

NOVOS DESENVOLVIMENTOS PARA MEDIDAS DE ESPESSURA NDT EM STAVES DE COBRE E FERRO FUNDIDO NO ALTO-FORNO¹

Afshin Sadri²
Brad Dempsie³
Barry Hyde⁴
Koorosh Mirkhani⁵

Resumo

Desde meados da década de 1900 o uso de Staves para fornecer proteção a carcaça do alto-forno tem aumentado constantemente aliado a um esforço para prolongar a vida útil da campanha do forno. Um stave consiste em um lingote sólido ou uma placa fabricada composta de ferro fundido ou de cobre e contendo vários canais de resfriamento de água integrados. Coletivamente, os staves formam um revestimento interno no forno para proteger e garantir sua integridade. Os locais exatos variam de projeto a projeto. Por exemplo, os staves de ferro fundido podem ser utilizados no cadinho, rampa e goela ou em qualquer combinação dos três domínios. Os staves de cobre (de maior condutividade térmica) são normalmente utilizados apenas nas zonas de altas temperaturas (rampa e cuba inferior). Embora as causas de falha podem ser múltiplas, as mesmas resultam em perda de material do corpo do stave por meio de erosão ou fissuras através da exposição a alta carga de calor. A ruptura das linhas de refrigeração gera ingresso de água para dentro do alto-forno e tais ingressos, se não detectados a tempo, podem causar sérios problemas para operação, segurança e integridade. A solução pró-ativa para garantir a integridade e evitar problemas na campanha é monitorar regularmente a espessura dos staves de forma exata. Esse acompanhamento pode facilitar a implementação de um plano de remediação proativa antes de danos extremos aos staves, evitando assim sua perda. Tal plano de remediação deve ser aplicado pelo acompanhamento regular via ensaios não destrutivos (NDT) para acompanhamento de desgaste. Técnicas de NDT tradicionais não podem ser aplicadas para medir espessuras tendo em vista que o stave se encontra atrás de vários meios (isolantes refratário e carcaça) e, portanto, não são diretamente acessíveis. Um novo sistema baseado em princípios de propagação de ondas de tensão foi desenvolvido para determinar com exatidão as espessuras das nervuras e corpo dos staves com uma precisão de ± 2 milímetros. Este artigo discute a pesquisa, o processo e os dados coletados no campo usados para desenvolver e provar esta nova metodologia de inspeção e monitoramento.

Palavras-chave: Inspeção em alto-forno; Stave coolers; Medidas de espessura; Ensaios não destrutivos.

New Developments for NDT Measurements of Copper and Cast Iron Stave Thicknesses in the Blast Furnace

Abstract

Since the mid-1900s the use of staves to provide blast furnace shell cooling protection has steadily increased in an effort to prolong the furnace campaign life. A blast furnace stave consists of a solid cast or fabricated slab composed of copper or cast iron and containing multiple water cooling channels integrated into the stave body. Collectively the staves form an inner lining in the furnace against the furnace outer shell and protect the integrity of the vessel. The specific locations and media can vary between furnace designs. For example, cast iron staves can be used in the hearth, bosh, and stack or any combination of the three areas. The high thermally conductive copper staves are typically utilized in the high heat zones only (bosh and lower stack) due to cost. Although the root causes of stave failure are multiple, the failure ultimately results in a loss of stave body material through erosion and cracks via exposure to significant high heat load excursions. Ultimate failure of cooling staves results in damage to the cooling channels causing ingress of water into the blast furnace. Such ingressions of water cause serious process, safety and integrity issues. The proactive solution to ensure stave integrity and maximize furnace campaign longevity is to regularly monitor stave conditions in an accurate and timely manner. Such monitoring can facilitate implementation of a proactive remediation plan before extreme stave damage occurs, demanding replacement. Such a remediation plan is applied by regular monitoring of stave thickness through nondestructive testing (NDT) techniques to identify progression of stave wear in a proactive manner. Traditional NDT techniques cannot be applied to measure stave thicknesses as the staves are hidden behind multiple media (i.e. insulating refractory and an external steel shell) and so are not directly accessible. A new system based on stress wave propagation principals has been developed to accurately determine thicknesses of the rib and root sections of the staves with an accuracy of ± 2 millimeters. This paper discusses the research, the process and collected field data that was used to develop and prove this new inspection and monitoring methodology.

Key words: Blast furnace inspection; Cooling staves; Thickness measurements; Non-destructive testing.

¹ *Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Director, Non-Destructive Testing (NDT), Hatch, Mississauga, Canada.*

³ *Specialist, Non-Destructive Testing (NDT), Hatch, Mississauga, Canada.*

⁴ *Senior Project Manager, Iron and Steel Group, Hatch, Hamilton, Canada.*

⁵ *Specialist Non-Destructive Testing (NDT), Hatch, Mississauga, Canada*

1 INTRODUÇÃO

Elementos de resfriamento de ferro fundido têm sido utilizados na rampa e cadinho de altos-fornos por muitos anos e houve pelo menos cinco gerações de vários modelos e formas com diferentes canais de refrigeração e materiais. Em 1999, a primeira geração de staves de cobre foi instalada em um cadinho de alto-forno.⁽¹⁾ O projeto de staves de cobre normalmente promove uma camada protetora de cascão em sua face quente, o que ajuda a prolongar a vida de campanha do forno. Staves de cobre têm a vantagem sobre staves de ferro fundido em termos de melhor condutividade térmica, além da vantagem de serem mais finos, o que leva a um aumento do volume do forno. Operacionalmente, a manutenção de um cascão estável na face quente dos staves tem sido um desafio. A grande desvantagem de staves de cobre é que o cobre é mais suscetível a desgastes causados por condições adversas químicas e mecânicas.

A primeira indicação de uma deterioração progressiva dos staves é o desgaste de suas nervuras. Uma vez que as nervuras são perdidas, a capacidade de retenção de cascão é diminuída e isso pode, potencialmente, aumentar a taxa de desgaste no corpo principal. A degradação pode continuar sem controle para além da porção sólida, atingindo os canais de água e, eventualmente, isso vai levar a falha e exposição dos canais de arrefecimento, resultando em ingresso de água no forno e causando instabilidades do processo, preocupações com a segurança operacional e possível impacto na integridade dos refratários.

O grupo de NDT da Hatch desenvolveu uma metodologia baseada na propagação de ondas ultrassônicas de estresse para determinar a espessura restante de cobre e ferro fundido nos staves de refrigeração com uma precisão de ± 2 milímetros. Os principais objetivos durante o desenvolvimento foi criar um sistema de medição exato e que pode ser implementado sem dificuldade durante a operação do forno ou durante interrupções planejadas. Assim, a metodologia foi projetada com base nos princípios de ultrassom de baixa frequência usando um par de transmissores (T_x) e receptores (R_x) sensores que são colocados na carcaça do forno. Os dados são coletados em poucos minutos e armazenados em um sistema de aquisição de dados digital para análise off-site.

1.1 Parede do Forno e Resfriamento por Slave

Altos-fornos modernos utilizam refrigeração por staves para melhor aproveitar o volume interno do forno. Staves de ferro fundido são utilizados no cadinho, cuba superior e goela, enquanto os staves de cobre são utilizados na cuba inferior e rampa em que as cargas de calor são maiores. Uma camada de massa refratária isolante geralmente reside entre os staves e carcaça. Uma camada de refratário é também colocada nas nervuras dos staves para proteger a face quente e prolongar a vida útil, essa camada é vital também para proteção sob condições extremas inerentes a operação durante e após blow in do Alto-Forno. Os staves são concebidos com canais de água embutidos, que fornecem o mecanismo de transferência de calor para o arrefecimento destes, protegendo assim as paredes do forno. A Figura 1 ilustra a estrutura básica e os processos de alto forno, enquanto a Figura 2 ilustra as diferentes camadas compreendendo a parede lateral do forno.

Durante toda a operação do alto forno, as paredes do forno são submetidas a um desgaste mecânico, térmico e químico. Desgaste mecânico é causado pela fricção da carga metálica e de coque contra a parede lateral enquanto o stress térmico é

causado pelo calor produzido pelo processo. O desgaste químico é causado pela presença de gases agressivos quentes, tais como enxofre, dióxido de carbono, monóxido de carbono e água que podem reagir com a parede lateral de refratários e elementos de resfriamento.

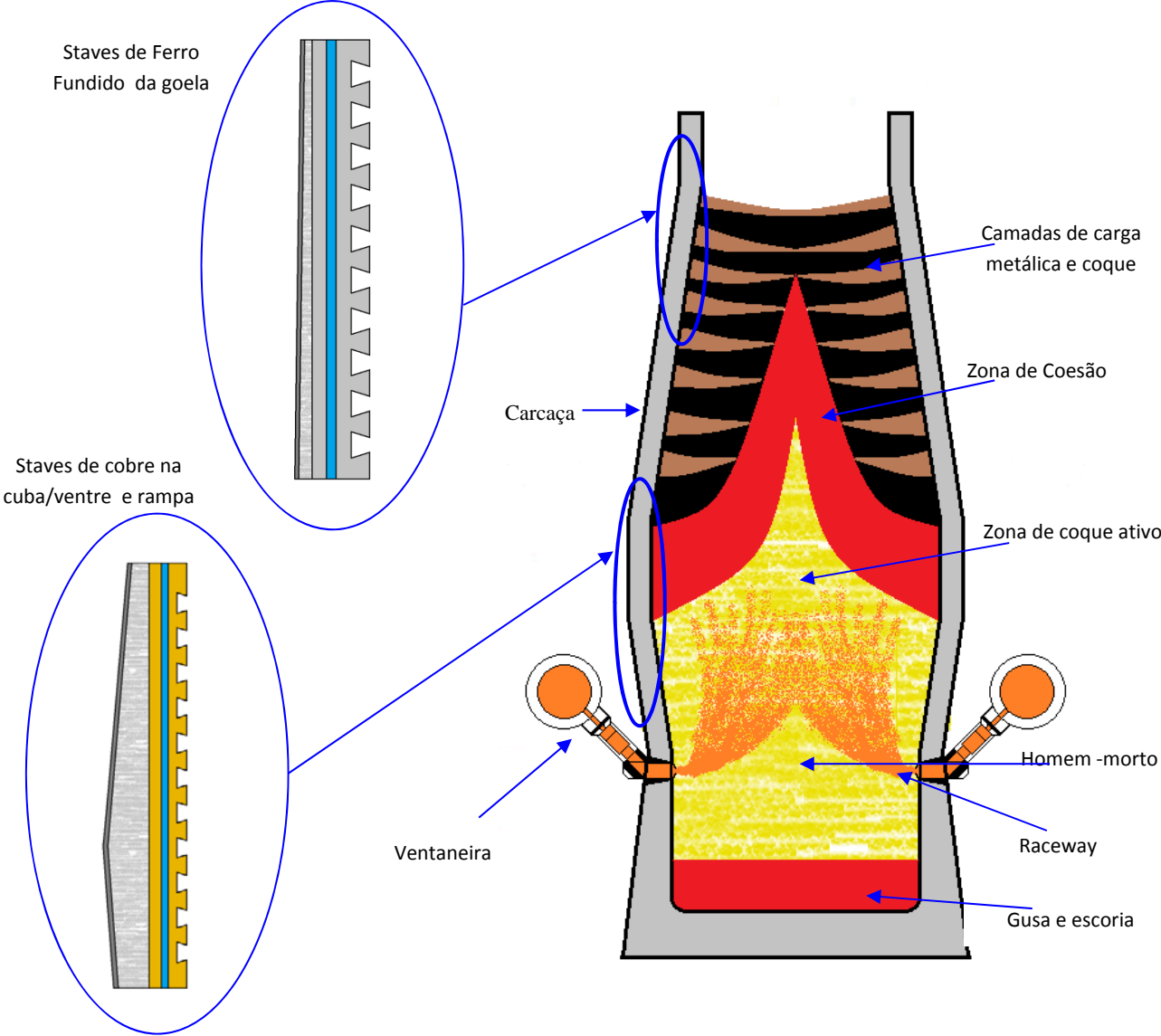


Figura 1. Estruturas Básicas e de Processo do Alto-Forno.

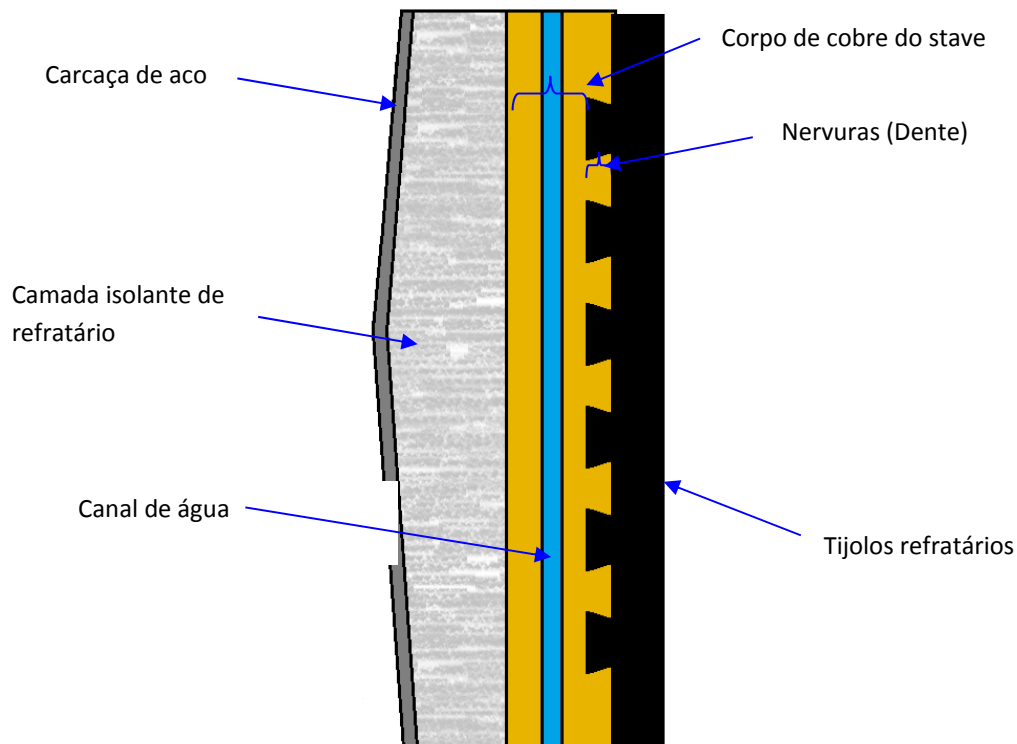


Figura 2. Seção transversal de um stave de cobre típico.

1.2 Modo de Falha

Vazamento de água dos canais de refrigeração através de afinamento do stave, é um modo principal de falha ocorrida no alto-forno. O conhecimento da espessura de todos os staves do forno ajuda os operadores com a implementação de medidas corretivas assim como com o planejamento antecipado de datas de reforma. Este conhecimento ajuda a prolongar a vida útil da campanha do forno, impede reduções extensas em produtividade e evita interrupções não planejadas mais caras para o processo.

1.3 Sistemas Tradicionais de Detecção e Monitoramento de Desgaste de Stave

Dados de termopares podem ajudar na modelagem térmica do stave, que por sua vez pode ser usado para estimar áreas de desgaste. A correlação de modelagem térmica para espessura de stave e refratário é essencial para fins de manutenção e é realizada rotineiramente para muitos altos-fornos. No entanto, esta técnica não tem a resolução necessária para determinar a deterioração do stave, além disto, a exatidão e a resolução do modelo de espessura será limitada ao número de termopares instalados. Outra limitação reside na medida de temperatura do termopar que pode ser influenciada pelo fluxo e temperatura de água nos staves.

Uma perfuração da carcaça, tal como mostrado na Figura 3, pode ser usada para a medição da espessura do stave. Ela fornece o acesso para que se faça a medida via ultrassom tradicional. Infelizmente, isso cria mais furos na parede lateral do forno. Além disso, este método está limitado a um pequeno número de locais no forno, uma vez que é dispendioso, consome tempo e s pode ser realizado durante interrupções planejadas:



Figura 3. Perfuração.⁽³⁾

Um sistema de ultrassom para medir a espessura dos staves de cobre por meio de um sensor de ultrassom inserido na entrada / saída do canal de água também já foi explorado e está ilustrado na Figura 4.⁽⁴⁾ O sensor ultrassônico pode aproximar-se do staffe através dos circuitos de refrigeração. Ele é projetado para ser flexível e dobrável para passar através de tubos de refrigeração de entrada/saída do staffe de cobre. Este método, infelizmente, limita a fornecer medições de espessura em apenas nos locais de entrada/saída, além de exigir uma configuração mais complexa, envolvendo a drenagem da água de refrigeração ou necessidade de inserção do sensor na água.

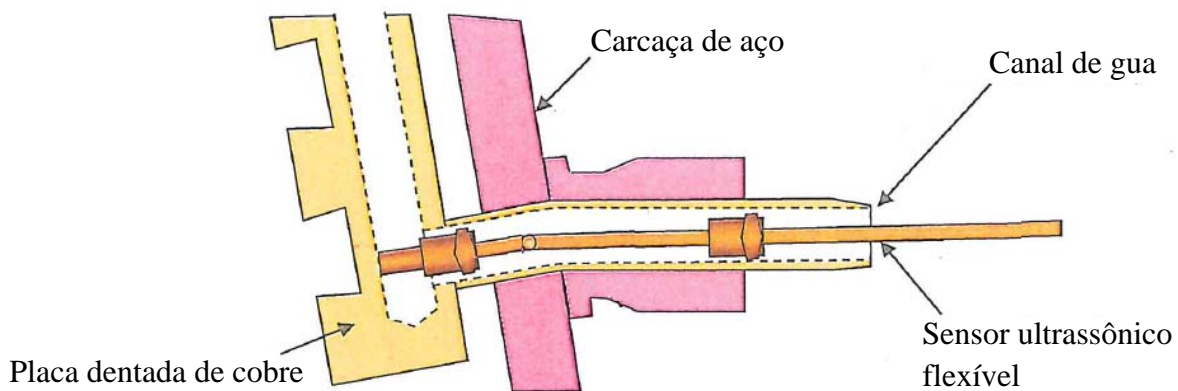


Figura 4. Sistema de ultrassom na linha para medir a espessura dos staves de cobre.

Medidores de fluxo de Coriolis (Figura 5) ou outros tipos de medidores de fluxo pode indicar aos operadores que um vazamento nos staves ocorreu. Uso de medidores de fluxo para o sistema de refrigeração do forno é essencial e deve ser aplicado. No entanto, um medidor de vazão não oferece uma indicação avançada de desgaste e, principalmente, somente impede a extensão de um vazamento alertando os operadores quando o vazamento inicial já aconteceu.



Figura 5. Medidor de Vazão Coriolis.⁽⁵⁾

2 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DO PULSO ULTRASSÔNICO DE BAIXA FREQUÊNCIA (LFPU)

Houve vários estudos que levaram ao desenvolvimento da técnica de ondas de tensão ultrassônicas atualmente utilizada pela Hatch para inspecionar os canais de resfriamento de um alto-forno. O objetivo era desenvolver uma metodologia não destrutiva que pode medir e distinguir nervura e corpo, para um acesso limitado apenas a partir da carcaça externa do forno. Foi também desejável ser capaz de medir em qualquer local e realizar as inspeções enquanto o forno estiver em operação (apenas limitado pelo acesso específico da planta e as normas de segurança). A vantagem desta técnica é que ela proporciona um método de medição que pode rapidamente determinar o estado da condição dos staves em vários locais ao mesmo tempo não exigindo intervenções como perfuração e inserção de hastes para dentro do forno. Para tal, concluiu-se que a metodologia não-invasiva e sem interrupções atualmente viável é baseada em uma técnica de detecção de ondas de tensão ultrassônicas. Inicialmente, uma série de testes de ondas de ultrassom foi realizada usando amostras de staves de cobre e ferro para calibrar e caracterizar os padrões de onda de tensão e identificar limitações.

Para o trabalho em campo, o Grupo de NDT da Hatch utiliza principalmente a técnica de eco de ultrassom acústico (AU-E) para medir a espessura da carcaça de um alto-forno frio. Nesta técnica, as ondas de baixa frequência foram geradas através da parede lateral de um forno utilizando um dispositivo de impacto. Então, um transdutor recolhe dados refletidos a partir das vibrações que atravessou a espessura dos staves de cobre e ferro fundido. Devido à baixa frequência das ondas acústicas geradas, a resolução da medição era demasiadamente baixa para distinguir o corpo da nervura dos staves, embora a técnica de AU-E já havia sido bem sucedida para determinar com exatidão espessuras de refratário interno em fornos em funcionamento. A diferença entre o corpo e a nervura é de poucos centímetros e, portanto, as ondas de frequências baixas (AU-E) não forneciam a resolução necessária para distinguir estas partes.

Os testes AU-E foram repetidos em um alto-forno a frio e a quente, resultando nas mesmas limitações citadas acima.

O grupo de NDT, então, seguiu a inspeção AU-E usando um sistema multicanal e multi-sensores de baixa frequência. O sistema de ultrassom usado tinha um transmissor e um receptor e era composto por 24 transmissores/receptores arranjados em uma matriz de 6x4 partes. Infelizmente, o sistema não poderia medir além da camada de argamassa e os sinais foram atenuados, portanto, o sistema não foi capaz de determinar as espessuras dos staves.

Finalmente, uma metodologia de baixa frequência com um único transmissor e receptor de ondas de ultrassom foi desenvolvido pelo Grupo de NDT da Hatch,

sendo possível medir com sucesso a espessura dos staves de ferro fundido e cobre em um alto-forno. Medições produziram um perfil do refratário e nervura dos staves presentes no interior de um alto forno e os dados foram coletados a partir da carcaça de um forno em operação e fora de operação. Resultados de medidas também foram capazes de detectar padrões de desgaste até o corpo dos staves. Os resultados das medições foram verificados contra amostras de perfuração. Esta nova metodologia obteve sucesso devido ao seu sistema peculiar de pulso e captação além do uso de um transdutor mais sensível.

O método de ondas de tensão de ultrassom atualmente empregada pela Hatch requer acesso apenas a carcaça exterior do alto-forno. Medidas podem ser tomadas enquanto o forno estiver em funcionamento ou durante uma interrupção planejada e uma medição de espessura pontual leva menos de um minuto para ser executada. Análise dos desenhos de engenharia detalhados antes de uma inspeção ajudam a melhorar a precisão das medições, auxiliando na interpretação dos dados de ondas coletados. As medições devem ser repetidas em várias elevações e em intervalos de tempo regulares para fornecerem um perfil de desgaste preciso e ferramentas para compreender a taxa de desgaste progressivo. Os resultados devem ser regularmente comparados e correlacionados para enfatizar os operadores com relação as áreas mais degradadas e criar um perfil histórico da taxa de desgaste em um alto-forno em particular.

3 TESTE DE CAMPO LFPU E RESULTADOS

3.1 Stave de Ferro Fundido

Os dados foram coletados em staves de ferro fundidos com nervuras e em staves de cobre que foram desgastados até o corpo.

Os resultados para o ferro fundido são apresentados na Figura 6 e indicam um sinal de nervura restante, bem como um refratário intacto.

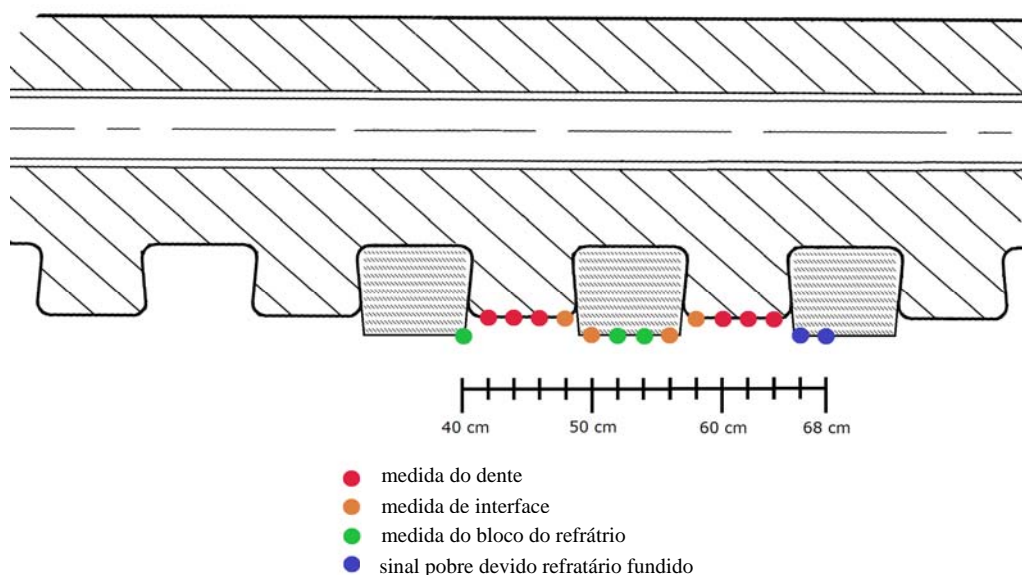


Figura 6. Resultados das medições de espessura em um stave de ferro fundido.

Uma medição de espessura da nervura é dada por dois picos agudos correspondente a todo o comprimento da estrutura, que corresponde à camada de

refratário, bem como a espessura da própria nervura. Uma medição de nervura indica que os dados foram feitos no centro da nervura. A Figura 7 ilustra uma medição de nervura.

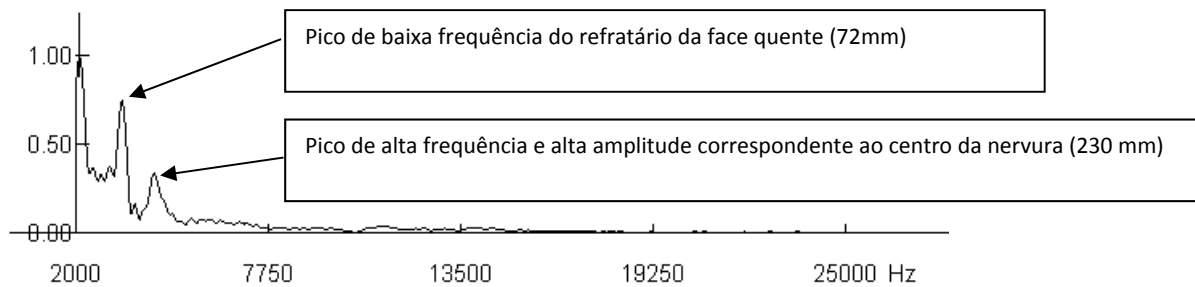


Figura 7. Dados de Medida de Espessura correspondente a nervura.

Uma medição de interface é caracterizada pelos mesmos picos de medição utilizados na nervura, no entanto, a amplitude do pico que corresponde a uma nervura é suprimida. Uma medição de interface indica que os dados foram retirados na borda do tijolo/nervura do stave de cobre. A Figura 8 ilustra uma medição de interface.

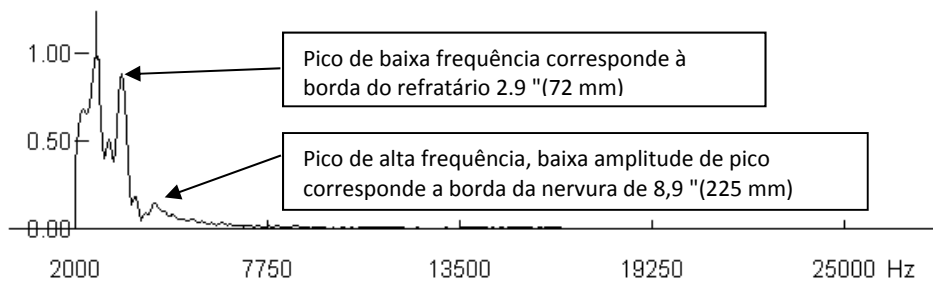


Figura 8. Dados de Medida de Espessura correspondente a interface.

Uma medição de refratário da face quente é caracterizada por um pico, que corresponde à espessura total da estrutura. Uma medição de refratário indica que os dados foram coletados no centro de um tijolo refratário. A Figura 9 ilustra uma medição de refratário

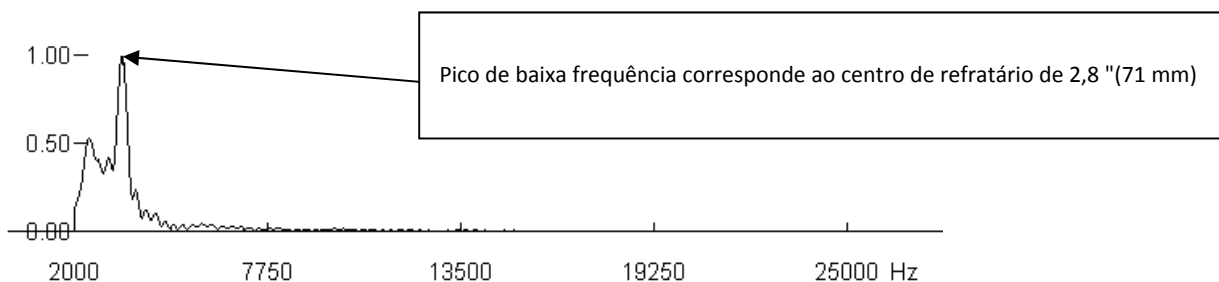


Figura 9. Dados de medição de espessura correspondentes ao refratário da face quente.

Foi também possível detectar um canal de água, quando a medição foi feita na mesma direção deste. Os dados obtidos para esta medição foram úteis para calibrar a velocidade da onda na camada entre o refratário do costado e o stave (foram comparados com os valores teóricos obtidos através de avaliações de desenho). A Figura 10 ilustra uma medição de canal de água.

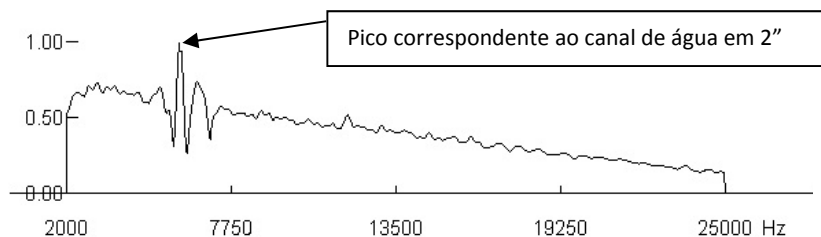


Figura 10. Dados de Medida de Espessura correspondente ao canal de água.

3.2 Stave de Cobre

Resultados para o stave de cobre indicaram que o stave foi desgastado até a porção sólida do corpo. Nenhuma nervura foi detectada. A Figura 11 ilustra os dados correspondentes ao stave de cobre desgastado. Além disso, a Figura 12 ilustra o stave de cobre e um pico correspondente a uma ligeira de laminação entre o stave e o material refratário do costado indicando deterioração adicional nesta região do alto forno.



Figura 11. Dados de medição de espessura correspondente ao corpo do stave de cobre.

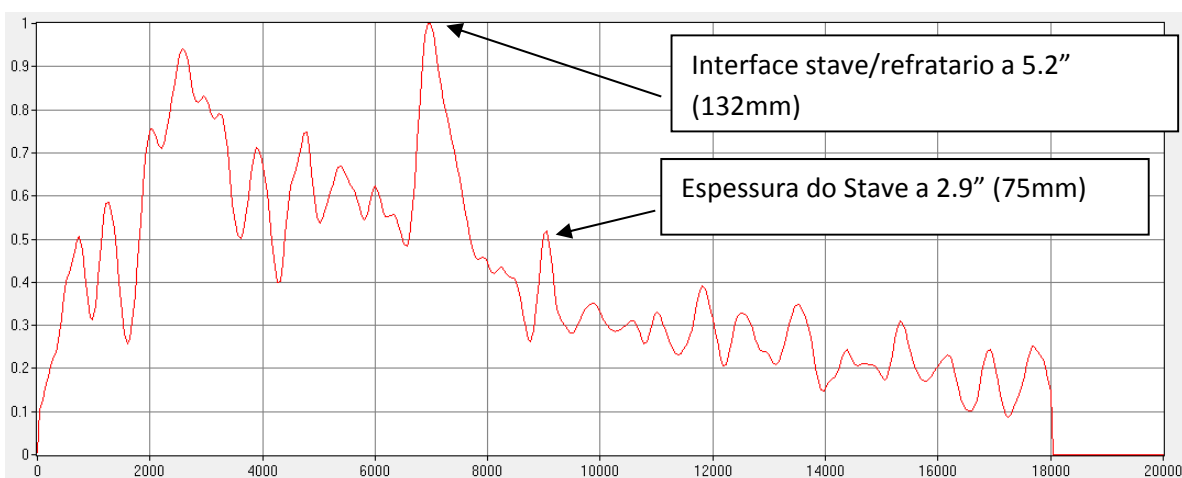


Figura 12. Dados de Medição de Espessura correspondentes ao corpo e à de laminação entre o stave e isolamento refratário.

3.3 Limitações

O grupo de NDT da Hatch concluiu que os sinais de ultrassom não podem passar por seções de parede de alto-forno com descontinuidades. Descontinuidades e lacunas muitas vezes existem dentro das camadas de refratário e elas podem ocorrer durante a instalação ou devido a penetração de gases durante a operação. Em áreas onde essas descontinuidades são grandes (1 mm ou maior) o sistema de ultrassom infelizmente não é capaz de coletar a espessura do stave. Quando essas condições se verificarem, o técnico normalmente move os sensores ao redor para encontrar um local onde o sinal possa passar através de todas as camadas. Se o problema de espaços vazios dentro da camada de argamassa é significativamente amplo, o operador tem a opção de executar uma injeção de massa pelos furos existentes na carcaça.

4 CONCLUSÕES / DISCUSSÃO

A nova metodologia de ultrassom utilizada pelo grupo de NDT da Hatch é capaz de detectar com exatidão a espessura do stave de ferro fundido e de cobre dentro de um alto-forno em operação. Este método tem as seguintes vantagens: realização das medições ao longo de todo o forno, simplicidade e não destrutividade. A única limitação do método sobre a perfuração da carcaça é com relação a atenuação de sinais em caso de vazios em refratários. Neste caso, uma posição mais próxima deve ser perseguida.

O conhecimento da espessura remanescente dos staves permite os operadores a modificarem os parâmetros de operação do forno a fim de prolongar a vida da campanha. A estimativa de vida remanescente do forno pode basear-se em resultados quantitativos de NDT. Outra importância da medição é a segurança operacional no sentido de prevenir contra ocorrências de vazamento de água para dentro do forno e ocorrências de defeitos na carcaça do forno. Além disso, reparos e substituições podem ser agendadas com antecedência, para se acomodarem aos planos de negócios da empresa e otimizando a produtividade do forno.

REFERÊNCIAS

- 1 HB Luengen, M. Peters, e P.Schmöle., *Ironmaking in Western Europe*, AISTech 2011 Proceedings, Volume I, pp . 387-400.
- 2 A. Sadri, P. Gebski, H. Ghorbani, G. McGarrie e T. Vries., *Monitoring Deterioration of Waffle Cooler Thickness at Polokwane Smelter*, Journal of the Minerals and Materials Society, vol. 61, No. 10, pp 69-73 (2009).
- 3 *Stay out of trouble diamond core drilling.*, Disponível em: <http://www.diamondsworld.net/stay-out-of-trouble-diamond-core-drilling.html>. Acesso em., 31 de dezembro de 2011,
- 4 S. Choi e D. Kim., *On-line Ultrasonic System for Measuring Thickness of the Copper Stave in the Blast Furnace*, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, pp 1715-1721 (2012).
- 5 Coriolis mass flow-meter OPTIMASS 1000 KROHNE, Disponível em: <http://www.directindustry.com/prod/krohne/coriolis-mass-flow-meters-5863-107561.html>. Acesso em: (2013)