

# **ANÁLISE TERMOELÁSTICA EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL, POR ELEMENTOS FINITOS, DA PAREDE EXTERNA DE UM FORNO DE COZIMENTO DE ANODOS.**

Marcelo Rassy Teixeira<sup>1</sup>; Remo Magalhães de Souza<sup>2</sup>

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo sobre o comportamento de uma estrutura em concreto armado e refratários submetida a elevadas variações térmicas. A estrutura analisada consiste na parede externa de um forno de cozimento de anodos, utilizados na produção de alumínio, que está submetida a temperaturas de cerca de 1200°C, devido às exigências do processo.

As motivações principais para o estudo foram a ocorrência de grandes deformações e o surgimento de fissuras na estrutura, o que poderia provocar a inutilização do forno. O objetivo do trabalho foi a investigação das causas destas anomalias. Para isso, foram realizados estudos experimentais e computacionais do comportamento da estrutura. Inicialmente, a estrutura foi monitorada utilizando-se transdutores de deslocamento e sensores de temperatura (termopares), conectados a um sistema de aquisição de dados, para obtenção e armazenamento automático das informações ao longo do tempo. Em seguida, foram desenvolvidos modelos computacionais em Elementos Finitos, com auxílio do programa Algor, realizando análises estacionárias de condução de calor, seguidas de análises de tensões de origem térmica. Como conclusão do estudo, tem-se que a metodologia proposta para a solução do problema foi bastante satisfatória, conforme mostrado no presente trabalho.

Palavras chaves: 1. forno de cozimento de anodo, 2. método dos elementos finitos, 3. análise experimental

II Congresso Internacional do Alumínio; Temário 7. Refratários; 23, 24 e 25 de agosto de 2005 – São Paulo – Brasil.

1. Engenheiro Manutenção Refratário, ALBRAS – Alumínio Brasileiro S.A e Mestre pelo PPGEC/UFPa – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

2. Professor Adjunto IV, PPGEC/UFPa – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

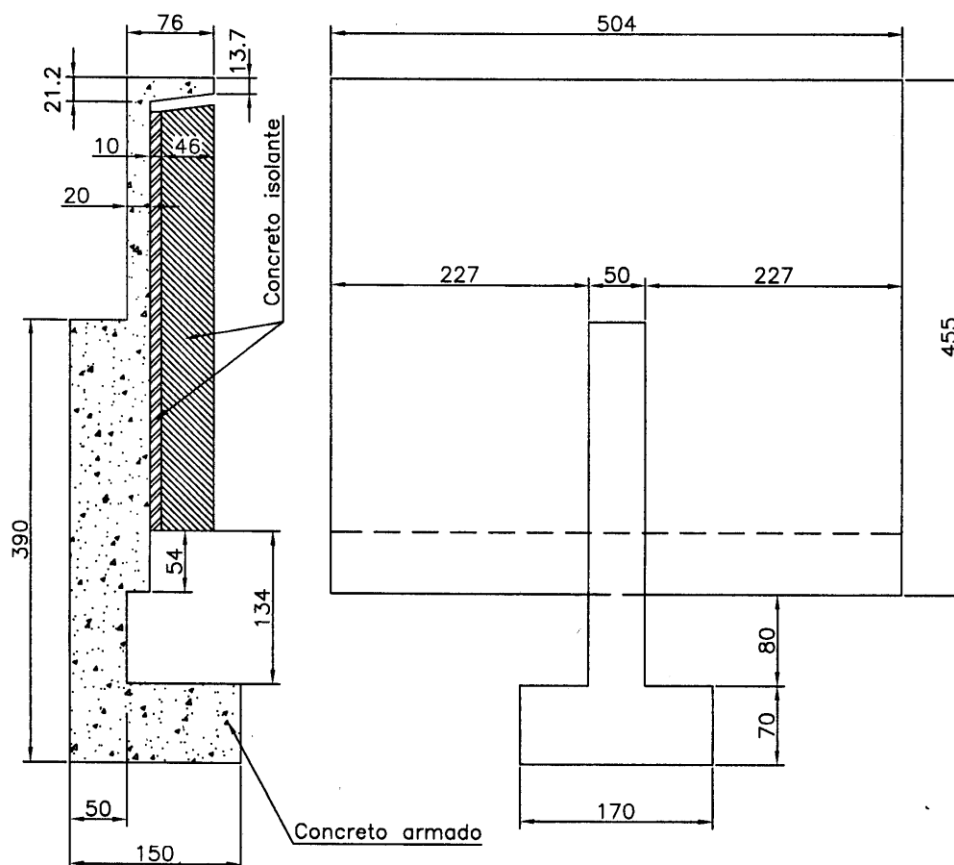
## 1. Introdução

O Alumínio é um metal cujo campo de aplicação está em ampla expansão, com avanço em novos mercados, como por exemplo: o mercado automobilístico, o mercado de aeronaves e a construção civil. Esta expansão ocorre devido as excelentes propriedades do alumínio tais como baixo peso específico, boa condutividade elétrica e boa resistência mecânica.

A produção do alumínio primário a partir da matéria prima extraída da natureza (bauxita) é complexa. Existem duas etapas de transformação para se produzir alumínio. A primeira etapa é a transformação da bauxita em alumina (óxido de alumínio) e a segunda etapa consiste na transformação da alumina em alumínio.

Para realização da segunda etapa é necessário, entre outros insumos, a utilização de blocos anódicos, os quais também são comumente denominados de anodos. Durante o processo de produção do bloco anódico ou anodo é necessário manter o material a elevadas temperaturas para adquirir propriedades mecânicas e químicas exigidas no produto final (anodo pré-cozido). Os fornos de cozimento dos blocos anódicos geralmente apresentam problemas estruturais de origem térmica.

A FIGURA 1 ilustra a estrutura de concreto armado existente nas laterais dos fornos de cozimento de anodo que apresentam patologias estruturais provenientes dos carregamentos térmicos inerentes à operação do forno. Esta pesquisa analisará o comportamento desta estrutura.



COTAS EM CENTIMETROS

FIGURA 1 – Estrutura de Concreto Armado em Estudo

## 2. Objetivo

O objetivo geral desta pesquisa é o estudo do comportamento termo-mecânico das paredes externas de fornos de cozimento de anodo. Embora a pesquisa possa ser aplicada a diversos tipos de fornos, têm-se como aplicação, os fornos de cozimento de anodo da Albras – Alumínio Brasileiro S.A<sup>1</sup>. localizada no município de Barcarena, Estado do Pará.

## 3. Justificativa

A importância de se estudar os fornos de cozimento de anodos é justificada pela sua ampla utilização em diversas fábricas de alumínio em vários países. Existem dois processos de produção de anodo: anodo pré-cozido que utiliza os fornos de cozimento de anodo e o anodo Soderberg, que não utiliza os fornos de cozimento de anodo. Porém, aproximadamente 70% da produção de alumínio primário mundial é produzido em fábricas que utilizam anodos pré-cozidos

O estudo das deformações nas paredes externas do forno de cozimento de anodo é justificado pela necessidade da determinação do comprometimento da integridade do forno e conseqüentemente da sua vida útil. É importante verificar o provável risco de desabamento das paredes e/ou provável risco de perda de eficiência do isolamento para o meio externo.

Como as propriedades físico-mecânicas dos materiais utilizados no forno (concreto armado e concretos isolantes) não são especificadas e/ou conhecidos com grande precisão, justifica-se o interesse em caracterizar os materiais existentes para se obter suas reais propriedades.

Os objetivos da análise experimental, com a obtenção da curva temporal dos deslocamentos e das temperaturas, são justificados pela necessidade de se mapear o comportamento termomecânico da parede devido a variação térmica.

A escolha de simular o comportamento da estrutura através de um método numérico justifica-se pelo fato desta opção ser mais rápida, prática e econômica, do que a utilização de modelos reduzidos ensaiados em laboratório.

## 4. Metodologia

A metodologia empregada na pesquisa consiste basicamente em levantamentos de dados experimentais *in loco* e modelagem computacional do problema. Uma descrição resumida destas atividades é apresentada a seguir, para proporcionar uma visão geral do trabalho. Basicamente, o estudo foi desenvolvido em três etapas descritas a seguir.

A primeira etapa consistiu na obtenção de algumas propriedades dos materiais que são importantes no estudo da distribuição de temperatura na estrutura, são elas: a condutividade térmica do concreto e o coeficiente de dilatação térmica do bloco de concreto isolante. A necessidade de determinação da condutividade térmica do concreto é justificada pela influência desta no fluxo de calor que atravessa a estrutura.

A segunda etapa consistiu na monitoração da parede de concreto armado com o auxílio de sensores de deslocamento linear, sensores de temperatura, sistema de aquisição de dados e software para obtenção e armazenamento

---

<sup>1</sup> <http://www.albras.net/>

automático das amostras ao longo do tempo. Com esta monitoração, pôde-se mapear o comportamento da estrutura, correlacionando os resultados obtidos com os dados de operação do forno (variação de temperatura no seu interior).

A terceira etapa consistiu na modelagem computacional da parede do forno. Inicialmente foi criado um modelo computacional, referente à estrutura original, usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) através do Programa Algor. Este modelo foi posteriormente validado comparando os resultados numéricos com os experimentais. O Software Algor é um programa comercial, desenvolvido em MEF, implementado para análises térmicas estacionárias e transientes; análises tencionais lineares e não lineares; análises eletrostáticas e análises de escoamento, porém divididos em vários módulos específicos.

## 5. Descrição do Problema

A Albras tem cinco fornos de cozimento de anodo com diferentes idades. O forno que será utilizado para este estudo será o forno mais antigo, qual seja o forno de cozimento de anodo B com 20 (vinte) anos de idade. A primeira reforma do revestimento refratário e isolante deste forno, ocorreu em 1996. Em setembro de 2004 o forno B passou pela segunda reforma do revestimento refratário e isolante após 170 ciclo de utilização, que foi considerada uma vida útil bem acima do planejado inicialmente de 100 ciclos. Vale ressaltar que a estrutura de concreto armado em estudo permanece a originalmente construída a 20 anos atrás.

O forno de cozimento de anodo é um equipamento que funciona a elevadas temperaturas. As paredes das extremidades do forno têm a função de conter o fluxo de calor produzido no processo de operação do forno, estando, ao mesmo tempo, em equilíbrio com o meio externo, o qual se situa à temperatura ambiente.

Estas paredes vêm apresentando deformações acumulativas com o passar dos seus vinte anos de existência. Embora a deformação observada não esteja ainda prejudicando a operação do forno, questiona-se se a sua integridade estrutural pode estar sendo afetada. Isto, então, levantou a questão de qual seria a inclinação máxima que esta estrutura poderá suportar. A FIGURA 2 ilustra o sentido principal da deformação da parede.

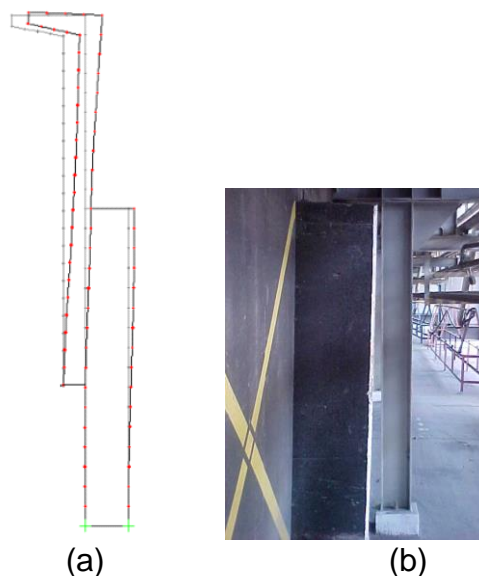


FIGURA 2 – (a) Ilustração da Deformação (b) Foto da deformação

## 6. Caracterização dos Materiais

A principal razão para as reformas dos fornos de cozimento de anodo é a degradação dos materiais refratários e isolantes decorrentes da operação do mesmo. Surge então o questionamento de como esta degradação pode ser mensurada.

Os critérios de avaliação da vida útil do forno de cozimento de anodo são: o desalinhamento das câmaras (*flue walls*); a presença de muitos tijolos refratários quebrados nas câmaras (*flue walls*); e a diminuição da junta de dilatação entre a *head wall* e a *flue wall*. Porém, estes critérios de avaliação pouco contribuem para este estudo.

É importante para esta pesquisa a determinação de forma precisa das propriedades dos materiais que influenciam na deformação da parede. Como o efeito é de origem térmica, as propriedades mais importantes a serem investigadas são a condutividade térmica e o coeficiente de dilatação térmica dos diversos materiais empregados na parede.

Embora as propriedades mecânicas e térmicas dos diversos materiais que constituem a parede sejam encontradas na literatura técnica ou fornecidas pelos respectivos fabricantes, julgou-se importante à determinação experimentalmente de algumas destas propriedades para alguns materiais.

A parede externa do forno possui três camadas adjacentes, com materiais de propriedades térmicas e mecânicas diferentes, conforme apresentado na FIGURA 3.

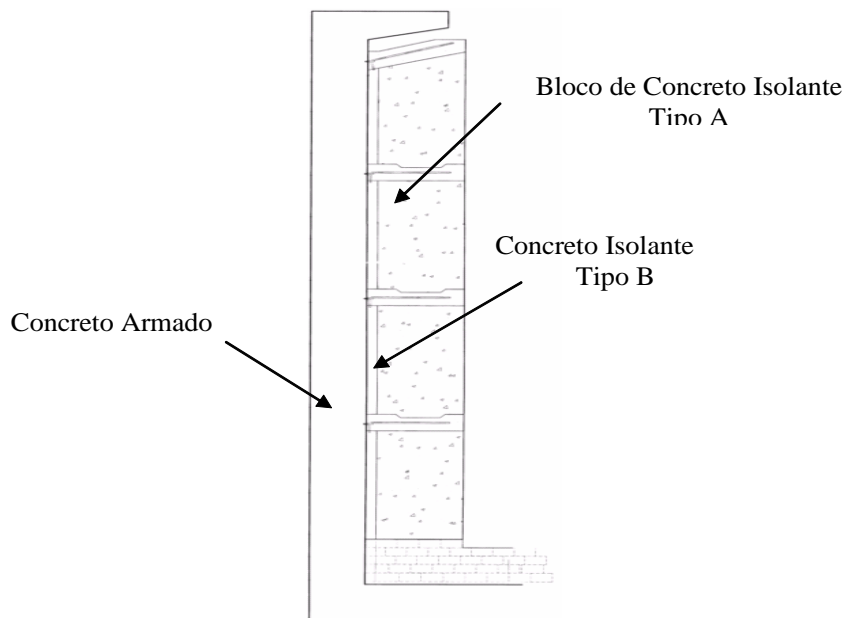


FIGURA 3 – Parede externa do forno de cozimento de anodo

Como a camada referente aos blocos de concreto isolante é a região exposta às maiores temperaturas por estar mais próxima da câmara de combustão, foi importante obter o coeficiente de dilatação térmica deste material. É importante destacar também que embora este coeficiente varie dentro da faixa de temperatura de interesse do estudo, foi realizada uma análise térmica linear, ou seja, considerando este coeficiente constante com a temperatura. Este critério de linearidade do coeficiente de dilatação térmico foi assumido devido as restrições dos equipamentos disponíveis em laboratório.

Devido ao fato do concreto isolante tipo B (FIGURA 3) ser um material muito poroso e de baixa resistência mecânica, se torna difícil a obtenção das suas

propriedades térmicas com os equipamentos que estavam disponíveis para esta pesquisa. Por este motivo, foram admitidos os valores tabelados para as propriedades deste material.

Pelo fato da estrutura de concreto armado estar submetida a um pequeno gradiente térmico, além de restrições quanto ao tempo para execução dos ensaios, foi obtida experimentalmente apenas a sua condutividade térmica. Esta propriedade foi obtida a partir da retirada de testemunhos da parede, posteriormente preparados na forma de pastilhas com 50mm de diâmetro e 20mm de altura, conforme ilustra a figura 4.



FIGURA 4 – Processo de retirada do testemunho para medição da condutividade térmica

A condutividade térmica permitiu a determinação do fluxo de calor na parede a partir das temperaturas nas faces interna e externa da camada em concreto armado, as quais foram obtidas na fase de monitoração que será mostrada adiante. Para o coeficiente de dilatação térmica foi assumido o valor tabelado.

O equipamento utilizado para medir a condutividade térmica do material foi fabricado pela R&D Carbon; possui precisão de 0,10%, e funciona a uma temperatura padrão de 60°C. Para possibilitar a realização dos ensaios nesta faixa de temperatura, as amostras são pré-aquecidas no próprio equipamento. A FIGURA 5 ilustra este equipamento no laboratório da Albras.



FIGURA 5 – Equipamento para medição da condutividade térmica do material

Como o concreto é um material heterogêneo, é necessário a utilização de um número significativo de amostras, para a sua caracterização. Para isso, foram

preparadas 25 (vinte e cinco) pastilhas da estrutura e para cada pastilha foram obtidos cinco resultados da condutividade térmica. A partir da média dos cinco resultados de cada amostra, e da média dos resultados de todas as amostras, chegou-se ao valor de  $k_1=1,18$  W/mK.

O coeficiente de dilatação térmica do bloco de concreto isolante tipo A é outra propriedade importante pelas seguintes razões: por ser o material com maior espessura no sistema em estudo; por apresentar considerável rigidez; e por estar mais próximo da câmara de combustão, conseqüentemente, o material que está exposto às maiores temperaturas. A influência considerável desta propriedade na deformação da estrutura foi confirmada através de simulações computacionais.

Do forno de cozimento de anodo em estudo, forno B, foi retirada uma amostra do bloco de concreto isolante tipo A, e com o auxílio de uma serra de corte diamantada foram preparadas amostras com geometria prismática nas dimensões de 100mm de altura por 50mm de lados, conforme ilustra a FIGURA 6.



FIGURA 6 – Amostras do bloco de concreto isolante

Para a determinação experimental do coeficiente de dilatação térmica do concreto isolante tipo A, foi utilizado um equipamento de medição preparado para a presente pesquisa. O sistema de medição utilizou um forno com variação de temperatura controlada através do emprego de sensores de temperatura (termopares) e um controlador digital e que atinge a temperatura máxima de 600°C. As deformações da amostra foram obtidas utilizando um relógio comparador digital. Com a utilização do forno, do controlador digital, do relógio comparador e do termopar, pôde-se obter as deformações e as temperaturas presentes no sistema.

Inicialmente, submeteu-se o forno à temperatura de 600°C para se obter a deformação do sistema (composto por uma haste cerâmica e suporte metálico de apoio do testemunho), sem a presença da amostra. Em seguida colocou-se o corpo de prova no interior do forno, submetendo-o à mesma variação térmica anterior de 600°C. Com a dilatação do testemunho subtraído da deformação do sistema obtida inicialmente, obteve-se a dilatação média de 0,20mm, exclusiva do corpo de prova. Com base neste resultado, obteve-se o coeficiente de dilatação térmica de 0,00000328 1/°C. A FIGURA 7 ilustra o equipamento de dilatação térmica.

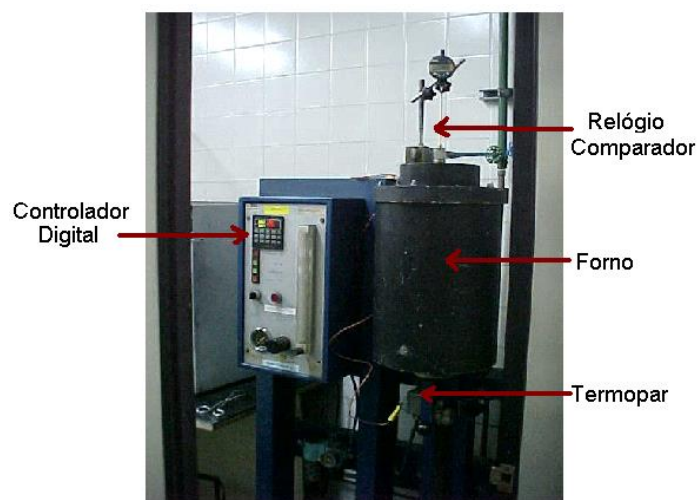


FIGURA 7 – Equipamento para o ensaio de dilatação térmica

## 7. Análise Experimental

As paredes de concreto armado do forno de cozimento de anodo deformam seguindo as variações de temperatura decorrentes do próprio processo de operação do forno. Até então, não se conhece detalhadamente os efeitos do processo de cozimento de anodo na deformação da parede externa em concreto armado.

Para responder diversas perguntas relacionadas ao comportamento das paredes externas do forno precisou-se mapear o seu comportamento escolhendo se pontos distribuídos ao longo da parede para monitoração.

Com a utilização de um sistema de aquisição de dados, sensores de deslocamentos lineares (modelo PY2, marca Gefran) e sensores de temperatura (termopar do tipo PT100, marca Equipe) a parede de concreto armado foi monitorada por 50 (cinquenta dias), durante 24 (vinte e quatro) horas por dia, coletando uma amostra a cada 5 (cinco) segundos de intervalo.

A decisão de se monitorar a estrutura por um período longo foi devida ao objetivo de correlacionar a deformação da parede com a variação de temperatura decorrente da operação do forno. Como cada ciclo de operação do forno tem a duração de 18 dias, através do ensaio, foi possível monitorar o comportamento da estrutura durante a ocorrência de três ciclos (passagem de três “fogos”) na seção correspondente a parede externa do forno.

Para obtenção das temperaturas na face interna da parede de concreto armado foi utilizado o furo resultante da extração dos testemunhos da estrutura.

Para realização da monitoração da estrutura de concreto armado foi utilizado o sistema de aquisição de sinais modelo ADS2000, marca Lynx. Este sistema é basicamente formado por dois módulos: um módulo condicionador AC-2161A de 16 canais, responsável pela alimentação dos sensores, leitura e condicionamento (filtragem e amplificação) dos sinais de sensores, e um módulo condicionado); e um módulo controlador AI-2122, responsável pela conversão dos sinais analógicos em sinais digitais, comunicação com o micro-computador, para posterior conversão dos sinais digitais em valores de engenharias.

A FIGURA 8 é uma ilustração esquemática do sistema como um todo, com a parede de concreto armado, a estrutura metálica de fixação dos sensores de deslocamento linear e o piso operacional.



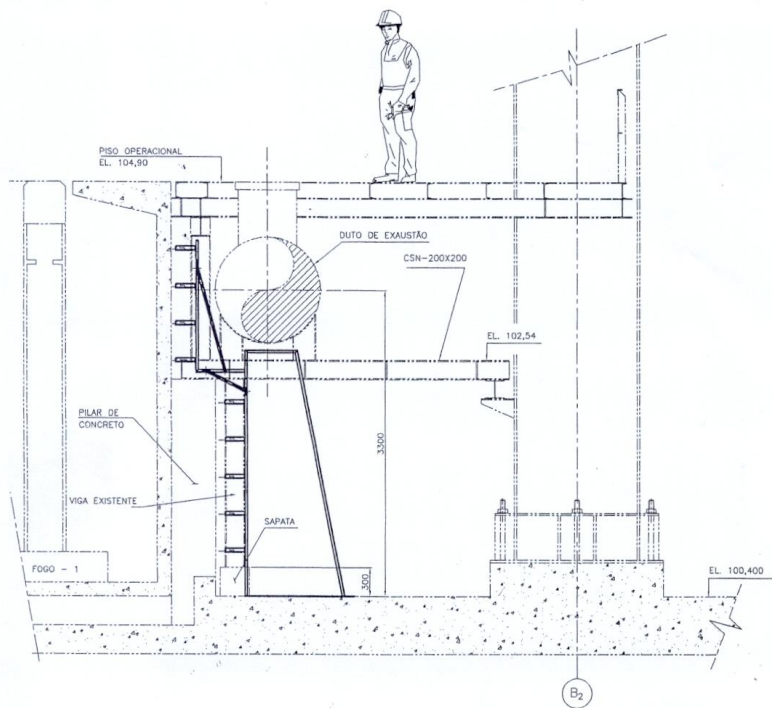


FIGURA 8 – Ilustração: parede – suporte metálico – piso operacional

A FIGURA 9 mostra as estruturas metálicas utilizadas para fixação dos 10 (dez) sensores de deslocamento linear durante a monitoração.



FIGURA 9 – Estrutura dos sensores de deslocamento linear

Os dados coletados no ensaio são apresentados em forma de curvas temporais devido ao elevado número de amostras coletadas (880249 amostras no total). A FIGURAS 10 mostra os resultados obtidos no sensor SENSOR01 de deslocamento linear.



FIGURA 10 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 1

## 8. Análise Computacional

Nesta pesquisa foram desenvolvidos modelos computacionais pelo MEF com auxílio do programa computacional Algor, para determinação da distribuição de temperatura e as correspondentes tensões e deformações de origem térmica na estrutura.

O primeiro modelo desenvolvido foi baseado nas dimensões reais da parede. Os resultados deste modelo foram comparados com os resultados obtidos na monitoração da estrutura, objetivando a validação da modelagem numérica. Para isso foi utilizado o programa Algor. A FIGURA 11 ilustra o modelo computacional da parede do forno de cozimento de anodo com as dimensões reais.

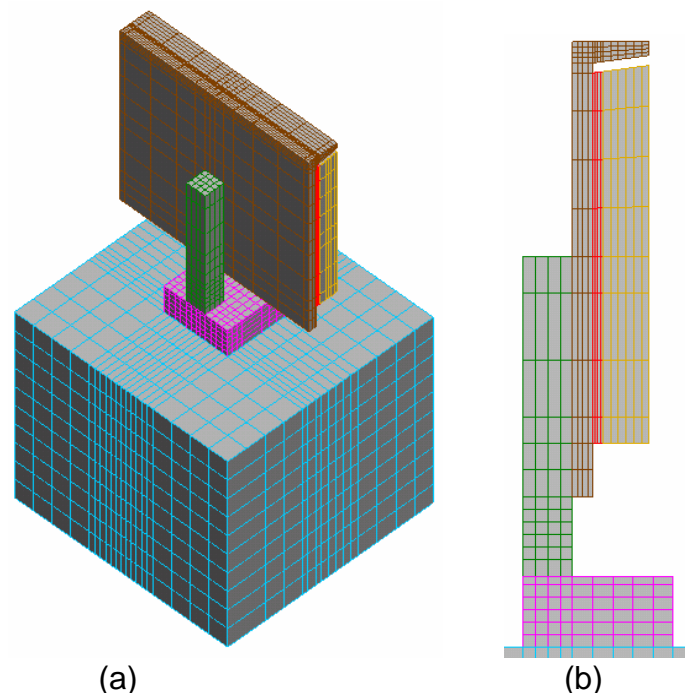


FIGURA 11 – Modelo em elementos finitos. (a) Vista do Modelo (b) Corte Transversal do Modelo

O resultado da análise térmica estacionária, com a representação gráfica das isotermas está ilustrado na FIGURA 12.

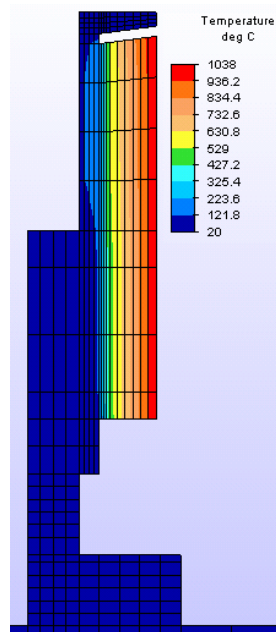


FIGURA 12 – Perfil térmico do modelo – análise estacionária

A partir das temperaturas nodais obtidas nas análises térmicas, pode-se realizar a análise de tensões com este efeito. A configuração do modelo deformado da estrutura, devido ao efeito térmico, é representada na FIGURA 13.

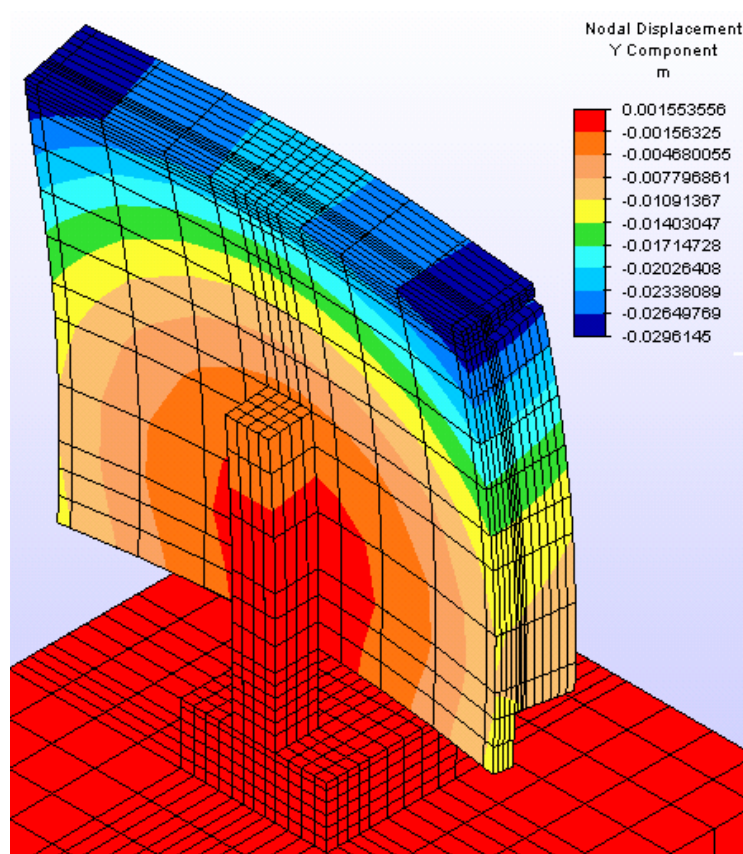


FIGURA 13 – Modelo deformado devido o efeito térmico

## 9. Conclusão

As conclusões são apresentadas a seguir:

a) A evolução da deformação da parede apresentou uma descontinuidade no segundo dia de pré-aquecimento que foi similar a descontinuidade da temperatura no processo no interior das *flue walls*, que são originadas pela emissão dos gases despreendidos do anodo (voláteis). Com isto confirma-se a relação entre a deformação da parede de concreto armado e as variações da temperatura referentes ao próprio processo de operação do forno de cozimento de anodo. As FIGURAS 14 e 15 ilustram este efeito.

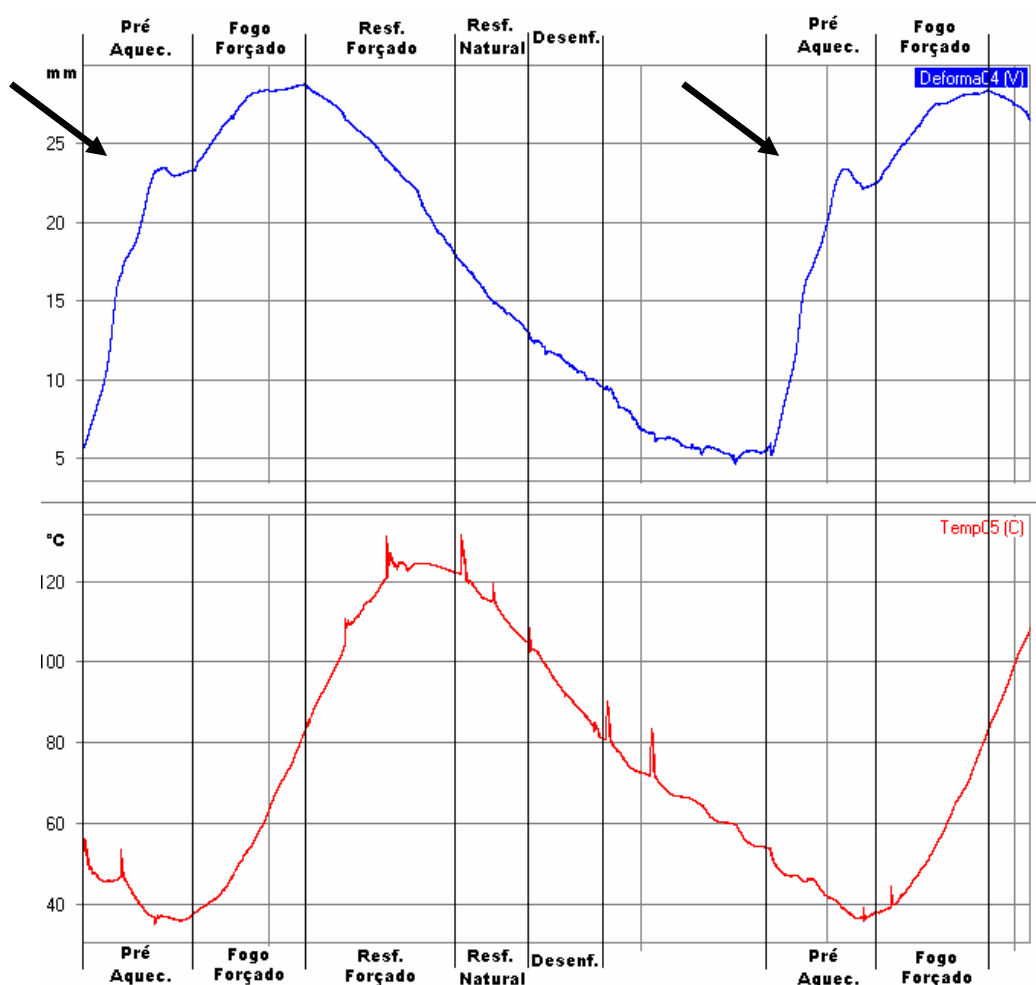


FIGURA 14 – Curvas obtidas na monitoração da parede de concreto armado

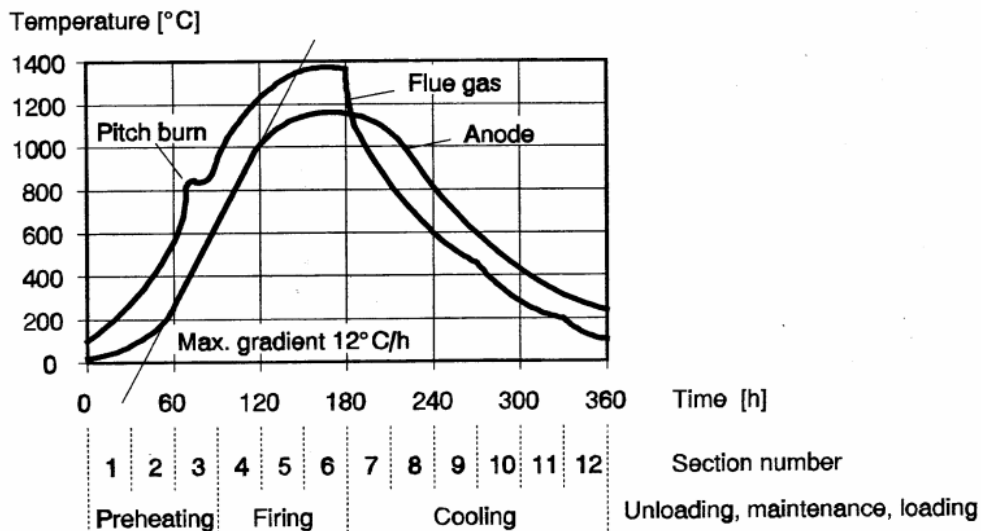


FIGURA 15 – Temperatura durante a operação do forno.

Fonte: Meier M.W. 1996

b) A parede monitorada apresenta deformação torcional em um sentido quando a operação do forno se encontra nas fases de pré-aquecimento e fogo forçado e no sentido inverso quando a operação do forno se encontra nas fases de resfriamento forçado e resfriamento natural. A FIGURA 16 ilustra esse efeito.

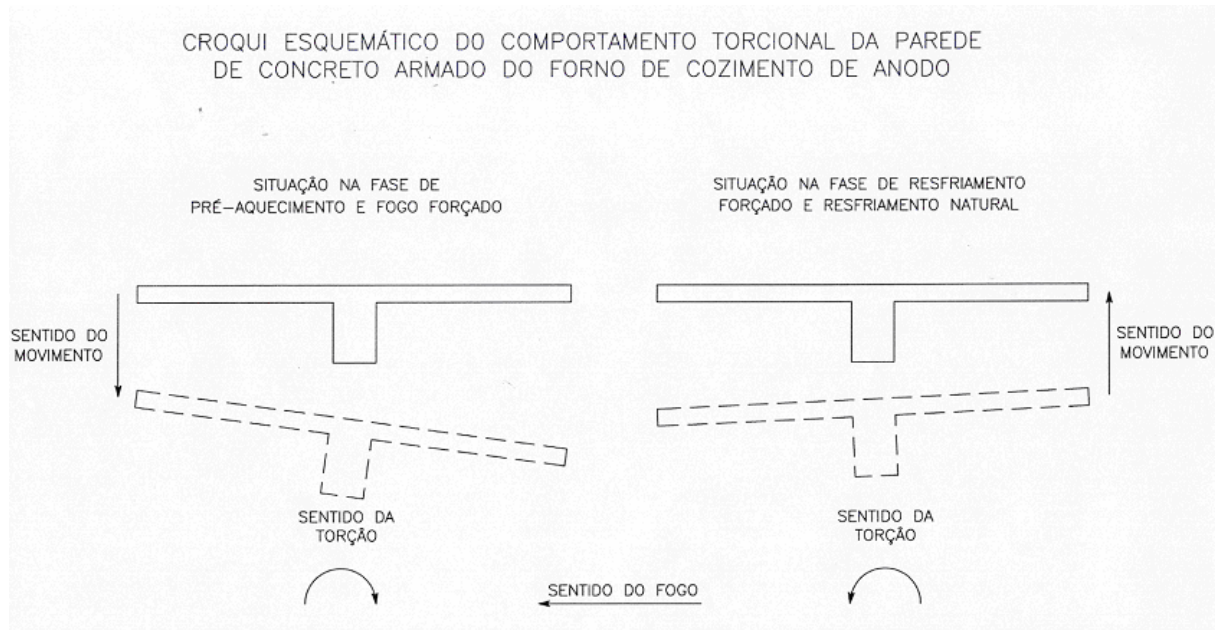


FIGURA 16 – Comportamento torcional da parede de concreto armado

c) Conclui-se que a deformação observada na estrutura em estudo é devido na sua maior parte a efeitos de origem térmica na própria parede. Porém ainda não se sabe, com precisão, qual a influência de efeitos mecânicos adicionais no comportamento da estrutura. Como exemplo cita-se a possível influência da deformação da flue-wall adjacente a parede em estudo, o que pode causar uma provável deformação adicional provocada pelo contato entre as duas estruturas.

## 10. Bibliografia

- Aitcin, P.C. – Concreto de Alto Desempenho. Livro. PINI – 2000.
- Albras – Alumínio Brasileiro S/A. Curso de Capacitação de Operadores da Área de Carbono. Apostila – 2003.
- Aquino, A. M. A., Moura, R. R. e Mello, J. M – Expansion of an Albras Bake Furnace in Continuous Operation. Light Metals – 2004.
- Associação Brasileira do Alumínio. Site. <http://www.abal.org.br/>
- Costa, C.N.; Figueiredo, A.D.; Silva, V.P.– Aspectos Tecnológicos dos Materiais de Concreto em Altas Temperaturas. Nutau – 2002.
- Dally, J.W.; Rillely W.F.– Experimental Stress Analysis – Third Edition – McGraw-Hill International Editions. Engineering Mechanics Series – 1991.
- de Souza, R.M. – O método dos Elementos Finitos Aplicado a Problema de Condução de Calor – Texto Didático. Nicae – 2003.
- Desai, C.S., Siriwardare, H.J. – Constitutive Laws for Engineering Materials with Emphasis on Geologic Materials – 1984.
- Fakury, R.H.; Casas, E.B.L.; Ribeiro, J.C.L.; Nóbrega, A.P.M. – O Uso de Análise Térmica via MEF no Cálculo de Pilares Mistos Preenchidos com Concreto em Situação de Incêndio. XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. CILANCE – 2003.
- Galletto, A.; Meneguini, E.C.A.; Pinto Jr, N.O.; Paulon, V.A.; Moreiro Jr, A.L.– Efeito do calor sobre a Resistência à Compressão, Módulo de Elasticidade e Coloração de Concretos Convencionais e de alta Resistência – Instituto Brasileiro do Concreto. 44º congresso Brasileiro – 2002.
- Gawin, D.; Pesavento, F.; Schrefler B.A.– Modelling of Hydro-Thermal Behaviour of Concrete at High Temperature with thermo-Chemical and Mechanical Material Degradation –Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 192 páginas 1731 à 1771 – 2003.
- Grjotheim, K.; Kvannd, H. – Introduction to Aluminium Electrolysis. Understanding the Hall - Héroult Process. Aluminium-Verlag 2<sup>nd</sup> Edition – 1993
- Huang, Z. H.; Burgess, I.W.; Plank, R.J.– Non-linear Structural Modelling of a Fire Test Subject to High Restraint — Fire Safety Journal 36 páginas 795 à 814 – 2001.
- International Aluminium Institute. Site. <http://www.world-aluminium.org/>
- Ki-Yeol Shin, Sang-Baik Kim, Jong-Hwan Kin, Mo Chung, Pyung-Suk Junhg – Thermo-Physical Properties and Transient Heat Transfer of Concrete at Elevated Temperatures – Nuclear Engineering and Design 212 páginas 233 à 241 – 2002.
- Kruger, D.A.V. Análise Térmica de Estruturas Executadas por Camadas: Aplicação a Barragem em CCR. XXII CILANCE – 2001.
- Kruger, D.A.V. Análise Térmica Transiente de Estruturas de Concreto Executadas por Camadas. Dissertação. Universidade Federal do Paraná – 2001.
- Meier, M.W. - Cracking – Cracking Behavior of Anodes. R&D Carbon Ltd. – 1996.
- Metha, P.K., Monteiro P.J.M. – Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais. Livro. PINI. – 1994.
- Nunes, J.M.B.; Bezerra, L.M.– Formulação em Elementos Finitos para Determinação de Temperaturas em Sólidos Submetidos a Gradientes Térmicos – XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. CILAMCE – 2003.

Paulo Barroso Engenharia Ltda, 4º Relatório de Monitoramento da Estrutura dos fornos A e B – 1999.

Poon, C.S.; Azhar, S.; Anson, M.; Wong, Y.L.– Comparison of the Strength and Durability Performance of Normal and High Strength Pozzolanic Concretes at Elevated Temperatures –Cement and Concrete Research 31 páginas 1291 à 1300 – 2001.

Santos, W.N. – Effect of Moisture and Porosity on the Thermal Properties of a Conventional Refractory Concrete – Journal of the European Ceramic Society 23 páginas 745 à 755 – 2003.

Shames, I.H.; Cozzarelli F.A.– Elastic and Inelastic Stress Analysis – State University of New York at Buffalo – Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey – 1991.

Silva, C.A.R., Tolentino, E., Starling, C.M.D., Vasconcelos, W.L. e Lameira, F.S. Comportamento Mecânico de Concretos e Aços Estruturais Expostos a Temperaturas Elevadas. 44 Congresso Brasileiro do Concreto – 2002.

Silva, C.A.R., Tolentino, E., Starling, C.M.D., Vasconcelos, W.L. e Lameira, F.S. Microestrutura de Concreto e Aços Estruturais antes e após a Exposição a Temperaturas Elevadas. 44 Congresso Brasileiro do Concreto – 2002.

Sousa, A.A.A., Moreno Jr., A.L. Efeitos de Altas Temperaturas na Resistência à Tração e Módulo de Deformação do Concreto. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto – 2003.

Soares, M. P. A. M. – Inspeção e Manutenção de Refratários. Instituto Santista de Qualidade Industrial. Apostila – 1995.

Vasconcelos, A.C. Efeitos Térmicos nas Estruturas de Concreto. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto – 2003.

Velasco, R.V., Toledo Filho, R.D., Lima, P.R., Fairbairn, E.M.R. Comportamento Tensão-Deformação do Concreto de Alto Desempenho submetido a Altas Temperaturas. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto – 2003.

Zanato, G.A., Campos Filho, A., Campagnalo, J.L. Pilares Esbeltos Reforçados com Concreto Armado: Análise Teórica e Experimental. 41 Congresso Brasileiro do Concreto – 1999.

# **EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE EXTERNAL WALL IN REINFORCED CONCRETE OF AN ANODE FURNACE.**

**Marcelo Rassy Teixeira<sup>1</sup>; Remo Magalhães de Souza<sup>2</sup>**

**This paper presents a study about the behavior of a reinforced concrete structure subjected to high thermal variations. The structure under investigation is the external wall of an anode furnace used in Aluminum production, and is subjected to thermal variations in the range of 1250°C (2282 F) due to the furnace operation.**

**The main motivations for the study were the presence of large deformations and occurrence of cracks in the structure, which could cause the furnace to become inoperable. The objective of the research was to investigate the causes of these structural pathologies. For this purpose, experimental and numerical studies were carried out. At first, the structure was monitored using displacement transducers and temperature sensors (thermocouples) connected to a data acquisition system, which could automatically obtain and store samples along the test period. Next, computer models were developed, using a multiphysics Finite Element Code called Algor, for the evaluation of temperature distribution and corresponding thermal stresses and strains in the structure. In these studies, stationary heat conduction analyses were performed, followed by thermal stress analyses. As a conclusion of this research, it can be stated that the proposed methodology, based on advanced tools of structural engineering, was very suitable for the study of the presented phenomenon.**

**Keywords: 1. Finite Element. 2. Experimental Analysis 3. Anode Furnace**

**II International Aluminum Congress; Themes 7. Refractories; August 23<sup>rd</sup>, 24<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup>, 2005 – São Paulo – Brasil.**

**1. Refractories Maintenance Engineer, ALBRAS – Alumínio Brasileiro S.A and Master of the PPGEC/UFPa – Graduate Program in Civil Engineering. Federal University of Pará.**

**2. Associate Professor, PPGEC/UFPa – Graduate Program in Civil Engineering. Federal University of Pará.**