

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Química

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ

Autor: Gilmar Soares Alves

**METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ÂNCORAS CERÂMICAS
APLICADAS EM FORNOS DE REAQUECIMENTO**

Belo Horizonte – MG

Abril 2016

Autor: Gilmar Soares Alves

Dissertação de Mestrado

**METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ÂNCORAS CERÂMICAS
APLICADAS EM FORNOS DE REAQUECIMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ, da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof^a Dra. Vanessa de Freitas Cunha Lins

Coorientador: Prof^o Dr. Alamar Kasan Duarte

Belo Horizonte – MG

Abril 2016

A474m Alves, Gilmar Soares.
 Metodologia para previsão de vida útil de âncoras cerâmicas aplicadas
em fornos de reaquecimento [manuscrito] / Gilmar Soares Alves. - 2016.
83 f., enc.: il.

 Orientadora: Vanessa de Freitas Cunha Lins.
 Coorientador: Alamar Kasan Duarte.

 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

 Bibliografia: f.80-83.

 1. Engenharia química - Teses. 2. Materiais refratários - Teses. 3.
Cerâmica (Tecnologia) - Teses. 4. Ultra-som - Teses. I. Lins, Vanessa de
Freitas Cunha. II. Duarte, Alamar Kasan. III. Universidade Federal de
Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

 CDU: 66.0(043)

A minha mulher Theoma, meus filhos Valerinho, Léo e Lory, e a meu neto Nuno,
por tudo aquilo que me inspira, toca e motiva.

Eu amo vocês!

AGRADECIMENTOS

A minha prezada orientadora Professora Vanessa de Freitas Cunha Lins, que acreditou em mim e pacientemente me ensinou a trilhar os caminhos acadêmicos.

Ao querido coorientador Professor Alamar Kasan Duarte, pela orientação, disponibilidade, referência e incentivo. A nossa amizade além do ambiente profissional.

Ao meu pai João Alves Filho, que muito cedo me inspirou a buscar o conhecimento por meio dos estudos.

A minha mãe Darcy Soares Alves, por me ensinar a ser engenheiro, criativo, inovador e a pensar de maneira diferente do usual. Desistir nunca.

A meus irmãos Ginamara Lessa e Fabian Alves, em especial aos meus queridos sobrinhos, cunhados, pelo apoio e por fazerem parte da minha vida.

Aos colegas Danilson Gonçalves de Melo Silva, Élcio Alves Ribeiro de Carvalho, Luiz Eduardo Andrade de Carvalho e Tereza Cristina Moreira Faustino, pelo apoio, disponibilidade na solução de dúvidas e clareza nas respostas.

A DEUS, na sua forma mais sutil de amor, que transcende religiões, crenças e preconceitos. Somos todos um!

“Crescer é doloroso. Mudar é doloroso. Mas nada é mais doloroso que ficar estagnado em um lugar ao qual você não pertence”.

Mangala Bhadra

RESUMO

O uso da técnica de ultrassom na avaliação, seleção e classificação de âncoras cerâmicas aplicadas em teto e paredes de fornos de reaquecimento permite identificar os seus principais defeitos e também determinar a sua resistência ao choque térmico em função da alteração do módulo de elasticidade com o número de ciclos térmicos aplicados ao material. A resistência ao dano por choque térmico típica de âncoras novas que cumprem todas as especificações técnicas é de aproximadamente 29 ciclos, sendo que estes materiais possuem um histórico de vida média de 15 anos para as paredes e de 10 anos para o teto. A degradação do módulo de elasticidade e da resistência ao dano por choque térmico destas peças ao longo de sua vida permite estimar a expectativa de vida útil do revestimento refratário montado com estes materiais. Com estes resultados, pode-se comparar a “idade real”, identificada por esta metodologia, com a “idade cronológica” que considera o tempo de operação do revestimento refratário. Pode-se ainda, como consequência, estimar o tempo para a falha destas peças refratárias, melhorar o planejamento das paradas destes fornos para manutenção e evitar paradas não programadas, o que causaria perda de produção e prejuízos para as empresas.

Palavras-chave: *Âncoras cerâmicas, Revestimento refratário, Fornos de reaquecimento, Ensaio de ultrassom, Resistência ao choque térmico, Resistência à flexão a quente, Tempo de vida útil.*

ABSTRACT

The use of ultrasound technique in evaluation, selection and classification of ceramic anchors applied to the ceiling and walls of reheating furnaces allows identifying the main defects and also determining their thermal shock resistance due to the alteration of the modulus of elasticity with the number of thermal cycles applied to the material. The typical thermal shock resistance of new anchors that meet all technical specifications is approximately 29 cycles, and these materials have a history of service life of about 15 years for walls and 10 years for the roof. The degradation of the elastic modulus and thermal shock resistance of these parts throughout its life allows predicting the life expectancy of the refractory lining mounted with these materials. With these results, one can compare the "real age", identified by this methodology, with the "chronological age" which considers the operating time of the refractory lining. It can still, as a result, estimate the time to failure of these refractory parts, improve the planning of the charts of these furnaces for maintenance and avoid unplanned shutdowns, which would cause loss of production and damage to businesses.

Keywords: *Ceramic anchors, refractory lining, Reheating furnaces, Ultrasonic testing, Hot modulus of rupture, Resistance to thermal shock and Lifetime.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVO	20
2.1. Objetivo específico	20
3. JUSTIFICATIVA.....	21
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
4.1. Cerâmicas refratárias	26
4.2. Inspeção e controle de qualidade das âncoras cerâmicas	34
4.3. Ensaio de caracterização de cerâmicos.....	35
5. METODOLOGIA	47
5.1. Materiais e Métodos	47
6. RESULTADOS	57
6.1. Análise e inspeção das âncoras cerâmicas novas	57
7. DISCUSSÃO E VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA.....	68
8. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
9. REFERÊNCIAS	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de aços brutos por empresa brasileira [18].....	23
Tabela 2 – Especificação técnica da âncora cerâmica aplicadas em forno de reaquecimento [38].	49
Tabela 3 – Plano de Amostragem para Produtos Conformados Densos	52
Inspeção por atributos com NQA 4,0% [36].	52
Tabela 4 – Plano de Amostragem para produtos conformados densos inspeção por variáveis com NQA 4.0% [36].....	55
Tabela 5 – Padrão de aceitação como final da vida útil, para um módulo de elasticidade residual de 50% [36, 37].	56
Tabela 6 – Critério de aceitação das âncoras novas de teto e parede.	58
Tabela 7 – Segregação de âncoras cerâmicas novas de teto e parede sob suspeita.....	59
Tabela 8 – Caracterização química das âncoras cerâmicas novas.	60
Tabela 9 – Caracterização física de âncoras cerâmicas novas sob suspeita.	60
Tabela 10 – Caracterização da resistência ao choque térmico (RCT) de âncoras cerâmicas novas sob suspeita (1000 °C x água).	66
Tabela 11 – Segregação de âncoras cerâmicas novas de teto analisadas.	71
Tabela 12 – Caracterização química das âncoras novas (Âncoras 2 e 4) e âncoras usadas (A, B, C e D) do forno de reaquecimento.	72
Tabela 13 – Caracterização física das âncoras de teto novas (Âncoras 2 e 4) e âncoras usadas (A, B, C e D) do forno de reaquecimento.	73
Tabela 14 – Caracterização da Resistência ao Choque Térmico (RCT) de âncoras cerâmicas novas e usadas retiradas do forno de reaquecimento (1000 °C x água).	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema geral de um forno de reaquecimento [5].	16
Figura 2 - Modelo de âncora cerâmica utilizada em forno de reaquecimento (a) [6]. Tipos de âncoras cerâmicas utilizadas em teto (b) parede (c) em fornos de reaquecimento [7].	18
Figura 3 - Revestimento refratário contendo âncoras cerâmicas de teto e parede [8].....	18
Figura 4 – Fluxo de processos para conformação mecânica na fabricação de tarugos e placas em um forno de reaquecimento [2, 3].....	24
Figura 5 – Classificação dos materiais cerâmicos com base na sua aplicação [12].	27
Figura 6 – Diagrama de fases para o Sistema Sílica-Alumina [12].	29
Figura 7 – Desenho esquemático e disposição dos materiais refratários no teto e paredes do Forno de Reaquecimento Rotativo [22].	31
Figura 8 – Visão interna de um Forno de Reaquecimento Rotativo pronto para operação com o revestimento refratário de teto e paredes montados [23].....	31
Figura 9 – Microestrutura de âncora cerâmica com 80% alumina ligadas a Fosfato e queimada, onde P = Poro, M = Al_2O_3 e C = SiO_2 [10].....	40
Figura 10 – Metodologia utilizada para teste de ultrassom nas âncoras cerâmicas [36].	48
Figura 11 – Regiões da retirada de corpos de prova da âncora cerâmica para o teste de resistência à flexão a quente a 1200 °C x 60 min. (HMOR) [36].	51
Figura 12 – Previsão de 25 anos da vida real das zonas de pré-aquecimento e aquecimento [36].	57
Figura 13 – Previsão de 20 anos da vida real da zona de encharque [36].	57
Figura 14 - Âncoras de teto 136, 145 e 243 (a) e âncoras de parede 29 e 53 (b) sob suspeita.	61
Figura 15 - Âncora de teto 136 sob suspeita com presença de trincas internas.	61
Figura 16 - Âncora de teto 145 sob suspeita com presença de grumos internos.	62
Figura 17 - Âncora de teto 243 sob suspeita com presença de trincas internas.	62
Figura 18 - Âncora de parede 29 sob suspeita com velocidade menor no ensaio de ultrassom.	62
Figura 19 - Âncora de parede 53 sob suspeita com trincas internas.	63
Figura 20 – Âncora dividida ao meio com os locais de retirada dos corpos de prova da cabeça da âncora (Ca), do centro (Ce) e da base (Ba) de cada metade para o teste de resistência ao choque térmico [36].....	64
Figura 21 – Amostras das âncoras cerâmicas sob suspeita retiradas para Teste de Resistência ao Choque Térmico (RCT).	64
Figura 22 – Determinação da RCT de âncoras novas sem defeito (1000 °C x água).....	65
Figura 23 – Correlação entre a resistência ao choque térmico (RCT) com a sua vida adicional da âncora cerâmica em anos a serem aplicadas no forno de reaquecimento.	65
Figura 24 - Determinação da RCT de âncoras novas sob suspeita (1000 °C x água).	67
Figura 25 – Correlação entre a resistência ao choque térmico (RCT) das âncoras 29 e 53 e sua vida adicional no forno de reaquecimento.	68

Figura 26 – Esquema da estrutura do forno de reaquecimento [1].	69
Figura 27 – Visão interna de um forno de reaquecimento de placas com o revestimento refratário montados no teto e parede. Divisão entre a Zona de pré-aquecimento e Zona de aquecimento(a), e queimadores no teto da Zona de aquecimento (b) [39].	70
Figura 28 – Estudo da estrutura e análise de trincas das peças usadas por corte transversal nas âncoras A e B (2 anos) e C (20 anos).	70
Figura 29 – IRCT das âncoras cerâmicas novas 2 e 4 do forno de reaquecimento obtido no RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x ar).....	75
Figura 30 – IRCT das âncoras cerâmicas usadas A e B (2 anos) do forno de reaquecimento obtido no RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x ar).....	75
Figura 31 – IRCT das âncoras cerâmicas usadas C e D (20 anos) do forno de reaquecimento obtido no RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x ar).....	76
Figura 32 – IRCT do conjunto de âncoras cerâmicas retiradas do forno de reaquecimento obtidos no Teste de RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x 60 min.)	77
Figura 33 – Conjunto de amostras das âncoras cerâmicas retiradas do forno de reaquecimento para Teste de RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x água).....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

NBR – Norma Brasileira;

BS EN – British Standard European;

RHF – Forno de Reaquecimento Rotativo (*Rotary Hearth Furnace*);

VLD - Variação Linear Dimensional (m);

V - Velocidade do som no material (m/s);

V_T – Velocidade transversal (m/s);

V_L – Velocidade longitudinal (m/s);

FRX – Fluorescência de Raios X;

V_a – Volume Aparente (cm³);

DMA – Densidade (g/cm³);

MEA - Massa Específica Aparente (g/cm³);

PA – Porosidade Aparente (%);

M_s – Massa Seca (g);

M_u – Massa Saturada (g);

M_i – Massa Imersa (g);

$M_{e\text{ líquido}}$ – Massa Específica do Líquido (p/ água = 1 g/cm³);

D_a – densidade de massa aparente (g/cm³);

m – massa do corpo-de-prova (g);

c – comprimento do corpo-de-prova (cm);

l – largura do corpo-de-prova (cm),

e – espessura do corpo-de-prova (cm);

P – Carga de Ruptura (MPa);

L – Distância entre Apoio (mm);

d – Altura (mm);

b – Largura do corpo-de-prova (mm);

T_q – Temperatura de aquecimento (°C);

T_a – Temperatura de resfriamento (°C);

ΔL – Variação do comprimento (mm);

Consumo específico – Kilograma de refratário aplicado dividido pela Tonelada de aço produzido (Kg/Ton);

G (y_{wof}) – Energia total de fratura (J/m^2);

E – Módulo de elasticidade (GPa);

ρ – Densidade do material (g/m^3);

μ – Coeficiente de Poisson;

σ_f – Tensão de fratura térmica (MPa);

α – Coeficiente de dilatação térmica linear do material ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

K_{Ic} – Tenacidade à fratura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$);

K_I – Fator de intensidade de tensão da trinca (MPa);

t_f – Tempo de fratura;

B – Tensão dinâmica (MPa);

S_I – Tensão inerte (MPa);

σ_f – Tensão de fratura (MPa);

σ_a – Tensão aplicada (MPa);

c – tamanho de uma trinca superficial ou metade do comprimento de uma trinca interna (mm);

Y (Fator de forma da LEFM) – $\pi^{1/2}$;

LEFM - Mecânica da Fratura Linear Elástica (*Linear Elastic Fracture Mechanics*);

RCTA - Resistência à compressão a temperatura ambiente (MPa);

HMOR - Módulo de ruptura à flexão a quente (*Hot Modulus of Rupture*) (MPa);

RCT - Resistência ao choque térmico (Ciclos);

IRCT - Índice de resistência ao choque térmico (Ciclos);

NQA - Nível de Qualidade Aceitável (%);

IQ - Índice de Qualidade;

LSE - limite superior de especificação;

LIE - limite inferior de especificação;

K - Fator de aceitação;

FDT - Ficha de Dados Técnicos.

1. INTRODUÇÃO

Os fornos contínuos de reaquecimento são utilizados na indústria siderúrgica para tratamento térmico no aquecimento de placas ou tarugos para adquirirem propriedades necessárias ao seu processamento com o objetivo de abastecer a indústria de energia, petrolífera, construção civil e automotiva. Sua função principal é elevar a temperatura destes produtos semiacabados para permitir sua redução mecânica à secção desejada. O controle da temperatura é muito importante dentro do processo de laminação, pois a obtenção das dimensões, forma, características metalúrgicas e mecânicas requeridas pelo produto final estão inteiramente relacionadas a este fator. São nestes fornos que produtos intermediários, como placas e tarugos, são reaquecidos até atingirem características necessárias para o adequado processamento [1, 2, 3].

A Figura 1 ilustra um esquema de um forno de reaquecimento e mostra um sistema para carregar e descarregar o aço, um sistema para suportar e transportar o aço ao longo da câmara (soleira ou vigas), uma câmara constituída por uma soleira, parede e teto com queimadores para fornecer energia e elevar a temperatura do aço para os valores desejados para o seu processamento posterior, um sistema para coletar os gases gerados no processo, refratários revestindo a parede, o teto e a soleira para proteger a carcaça e confinar o calor dentro do forno. Os fornos de reaquecimento podem ser classificados como tipo empurrador (“*pusher*”), soleira caminhante (“*walking hearth*”), viga caminhante (“*walking beam*”) e soleira rotativa (“*rotary hearth*”). [4].

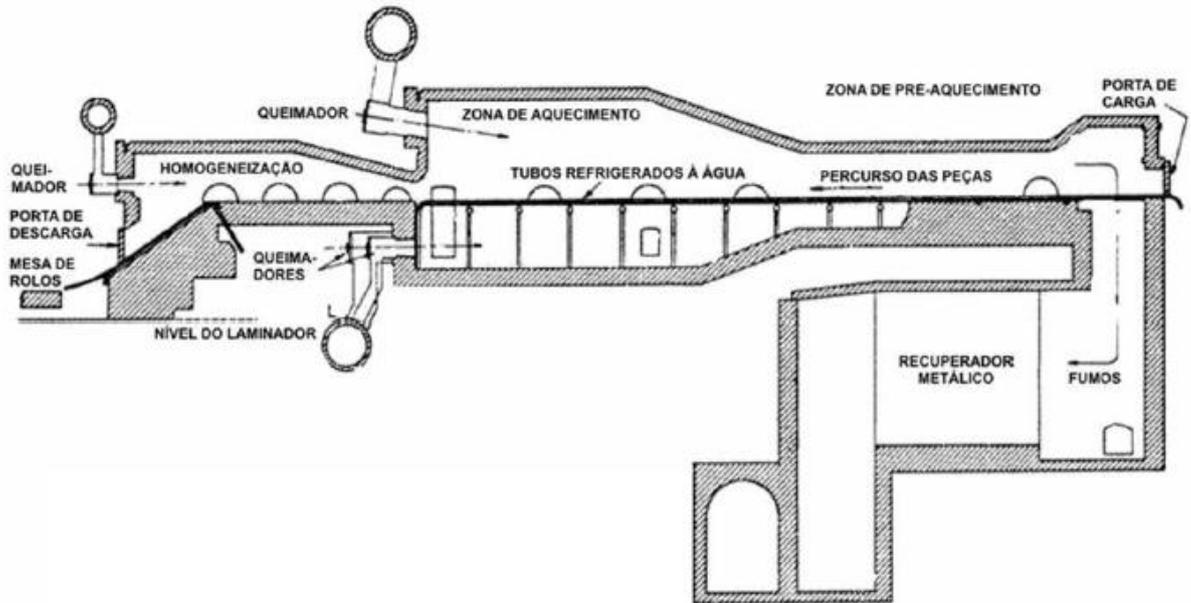


Figura 1 - Esquema geral de um forno de reaquecimento [5].

Zona de pré-aquecimento: Onde o material que entra a temperatura ambiente é aquecido, em contracorrente, até uma temperatura da ordem de 700°C , pelos gases da combustão procedentes das outras zonas em direção ao recuperador onde aquecerá o ar de combustão.

Zona de aquecimento: Região de grande fluxo de calor onde o material é aquecido na superfície até uma temperatura de 1250°C , principalmente por radiação do calor das chamas dos queimadores (em torno de 10).

Zona de encharque: Equipada com queimadores (radiação de calor) onde se consegue que a diferença de temperatura entre o ponto mais frio (núcleo) e o ponto mais aquecido da peça, seja reduzida ao mínimo, não representando um problema para o trem de laminação ou para a qualidade do produto final laminado.

Os refratários possuem uma função extremamente importante nos fornos de reaquecimento. O projeto refratário do forno deve considerar as seguintes demandas principais: temperatura máxima interna de cada zona, temperatura máxima externa em cada

zona, estado do equipamento (novo, reforma, intervenção durante a operação), disponibilidade para manutenção, custo de materiais e facilidade de aplicação [1].

A vida útil ou campanha típica dos revestimentos refratários destes fornos é de 2 a 6 anos para a soleira e vigas, 5 a 15 anos para as paredes e 10 a 20 anos para o teto. A zona de pré-aquecimento destes fornos trabalha a uma temperatura entre 800 e 1000°C e a maior solicitação ao refratário se dá por choque térmico devido à abertura e fechamento de portas. A zona de aquecimento trabalha com temperaturas entre 1000 e 1300°C e a principal solicitação também é por choque térmico, devido à oscilação de aporte térmico na operação dos queimadores presentes. Na zona de encharque ocorre pouca variação de temperatura, sendo normalmente uma região menos crítica ao refratário. Tensões termomecânicas elevadas sobre o refratário ocorrem durante o resfriamento e aquecimento dos fornos em paradas programadas ou não da operação [1].

Os fatores que afetam a vida em serviço do revestimento refratário de um forno de reauecimento podem ter causas diversas: o projeto do forno e do revestimento refratário, a sua montagem, as condições operacionais e a qualidade do refratário. O revestimento refratário usado na construção destes fornos pode envolver diferentes tipos de materiais, que podem ser moldados, monolíticos e pré-moldados, materiais densos e isolantes. Para se obter estabilidade do revestimento refratário nas paredes e tetos é comum o uso de âncoras cerâmicas (Figura 2 e 3). Âncoras cerâmicas são geralmente usadas em temperaturas maiores do que 1100°C e espessuras de revestimento maiores do que 200 mm, sendo que as âncoras metálicas são usadas em temperaturas inferiores a 1100°C e espessuras inferiores a 200 mm. Existem diferenças dimensionais importantes entre as âncoras cerâmicas que são aplicadas nos fornos de reauecimento. Normalmente as âncoras de teto possuem comprimento em torno de 35 - 48 cm e densidade 2450 - 2500 Kg/m³, em contrapartida, as âncoras de parede possuem comprimento em torno de 45 - 50 cm e densidade 2400 - 2450 Kg/m³.

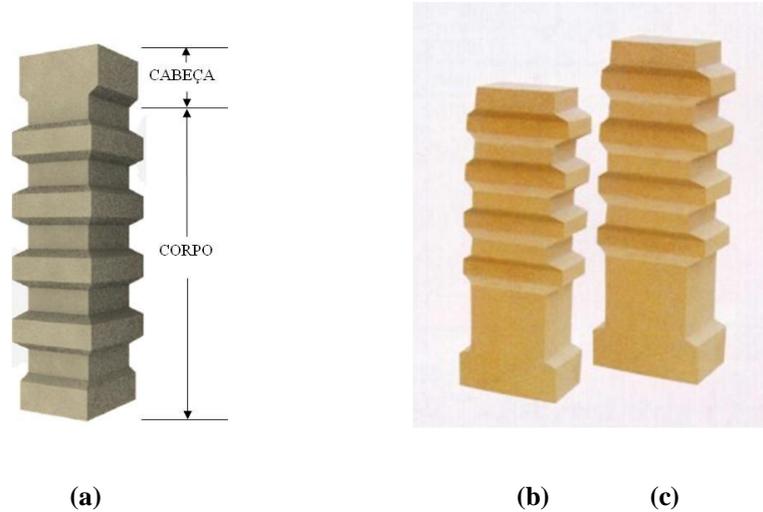


Figura 2 - Modelo de âncora cerâmica utilizada em forno de reaquecimento (a) [6]. Tipos de âncoras cerâmicas utilizadas em teto (b) parede (c) em fornos de reaquecimento [7].

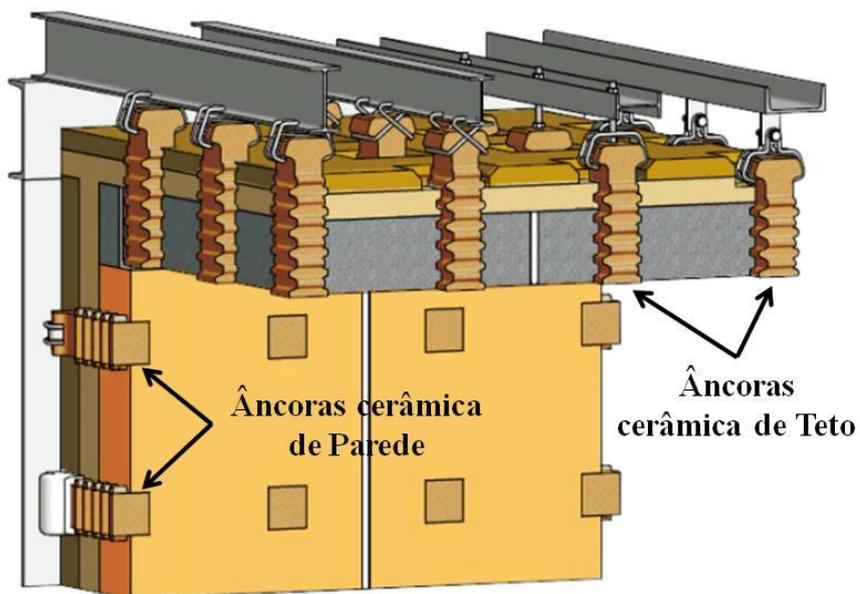


Figura 3 - Revestimento refratário contendo âncoras cerâmicas de teto e parede [8]

Para que o processo de tratamento térmico se torne eficiente, o revestimento refratário usualmente é constituído de âncoras cerâmicas, massas plásticas e peças de concretos refratários densos. Os concretos refratários são resistentes à abrasão com baixo teor de cimento e tijolos com alto teor de alumina. As âncoras cerâmicas possuem alumina ligada a fosfato, queimada e com presença de potássio. A área de baixa temperatura pode ser revestida

com módulos de lã de isolamento de alta temperatura, módulos combinados e tijolos refratários leves. Estes materiais sofrem danos e desgastes com a exposição excessiva a temperaturas elevadas, causada pelo fluxo de calor emitido pelos queimadores e vazão de ar em cada zona [9, 10].

A resistência ao dano por choque térmico de um material refratário não pode ser estimada precisamente por não ser uma propriedade intrínseca do material, podendo variar com o tamanho de grão, com o tipo e valor da tensão, com a taxa de carregamento e com outras condições de aplicação da tensão. A resistência ao dano por choque térmico pode ser medida em termos de número de ciclos térmicos que o refratário pode suportar quando submetido a mudanças de temperatura, e depende da densidade e das propriedades elásticas do material [11, 12]. Quando um refratário é submetido a ciclos térmicos industriais ocorre nucleação e/ou propagação de trinca resultando na perda de sua rigidez e resistência mecânica, levando à degradação de suas propriedades. Os danos resultantes dos números de ciclos térmicos que estas peças refratárias sofrem durante a operação do forno acabam comprometendo sua vida útil.

Portanto, a necessidade de determinar a vida útil e a durabilidade sem falhas das peças refratárias aplicadas em equipamentos de alto desempenho, como no caso dos materiais refratários aplicados em fornos de reaquecimento, exige um estudo técnico que oriente de forma equilibrada a avaliação dos parâmetros mensuráveis [13, 14]. A avaliação por ensaio de ultrassom e o teste de resistência a choque térmico das âncoras cerâmicas retiradas do teto e paredes do forno de reaquecimento (usadas ou não), permite obter dados importantes para mensurar e prever a vida útil deste material. Estas informações, após analisadas, asseguram a equipe de operação garantias da qualidade do bom desempenho do equipamento e do produto com base na escolha correta das peças refratárias e do projeto de sua montagem. Estas

informações, análises e resultados podem prever quando ocorrerá a próxima manutenção ou troca, e executar um planejamento eficaz de paradas programadas sem prejudicar o ritmo e produtividade do equipamento, podendo contribuir para a diminuição de perdas e desperdícios de recursos [15, 16].

2. OBJETIVO

Propor método para prever a vida útil de âncoras cerâmicas antes e após uso por meio de ensaios de ultrassom, avaliando sua longevidade e durabilidade utilizando métodos e ensaios destrutivos e não destrutivos, medindo a velocidade ultrassônica, resistência termomecânica e resistência ao dano por choque térmico.

2.1. Objetivo específico

- Realizar ensaios de ultrassom em peças refratárias novas e usadas propondo critérios de aceitação durante a inspeção de montagem para fornos de reaquecimento.

- Analisar as peças refratárias que foram rejeitadas mediante aos critérios de aprovação e rejeição das âncoras do teto e parede tendo a velocidade média (m/s) e o Índice de Qualidade (IQ) como parâmetros.

- Caracterização química e física das âncoras cerâmicas novas antes de serem montadas no forno de reaquecimento.

- Avaliar os resultados do teste de resistência à flexão a quente e do índice médio do teste de resistência ao choque térmico baseado no cálculo do módulo de elasticidade e no número de ciclos térmicos das âncoras cerâmicas.

- Determinar e prever o tempo de vida útil das âncoras cerâmicas novas e usadas causadas pelo desgaste e dano térmico em forno de reaquecimento.

- Analisar os resultados com base nos mecanismos envolvidos, na relação estrutura e propriedade dos materiais cerâmicos.

3. JUSTIFICATIVA

Em um mercado extremamente competitivo e de grande responsabilidade técnica, identificar uma metodologia capaz de orientar e estruturar a atividade de controle e monitoramento da qualidade antes, durante e após a aplicação dos materiais refratários em equipamentos industriais, permite aos aplicadores de materiais de revestimento, acrescentar determinados parâmetros de confiabilidade as suas atividades. Para isto os materiais refratários empregados em revestimentos de médias e altas temperaturas devem ser inertes, seguros ao manuseio e muitas vezes apropriados ao uso em ambientes reativos e severos, atendendo plenamente as características do projeto, tanto do equipamento quanto do fabricante do material refratário. No caso deste estudo, as peças refratárias conhecidas como âncoras cerâmicas possuem grande capacidade de isolamento térmico, propriedades térmicas, físico-químicas e mecânicas adequadas a sua aplicação. Medir e prever o tempo de vida útil destas âncoras cerâmicas é extremamente relevante para garantir a longevidade e desempenho dos fornos de reaquecimento, como também reduzir desperdícios e economizar recursos. Por outro lado, na literatura não existe uma metodologia científica para prever a vida útil de âncoras cerâmicas antes e após uso por meio de ensaios de ultrassom, avaliando sua longevidade e durabilidade utilizando métodos e ensaios destrutivos e não destrutivos, medindo a velocidade ultrassônica, resistência termomecânica e resistência ao dano por choque térmico. Desta forma, essa pesquisa vem suprir a deficiência da literatura específica sobre o tema.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A indústria siderúrgica é uma atividade intensiva no uso de energia, água, insumos e matérias-primas. É o ramo da metalurgia que possui diversos processos e características específicas que se dedicam à fabricação e tratamento do aço, sendo que este aço contribui para fabricação de diversos outros produtos e subprodutos em diferentes segmentos industriais. A produção mundial de aço bruto, em 2013, totalizou 1,6 bilhão de toneladas, aumentando 0,5% em relação a 2012. Os países asiáticos (China, Japão, Índia e Coreia do Sul) foram responsáveis por 64,6 % da produção. O Brasil foi o 9º maior produtor mundial (2,1%) e o maior produtor da América Latina (52,2%). O consumo aparente mundial de aço foi da ordem de 1,4 bilhão de toneladas (+2,9% em comparação com 2012). A produção mundial de ferro-gusa em 2013 está estimada em 1,2 bilhão de toneladas. O Brasil participou com 2,6% dessa produção. Em 2014, representado por 14 empresas privadas, controladas por onze grupos empresariais e operando 29 usinas distribuídas por 10 estados brasileiros, a indústria do aço no Brasil foi responsável pela produção de 33,9 milhões de toneladas de aço bruto, mantendo-se na 9ª posição no ranking da produção mundial [17]. A projeção de crescimento previsto para 2015 foi de 6,5% e as exportações siderúrgicas cresceram 38,1%, comparado com o ano de anterior [18]. A Tabela 1 apresenta a produção de aço bruto por empresa no Brasil.

Tabela 1 – Produção de aços brutos por empresa brasileira [18].

PRODUÇÃO DE AÇO POR EMPRESA (10³t)						
EMPRESA	2009	2010	2011	2012	2013	2014
APERAM	607	771	739	728	739	745
Arcelor Mittal Aços Longos	3.171	3.394	3.538	3.423	3.510	3.273
Arcelor Mittal Tubarão	5.334	5.959	5.405	4.390	4.430	5.368
CSA	-	478	3.147	3.510	3.721	4.134
CSN	4.375	4.902	4.874	4.847	4.457	4.458
GERDAU	6.105	8.177	8.777	8.181	8.063	7.458
SINOBRAS	181	239	243	319	314	331
USIMINAS	5.637	7.298	6.698	7.157	6.859	6.054
VALLOUREC	687	573	537	511	421	404
VILLARES METALS	92	119	137	121	141	140
VOTORANTIM SIDERURGIA	617	1.041	1.086	1.145	1.204	1.180
TOTAL	25.506	32.948	35.220	34.524	34.163	33.897

Nota: Correspondem à produção em lingotes + produtos de lingotamento contínuo + aços para fundição (Fonte: Aço Brasil 2015).

Os processos de fabricação do aço são complexos e exigem muitas transformações mecânicas, físicas e químicas. O aço é produzido, basicamente, a partir de minério de ferro, coque e cal. A fabricação do aço pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação, sendo que, neste trabalho a ênfase será no processo de laminação, mais especificamente, do tratamento térmico de tubos de aço em fornos de reaquecimento (Figura 4). O fluxo de processo do forno rotativo é "pré-aquecer - aquecer - descarregar" placas ou tarugos que giram juntamente com a base do forno para percorrer as zonas de aquecimento, concluindo, assim, o processo de tratamento térmico antes de finalmente serem descarregadas [1].

Para que o processo de tratamento térmico ocorra sem comprometer a estrutura do equipamento e atenda o desempenho exigido na utilização do produto final, é necessário revestir todo o forno de reaquecimento com materiais refratários que podem ser tijolos,

âncoras cerâmicas, blocos de concreto e argamassas refratárias. Vale comentar que a indústria de refratários brasileira está situada entre as mais avançadas do mundo, com produtos de alta qualidade, desenvolvidos para maximizar o desempenho dos equipamentos. A indústria de refratários tem feito uma contribuição significativa para as indústrias siderúrgicas, de cimento, não ferrosos, vidro, petroquímica e outras, diminuindo os custos específicos com refratários e aprimorando a qualidade de seus produtos através do uso de melhores sistemas refratários [9].

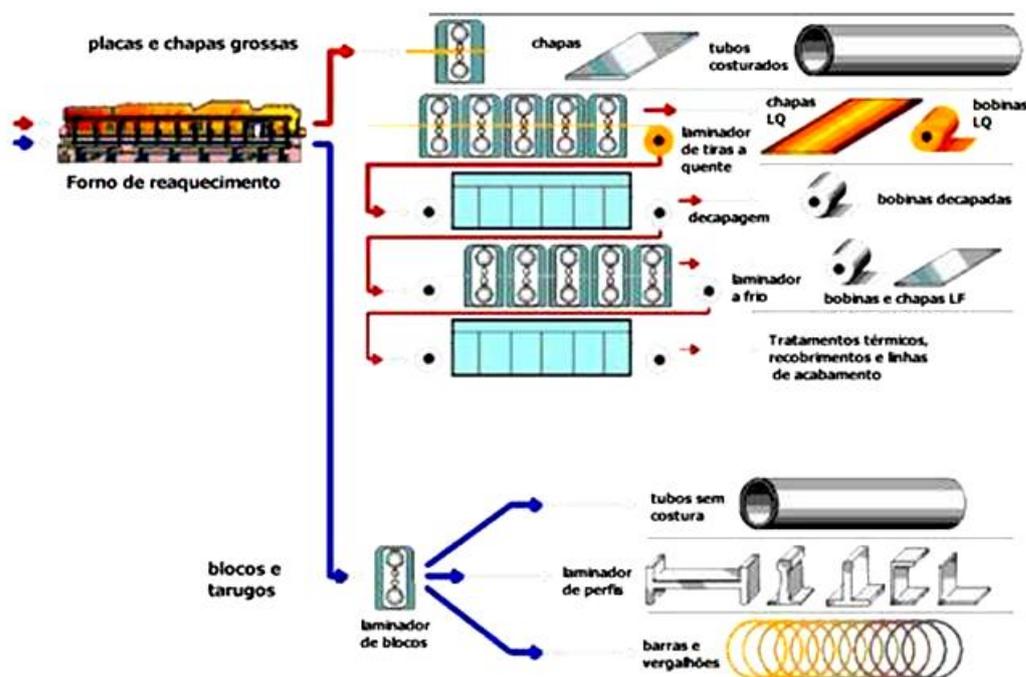


Figura 4 – Fluxo de processos para conformação mecânica na fabricação de tarugos e placas em um forno de reaquecimento [2, 3].

O refratário é um material cerâmico, natural ou artificial, conformado ou não, geralmente não metálico, que retém a forma física e a identidade química quando submetido a altas temperaturas (ABNT NBR 8826:2014 – Materiais refratários - Terminologia) ou esforço termomecânico. Os refratários são materiais multicomponentes, polifásicos, policristalinos, estáveis volumetricamente, capazes de resistir a ambientes hostis sob solicitações diversas, tais como: altas temperaturas, altas cargas mecânicas, oscilações de temperaturas, abrasão, erosão, corrosão, impacto, entre outros [10].

A grande demanda por projetos e plantas industriais ligadas ao consumo de produtos nos diversos segmentos fez com que o aperfeiçoamento da tecnologia de fabricação de materiais refratários necessitasse de garantias na qualidade do fornecimento, produtos mais adequados ao uso e serviços de aplicação mais rápidos e eficientes. Uma metodologia para a avaliação do desempenho das peças refratárias em cada etapa é prioridade, pois existindo algum desvio que afete algum destes processos, pode comprometer a qualidade dos produtos fabricados em equipamentos de alta tecnologia e gerar prejuízos com alto custo de investimento. É importante ressaltar que a cada parada para manutenção, defeito de qualidade ou mesmo falhas operacionais inviabilizam a comercialização e os custos destes produtos planos e não planos. Por isto, o controle e desempenho da qualidade das peças cerâmicas produzidas e/ou aplicadas para confiabilidade dos processos de fabricação é tão importante e o monitoramento de cada etapa é fundamental.

A necessidade de determinar a longevidade e durabilidade das peças refratárias aplicadas em equipamentos de alto desempenho, como no caso das âncoras cerâmicas montadas no teto e paredes no forno de reaquecimento, partem da experiência técnica e operacional que orientam de forma equilibrada o controle de qualidade na avaliação de parâmetros apurados, assegurando a equipe de operação o bom desempenho do equipamento em uso. Informações, análise e resultados que possibilitem uma previsão da manutenção e um planejamento correto das paradas programadas sem prejudicar o ritmo e a produtividade da laminação são necessários e contribuem para a diminuição de perdas e desperdícios de recursos.

4.1. Cerâmicas refratárias

As cerâmicas refratárias são uma importante classe de cerâmicas que normalmente são utilizadas em grandes tonelagens. As expressivas propriedades destes materiais incluem a capacidade de suportar altas temperaturas sem fusão ou decomposição e a capacidade de permanecer não reagidos e inertes quando expostos a ambientes severos. Em adição, a capacidade de proporcionar isolamento térmico é muitas vezes um importante diferencial. Materiais refratários são comercializados numa variedade de formas, mas tijolos e âncoras são as mais comuns. Aplicações típicas incluem revestimentos de fornos para refino de metais, fabricação de vidro, tratamentos térmicos metalúrgicos e geração de potência [11, 12].

Naturalmente, o desempenho de uma cerâmica refratária depende de sua composição. Nesta base, existem várias classificações, que são as argilas refratárias, de sílica, cerâmicos básicos e especiais. Para muitos materiais comerciais, as matérias primas consistem de partículas de diferentes tamanhos, que podem ter diferentes composições (Figura 5). Na queima, as partículas finas normalmente são envolvidas na formação de uma fase de ligação, que é responsável pelo aumento da resistência mecânica do tijolo ou âncora; esta fase pode ser predominantemente vítrea ou cristalina. A temperatura de serviço é normalmente inferior àquela na qual a peça refratária foi queimada [11, 12]. A Figura 5 apresenta os diversos materiais cerâmicos.

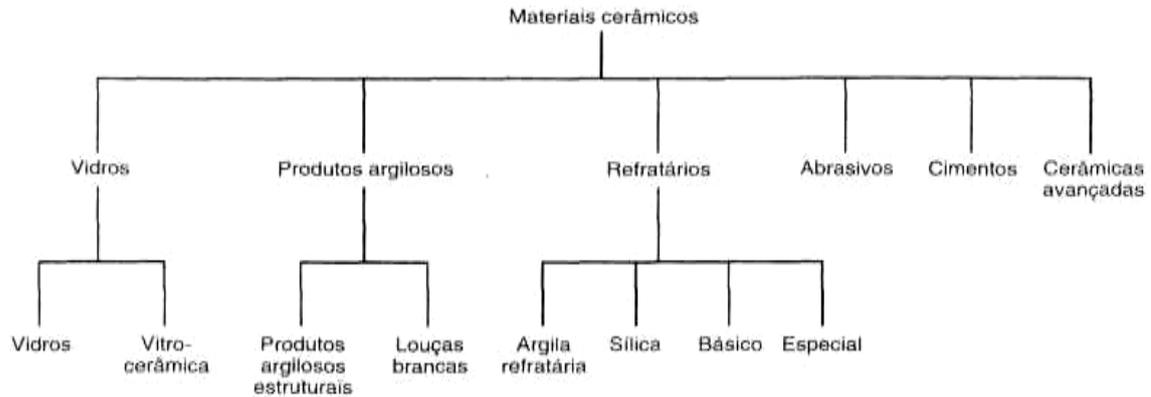


Figura 5 – Classificação dos materiais cerâmicos com base na sua aplicação [12].

Argilas Refratárias: Os ingredientes principais para os refratários sílico-aluminosos são misturas de argilas sílico-aluminosas de alta pureza, alumina e sílica, usualmente contendo entre 25 a 45%, em massa de alumina. De acordo com o diagrama de fases $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Figura 6), ao longo desta faixa de composição, a máxima temperatura possível sem a formação de uma fase líquida é 1587°C . Abaixo desta temperatura as fases de equilíbrio são mulita e sílica (cristobalita). Durante o uso em serviço do refratário, a presença de uma pequena quantidade de uma fase líquida pode ser permitida sem comprometer a integridade mecânica. Acima de 1587°C , a fração da fase líquida dependerá da composição do refratário. O aumento do teor de alumina aumentará a temperatura máxima de serviço, permitindo a formação de uma pequena quantidade de líquido. Tijolos de refratário sílico-aluminoso são usados principalmente em construção de fornos, para confinar atmosferas quentes e para isolar termicamente membros estruturais em relação a temperaturas altas. Para tijolo sílico-aluminoso, a resistência mecânica não é ordinariamente uma consideração importante, porque o suporte de cargas estruturais usualmente não é requerido. Algum controle é normalmente mantido sobre a precisão dimensional e estabilidade dimensional do produto acabado [12, 19].

Refratários de Sílica: O principal ingrediente para os refratários de sílica, às vezes denominado refratários ácidos, é a sílica. Estes materiais, bem conhecidos pela sua capacidade de suportar carga a alta temperatura, são comumente usados nas abóbadas arqueadas de fornos

de fabricação de aço e de vidro; para estas aplicações, temperaturas tão altas quanto 1650°C são possíveis. Sob estas condições, uma fração do tijolo existirá realmente como um líquido. A presença de concentrações, mesmo pequenas, de alumina tem uma influência adversa no desempenho destes refratários, que pode ser explicada pelo diagrama de fases sílica-alumina, (Figura 6). Uma vez que a composição eutética (7,7% de Al_2O_3) está muito próxima à extremidade da sílica do diagrama de fases, mesmo pequenas adições de Al_2O_3 , abaixarão a temperatura “liquidus” significativamente, o que significa que substanciais quantidades de líquido podem estar presentes em temperaturas acima de 1600°C. Assim, o teor de alumina deveria ser mantido num mínimo, normalmente entre 0,2 e 1,0% em massa [12, 19].

Estes materiais refratários são também resistentes a escórias que sejam ricas em sílica (denominadas escórias ácidas) e são, às vezes, usados como vasos de contenção (armazenamento) para elas. Por outro lado, eles são prontamente atacados por escórias compostas de uma alta proporção de CaO e/ou MgO (escórias básicas) e o contato com estes materiais óxidos deveriam ser evitados.

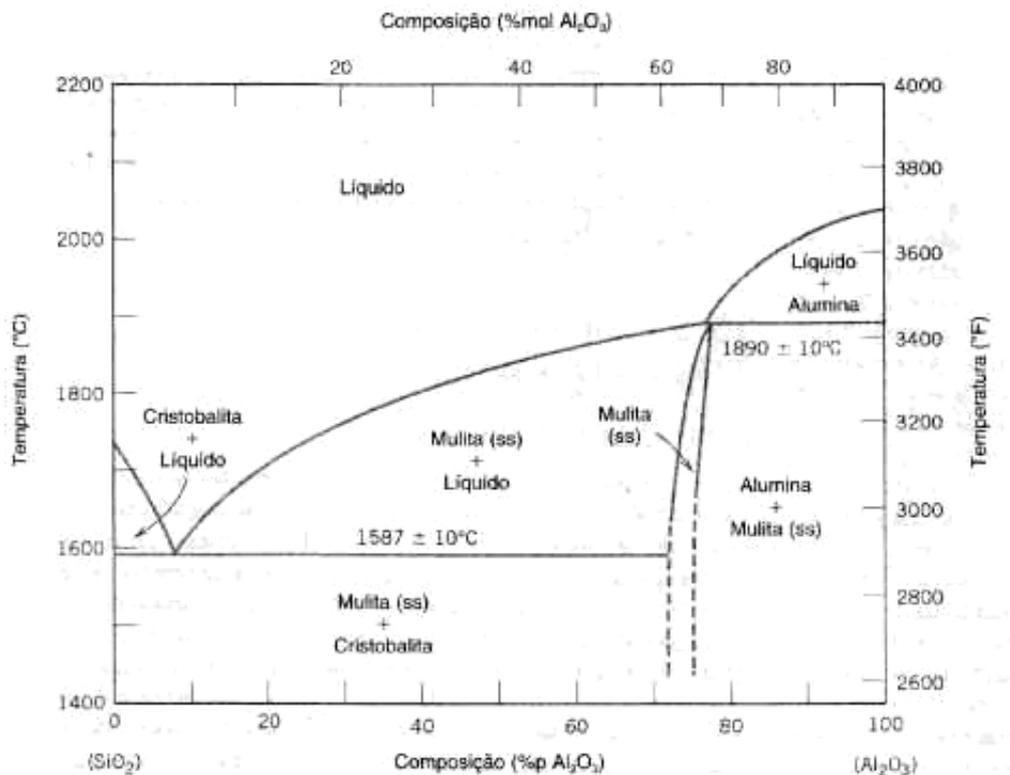


Figura 6 – Diagrama de fases para o Sistema Sílica-Alumina [12].

Refratários Básicos: Os refratários que são ricos em periclásio, ou magnésia (MgO), são denominados básicos; eles podem conter também compostos de cálcio, cromo e ferro. A presença de sílica é deletéria ao seu desempenho em alta temperatura. Refratários básicos são especialmente resistentes ao ataque por escórias contendo altas concentrações de MgO e CaO, e encontram extensivo uso em alguns fornos de soleira aberta para fabricação de aços. (Na verdade, atualmente, os fornos de aciaria em vigor são os de Conversores LD e os Fornos Elétricos a Arco Trifásico de Ultra Alta Potência) [11, 12].

Refratários Especiais: Existem ainda outros materiais cerâmicos refratários que são usados para aplicações refratárias bastante especializadas. Como por exemplo, os refratários de zircônia, que são compostos essencialmente de óxido de zircônio (ZrO₂), os refratários de zircão ou zirconita, que são compostos essencialmente pelo ortossilicato de zircônio 67,03% ZrSiO₄ e 32,97% de SiO₂, e os refratários de óxido de cromo ou cromo, que são compostos de

óxido de cromo (Cr_2O_3). Alguns desses são materiais óxidos relativamente de alta pureza, muitos dos quais podem ser produzidos com muito pouca porosidade. Incluídos nesse grupo estão alumina, sílica, magnésia, berília (BeO) e mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$). Outros incluem compostos de carbetos, em adição ao carbono e grafita. Carbetos de silício (SiC) tem sido usado como elemento de aquecimento em resistência elétrica, como material de cadinho e como componente interno de forno. Carbono e grafita são refratários, mas encontram limitada aplicação por causa da sua susceptibilidade à oxidação em temperaturas acima de 800°C . Como esperado, estes refratários especializados são relativamente caros [11, 12].

Refratários Não conformados: Os produtos refratários não conformados têm o formato de um grande bloco, isento de juntas em sua disposição final, algo como a peça monolítica, cinza, opaca e densa. Essa configuração é particularmente importante nos revestimentos cuja função principal é conter gases, líquidos ou manter pressões positivas em vasos industriais. Esse tipo de solicitação é comum nas indústrias químicas, petroquímicas e em calcinadores de alumina. Entre as maiores indústrias usuárias de produtos refratários não conformados estão a petroquímica e a fundição. A primeira é um dos grandes consumidores desta classe de material e, aproximadamente, 95% dos produtos correspondem aos materiais monolíticos. As vantagens em relação aos materiais conformados são a redução do tempo de fabricação, a diminuição de estoques de formatos especiais, a menor quantidade de juntas e a facilidade em revestir geometrias complexas, entre outras [20, 21].

Os materiais refratários possuem como funções básicas contenção de material líquido e isolamento térmico. Sua durabilidade depende do conjunto de fatores e das solicitações às quais está sujeito (Figura 7). Tais solicitações variam de acordo com a região de cada equipamento, definindo o padrão de desgaste do revestimento [12, 19]. A Figura 8 apresenta o interior de um forno de aquecimento rotativo.

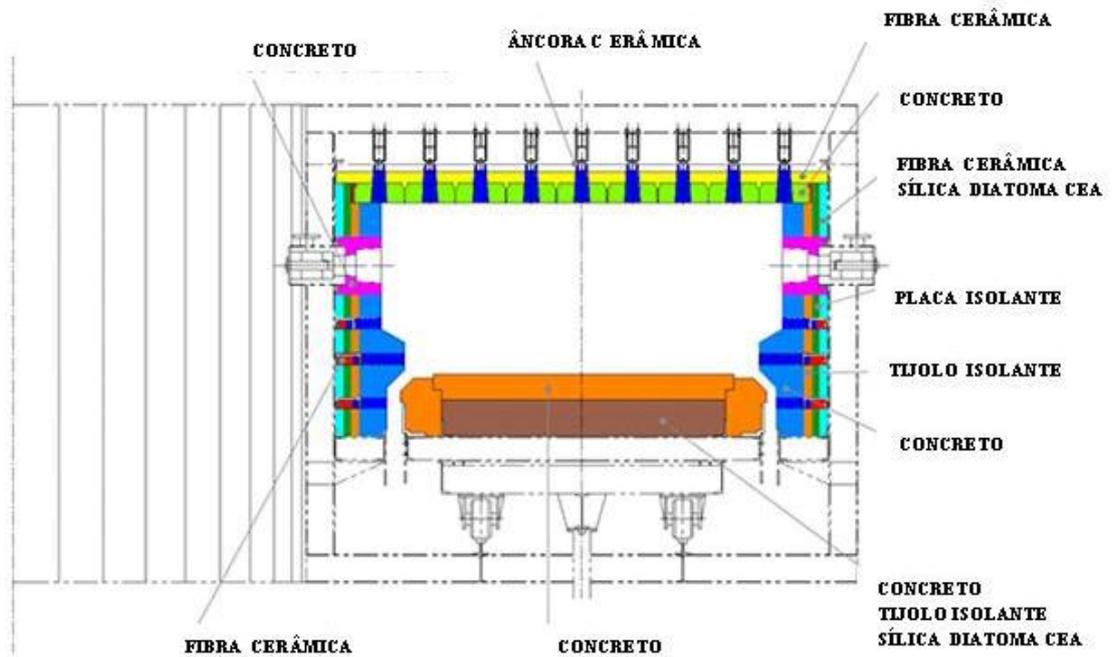


Figura 7 – Desenho esquemático e disposição dos materiais refratários no teto e paredes do Forno de Reaquecimento Rotativo [22].

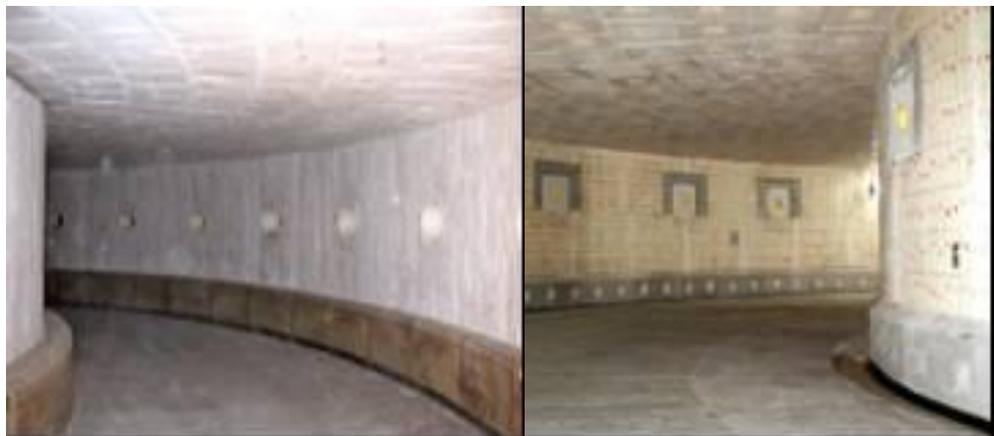


Figura 8 – Visão interna de um Forno de Reaquecimento Rotativo pronto para operação com o revestimento refratário de teto e paredes montados [23]

A ABNT NBR 10237:2014 – Materiais refratários – Classificação, define os materiais refratários de acordo com os seguintes critérios: forma, processo de fabricação, processo de conformação, natureza química e mineralógica dos constituintes e grau de porosidade. Quanto à forma física final, os refratários são classificados:

- Conformados (moldados): formatos definidos e padronizados como arco, cunha, paralelos, radiais e formatos especiais.
- Não conformados (não moldados): Não apresentam forma definidas como massas plásticas e massas de projeção: argamassas, concretos densos e isolantes e massas de socar.

Ainda de acordo com a ABNT NBR 10237:2014, quanto ao processo de fabricação, os refratários são classificados do seguinte modo:

- Conformados: queimados, impregnados, quimicamente ligados, eletrofundidos e ligados (curados ou não) a piche, a alcatrão ou a resinas.
- Não conformados: pega hidráulica, pega a quente ou cerâmica, pega ao ar e pega química.

Quanto ao grau de porosidade, os refratários podem ser classificados em densos e isolantes. Os refratários densos possuem coeficiente de condutividade térmica elevada. Os refratários isolantes possuem baixo coeficiente de condutividade térmica, baixa densidade (0,70 a 1,20 Kg/m³), alta porosidade, baixa resistência à compressão e variação linear dimensional (VLD) limitada em 2,0%.

Concreto Refratário: Com base nesta classificação, o concreto refratário pode ser definido como um produto refratário não-conformado de pega hidráulica. Consiste na mistura de um ou mais agregados refratários de granulometrias adequadas com um cimento refratário que funciona como ligante, podendo conter ainda aditivos e componentes não cerâmicos (ABNT NBR 8826:2014). Os concretos refratários são bons isolantes com função importante na indústria, e para cumprir esta finalidade a sua qualidade deve ser testada, e necessita que suas propriedades sejam confirmadas e seus ensaios sejam realizados conforme normas técnicas nacionais e internacionais [21].

Âncoras Cerâmicas: As âncoras cerâmicas são normalmente um produto refratário aluminoso, prensado, queimado ou quimicamente ligado e curado. As peças estudadas são compostas quimicamente por SiO₂ (16 a 24%), Al₂O₃ (69 a 77%), Fe₂O₃ (máxima 2,3%) e álcalis (máxima 1,2%). Possui massa específica aparente de 2,4 a 2,7 g/cm³, porosidade aparente de 16 a 25%, a dilatação térmica reversível a 1400 °C é de 0,90%, resistência à compressão à temperatura ambiente mínima de 40 MPa e temperatura máxima de uso de 1600 °C⁽¹⁾. Sua matéria prima básica é constituída por chamote refratário, que é um agregado refratário aluminoso composto por mais de 80% de fase mulita e com teor de argila de até, aproximadamente, 50%. Dependendo da matéria-prima, a âncora cerâmica é formada para adquirir características, como por exemplo, elevada densidade estrutural, boa resistência à mudança e à deformação térmica. [22, 24].

É importante salientar que a mistura é fundamental durante a aplicação dos concretos refratários, pois além de prevenir degradações e futuros defeitos de qualidade, afeta diretamente o tempo de parada de equipamentos durante operações de reparo ou substituição do revestimento. Concretos que sejam rapidamente misturados e que exijam misturadores de menor potência são sempre os mais adequados [25]. Além de cuidados tomados durante a mistura, atenção também deve ser dedicada ao transporte e à aplicação do concreto. Após a mistura, realiza-se a moldagem dos concretos refratários de acordo com o tipo de aplicação. Existem vários métodos para instalação do concreto refratário (vertido, projetado, *gunning*, *shotcret*, etc.) [10].

(1) As características mencionadas referem-se a valores médios provenientes do Controle de Processo Assegurado do fabricante. As metodologias utilizadas são próprias dos fabricantes, as quais foram baseadas em Normas Técnicas Nacionais e Internacionais, quando aplicáveis.

4.2. Inspeção e controle de qualidade das âncoras cerâmicas

Pode-se desdobrar o processo de controle de qualidade da fabricação a aplicação das peças refratárias em três momentos. O primeiro refere-se ao controle de qualidade criterioso que é realizado pelos fabricantes da âncora cerâmica. O segundo é o controle de qualidade que é feito durante o recebimento da âncora cerâmica pelas empresas de engenharia de aplicação de materiais de revestimento. E o terceiro é o monitoramento da qualidade da montagem necessária para garantir que a âncora cerâmica, que foi aplicada, esteja conforme o escopo definido pelo cliente, e a garantia que o serviço contratado foi executado de acordo o planejado.

No entanto, para que equipamentos como fornos de reaquecimentos possam ter bom desempenho, atendendo aos padrões de qualidade exigidos na preparação de placas, tarugos ou peças de engenharia, é necessário garantir certas características e parâmetros para realizar os processos de tratamento térmicos, forjaria, laminação, cementação, têmpera ou recozimento. Para isto, é importante que o revestimento refratário esteja adequado e tenha seu desempenho apropriado para atender exigências térmica, mecânica e química.

As exigências térmicas requeridas para as peças refratárias depois de montadas em equipamentos de alto desempenho, assim que colocadas em serviço, são alta resistência a temperaturas elevadas, suportando gradientes de temperatura e alterações nos mesmos (transientes de temperatura). Em muitos casos, as variações afetam muito pouco a peça refratária montada no equipamento, mas dependendo do tipo e extensão das alterações, podem causar danos catastróficos ao revestimento refratário. As exigências mecânicas do revestimento refratário são significativas passando por diversos tipos de solicitações físicas, tais como: choques no carregamento, compressões estáticas ou dinâmicas, peso do próprio

revestimento, peso da carga, abrasão, vibrações, líquidos em alta temperatura e também posicionamento errado das juntas de dilatação. Nas solicitações químicas, essencialmente, o efeito do potencial químico sobre as peças refratárias é a sua maior exigência. Um potencial químico decorre da diferença de composição química entre a peça refratária e o meio, a certa condição de temperatura e pressão. Isto provoca uma diferença de energia livre promovendo uma alteração no refratário fazendo que esta diferença se torne mínima [9].

As propriedades físicas e mecânicas que impactam o desempenho e o comportamento do revestimento refratário, quando escolhido para montagem no equipamento, dependem principalmente do projeto do equipamento, projeto de montagem, mão de obra qualificada para montagem do material, especialistas e técnicos refrataristas, propriedades e características dos materiais usados, fatores operacionais e qualidade da fabricação do material refratário [10].

Um método de avaliação da qualidade para estudar o comportamento das peças cerâmicas, antes e após sua aplicação, utiliza os ensaios de ultrassom, velocidade ultrassônica, módulo de elasticidade, caracterização química e física, análise da microestrutura, teste de resistência à compressão, densidade aparente, porosidade aparente, densidade geométrica e teste de resistência ao choque térmico. Pois, entende-se que em posse destes dados, pode-se prever a qualidade, desempenho, longevidade e o tempo de falha destas peças cerâmicas submetidas a determinados esforços, o que torna este estudo inovador ao ser aplicado como método de avaliação e controle de qualidade de peças refratária na indústria siderúrgica.

4.3. Ensaios de caracterização de cerâmicos

Velocidade de Ultrassom: Medidas de velocidade e atenuação de ultrassom são as mais frequentemente empregadas para caracterização de corpos cerâmicos. Segundo Berutti, citando Bhardwaj [26], a velocidade de ultrassom pode ser tratada como uma propriedade

macroscópica e ser usada principalmente para determinação de propriedades elásticas, ainda que, em muitos casos, possa ser usada para determinar defeitos microestruturais. O módulo de elasticidade está relacionado com a velocidade do som no material e com a densidade do mesmo, conforme a Equação 1 [9, 10].

$$V = (E / \rho)^{1/2} \quad (\text{Eq. 1})$$

De uma forma mais completa, por meio do coeficiente de Poisson, podem ser relacionadas às velocidades longitudinais e transversais da onda ultrassônica, ficando o módulo de elasticidade em função destas velocidades [27, 28]:

$$E = (\rho \cdot V_L^2) \cdot [(1 + \mu) (1 - 2\mu) / (1 - \mu)] \quad (\text{Eq. 2})$$

$$E = (\rho \cdot V_T^2) \cdot 2(1 + \mu) \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: V = Velocidade do som no material (m/s); V_T = Velocidade transversal; V_L = Velocidade longitudinal; E = Módulo de elasticidade (GPa); ρ = Densidade do material (g/m^3); μ = Coeficiente de Poisson.

Caracterização e Análise Química: A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica analítica espectroscópica. É um importante ensaio que pode verificar as porcentagens dos óxidos presentes em cada matéria prima, visando o desenvolvimento de formulações de refratários, além do controle de qualidade para verificar suas especificações químicas dos produtos e a presença de algum elemento contaminante. Os resultados são expressos em "porcentagem" de óxidos presentes [9].

Densidade aparente e Porosidade aparente: Densidade e Massa aparente (DMA) e Porosidade (PA) aparentes são propriedades importantes a serem conhecidas para o cálculo estrutural e sua correlação com outras propriedades mecânicas; seus resultados são normalmente expressos em g/cm^3 e % respectivamente [9]:

$$V_a = (M_u - M_i) / M_{e \text{ líquido}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$D_{ma} = (M_s / V_a) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$P_a = [(M_u - M_s) / (M_{e \text{ líquido}} \times V_a)] \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde: V_a = Volume Aparente (cm^3), D_{ma} = Densidade, Massa Aparente (g/cm^3), P_a = Porosidade Aparente (%), M_s = Massa Seca (g), M_u = Massa Saturada (g), M_i = Massa Imersa (g), $M_{e \text{ líquido}}$ = Massa Específica do Líquido (ρ / água = $1 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Densidade geométrica ou Massa aparente (Seca e úmida): Para determinar a densidade de massa aparente ou densidade geométrica é feito o cálculo pela equação 7 [9]:

$$D_a = m / (c \cdot l \cdot e) \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde: D_a = densidade de massa aparente (g/cm^3), m = massa do corpo-de-prova (g), c = comprimento do corpo-de-prova (cm), l = largura do corpo-de-prova (cm), e = espessura do corpo-de-prova (cm).

Resistência à compressão à temperatura ambiente e Ruptura à flexão a quente: A resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA) e o módulo de ruptura à flexão a quente (HMOR) são propriedades importantes a serem conhecidas, pois as solicitações por esforços mecânicos dos materiais refratários geralmente são de compressão e estas propriedades são utilizadas conjuntamente para as decisões de projetos de refratários, no cálculo das estruturas e seus resultados são normalmente expressos em MPa [9, 14].

$$RCTA = (\text{Carga Máxima Aplicada} / \text{Área}) \quad (\text{Eq. 8})$$

$$HMOR = (3 \cdot P \cdot L) / (2 \cdot b \cdot d^2) \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde: P = Carga de Ruptura (MPa), L = Distância entre Apoio (mm), d = Altura (mm), b = Largura do corpo-de-prova (mm).

Módulo de Elasticidade (E): A medida do módulo de elasticidade de um material é útil na determinação de sua integridade estrutural. O resultado pode indicar o grau de ligação e a presença de macrotrincas ou laminações. Técnicas sônicas e ultrassônicas excitam continuamente a amostra, enquanto que técnicas de impulso excitam a amostra instantaneamente. O cálculo do módulo de elasticidade envolve em todos os casos o conhecimento da densidade aparente da amostra e um fator de forma [27, 28, 29].

$$E = V_L^2 \cdot \rho \cdot [(1 + \mu) (1 - 2\mu) / (1 - \mu)] \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde: E = Módulo de elasticidade (GPa), V_L = Velocidade ultrassônica (km/s), ρ = Densidade aparente (g/cm^3), μ = Coeficiente de Poisson.

Resistência ao Choque Térmico: O Índice de resistência ao choque térmico ($IRCT \rightarrow 0$) é determinado por meio do gráfico do módulo de elasticidade residual com o número de ciclos de choque térmico, onde a temperatura ambiente é 25°C e a temperatura de teste é 1000°C . Obtém-se uma reta traçada pelos pontos obtidos após 5, 10, 15 e 20 ciclos, de onde o índice térmico ($IRCT \rightarrow \infty$) é obtido pela extrapolação da curva, usando a equação da reta ($y = ax + b$), no ponto onde o módulo de elasticidade é igual à zero. O módulo de elasticidade a frio é obtido também através do método de ultrassom, onde se determina o módulo de elasticidade inicial e após os 5, 10, 15 e 20 ciclos. O choque térmico ocorre quando um componente é submetido a um gradiente de temperatura entre a sua superfície e seu

interior, provocado por aquecimento ou resfriamento brusco originando tensões térmicas em seu interior [10]. A Variação do comprimento da amostra é dada pela equação 11.

$$\Delta L = \alpha \cdot (T_q - T_a) \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde: T_q = Temperatura de aquecimento, T_a = Temperatura de resfriamento, α = coeficiente de dilatação térmica linear do material e ΔL = variação do comprimento (mm).

Estudo da Microestrutura: A ausência total de escoamento nos materiais cerâmicos a temperatura ambiente é a principal razão da sua fragilidade (Figura 9). A resistência mecânica dos materiais refratários é baixa, e isto devido às descontinuidades, que produzem concentração de tensões no material. Estas descontinuidades podem ser fissuras, poros, contorno de grãos ou mesmo cantos vivos da peça. Nos materiais dúcteis, as concentrações de tensão podem ser aliviadas por deformação plástica. Nos materiais frágeis este mecanismo não ocorre, em vez disso, quando a concentração de tensões supera o limite de resistência do material, ocorre a fratura. Uma vez iniciada, a fratura se propaga facilmente sob tensão, pois a concentração de tensão na ponta da trinca aumenta conforme a trinca avança. Usualmente os materiais refratários são muito mais resistentes à compressão que à tração, pois os esforços de compressão não tem tanto efeito no sentido de propagar a trinca, como acontece nos esforços de tração [26, 28].

Obviamente, não se pode deixar de citar a porosidade, que é uma variável microestrutural que deve ser controlada e medida para produção de uma peça ou tijolo refratário ou mesmo concreto refratário adequado. As propriedades de resistência mecânica, capacidade de suportar carga, e resistência ao ataque pelos materiais corrosivos crescem com a redução da porosidade. Ao mesmo tempo, características de isolamento térmico e resistência ao choque térmico são diminuídas com a redução da porosidade. Naturalmente, a porosidade

ótima depende das condições de serviço [11, 12]. A Figura 9 apresenta uma âncora cerâmica com 80% de alumina (Al_2O_3) e 20% de sílica (SiO_2) contendo poros e ligada a fosfato (P_2O_5),

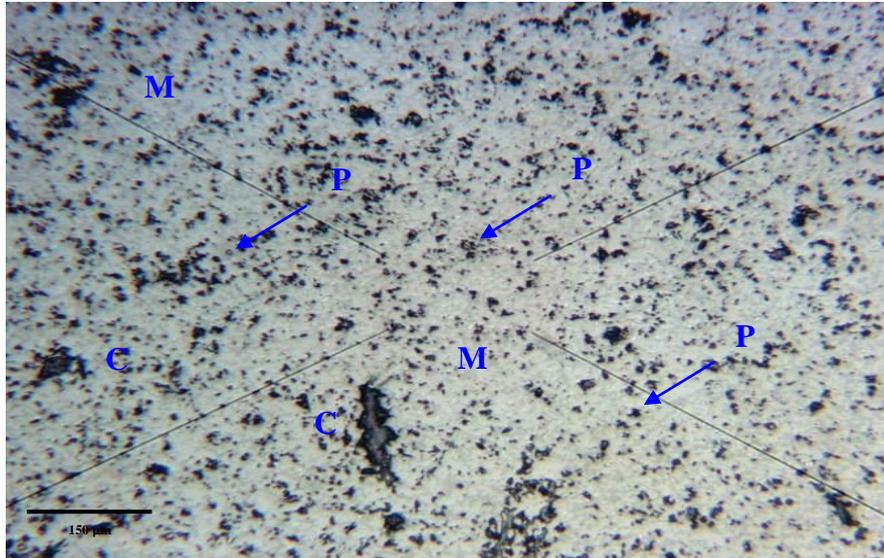


Figura 9 – Microestrutura de âncora cerâmica com 80% alumina ligadas a Fosfato e queimada, onde P = Poro, M = Al_2O_3 e C = SiO_2 [10]

A vida útil de uma âncora cerâmica depende de fatores importantes como, por exemplo, o processo de fabricação das peças, a refratariedade (ou seja, pureza), as propriedades físico-químicas, a resistência ao choque térmico, a temperatura de formação da fase líquida e a resistência mecânica a quente, sendo que estas características são adquiridas durante o processo de fabricação da peça refratária. No início da produção de âncoras cerâmicas é preciso definir o projeto e o objetivo da aplicação, além da escolha dos tipos de agregados. Como relação ao projeto de aplicação, determina-se a temperatura de uso, a condição de uso correlacionado ao modo de operação do equipamento, sempre considerando uma operação em temperatura constante ou sujeita a variações térmicas (choque térmico). Para a escolha do agregado, deve-se levar em consideração o percentual de alumina ($\% \text{Al}_2\text{O}_3$) a ser utilizado na fabricação da peça.

Refratariedade é a capacidade que alguns materiais possuem para resistir à temperatura acima de 1435°C sem se deformarem e sem perderem suas propriedades de baixa condutividade térmica e elétrica [10]. Analisando o diagrama da Figura 6, se a formação de líquidos e a formação da fase vítrea ocorrem a temperaturas elevadas, melhor será para a refratariedade da peça cerâmica. Quanto mais alta for a temperatura para retardar a formação de líquidos, melhor será o desempenho termomecânico da peça refratária.

O objetivo primeiro do trabalho era visualizar, por meio do teste de ultrassom, a conformidade das peças selecionadas com a especificação técnica da âncora cerâmica aplicadas em forno de reaquecimento e correlacionar os valores do teste de ultrassom com a vida útil baseando-se nas campanhas e desempenho do revestimento refratário. Em seguida, comparar o método de medição direta com o método indireto de ultrassom. No momento deste estudo, pesquisar a influência das trincas e fraturas nas âncoras cerâmicas, não era o ponto principal deste trabalho. A análise microestrutural foi utilizada para responder e justificar os desvios encontrados durante os ensaios de ultrassom identificados nas peças selecionadas (Tabela 7). O interesse em buscar alguma fundamentação teórica relacionada a este aspecto, influência das trincas e fraturas nas âncoras cerâmicas, foi percebido na forma de responder algumas questões durante a construção deste trabalho.

A possibilidade de eleger um método de avaliação utilizando ensaios laboratoriais destrutivos e não destrutivos para ajudar a monitorar a qualidade e inspecionar peças refratárias, antes e durante as etapas de montagem do revestimento, nos auxilia a detectar possíveis defeitos que podem comprometer o desempenho dos produtos que passam por tratamento térmico durante a operação destes fornos de reaquecimento. A cada parada para manutenção, queda de refratário, defeito de qualidade de aplicação ou mesmo falhas operacionais inviabilizam a comercialização e elevam os custos destes produtos [9].

A duração das campanhas das âncoras cerâmicas aplicadas ao revestimento refratário possuem muitas variáveis significativas. A escolha, montagem e composição do revestimento refratário dependem de fatores que vão desde a análise do desgaste do material até o seu aspecto econômico. Os fatores de desgaste dependem principalmente das solicitações exigidas pelas condições operacionais do forno de reaquecimento que abrange toda a operação, e tem a distribuição e variação de temperatura ao longo das diversas regiões do equipamento como seu fator mais crítico. O projeto do equipamento (geometria e dimensões), o projeto de revestimento (isolamento térmico e balanceamento qualitativo/quantitativo), o projeto de montagem (aplicação gradativa das peças e posicionamento correto na região pré-definida), além das características das peças refratárias (aspecto físico e químico), são os fatores que impactam diretamente na boa campanha do revestimento associado à operação do equipamento [9].

Tecnicamente, existem três maneiras de avaliar o desempenho do revestimento refratário quando montado no forno de reaquecimento. A primeira se baseia na vida útil produtiva do revestimento refratário quando aplicado no equipamento, chamado de campanha, que é o tempo ao qual o revestimento esteve em operação ou produção dentro do equipamento. Embora demorado e questionável, este modelo compara o desempenho do revestimento de um equipamento, campanha a campanha, que inicia a partir da montagem do novo revestimento, o reparo deste revestimento durante a operação até a sua demolição, e por fim, a troca total do revestimento, incluindo todas as paradas para manutenção programada do revestimento. Este parâmetro também é utilizado para avaliar o desempenho do equipamento [9, 10].

A segunda se baseia no consumo específico do refratário aplicado. O desempenho é avaliado em termos de quantas toneladas de refratário são consumidos (desgastes térmicos, mecânicos ou químicos) para produção da unidade de peso do produto fabricado no

equipamento. O consumo específico é calculado considerando o peso do refratário aplicado no revestimento do equipamento consumido, desconsidera o peso do material demolido após a campanha e inclui os pesos dos refratários gastos com manutenções ou reparos periódicos (Consumo específico (Kg/Ton) = Kilograma de refratário aplicado / Tonelada de aço produzido) [9, 10].

E a terceira se baseia na avaliação da velocidade do desgaste como modelo de avaliação do desempenho dos revestimentos em campanha. Considerando a medida da espessura do revestimento remanescente subtraindo a medida original, para em seguida, dividir pelo número de corridas ou tempo de permanência do material em processo no equipamento. Medindo e avaliando a velocidade de desgaste (milímetro / corrida ou tempo de contato com o material), pode-se definir quantas corridas ou quanto tempo pode-se ter o equipamento novamente a disposição para operação [9, 10, 21].

Entretanto, para estudar a vida útil e longevidade das âncoras cerâmicas, pode-se utilizar modelos teóricos para explicar a falha por choque térmico em materiais cerâmicos partindo de duas teorias. A primeira trata da ocorrência da fratura, quando a resistência mecânica do material é superada, enquanto a segunda trata da propagação de trincas, a qual é promovida pela energia elástica armazenada no momento da fratura [29, 30]. Na primeira teoria qualquer problema de origem térmica é entendido a partir da distribuição interna de temperatura, tensões resultantes e resistência do material, sendo que a distribuição heterogênea da temperatura no interior do sólido gera tensão. Na segunda teoria, o início do processo de fratura não é considerado, pois é abordada a extensão de trincas já existentes e a mudança no comportamento físico do material, o qual é observado por meio de ensaios realizados após determinado número de ciclos de choque térmico, nos quais são avaliadas as alterações na resistência mecânica do material [11, 31].

Segundo a teoria de Griffith [30], e no modelo proposto por Hasselman [31], o material é considerado totalmente frágil quando a densidade volumétrica de defeitos estruturais na forma de multidefeitos, circulares e idênticos, estão distribuídos uniformemente pelo material. Para calcular a propagação de trincas, pode-se utilizar um critério proposto por Hasselman [13, 14, 32] medindo a extensão da trinca que se propaga em materiais cerâmicos submetidos a variações térmicas. Para isto, pode-se aplicar o conceito de tensão térmica (σ_t), proveniente de gradientes de dilatação térmica e das condições de propagação contínua de trincas, além da energia total de fratura ($G = y_{wof}$):

$$\sigma_t = (E \cdot \alpha \cdot \Delta T) / (1 - \mu) \quad (\text{Eq. 14})$$

$$G = y_{wof} = (\pi \cdot \sigma_t^2 \cdot c) / E \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde: $G = (y_{wof}) =$ Energia total de fratura (J/m^2); $E =$ Módulo de elasticidade (GPa); $\sigma_f =$ Tensão de fratura térmica (MPa); $\mu =$ Coeficiente de Poisson; $\alpha =$ Coeficiente de dilatação térmica linear do material ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Quando Griffith [30], em 1920, propôs, inicialmente, a ideia de defeitos controladores e limitadores da resistência mecânica em sólidos frágeis, abriu possibilidade para desenvolver um modelo de previsão de vida útil que considera o crescimento subcrítico de trincas em um ambiente úmido. Postulou que materiais refratários possuem uma quantidade significativa de micro defeitos, e estes defeitos estão sob um estado de tensão abaixo do valor crítico necessário para propagá-lo, estabelecendo uma equação (Eq. 23) que define, em função das condições de trabalho, em quanto tempo o defeito controlador poderá atingir níveis críticos.

É importante ressaltar que, segundo Cunha-Duncan [14], quando a peça refratária rompe de maneira elástica frágil, onde a força-deslocamento é claramente linear elástica até a ruptura, a equação clássica de Griffith (Eq. 21) representa satisfatoriamente a resistência do corpo cerâmico. Contudo quando a peça refratária não rompe de maneira linear elástica, assim

como quando uma extensa região não-linear se desenvolve antes da ruptura, o uso dessa equação não é a melhor prática para determinação da resistência. Mas, essa equação é utilizada com regularidade no campo das peças refratárias, geralmente, sem considerar as suas limitações.

Em seu modelo, Griffith propôs a ideia dos defeitos controladores e limitadores da resistência mecânica dos sólidos frágeis [30, 32], considerando que nos materiais refratários há uma quantidade significativa de micro defeitos que estão sob tensão abaixo do valor crítico necessário para propagá-los. Para isto, estabeleceu equações que definem, em função das condições de trabalho, o tempo possível para o defeito controlador atingir os níveis críticos de fratura, e qual o seu provável tempo de vida útil [13, 14, 30]:

$$\sigma_f = [2 \cdot E \cdot \gamma / \pi \cdot c]^{1/2} \quad (\text{Eq. 19})$$

$$(2 \cdot E \cdot \gamma)^{1/2} = (Y \cdot \sigma_f \cdot c^{1/2}) \quad (\text{Eq. 20})$$

$$K_I = (Y \cdot \sigma_f \cdot c^{1/2}) \quad (\text{Eq. 21})$$

$$c = [K_I / Y \cdot \sigma_f]^2 \quad (\text{Eq. 22})$$

Utilizando a equação básica da Mecânica da Fratura Linear-Elastica (LEFM) [33, 34 35]:

$$c = dc / dt = A \cdot K_I^n = A \cdot [K_I / K_{Ic}]^n \quad (\text{Eq. 23})$$

Substituindo K_I , onde $\sigma = f(t) =$ carga constante em função do tempo, tem-se:

$$dc = A \cdot [(Y \cdot \sigma_f \cdot c^{1/2}) / K_{Ic}]^n \cdot dt \quad (\text{Eq. 24})$$

Pela equação diferencial ordinária linear de primeira ordem (EDO), obtêm-se:

$$t(c) = k_1 - [2c \cdot K_{Ic} / A \cdot Y^n \cdot (n - 2) \cdot c^{n/2} \cdot \sigma_f^n] \quad (\text{Eq. 25})$$

Calculando o tempo de fratura (t_f) em função da tensão (σ_f), onde $\sigma = f(t) =$ cte:

$$t_f = 2 / [A \cdot Y^n \cdot (n - 2) \cdot K_{Ic}^{n-2} \cdot \sigma_f^n] \cdot [K_{Ic} / Y \cdot c_i] \quad (\text{Eq. 26})$$

Simplificando:

$$B = 2 / [A \cdot Y^n \cdot (n - 2) \cdot K_{Ic}^{n-2}] \text{ e,} \quad (\text{Eq. 27})$$

$$S_I = K_{Ic} / Y \cdot c_i \quad (\text{Eq. 28})$$

Temos então a equação para cálculo da previsão do tempo de vida útil, onde ($\sigma_f = \sigma_a$):

$$t_f = (B \cdot S_I^{n-2}) / \sigma_a^n \quad (\text{Eq. 29})$$

Onde: $\sigma = f(t) = \text{cte}$; K_{Ic} = Tenacidade à fratura; K_I = Fator de intensidade de tensão da trinca; t_f = Tempo de fratura; B = Tensão dinâmica; S_I = Tensão inerte; σ_f = Tensão de fratura; σ_a = Tensão aplicada; c = tamanho da trinca; Y (Fator de forma da LEFM) = $\pi^{1/2}$; Parâmetros do crescimento subcrítico de trincas (*Slow Crack Growth*) = A , n , σ_f e B [33, 34, 35].

O modelo geral proposto por Griffith para crescimento subcrítico de trincas em materiais cerâmicos prevê que a propagação rápida e catastrófica de uma trinca dar-se-á somente quando a tensão aplicada for maior ou igual à tensão de ruptura do material, isto é, quando o fator de intensidade de tensão na ponta da trinca (K_I) for maior ou igual ao fator de intensidade de tensão crítica (K_{Ic}). Para tensões menores que as correspondentes a K_{Ic} , ocorre o crescimento subcrítico das trincas [29]. Com o modelo de Griffith, os ensaios de ultrassom (que fornecem o módulo de elasticidade), os resultados dos testes de resistência ao choque térmico (RCT), testes de resistência à flexão á quente (HMOR) e especificação técnica fornecida pelo fabricante referente às âncoras cerâmicas [22, 24], é possível comparar a vida real com a vida cronológica, calcular o tempo de vida útil e prever o tempo de desgaste (em anos) das peças cerâmicas submetidas ao esforço térmico, e possivelmente, prever o momento da sua degradação.

As equações apresentadas relacionam ao choque térmico as propriedades físicas e variáveis de transferência de calor das âncoras cerâmicas aplicadas em teto e paredes em forno de reaquecimento. Estes parâmetros governam o mecanismo de nucleação de fraturas. Nos processos industriais, a resistência ao choque térmico é avaliada por meio de testes

relacionados aos efeitos do choque térmico nas propriedades e condições físicas do material. Ensaio realizados após a solicitação térmica em peças refratárias, tais como: perda de peso, perda da resistência mecânica ou alteração na permeabilidade, não indicam a nucleação de trincas, mas o grau de dano resultante das fraturas por choque térmico [29].

Para alguns processos e aplicações, o grau de dano por choque térmico pode ser mais importante que a nucleação de trincas. Assim, a principal preocupação passa a ser a determinação dos parâmetros que influenciam a propagação das trincas levando ao dano do corpo cerâmico e a denominação “resistência ao dano por choque térmico” passa a ser empregada para caracterização destas variáveis. Através da análise destes parâmetros pode-se deduzir por que materiais cerâmicos com alta resistência ao dano por choque térmico normalmente apresentam frações discretas de grãos, considerável porosidade e abundância de micro trincas internas. Além disso, pela comparação com fatores de resistência ao início da fratura, pode-se entender por que é impossível maximizar ambas as propriedades [29].

5. METODOLOGIA

5.1. Materiais e Métodos

Para realizar um estudo visando avaliar o desempenho das âncoras cerâmicas utilizadas em forno de reaquecimento na área de laminação para tratamento térmico de tarugos e tubos, primeiramente monta-se as âncoras em blocos de concreto para depois aplicá-las no teto e paredes do forno de reaquecimento. O método de avaliação utilizado propõe [36], primeiramente, realizar inspeção das âncoras cerâmicas por meio do ensaio de ultrassom com base na norma BS EN 12504-4-2004 - *Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity* para obter o módulo de elasticidade (E) a frio (Eq. 10). Para este ensaio utiliza-se o método direto [26] (Figura 10) por meio do aparelho V-meter MK IV – NDT James

Instruments, com transdutores de 150 kHz e como acoplante o gel condutor Mercur, segregando as âncoras cerâmicas que apresentaram defeitos ou desvios na velocidade ultrassônica medida: Coeficiente de Poisson (μ) = 0,21 e coeficiente de expansão térmica (α) = $7,70 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

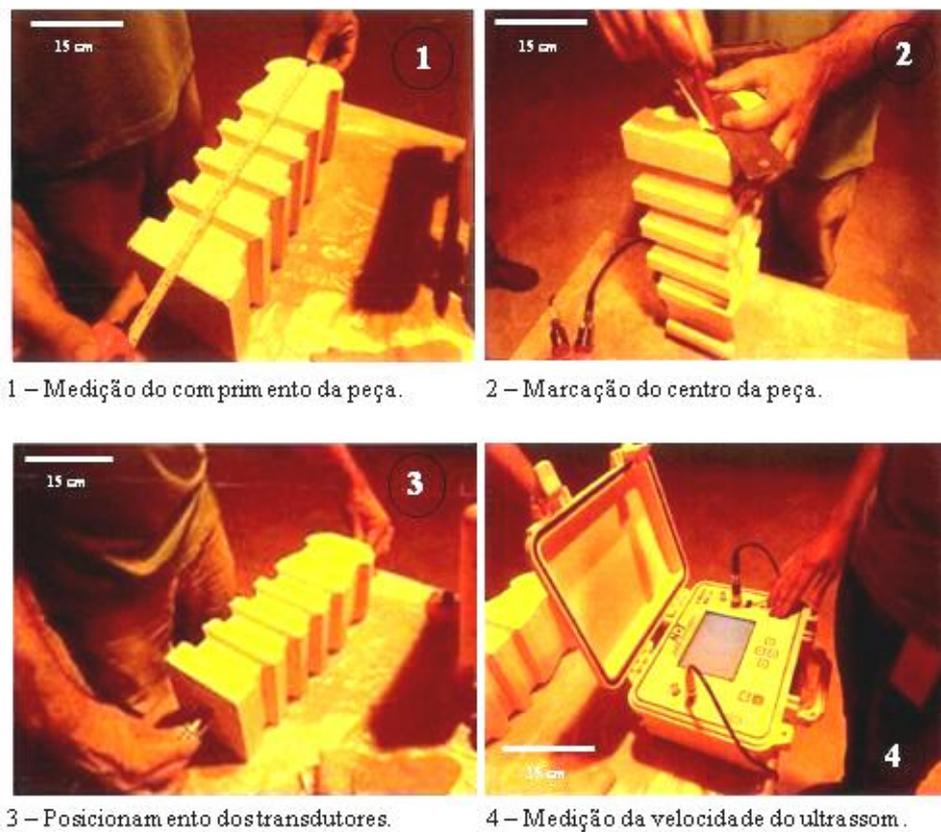


Figura 10 – Metodologia utilizada para teste de ultrassom nas âncoras cerâmicas [36].

Para realizar a inspeção das âncoras cerâmicas utilizando ensaio de ultrassom, é necessário adotar alguns cuidados, como: numerar individualmente as peças sequencialmente antes e após sua montagem para facilitar sua identificação e uniformidade durante os testes de avaliação; medir o comprimento de cada peça; utilizar o valor medido como parâmetro no equipamento de ultrassom (em metros); marcar o centro de ambas as faces onde serão posicionados os transdutores, de modo a realizar medição pelo método direto; posicionar a peça em uma bancada para iniciar o ensaio de ultrassom; usar gel condutor nos transdutores

com o objetivo de se obter o acoplamento ideal; posicionar os transdutores nos centros marcados nas faces da âncora cerâmicas e, finalmente, realizar a medição [36, 37].

Na caracterização química, visando o controle da qualidade para identificar as conformidades com as especificações químicas das âncoras cerâmicas, recorreu-se a experiência operacional, o desempenho das campanhas do equipamento e dados específicos do fabricante para montar um padrão de características aceitáveis (Tabela 2), utilizando o ensaio de fluorescência de raios X (FRX) como técnica analítica espectroscópica para confirmar estas especificações técnicas importantes e identificar a possível presença de elementos contaminantes. O equipamento utilizado para o ensaio foi o espectrômetro de FRX por dispersão de comprimento de onda, modelo Axios Max, da Panalytical, utilizando para isto a norma NBR ISO 12677:2014 - Análise química de produtos refratários por fluorescência de raios X (FRX), sendo que o teste de caracterização química e física foi realizado no laboratório da Refralab Ltda - Centro de Caracterização de Minerais e Materiais Industriais.

Tabela 2 – Especificação técnica da âncora cerâmica aplicadas em forno de reauecimento [38].

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
Al₂O₃	%	> 60.0	> 70.0
SiO₂	%	28.0	20.0
Fe₂O₃	%	< 1.70	< 1.70
TiO₂	%	< 2.40	< 2.40
Na₂O	%	< 0.40	< 0.30
K₂O	%	< 0.60	< 0.40
P₂O₅	%	> 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
Ensaio de Ultrassom		Inspeção 100% para Teto	Inspeção 100% para Teto
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

Para os ensaios de massa específica aparente (MEA) e porosidade aparente (PA) aplicou-se a norma ABNT NBR ISO 5017:2015 - Produtos refratários conformados densos - Determinação da densidade de massa, porosidade aparente e porosidade real, onde os corpos de prova foram secados em estufa modelo JUNG 500 °C a temperatura de 110 ± 5 °C até obtenção de massa constante para, em seguida, serem resfriados até temperatura ambiente (25 °C), utilizando uma balança hidrostática com precisão de 0,01g para obter a massa seca da amostra.

No ensaio de densidade geométrica utilizaram-se as normas ABNT NBR 6115:2012 - Materiais refratários isolantes conformados — Determinação da densidade de massa aparente e a ABNT NBR 6225:2013 - Materiais refratários conformados — Determinação da variação linear dimensional permanente, após aquecimento onde os corpos de prova seguem preparação semelhante ao ensaio anterior.

Para a resistência à compressão a temperatura ambiente (RCTA), as normas ABNT NBR ISO 10059-2:2014 - Produtos refratários prensados densos — Determinação da resistência à compressão a frio - Parte 2: Ensaio com isolamento e ABNT NBR 11222:2010 - Materiais refratários densos não-conformados - Determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente, foram empregadas, usando corpos de prova cilíndricos (50 mm x 50 mm) e carregamento com velocidade de 800 ± 100 N/s até ruptura da amostra. As amostras foram ensaiadas no aparelho para teste de resistência mecânica INSTRON EMIC Modelo DL-2000.

Para o ensaio do módulo de ruptura à flexão a quente (Módulo de ruptura a quente “HMOR” a 1200 °C x 60 min.) utilizou-se a norma ABNT NBR 9642:2012 - Materiais refratários — Determinação da resistência à flexão a quente, onde os corpos de prova foram retirados das regiões da âncora conforme mostra a Figura 11. O módulo de ruptura à quente é

definido como a máxima tensão, que uma amostra pode resistir em um ensaio de torção em 3 pontos até romper, tensão esta expressa em N/mm^2 ou MPa. Estes corpos de prova (160 mm x 40 mm x 40 mm) foram aquecidos em forno elétrico a uma temperatura máxima de 1200°C , aplicando velocidade de carga de $670 \pm 30 \text{ N/min}$ com resolução de 5 N, com base com apoios de 6 mm de raio, equidistantes 120 mm. As amostras foram ensaiadas em um forno elétrico com capacidade de aquecimento até 1400°C JUNG, adaptado com mecanismo de andamento, com prensa hidráulica KRATOS 100 KN, acoplada ao topo com êmbolo cerâmico de alta alumina (98%) sendo que o teste da resistência à flexão a quente foi realizado no laboratório da Togni S/A – Materiais Refratários.



Figura 11 – Regiões da retirada de corpos de prova da âncora cerâmica para o teste de resistência à flexão a quente a 1200°C x 60 min. (HMOR) [36].

Para a determinação do Índice de resistência ao choque térmico (IRCT), foi utilizada a norma ABNT NBR 13202:1997 - Materiais refratários - Determinação da resistência ao choque térmico com resfriamento em água. Os valores do módulo de elasticidade e a resistência ao dano térmico a cada ciclo ensaiado são plotados em um gráfico que relaciona o “módulo de elasticidade x número de ciclos térmicos” [32]. A comparação da “Idade real x Idade cronológica” é feita traçando uma linha de tendência para obter o Índice de resistência ao choque térmico (IRCT), que é o maior número possível de choques térmicos que a amostra

da peça refratária consegue suportar antes de se romper completamente. Uma reta é extrapolada até se obter o número de ciclos térmicos para o valor do módulo de elasticidade (E) igual a zero usando para isto a equação da reta ($y = ax + b$) onde $f(y) = 0$ e $x = -b/a =$ ciclos térmicos.

A metodologia aplicada segue um procedimento padrão utilizada na indústria antes e após a aplicação das âncoras cerâmicas juntamente com blocos de concreto [36, 37]:

1. **Seleção das amostras de peças para montagem no forno de reaquecimento:** O plano de amostragem utilizado para selecionar as amostras durante a vida útil das âncoras cerâmicas segue a inspeção por atributos (formato, dimensão e aparência) conforme demonstrado na Tabela 3. Este plano é baseado na norma ABNT NBR ISO 5022 - Produtos refratários conformados — Amostragem e ensaios de aceitação Seção 5.4, com NQA (Nível de Qualidade Aceitável) de 4.0%.

**Tabela 3 – Plano de Amostragem para Produtos Conformados Densos
Inspeção por atributos com NQA 4,0% [36].**

Inspeção Normal			
Tamanho do Lote N (peças)	Tamanho da amostra (peças)	Número de Aceitação (c)	Número de Rejeição (r)
2 a 25	N ou 3	0	1
26 a 90	13	1	2
91 a 150	20	2	3
151 a 180	32	3	4
281 a 500	50	5	6
501 a 1.200	80	7	8
1.201 a 3.200	125	10	11
3.201 a 10.000	200	14	15
Acima de 10.000	315	21	22

O NQA (Nível de Qualidade Aceitável) é a máxima porcentagem defeituosa (ou número máximo de defeitos ou não-conformidades) que, para fins de aceitação por amostragem, pode ser considerada satisfatória como média de um processo ou série contínua de lotes. O lote é

construído por embalagens contendo aproximadamente 100 peças refratárias (1,500 kg) sob uma base de madeira (engradado) chamada de “palete”.

Este lote será aceito se o número de peças defeituosas for menor ou igual ao número de aceitação (c). Se o número de itens defeituosos for maior ou igual ao número de rejeição (r) o lote deverá ser rejeitado.

2. **Determinação das características químicas e físicas** das peças refratárias e principalmente, determinação da proporção dos materiais que compõe a âncora cerâmica.
3. **Realização de ensaios de ultrassom:** Determinar as velocidades ultrassônicas das peças refratárias além do seu módulo de elasticidade (E), e determinar as dimensões, volume e densidade das âncoras cerâmicas.
4. **Seleção das peças conforme os critérios de aceitação e aprovação:** Determinar as velocidades de propagação de ondas nas peças por meio do ensaio de ultrassom, calculando a média das velocidades (X_{barra}) e o desvio padrão (σ) das âncoras cerâmicas.
5. **Análise estrutural das peças refratárias:** Analisar, após corte longitudinal e transversal por meio de disco circular diamantado, a estrutura interna e o tamanho das fraturas e trincas das âncoras cerâmicas. Foram consideradas as teorias propostas por Griffith (defeitos controladores e limitadores da resistência mecânica em sólidos frágeis) para analisar e estudar as trincas e fraturas identificadas após corte transversal e longitudinal.
6. **Realização de teste da resistência à flexão a quente:** Em laboratório foram realizados testes de resistência à flexão a quente a 1200 °C x 60 minutos. Para este teste, os corpos de prova foram retirados das regiões da âncora conforme demonstrado na Figura 11.
7. **Comparação da relação entre módulo de elasticidade e o número de ciclos de choque térmicos:** Para o cálculo da vida cronológica x vida real, os dados dos ciclos 0, 2, 6 e 10 de choque térmico a 1000 °C com resfriamento em água foram plotados em um gráfico módulo de elasticidade x número de ciclos. É traçada uma linha de tendência para obter o Índice de resistência ao choque térmico (a reta é extrapolada até se obter o número de ciclos para módulo de elasticidade igual a zero).
8. **Calculo do índice de resistência ao choque térmico:** O índice de choque térmico (IRCT) obtido foi comparado com os dados obtidos no gráfico de degradação das âncoras antes de seu uso. Desta forma, é feita a comparação da vida real obtida no gráfico com a vida cronológica (avaliação da campanha até a inspeção).

9. **Elaboração do gráfico de correlação da vida útil cronológica versus vida útil real:** O gráfico é obtido comparando os dados do módulo de elasticidade x número de ciclos de choque térmicos com os dados de degradação das âncoras antes de seu uso por meio do Índice de choque térmico (IRCT).

O critério proposto para as inspeções segue uma metodologia desenvolvida operacionalmente [36, 37] considerando a classificação, com base nas medições feitas por intermédio do ensaio de ultrassom obtendo a velocidade ultrassônica (m/s) e o módulo de elasticidade (E). É muito importante ressaltar que a inspeção das âncoras cerâmicas deve ser realizada em 100% nas peças escolhidas para o ensaio. Ao construir a planilha de controle, determinam-se os limites de controle superior e inferior, adotando as orientações de separar as peças classificadas por lote, formato, nº do palete, zona e região de aplicação. E por fim, deve-se medir a velocidade das peças conforme seleção e identificação realizada e calcular a média das velocidades (X_{barra}) e o desvio padrão (σ) conforme a classificação e procedimento adotado. Para as primeiras medições de cada lote, foram calculados os valores das médias das velocidades ultrassônicas (m/s).

Para calcular o índice de qualidade (IQ) da amostra, os critérios foram adotados [36]:

- a) Sendo dado o limite superior de especificação (LSE – a maior velocidade encontrada):

$$IQ = (LSE - X_{\text{barra}}) / \sigma \quad (\text{Eq. 12})$$

- b) Sendo dado o limite inferior de especificação (LIE – a menor velocidade encontrada):

$$IQ = (X_{\text{barra}} - LIE) / \sigma \quad (\text{Eq. 13})$$

- c) Regras de decisão:

Se $IQ \geq K$: Aceitar o lote.

Se $IQ < K$: Rejeitar o lote.

O Fator “K” utilizado deve estar de acordo com o plano de amostragem para inspeção de variáveis (formato, dimensão e aparência), conforme Tabela 4. Este plano é baseado na norma ABNT NBR ISO 5022 - Produtos refratários conformados — Amostragem e ensaios de aceitação – Seção 5.4, utilizando limite unilateral (superior ou inferior), NQA (Nível de Qualidade de Aceitação) de 4.0 % e desvio padrão (σ) desconhecido, onde o fator de aceitação para K é igual a 0,93 [36, 37].

Tabela 4 – Plano de Amostragem para produtos conformados densos inspeção por variáveis com NQA 4.0% [36].

Tamanho do Lote		Tamanho da amostra (n)	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

As amostras de âncoras cerâmicas devem ser escolhidas cuidadosamente para a caracterização química e física com base no histórico de operação do equipamento, tempo de serviço da peça refratária aplicada e na experiência do fabricante com relação ao modelo da âncora cerâmica escolhida para o projeto de montagem. Com estas informações, montou-se a Tabela 2 que contém as principais especificações técnicas do material relacionadas à sua zona de montagem dentro do forno de reaquecimento (zonas de aquecimento e encharque),

utilizando a especificação da Ficha de Dados Técnicos (FDT) [22, 24], servindo de parâmetro para o monitoramento e controle.

Após coleta dos dados do ensaio por ultrassom e a classificação baseada no Fator “K”, as amostras foram avaliadas por meio da degradação causada pela resistência ao dano por choque térmico durante seu tempo de uso. Para que a “vida real” seja comparada com a “vida cronológica” das âncoras cerâmicas é considerada uma curva inicial de choque térmico (antes do uso) como padrão, e aceito, como final da vida útil, um módulo de elasticidade residual de 50% (Tabela 5). Os critérios de análise são baseados nos dados históricos do módulo de elasticidade (E) e ciclos de choque térmicos estudados ao longo dos anos de operação e são estabelecidos com base em estudos e análises das âncoras cerâmicas novas e usadas, e podem ser revistos à medida que este método for sendo aplicado. Na prática, a campanha esperada é estabelecida em função de valores históricos das campanhas anteriores e dos relatórios de controle da operação (Figuras 12 e 13).

Tabela 5 – Padrão de aceitação como final da vida útil, para um módulo de elasticidade residual de 50% [36, 37].

MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)	GPa
ME antes do uso	50
ME após 02 ciclos de choque térmico	35
ME após 06 ciclos de choque térmico	30
ME após 10 ciclos de choque térmico	25
ME após 30 ciclos (nº máximo de ciclos de choque térmico para se obter um módulo de elasticidade igual a zero)	0

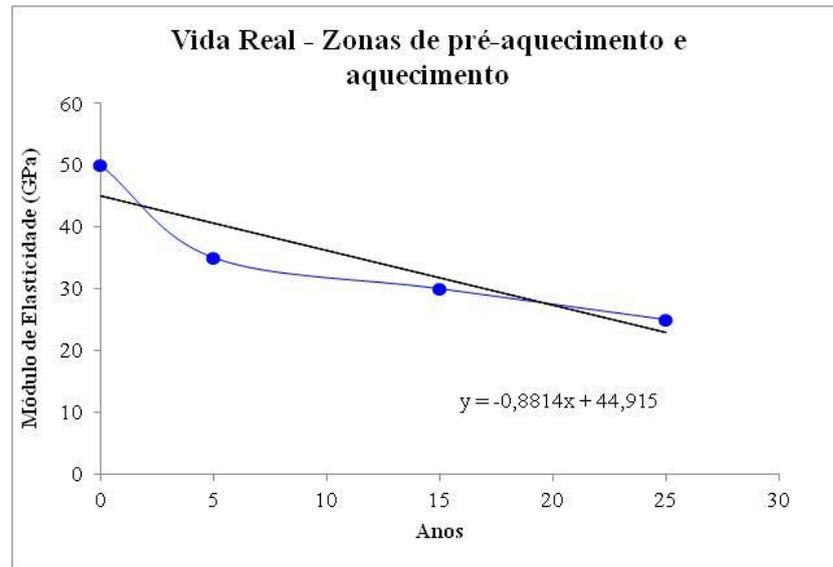


Figura 12 – Previsão de 25 anos da vida real das zonas de pré-aquecimento e aquecimento [36].

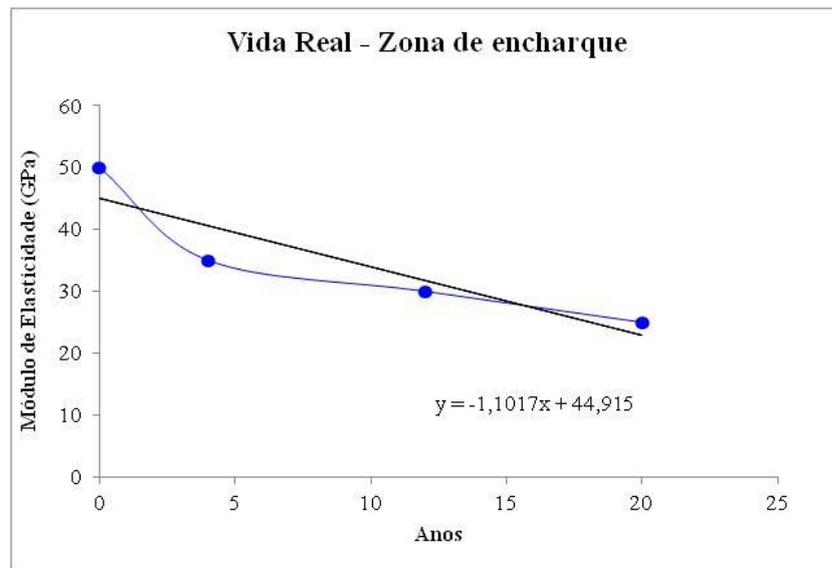


Figura 13 – Previsão de 20 anos da vida real da zona de encharque [36].

6. RESULTADOS

6.1. Análise e inspeção das âncoras cerâmicas novas

Foram inspecionadas 312 âncoras novas do teto e 352 âncoras novas da parede a serem instaladas na reforma de um forno de reaquecimento, para com base nos valores médios da velocidade ultrassônica e seus desvios padrões encontrados, estabelecer o Limite Inferior de

Especificação (LIE) como parâmetro, criando-se um critério para aceitação e rejeição das peças (Tabela 6). Entre as 664 âncoras inspecionadas, foram identificadas 5 âncoras que apresentaram algum tipo de desvio na velocidade medida por ultrassom ou algum defeito encontrado na peça (Tabela 7). Tem-se como faixa de aceitação para as velocidades de ultrassom das âncoras de teto e parede, a média das velocidades medidas em todas as âncoras (3250 m/s).

Como o objetivo deste trabalho é o de se estudar o desempenho das âncoras cerâmicas antes e após montagem, as peças que apresentaram desvios nos valores dos ensaios realizados foram rejeitadas e selecionadas para estudos visando prever seu possível comportamento, analisar sua longevidade e prever seu desempenho no equipamento. Do total de 352 âncoras de parede foram separadas 2 (0,6%) e do total de 312 âncoras de teto foram separadas 3 (1,0%) de peças sob suspeita de defeitos para serem avaliadas. Estas peças, obviamente, deixariam dúvidas sobre seu desempenho caso fossem montadas no forno de reaquecimento.

Tabela 6 – Critério de aceitação das âncoras novas de teto e parede.

ÂNCORAS CERÂMICAS DO TETO			
LOTES	1	2	3
NÚMERO DE PEÇAS NO LOTE	33	160	119
FATOR DE ACEITAÇÃO [K]	0,93	0,93	0,93
VELOCIDADE MÉDIA [X_{barra}] (m/s)	4631	3612	4403
DESVIO PADRÃO (m/s)	458	146	459
LIE (Limite inferior mensurado) (m/s)	3750	3042	3718
IQ (Índice de Qualidade)	1.92	3.90	1.49
CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO [$IQ \geq K$]	Aceitar	Aceitar	Aceitar
ÂNCORAS CERÂMICAS DA PAREDE			
LOTES	4	5	6
NÚMERO DE PEÇAS NO LOTE	128	100	124
FATOR DE ACEITAÇÃO [K]	0,93	0,93	0,93
VELOCIDADE MÉDIA [X_{barra}] (m/s)	3586	3607	3765
DESVIO PADRÃO (m/s)	217	234	267
LIE (Limite inferior mensurado) (m/s)	3106	3162	3266
IQ (Índice de Qualidade)	2.31	1.81	1.87
CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO [$IQ \geq K$]	Aceitar	Aceitar	Aceitar

Tabela 7 – Segregação de âncoras cerâmicas novas de teto e parede sob suspeita.

ÂNCORAS	LOTE	NUMERO DA PEÇA	MOTIVO	VELOCIDADE (m/s)	FAIXA DE ACEITAÇÃO
TETO	2 (160 Peças)	136	Trinca	3706	> 3250
	2 (160 Peças)	145	Trinca	3599	> 3250
	3 (119 Peças)	243	Trinca	3910	> 3250
PAREDE	4 (128 Peças)	29	Menor velocidade	3162	> 3250
	4 (128 Peças)	53	Quebrada	3277	> 3250

Uma caracterização química das âncoras a serem instaladas no forno de soleira rotativa foi inicialmente feita como forma de se verificar se as peças atendiam as especificações do cliente (Tabela 8). As 5 peças segregadas por apresentarem anomalia foram caracterizadas fisicamente (Tabela 9). Para o Teste de Resistência à Flexão a Quente (HMOR), escolheu-se 3 peças para caracterização (Tabela 9 – peças 136, 29 e 53); corpos de prova retirados e que apresentavam algum tipo de defeito não foram testados. Algumas das peças apresentaram grumos, demonstrando problemas de mistura⁽²⁾ durante o processo de fabricação (Figura 16).

⁽²⁾ Homogeneidade da mistura: Consiste em fazer uma mistura apropriada em conformidade com a aplicação da peça refratária. Misturam-se agregados, componentes ou minerais refratários com granulometria correta, com distribuição de tamanho de partículas e composição química durante o seu processo de fabricação.

Tabela 8 – Caracterização química das âncoras cerâmicas novas.

CARACTERIZAÇÃO		ZONA DE AQUECIMENTO		ZONA DE ENCHARQUE	
TIPO DE PRODUTO		LIGADO A FOSFATO E QUEIMADO		LIGADO A FOSFATO E QUEIMADO	
CLASSE		60% de Al ₂ O ₃		70% de Al ₂ O ₃	
PERDA POR CHAMA (%):	PPC	0,14		0,15	
ANÁLISE QUÍMICA (%):	Al ₂ O ₃	67,50	> 60,0	69,21	> 70,0
	SiO ₂	24,59		23,86	
FLUORESCÊNCIA DE	TiO ₂	2,31	< 2,40	2,10	< 2,40
	Fe ₂ O ₃	1,30	< 1,70	1,18	< 1,70
RAIOS – X [NBR ISO 12677:2014]	Cr ₂ O ₃	0,03		0,02	
	MnO	0,02		0,10	
	CaO	0,08		0,08	
	MgO	0,32		0,40	
	P ₂ O ₅	3,05	> 2,00	2,20	> 2,00
	ZrO ₂	0,25		0,29	
	Na ₂ O	0,26	< 0,40	0,29	< 0,30
	K ₂ O	0,13	< 0,60	0,11	< 0,40

Tabela 9 – Caracterização física de âncoras cerâmicas novas sob suspeita.

DADOS DA CARACTERIZAÇÃO	PARÂMETROS	ÂNCORAS DE PAREDE		ÂNCORAS DE TETO			ESPECIFICAÇÃO
		29	53	136	145	243	
DENSIDADE GEOMÉTRICA (g/cm ³) Peças: 40x40x160 mm [ABNT NBR 6115:2012] e [ABNT NBR 6225:2013]	n (n° amostras)	4	4	4	4	4	≥ 2,40
	Média	2,42	2,46	2,52	2,49	2,48	
	Desvio Padrão	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	
MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm ³) Balança hidrostática [ABNT NBR ISO 5017:2015]	n (n° amostras)	4	4	4	4	4	≥ 2,40
	Média	2,30	2,37	2,41	2,39	2,36	
	Desvio Padrão	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	
POROSIDADE APARENTE (%) Balança hidrostática [ABNT NBR ISO 5017:2015]	n (n° amostras)	4	4	4	4	4	≤ 20
	Média	11,37	9,38	6,91	8,94	8,60	
	Desvio Padrão	0,30	0,99	0,23	1,04	0,29	
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa) Peças: 40x40x160 mm [ABNT NBR ISO 10059-2:2014]	n (n° amostras)	4	4	4	4	4	70 /120
	Média	110,6	94,49	143,3	111,9	124,5	
	Desvio Padrão	11,41	13,87	17,85	5,32	10,41	
RESISTÊNCIA A FLEXÃO À QUENTE (MPa) Peças: 40x40x160 mm (1200 °C x 60 min.) [ABNT NBR 9642:2012]	n (n° amostras)	4	4	4	-	-	≥ 7,0
	Média	13,39	6,10	7,30	-	-	
	Desvio Padrão	1,30	2,30	2,10	-	-	

As peças com defeito no teste de ultrassom também foram cortadas para se observar possíveis defeitos internos em sua estrutura. Os cortes foram feitos no sentido longitudinal das âncoras do teto 136, 145 e 243 constatando presença de trincas grandes e defeitos internos, e também nas âncoras de parede 29 e 53, que acusaram menor velocidade de ultrassom e presença de trincas pequenas, respectivamente (Figuras 14 a 19) Estas trincas podem indicar o grau de ligação e uniformidade entre a mistura de agregados, componentes ou minerais refratários com granulometria correta, distribuição de tamanho de partículas, composição química e a presença de microtrincas ou laminações nas âncoras cerâmicas, durante o seu processo de fabricação.



Figura 14 - Âncoras de teto 136, 145 e 243 (a) e âncoras de parede 29 e 53 (b) sob suspeita.



Figura 15 - Âncora de teto 136 sob suspeita com presença de trincas internas.



Figura 16 - Âncora de teto 145 sob suspeita com presença de grumos internos.



Figura 17 - Âncora de teto 243 sob suspeita com presença de trincas internas.



Figura 18 - Âncora de parede 29 sob suspeita com velocidade menor no ensaio de ultrassom.

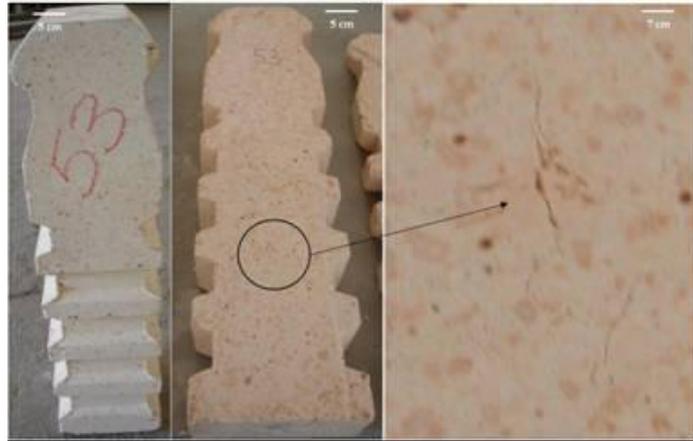


Figura 19 - Âncora de parede 53 sob suspeita com trincas internas.

Para a realização do teste de resistência ao choque térmico (RCT), foram retirados corpos de prova (50 x 50 mm) de 5 âncoras novas sem defeito (Figura 20) sendo 2 corpos de prova de cada metade da âncora cortada, que foram separadas por suspeita de problemas durante a fabricação. Estes corpos de prova (Figura 21) foram submetidos ao ensaio de RCT a uma temperatura de 1000 °C e resfriados em água a temperatura ambiente a cada ciclo de choque térmico. Foi determinado o módulo de elasticidade médio (E) das amostras ensaiadas antes de se iniciar o primeiro ciclo de choque térmico, e após 2, 6 e 10 ciclos de choque térmico.

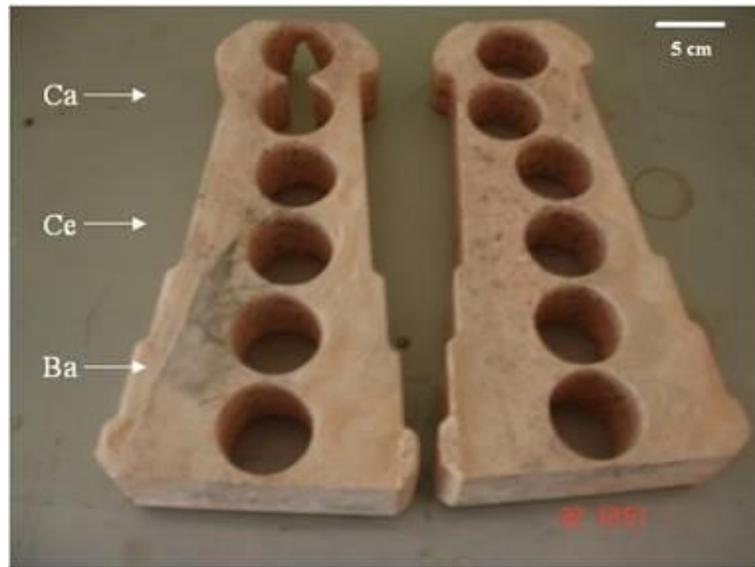


Figura 20 – Âncora dividida ao meio com os locais de retirada dos corpos de prova da cabeça da âncora (Ca), do centro (Ce) e da base (Ba) de cada metade para o teste de resistência ao choque térmico [36]

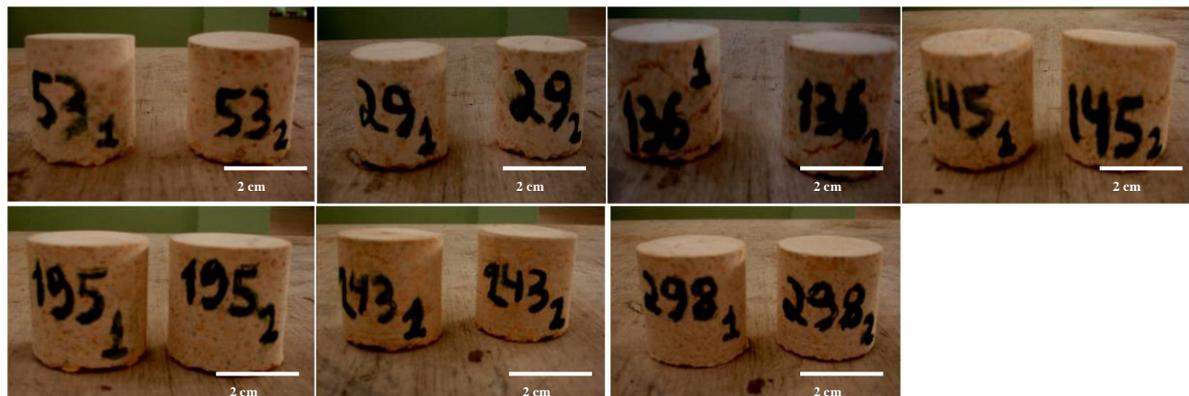


Figura 21 – Amostras das âncoras cerâmicas sob suspeita retiradas para Teste de Resistência ao Choque Térmico (RCT).

O valor médio do Índice de resistência ao choque térmico (IRCT) das 5 âncoras novas sem defeito foi de 29 ciclos (Figura 22). Isto demonstra que o histórico de campanha destas âncoras novas, partindo obviamente do pressuposto que existe uma correlação entre o IRCT da âncora novas e a expectativa estendida de sua campanha, pode ser correlacionar o valor obtido de 29 ciclos (IRCT) com a reta da Figura 23, obtemos assim o tempo de vida adicional de 15 anos. Da análise de dados da indústria, estima-se que a resistência a dois ciclos de choque térmico corresponda a um ano de operação da peça cerâmica.

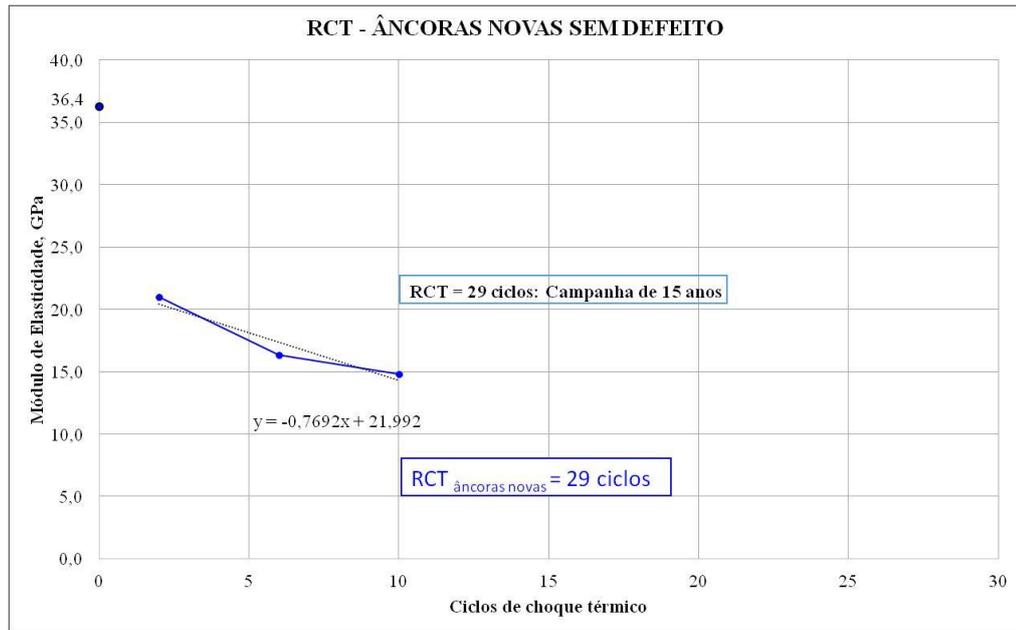


Figura 22 – Determinação da RCT de âncoras novas sem defeito (1000 °C x água).

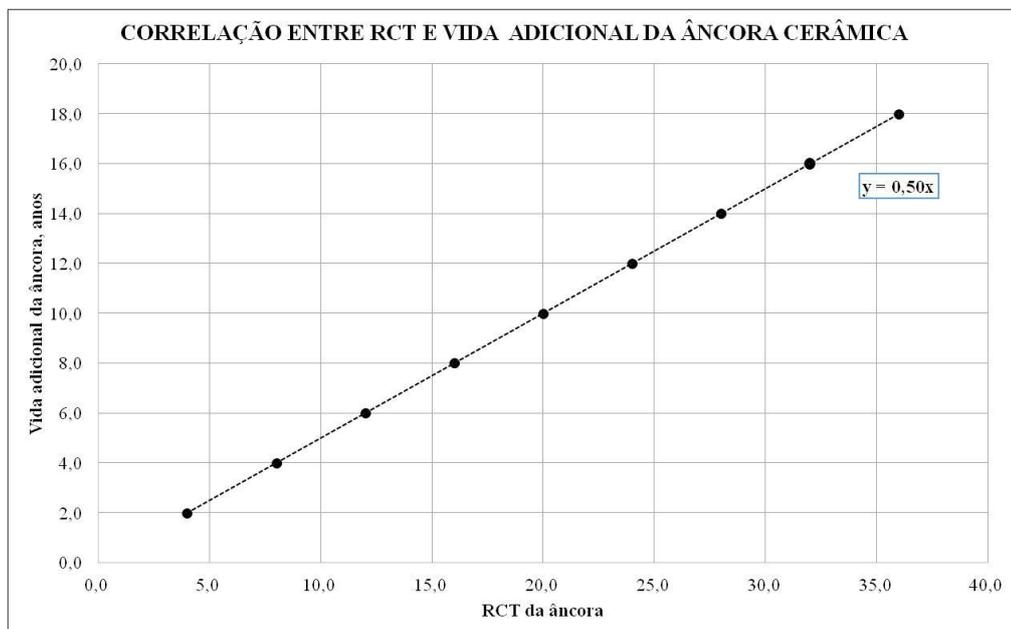


Figura 23 – Correlação entre a resistência ao choque térmico (RCT) com a sua vida adicional da âncora cerâmica em anos a serem aplicadas no forno de reaquecimento.

A Tabela 10 mostra os valores do Módulo de Elasticidade (E) das peças retiradas das âncoras sob suspeita durante o teste de Resistência ao Choque Térmico após os testes de resistência ao choque térmico. As três âncoras de teto apresentaram um módulo de

Elasticidade igual a zero após 2 ciclos de choque térmico, mostrando que as peças haviam tido fratura completa após os primeiros ciclos. As duas âncoras de parede apresentaram um comportamento melhor, explicado talvez pelo fato de que a âncora 29 apresentou, durante a inspeção inicial, apenas um valor de menor velocidade de ultrassom e a âncora 53 apresentou pequenas trincas internas. O cálculo de RCT a partir destes dados mostrou que a âncora 29 apresentou uma RCT de 23 ciclos e a âncora 53 um valor de RCT de 25 ciclos (Figura 24).

Tabela 10 – Caracterização da resistência ao choque térmico (RCT) de âncoras cerâmicas novas sob suspeita (1000 °C x água).

POSIÇÃO DA ÂNCORA	NUMERO DA PEÇA	MOTIVO	NÚMERO DA AMOSTRA	INÍCIO [E](GPa)	2º CICLO [E](GPa)	6º CICLO [E](GPa)	10º CICLO [E](GPa)
TETO	136	Trinca	1	19,8	0,0	0,0	0,0
			2	20,3	0,0	0,0	0,0
	145	Trinca	1	21,3	0,0	0,0	0,0
			2	21,2	0,0	0,0	0,0
	243	Trinca	1	29,0	0,0	0,0	0,0
			2	29,2	0,0	0,0	0,0
PAREDE	29	Menor velocidade	1	21,7	14,4	13,0	6,3
			2	22,9	17,2	12,9	11,9
			Média	22,3	15,8	12,9	9,1
	53	Quebrada	1	27,1	17,8	13,5	12,1
			2	22,6	18,1	12,4	11,6
			Média	24,9	18,0	12,9	11,9

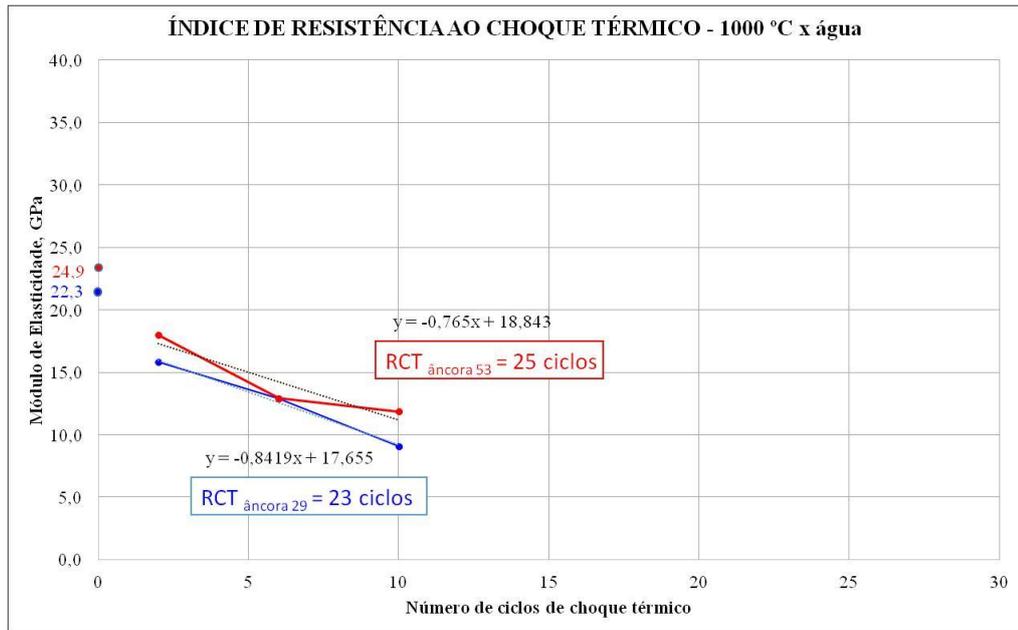


Figura 24 - Determinação da RCT de âncoras novas sob suspeita (1000 °C x água).

Ao se entrar com os valores dos IRCT (Índice de resistência ao choque térmico) das âncoras cerâmicas no gráfico da Figura 23, caso as mesmas fossem instaladas, poderia se esperar uma estimativa da âncora 29 e campanha da em 11,5 anos e a da âncora 53 em 12,5 anos (Figura 25). Desta forma, pode-se esperar que estas âncoras não alcancem a expectativa de campanha de 15 anos (Figura 22), conforme histórico de campanha para este material. São mostrados resultados de medições de RCT (Resistência ao choque térmico) de âncoras retiradas de um forno após alguns anos de campanha, comparando a sua vida cronológica com a vida real, estimada por meio da Figura 25, baseada na correlação da expectativa de vida útil determinada na Figura 23.

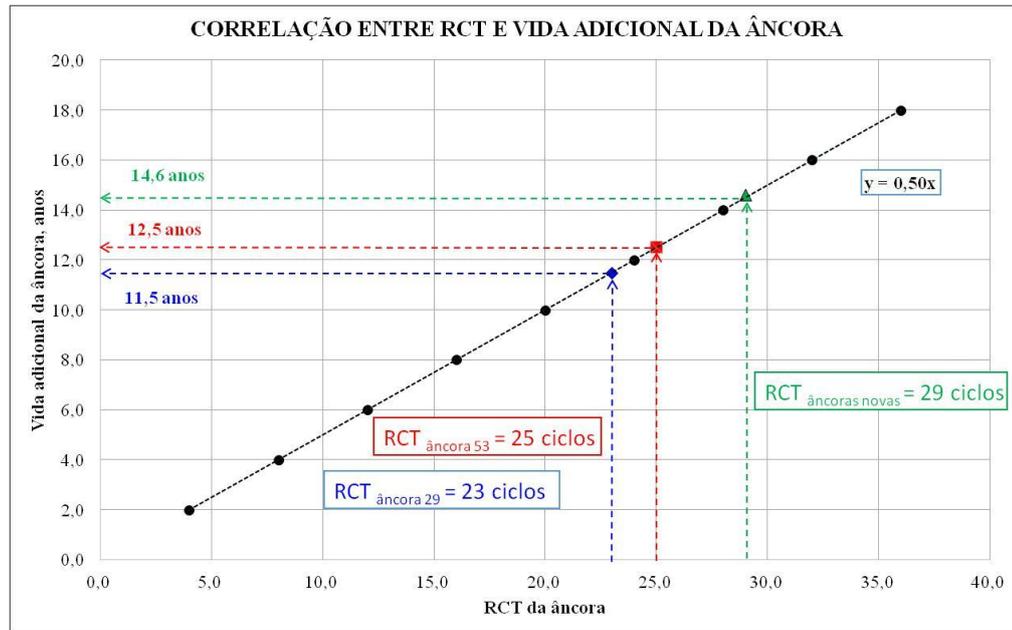


Figura 25 – Correlação entre a resistência ao choque térmico (RCT) das âncoras 29 e 53 e sua vida adicional no forno de reaquecimento.

7. DISCUSSÃO E VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

O Forno de reaquecimento, como já mencionado anteriormente, possui fatores que potencializam o seu desgaste e que são fortemente influenciados pelas solicitações exigidas durante a sua operação. Tem na distribuição de calor, variação de temperatura e no esforço termomecânico sobre as peças refratárias montadas nas regiões de pré-aquecimento, aquecimento e encharque do forno de reaquecimento (Figura 26), seus fatores mais críticos. Buscando aproximar ao máximo da condição real de operação, optou-se por realizar ensaios de Resistência ao Choque Térmico inicialmente com resfriamento ao ar onde ocorreram os maiores desgastes no forno de reaquecimento, para desenvolver e propor parâmetros de estudo com o objetivo de medir a longevidade das peças refratárias, e consequentemente, prever sua vida útil conforme o histórico de campanha do revestimento refratário.

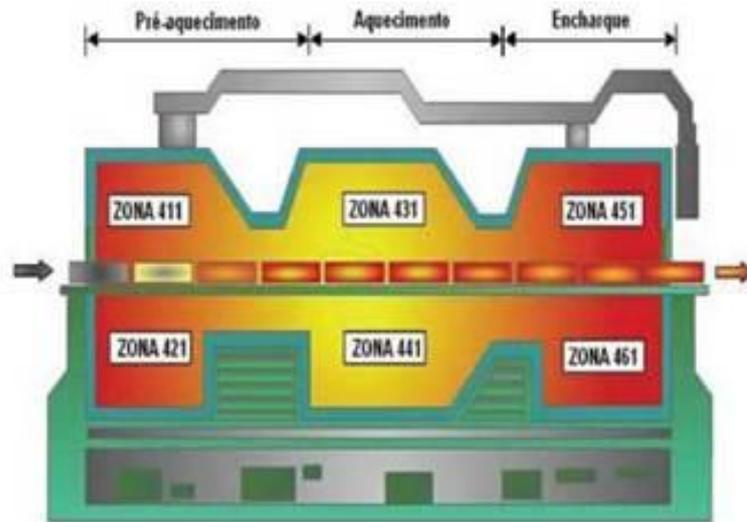


Figura 26 – Esquema da estrutura do forno de reaquecimento [1].

Para confirmar o método proposto anteriormente, foram retiradas e testadas 6 amostras do mesmo fabricante, de regiões diferentes do teto e do mesmo forno de reaquecimento, sendo que, as âncoras usadas A e B (região de encharque) são de classe 75% de alumina. As âncoras usadas C e D (região de aquecimento) são de classe 60% de alumina e âncoras novas 2 e 4 (região do pré-aquecimento, Posição 11 e 19) são de classe 70% de alumina. Todas as amostras são ligadas a fosfato, queimadas e com presença de potássio. Foi feito também corte transversal nas âncoras novas (2 e 4), âncoras usadas (A e B) com 2 anos de aplicação (Figura 28) e âncoras usadas (C e D) com 20 anos de aplicação (Figura 28) para analisar sua microestrutura e estudar a possível presença de trincas e defeitos. A Figura 27 mostra o interior do forno de reaquecimento.



(a)

(b)

Figura 27 – Visão interna de um forno de reaquecimento de placas com o revestimento refratário montados no teto e parede. Divisão entre a Zona de pré-aquecimento e Zona de aquecimento(a), e queimadores no teto da Zona de aquecimento (b) [39].

O objetivo do ensaio foi primeiramente, visualizar os defeitos nas peças após o corte e tentar correlacionar com os valores de velocidade obtidos no ultrassom (Tabela 11). Em segundo, comparar o método de medição direta com o método indireto do ultrassom, e, em terceiro, verificar se o desgaste sofrido pelas peças submetidas a choque térmico, que é pouco severo, está em condição semelhante ao que ocorre durante a operação do forno. Considerou-se como faixa de aceitação para as velocidades de ultrassom das âncoras de novas e usadas a média das velocidades medidas entre todas as âncoras (3250 m/s).



Figura 28 – Estudo da estrutura e análise de trincas das peças usadas por corte transversal nas âncoras A e B (2 anos) e C (20 anos).

Tabela 11 – Segregação de âncoras cerâmicas novas de teto analisadas.

	NUMERO DA PEÇA	MOTIVO / IDADE DA PEÇA	VELOCIDAD E (m/s)	FAIXA DE ACEITAÇÃO
ÂNCORAS DE TETO	2	Nova	4143	> 3250
	4	Nova	3857	> 3250
	A	2 anos	3641	> 3250
	B	2 anos	2977	> 3250
	C	20 anos	3648	> 3250
	D	20 anos	3449	> 3250

Não se conseguiu medir os valores de ultrassom longitudinalmente para as peças usadas A e B, pois apresentavam trincas perpendiculares que barravam o ultrassom. Na peça C, foi possível a medição, apesar do baixo valor da velocidade medida, o que evidencia certa degradação e desgaste por esforço térmico. Os valores medidos ao longo da espessura das amostras A e C apresentaram valores de velocidade mais baixos e heterogêneos em relação às peças novas. Não se conseguiu medir a velocidade na peça B por também apresentar trinca perpendicular ao sentido da onda do ultrassom. Durante os ensaios, as peças novas não apresentaram trincas ou defeitos no corte e mostraram resultados elevados de velocidade de ultrassom tanto na largura quanto na espessura (Figura 28). Houve correlação entre resultados de ultrassom e presença de trincas e defeitos nas peças, podendo ser vistas a olho nu.

A medição da velocidade do ultrassom pelo método indireto mostrou que o mesmo não pode ser usado para pequenas distâncias entre os transdutores, inviabilizando, em princípio, o seu uso na avaliação de revestimento de teto ou parede no local ou região onde a peça pode estar montada dentro do equipamento. Foram realizados ensaios em diferentes posições de medição nas âncoras para determinar se o teste de ultrassom consegue detectar com eficiência as trincas internas. Posicionaram-se os transdutores, sendo que um transdutor foi colocado na cabeça e outro na base das âncoras, e foram realizadas medições longitudinais e transversais

pelo método direto. Observou-se que, se uma trinca interna, de aproximadamente 5 – 10 cm de comprimento, estiver muito próxima a superfície (em uma profundidade de 4 cm), ela não será detectada com facilidade pelas ondas ultrassônicas. Constatou-se que existe certa limitação com relação à amplitude e raio na detecção das trincas internas próximas a superfície durante as medições, além também de observar que características como porosidade, homogeneidade da mistura dos agregados e refratariedade do material, influenciam na emissão e recepção das ondas ultrassônicas, o que exige recursos de calibração mais apurados do aparelho utilizado, sendo que este ajuste não é permitido pelo aparelho.

A caracterização química e física das 6 âncoras retiradas do forno de reaquecimento apresentou resultados como demonstrado nas Tabelas 12 e 13, sendo que, estes resultados foram comparados com as especificações técnicas feitas para este trabalho (Tabela 2).

Tabela 12 – Caracterização química das âncoras novas (Âncoras 2 e 4) e âncoras usadas (A, B, C e D) do forno de reaquecimento.

CARACTERIZAÇÃO			ZONA DE PRÉ-AQUECIMENTO		ZONA DE AQUECIMENTO		ZONA DE ENCHARQUE	
			ÂNCORA 2	ÂNCORA 4	ÂNCORA A	ÂNCORA B	ÂNCORA C	ÂNCORA D
TIPO DE PRODUTO: LIGADO A FOSFATO E QUEIMADO								
CLASSE			70% de Al ₂ O ₃		75% de Al ₂ O ₃		70% de Al ₂ O ₃	
PERDA	POR	PPC	0,07	0,05	0,00	0,01	0,06	0,06
CHAMA (%)		Al ₂ O ₃	77,00	77,09	76,55	76,55	63,02	61,57
ANÁLISE		SiO ₂	16,81	16,74	126,45	16,43	28,31	28,52
QUÍMICA (%)		TiO ₂	1,14	1,15	1,24	1,24	1,78	2,01
		Fe ₂ O ₃	1,25	1,24	1,18	1,18	1,61	1,74
FLUORESCÊNCIA		Cr ₂ O ₃	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,04	0,02
DE RAIOS – X		MnO	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
[NBR	ISO	CaO	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,07
12677:2014]		MgO	0,13	0,20	0,14	0,14	0,22	0,42
		P ₂ O ₅	2,03	2,01	2,80	2,80	2,77	3,29
		ZrO ₂	0,33	0,69	0,68	0,68	0,92	0,88
		Na ₂ O	0,65	0,22	0,32	0,32	0,22	0,57
		K ₂ O	0,33	0,51	0,53	0,53	0,96	0,83

Tabela 13 – Caracterização física das âncoras de teto novas (Âncoras 2 e 4) e âncoras usadas (A, B, C e D) do forno de reaquecimento.

DADOS DA CARACTERIZAÇÃO	PARÂMETROS	ZONA DE PRÉ-AQUECIMENTO		ZONA DE AQUECIMENTO		ZONA DE ENCHARQUE		ESPECIFICAÇÃO
	ÂNCORAS	2	4	A	B	C	D	
DENSIDADE GEOMÉTRICA (g/cm ³) Peças: 40x40x160 mm [ABNT NBR 6115:2012] e [ABNT NBR 6225:2013]	n	4	4	4	4	4	4	≥ 2,40
	Média	2,54	2,63	2,46	2,46	2,35	2,27	
	Desvio Padrão	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,60	
MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm ³) Balança hidrostática [ABNT NBR ISO 5017:2015]	n	4	4	4	4	4	4	≥ 2,40
	Média	2,62	2,58	2,52	2,51	2,41	2,39	
	Desvio Padrão	0,10	0,02	0,03	0,03	0,02	0,06	
POROSIDADE APARENTE (%) Balança hidrostática [ABNT NBR ISO 5017:2015]	n	4	4	4	4	4	4	≤ 20
	Média	19,5	20,8	23,2	22,4	18,2	18,9	
	Desvio Padrão	0,8	0,7	1,2	1,4	1,9	2,1	
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa) Peças: 40x40x160 mm [ABNT NBR ISO 10059-2:2014]	n	2	2	2	2	2	2	70 / 120
	Média	96,2	87,9	68,9	58,2	74,6	46,5	
	Desvio Padrão	12,1	1,4	2,8	12,6	0,3	21,1	

Para a realização do teste de resistência ao choque térmico (RCT) das 6 peças escolhidas, foram retirados 2 corpos de prova de cada uma das metades cortadas (ver Figuras 20 e 21) e submetidos a metodologia com base na ABNT NBR 13202:1997 - Materiais refratários - Determinação da resistência ao choque térmico com resfriamento em água. Estas âncoras cerâmicas foram selecionadas por serem de um mesmo tipo, formato, dimensão, características e fabricante. As âncoras de teto usadas A e B (2 anos) e C e D (20 anos), conforme demonstrado na Tabela 13, apresentaram alguns resultados divergentes da especificação. No caso das peças da zona de pré-aquecimento a porosidade aparente da peça A (23,2%) e peça B (22,4%) ficou acima do padrão especificado ($\leq 20,0\%$), significando aumento da porosidade causado pela possível perda de óxidos resultante das elevadas temperaturas geradas pelos queimadores, o que influenciou também a diminuição da resistência à compressão das peças A (68,9 MPa) e B (58,2 MPa) com relação ao padrão especificado (70 – 120 MPa). As peças da

zona de encharque apresentaram diminuição da densidade geométrica da peça C ($2,35 \text{ g/cm}^3$) e peça D ($2,27 \text{ g/cm}^3$) ficando abaixo do padrão especificado ($\geq 2,40 \text{ g/cm}^3$), e significando que o esforço térmico associado ao desgaste por choque térmico causado pelo tempo de uso, dependendo da posição da peça no equipamento, influencia suas características dimensionais, e, conseqüentemente, diminui a sua resistência a compressão, no caso da peça C ($74,6 \text{ MPa}$) e da peça D ($46,5 \text{ MPa}$), em comparação ao padrão especificado ($70 - 120 \text{ MPa}$).

Durante os ensaios, a degradação do módulo de elasticidade com a evolução do número de choques térmicos foi pequena, mostrando um bom comportamento destes materiais no teste de resistência ao choque térmico ao ar. Os resultados obtidos com as âncoras (novas e usadas) do forno de reaquecimento no choque térmico para o teste ao ar não são representativos e não devem ser utilizados como referência para se determinar a longevidade das âncoras cerâmicas (ver Figuras 29, 30 e 31).

O Índice de resistência ao choque térmicos (IRCT) obtido e representado nas Figuras 29, 30 e 31 foram também correlacionados com a reta ($y = ax + b$) obtida na Figura 23 comparando a vida real das âncoras antes do uso e a vida real adicional das âncoras usadas retiradas das zonas de calor do forno de reaquecimento. O eixo das abscissas em “anos” e o eixo das ordenadas em “Módulos de Elasticidade” foi construído com base nos valores obtidos na média das campanhas do revestimento de teto dos fornos de reaquecimento com base na experiência e prática operacional. Os gráficos (Figuras 29, 30 e 31) acompanham o comportamento do IRCT de cada peça escolhida, medindo o número de ciclos térmicos possíveis expostos ao ar, o módulo de elasticidade das âncoras usadas A e B (zona de encharque), C e D (zona de aquecimento), e das âncoras novas 2 e 4 (zona de pré- aquecimento).

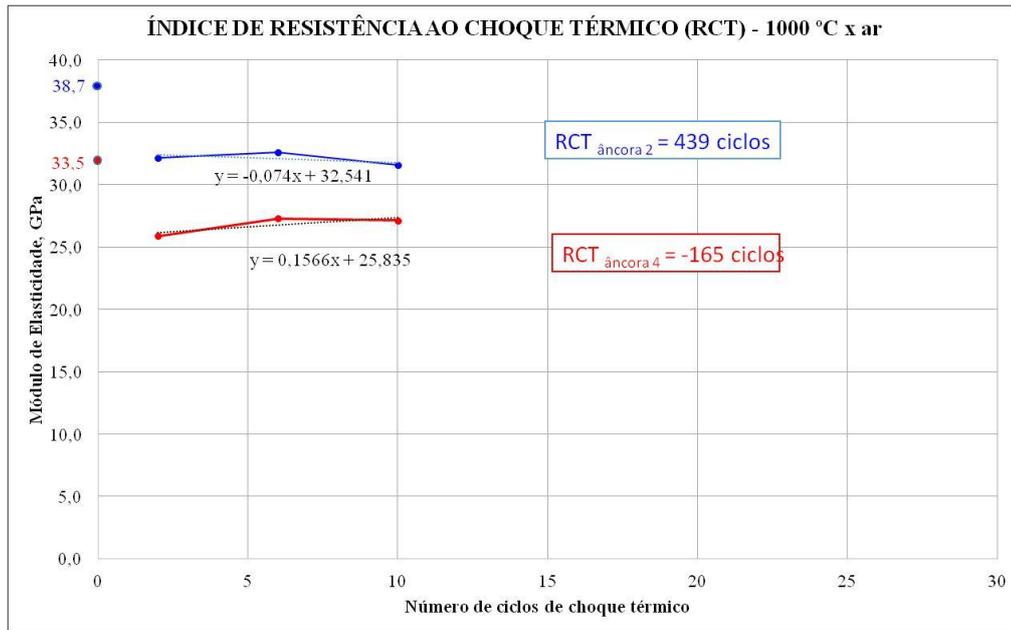


Figura 29 – IRCT das âncoras cerâmicas novas 2 e 4 do forno de reaquecimento obtido no RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x ar)

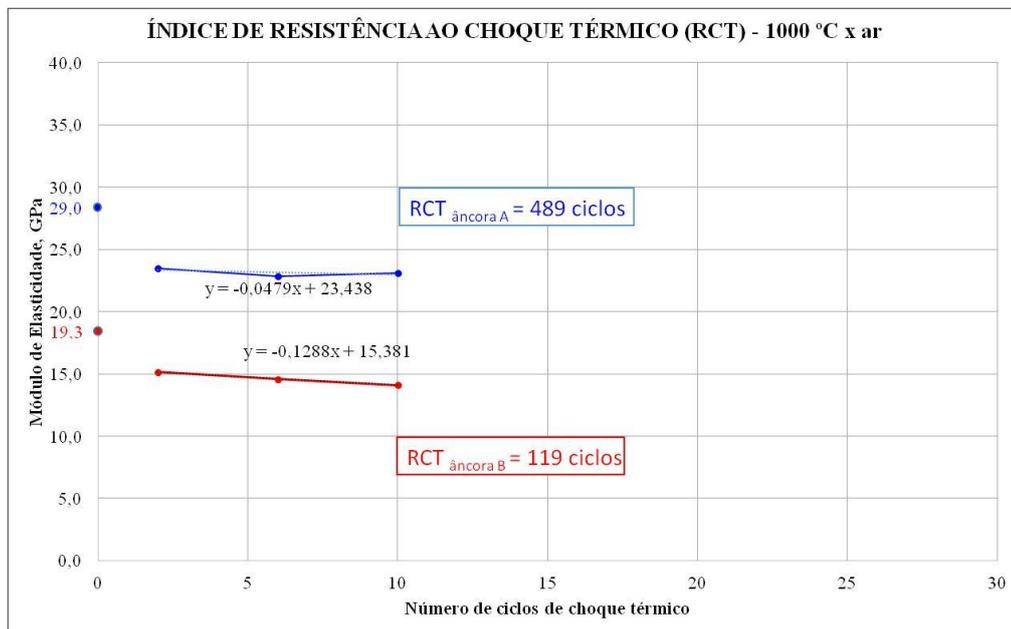


Figura 30 – IRCT das âncoras cerâmicas usadas A e B (2 anos) do forno de reaquecimento obtido no RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x ar)

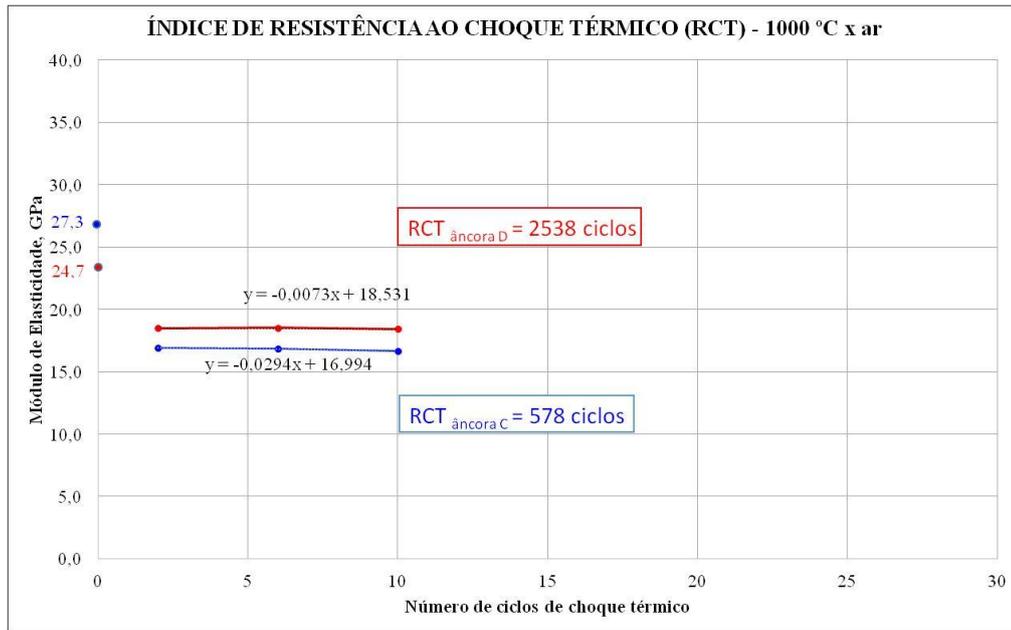


Figura 31 – IRCT das âncoras cerâmicas usadas C e D (20 anos) do forno de reaquecimento obtido no RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x ar)

Observou-se no ensaio de resistência ao choque térmico com resfriamento ao ar (RCT) um comportamento pouco severo para as âncoras cerâmicas novas e usadas, ficando seus ciclos térmicos muito longos e não uniformes, indicando uma longevidade elevada e irreal quando comparadas com o padrão estipulado para prever a vida útil destas peças (Figura 23). Tanto com relação às âncoras novas (2 e 4), quanto para as âncoras usadas (A, B, C e D), os resultados foram não uniformes com Índice de resistência ao choque térmico (IRCT) muito alto, e também pouca variação no Módulo de Elasticidade (E) exigindo a realização de testes de resistência ao choque térmico mais severos para avaliar e garantir seu real desempenho. Os dados obtidos, como mostrado nas Figuras 29, 30, 31 e 32, são impossíveis de serem inseridos e correlacionados com a Resistência ao Choque Térmico (RCT) das âncoras novas e usadas e sua vida adicional no forno de reaquecimento.

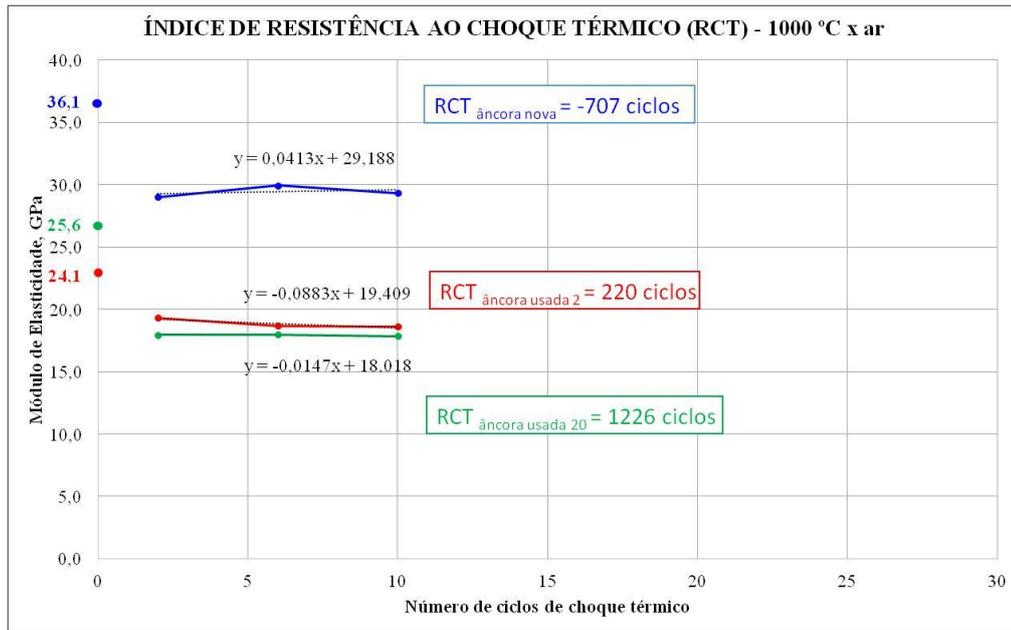


Figura 32 – IRCT do conjunto de âncoras cerâmicas retiradas do forno de rea aquecimento obtidos no Teste de RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x 60 min.)

Optou-se, portanto, por realizar o teste de resistência ao choque térmico com resfriamento em água a 1000 °C (que é muito mais severo) para se obter o Módulo de Elasticidade (E) e o Índice de resistência ao choque térmico (IRCT) das âncoras novas, das âncoras usadas com 2 anos e das âncoras usadas com 20 anos, conforme demonstrado na Figura 32, para medir e correlacioná-las (Figura 23) com a vida real adicionada.

Inserindo o valor de RCT das âncoras cerâmicas novas e usadas retiradas do forno de rea aquecimento (Tabela 14) no gráfico da Figura 23, se as novas fossem montadas, poderia se esperar das âncoras 2 e 4 uma campanha estimada em 14,6 anos. Com relação às âncoras usadas A e B (2 anos), se continuassem montadas, teria-se uma campanha estimada em mais 9,4 anos. E as âncoras usadas C e D (20 anos), se também continuassem montadas, teria-se uma campanha estimada em mais 8,8 anos. (ver Figura 33).

Tabela 14 – Caracterização da Resistência ao Choque Térmico (RCT) de âncoras cerâmicas novas e usadas retiradas do forno de reaquecimento (1000 °C x água).

POSIÇÃO DA ÂNCORA	NUMERO DA PEÇA	MOTIVO / IDADE	NÚMERO DA AMOSTRA	INÍCIO [E](GPa)	2º CICLO [E](GPa)	6º CICLO [E](GPa)	10º CICLO [E](GPa)
TETO	2	Âncora nova	1	38,7	32,1	32,6	31,6
			2	37,8	30,2	30,0	29,8
	4		1	29,2	23,4	24,1	24,1
			2	37,8	28,3	30,5	30,2
			Média	36,1	29,0	29,9	29,3
	A		Âncora usada (2 anos)	1	30,5	25,9	24,6
		2		27,4	21,1	21,0	21,6
	B	1		19,3	14,1	14,4	13,4
		2		19,2	16,2	14,8	14,8
		Média		24,1	19,3	18,7	18,6
	C	Âncora usada (20 anos)		1	27,3	16,9	16,8
			2				
	D		1	22,4	17,0	16,4	16,2
			2	27,1	20,0	20,7	20,7
			Média	25,6	18,0	18,0	17,8

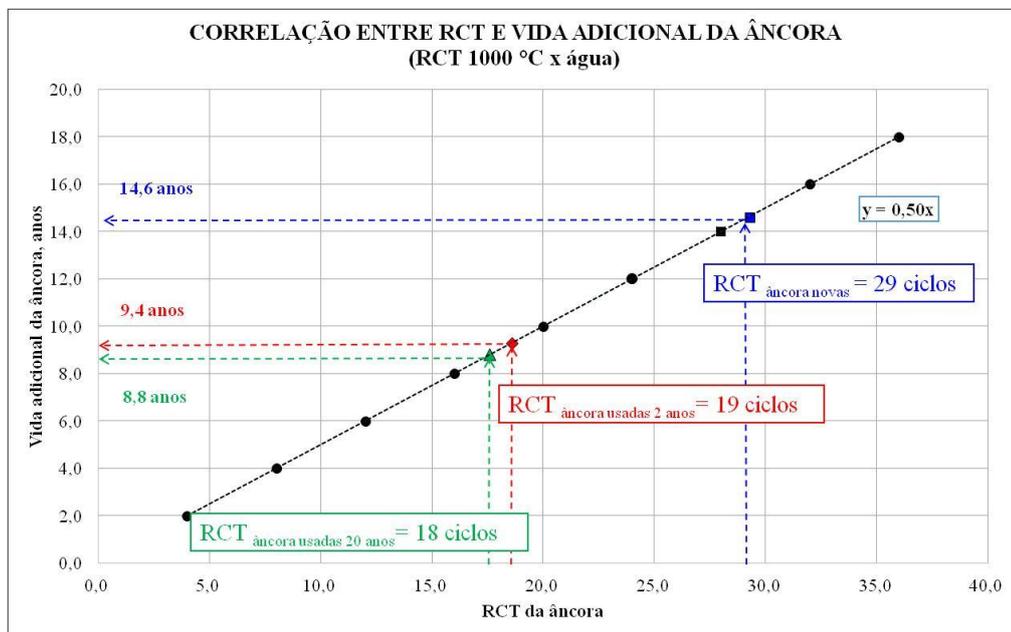


Figura 33 – Conjunto de amostras das âncoras cerâmicas retiradas do forno de reaquecimento para Teste de RCT com resfriamento ao ar (1000 °C x água)

8. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Resistência ao Choque Térmico (RCT) medida por meio do método de ultrassom pode ser usada para se estimar a vida útil de âncoras cerâmicas em fornos de reaquecimento, uma vez que a campanha destes fornos sofre grande influência de danos causados por choque térmico durante ciclos de aquecimento e resfriamento em operação.

Com base em dados acumulados na indústria, sugere-se que a resistência da peça cerâmica à dois ciclos no ensaio de resistência ao choque térmico em água corresponde a um ano de vida em serviço no forno de reaquecimento.

O histórico de desempenho das âncoras cerâmicas novas, antes de serem montadas, é de uma vida média de 15 anos em parede e de 10 anos para teto nestes fornos de reaquecimento. A RCT de âncoras novas selecionadas para este estudo, que cumpriram todas as especificações, apresentou um valor médio de 29 ciclos que equivalem a 15 anos de vida útil.

Âncoras cerâmicas novas foram selecionadas posteriormente e âncoras usadas foram retiradas do forno de reaquecimento das regiões críticas das zonas de pré-aquecimento, aquecimento e encharque, respectivamente, com o objetivo de confirmar o desempenho das âncoras novas sem defeito que apresentaram IRCT de 29 ciclos equivalente a 15 anos de vida útil.

Pode-se confirmar com a avaliação das âncoras novas planejadas para serem aplicadas na zona de pré-aquecimento do forno de reaquecimento, uma campanha estimada em 14,6 anos. Para as âncoras com 20 anos de uso, retiradas da zona de aquecimento, pode-se prever uma campanha estendida em 28,8 anos, o que é coerente com a previsão de 25 anos de operação para as zonas de pré-aquecimento e aquecimento. E com relação às âncoras avaliadas após 2 anos, pode-se prever uma campanha estendida em 11,4 anos, o que é também coerente com a previsão de 20 anos da vida em serviço para a zona de encharque .

Portanto, é possível esperar uma correlação entre a Resistência ao Choque Térmico (RCT) encontrado para uma âncora nova e sua expectativa de vida. É também possível esperar que a medição de RCT de uma âncora em uso, retirada do revestimento do Forno de Reaquecimento, possa dar indicações do tempo de vida restante deste revestimento. Isto pode permitir a previsão de parada do forno para reforma, reduzindo paradas não programadas e, conseqüentemente, prejuízos no lucro cessante.

O uso deste método de avaliação influencia construtivamente e positivamente as áreas de produção em seus futuros planejamentos de paradas para troca do revestimento ou manutenção refratária. Sugere-se ampliar este estudo para outras peças refratárias, podendo seus conceitos ser revistos à medida que esta metodologia for sendo usada para outras peças refratárias após um período representativo de operação, e também para outros equipamentos siderúrgicos.

9. REFERÊNCIAS

- [1] TEIXEIRA, B. O. S.; JOTA, F.O.; TEIXEIRA, M. H. - **Modelagem, Controle e Otimização do Processo dos Fornos de Reaquecimento de Placas**. Controle & Automação [0103-1759] Ano: 2007 Vol: 18 Issue:1 pp: 67.
- [2] COTTA L. S., RODRIGUES C. G. - **Avaliação de Revestimento Refratário no Processo Siderúrgico**. e-xacta, Belo Horizonte, Brazil. Year: 2014 Vol.: 7 No. 1 pp: 185-203.
- [3] KIKUTA, J., SAKURAI, Y., NAKAYAMA, T. – **Rotary Hearth Furnace Process for Steel Dust Recycling and Iron Making**. Plant and Machinery Division, Nippon Steel Engineering Co. Ltd., Japan 46-59 Nabuku, Kitakyushu – City, Fukuoka, 804-8505 – Japan, October 2012. Ed. UniBH - www.unibh.br/revistas/exacta/.
- [4] SHACKELFORD, J. F., DOREMUS, R. H. - **Ceramic and Glass Materials. Structure, Properties and Processing**. Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, pp: 87-110.
- [5] MACHADO, M.L.P., MARCELO LUCAS, PM, <https://sites.google.com/site/marcelolucaspdm/disciplina-de-processos-de-conformao>. Acessado em janeiro de 2016.
- [6] HARBISON-WALKER, “**Handbook of Refractory Practice**”, Pittsburg, Harbison-Walker Refractories Company, 2005.
- [7] Grand Refractories Co, Ltd.. <http://www.grandrefractories.com/76-refractory-anchor-brick.html>. Acessado em janeiro de 2016.
- [8] Keramserviss Ltd.. <http://keramserviss.lv/public/index.php?lang=en§ion=439>. Acessado em janeiro de 2016.
- [9] DUARTE, A. K. **Curso Fundamentos em Refratários. Apostila: A.1 Introdução a Materiais Refratários** - Yamagata Consultoria - Professor Doutor de Refratários, EEUFMG – Belo Horizonte, MG – Aula ministrada em: 10 a 14 jun. 2013.
- [10] DUARTE, A. K. **Curso Fundamentos em Refratários. Apostila: B.1 Propriedade dos Materiais Refratários** - Yamagata Consultoria - Professor Doutor de Refratários, EEUFMG – Belo Horizonte, MG – Aula ministrada em: 17 a 18 jul. 2013.
- [11] KINGERY, W. D. - **Introduction to Ceramics**. New York: J. Wiley & Sons, Year: 1960. 781 p..
- [12] CALLISTER, W. D. Jr. - **Materials Science and Engineering. An Introduction**. John Wiley & Sons, Inc., 5th Edition, New York, NY, 1991.
- [13] QUINTELA, M. A., MELO, T. M. F., LAGE, I. J., PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A. - **Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono**. Cerâmica. Ano: 2001 Vol: 47 No. 304 pp: 174-179.
- [14] CUNHA-DUNCAN, F. N., BRADT, R. C. - **Fratura de refratários**. Cerâmica. Ano: 2003 Vol: 49 No. 312 pp: 199-215.
- [15] AKIYOSHI, M. M.; SILVA, A. P. da; PEREIRA, R. and PANDOLFELLI, V. C. - **Importância da utilização de propriedades avaliadas em função da temperatura para a simulação computacional de cerâmicas refratárias**. Cerâmica. Ano: 2002 Vol: 48 No 306 pp: 70-78.
- [16] PEREIRA, R.; TORRES, A. A., AKIYOSHI, M. M.; PANDOLFELLI, V. C. - **Avaliação de taxas de aquecimento em materiais refratários: comparação entre**

simulações físicas e cálculos computacionais. Cerâmica. Ano: 2002 Vol: 48 No. 306 pp: 54-60.

[17] Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral** / Coordenadores Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília, Vol.: 34: DNPM, Dez. 2014. Brasil.

[18] Instituto do Aço Brasil. **Anuário Estatístico 2015.** Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2015, Séries revisadas em 2015. Ago. 2015. Brasil.

[19] VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciências dos Materiais**, Ed. Edgard Blücher Ltda., 1ª Edição, São Paulo, SP, 1970 - 8ª Reimpressão 1988.

[20] RESENDE, W. S. - **Tipos de Refratários - Parte 3 Produtos Não Conformados (Monolíticos) - Refratários e Isolantes Térmicos** - Out a Dez 2011 - www.revistaH.com.br.

[21] RESENDE, W. S. - **Concretos Refratários para Cimento e Cal: Evolução, Propriedade e Métodos de Aplicação** - VII ERUR – Encontro de Refratários e Usuários de Refratários – 17, 18 e 19 Out. 2013. IBAR Ltda.

[22] Folha de Dados Técnicos - **RB 7 B.** Vigência: Março 27/2009. Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários IBAR Ltda. - <http://www.ibar.com.br>.

[23] GRUPO HATH, <http://www.rath-group.com/pt/setores/acos-de-aquecimento-para-aco/aquecimento/>. Acessado em setembro de 2015.

[24] Folha de Dados Técnicos - **LICOTON 39CH.** FDT-CQ.026. Versão: 011 - Maio 28/2013. SAFFRAN Refractories - www.saffran.com - saffran@saffran.com.br.

[25] STUDART, A. R., PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI V. C. - **Development of multifunctional refractory castables.** Ceramics. Year: 2001 Vol: 47 Issue: 301 pp: 40 - 44.

[26] YAMAN, I. O., INCI G., YESILLER, N. and AKTAN H. M. - **Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission** - ACI Materials Journal, Ultrasonic Vol: 98 No.6 November-December 2001.

[27] UEDA, M. – **Ultrasonic Testing of Refractories.** The Refractories Journal 39 (12). Year: December 1963 pp: 492 – 501.

[28] OHTA, H., NISHIHARA, A. – **Ultrasonic Test Methods for Refractories** – Taikabutsu Overseas. Year: 1989 Vol: 10. Nº 2 pp: 99 – 105.

[29] RAPOPORT, Yu - **Ultrasonic evaluation of the heat resistance of refractories.** Refractories [0034-3102]. Year: 1989, Vol: 30 Issue: 7 pp: 430 - 435.

[30] GRIFFITH, A. A. - **The Phenomena of Rupture and Flow in Solid.** Phil Trans. Royal Society. A 221 pp: 163-198. London, 1921.

[31] HASSELMAN, D. P. H. - **Unified theory of thermal shock fracture initiation and crack propagation in brittle ceramics.** Journal American Ceramic Society. Year: 1969 Vol: 52 (11) pp: 600-604.

[32] BOCCACCINI, D. N. - **Determination of thermal shock resistance in refractory materials by ultrasonic pulse velocity measurement.** Journal of the European Ceramic Society [0955-2219]. Year: 2007 Vol: 27 Issue: 2 pp: 1859 -1863.

[33] MUNZ, D., FETT, T. - **Ceramics - Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection.** (Springer series in materials science Vol.: 36), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1th Edition, 1999.

- [34] PFINGSTEN, T., GLIEN, K. - **Statistical analysis of slow crack growth experiments**. Journal of the European Ceramic Society [0955-2219]. Year: 2006 Vol: 26, Issue: 15 pp: 3061-3065.
- [35] SALEM, J. A., WEAVER, A. S. - **Estimation and Simulation of Slow Crack Growth Parameter from Constant Stress Rate Data**. NASA Glenn Research Center at Lewis Field Cleveland, Ohio [44135]. Fracture Mechanics of Ceramics. Vol: 14 of the series Fracture Mechanics of Ceramics pp: 579-596.
- [36] SILVA, D. G. DE MELO – **Procedimento para previsão da vida útil de âncoras cerâmicas**. Projeto: P&D-1356. Localização: 7501 - Versão: 00 - Usina Barreiro, Vallourec Tubos do Brasil S/A. <http://www.vallourec.com>.
- [37] REFRALAB Ltda - **Procedimento para Inspeção de Âncoras Cerâmicas pelo Método de Ultrassom**. Centro de Caracterização de Minerais e Materiais Industriais, Santa Luzia, MG, Brazil – Setembro 10/2014 - Versão 00.
- [38] DUARTE, ALAMAR KASAN - **Refratários para fornos de reaquecimento**. Curso de Fundamentos em Refratários, Santiago, ALAFAR, 2015.
- [39] Editoria, **REVISTA INDUSTRIAL HEATING**, <http://www.revistaih.com.br/artigo-tecnico/modernas-tecnicas-de-aplicacao-de-refratarios-em-fornos-de-reaquecimento/2562>. Acessado em setembro de 2015.
- [40] AKIYOSHI, M. M., DA SILVA, M. G., DA SILVA, A. P., PANDOLFELLI V. C. - **Influência simultânea do teor de alumina, da porosidade total e da temperatura na condutividade térmica de refratários sílico-aluminosos e aluminosos**. Cerâmica. Ano: 2001 Vol: 47 Issue: 303 pp: 163-169.
- [41] SALVINI, V. R. PANDOLFELLI, V. C., BRADT, R. C. - **Extension of Hasselman's thermal shock theory for crack/microstructure interactions in refractories**. Ceramics International. Vol: 38 Issue: 7 September 2012 pp: 5369–5375.
- [42] GOGOTSI, G. A. - **Criteria of ceramics fracture (edge chipping and fracture toughness tests)**. Original Research Article. Ceramics International. Year: April 2013 Vol: 39 Issue 3 pp: 3293-3300.
- [43] GOGOTSI, G. A., MUDRIK, S., GALENKO, V. - **Evaluation of fracture resistance of ceramics: Edge fracture tests**. Original Research Article. Ceramics International. Year: April 2007 Vol: 33, Issue: 3 pp: 315-320.
- [44] RITTER, J. E. - **Effect of microstructure on the impact damage of ceramics**. Ceramics international [0272-8842]. Year: 1991 Vol: 17 Issue: 3 pp: 165 -170.
- [45] RITTER, J. E. - **Engineering design and fatigue failure of brittle materials**, In Fracture Mechanics of Ceramics. Ed. by R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman and F. F. Lange (Plenum Publishing Co., New York). Year: 1978 Vol: 4 pp: 661-686.
- [46] BRADT, R. C., MUNZ D., SAKAI M. and WHITE, K. W. - **Fracture Mechanics of Ceramics**. Proceeding of the 8th International Symposium of Fracture Mechanics of Ceramics at University of Houston, Houston, Texas. Year: February 2005 pp: 25-28.
- [47] THUMMEN, F.; OLAGNON, C.; GODIN, N. - **Cyclic fatigue and lifetime of a concrete refractory**. Journal of the American Ceramic Society, Year: 2006 Vol: 26 pp: 3357- 3363.
- [48] AKIYOSHI, M. M., DA SILVA, M. G., DA SILVA, A. P., PANDOLFELLI V. C. - **Correlation between thermal conductivity, temperature and bulk density for fireclay and alumina refractories**. Ceramics. Year: 2001 Vol: 47 Issue: 301 pp: 19 -27.

- [49] PERLIN, L. P. - **Tomografia Ultrassônica em Concreto: Desenvolvimento de Ferramenta Computacional**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Florianópolis, SC, 2011.
- [50] GARCIA, G. C. R. - **Estudo do comportamento ao dano por choque térmico de um concreto refratário, contendo agregados de andaluzita, sinterizado em diferentes temperaturas**. Dissertação de Mestrado em Ciências – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos – Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, 2010.
- [51] ORNAGHI, B. P. **Tenacidade à fratura, crescimento subcrítico de trinca e limite de fadiga de compósitos resinosos experimentais com diferentes tamanhos de partículas de carga**. Tese de Doutorado. Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo. Programa de Pós Graduação em Odontologia. Área de concentração de Materiais Dentários – São Paulo, SP, 2010.
- [52] JIN, L., NI, L., YU, Q., RAUF, A., ZHOU, C. - **Thermal cyclic life and failure mechanism of nanostructured. 13 wt% Al₂O₃ doped YSZ coating prepared by atmospheric plasma spraying**, *Ceramics International*, v. 38, n. 4, pp. 2983-2989, May 2012.
- [53] STEINBRECH, R.W., POSTOLENKO, V., MÖNCH, J., MALZBENDER, J., SINGHEISER, L. - **Testing method to assess lifetime of EB-PVD thermal barrier coatings on tubular specimens in static and cyclic oxidation tests**. *Ceramics International*, v. 37, n. 1, pp. 363-368, Jan 2011.
- [54] WANG, Z., LI, P. - **Dynamic failure and fracture mechanism in alumina ceramics: Experimental observations and finite element modelling**. *Ceramics International*, v. 41, n. 10, pp. 12763-12772, Dec 2015.
- [55] VASYLKIV, O., DEMIRSKYI, D., BADICA, P., NISHIMURA, T., TOK, A.I.Y., SAKKA, Y., BORODIANSKA, H. - **Room and high temperature flexural failure of spark plasma sintered boron carbide**. *Ceramics International*, v. 42, n. 6, pp. 7001-7013, May 2016.