técnica de ultrassom pode ser utilizada para a análise da integridade de materiais refratários, uma vez que as medições apresentaram velocidades similares para âncoras em boas condições e velocidades anômalas para âncoras defeituosas, o que comprova a interferência da integridade da microestrutura na velocidade ultrassônica.

É importante ressaltar que os valores encontrados no presente trabalho podem sofrer alterações em função da microestrutura do material avaliado, uma vez que fatores como porosidade, microtrincas, laminações internas, grau de sinterização, dentre outros, interferem diretamente nos resultados apresentados. Deste modo, os valores expostos neste trabalho não devem ser utilizados como referência para outros estudos, os quais devem seguir a metodologia proposta.

A técnica descrita neste estudo está restrita ao controle de qualidade de produtos refratários, anterior a sua instalação em fornos de reaquecimento, uma vez que se faz necessária a utilização de dois cabeçotes (um emissor e um receptor) posicionados nas faces opostas para a realização das medições. Este fato limita o seu uso como uma ferramenta de manutenção preditiva após esses materiais refratários terem sido montados, pois para o monitoramento da evolução da vida útil das âncoras as inspeções tem que ser realizadas no interior dos equipamentos, onde apenas uma face de medição encontrar-se-á presente.

Uma possibilidade de expansão desta prática como ferramenta de manutenção preditiva para âncoras cerâmicas já instaladas nos fornos é a utilização da técnica de pulso-eco, na qual o cabeçote que age como emissor e receptor é mantido em apenas uma única face para realizar a inspeção. Dentre os tipos de cabeçotes utilizados, principalmente em materiais metálicos, destacam-se o cabeçote normal, no qual está presente apenas um único cristal como transmissor e receptor; o cabeçote duplo cristal, o qual apresenta dois cristais independentes elétrica e acusticamente e o cabeçote *phased array*, que consiste em vários cristais dispostos de forma a emitir e receber sinais individualmente. Este último vem sendo bastante utilizado para inspeção de concreto. (7)

Desta forma, com o uso de técnicas e equipamentos apropriados, seria possível a inspeção das âncoras através do acesso a apenas uma de suas faces, o que permitiria a avaliação destas dentro do forno, com consequente aumento da confiabilidade das inspeções. Com isto, seria possível acompanhar o desempenho desses produtos ao longo do seu ciclo de vida e substituí-los apenas quando necessário. Isso mudaria o paradigma de determinação da vida útil de revestimentos refratários, deixando o aspecto qualitativo em segundo plano e adotando critérios que sejam mais fáceis de serem quantificados.

3 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou que é possível utilizar a técnica de inspeção por ultrassom para avaliar âncoras refratárias, através do desenvolvimento de um critério de aceitação ou rejeição de lotes. Essa metodologia demonstrou ter um alto grau de confiabilidade, uma vez que a técnica permitiu a identificação de âncoras defeituosas, evitando que as mesmas fossem instaladas nos fornos de reaquecimento. Caso estes materiais não conformes tivessem sido instalados, eles poderiam gerar consequências negativas na estabilidade do teto e das paredes.

Como evolução do presente trabalho, sugere-se o desenvolvimento da técnica de pulso-eco para materiais refratários como uma ferramenta de manutenção preditiva para revestimentos já instalados nos fornos. Esta abordagem possibilitaria melhorar a acurácia de inspeção das âncoras durante o seu ciclo de vida. Este aspecto seria de grande valia para as indústrias siderúrgicas, tanto em relação ao quesito de segurança quanto em relação ao quesito financeiro.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 Cotta LS, Rodrigues CG. Avaliação de revestimento refratário no processo siderúrgico. *Exacta*. 2014; 7(1): 185-203.
- 2 Teixeira BOS, Jota FG, Teixeira MH. Modelagem, controle e otimização do processo dos fornos de reaquecimento de placas. *Sba Controle & Automação*. 2007; 18(1): 67-93.
- 3 Machado MLP. Processos de Laminação. IFES [Internet]. 2011 [acesso em 02 mai. 2018]. Disponível em: <https://sites.google.com/site/marcelolucaspmp/disciplina-de-processos-de-conformao>
- 4 Harbison-Walker. Handbook of refractory practice. Moon Township, Pennsylvania, Estados Unidos: Harbison-Walker Refractories Company; 2005.
- 5 British Standard. BS EN 12504-4:2004: Testing concrete – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. London, Reino Unido, 2004, 18p.
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 5022: Produtos refratários conformados — Amostragem e ensaios de aceitação. Rio de Janeiro, 2014, 41p.
- 7 Martin CG. Ultrassom. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção; 2012.