UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCELO RASSY TEIXEIRA

ANÁLISE TERMOELÁSTICA EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS DA PAREDE EXTERNA EM CONCRETO ARMADO DE UM FORNO DE COZIMENTO DE ANODO

Belém

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCELO RASSY TEIXEIRA

ANÁLISE TERMOELÁSTICA EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS DA PAREDE EXTERNA EM CONCRETO ARMADO DE UM FORNO DE COZIMENTO DE ANODO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, orientada.

Orientador: Remo Magalhães de Souza

Belém

2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DO CT – UFPA

B 132 f

Teixeira, Marcelo R.

Análise Termoelástica Experimental e Computacional por Elementos Finitos da Parede Externa em Concreto Armado de um Forno de Cozimento de Anodo / Marcelo Rassy Teixeira. – Belém, Pará: 2004.

Orientador: Remo Magalhães de Souza

Tese (doutorado) – Universidade da Califórnia.

1. Elementos Finitos. 2. Análise Experimental 3. Forno de Cozimento de Anodo I. de Souza, Remo M. II. Universidade Federal do Pará. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil III. Análise Termoelástica Experimental e Computacional por Elementos Finitos da Parede Externa em Concreto Armado de um Forno de Cozimento de Anodo

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCELO RASSY TEIXEIRA

ANÁLISE TERMOELÁSTICA EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS DA PAREDE EXTERNA EM CONCRETO ARMADO DE UM FORNO DE COZIMENTO DE ANODO

Dissertação submetida a Banca Examinadora aprovada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Estruturas e Construção Civil.

Aprovada em 16 de dezembro de 2004.
BANCA EXAMINADORA

Prof. Phd. Remo Magalhães de Souza
Presidente e Orientador / DEC/UFPA

Prof. Dr. Emanuel Negrão Macedo
DEQ/UFPA

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo
DEC/UFPA

Prof. Phd. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo
ENC/UNB

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
DEC/UFPA

Prof. Dra. Regina Augusta Campos Sampaio
DEC/UFPA

Belém
2004

A Deus.

Aos meus pais em sinal de eterno agradecimento.

Aos meus irmãos.

Agradecimentos

Agradecimento especial aos meus pais, Raulino e Terezinha por terem sido os melhores pais que um filho poderia querer: educando, incentivando, conversando e amando. Eu amo vocês! Saudades do senhor, meu pai, que me deixou no meio desta caminhada para descansar em paz.

Ao meu orientador por ter me orientado e incentivado em trocar de tema no meio do mestrado. Conduzindo-me ao estudo de um problema que será muito útil para minha vida profissional.

A Albras por ter acreditado e investido neste estudo.

Aos meus colegas da Albras que tanto me ajudaram na caminhada deste estudo.

Resumo

Teixeira, Marcelo R. Análise Termoelástica Experimental e Computacional por Elementos Finitos da Parede Externa do Forno de Cozimento de Anodo. Belém. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, 2004. 132p. Dissertação (Mestrado).

Nesta dissertação foi desenvolvido um estudo sobre o comportamento de uma estrutura em concreto armado submetida a elevadas variações térmicas. A estrutura analisada consiste na parede externa de um forno de cozimento de anodo utilizado na produção de Alumínio, e está submetida a variações térmicas de cerca de 1250°C devido à própria operação do forno. 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 patologias, assim como o estabelecimento de propostas para reforço da estrutura. 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 automática das amostras ao longo do tempo. Em seguida, foram desenvolvidos modelos computacionais em Elementos Finitos com auxilio do programa computacional Algor, para determinação da distribuição de temperatura e as correspondentes tensões e deformações de origem térmica na estrutura. Nestes estudos, foram realizadas análises estacionárias e transientes 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, solucionando o problema de forma precisa, porém econômica.

Palavras-Chave: 1. Elementos Finitos. 2. Análise Experimental 3. Forno de Cozimento de Anodo

Abstract

Teixeira, Marcelo R. Experimental and Finite Element Analysis of the external wall in reinforced concrete of an anode furnace. Belém. Graduate Program in Civil Engineering. Federal University of Pará. 2004. 132p. Master´s Thesis.

This thesis 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, as well as to establish retrofit proposals for the structure. 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 and transient 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, since it rendered a precise and economic solution for the problem.

Palavras-Chave: 1. Finite Element. 2. Experimental Analysis 3. Anode Furnace

Sumário

Capítulo 1 – Introdução 01

1.1. Objetivos 03

1.2. Justificativa 04

1.3. Metodologia 05

1.4. Organização do texto 06

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica 07

2.1. Concreto submetido a elevadas temperaturas 07

2.2. Comportamento térmico de materiais refratários 15

2.3. Modelos computacionais para simulação do efeito térmico 17

2.4. Fundamentação teórica 21

2.4.1. Fundamentos de transferência de calor 21

2.4.1.1. Equações básicas da condução de calor estacionária 21

2.4.1.2. Condições de contorno do problema de condução de calor 24

2.4.1.3. Resumo das equações do problema estacionário de condução de calor 25

2.4.2. Fundamentos da teoria da elasticidade 26

2.4.2.1. Equações fundamentais da teoria da elasticidade 26

2.4.2.2. Condições de contorno do problema de análise de tensões 28

2.4.2.3. Resumo das equações da teoria da elasticidade 30

2.4.2.4. Determinação das tensões principais 31

2.4.3. Análise termoelástica 32

2.5. Processo de fabricação do alumínio e anodo 34

2.5.1. Processo de fabricação do alumínio 34

2.5.2. Processo de fabricação do anodo 35

2.5.3. Processo de cozimento do anodo 37

2.5.3.1. Processo de transferência de calor 42

Capítulo 3 – Descrição do problema 44

3.1. Descrição da estrutura 44

3.2. Deformações da parede de concreto armado 47

3.3. Fissurações nas paredes 49

3.4. Caracterização dos materiais 53
3.4.1. Caracterização das propriedades do concreto da parede 54
3.4.2. Determinação do coeficiente de dilatação térmica do concreto isolante 58
3.4.3. Resumo das propriedades consideradas 60

Capítulo 4 – Análise experimental 61
4.1. Execução do ensaio 61
4.2. Resultados do ensaio 70

Capítulo 5 – Análise computacional 77
5.1. Cálculo das temperaturas a partir dos resultados obtidos experimentalmente 77
5.2. Análise dos esforços mecânicos na estrutura de concreto armado 79
5.3. Modelo com as dimensões reais 82
5.4. Análise do efeito da variação das propriedades dos materiais no comportamento da estrutura 90
5.5. Modelo com a primeira proposta de reforço 91
5.6. Modelo com a segunda proposta de reforço 97
5.7. Modelo com a terceira proposta de reforço 102
5.8. Modelo com a quarta proposta de reforço 107
5.9. Modelo com a quinta proposta de reforço 111
5.10. Modelo com a sexta proposta de reforço 117

Capítulo 6 – Conclusões e sugestões para próximos trabalhos 122
6.1. Monitoração da parede 122
6.2. Modelos computacionais 126
6.3. Sugestões para trabalhos futuros 129

Referências 130

Anexos 133

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Estrutura de Concreto Armado em Estudo

FIGURA 2.1 – Difusividade térmica vs. temperatura. Fonte: HARADA (*apud* SHIN *et al*, 2002)

FIGURA 2.2 – Condutividade térmica vs. temperatura. Fonte: HARADA (*apud* SHIN *et al*, 2002)

FIGURA 2.3 – Densidade vs. temperatura - Fonte: HARADA (*apud* SHIN *et al.*, 2002)

FIGURA 2.4 – Resistência a compressão vs. temperatura. Fonte: POON *et al* (2001)

FIGURA 2.5 – Resistência a compressão vs. temperatura. Fonte: POON *et al* (2001)

FIGURA 2.6 – (a) Coeficiente de poisson vs. temperatura (b) Resistência a compressão vs. temperatura – Fonte: HITECO (*apud* GAWIN *et al*., 2003)

FIGURA 2.7 – Alteração do gráfico tensão vs. deformação devido à variação de temperatura – concreto convencional. Fonte: GALLETTO *et al* (2002)

FIGURA 2.8 – Alteração do gráfico tensão vs. deformação devido à variação de temperatura – concreto de alta resistência. Fonte: GALLETTO *et al* (2002)

FIGURA 2.9 – condutividade térmica vs. temperatura de um concreto refratário. Fonte: SANTOS (2003)

FIGURA 2.10 – difusividade térmica vs. temperatura de um concreto refratário. Fonte: SANTOS (2003)

FIGURA 2.11 – Condutividade térmica vs. porosidade de um concreto refratário. Fonte: SANTOS (2002)

FIGURA 2.12 – Deflexão vs. temperatura da laje - Fonte: HUANG *et al* (2001)

FIGURA 2.13 – Comportamento da laje a 20°C- Fonte: HUANG *et al* (2001)

FIGURA 2.14 – Comportamento da laje a 1000°C- Fonte: HUANG *et al* (2001)

FIGURA 2.15 – Modelo em elementos finitos de uma placa de aço submetida a variações de temperatura - Fonte: Nunes *et al* (2003)

FIGURA 2.16 – Corpo tridimensional com domínio Ω e contorno Γ, com referência a um sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z).

FIGURA 2.17 – Elemento diferencial com fluxo de calor atravessando o contorno do elemento

FIGURA 2.18 – subdivisão do contorno do corpo.

FIGURA 2.19 – Corpo tridimensional com domínio Ω e contorno Γ, com referência a um sistema de coordenadas cartesianas (*x*, *y, z*).

FIGURA 2.20 – Elemento diferencial com vetores de trações no contorno do elemento

FIGURA 2.21 – subdivisão do contorno do corpo.

FIGURA 2.22 – Blocos anódicos

FIGURA 2.23 – Cuba eletrolítica Fonte: Catálogo RHI Refractories

FIGURA 2.24 – Forno de cozimento de anodo.

FIGURA 2.25 – Blocos anódicos após chumbamento das hastes metálicas

FIGURA 2.26 – Forno de cozimento de anodo

FIGURA 2.27 – Ilustração do forno de cozimento de anodo. Fonte: AQUINO *et al* (2004)

FIGURA 2.28 – Detalhe do processo de cozimento - fogo

FIGURA 2.29 – Emissão de voláteis

FIGURA 2.30 – Vista superior da região da parede em estudo

FIGURA 3.1 – Parede externa do forno de cozimento de anodo

FIGURA 3.2 – Dimensões da parede de concreto armado

FIGURA 3.3 – Detalhe esquemático da seção da parede deformada

FIGURA 3.4 – Parede de concreto armado deformada

FIGURA 3.5 – Detalhe do efeito de deformação torcional na parede de concreto armado.

FIGURA 3.6 – Detalhe das trincas no contorno do pilar.

FIGURA 3.7 – Trincas na parede devido ao efeito térmico

FIGURA 3.8 – Trincas na parede devido ao efeito térmico

FIGURA 3.9 – Detalhe da trinca no contorno do pilar

FIGURA 3.10 – Camada referente aos blocos de concreto isolante

FIGURA 3.11 – Camada referente aos blocos de concreto isolante

FIGURA 3.12 – Detalhe da trinca na parede de concreto isolante

FIGURA 3.13 – Pacômetro utilizado antes da extração de testemunhos.

FIGURA 3.14 – Processo de retirada do testemunho para medição da condutividade térmica

FIGURA 3.15 – Testemunho de concreto da parede

FIGURA 3.16 – Pastilha preparada com dimensão de 50mm de diâmetro por 20mm de espessura.

FIGURA 3.17 – Equipamento para medição da condutividade térmica do material
FIGURA 3.18 – Amostras do bloco de concreto isolante
FIGURA 3.19 – Equipamento para o ensaio de dilatação térmica
FIGURA 4.1 – Ilustração do sistema: parede – suporte metálico – piso operacional
FIGURA 4.2 – Projeto do suporte metálico dos sensores utilizado na medição de deslocamentos da linha do pilar.
FIGURA 4.3 – Projeto do suporte metálico dos sensores
FIGURA 4.4 – Detalhe do suporte dos sensores de deslocamento linear
FIGURA 4.5 – Sistema de aquisição de dados sendo testado
FIGURA 4.6 – Arranjo dos sensores de deslocamento linear.
FIGURA 4.7 – Arranjo dos sensores de temperatura (PT100)
FIGURA 4.8 – Estrutura dos sensores de deslocamento linear
FIGURA 4.9 – Detalhe do sensor de deslocamento linear e do sensor de temperatura
FIGURA 4.10 – Detalhe do sensor de deslocamento linear e do sensor de temperatura
FIGURA 4.11 – Detalhe da monitoração do deslocamento.
FIGURA 4.12 – Sistema de Monitoração
FIGURA 4.13 – Detalhes do ensaio.
FIGURA 4.14 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 1
FIGURA 4.15 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 2
FIGURA 4.16 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 3
FIGURA 4.17 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 4
FIGURA 4.18 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 5
FIGURA 4.19 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 6
FIGURA 4.20 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 7
FIGURA 4.21 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 8
FIGURA 4.22 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 9
FIGURA 4.23 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 10
FIGURA 4.24 – Temperatura vs. Tempo – Temp 1
FIGURA 4.25 – Temperatura vs. Tempo – Temp 2
FIGURA 4.26 – Temperatura vs. Tempo – Temp 3

FIGURA 4.27 – Temperatura vs. Tempo – Temp 4
FIGURA 4.28 – Temperatura vs. Tempo – Temp 5
FIGURA 5.1 – Parâmetros utilizados no estudo de distribuição de temperatura da parede
FIGURA 5.2 – Junta de dilatação na viga
FIGURA 5.3 – Detalhe da junta de dilatação
FIGURA 5.4 – Espaçamento entre a parede de concreto armado e o piso operacional
FIGURA 5.5 – Detalhe do espaçamento
FIGURA 5.6 – Modelo em elementos finitos com a geometria real da estrutura.
FIGURA 5.7 – Seção transversal vertical do modelo de elementos Finitos
FIGURA 5.8 – Perfil térmico do modelo – análise estacionária
FIGURA 5.9 – Curva da variação de temperatura utilizada na análise transiente
FIGURA 5.10 – Perfil térmico do modelo na análise transiente
FIGURA 5.11 – Perfil térmico do modelo na análise transiente
FIGURA 5.12 – Modelo deformado devido o efeito térmico
FIGURA 5.13 – Representação das tensões de Von Mises
FIGURA 5.14 – Detalhe da representação de tensões de Von Mises indicando região com concentração de tensões.
FIGURA 5.15 – Representação das tensões principais mínimas – Modelo real
FIGURA 5.16 – Representação das tensões principais máximas – Modelo real
FIGURA 5.17 – Histograma com as variações das deformações devido a mudança das propriedades
FIGURA 5.18 – Modelo em elementos finitos com a proposta de reforço tipo 1
FIGURA 5.19 – Projeto da geometria do reforço tipo 1
FIGURA 5.20 – Modelo deformado devido o efeito térmico do reforço tipo 1
FIGURA 5.21 – Representação de tensões por von mises – Reforço 1
FIGURA 5.22 – Detalhe da .representação de tensões por von mises – Reforço 1
FIGURA 5.23 – Representação das tensões principais mínimas – reforço tipo 1
FIGURA 5.24 – Representação das tensões principais máximas – reforço tipo 1
FIGURA 5.25 – Projeto do reforço tipo 2
FIGURA 5.26 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 2
FIGURA 5.27 – Corte transversal da proposta de reforço tipo 2
FIGURA 5.28 – Modelo Deformado devido o efeito térmico do reforço tipo 2
FIGURA 5.29 – Representação de tensões por von mises – reforço tipo 2

FIGURA 5.30 – Representação das tensões principais mínimas – reforço tipo 2
FIGURA 5.31 – Representação das tensão principais máximas – reforço tipo 2
FIGURA 5.32 – Projeto do reforço tipo 3
FIGURA 5.33 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 3
FIGURA 5.34 – Corte transversal do reforço tipo 3
FIGURA 5.35 – Modelo deformado do reforço tipo 3
FIGURA 5.36 – Representação de tensão por von mises – reforço tipo 3
FIGURA 5.37 – Representação de tensão principal mínima – reforço tipo 3
FIGURA 5.38 – Representação de tensão principal máxima – reforço tipo 3
FIGURA 5.39 – Projeto do reforço tipo 4
FIGURA 5.40 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 4
FIGURA 5.41 – Configuração do modelo deformado referente a proposta de reforço tipo 4
FIGURA 5.42 – Representação de tensão por von mises – reforço tipo 4
FIGURA 5.43 – Representação de tensão principal mínima – reforço tipo 4
FIGURA 5.44 – Representação de tensão principal máxima – reforço tipo 4
FIGURA 5.45 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 5
FIGURA 5.46 – Corte transversal do reforço tipo 5
FIGURA 5.47 – Projeto de reforço tipo 5.
FIGURA 5.48 – Modelo deformado do reforço tipo 5
FIGURA 5.49 – Representação de tensão por von mises – reforço tipo 5
FIGURA 5.50 – Representação de tensão principal mínima – reforço tipo 5
FIGURA 5.51 – Representação de tensão principal máxima – reforço tipo 5
FIGURA 5.52 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 6
FIGURA 5.53 – Projeto de reforço tipo 6.
FIGURA 5.54 – Modelo deformado do reforço tipo 6
FIGURA 5.55 – Representação de tensão por von mises – reforço tipo 6
FIGURA 5.56 – Representação de tensão principal mínima – reforço tipo 6
FIGURA 5.57 – Representação de tensão principal máxima – reforço tipo 6
FIGURA 6.1 – Ciclos diários na face externa da parede de concreto armado
FIGURA 6.2 – Curvas obtidas na monitoração da parede de concreto armado
FIGURA 6.3 – Temperatura durante a operação do forno. Fonte: Meier M.W. 1996
FIGURA 6.4 – Comportamento torcional da parede de concreto armado

FIGURA 6.5 – Parte hachurada representando a região onde os resultados do modelo numérico não coincidem com os resultados obtidos experimentalmente para os deslocamentos.

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Misturas de concreto. Fonte: POON *et al* (2001)

TABELA 2.2 – Misturas de concreto. Fonte POON *et al* (2001)

TABELA 2.3 – Resultado dos ensaios a diferentes temperaturas. Fonte: POON *et al* (2001)

TABELA 2.4 – Resultado dos ensaios a diferentes temperaturas. Fonte: POON *et al* (2001)

TABELA 2.5 – Resultado do comportamento do aço com a elevação da temperatura. Fonte: FAKURY *et al* (2003)

TABELA 2.6 – Resultado do comportamento do concreto com a elevação da temperatura. Fonte: FAKURY *et al* (2003)

TABELA 2.7 – Propriedades do concreto após o resfriamento. Fonte: GALLETTO *et al* (2002)

TABELA 2.8 – Resultados da análise térmica - Fonte: Nunes *et al* (2003)

TABELA 2.9 – Resumo das equações que governam o problema de condução de calor.

TABELA 2.10 – Resumo das equações que governam o problema de análise de tensões.

TABELA 3.1 – Propriedades dos materiais

TABELA 5.1 – Resultado das análises com as variações das propriedades

TABELA 6.1 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos para os deslocamentos

TABELA 6.2 – Comparação do resultado experimental com os resultados dos diversos modelos computacionais

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 especifico, 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. Os fornos de cozimento dos blocos anódicos geralmente apresentam problemas estruturais de origem térmica.

A FIGURA 1.1 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.

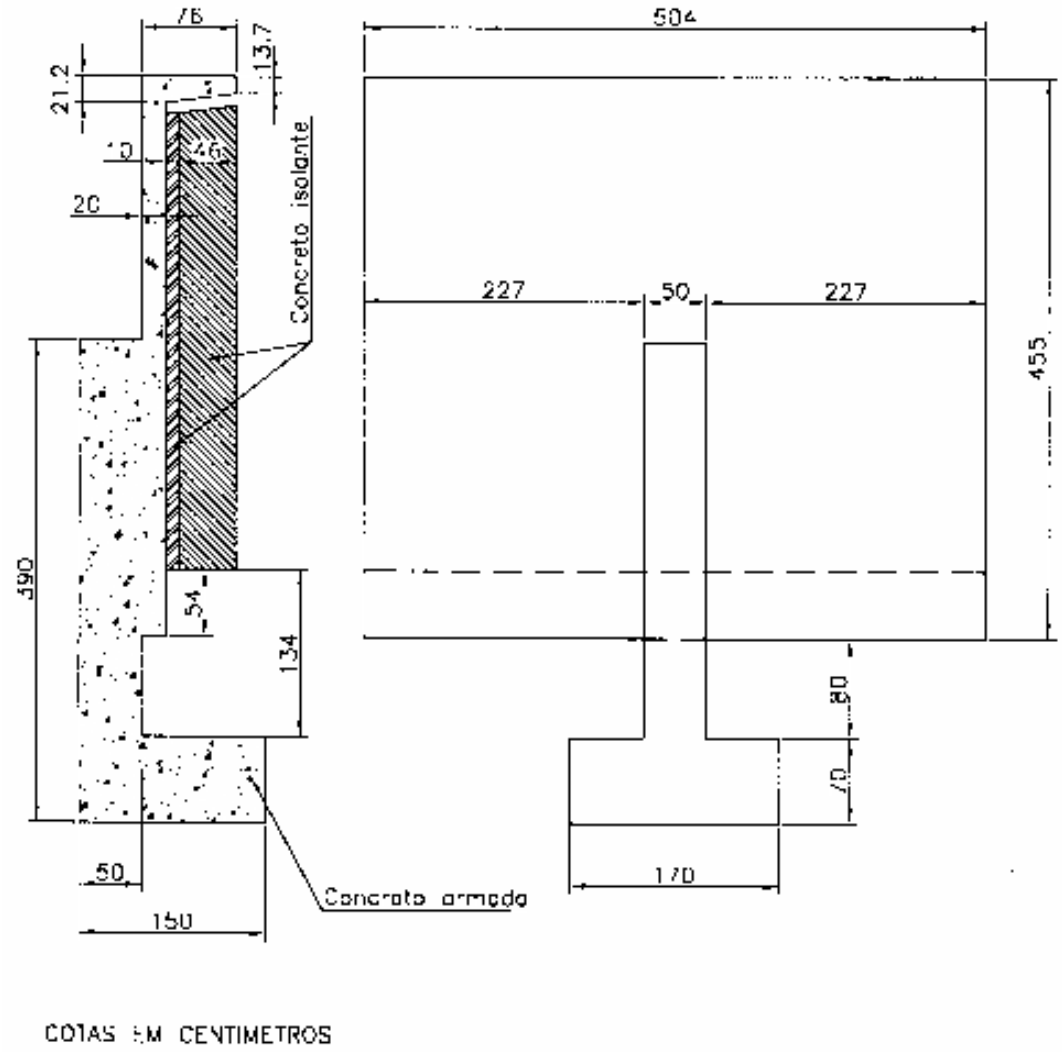


FIGURA 1.1 – Estrutura de Concreto Armado em Estudo

1.1. Objetivos

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[1]. localizada no município de Barcarena, Estado do Pará.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Caracterização do material da parede do forno, a partir da retirada de amostras (testemunhos) do concreto armado (com função estrutural e de vedação) e do concreto isolante.
- Obtenção experimental das curvas temporais dos deslocamentos e das temperaturas nas paredes de concreto armado devido à variação térmica.
- Definição de um modelo numérico pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) que represente o fenômeno.
- Obtenção de uma possível solução para conter as deformações das paredes de concreto armado.

[1] http://www.albras.net/

1.2. 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.

Com os modelos matemáticos desenvolvidos, o material caracterizado e o comportamento da estrutura submetida às variações térmicas monitorado, pode-se então propor possíveis soluções que amenizem o efeito térmico na parede do forno de cozimento de anodo.

1.3. Metodologia

A metodologia empregada na pesquisa consiste basicamente na realização de ensaios laboratoriais, 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 nas 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 parede de bloco de concreto isolante é a que está exposta a maior temperatura, e por ter a maior espessura a sua dilatação terá uma grande contribuição no comportamento da parede de concreto armado, demonstrando a importância em se obter à dilatação térmica deste material a partir da obtenção experimental do seu coeficiente de dilatação térmica. Devido a problemas laboratoriais não foi passível obter experimentalmente a condutividade térmica do bloco de concreto isolante, sendo utilizado o valor fornecido pelo fabricante.

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 automático das amostras ao longo do tempo. Com está 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. A partir daí foram propostas seis modificações na estrutura, as quais foram devidamente modeladas através do MEF. Os resultados dos modelos com reforço foram comparados com os resultados do modelo original para se saber qual apresentou melhor desempenho no controle da deformação.

O Software Algor é um programa comercial, desenvolvido pelo 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.

1.4. Organização do Texto

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica da literatura referente aos assuntos abordados neste trabalho. No capítulo 3 é feita uma exposição do problema em estudo, com uma descrição da estrutura analisada, e das principais patologias estruturais observadas. No capítulo 4 são apresentadas as análises experimentais realizadas na estrutura. No capítulo 5 são descritas as simulações computacionais do comportamento da estrutura através do MEF. No capítulo 6, finalmente, são apresentadas as principais conclusões, além de sugestões para continuidade do trabalho.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre concretos submetidos a elevadas temperaturas, considerando estudos experimentais e computacionais empregando-se MEF, a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento das análises propostas e um breve resumo do processo de produção do alumínio e do anodo.

Deve-se destacar que não é do conhecimento do autor a existência de trabalhos acadêmicos publicados na literatura técnica abordando especificamente estudos sobre o comportamento termo-mecânico de fornos de cozimento de anodo. Cabe ressaltar, no entanto, que foi realizada, por uma empresa de consultoria durante 4 (quatro) anos, uma monitoração dos deslocamentos e temperatura das paredes externas do forno de cozimento de anodo. Neste trabalho, foram emitidos relatórios técnicos sobre o problema, cujas principais conclusões serão apresentadas no final deste capítulo.

2.1. Concreto submetido a Elevadas Temperaturas

O concreto é um material heterogêneo, geralmente composto por agregado graúdo, agregado miúdo, cimento e possíveis adições ou aditivos, além de água. O concreto armado é formado pelos materiais concreto e armadura, a qual pode ser ativa ou passiva. Devido os materiais apresentarem características distintas, o comportamento do concreto armado é bastante complexo quando submetido a elevadas temperaturas.

A expansão térmica do agregado graúdo é diferente da pasta de cimento, provocando assim pontos de desagregação *"pop outs"* (pipocamentos) e *"spalling"* (lascamento) na superfície do concreto (METHA & MONTEIRO 1994).

A propriedade que combate a combinação de fatores que são desejáveis para reduzir o surgimento da fissuração no concreto pode ser descrita pelo termo chamado extensibilidade. Diz-se que o concreto tem um alto grau de extensibilidade quando ele pode ser sujeito a grandes deformações sem fissurar (MEHTA & MONTEIRO 1994).

Segundo COSTA *et al* (2002), as propriedades das estruturas de concreto armado quando submetidas a elevadas temperaturas não são prejudicadas até 100ºC. A partir disto, começam a surgir fissuras na microestrutura inicialmente pela contração da pasta, provocada pela perda de água contida no sistema de poros.

Os materiais concretos de classes de resistência à compressão entre 20 e 60MPa, quando submetidos a elevadas temperaturas (até 600°C) apresentam um módulo de elasticidade decrescente com o aumento da temperatura, ocorrendo a propagação de trincas de origem térmica (SILVA *et al* 2002a).

HARADA (*apud* SHIN *et al*, 2002) analisou o comportamento de concretos e argamassas de diferentes misturas. O acréscimo de calor provoca uma mudança no desempenho do material, e suas propriedades térmicas (densidade, condutividade e difusividade) decrescem com o aumento de temperatura. As FIGURAS 2.1, 2.2 e 2.3 apresentam os resultados neste trabalho.

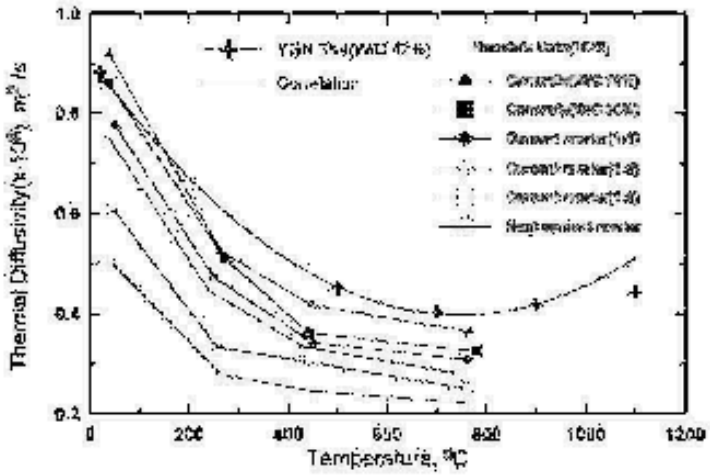


FIGURA 2.1 – Difusividade térmica vs. temperatura. Fonte: HARADA (*apud* SHIN *et al*, 2002)

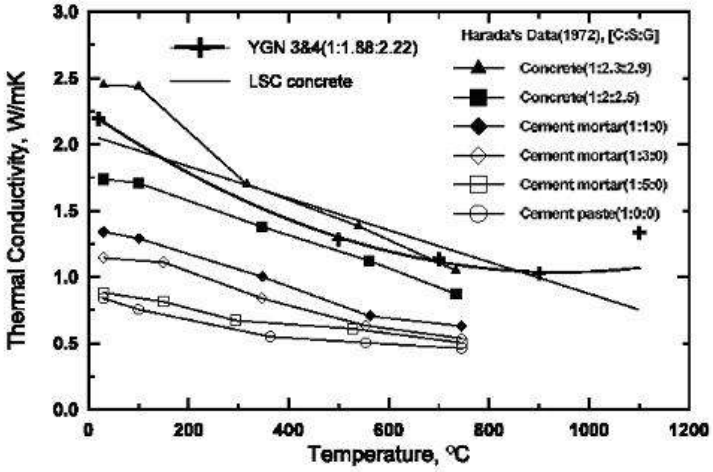


FIGURA 2.2 – Condutividade térmica vs. temperatura. Fonte: HARADA (*apud* SHIN *et al*, 2002)

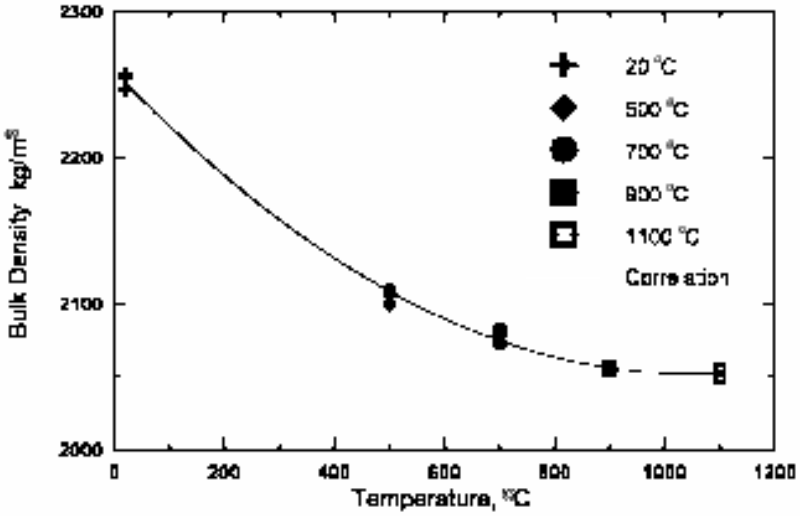


FIGURA 2.3 – Densidade vs. temperatura - Fonte: HARADA (*apud* SHIN *et al.*, 2002)

A partir dos gráficos obtidos por HARADA concluiu-se que a densidade, condutividade e difusividade de concretos e argamassa diminuem com a temperatura, de forma considerável, até a faixa de 800°C.

POON *et al* (2001) compararam o comportamento de diversas misturas de concreto, com e sem adição pozolânica (cinza volante, silica ativa e escória de alto forno) quando submetidas a elevadas temperaturas. Os diversos concretos utilizados no estudo e as

respectivas misturas são apresentadas nas TABELAS 2.1 e 2.2. Os resultados obtidos são mostrados nas FIGURAS 2.4 e 2.5 e nas TABELAS 2.3 e 2.4.

TABELA 2.1 – Misturas de concreto. Fonte: POON *et al* (2001)

Mix proportions of HSC mixtures

Mix	SF (%)	FA (%)	GGBS (%)	W/B	Batched quantities (kg/m^3)					28 days compressive strength (MPa)
					Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	SP[a]	
HS-CC[b]	–	–	–	0.30	150	500	758	927	0.5	85.9
HS-SF5	5	–	–	0.30	150	475	710	1066	0.6	96.5
HS-SF10	10	–	–	0.30	150	450	620	1151	0.8	108.3
HS-FA20	–	20	–	0.30	150	400	618	1147	0.8	82.7
HS-FA30	–	30	–	0.30	150	350	615	1143	0.7	80.2
HS-FA40	–	40	–	0.30	150	300	613	1139	0.7	76.7
HS-SF + FA	10	20	–	0.30	150	350	615	1142	0.8	105.3
HS-BS30	–	–	30	0.30	150	350	616	1145	0.7	83.9
HS-BS40	–	–	40	0.30	150	300	615	1142	0.7	80.9

[a] SP content in percentage by weight of binder.
[b] Control concrete.

TABELA 2.2 – Misturas de concreto. Fonte POON *et al* (2001)

Mix proportions of NSC mixtures

Mix	SF (%)	FA (%)	GGBS (%)	W/B	Batched quantities (kg/m^3)					28 days compressive strength (MPa)
					Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	SP[a]	
NS-CC[b]	–	–	–	0.50	195	390	768	917	–	35.8
NS-FA30	–	30	–	0.50	195	273	626	1133	–	39.3
NS-FA40	–	40	–	0.50	195	234	625	1129	–	36.9
NS-BS30	–	–	30	0.50	195	273	626	1135	–	46.4
NS-BS40	–	–	40	0.50	195	234	625	1132	–	39.8

[a] SP content in percentage by weight of binder.
[b] Control concrete.

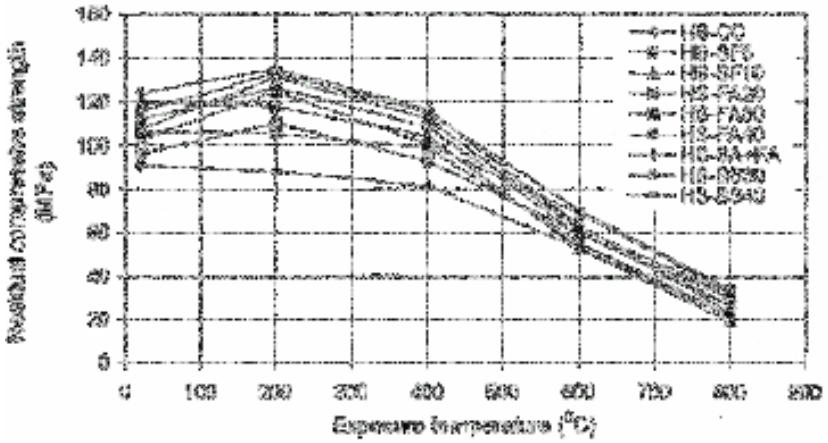


FIGURA 2.4 – Resistência a compressão vs. temperatura. Fonte: POON *et al* (2001)

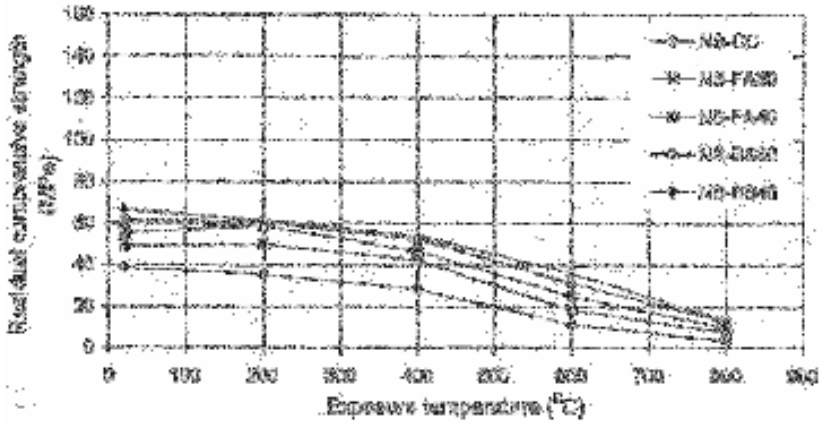


FIGURA 2.5 – Resistência a compressão vs. temperatura. Fonte: POON *et al* (2001)

TABELA 2.3 – Resultado dos ensaios a diferentes temperaturas. Fonte: POON *et al* (2001)

Porosity and average pore diameter of high-strength pozzolanic concretes

	Exposure temperatures					
	20°C		600°C		800°C	
Mix	Porosity (%, v/v)	Average pore diameter (μm)	Porosity (%, v/v)	Average pore diameter (μm)	Porosity (%, v/v)	Average pore diameter (μm)
HS-CC	9.52	0.0329	18.32	0.0632	29.13	0.1102
HS-SF5	7.68	0.0294	13.71	0.0526	22.21	0.0938
HS-SF10	5.73	0.0273	9.87	0.0470	32.71	0.1559
HS-FA20	7.73	0.0316	12.77	0.0521	23.31	0.0945
HS-FA30	6.69	0.0309	11.28	0.0522	21.96	0.0921
HS-FA40	6.23	0.0302	10.63	0.0516	22.46	0.0870
HS-SF + FA	5.49	0.0247	8.91	0.0400	30.01	0.1351
HS-BS30	6.29	0.0306	12.71	0.0630	23.01	0.0947
HS-BS40	6.02	0.0299	11.21	0.0562	24.42	0.0899

TABELA 2.4 – Resultado dos ensaios a diferentes temperaturas. Fonte: POON *et al* (2001)

Porosity and average pore diameter of normal-strength pozzolanic concretes

	Exposure temperatures					
	20°C		600°C		800°C	
Mix	Porosity (%, v/v)	Average pore diameter (μm)	Porosity (%, v/v)	Average pore diameter (μm)	Porosity (%, v/v)	Average pore diameter (μm)
NS-CC	14.82	0.0412	26.56	0.0935	42.12	0.1747
NS-FA30	12.17	0.0379	20.29	0.0760	31.09	0.1458
NS-FA40	11.71	0.0358	18.78	0.0688	29.98	0.1281
NS-BS30	11.46	0.0369	19.39	0.0734	28.89	0.1355
NS-BS40	11.08	0.0347	17.87	0.0671	27.79	0.1260

Com os experimentos de POON *et al* concluiu-se que concretos com e sem aditivos apresentam comportamentos distintos quando submetidos à elevações de temperatura. O concreto com aditivo apresentou um acréscimo da resistência à compressão até 200°C. Já o concreto sem aditivo teve um pequeno decréscimo nesta mesma faixa.

HITECO (apud GAWIN *et al*., 2003) analisou o comportamento do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do concreto de 60MPa quando submetido a elevadas temperaturas. Os resultados estão apresentados na FIGURA 2.6.

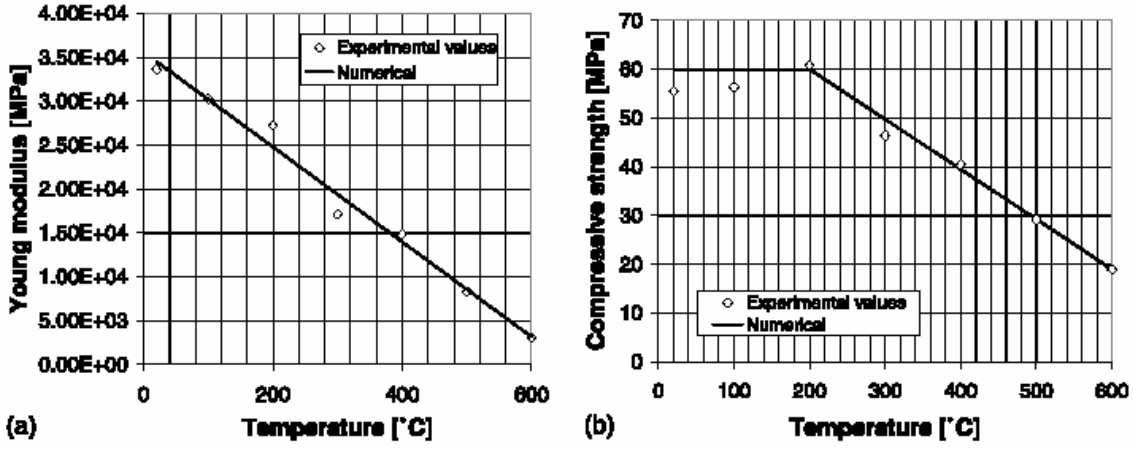


FIGURA 2.6 – (a) Coeficiente de poisson vs. temperatura (b) Resistência a compressão vs. temperatura – Fonte: HITECO (*apud* GAWIN *et al*., 2003)

HITECO (*apud* GAWIN *et al*., 2003) apresentou o efeito térmico na degradação do concreto, demonstrando que o módulo de elasticidade teve um decréscimo de 50% quando submetidos a temperaturas de 300°C e a resistência à compressão apresentou aproximadamente 30% de redução à 200°C.

FAKURY *et al* (2003) estudaram a variação das propriedades do aço laminado e do concreto quando submetidas a altas temperaturas de acordo com o texto-base de revisão da norma NBR14323 (2003). As TABELAS 2.5 e 2.6 apresentam os resultados.

TABELA 2.5 – Resultado do comportamento do aço com a elevação da temperatura. Fonte: FAKURY *et al* (2003)

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução da resistência ao escoamento $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,0000
100	1,000	1,0000
200	1,000	0,9000
300	1,000	0,8000
400	1,000	0,7000
500	0,780	0,6000
600	0,470	0,3100
700	0,230	0,1300
800	0,110	0,0900
900	0,060	0,0675
1000	0,040	0,0450
1100	0,020	0,0225
1200	0,000	0,0000

TABELA 2.6 – Resultado do comportamento do concreto com a elevação da temperatura. Fonte: FAKURY *et al* (2003)

Temperatura do concreto θ_c (°C)	Fator de redução da resistência característica a compressão $k_{c,\theta}$	Deformação $\varepsilon_{cu,\theta} x\ 10^3$
20	1,00	2,5
100	0,95	3,5
200	0,90	4,5
300	0,85	6,0
400	0,75	7,5
500	0,60	9,5
600	0,45	12,5
700	0,30	14,0
800	0,15	14,5
900	0,08	15,0
1000	0,04	15,0
1100	0,01	15,0
1200	0,00	15,0

Conclui-se com os experimentos de FAKURY que o aço apresenta variações nas suas propriedades a partir dos 200°C e o concreto deste 100°C. Porém, com a elevação da temperatura, as propriedades do aço decrescem mais rapidamente do que as propriedades do concreto.

GALLETTO *et al* (2002) estudaram o efeito do calor sobre o módulo de elasticidade do concreto convencional e do concreto de alta resistência. Tanto com resfriamento lento como com resfriamento rápido o concreto convencional e o concreto de alta resistência

apresentaram uma perda considerável desta propriedade. Os resultados estão expostos nas FIGURAS 2.7 e 2.8 e na TABELA 2.7.

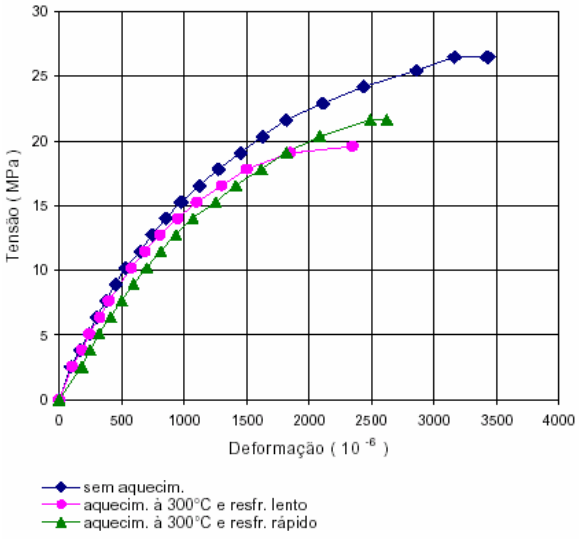


FIGURA 2.7 – Alteração do gráfico tensão vs. deformação devido à variação de temperatura – concreto convencional. Fonte: GALLETTO *et al* (2002)

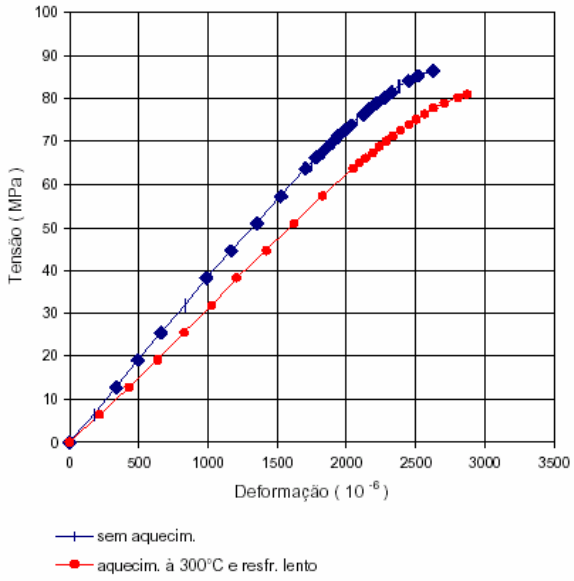


FIGURA 2.8 – Alteração do gráfico tensão vs. deformação devido à variação de temperatura – concreto de alta resistência. Fonte: GALLETTO *et al* (2002)

Para o concreto de alta resistência não foi realizado o ensaio com aquecimento a 300ºC seguido de resfriamento rápido, pois para este caso ocorria ruptura abrupta do concreto.

TABELA 2.7 – Propriedades do concreto após o resfriamento.

Fonte: GALLETTO *et al* (2002)

Tipo de Concreto	Temperatura (ºC)	Tipo de Resfriamento	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Módulo de Elasticidade (% mens.)
Convencional	25	...	25,5	100
	300	emb	19,2	95
	300	rápido	19,5	78
Alta Resistência	25	...	36,5	100
	300	emb	30,0	78

Logo, concluiu-se que variações térmicas tanto no concreto convencional quanto no concreto de alta resistência provocam reduções no módulo de elasticidade e na resistência máxima a compressão.

A NBR 6118/2003 descreve no item 6.3 os diversos mecanismos de envelhecimento e deterioração de estruturas de concreto armado. Em um dos tipos de deterioração esta norma cita como um dos exemplos as ações de origem térmica, demonstrando a grande importância deste tipo de ação.

2.2. Comportamento Térmico de Materiais Refratários

A denominação de refratário é quando o material é capaz de, durante certo tempo, suportar solicitações mecânicas e químicas a temperaturas elevadas. A faixa de temperatura varia com o tipo da matéria prima utilizado. Por exemplo, no Brasil, encontram-se diversos tipos de argilas com características refratárias. As argilas utilizadas na fabricação de tijolos vermelhos apresentam bons desempenhos até 900ºC. Já as utilizadas na fabricação de tijolos refratários para alto-fornos, apresentam bons desempenhos até 1700ºC (SOARES 2000).

Os materiais refratários são utilizados nas indústrias nas fases de processo que envolve altas temperaturas. Sua principal utilização é no revestimento das paredes internas de equipamentos e/ou tubulações.

SANTOS (2003) analisou experimentalmente o comportamento de um concreto refratário aluminoso à temperaturas superiores de 1000°C. Os resultados obtidos estão apresentados nas FIGURAS 2.9, 2.10 e 2.11.

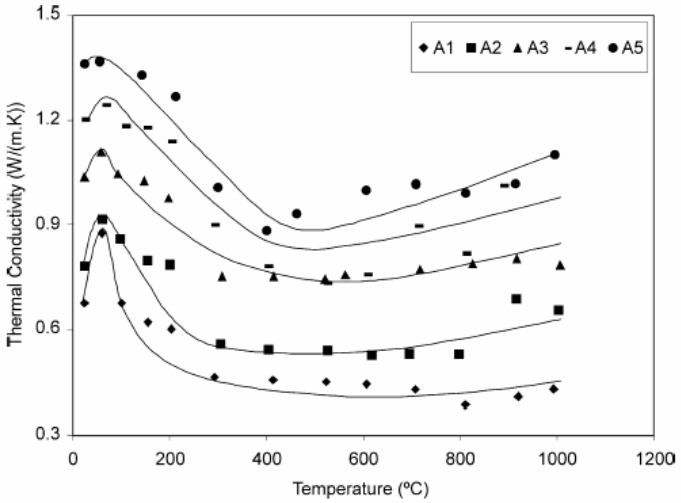


FIGURA 2.9 – condutividade térmica vs. temperatura de um concreto refratário. Fonte: SANTOS (2003)

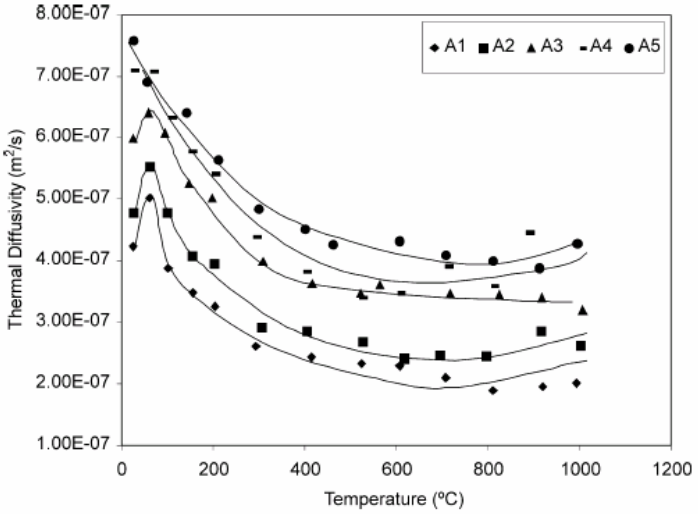


FIGURA 2.10 – difusividade térmica vs. temperatura de um concreto refratário. Fonte: SANTOS (2003)

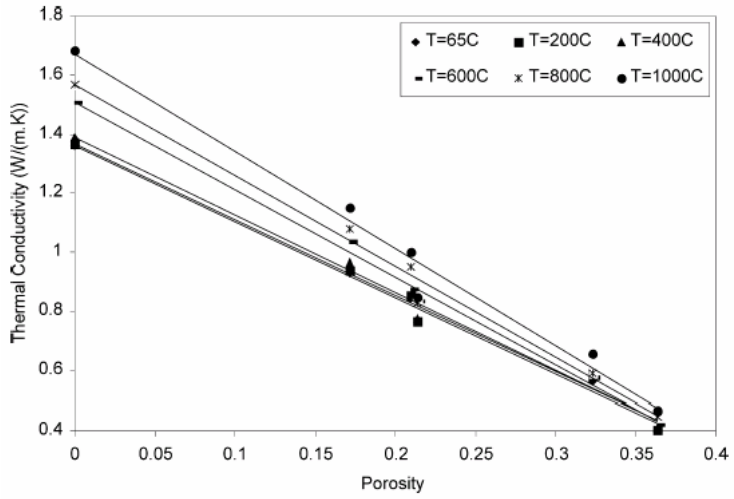


FIGURA 2.11 – Condutividade térmica vs. porosidade de um concreto refratário. Fonte: SANTOS (2002)

Com os estudos de SANTOS (2002) concluiu-se que os concretos refratários apresentam grandes variações quando submetidos ao acréscimo de temperatura até 400°C. Após esta temperatura a variação das propriedades do material é menor. Concluiu-se também que a condutividade térmica deste tipo de concreto é inversamente proporcional ao aumento de porosidade.

2.3. Modelos Computacionais para simulação do efeito térmico.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) pode ser utilizado de forma eficiente na determinação de temperaturas em estruturas com geometria e condições de contorno complexas. Como o MEF é um método genérico em relação à geometria, características do material e condições de contorno, ele permite a representação de estruturas de geometria complexa e arbitrária. (KRUGER, 2001).

A seguir apresenta-se uma revisão sobre alguns trabalhos que empregaram este método na análise de estruturas submetidas a efeitos térmicos.

HUANG *et al* (2001) desenvolveu um modelo tridimensionais na plataforma computacional VULCAN. O modelo simulou o comportamento de uma laje de concreto armado com vigamento de aço submetidas a elevadas temperaturas (em situação de incêndio). A FIGURA 2.12 mostra a comparação do modelo desenvolvido no estudo. As FIGURAS 2.13

e 2.14 mostram como variam o comportamento da laje analisada com a elevação da temperatura em uma das vigas da estrutura.

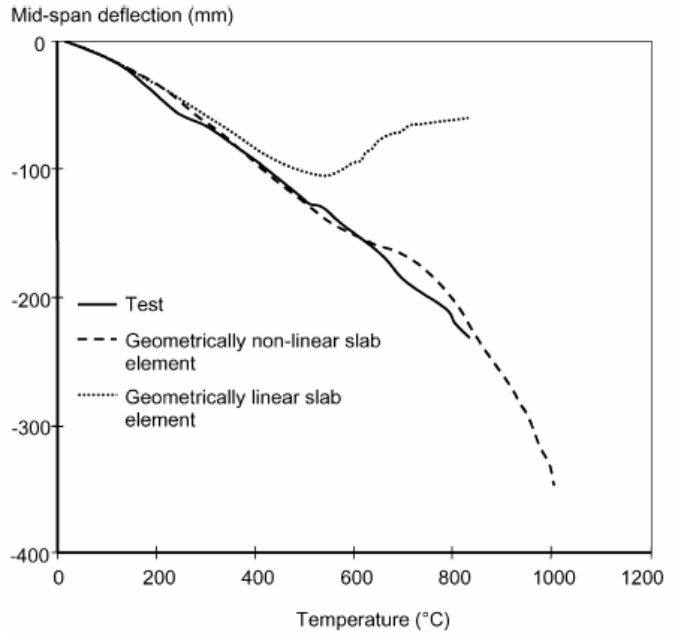


FIGURA 2.12 – Deflexão vs. temperatura da laje - Fonte: HUANG *et al* (2001)

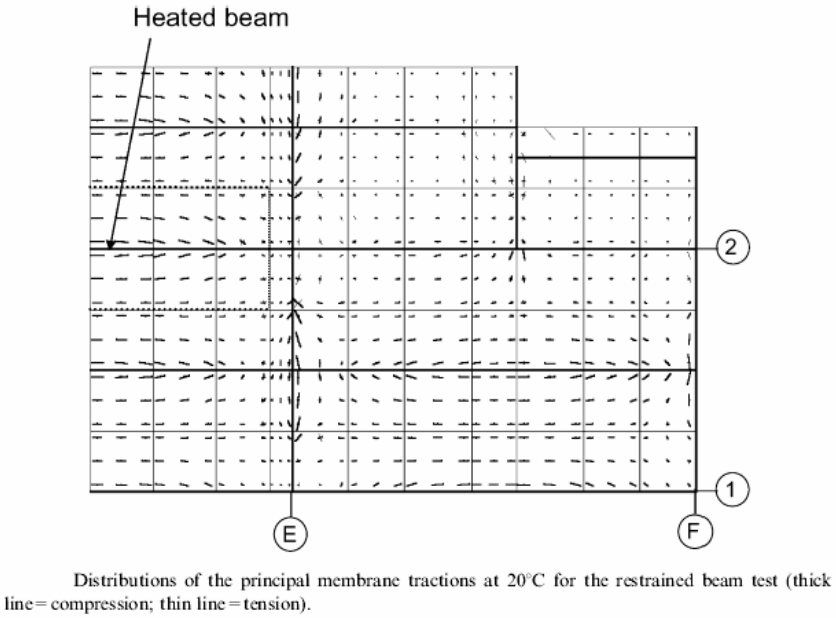


FIGURA 2.13 – Comportamento da laje a 20°C- Fonte: HUANG *et al* (2001)

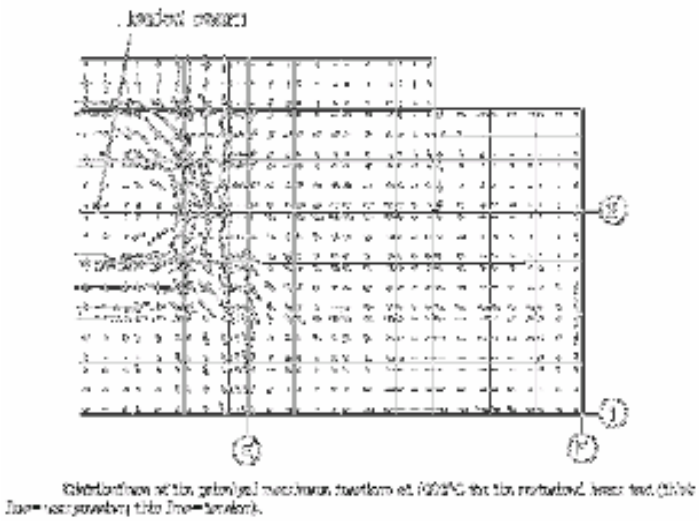


FIGURA 2.14 – Comportamento da laje a 1000°C- Fonte: HUANG *et al* (2001)

Considerando os estudos desenvolvidos por HUANG, concluiu-se que a variação térmica pode corresponder a um importante efeito no comportamento da estrutura. O mesmo modelo, porém submetidos a diferentes temperaturas apresentam uma diferença significativa na distribuição de tensões.

NUNES *et al* (2003) desenvolveu uma formulação pelo MEF para determinação de temperaturas em sólidos submetidos a gradientes térmicos. Foi mapeada a temperatura da placa de aço mostrada na FIGURA 2.15. A chapa tem formato "L", é discretizada em 21 elementos quadrangulares de quatro nós e tem temperatura imposta de 100°C nos nós 14, 20, 26 e 32. Está sujeita a convecção nos lados 1-4 e 1-27 e uma geração de calor de 1000 W/m^3. Considerou-se condutividade térmica de 60 W/m °C, coeficiente de troca térmica entre corpo e ambiente, 25 W/m^2 °C, temperatura ambiente de 25°C e espessura unitária. Os resultados obtidos com o modelo desenvolvido estão expostos na TABELA 2.8.

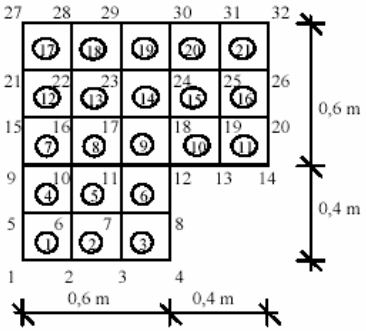


FIGURA 2.15 – Modelo em elementos finitos de uma placa de aço submetida a variações de temperatura - Fonte: Nunes *et al* (2003)

TABELA 2.8 – Resultados da análise térmica - Fonte: Nunes *et al* (2003)

Nós	Temp (ºC)	Nós	Temp (ºC)	Nós	Temp (ºC)	Nós	Temp (ºC)
1	64,02	9	72,06	17	81,89	25	94,64
2	66,08	10	74,04	18	87,57	26	100,00
3	69,09	11	78,04	19	93,79	27	79,65
4	70,09	12	83,38	20	100,00	28	81,08
5	68,46	13	93,51	21	77,39	29	84,81
6	70,21	14	100,00	22	79,56	30	89,70
7	73,44	15	75,05	23	84,13	31	94,92
8	74,57	16	77,21	24	89,18	32	100,00

O objetivo desta análise foi a determinação das temperaturas nodais no dominio da estrutura a partir das especificações de diversos tipos de condições de contorno.

Paulo Barroso Engenharia Ltda (1999) monitoraram o comportamento das deformações e as temperaturas das paredes externas do forno de cozimento de anodo durante 4 (quatro) anos. Uma vez por ano era realizada a medição de temperatura e de deslocamentos de todas as paredes externas do forno com auxilio de uma equipe de topografia que media a distância da parede em relação a um referencial.

No final do estudo, chegou-se a conclusão de que, de uma forma geral, havia ocorrido estabilização dos deslocamentos medidos para a maioria dos pontos observados, sendo que em alguns pontos as amplitudes máximas da última avaliação foram um pouco superiores às encontradas nos anos anteriores. Outra conclusão apresentada foi de que a estrutura apresentaria fissuras bastante pronunciadas e/ou desplacamentos antes da mesma se tornar inservível para a função que ela desempenha.

2.4. Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica necessária ao entendimento das análises realizadas no presente estudo. Dá-se ênfase ao problema estacionário de condução de calor, e ao problema de análise de tensões em meios sólidos, submetidos a ações mecânicas e de origem térmica.

2.4.1. Fundamentos de Transferência de Calor

Os modos de transferência de calor são condução, convecção e radiação. A condução é a transferência de calor que ocorre quando se tem um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser sólido ou um fluido. O caso da convecção ocorre quando uma superfície e um fluido em movimento se encontram com temperaturas diferentes. A radiação ocorre quando uma superfície de temperatura não nula troca energia na forma de ondas eletromagnéticas para uma outra região.

No caso da câmara dos fornos de cozimento de anodo (*flue wall*) ocorre a convecção, pois o fluido em movimento passa com uma temperatura elevada através de um sistema de ventilação e exaustão e com a queima de combustível para geração de calor. Entretanto, no interior da parede externa do forno de cozimento de anodo ocorre transferência de calor por condução.

Esta pesquisa aborda apenas o modo de transferência de calor por condução pelo fato de ser este o modo de transferência de calor no interior da parede em estudo. A transferência de calor que ocorre por convecção entre a parede e o meio externo está fora do escopo do trabalho.

2.4.1.1. Equações Básicas da Condução de Calor Estacionária

Considera-se um corpo tridimensional com domínio Ω e contorno Γ, com referência a um sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) conforme ilustra a FIGURA 2.16.

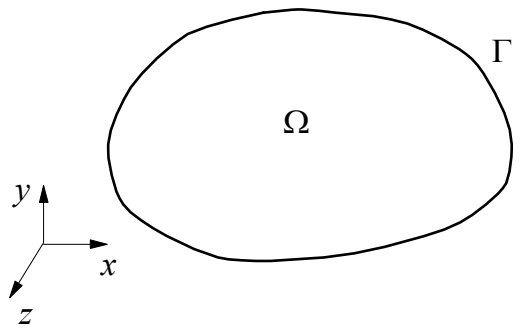


FIGURA 2.16 – Corpo tridimensional com domínio Ω e contorno Γ, com referência a um sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z).

Seja $Q(x, y, z)$ a taxa de geração de calor interna ou fonte (calor por unidade de volume e tempo) e $\mathbf{q}(x, y, z)$, o vetor fluxo de calor (calor por unidade de área e tempo) em um ponto (x, y, z) do corpo Ω.

A equação que governa o problema de condução de calor em um meio bidimensional em equilíbrio (regime estacionário, sem variação no tempo) pode ser facilmente deduzida considerando-se um elemento diferencial de lados $\mathrm{d}x$, $\mathrm{d}y$, e $\mathrm{d}z$, e com fluxo de calor atravessando o contorno do elemento, conforme ilustra a FIGURA 2.17 (DE SOUZA, 2003).

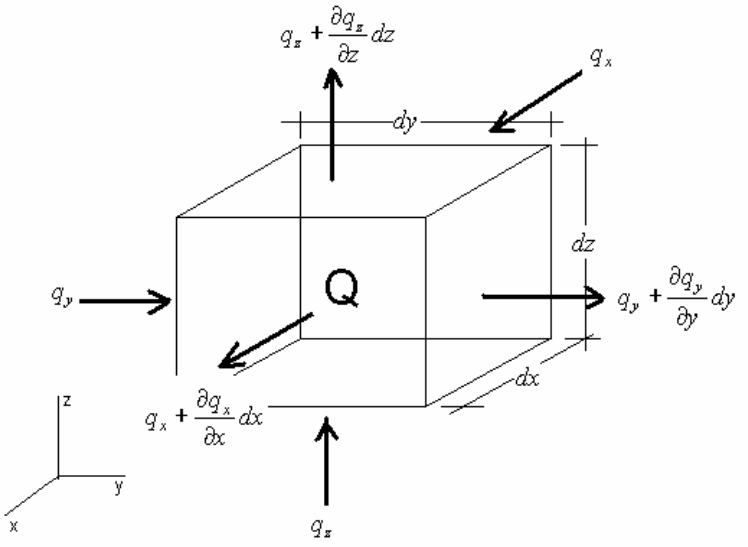


FIGURA 2.17 – Elemento diferencial com fluxo de calor atravessando o contorno do elemento

Aplicando o princípio de conservação de energia (primeira lei da termodinâmica) no elemento diferencial de volume tem-se:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x}-\frac{\partial q_y}{\partial y}-\frac{\partial q_z}{\partial z}+Q=0 \quad \text{em} \quad \Omega \tag{0.1}$$

Utilizando-se a notação indicial[2] a eq. (0.1) pode ser expressa como

$$-q_{i,i}+Q=0 \ \text{ em } \ \Omega, \tag{0.2}$$

No caso de fluxo unidimensional, observa-se fisicamente que o fluxo de calor em uma direção é proporcional à taxa de variação da temperatura T naquela direção (Lei de Fourier). Assim,

$$q=-\kappa\frac{\partial T}{\partial x}, \tag{0.3}$$

onde κ é o coeficiente de condutividade térmica (calor por unidade de comprimento e temperatura).

Para o caso mais geral (bi ou tridimensional), observa-se que o vetor fluxo de calor é função do gradiente de temperatura T

$$q_i=-\kappa_{ij}T_{,j}, \tag{0.4}$$

onde, para o caso tridimensional, κ_{ij} é a matriz de condutividade térmica.

Substituindo a eq. (0.4) na eq. (0.2), tem-se

$$(\kappa_{ij}T_{,j})_{,i}+Q=0 \ \text{ em } \ \Omega, \tag{0.5}$$

Considerando um meio isotrópico e homogêneo, tem-se que

$$\kappa_{ij}=\kappa\delta_{ij}=\text{cte} \tag{0.6}$$

onde κ (escalar) é a condutividade térmica do material isotrópico e

$$\delta_{ij}=\begin{cases}1 & \text{se } i=j\\ 0 & \text{se } i\neq j\end{cases} \tag{0.7}$$

é o delta de Kronecker.

Com o emprego da eq. (0.6), válida para um meio isotrópico, e considerando ainda que o meio é homogêneo, o primeiro termo da eq. (0.5) fica simplificado para

$$(\kappa_{ij}T_{,j})_{,i}=(\kappa\delta_{ij}T_{,j})_{,i}=\kappa T_{,ii} \tag{0.8}$$

---

[2] Na notação indicial, as componentes x, y, z, são representadas através dos índices 1, 2 e 3, e emprega-se também a regra do somatório implícito de Einstein, onde dois índices repetidos indicam somatório. Além disso, derivadas parciais em relação às coordenadas cartesianas são indicadas por índices depois da vírgula.

Assim, a eq. (0.5) particularizada para o caso de meio isotrópico e homogêneo é

$$\kappa T_{,ii} + Q = 0 \qquad \text{ou} \qquad \kappa \nabla^2 T + Q = 0 \ \text{ em } \ \Omega \tag{0.9}$$

onde ∇^2 é o operador Laplaciano. A equação acima é conhecida como equação de Poisson. Para o caso particular em que $Q = 0$, ou seja, sem nenhuma fonte de calor interna, a eq. (0.9), fica

$$\kappa T_{,ii} = 0 \qquad \text{ou} \qquad \nabla^2 T = 0 \tag{0.10}$$

a qual é conhecida como Equação de Laplace.

2.4.1.2. Condições de Contorno do Problema de Condução de Calor

Em geral, três diferentes tipos de condições de contorno podem ser considerados para o problema de condução de calor, quais sejam: a) Imposição de temperatura; b) Imposição de fluxo de calor; c) Imposição da relação entre temperatura e o fluxo de calor (ocorrendo na parte do contorno sujeita a convecção). Por simplicidade, serão consideradas na discussão a seguir, apenas os tipos de condições de contorno (a) e (b).

Para isto, considera-se que o contorno Γ é subdivido em duas subregiões, Γ_T e Γ_q, conforme indica a FIGURA 2.18, tal que

$$\begin{aligned} \Gamma_T \cup \Gamma_q &= \Gamma \\ \Gamma_T \cap \Gamma_q &= \varnothing \end{aligned} \tag{0.11}$$

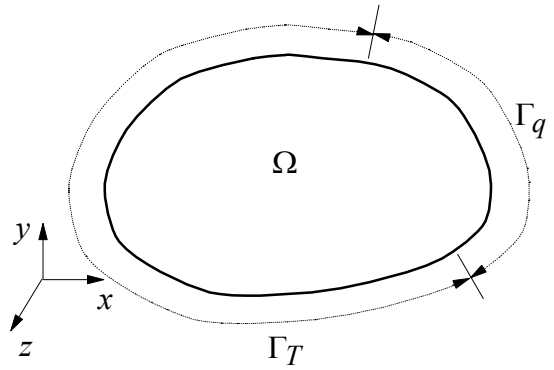


FIGURA 2.18 – subdivisão do contorno do corpo.

As regiões Γ_T e Γ_q são definidas de acordo com o tipo de condição de contorno considerada, quais sejam:

a) Imposição de temperatura. Este caso corresponde ao tipo mais simples de condição de contorno, e consiste basicamente em se especificar o valor da temperatura na região Γ_T do contorno, ou seja

$$T = \overline{T} \quad \text{em} \quad \Gamma_T \tag{0.12}$$

onde $\overline{T}$ é a temperatura conhecida no contorno Γ_T.

b) Imposição de fluxo de calor. Neste caso, considera-se o "equilíbrio" de fluxo de calor em um elemento infinitesimal na região Γ_q do contorno.

Para que haja equilíbrio de fluxo de calor no contorno, a seguinte equação deve ser satisfeita

$$-q_i \hat{n}_i = \overline{q}_n \qquad \text{em} \quad \Gamma_q \tag{0.13}$$

onde $\hat{n}_i$ é o vetor normal unitário a superfície do contorno e $\overline{q}_n$ é o valor (grandeza escalar) conhecido do fluxo normal à superfície no contorno Γ_q.

2.4.1.3. Resumo das Equações do Problema Estacionário de Condução de Calor

Por conveniência, as equações que governam o problema de condução de calor, são resumidamente apresentadas na TABELA 2.9.

TABELA 2.9 – Resumo das equações que governam o problema de condução de calor.

Equação de equilíbrio	$-q_{i,i} + Q = 0 \quad \text{em } \Omega \qquad (0.14)$
Relação constitutiva do meio (Lei de Fourier)	$q_i = -\kappa_{ij} T_{,j} \quad \text{em } \Omega \qquad (0.15)$
Condições de contorno	$\left.\begin{array}{ll} T = \overline{T} & \text{em } \Gamma_T \\ -q_i \hat{n}_i = \overline{q}_n & \text{em } \Gamma_q \end{array}\right\} \qquad (0.16)$
Equação de Laplace	$\kappa T_{,ii} + Q = 0 \qquad \text{em} \quad \Omega \; (0.17)$

A solução para o problema de condução de calor consiste em se resolver a equação diferencial parcial (0.14), considerando a relação constitutiva (0.15) do material, e satisfazendo as condições de contorno (0.17). Este tipo de problema é comumente denominado problema de valor de contorno.

2.4.2. Fundamentos da Teoria da Elasticidade

A seguir são apresentadas as equações fundamentais para a análise de tensões em sólidos submetidos a pequenas deformações, e constituídos de material linear elástico.

2.4.2.1. Equações Fundamentais da Teoria da Elasticidade

Considera-se um corpo tridimensional com domínio Ω e contorno Γ, submetido a ações externas, com referência a um sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) conforme ilustra a FIGURA 2.19.

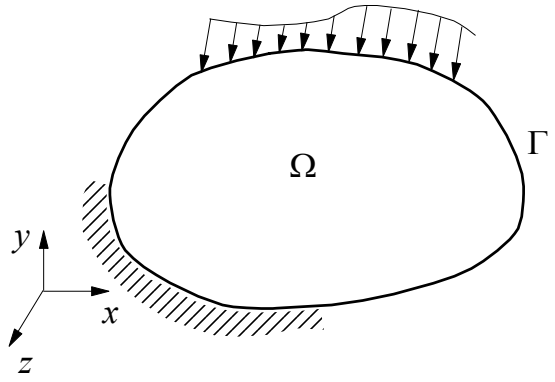


FIGURA 2.19 – Corpo tridimensional com domínio Ω e contorno Γ, com referência a um sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z).

Seja $b_i(x, y, z)$ o vetor de forças de corpo (forças por unidade de volume) que atuam no domínio do corpo, e $T_i(x, y, z)$ o vetor de forças de superfície (forças por unidade de área) que atuam no contorno do corpo.

As equações de equilíbrio que governam o problema de análise de tensões em um meio tridimensional em equilíbrio (regime estacionário, sem variação no tempo) pode ser

facilmente deduzida considerando-se um elemento diferencial de lados dx, dy, e dz, submetido a forças (trações) no contorno do elemento, conforme ilustra a FIGURA 2.20 (SHAMES & COZZARELLI 1991)

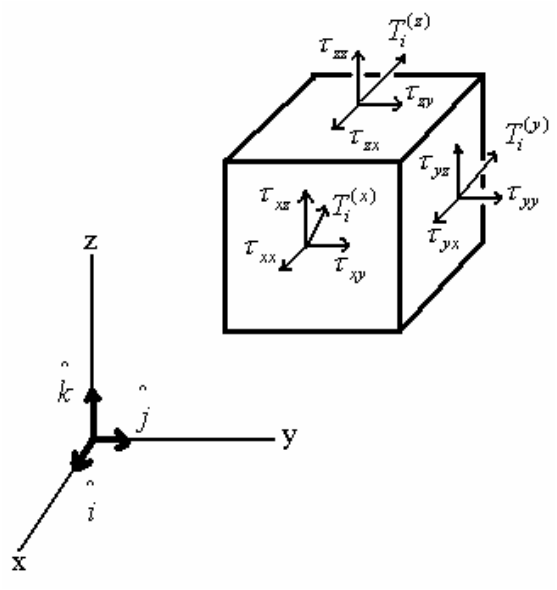


FIGURA 2.20 – Elemento diferencial com vetores de trações no contorno do elemento

A condição de que o elemento infinitesimal deve estar em equilíbrio de forças nas direções x, y e z (balanço de momentum linear) conduz a seguinte equação

$$\tau_{ij,i} + b_i = 0 \qquad \text{em } \Omega \tag{0.18}$$

onde τ_{ij} representa o tensor das tensões de Airy.

A condição de que o elemento infinitesimal deve estar em equilíbrio de momento em torno das direções x, y e z (balanço de momentum angular) conduz a seguinte equação

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} \qquad \text{em } \Omega \tag{0.19}$$

o que demonstra que o tensor das tensões é simétrico.

A relação constitutiva do problema de análise de tensões em um meio formado por material linear elástico pode ser escrito como

$$\tau_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \tag{0.20}$$

onde C_{ijkl} representa o tensor (de quarta ordem) das constantes elásticas, e ε_{kl} representa o tensor das deformações. A eq. (0.20) é conhecida como Lei de Hooke generalizada. Para o

caso de material isotrópico e linear elástico, o tensor das constantes elásticas pode ser escrito como

$$C_{ijkl} = 2\mu\left[\frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{kj})\right] + \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} \tag{0.21}$$

onde μ e λ são as constantes de Lamé, as quais podem ser expressas, em termos de constantes mais usuais, como

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{0.22}$$

sendo E o módulo de elasticidade do material, ν o coeficiente de Poisson, e $G = \mu$ o módulo de cisalhamento.

Substituindo a eq. (0.21) na eq. (0.20), obtem-se a relação entre tensões e deformações para material isotrópico e linear elástico (Lei de Hooke)

$$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} \tag{0.23}$$

Pode-se inverter a relação acima, o que permite obter escrever as deformações, em termos das tensões, através da seguinte expressão

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}\tau_{ij} - \frac{\nu}{E}\tau_{kk}\delta_{ij} \qquad \text{ou} \qquad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\mu}\tau_{ij} - \frac{\lambda}{2\mu(3\lambda+2\mu)}\tau_{kk}\delta_{ij} \tag{0.24}$$

Seja $u_i(x, y, z)$ o campo de deslocamentos do meio. Considerando que o corpo está sujeito a pequenas deformações, a relação entre o tensor das deformações ε_{ij} e o vetor de deslocamentos u_i pode ser expresso como

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right) \tag{0.25}$$

Substituindo a eq. (0.25) na eq. (0.23), e o resultado na eq. (0.18), chega-se a seguinte equação, escrita apenas em termos do campo de deslocamentos u_i

$$\mu u_{i,jj} + (\mu+\lambda)u_{j,ji} + b_i = 0 \tag{0.26}$$

A eq. (0.26) é conhecida como equação de Navier-Cauchy.

2.4.2.2. Condições de Contorno do Problema de Análise de Tensões

Em geral, três diferentes tipos de condições de contorno podem ser considerados para o problema de análise de tensões, quais sejam: a) Imposição de deslocamentos; b)

Aplicação de forças de superfície; c) Imposição da relação entre deslocamentos e forças de superfície. Por simplicidade, serão consideradas na discussão a seguir, apenas os tipos de condições de contorno (a) e (b).

Para isto, considera-se que o contorno Γ é subdivido em duas subregiões, Γ_u e Γ_τ, conforme indica a FIGURA 2.21, tal que

$$\begin{aligned} \Gamma_u \cup \Gamma_\tau &= \Gamma \\ \Gamma_u \cap \Gamma_\tau &= \varnothing \end{aligned} \tag{0.27}$$

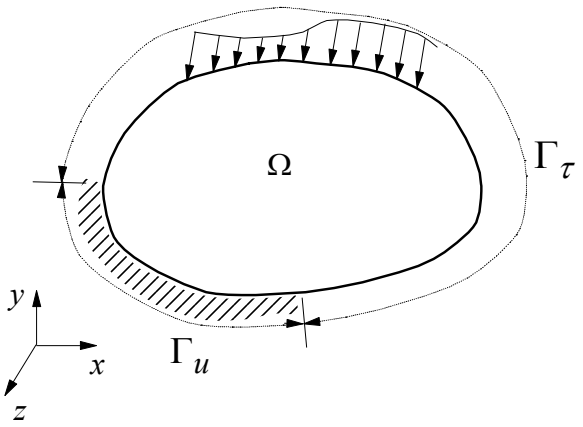


FIGURA 2.21 – subdivisão do contorno do corpo.

As regiões Γ_u e Γ_τ são definidas de acordo com o tipo de condição de contorno considerada, quais sejam:

a) Imposição de deslocamentos. Este caso corresponde ao tipo mais simples de condição de contorno, e consiste basicamente em se especificar o valor do campo de deslocamentos na região Γ_u do contorno, ou seja

$$u_i = \overline{u}_i \qquad \text{em } \Gamma_u \tag{0.28}$$

onde $\overline{u}_i$ é a temperatura conhecida no contorno Γ_u.

b) Aplicação de forças de superfície. Neste caso, considera-se o equilíbrio de forças em um elemento infinitesimal na região Γ_τ do contorno.

Para que haja equilíbrio de forças no contorno, a seguinte equação deve ser satisfeita

$$\tau_{ij}\hat{n}_i = \overline{T}_j^{(\hat{\mathbf{n}})} \qquad \text{em } \Gamma_\tau \tag{0.29}$$

onde $\hat{n}_i$ é o vetor normal unitário a superfície do contorno e $\overline{T}_j^{(\hat{\mathbf{n}})}$ é o vetor de forças de superfície conhecido em uma região do contorno. Esta equação corresponde a fórmula de Cauchy e pode ser obtida considerando-se o equilíbrio de forças em um tetraedro situado na região do contorno da estrutura.

2.4.2.3. Resumo das Equações da Teoria da Elasticidade

Por conveniência, as equações que governam o problema de análise de tensões são resumidamente apresentadas na TABELA 2.10.

TABELA 2.10 – Resumo das equações que governam o problema de análise de tensões.

Equações de equilíbrio	$\tau_{ij,i} + b_i = 0$ $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ em Ω	(0.30)
Relação constitutiva do meio (Lei de Hooke)	$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij}$ em Ω	(0.31)
Equação de compatibilidade	$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right)$ em Ω	(0.32)
Condições de Contorno	$\left.\begin{array}{ll} u_i = \overline{u}_i & \text{em } \Gamma_u \\ \tau_{ij}\hat{n}_i = \overline{T}_j^{(\hat{\mathbf{n}})} & \text{em } \Gamma_T \end{array}\right\}$	(0.33)

A solução para o problema de análise de tensões consiste em se resolver o sistema de equações diferenciais parciais (0.30), considerando a relação constitutiva (0.31) do material, a relação entre as deformações e os deslocamentos (0.32), e satisfazendo as condições de contorno (0.17). Este tipo de problema é comumente denominado problema de valor de contorno.

As equações apresentadas na TABELA 2.10 são expressas na chamada forma forte, o que significa que estas equações devem ser satisfeitas pontualmente, ou seja, a solução do problema consiste em satisfazes estas equações, para qualquer ponto (x,y,z) do meio. Alternativamente, pode-se resolver o problema na sua forma fraca, através do emprego de métodos numéricos. Neste trabalho a solução deste problema é obtida empregando-se o Método dos Elementos Finitos.

2.4.2.4. Determinação das Tensões Principais

As tensões e direções principais do corpo podem ser obtidas resolvendo o seguinte problema de autovalor e autovetor

$$(\tau_{ij} - \tau\delta_{ij})\nu_j = 0 \tag{0.34}$$

onde τ são as tensões principais (auto-valores) e ν_j são as componentes do correspondentes direções principais (auto-vetores).

A solução do problema de autovetor e autovalor é obtida impondo-se a condição de que o sistema deve ser indeterminado, ou seja que o determinante abaixo seja nulo

$$\left|\tau_{ij} - \tau\delta_{ij}\right| = 0 \tag{0.35}$$

que reescrito na forma expandida fica

$$\begin{vmatrix} \tau_{11} - \tau & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} - \tau & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} - \tau \end{vmatrix} = 0 \tag{0.36}$$

Expandindo o determinante, chega-se à equação característica

$$\tau^3 - I_\tau \tau^2 + II_\tau \tau - III_\tau = 0 \tag{0.37}$$

onde

$$\begin{aligned} I_\tau &= \tau_{ii} \\ II_\tau &= \frac{1}{2}\left(\tau_{ii}\tau_{jj} - \tau_{ij}\tau_{ij}\right) \\ III_\tau &= \frac{1}{6}(\tau_{ij}\tau_{jk}\tau_{kl} - 3\tau_{ij}\tau_{jl}\tau_{kk} + \tau_{ii}\tau_{jj}\tau_{kk}) \end{aligned} \tag{0.38}$$

são os invariantes de tensão (independentes do sistema de coordenadas cartesiano adotado como referência para a análise).

2.4.3. Análise Termoelástica

A análise de uma estrutura submetida a ações externas mecânicas (forças externas, peso próprio, recalques, etc) e ao mesmo tempo submetida a ações de origem térmica pode ser feita considerando-se que as deformações em um ponto da estrutura corresponde à soma de três parcelas (SHAMES & COZARELLI, 1991),

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon'' + \varepsilon''' \tag{0.39}$$

onde ε' a dilatação térmica corresponde à deformações causadas por efeitos mecânicos (forças externas), ε'' corresponde à dilatação térmica livres (não associada a tensões), e ε''' corresponde as tensões de origem térmica.

A primeira parcela de origem mecânica, foi descrita nas seções anteriores, sendo considerada de forma usual na teoria da elasticidade.

A forma de considerar as demais parcelas é apresentada a seguir.

Considerando um problema unidimensional, a dilatação térmica média em um pequeno segmento de comprimento δL, submetido a uma variação de temperatura ΔT, pode ser expressa como

$$\Delta(\delta L) = \alpha\, \delta L \Delta T \tag{0.40}$$

onde α é o coeficiente de dilatação térmica do material.

No limite, quando o tamanho do segmento tende a zero, obtém-se a expressão para a deformação térmica específica em um ponto

$$\varepsilon'' = \lim_{\delta L \to 0} \frac{\Delta(\delta L)}{\delta L} = \alpha \Delta T \tag{0.41}$$

Como se observa que não ocorrem deformações por cisalhamento devido ao efeito térmico, a Lei de Hooke (ver eq. (0.24)), incorporando os efeitos de origem térmica, é rescrita como

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}\tau_{ij} - \frac{\nu}{E}\tau_{kk}\delta_{ij} + \alpha\Delta T\delta_{ij} \tag{0.42}$$

Invertendo esta relação, de modo a exprimir as deformações em termos das tensões, chega-se a seguinte expressão

$$\tau_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} - \beta\Delta T\delta_{ij} \tag{0.43}$$

onde,

$$\beta = \left(3\lambda + 2\mu\right)\alpha \tag{0.44}$$

Desta forma, para a análise de tensões em meios submetidos a ações mecânicas (forças de corpo, forças de superfície, e deslocamentos impostos) além de variações de temperatura, é necessário apenas utilizar a equação constitutiva (0.43), no lugar da eq. (0.23) apresentada anteriormente.

É interessante ainda observar o resultado da contração da eq. (0.42), o que permite determinar a deformação volumétrica

$$\varepsilon_{ii} = \frac{1-2\nu}{E}\tau_{ii} + 3\alpha\Delta T \tag{0.45}$$

De onde se conclui que o coeficiente de dilatação volumétrica é igual a três vezes o coeficiente de dilatação linear.

2.5. Processo de Fabricação do Alumínio e Anodo

Neste capítulo, são descritos resumidamente os processos de fabricação do alumínio e do anodo. Esta descrição é importante para proporcionar ao leitor não familiarizado com estes processos, uma visão geral sobre a função do forno de cozimento de anodo, objeto deste estudo, em uma fábrica de Alumínio.

2.5.1. Processo de Fabricação do Alumínio

O processo de produção de alumínio primário, difundido internacionalmente, é o método de Hall-Heroult com a utilização de cubas eletrolíticas. Esse processo tem como matéria-prima a alumina e como principais insumos a energia elétrica e o bloco anódico vide por exemplo GRJOTHEIM & KVANDE, 1993.

No processo eletrolítico, que consiste na ocorrência de reações químicas devido à passagem de corrente elétrica, a alumina submetida a essa corrente elétrica forma o íon alumínio. O Bloco Anódico (BA) reage com o oxigênio desprendido da alumina, produzindo monóxido de carbono e dióxido de carbono. O BA tem um papel significativo na produção do alumínio primário.

A FIGURA 2.22 mostra alguns blocos anódicos.

FIGURA 2.22 – Blocos anódicos

O equipamento para produção de alumínio é chamado de cuba eletrolítica (CE). A CE é composto pelo pólo positivo (bloco anódico) e pelo pólo negativo (bloco catódico). A cuba é preenchida por diversas substâncias químicas, as quais têm duas funções principais: a primeira é a de baixar o ponto de fusão da molécula alumina e a segunda é de criar resistência à passagem da corrente elétrica. Uma das principais substâncias utilizadas é a criolita (Na_3AlF_6) 80%, que baixa o ponto de fusão da alumina (Al_2O_3) de 2000°C para 900°C, viabilizando a produção de alumínio.

A FIGURA 2.23 ilustra uma cuba eletrolítica.

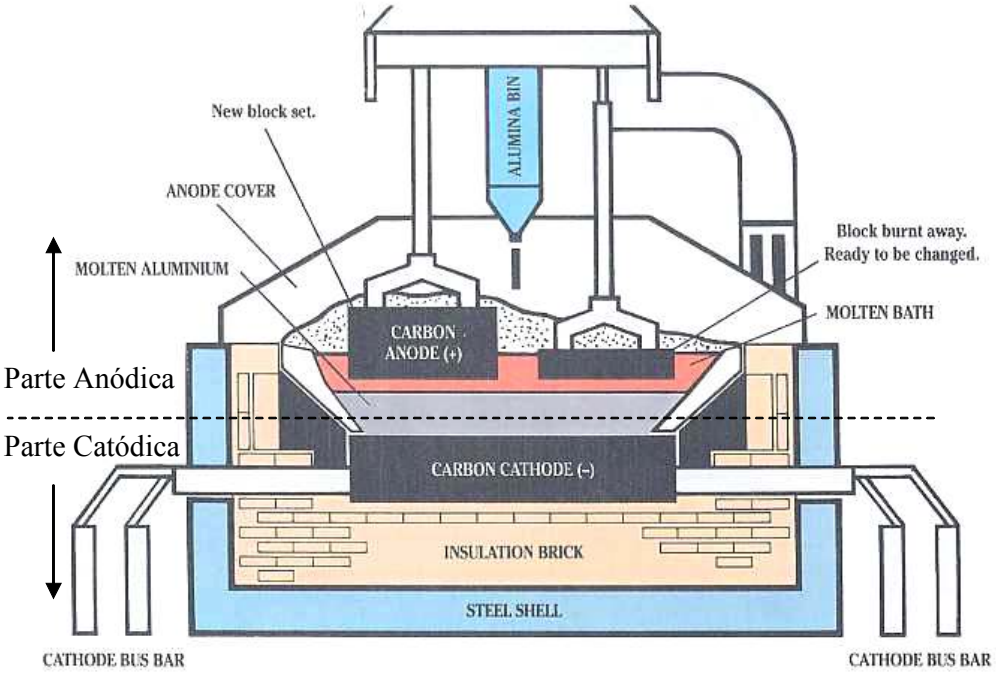


FIGURA 2.23 – Cuba eletrolítica Fonte: Catálogo RHI Refractories

2.5.2. Processo de Fabricação do Anodo

O Anodo pré-cozido é um material inicialmente heterogêneo, produzido pela mistura de coque de petróleo (agregado) com piche de alcatrão (aglomerante). O processo de fabricação é realizado em três áreas: fábrica de anodo verde, fábrica de anodo cozido e oficina de chumbamento de hastes.

A fábrica de anodo verde recebe as matérias primas, coque e piche transportados do porto até a fábrica. O coque é britado e peneirado em frações pré-estabelecidas e posteriormente armazenado em silos. O piche é utilizado na forma de pequenos bastões sendo armazenados em galpões.

O início do processo de produção consiste na mistura das frações de coque com uma adição de piche. A pasta úmida é homogeneizada e, em seguida, é compactada em uma forma prismática a fim de adquirir resistência mínima para manuseio do bloco.

A fábrica de anodo cozido tem a função de cozinhar blocos de anodo verde em fornos de cozimento para que estes adquiram as propriedades exigidas no processo eletrolítico. A FIGURA 2.24 ilustra um forno de cozimento de anodo.

FIGURA 2.24 – Forno de cozimento de anodo.

Na oficina de chumbamento de hastes chumbam-se as hastes metálicas no anodo. Estas hastes são necessárias para fixar o bloco anódico na cuba eletrolítica (conforme ilustra a FIGURA 4.1). A FIGURA 2.25 ilustra blocos anódicos após o chumbamento das hastes.

FIGURA 2.25 – Blocos anódicos após chumbamento das hastes metálicas

2.5.3. Processo de Cozimento do Anodo

O forno de cozimento de anodo opera a uma temperatura máxima de aproximadamente 1300°C. O forno é composto por seções, com cada seção tendo sete câmaras de combustão, chamadas de *Flue Walls*. A FIGURA 2.26 mostra uma vista superior do forno de cozimento de anodo em estudo. Nesta figura também são mostradas as *Head Walls* e os poços de cozimento de anodo.

O processo de cozimento de anodo é composto por quatro etapas: pré-aquecimento, fogo forçado, resfriamento forçado e resfriamento natural. Essas etapas estão relacionadas com as reações químicas que ocorrem durante o cozimento do anodo.

A FIGURA 2.26 mostra um esquema básico do processo de cozimento de anodo. Ao processo completo dá-se o nome de Fogo.

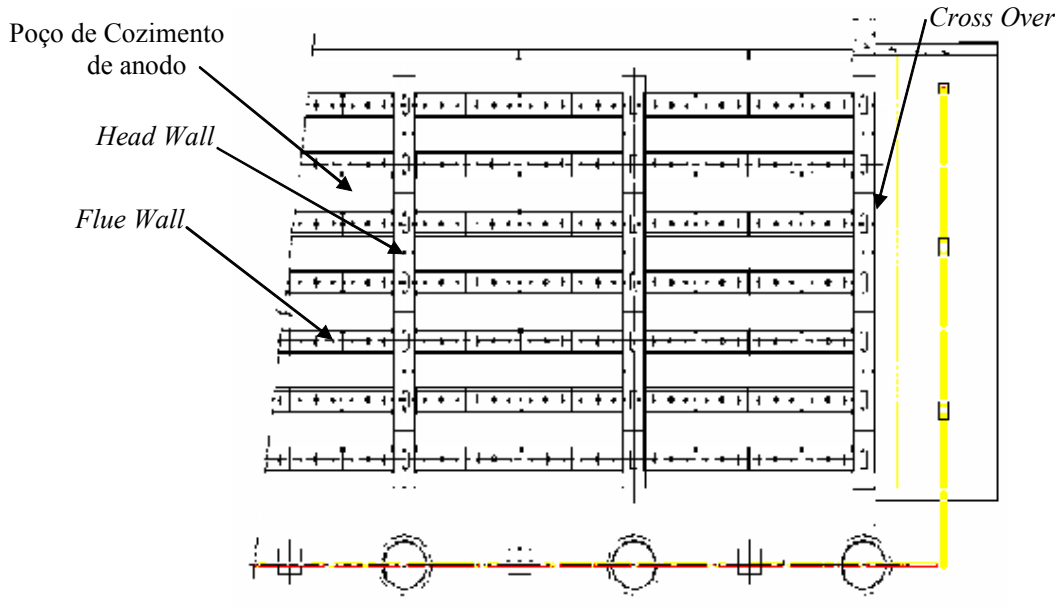


FIGURA 2.26 – Forno de cozimento de anodo

A temperatura interna no forno de cozimento de anodo é o principal parâmetro a ser controlado durante a sua operação. Existem basicamente quatro estágios de aquecimento/resfriamento do forno, quais sejam: a) Pré-aquecimento; b) Fogo Forçado; c)Resfriamento Forçado; d) Resfriamento Natural. Quando a seção de pré-aquecimento atinge a temperatura de 850°C, passa-se para fase de fogo-forçado; na fase de fogo forçado a temperatura máxima é de 1220°C permanecendo por um período pré-definido para em seguida a seção passar para a fase de resfriamento forçado; quando a seção na fase de resfriamento forçado atinge a temperatura de 300°C, esta passa para a fase de resfriamento natural; na fase de resfriamento natural permite-se que a seção resfrie até atingir a temperatura ambiente, completando o processo. Ao conjunto destes quatro estágios dar-se o nome de fogo, conforme ilustrado na FIGURA 2.28.

O principio de operação do forno é o movimento do fogo ao longo das seções conforme o processo de cozimento do anodo. A vida útil de um forno de cozimento de anodo é medida por ciclo. Um ciclo é quando um fogo dá a volta completa no forno, conforme representado na FIGURA 2.28.

Por exemplo, como ilustrado na FIGURA 2.28, no fogo que estão nas seções de 4 a 17. As seções 15, 16 e 17 estão em fase de pré-aquecimento, ao atingir em um período de tempo a temperatura exigida, estas mesmas seções passarão para fase de fogo forçado. Ou seja, a fase de fogo forçado passou das seções 12, 13 e 14 para as seções 15, 16 e 17, as outras

fases passaram paras respectivas seções posteriores. Desta forma o fogo irá percorrer todas as seções do forno.

A elevação da temperatura se dá através da queima de combustível (BPF) e dos gases desprendidos com a queima do piche. Com um sistema de ventilação e exaustão, o fogo percorre pelas seções através das *flue walls*, alimentando com calor os poços de cozimento de anodo.

A FIGURA 2.27 descreve todos os itens existentes em um forno de cozimento de anodo. Vale chamar atenção a parede de concreto motivo desta pesquisa.

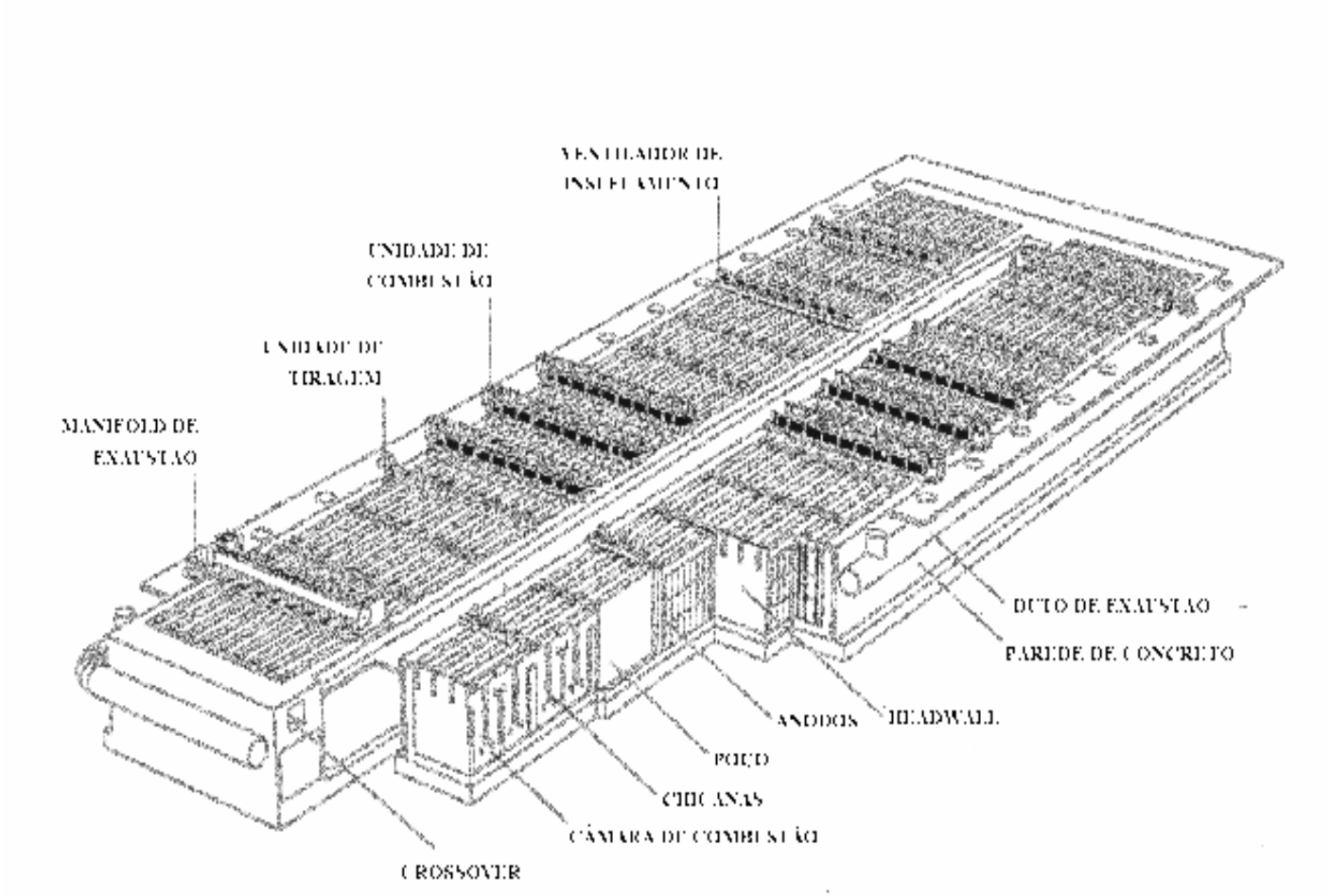


FIGURA 2.27 – Ilustração do forno de cozimento de anodo. Fonte: AQUINO *et al* (2004)

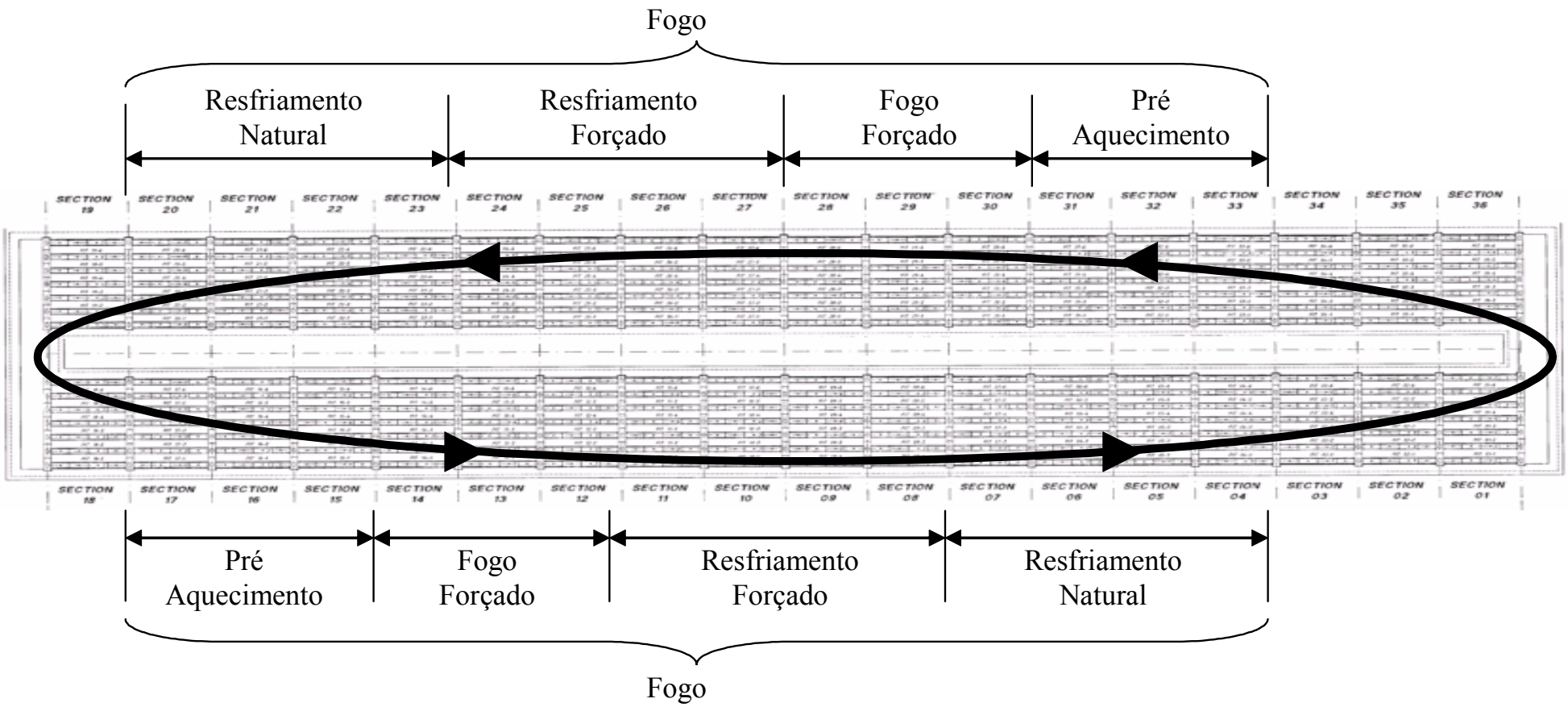


FIGURA 2.28 – Detalhe do processo de cozimento - fogo

2.5.3.1. Processo de transferência de calor

A transferência de calor no processo de cozimento do anodo verde dentro do forno ocorre da seguinte forma: dentro da câmara (*flue wall*) ocorre a queima de combustível para geração de calor, da onde, por convecção, o calor é transferido para a parede de tijolo refratário e, por condução, para o poço de anodo. Além disso, em uma determinada fase do processo, o anodo libera gases (voláteis), que por radiação, contribuem para a geração de calor dentro das câmaras. A FIGURA 2.29 ilustra a queima dos gases desprendidos no cozimento do anodo.

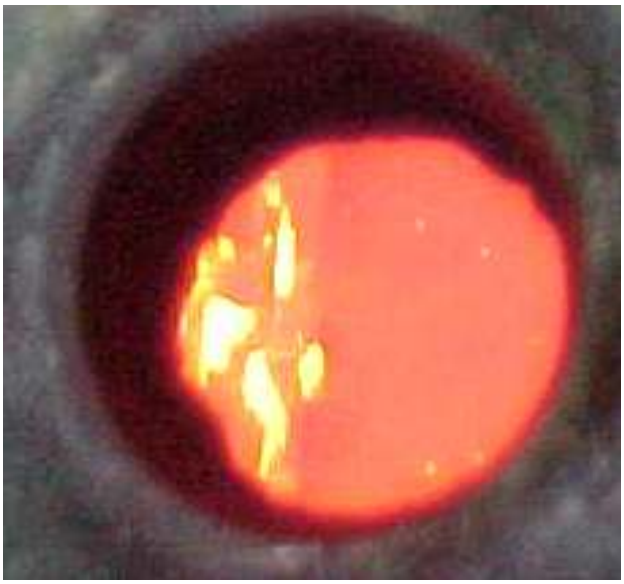


FIGURA 2.29 – Emissão de voláteis

A FIGURA 2.30 ilustra o sistema térmico em estudo, com uma vista superior da parede externa do forno, a câmara de combustão e o poço de cozimento de anodo. As câmaras de combustões das extremidades do forno transferem o calor por condução para as paredes em estudo que são constituídas com três materiais, descritos em mais detalhe no próximo capítulo.

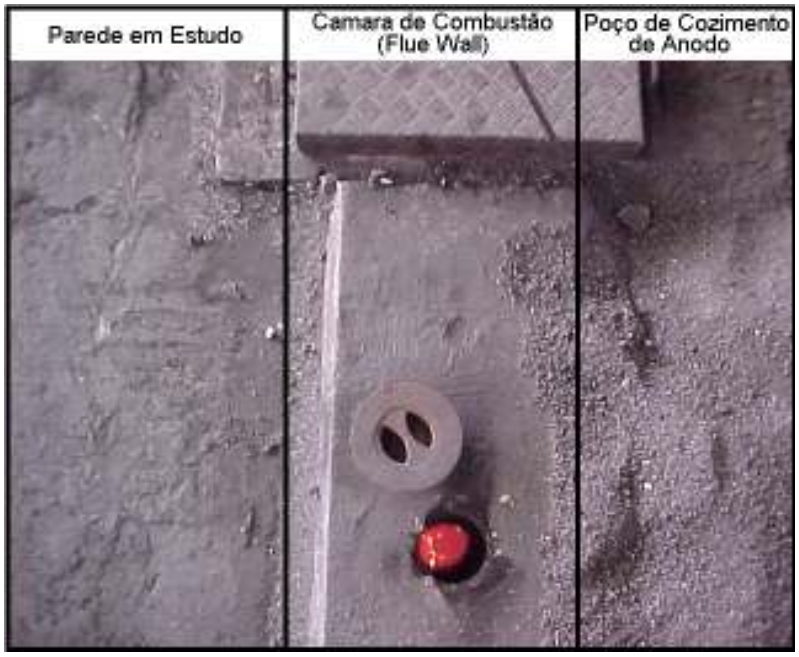


FIGURA 2.30 – Vista superior da região da parede em estudo

3. Descrição do problema

Neste capítulo é feita uma exposição do problema em estudo, com uma descrição da estrutura analisada, e das principais patologias estruturais observadas.

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.

3.1. Descrição da Estrutura

O forno de cozimento de anodo é um equipamento que funciona a elevadas temperaturas. As paredes das extremidades do forno tem 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.

Para isto, a parede externa do forno possui três camadas adjacentes, com materiais de propriedades térmicas e mecânicas diferentes, conforme apresentado na FIGURA 3.1.

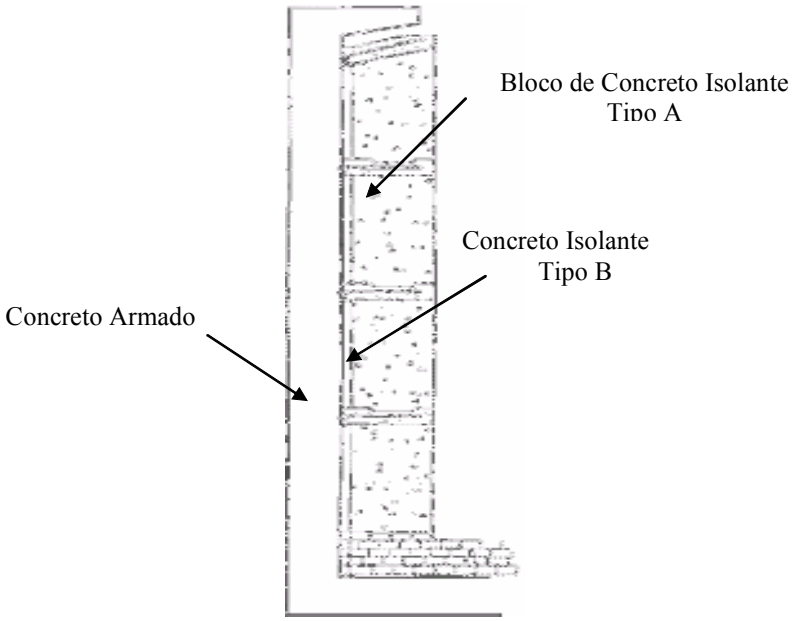


FIGURA 3.1 – Parede externa do forno de cozimento de anodo

Cada camada possui propriedades adequadas para a sua função, e de acordo com a faixa de temperatura à qual é submetida. Por exemplo, a camada situada na face interior do forno é formada por blocos de concreto isolante (Tipo A), sendo, das três camadas, a que está submetida às maiores temperatura. Já a camada situada na face externa é de concreto armado, sendo responsável pela estabilidade mecânica da estrutura, e que está submetida ao menor gradiente térmico. Os blocos de concreto isolante são fixados na estrutura em concreto armado através de um sistema de ancoragem. Entre estas duas camadas, existe ainda uma camada de concreto isolante (concreto isolante tipo B), a qual é moldada *in loco*.

Com a função de enrijecer a placa referente a cada parede, é disposta na região central desta placa, uma coluna em concreto armado de seção quadrada de 50×50cm, engastada em um bloco, conforme pode se observar na FIGURA 3.2. Esta figura ilustra toda estrutura em estudo com suas principais dimensões.

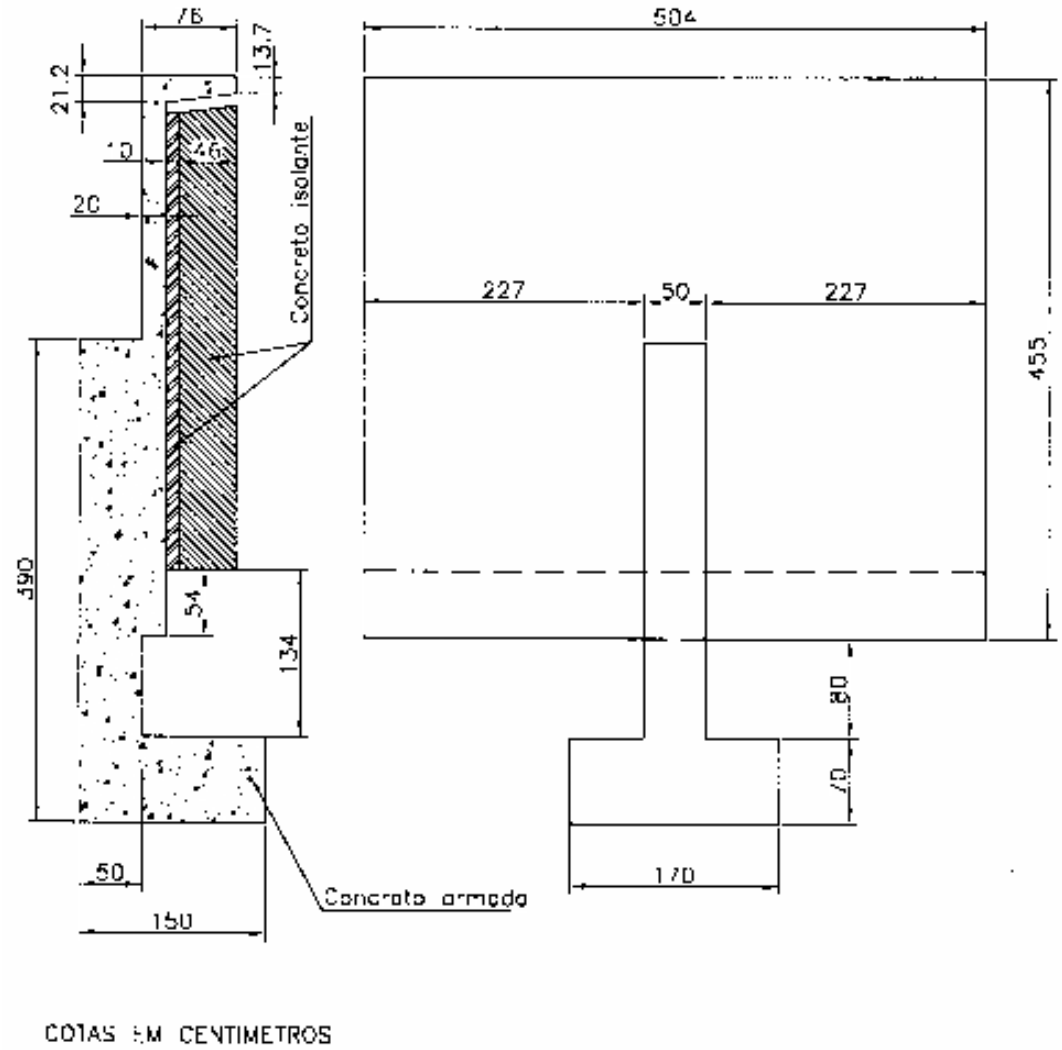


FIGURA 3.2 – Dimensões da parede de concreto armado

As paredes são construídas em segmentos adjacentes de aproximadamente 5m de comprimento, separadas por pequenas juntas de dilatação. Correlacionando a parede de concreto armado com as seções do forno, na direção do pilar da parede em estudo fica a divisão de uma seção para outra, ou seja, cada parede de concreto armado constitui metade de uma seção com a metade da seção posterior, conforme mostradas na FIGURA 2.28.

Cabe destacar que a parede é totalmente independente das outras estruturas do forno (lajes de piso, *head walls*, *flue walls*, etc) através de espaçamentos com juntas de dilatação nos pontos de contato.

A parede em estudo apresenta bom funcionamento no que diz respeito à função de isolamento térmico, contendo o fluxo de calor ao longo da espessura da mesma. Porém, no

que diz respeito à função estrutural (de estabilidade mecânica) a parede não está apresentando resultados satisfatórios, já que vem apresentando patologias estruturais decorrentes do efeito térmico.

Com o passar dos anos de utilização do forno, os problemas estruturais se agravaram, o que colocou em dúvida a segurança da estrutura e, conseqüentemente, a confiabilidade do funcionamento do forno de cozimento de anodo.

3.2. Deformações da Parede de Concreto Armado

As paredes de concreto armado do forno de cozimento de anodo vêm apresentando deformações acumulativas com o passar dos seus vinte anos de existência. A FIGURA 3.3 ilustra esquematicamente o sentindo principal da deformação da parede.

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.

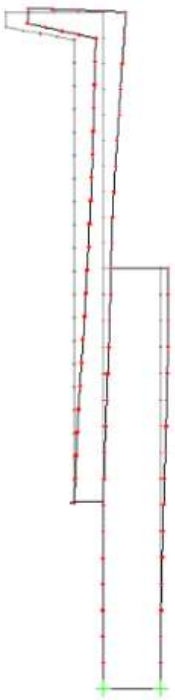


FIGURA 3.3 – Detalhe esquemático da seção da parede deformada

A FIGURA 3.4 ilustra a real deformação do pilar da parede, onde é possível perceber o seu desaprumo utilizando-se uma coluna metálica como referência, a qual encontra-se na posição vertical.

Um outro aspecto preocupante para o funcionamento da parede de concreto armado do forno é a deformação torcional de um segmento de parede relativa aos outros segmentos vizinhos. Esta deformação é ilustrada na FIGURA 3.5 com o desalinhamento de uma estrutura (segmento tipo) em relação à estrutura vizinha.

FIGURA 3.4 – Parede de concreto armado deformada

FIGURA 3.5 – Detalhe do efeito de deformação torcional na parede de concreto armado.

3.3. Fissurações nas Paredes

Os efeitos térmicos na parede nas extremidades dos fornos de cozimento de anodo, além de causar deformações permanentes, como já foi exposto, estão causando ainda fissurações.

O pilar da parede do forno apresenta uma rigidez maior do que a da placa da parede propriamente dita. Logo, à deformação do pilar é inferior a deformação da placa da parede. A FIGURA 3.6 ilustra a patologia oriunda deste efeito, que consiste em fissurações preferenciais pelo lado de dentro do forno ao longo do contorno do pilar. Esta foto refere-se a uma vista do lado de dentro da parede de concreto armado do forno, obtida após a demolição do revestimento interno, em uma reforma recente. As fissuras estão destacadas com giz branco para melhor visualização na foto.

FIGURA 3.6 – Detalhe das trincas no contorno do pilar.

Pelo lado de fora da parede de concreto armado também se observa fissuração devido ao efeito térmico, conforme se observa nas FIGURAS 3.7 e 3.8, em seguimentos distintos.

FIGURA 3.7 – Trincas na parede devido ao efeito térmico

FIGURA 3.8 – Trincas na parede devido ao efeito térmico

As fissuras do lado de dentro da parede de concreto armado possuem espessura na ordem de 4,00mm. A FIGURA 3.9 mostra algumas fissuras situadas na região ao redor do pilar.

FIGURA 3.9 – Detalhe da trinca no contorno do pilar

As FIGURAS 3.10 e 3.11 ilustram o estado de fissuração atingido pela parede de bloco de concreto isolante devido à grande variação térmica ocasionada pela operação do

forno. Cabe ressaltar que a camada referente aos blocos de concreto isolante mostrada nas fotos são ancoradas na parede de concreto armado.

FIGURA 3.10 – Camada referente aos blocos de concreto isolante

FIGURA 3.11 – Camada referente aos blocos de concreto isolante

A camada de concreto isolante que fica entre o bloco de concreto isolante e a parede de concreto armado também apresentou trincas de origem térmica. A FIGURA 3.12 ilustra as fissuras no concreto isolante.

FIGURA 3.12 – Detalhe da trinca na parede de concreto isolante

3.4. 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. O processo usual avalia a degradação do forno pelo número de rejeitos de anodos que este produz no cozimento.

Outros 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.

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 3.1) 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. Para o coeficiente de dilatação térmica foi assumido o valor tabelado.

3.4.1. Caracterização das Propriedades do Concreto da Parede

A condutividade térmica do concreto convencional da parede externa do forno de cozimento de anodo foi uma propriedade importante para o estudo, pois permitiu a determinação de 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, conforme descrição no capítulo 4.

Como não era possível medir a temperatura na face interna da camada de blocos isolantes, para a determinação desta temperatura, foram admitidas as hipóteses de que o sistema se encontrava em regime estacionário, e de que o fluxo de calor era unidirecional (perpendicular a parede) e constante nas três camadas. Com estas hipóteses pôde-se então calcular as temperaturas nas outras faces do concreto isolante (tipo B) e do bloco de concreto isolante tipo A, conforme apresentado no capítulo 5.

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, as quais são apresentadas no capítulo 5.

A condutividade térmica do concreto armado foi obtida experimentalmente a partir da retirada de testemunhos da parede, posteriormente preparados na forma de pastilhas com 50mm de diâmetro e 20mm de altura.

Para permitir a caracterização das propriedades do material da parede em concreto armado, foi realizada, com o auxilio de uma máquina extratora, com serra diamantada, ver FIGURAS 3.13 e 3.14.

A FIGURA 3.13 mostra a utilização do pacômetro para localizar as armaduras na estrutura, com o objetivo de retirar testemunhos de concreto sem a interferência das barras de aço.

FIGURA 3.13 – Pacômetro utilizado antes da extração de testemunhos.

Definido os locais sem a presença de armaduras, procede-se a extração do testemunho. A FIGURA 3.14 ilustra a extração do testemunho da parede de concreto armado.

FIGURA 3.14 – Processo de retirada do testemunho para medição da condutividade térmica

As FIGURAS 3.15 e 3.16 ilustram os testemunhos retirados da parede em estudo, com dimensões de 50mm de diâmetro e 200mm de comprimento, aproximadamente. Em seguida, foram cortadas amostras com espessura de 20mm. As dimensões de 50mm por 20mm são especificadas para a utilização do equipamento de medição de condutividade térmica, disponível para o estudo.

FIGURA 3.15 – Testemunho de concreto da parede

FIGURA 3.16 – Pastilha preparada com dimensão de 50mm de diâmetro por 20mm de espessura.

O equipamento utilizado para medir a condutividade térmica do material é 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 3.17 ilustra este equipamento no laboratório da Albras.

FIGURA 3.17 – 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.

3.4.2. Determinação do Coeficiente de Dilatação Térmica do Concreto Isolante

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 3.18.

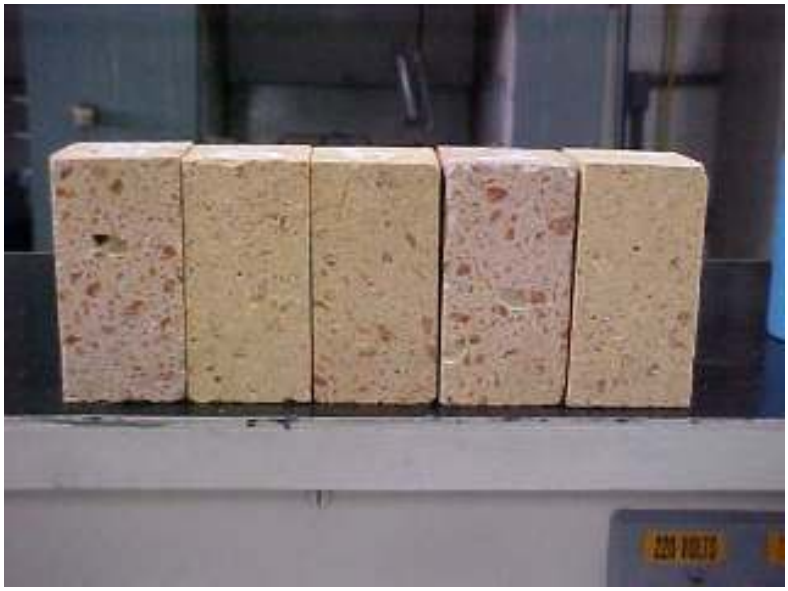


FIGURA 3.18 – Amostras do bloco de concreto isolante

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 3.19 ilustra o equipamento de dilatação térmica.

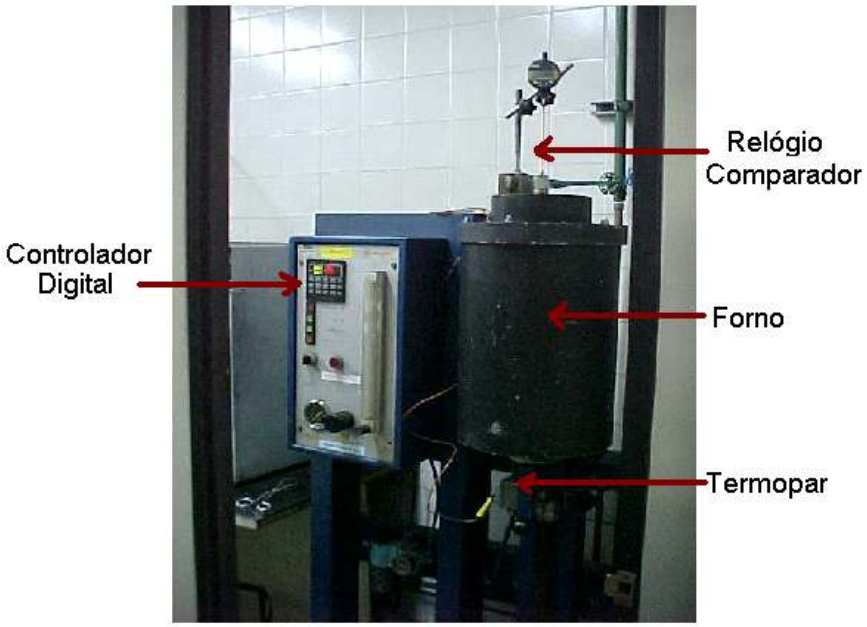


FIGURA 3.19 – Equipamento para o ensaio de dilatação térmica

3.4.3. Resumo das Propriedades Consideradas

Em resumo, na TABELA 3.1 são apresentadas os valores das propriedades dos materiais utilizadas neste estudo. Os valores com a sigla (exp.) correspondem a resultados obtidos experimentalmente e os demais valores foram retirados da literatura.

TABELA 3.1 – Propriedades dos materiais

	Concreto Convencional	**Concreto Isolante B**	**Bloco de Concreto Isolante A**	**Solo (Areia Compactada)**
Peso Específico(kgf/m^3)	2351,20	500,00	1420,39 (exp.)	1936,80
Módulo de Elasticidade (MPa)	21383,00	5000,00	6000,00	79,29
Condutividade Térmica (W/mK)	1,18 (exp.)	0,14	0,42	
Calor Específico (J/kg K)	880	1000	1000	
Coeficiente de Dilatação Térmica (10^{-6}/°C)	9,8999	7	3,28 (exp.)	
Coeficiente de Poisson	0,15	0,20	0,20	0,30

4. 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.

4.1. Execução do Ensaio

Para realização do ensaio de monitoração dos deslocamentos da parede de concreto armado foi necessário projetar e construir estruturas metálicas independentes para fixação dos sensores de deslocamento linear.

Estas estruturas de suporte dos sensores foram fixadas de forma totalmente independente da estrutura de concreto armado, para servirem como uma referência fixa, não sofrendo deformações mecânicas provenientes do forno. As deformações térmicas nestas estruturas foram consideradas muito pequenas, sendo desconsideradas neste estudo.

Foi necessária a construção de três unidades, sendo duas unidades iguais e uma diferente. A unidade diferente foi utilizada para monitorar o deslocamento ao longo do pilar e acima do pilar da parede de concreto armado (ver FIGURA 4.1). As outras duas foram fixadas nas extremidades da placa da parede de concreto armado.

A FIGURA 4.1 é uma ilustração esquemática do sistema como um todo, com a parede de concreto armado, a estrutura metálica na linha do pilar e o piso operacional.

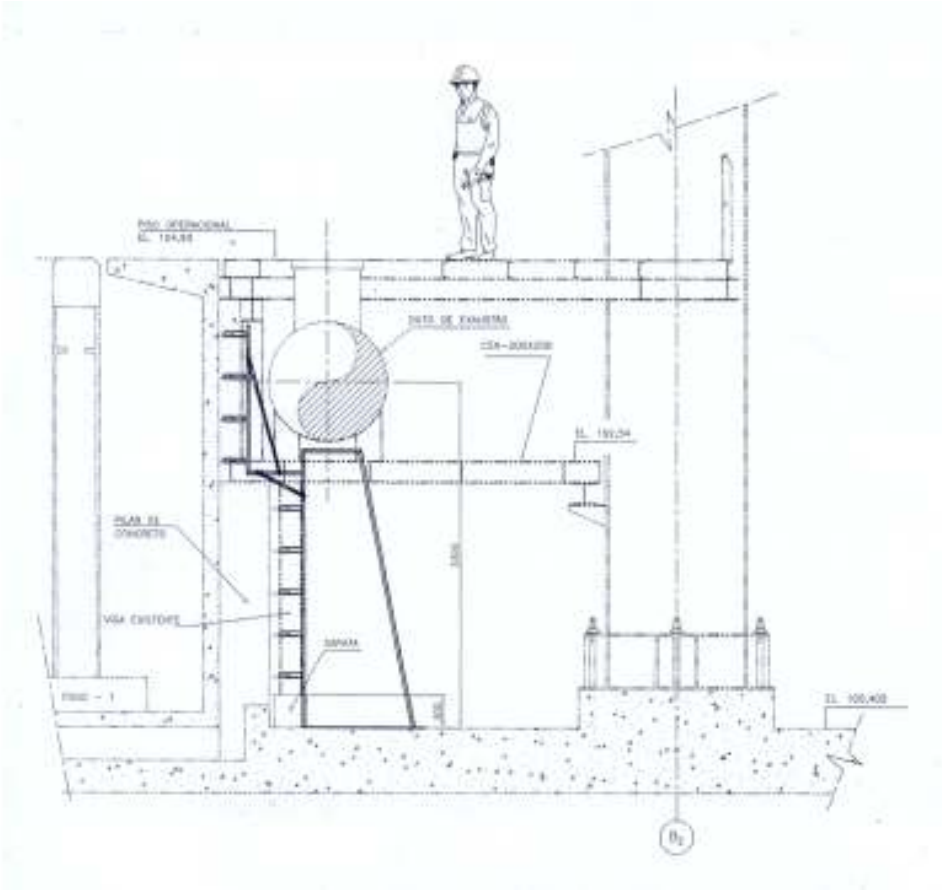


FIGURA 4.1 – Ilustração do sistema: parede – suporte metálico – piso operacional

As FIGURAS 4.2 e 4.3 ilustram os projetos de fabricação das estruturas metálicas.

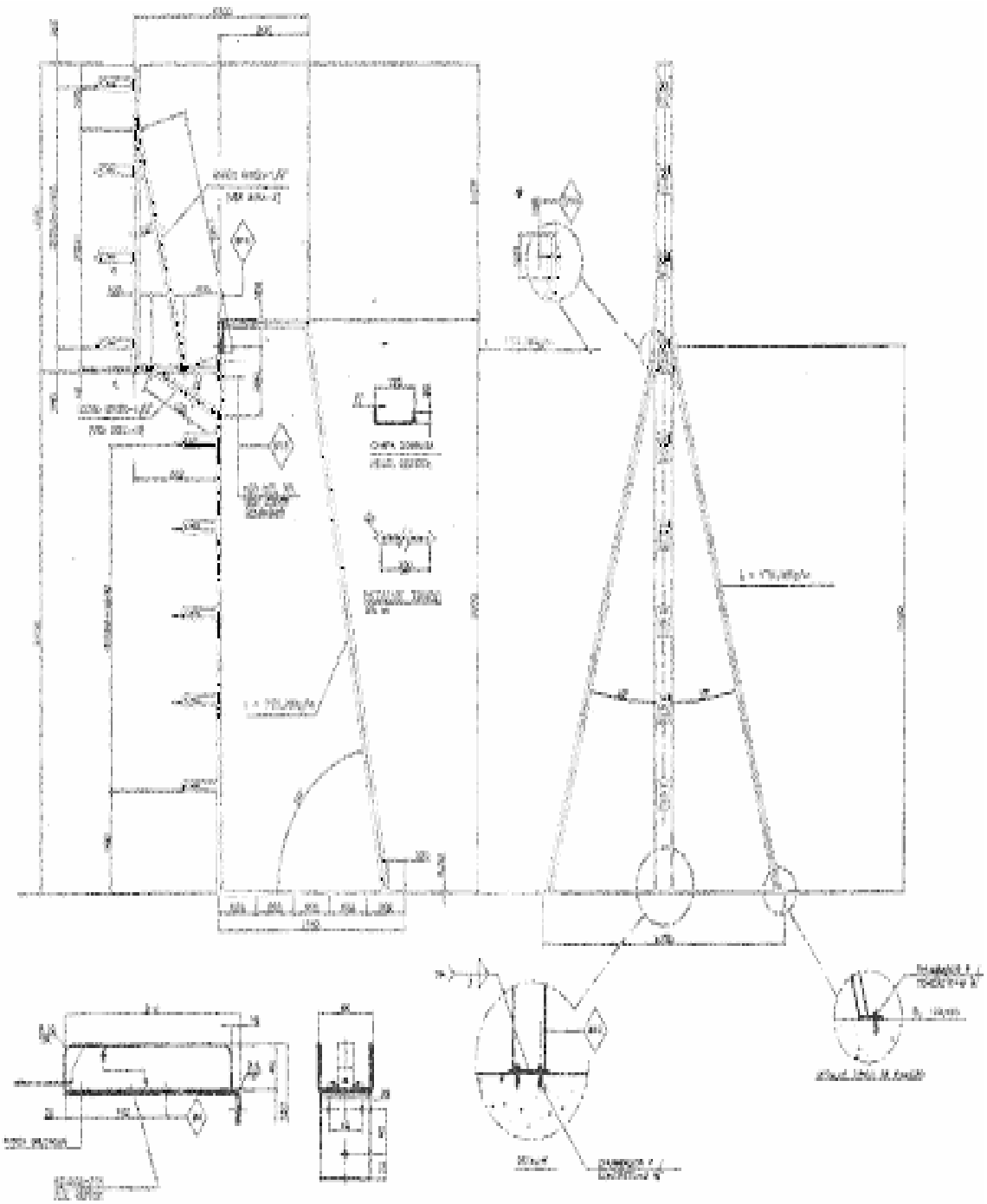


FIGURA 4.2 – Projeto do suporte metálico dos sensores utilizado na medição de deslocamentos da linha do pilar.

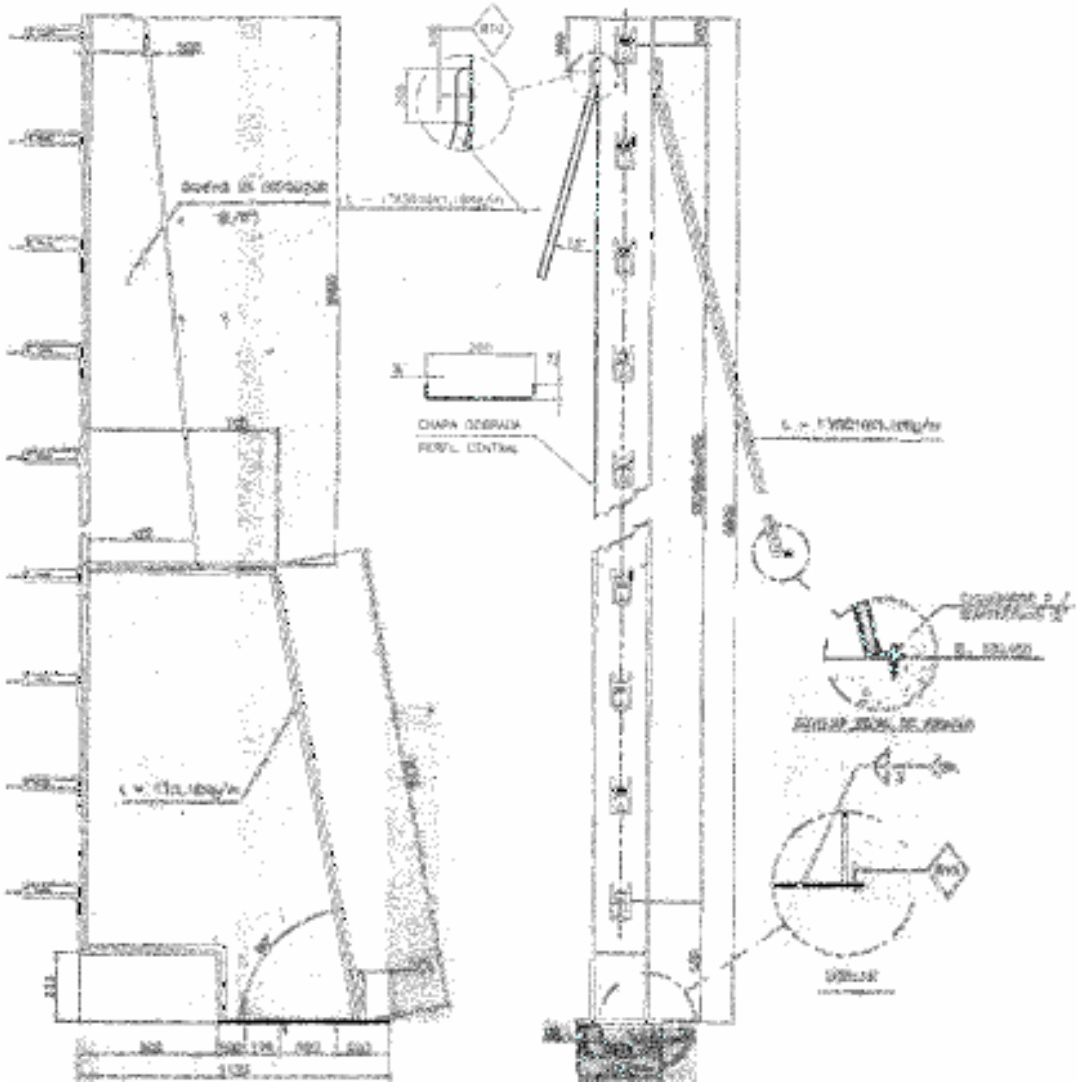


FIGURA 4.3 – Projeto do suporte metálico dos sensores

A FIGURA 4.4 mostra o detalhe do suporte de fixação dos sensores de deslocamentos lineares.

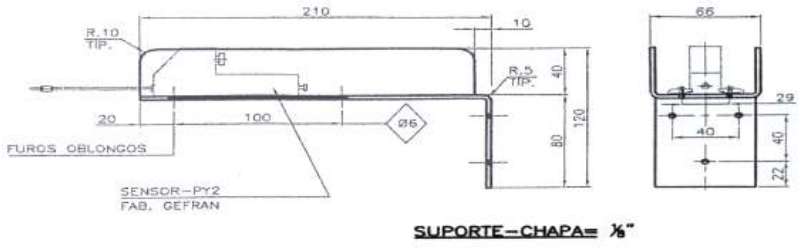


FIGURA 4.4 – Detalhe do suporte dos sensores de deslocamento linear

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 4.5 ilustra o sistema de aquisição de dados sendo testado e configurado.

FIGURA 4.5 – Sistema de aquisição de dados sendo testado

Após a configuração do sistema de aquisição de dados foi realizada uma validação das medidas obtidas, utilizando-se o seguinte procedimento: com o emprego de um paquímetro digital e um termômetro a laser foram medidos os deslocamentos e temperaturas. Os resultados foram comparados com os resultados que o sistema de aquisição estava apresentando.

Com o sistema configurado e aferido, partiu-se para montagem definitiva dos sensores e das estruturas de suporte no local de monitoração. Para a monitoração foi definida a localização dos sensores de forma que fosse possível o mapeamento de deslocamentos ao longo de todo um segmento de parede. As FIGURAS 4.6 e 4.7 mostram o arranjo dos sensores na parede de concreto armado.

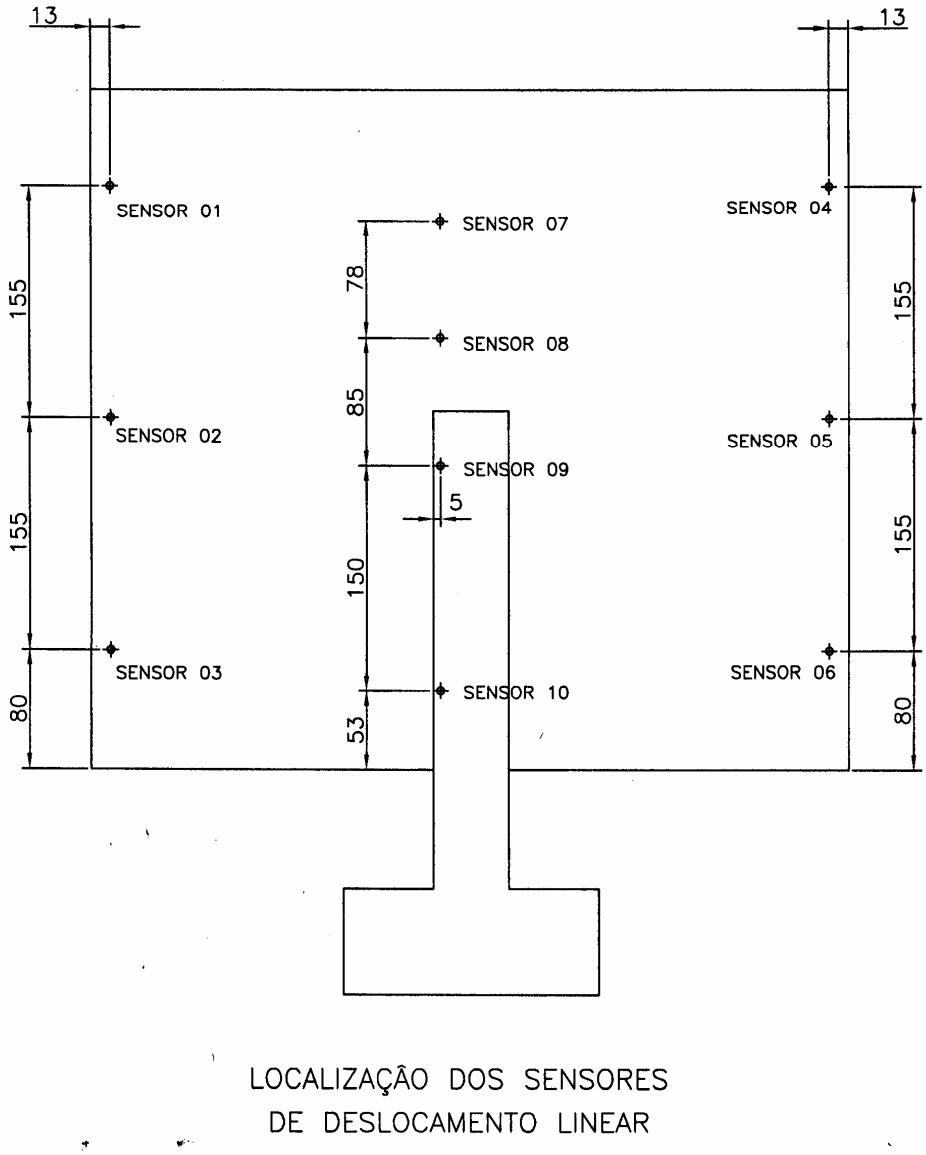


FIGURA 4.6 – Arranjo dos sensores de deslocamento linear.

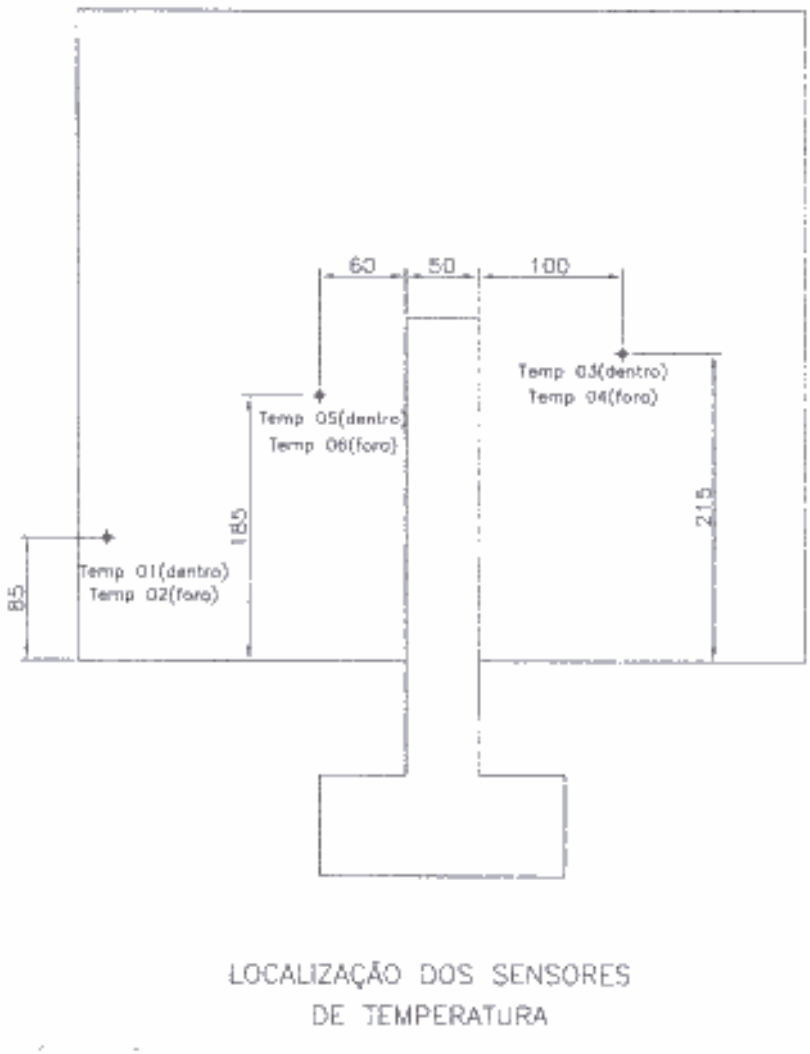


FIGURA 4.7 – Arranjo dos sensores de temperatura (PT100)

A FIGURA 4.8 mostra as estruturas metálicas na posição utilizada na monitoração.

FIGURA 4.8 – Estrutura dos sensores de deslocamento linear

As FIGURAS 4.9 e 4.10 mostram, em detalhe, os sensores de deslocamento linear e de temperatura (termopar do tipo PT100) fixados na estrutura.

FIGURA 4.9 – Detalhe do sensor de deslocamento linear e do sensor de temperatura

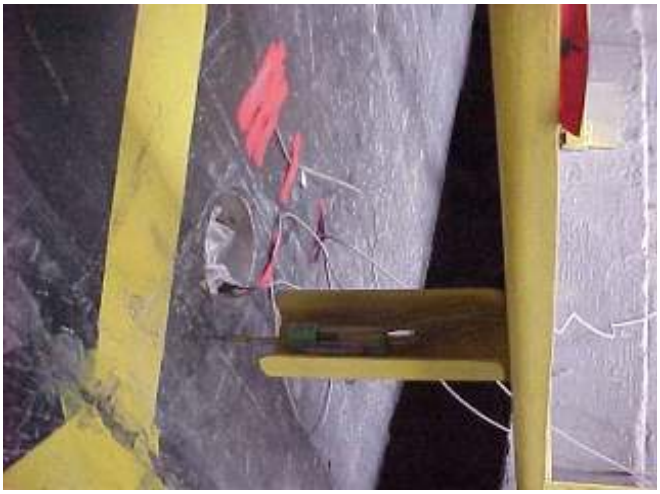


FIGURA 4.10 – Detalhe do sensor de deslocamento linear e
do sensor de temperatura

A FIGURA 4.11 mostra a aquisição do deslocamento no pilar da estrutura e acima do pilar.

FIGURA 4.11 – Detalhe da monitoração do deslocamento.

A FIGURA 4.12 mostra o micro-computador, e o sistema de aquisição de dados dentro do gabinete utilizado para proteção do equipamento, durante a realização do ensaio.

FIGURA 4.12 – Sistema de Monitoração

4.2. Resultados do Ensaio

Como o ensaio foi bastante longo (com duração de cinqüenta dias), o sistema foi configurado para fornecer um arquivo de saída com os resultados monitorados a cada 12 (doze) horas. A FIGURA 4.13 mostra os detalhes da configuração de entrada no software de monitoração da parede de concreto armado.

PARÂMETROS	VALOR
Tipo de Arquivo	Série Temporal
Nome do Arquivo	C:\Ensaio_Parede\Serie102.TEM
Data/hora	08/jul/2004 15:34:39
Comentário Principal	dissert0001 a dis0103
Frequência de Amostragem	0,2 Hz
Duração	50 dia(s) 22:34:04
Número de Amostras / Canal	880249
Número de Canais Ativos	16
Número de Eventos	0

FIGURA 4.13 – Detalhes do ensaio.

Os dados coletados no ensaio são apresentados em forma de curvas temporais devido ao elevado número de amostras coletadas (880249 amostras no total). As FIGURAS 4.14 à 4.23 mostram os resultados obtidos através dos sensores de deslocamento linear. As FIGURAS 4.24 à 4.28 mostram os resultados obtidos através dos sensores de temperatura (PT100).

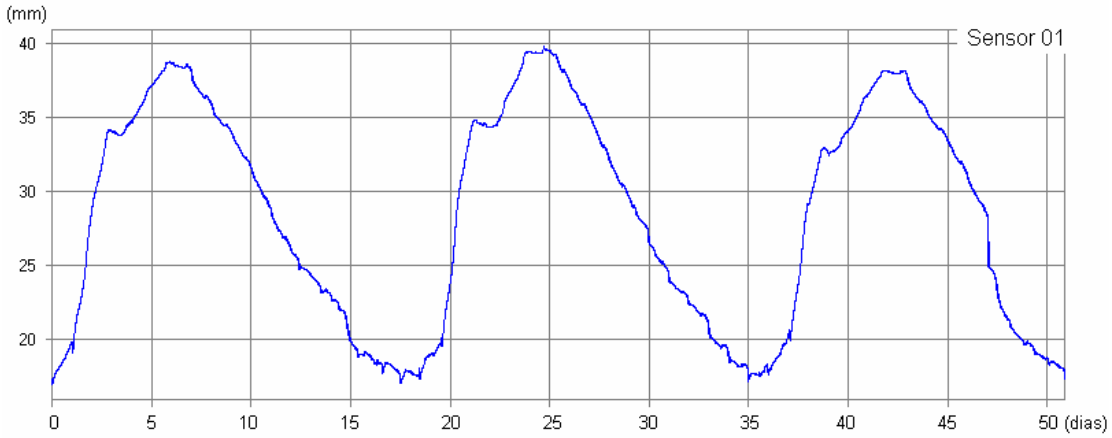


FIGURA 4.14 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 1

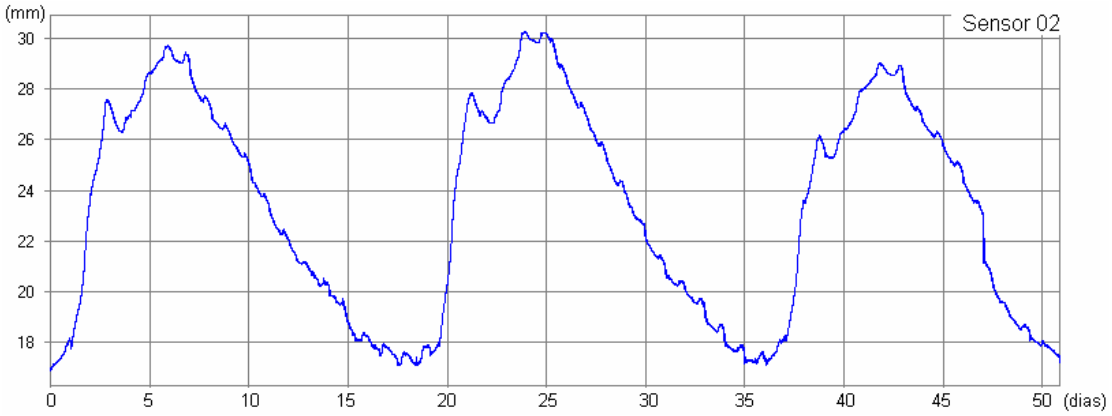


FIGURA 4.15 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 2

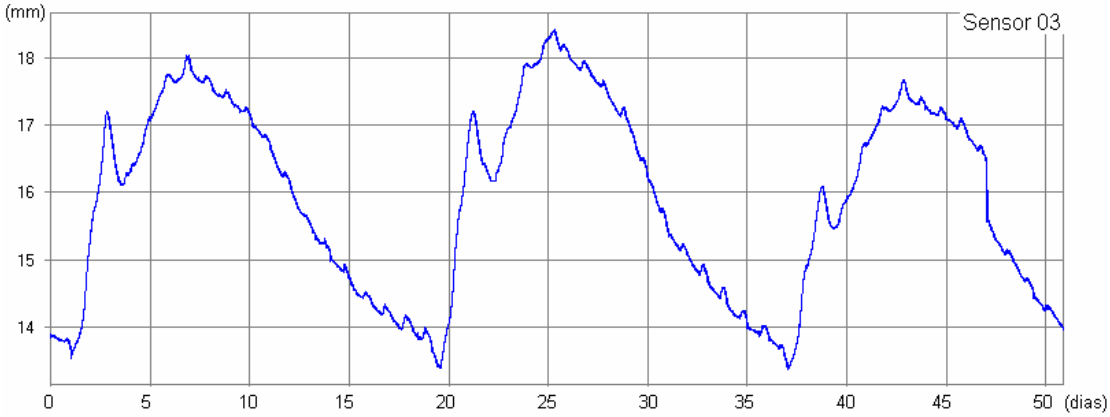


FIGURA 4.16 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 3

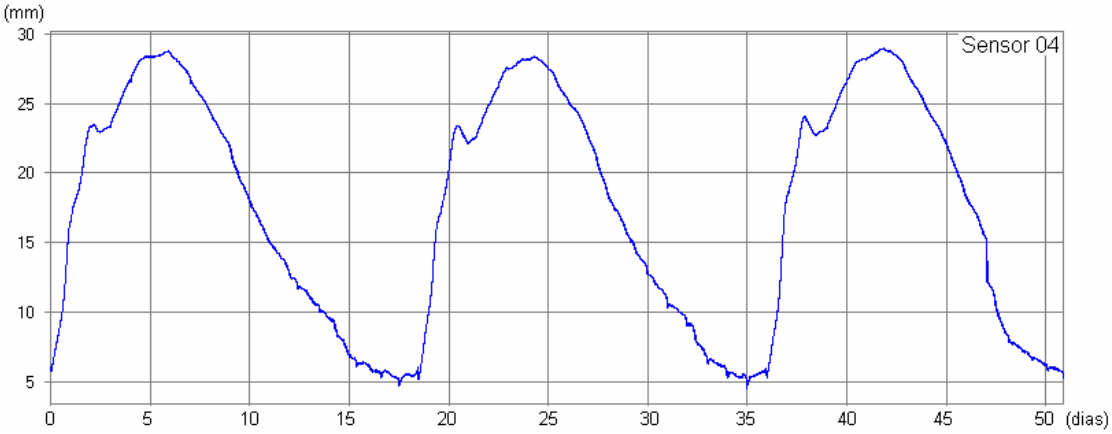


FIGURA 4.17 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 4

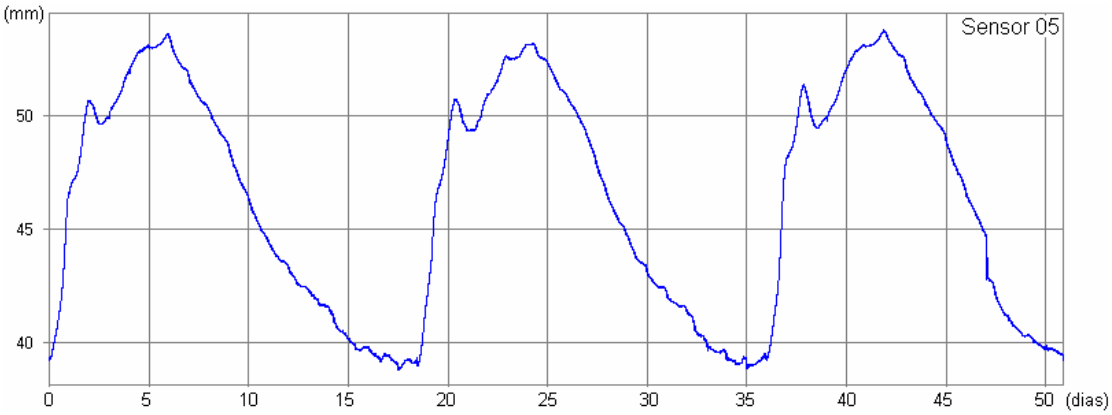


FIGURA 4.18 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 5

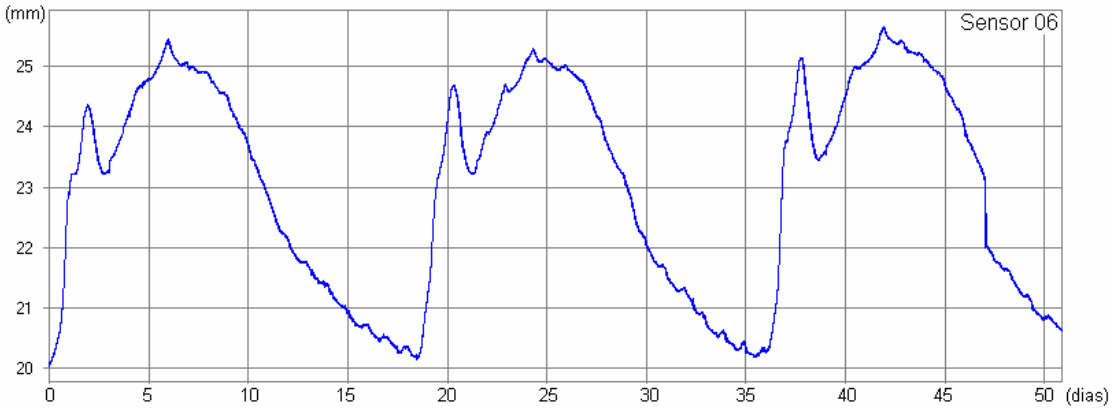


FIGURA 4.19 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 6

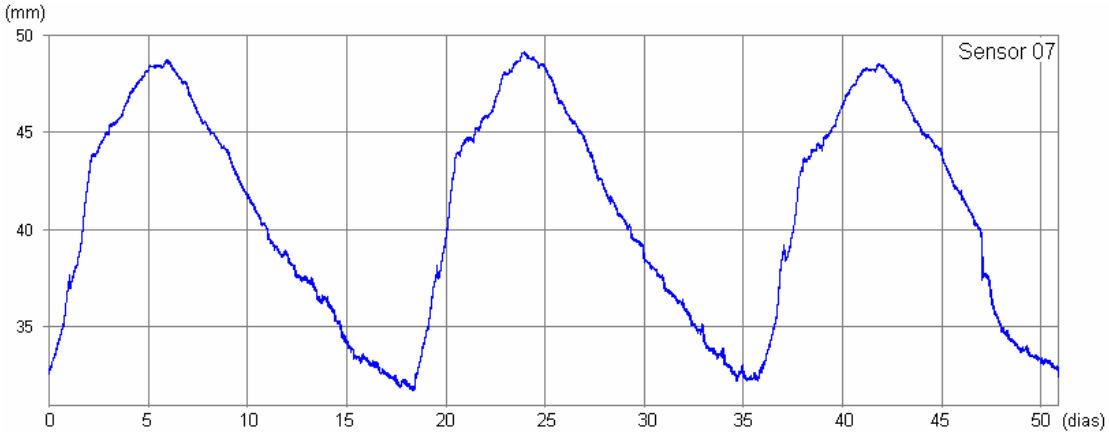


FIGURA 4.20 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 7

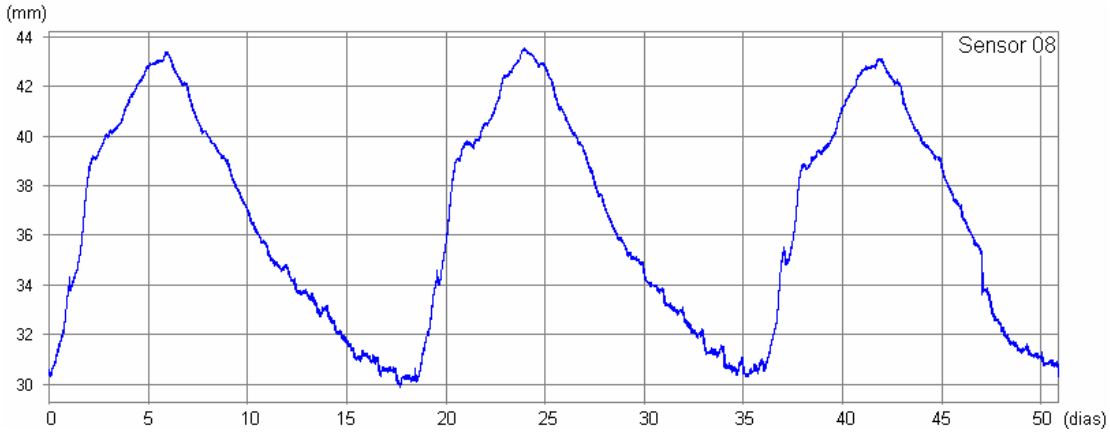


FIGURA 4.21 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 8

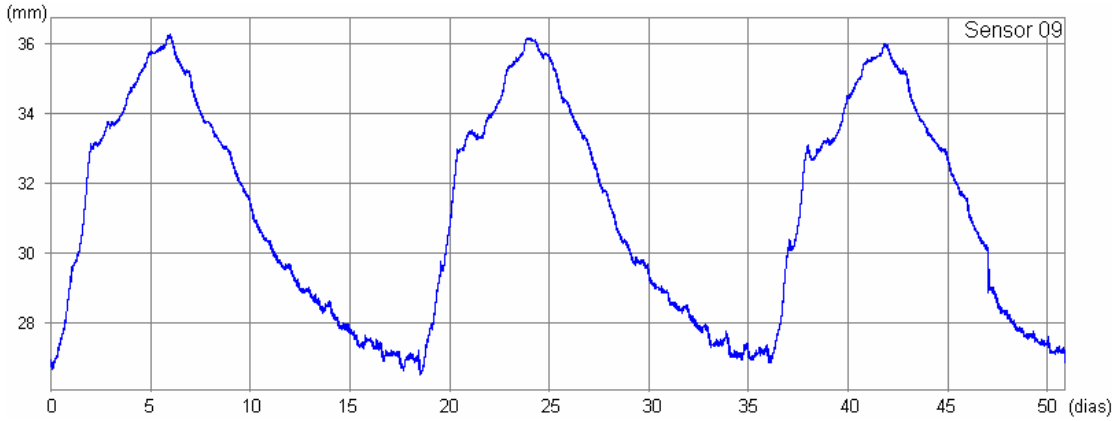


FIGURA 4.22 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 9

FIGURA 4.23 – Deslocamento vs. Tempo – Sensor 10

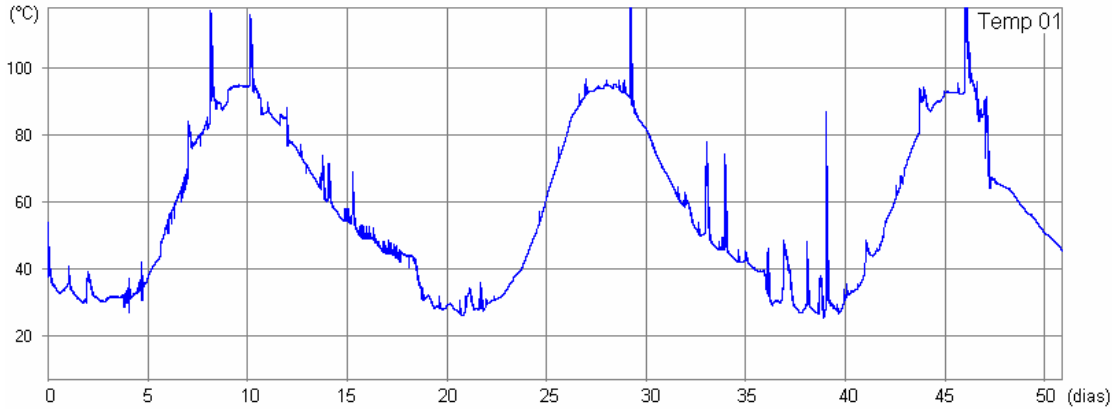


FIGURA 4.24 – Temperatura vs. Tempo – Temp 1

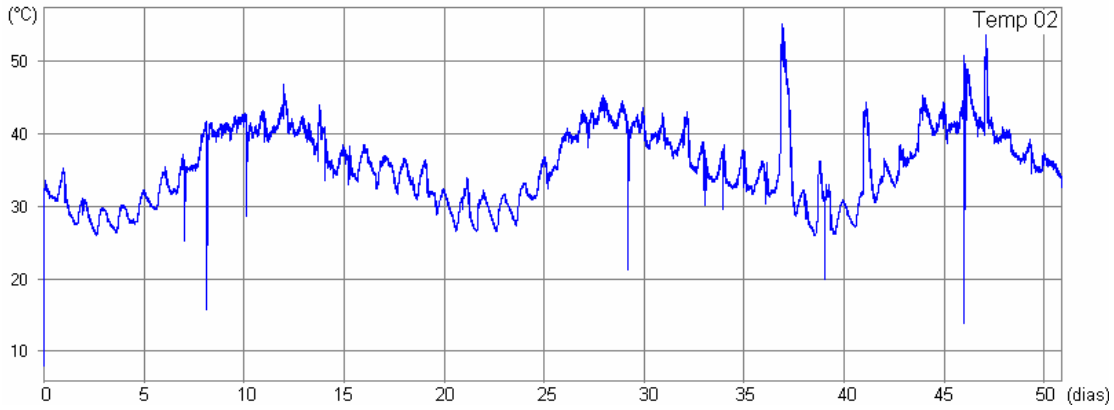


FIGURA 4.25 – Temperatura vs. Tempo – Temp 2

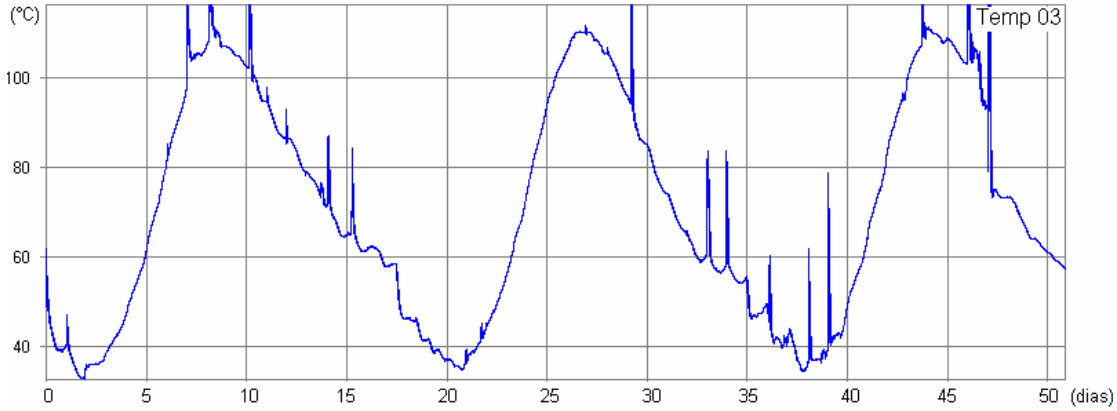


FIGURA 4.26 – Temperatura vs. Tempo – Temp 3

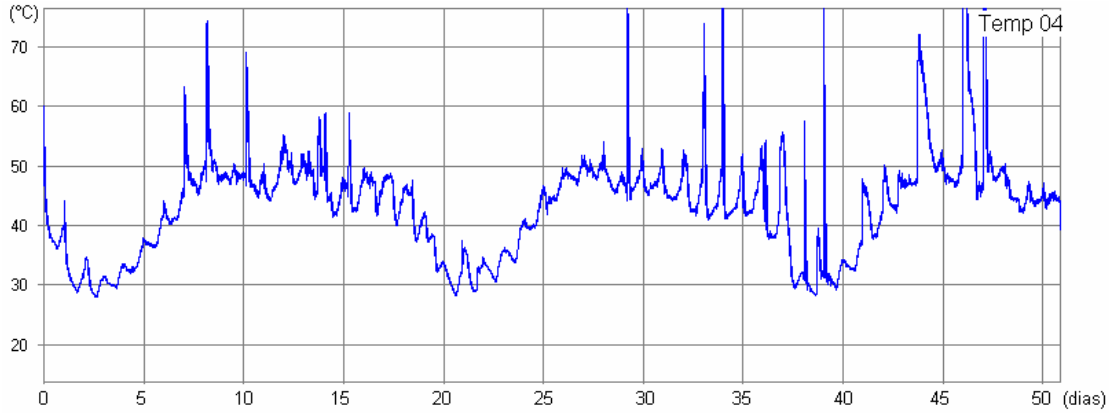


FIGURA 4.27 – Temperatura vs. Tempo – Temp 4

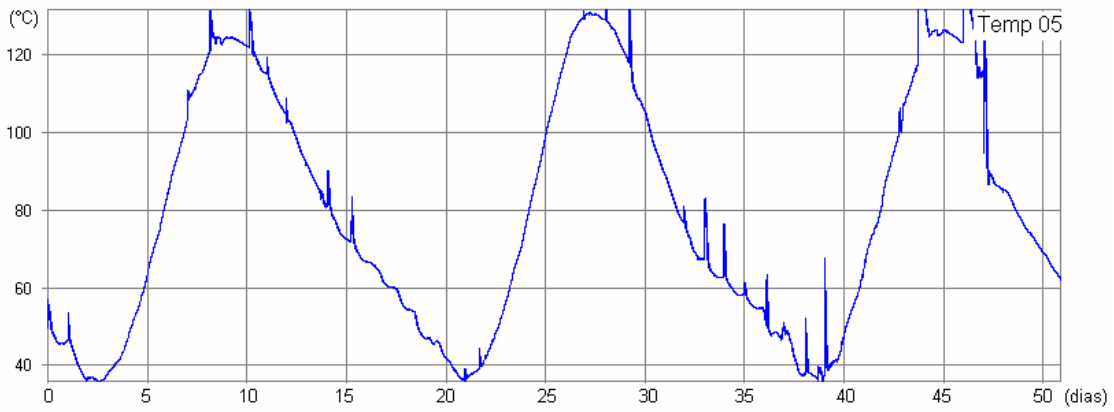


FIGURA 4.28 – Temperatura vs. Tempo – Temp 5

O resultados do sensor Temp 6 foram desconsiderados pois apresentou problemas de comunicação no andamento do ensaio.

Em linhas gerais observaram-se nas figuras anteriores três grandes ciclos de variação dos resultados, com variação de 18 (dezoito) dias, os quais correspondem ao próprio ciclo de operação do forno (fogo). Além disso, observam-se também variações menores, correspondente ao período de um dia, as quais são ocasionadas por variações térmicas externas diárias (ciclo dia/noite).

Não foi possível justificar a presença dos picos (*spikes*) mostrados nas figuras, que ocorrem uma vez por dia, especialmente para os sensores de temperatura. É possível que estes picos tenham sido provocados por alguma interferência eletromagnética no sistema de aquisição de dados, em função do acionamento de algum equipamento, ou então, em função de alterações na rede elétrica da fábrica, que também possuem ciclo diário.

5. Análise computacional

Nesta pesquisa foram desenvolvidos modelos computacionais pelo MEF com auxilio do programa computacional Algor, para determinação da distribuição de temperatura e as correspondentes tensões e deformações de origem térmica na estrutura. O primeiro modelo estudado refere-se à estrutura original, utilizando-se a geometria atual da parede. Este primeiro estudo teve por objetivo a validação do modelo numérico, através da comparação dos resultados numéricos com resultados experimentais. A partir do modelo computacional validado, foram desenvolvidos novos modelos numéricos contendo alterações referentes a diversas propostas de reforços.

Para representação dos materiais da estrutura foram admitidas as hipóteses de linearidade e isotropia. Foram realizadas três análises: análise térmica estacionária, análise térmica transiente e análise de tensões utilizando o resultado das análises térmicas. Nas análises térmicas transientes foram admitidas a evolução das temperaturas nas fases de pré-aquecimento e fogo forçado do processo de operação do forno. Os modelos empregam elementos finitos tridimensionais, do tipo *brick* com 8 (oito) nós cada elemento.

Nas análises de tensões foi considerada a interação solo-estrutura e foi desconsiderado o efeito da gravidade, devido ao fato da estrutura já se encontrar em equilíbrio, no momento da instalação dos sensores. Como ação para a análise de tensões foi considerada apenas a distribuição de temperatura.

5.1. Cálculo das temperaturas a partir dos resultados obtidos experimentalmente

O presente estudo considera de forma global as contribuições de geração de calor no processo de operação do forno, pois as temperaturas na parede de concreto armado foram obtidas experimentalmente durante a monitoração da estrutura, conforme apresentado a seguir.

Através das temperaturas obtidas na monitoração das faces internas e externas da camada em concreto armado da parede, são obtidas as temperaturas nas camadas referentes aos concretos isolantes (tipo A e B). A FIGURA 5.1 ilustra o sistema em estudo.

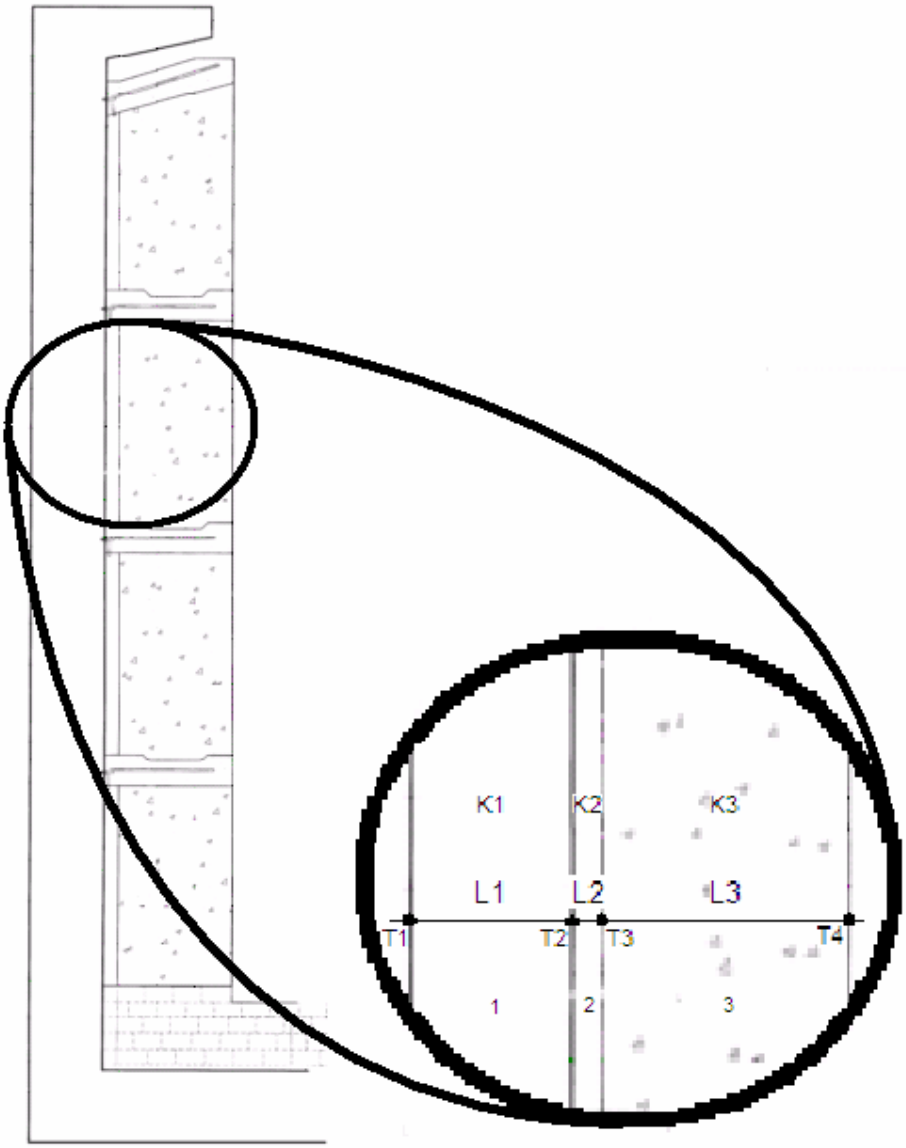


FIGURA 5.1 – Parâmetros utilizados no estudo de distribuição de temperatura da parede

Experimentalmente, foram obtidas as temperaturas T_1 e T_2 (FIGURA 5.1) ao longo do ciclo de operação do forno. Na análise seguinte, será considerado apenas o caso de maior gradiente térmico na parede, o qual corresponde aos seguintes valores para as temperaturas indicadas na figura: T_1 = 45°C (318,15K) e T_2 = 130°C (403,15K).

A condutividade térmica do concreto convencional foi obtida experimentalmente, conforme descrito no capítulo 3, correspondendo ao valor de k_1 =1,18 W/mK. Os dados dos dois concretos isolantes foram fornecidos pelo fabricante: k_2 = 0,14W/mK e k_3 = 0,42W/mK.

Para obter as temperaturas T_3 e T_4, foi considerado que a condução de calor se encontra em regime estacionário e unidimensional. Com base nestas hipóteses, pode-se então afirmar que o fluxo de calor é o mesmo nas três camadas.

As camadas possuem as seguintes espessuras: L_1=0,20m, L_2=0,10m e L_3=0,46m.

Em função das argumentações expostas acima, pode-se determinar as temperaturas T_3 e T_4, e o fluxo de calor na parede, utilizando-se a equação de acordo com o desenvolvimento abaixo:

$$q_1 = q_2 = q_3$$

$$\frac{k_1 \Delta T_1}{L_1} = \frac{k_2 \Delta T_2}{L_2} = \frac{k_3 \Delta T_3}{L_3}$$

$$\therefore \; q_1 = 501,50 \frac{w}{m^2}$$

$$\therefore \; T_3 = 761,37K$$

$$\therefore \; T_4 = 1310,63K$$

Após a determinação da estimativa da temperatura T_4, correspondente a face mais interna da parede, esta pode ser fornecida como uma condição de contorno (eq 0.12) para o modelo de Elementos Finitos.

5.2. Análise dos esforços mecânicos na estrutura de concreto armado

Os possíveis efeitos mecânicos externos que poderiam interferir no comportamento da parede foram analisados um a um para se saber o grau de influência nas deformações cíclicas observadas na estrutura. Os prováveis efeitos mecânicos considerados na parede externa foram: dilatação da *head wall*; dilatação da viga localizada abaixo da *head wall*; reação/contenção proporcionada pela estrutura metálica localizada na lateral do forno (piso operacional); deformação da *flue wall;* e deformação da sola (camada isolante do piso do forno).

A *head wall* e a viga de apoio da *head wall* ficam localizadas na linha do pilar da parede de concreto armado do forno. Porém foi descartada a possibilidade destes efeitos mecânicos por estas estruturas apresentarem juntas de dilatação com folgas superiores às

dilatações dos materiais, conforme está demonstrado no desenvolvimento auto-explicativo abaixo.

$$\Delta L_{HeadWall} = \alpha_{HeadWall} \Delta T L$$

$$\Delta L_{HeadWall} = 41,28mm < 70,00mm \quad \text{da junta de dilatação}$$

$$\Delta L_{Viga} = \alpha_{Viga} . \Delta T . L$$

$$\Delta L_{Viga} = 8,52mm < 28,00mm \quad \text{da junta de dilatação}$$

As FIGURAS 5.2 e 5.3 ilustram a junta de dilatação entre a parede de concreto armado e a própria viga.

FIGURA 5.2 – Junta de dilatação na viga

FIGURA 5.3 – Detalhe da junta de dilatação

O efeito de restrição do piso operacional foi desconsiderado pelo fato do mesmo apresentar 50 (cinqüenta) milímetros de afastamento em relação à parede do forno. No monitoramento da estrutura do forno foram obtidos deslocamentos máximos de 23 (vinte e três) milímetros no topo da parede. As FIGURAS 5.4 e 5.5 ilustram o espaçamento entre a parede de concreto armado e o piso operacional.

FIGURA 5.4 – Espaçamento entre a parede de concreto armado e o piso operacional

FIGURA 5.5 – Detalhe do espaçamento

Os efeitos de dilatação da sola e da flue wall, não puderam ser medidos diretamente. Porém estima-se que estes efeitos são muito pequenos, sendo desconsiderados na análise.

5.3. Modelo com as dimensões reais

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. As FIGURAS 5.6 e 5.7 ilustram o modelo computacional da parede do forno de cozimento de anodo com as dimensões reais. Na cor azul está representado o solo (areia compacta), nas cores rosa, verde e marrom o concreto armado e nas cores vermelha e laranja os dois tipos de concreto isolante. Embora não esteja representado na figura, os deslocamentos dos nós situados nas superfícies verticais do contorno da região em areia foram restringidos.

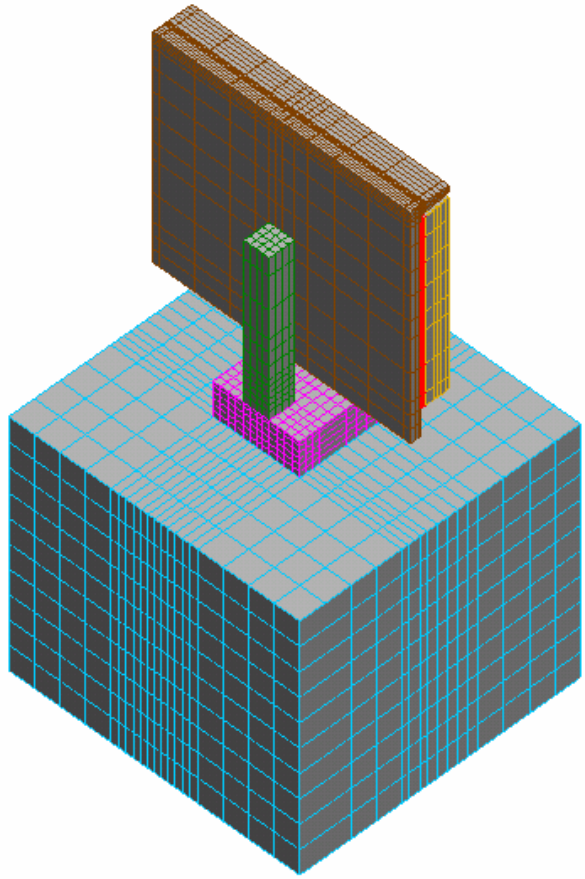


FIGURA 5.6 – Modelo em elementos finitos com a geometria real da estrutura.

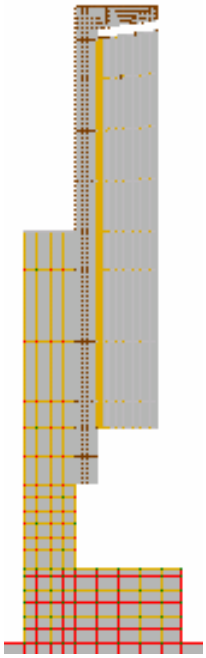


FIGURA 5.7 – Seção transversal vertical do
modelo de elementos Finitos

O resultado da análise térmica estacionária, com a representação gráfica das isotermas está ilustrado na FIGURA 5.8.

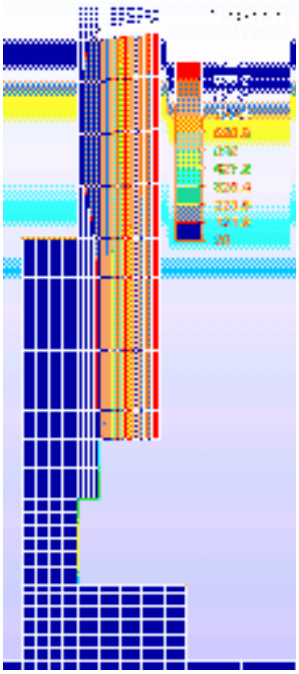
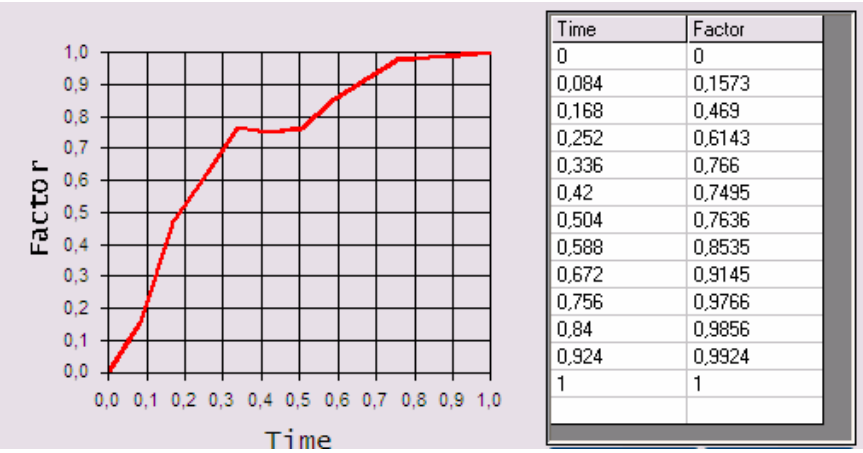


FIGURA 5.8 – Perfil térmico do modelo – análise estacionária

A análise térmica transiente leva em consideração o tempo e a curva de carregamento que a estrutura é submetida devido o efeito térmico. O tempo obtido experimentalmente para a temperatura atingir o seu valor máximo são de 6 (seis) dias. A curva de evolução da variação de temperatura está ilustrada na FIGURA 5.9.



Time	Factor
0	0
0,084	0,1573
0,168	0,469
0,252	0,6143
0,336	0,766
0,42	0,7495
0,504	0,7636
0,588	0,8535
0,672	0,9145
0,756	0,9766
0,84	0,9856
0,924	0,9924
1	1

FIGURA 5.9 – Curva da variação de temperatura utilizada na análise transiente

A curva de evolução da temperatura foi obtida com o auxílio de termopares durante o ciclo de operação do cozimento de anodo. A geração de calor ocorre nas fases de preaquecimento e fogo forçado, as quais correspondem aos 6 (seis) dias necessários para que se atinja a temperatura máxima.

As FIGURAS 5.10 e 5.11 representam as distribuições do campo de temperatura na estrutura, resultado da análise térmica transiente. Esta análise leva em consideração o efeito do tempo, na propagação do fluxo de calor e distribuição de temperatura na estrutura, em função do calor específico de cada material.

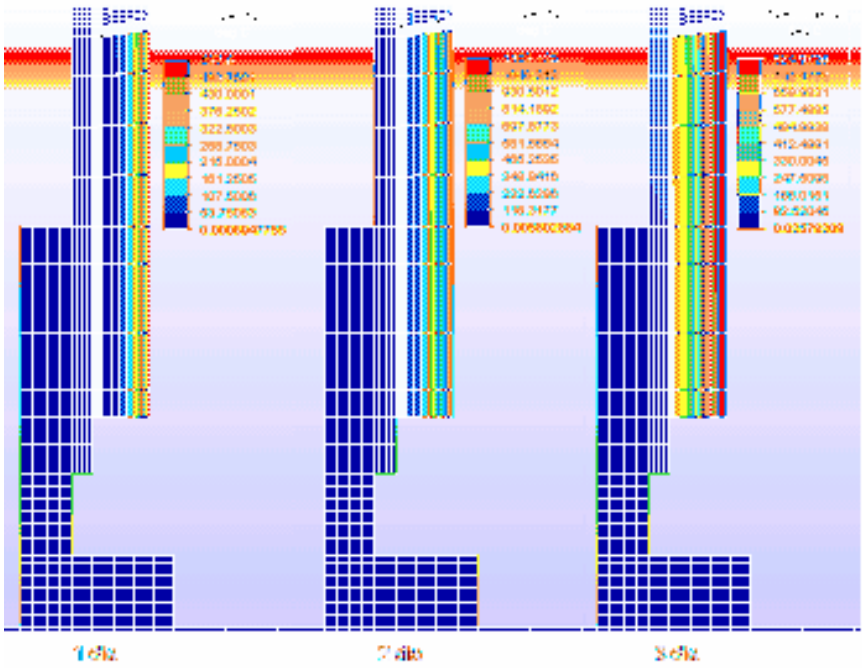


FIGURA 5.10 – Perfil térmico do modelo na análise transiente

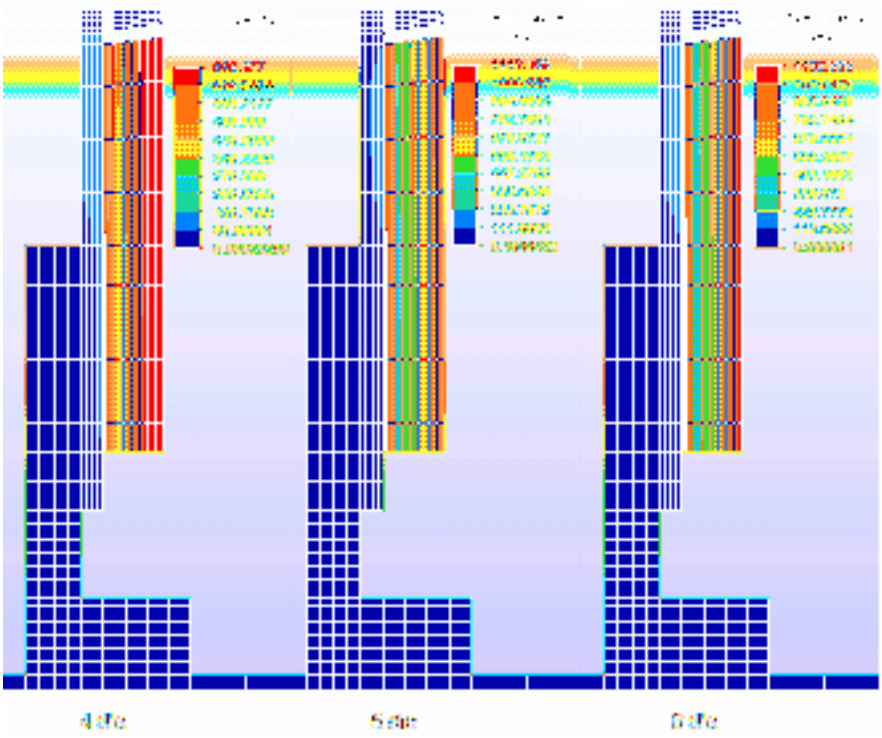


FIGURA 5.11 – Perfil térmico do modelo na análise transiente

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 5.12.

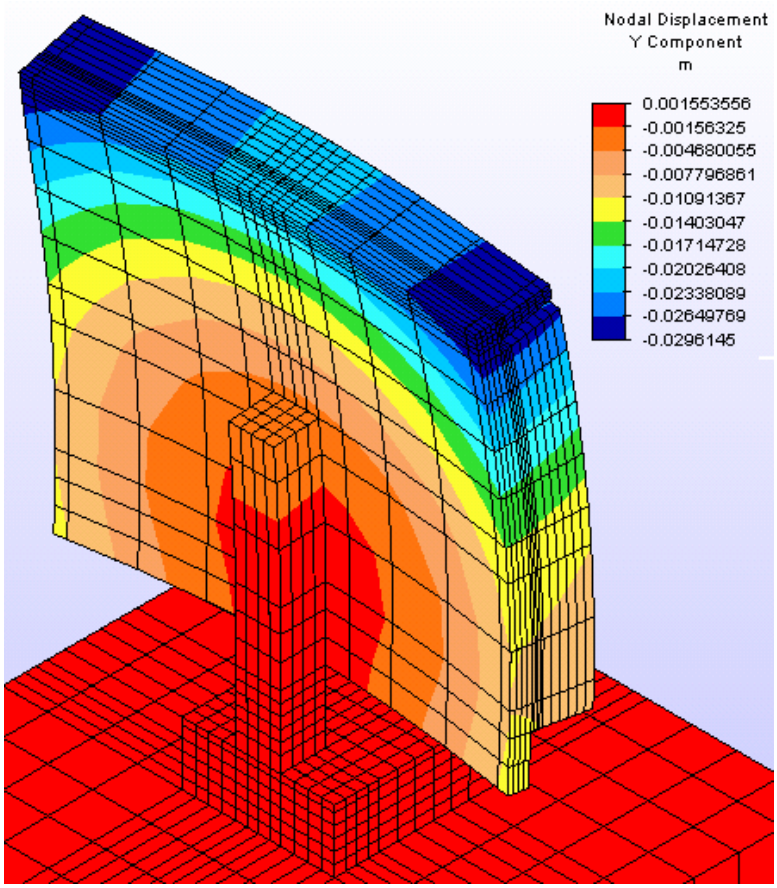


FIGURA 5.12 – Modelo deformado devido o efeito térmico

Nesta análise já é possível observar que os maiores deslocamentos ocorrem nas extremidades da placa em concreto armado, sendo que o pilar apresentou uma menor deformação.

As FIGURAS 5.13 à 5.16 ilustram as representações das tensões na estrutura devido o efeito térmico. Embora a parede em estudo seja uma estrutura em concreto armado, optou-se por representar as tensões de Von Mises, tradicionalmente utilizadas para estudo de escoamento em materiais dúcteis. A justificativa para a utilização desta representação foi o fato destas tensões representarem a contribuição geral das várias componentes de tensão para o escoamento do material em um estado complexo de tensões.

Entretanto, embora o concreto tenha um comportamento frágil, a estrutura em concreto armado pode ter um comportamento dúctil, dependendo do taxa e do detalhamento da armadura utilizada, o que de certa forma também valida, pelo menos parcialmente, a apresentação das tensões de Von Mises neste trabalho.

Naturalmente, a representação de um critério mais apropriado para materiais frágeis seria mais adequado neste trabalho, porém como isto não estava disponível no programa utilizado (Algor), esta representação não foi obtida.

Além disso, uma análise que considerasse a não linearidade física (do material) da estrutura seria mais apropriada, mas isto implicaria em complexidades adicionais ao estudo, estando fora do escopo deste trabalho.

Por servirem como uma representação mais apropriada para o nível de esforços presentes na estrutura, são apresentadas também as tensões principais no material.

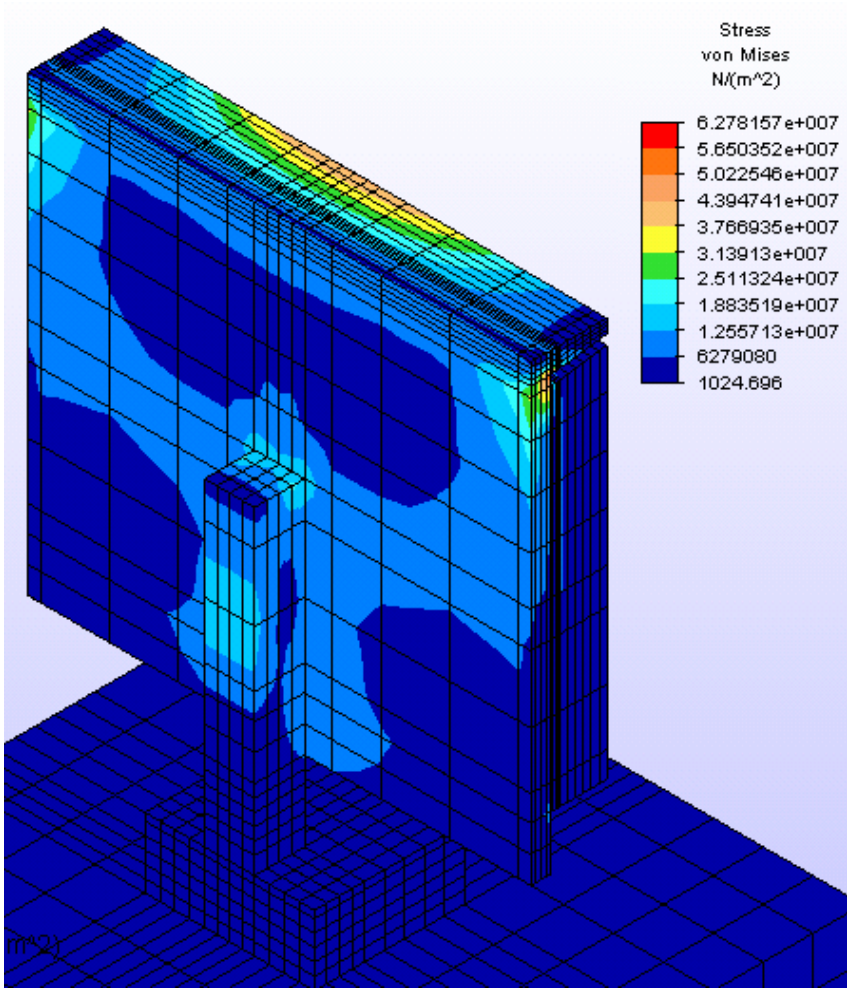


FIGURA 5.13 – Representação das tensões de Von Mises

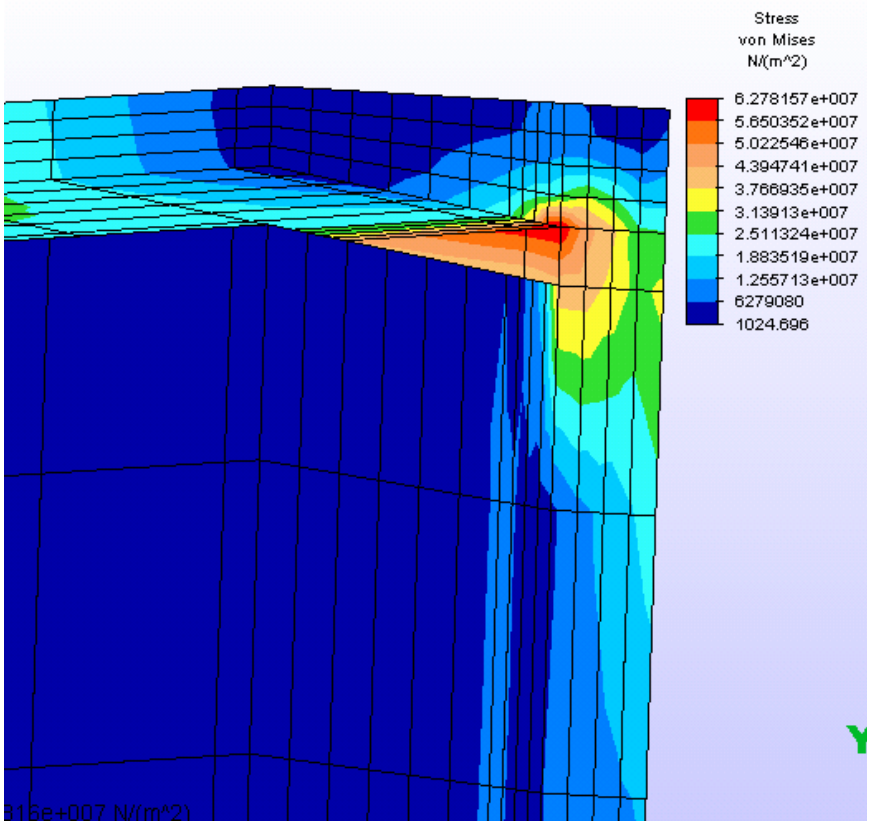


FIGURA 5.14 – Detalhe da representação de tensões de Von Mises indicando região com concentração de tensões.

Na análise da representação das tensões de Von Mises observou-se uma concentração de tensões na extremidade da parede, próximo a borda de concreto armado, conforme está representado no detalhe da FIGURA 5.14.

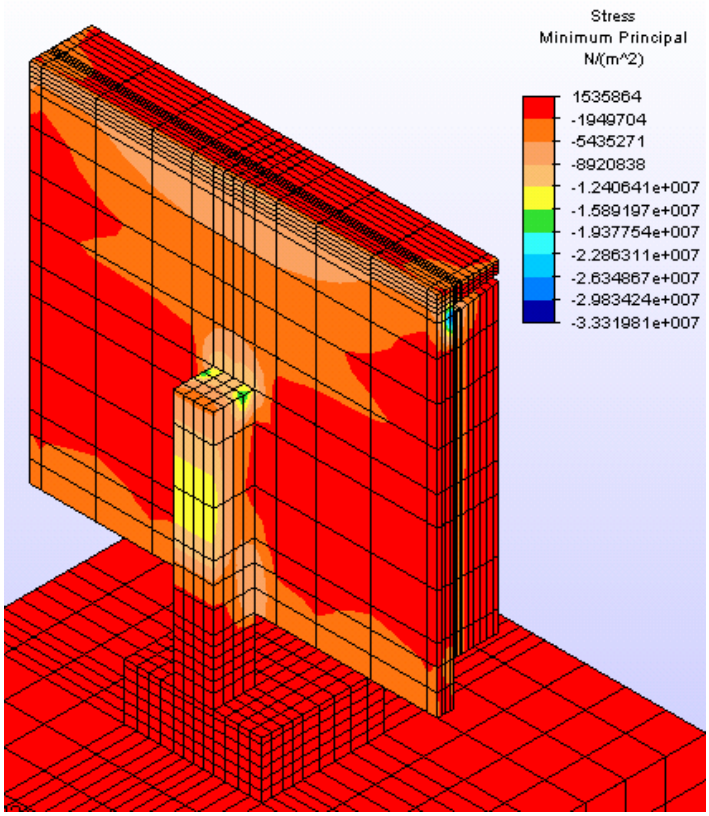


FIGURA 5.15 – Representação das tensões principais mínimas – Modelo real

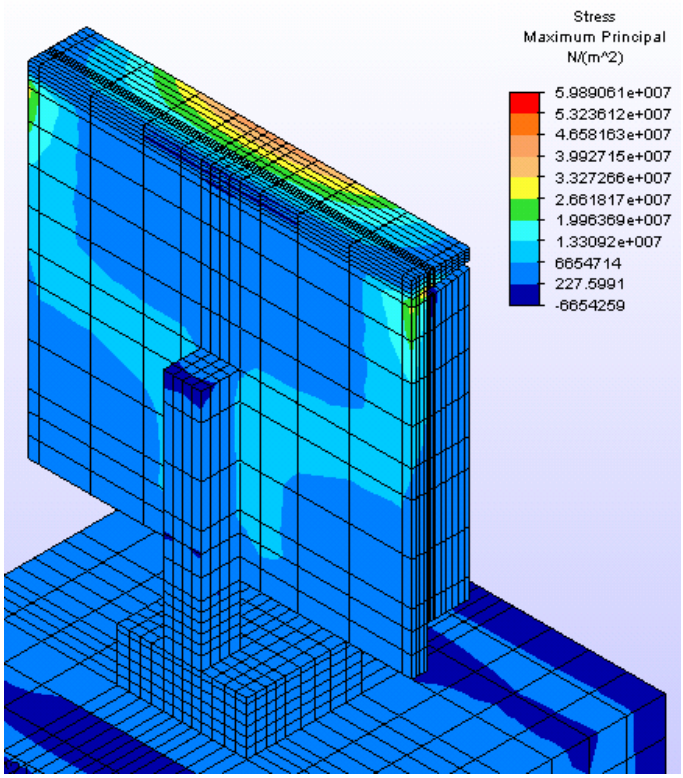


FIGURA 5.16 – Representação das tensões principais máximas – Modelo real

Deve-se destacar que os resultados referentes às tensões apresentadas devem ser avaliados de forma qualitativa, e não quantitativa, já que a análise foi baseada nas hipóteses de material linear elástico e homogêneo (sem consideração das armaduras), o que conduz a baixa precisão para determinação de tensões em elementos estruturais em concreto armado. Em função disso, observam-se valores demasiadamente elevados para as tensões.

Entretanto, a configuração deformada da estrutura, assim como os valores obtidos para os deslocamentos máximos estão em boa concordância com os valores obtidos experimentalmente.

5.4. Análise do efeito da variação das propriedades dos materiais no comportamento da estrutura

Após a conclusão do primeiro modelo computacional, foi realizado um estudo sobre a influência de cada uma das propriedades do material quanto à deformação da parede, objetivando-se determinar as propriedades mais importantes. Para isto, foram realizadas mais duas análises da estrutura referente as variações de cada propriedade, uma com o dobro do valor e a outra com a metade do valor de referência da propriedade em questão. Os valores de referência utilizados são aqueles mostrados na TABELA 5.1. Os resultados destas análise, utilizando-se o deslocamento do ponto do Sensor 04 (Ver FIGURA 4.17) são representados na TABELA 5.1 e FIGURA 5.17.

TABELA 5.1 – Resultado das análises com as variações das propriedades

Análise da Variação dos Deslocamentos em Função das Propriedades dos Materiais						
	Deslocamentos na Posição do Sensor04					
	Concreto Armado	Variação	Concreto Isolante	Variação	Bloco Concreto Isolante	Variação
Experimental do Sensor04	23,30	-	23,30	-	23,30	-
Modelo Real com as propriedades inalteradas	23,44	0,60%	23,44	0,60%	23,44	0,60%
Variação da deformação com a modificação das propriedades listadas abaixo:						
(2x) módulo elasticidade (tensile)	21,83	-6,87%	23,74	1,28%	23,92	2,05%
(1/2) módulo elasticidade (tensile)	24,67	5,25%	23,18	-1,11%	22,87	-2,43%
(2x) coeficiente de poisson	23,36	-0,34%	23,54	0,43%	23,59	0,64%
(1/2) coeficiente de poisson	23,48	0,17%	23,40	-0,17%	23,37	-0,30%
(2X) Módulo elasticidade (shear)	23,81	1,58%	23,51	0,30%	23,59	0,64%
(1/2) Módulo elasticidade (shear)	22,98	-1,96%	23,33	-0,47%	23,22	-0,94%
(2x) Conditividade Térmica	23,99	2,35%	21,11	-9,94%	25,34	8,11%
(1/2) condutividade Térmica	22,48	-4,10%	26,23	11,90%	21,67	-7,55%
(2x) Coeficiente de dilatação térmica	14,48	-38,23%	24,14	2,99%	55,12	135,15%
(1/2) Coeficiente de dilatação térmica	27,91	19,07%	23,08	-1,54%	7,59	-67,62%

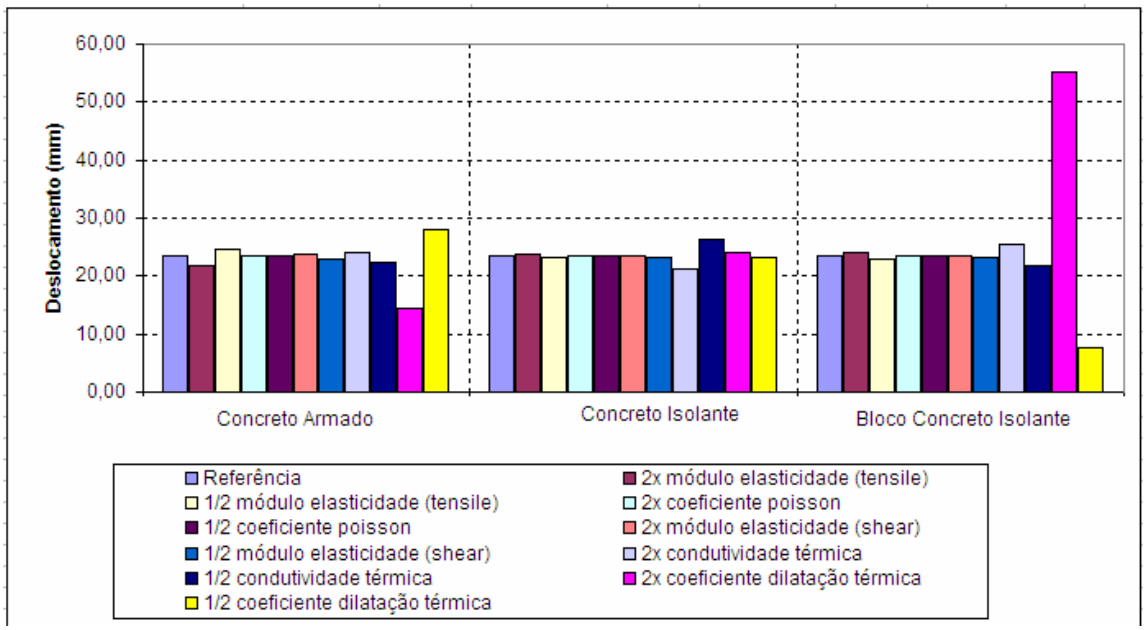


FIGURA 5.17 – Histograma com as variações das deformações devido a mudança das propriedades

Pode-se constatar, com este estudo comparativo das variações dos deslocamentos em função de mudança dos valores das propriedades dos materiais, que a propriedade mais importante é o coeficiente de dilatação térmica do bloco de concreto isolante. Isso ocorre porque este material está exposto às maiores temperaturas, por estar mais próximo da câmara de combustão, e por estar rigidamente ligado a estrutura de concreto armado.

5.5. Modelo com a Primeira Proposta de Reforço

A primeira proposta de modificação da estrutura real consiste na eliminação da junta de dilatação entre dois segmentos de parede. A FIGURA 5.18 representa esta modificação.

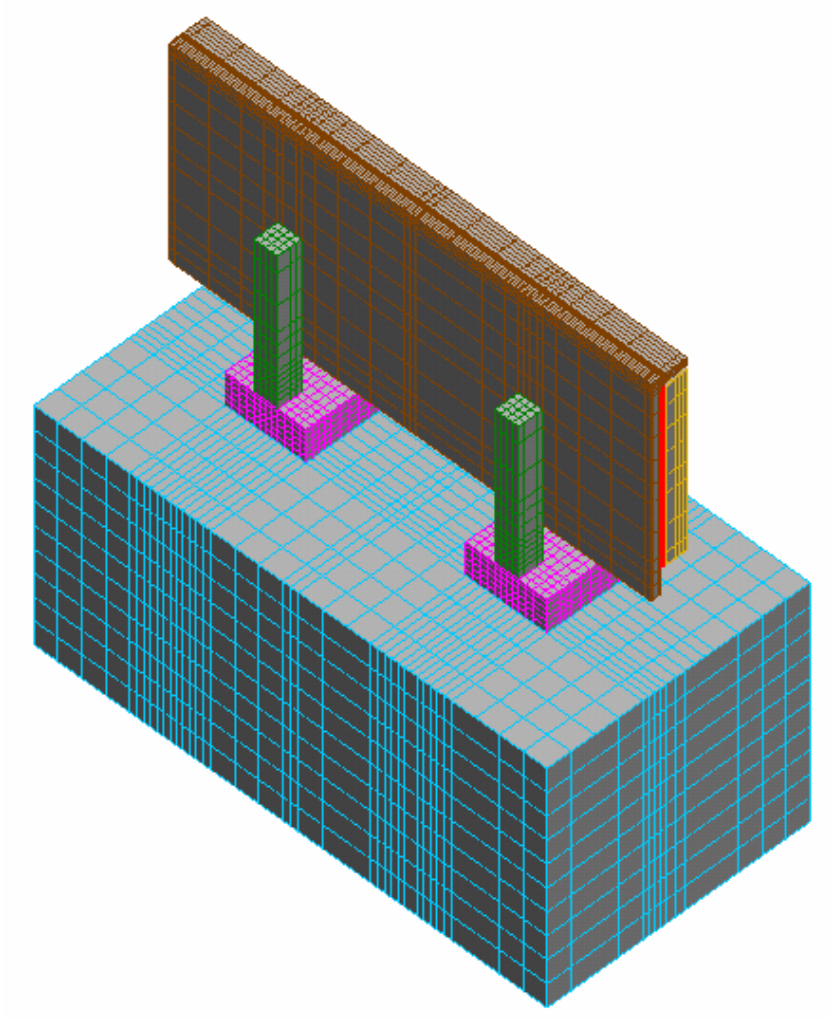


FIGURA 5.18 – Modelo em elementos finitos com a proposta de reforço tipo 1

A FIGURA 5.19 ilustra o projeto da estrutura com a primeira proposta de modificação.

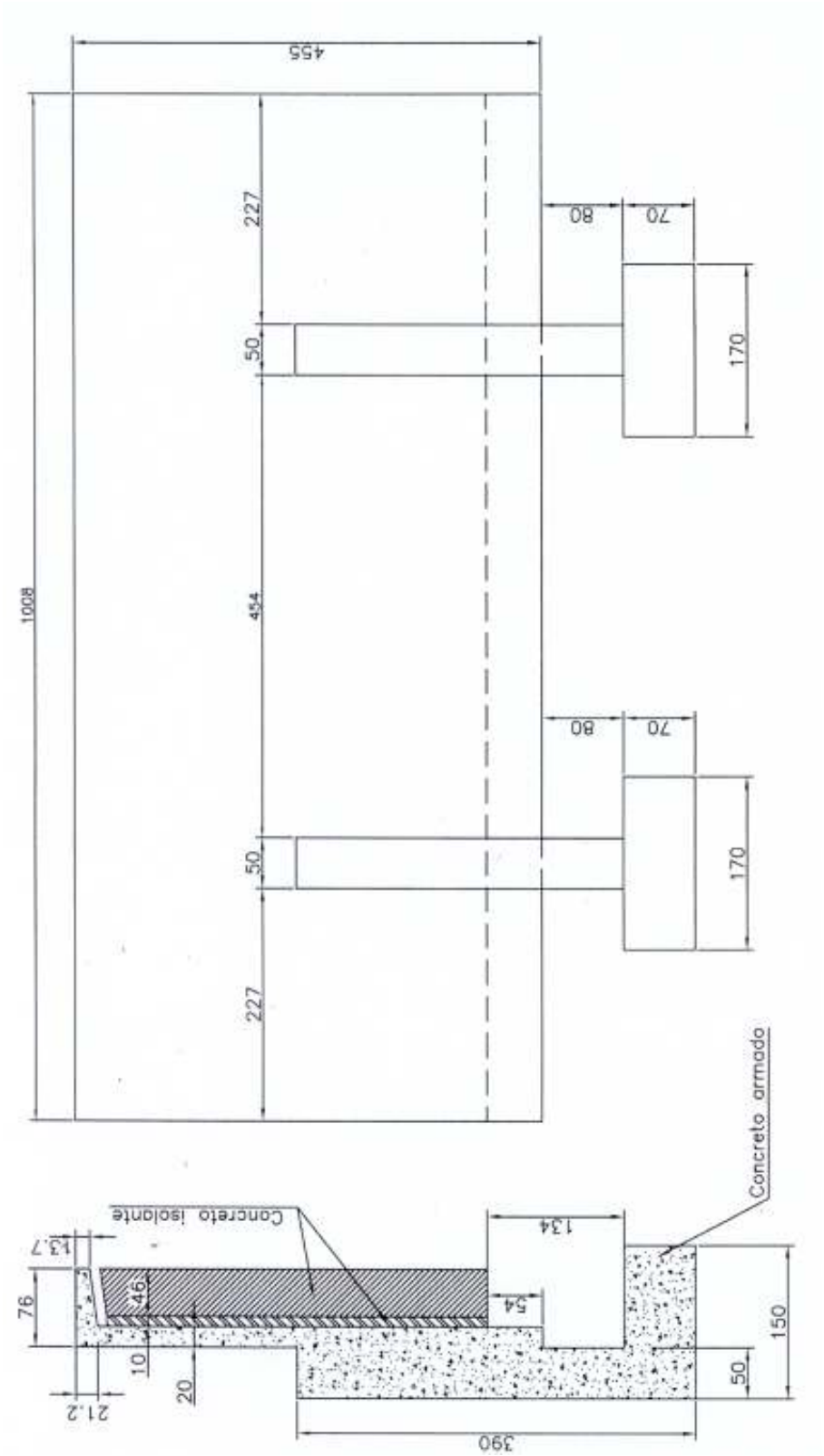


FIGURA 5.19 – Projeto da geometria do reforço tipo 1

A configuração do modelo deformado da estrutura devido ao efeito térmico é representada na FIGURA 5.20.

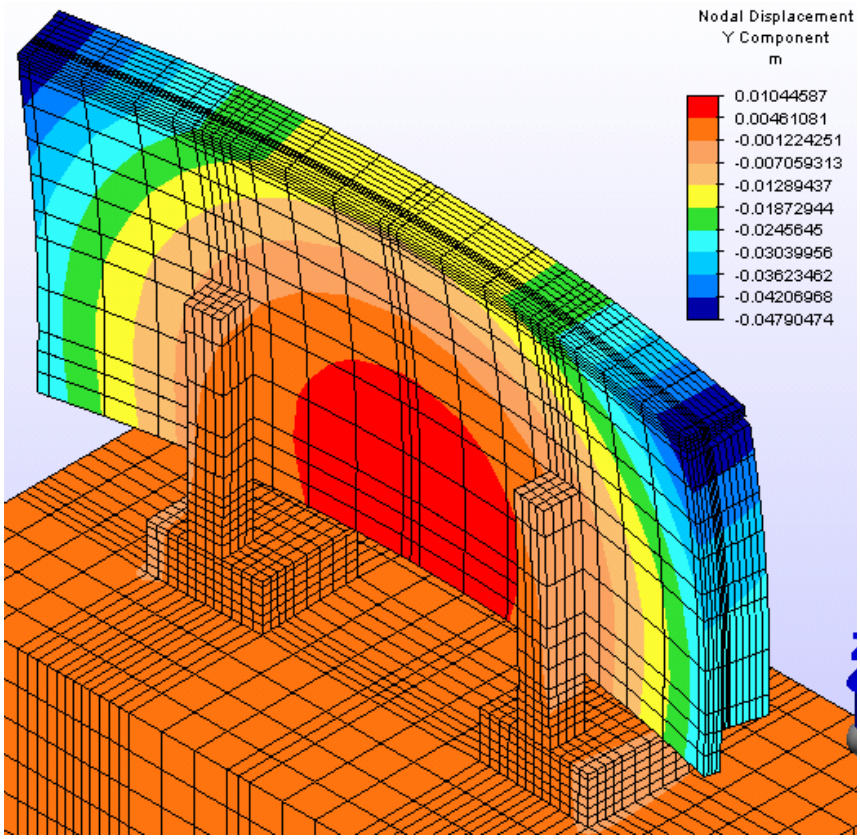


FIGURA 5.20 – Modelo deformado devido o efeito térmico do reforço tipo 1

Na análise de tensões com dois segmentos de paredes unidos, ou seja, sem junta de dilatação, observou-se um acréscimo das deformações na região central do modelo. Este resultado não é satisfatório para a parede de concreto armado, pois pode agravar as deformações já existentes, assim como agravar a evolução das trincas.

As FIGURAS 5.21 à 5.24 ilustram a distribuição de tensões na estrutura devido ao efeito térmico.

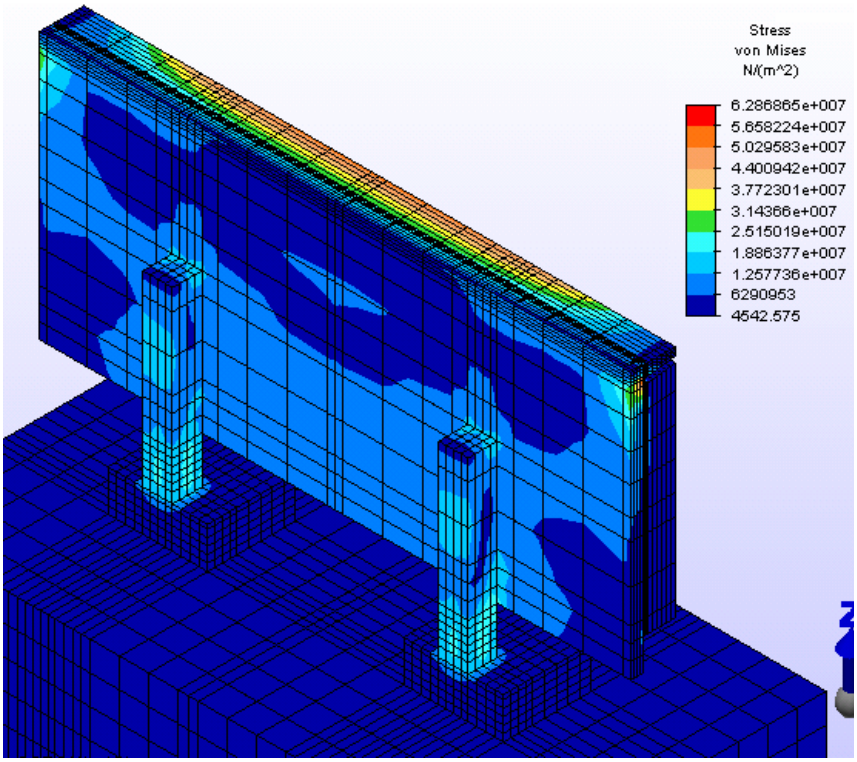


FIGURA 5.21 – Representação de tensões por von mises – Reforço 1

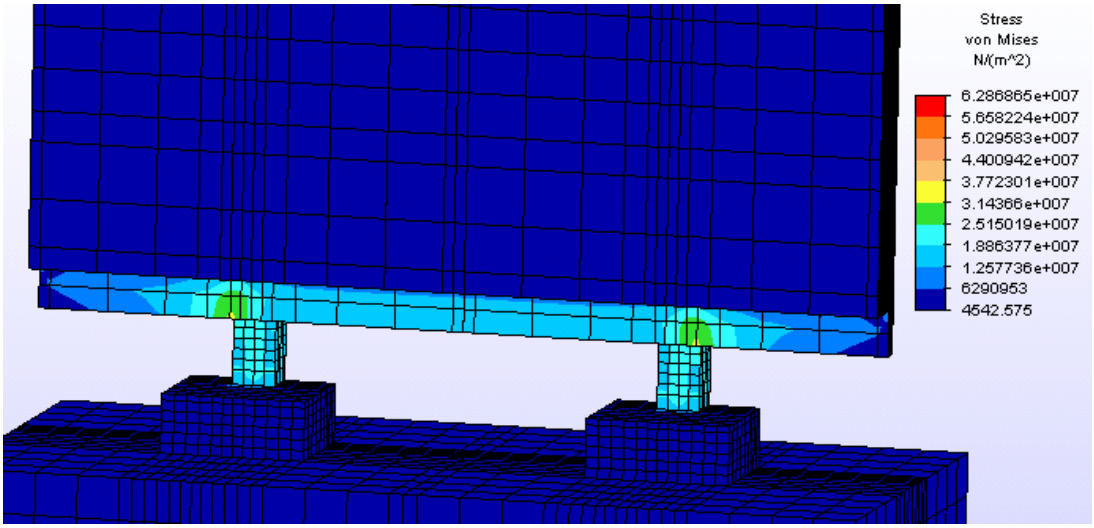


FIGURA 5.22 – Detalhe da .representação de tensões por von mises – Reforço 1

No detalhe da FIGURA 5.22 observou-se que, com a eliminação da junta de dilatação, agravou-se a concentração de tensões na face interna da placa na linha do pilar, próximo da extremidade inferior da parede. Este feito demonstra o acréscimo de tensões ao qual a estrutura estaria submetida, caso fosse adotado como solução.

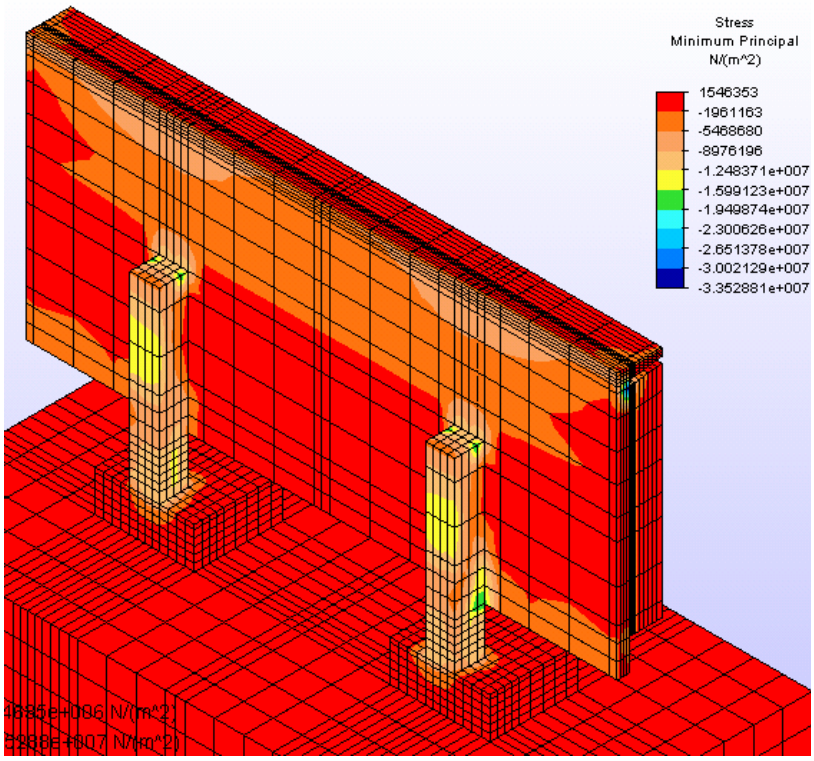


FIGURA 5.23 – Representação das tensões principais mínimas – reforço tipo 1

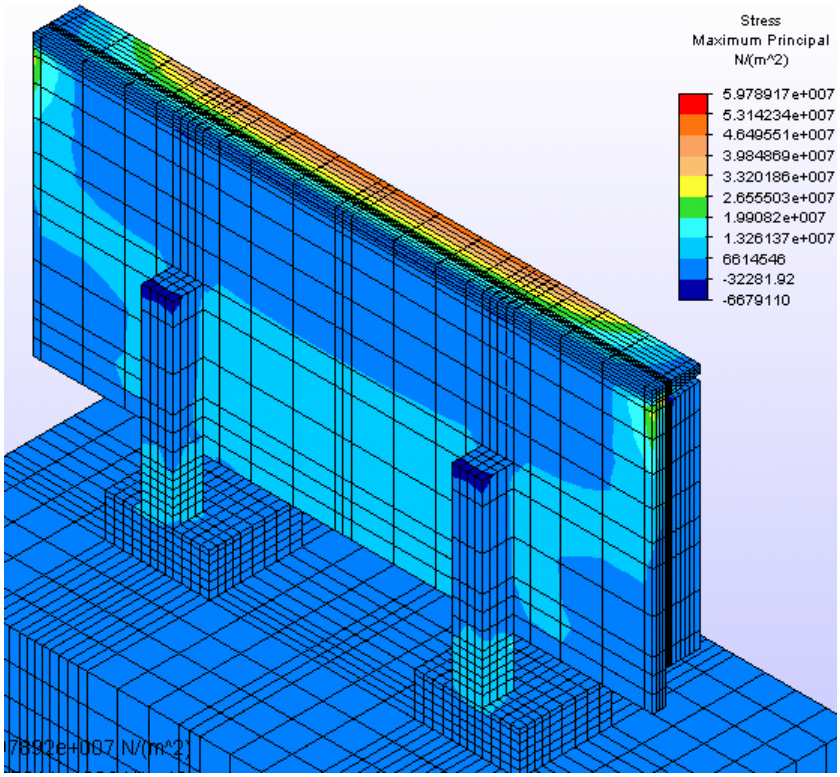


FIGURA 5.24 – Representação das tensões principais máximas – reforço tipo 1

5.6. Modelo com a Segunda Proposta de Reforço

A segunda proposta de modificação da estrutura real refere-se a alterações no bloco de fundação da estrutura e no pilar. A FIGURA 5.25 ilustra o projeto da estrutura com a proposta de modificação.

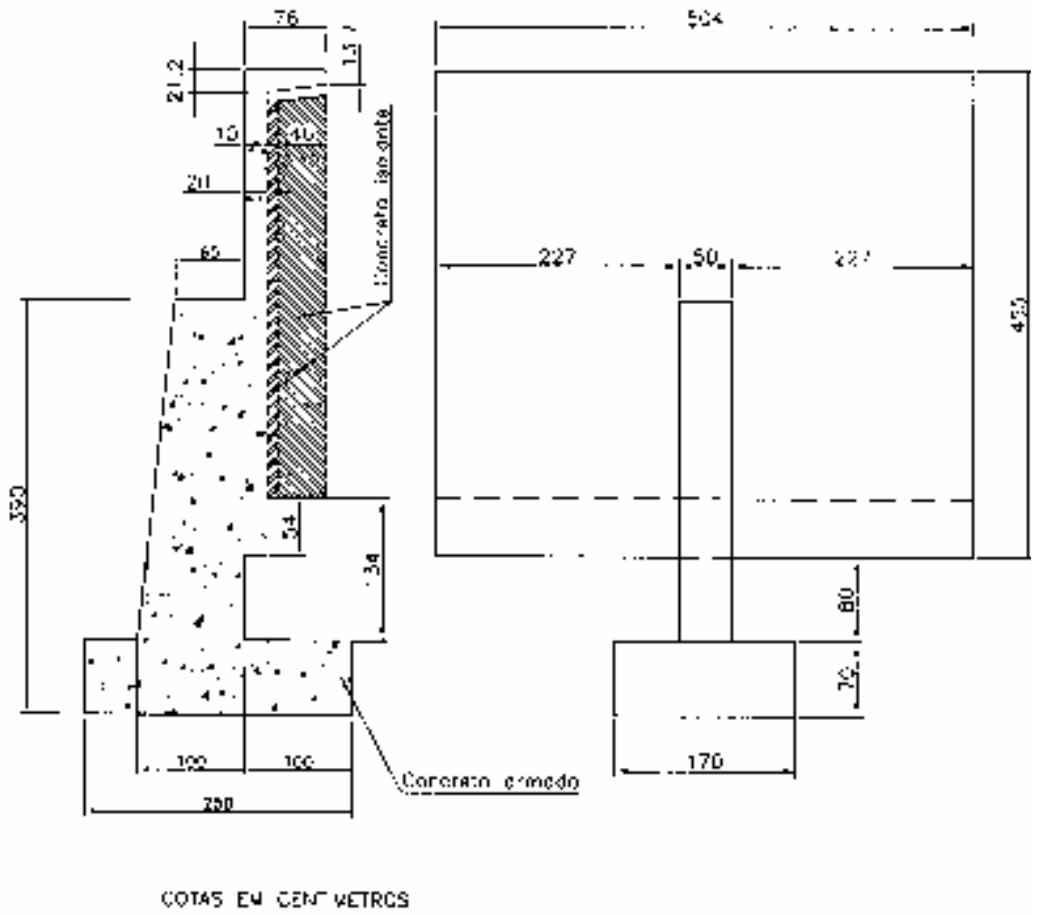


FIGURA 5.25 – Projeto do reforço tipo 2

As FIGURAS 5.26 e 5.27 ilustram o modelo computacional com a proposta de reforço tipo 2.

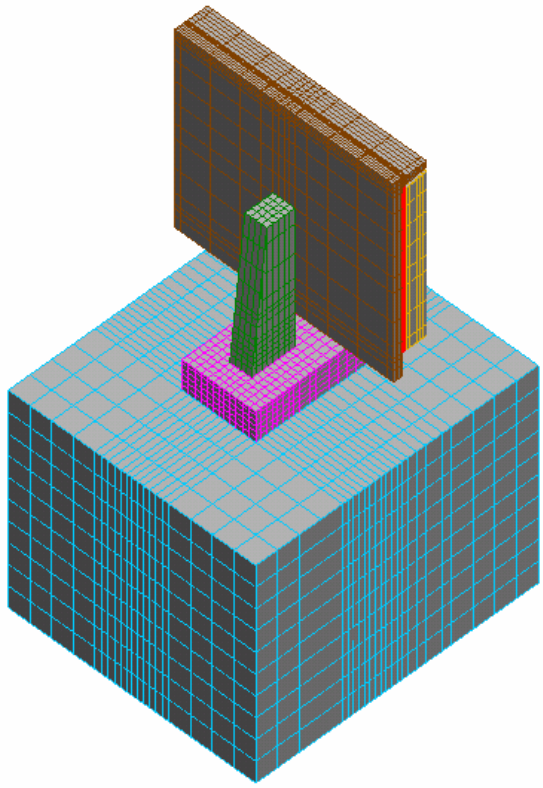


FIGURA 5.26 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 2

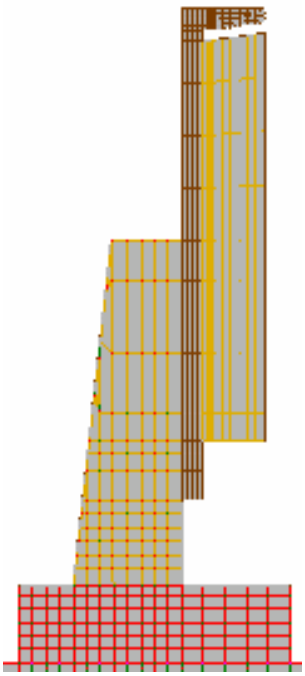


FIGURA 5.27 – Corte transversal da proposta de reforço tipo 2

A configuração do modelo deformado da estrutura referente às ações térmicas é representada na FIGURA 5.28.

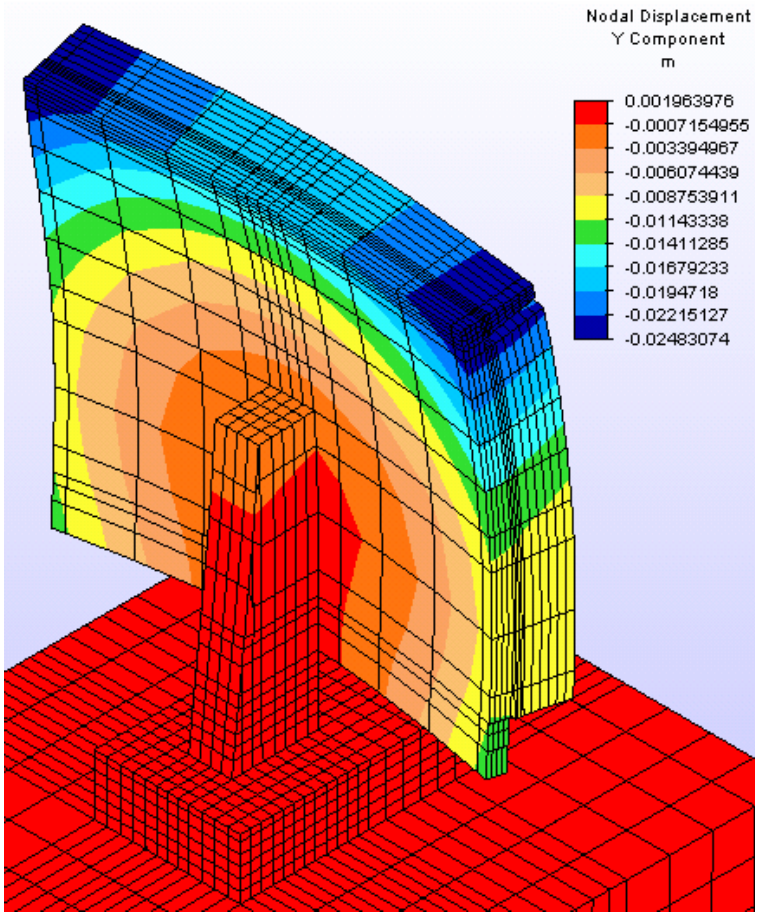


FIGURA 5.28 – Modelo Deformado devido o efeito térmico do reforço tipo 2

A análise do modelo com a proposta de reforço do bloco de fundação e do pilar demonstra uma redução muito pequena nos deslocamentos da parede, não vindo, portanto, a solucionar o problema de deformação excessiva da estrutura.

As FIGURAS 5.29 a 5.31 ilustram a distribuição das tensões na estrutura devido ao efeito térmico.

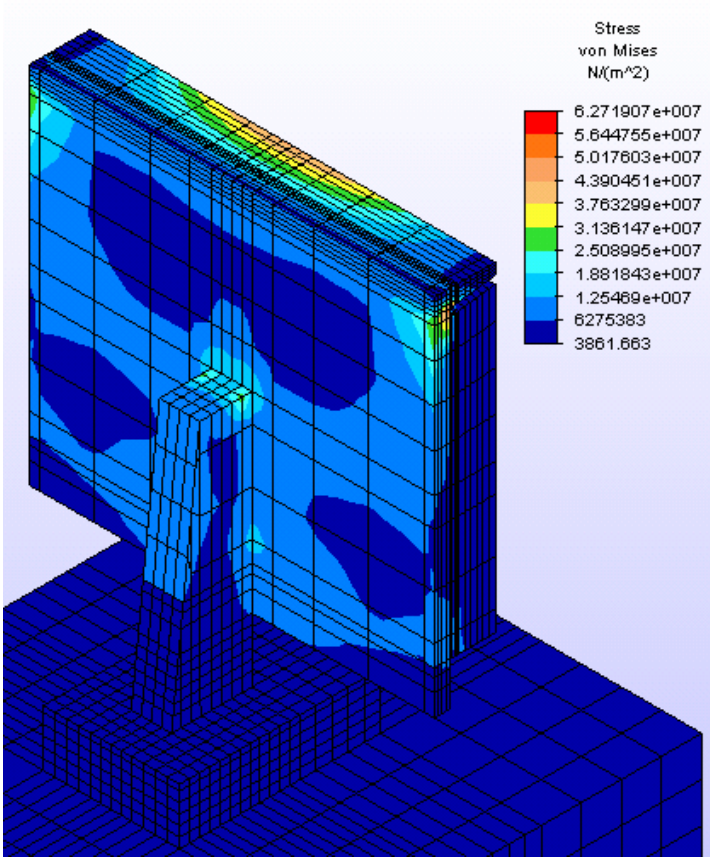


FIGURA 5.29 – Representação de tensões por von mises – reforço tipo 2

Esta proposta de reforço provoca um aumento das tensões na placa da parede de concreto armado, devido ao aumento da rigidez do pilar. Com essa análise, pode-se prever que caso essa solução venha a ser implantada, ela poderá agravar as fissurações devido a grande diferença de rigidez entre a placa e o pilar.

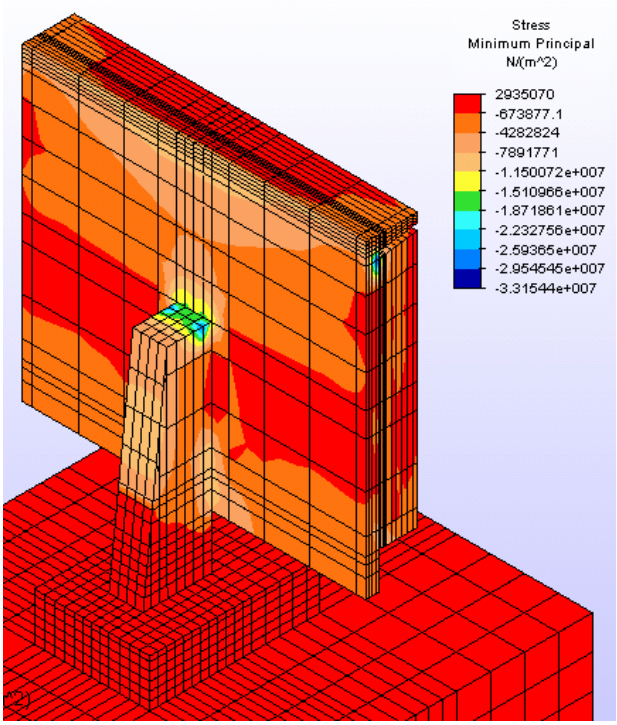


FIGURA 5.30 – Representação das tensões principais mínimas – reforço tipo 2

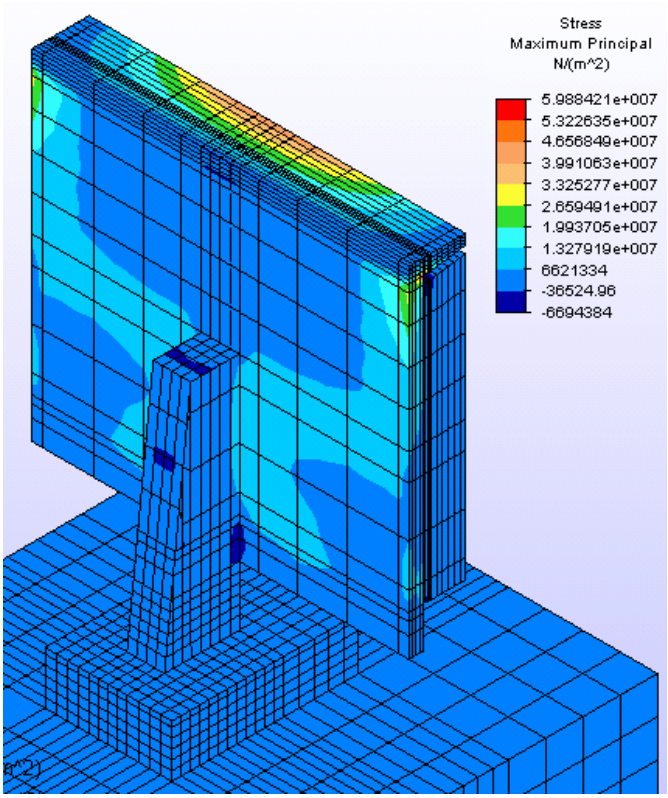


FIGURA 5.31 – Representação das tensão principais máximas – reforço tipo 2

5.7. Modelo com a Terceira Proposta de Reforço

A terceira proposta de modificação da estrutura real consiste em alterações no bloco de fundação da estrutura, no pilar e na placa. O elemento correspondente à alteração na placa tem o aspecto de um capitel comumente utilizado em lajes cogumelo. A FIGURA 5.32 ilustra o projeto da estrutura com a proposta de modificação.

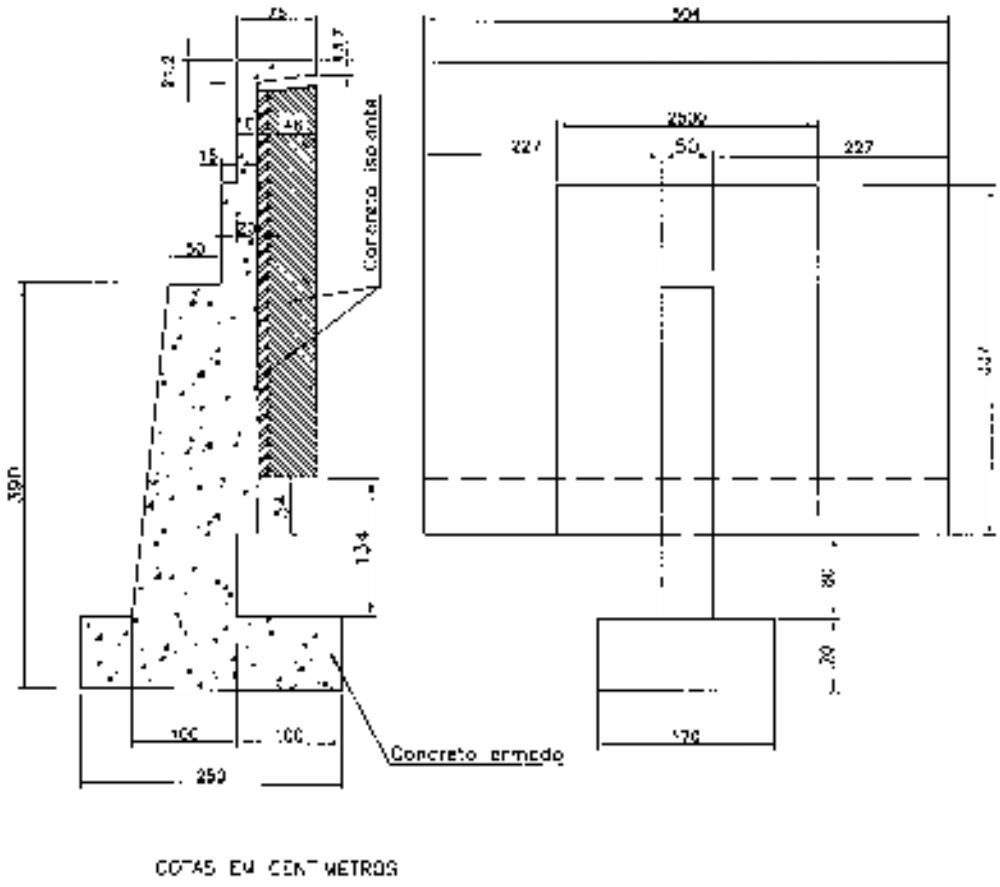


FIGURA 5.32 – Projeto do reforço tipo 3

As FIGURAS 5.33 e 5.34 ilustram o modelo computacional com a modificação referente ao reforço tipo 3.

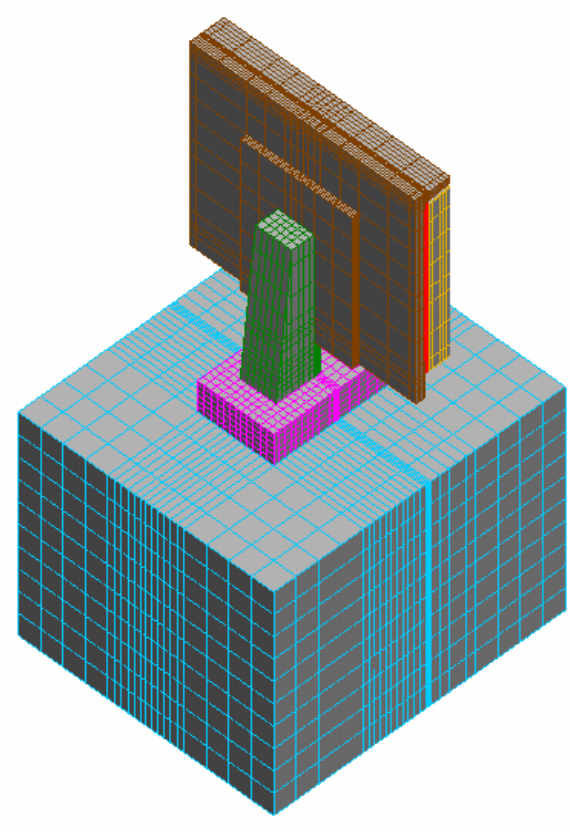


FIGURA 5.33 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 3

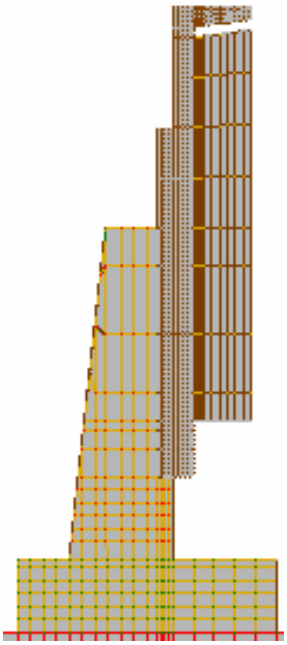


FIGURA 5.34 – Corte transversal do reforço tipo 3

O modelo deformado da estrutura devido ao efeito térmico está representado pela FIGURA 5.35.

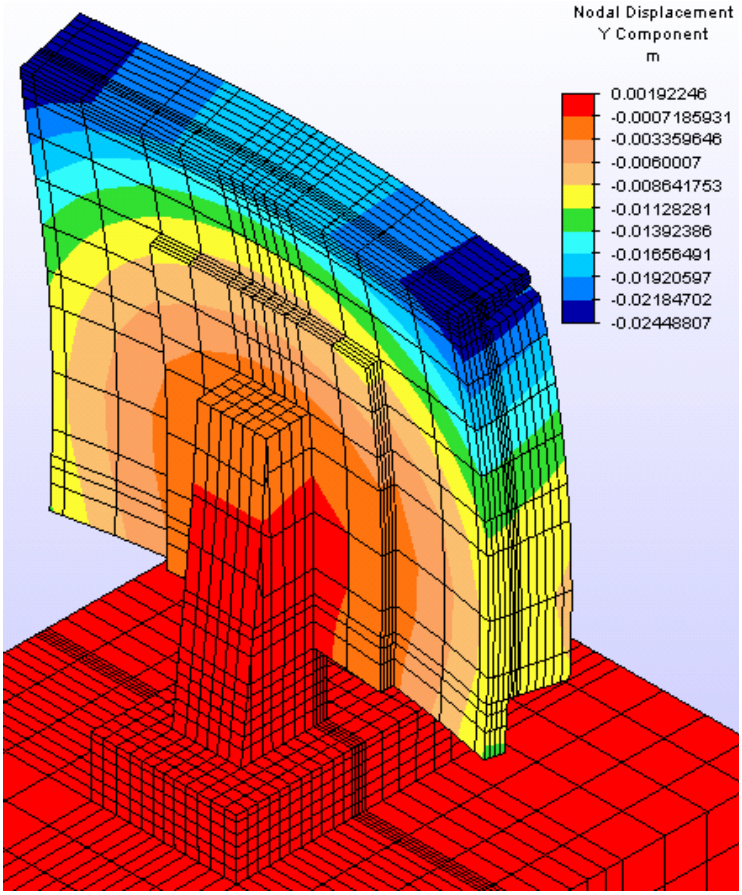


FIGURA 5.35 – Modelo deformado do reforço tipo 3

Os deslocamentos referentes a esta proposta de reforço não foram reduzidos de forma significativa, demonstrando que este reforço não irá solucionar o problema de deslocamento excessivo da estrutura.

As FIGURAS 5.36 a 5.38 ilustram a distribuição das tensões na estrutura devido ao efeito térmico.

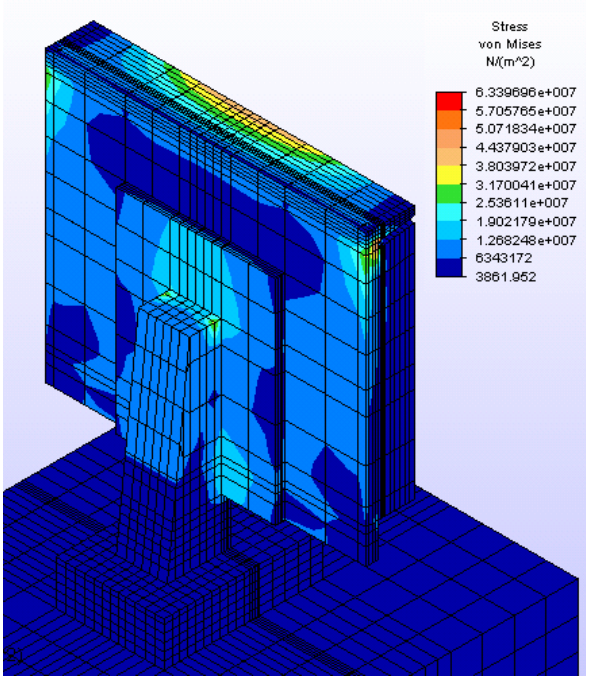


FIGURA 5.36 – Representação de tensão por von mises – reforço tipo 3

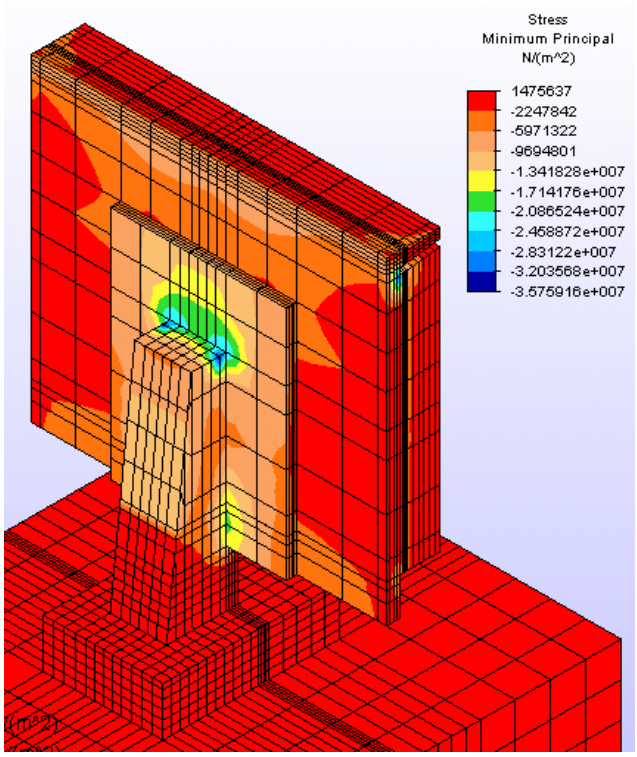


FIGURA 5.37 – Representação de tensão principal mínima – reforço tipo 3

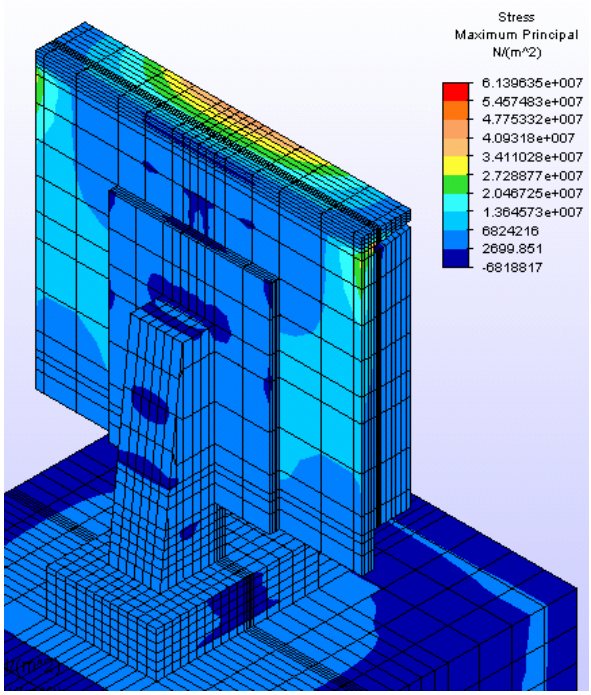


FIGURA 5.38 – Representação de tensão principal máxima – reforço tipo 3

5.8. Modelo com a Quarta Proposta de Reforço

A quarto proposta de modificação da estrutura real corresponde a alterações na seção do pilar. A FIGURA 5.39 ilustra o projeto da estrutura com esta proposta de modificação.

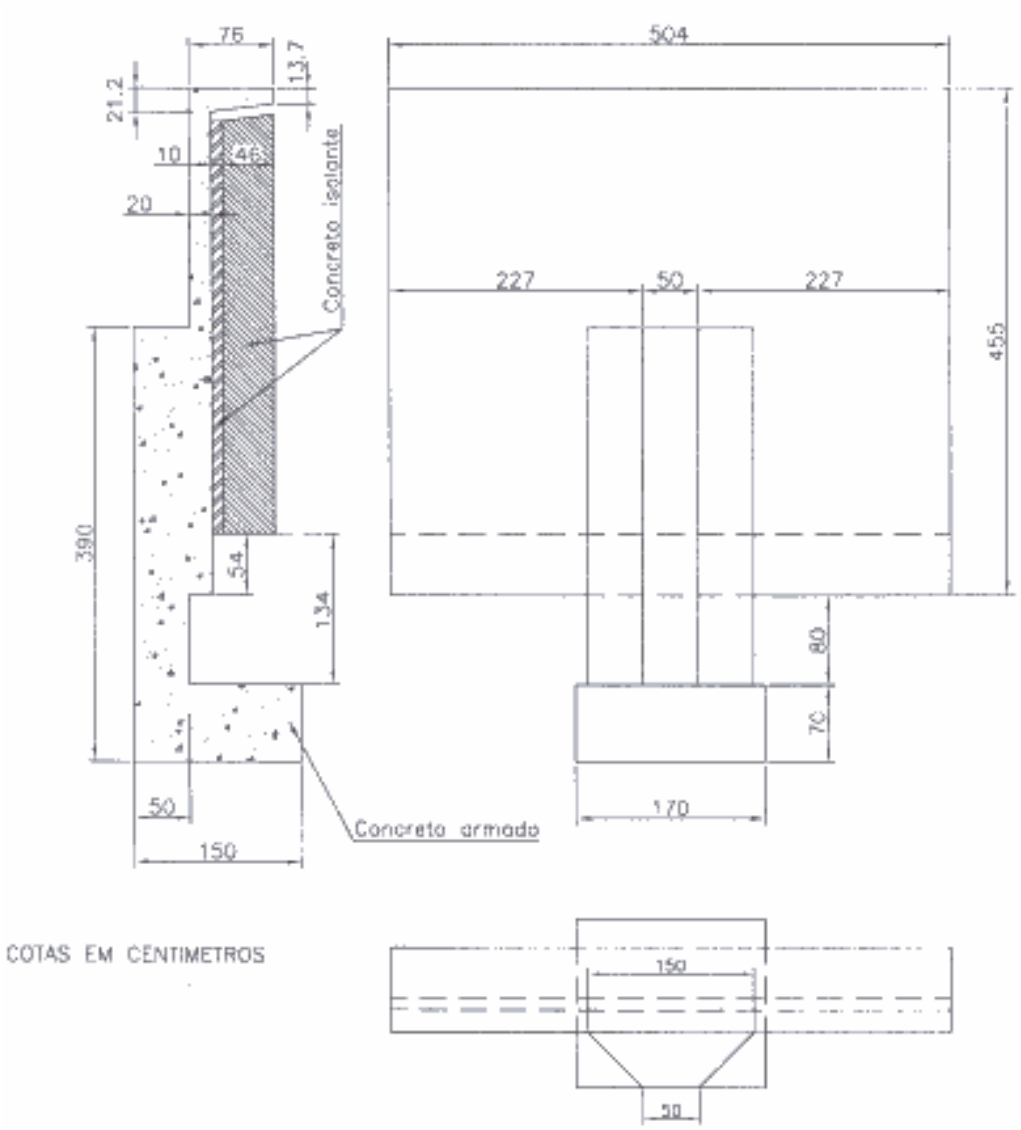


FIGURA 5.39 – Projeto do reforço tipo 4

A FIGURA 5.40 ilustra o modelo computacional com a proposta de reforço tipo 4.

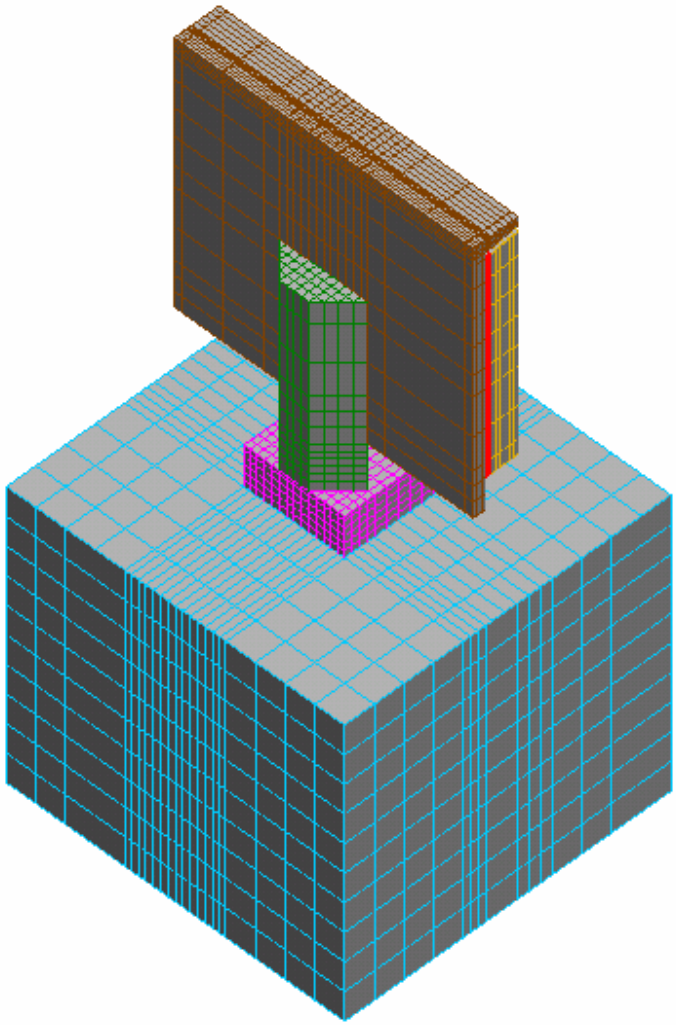


FIGURA 5.40 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 4

A configuração do modelo deformado da estrutura ocasionada pela variação térmica é representada na FIGURA 5.41.

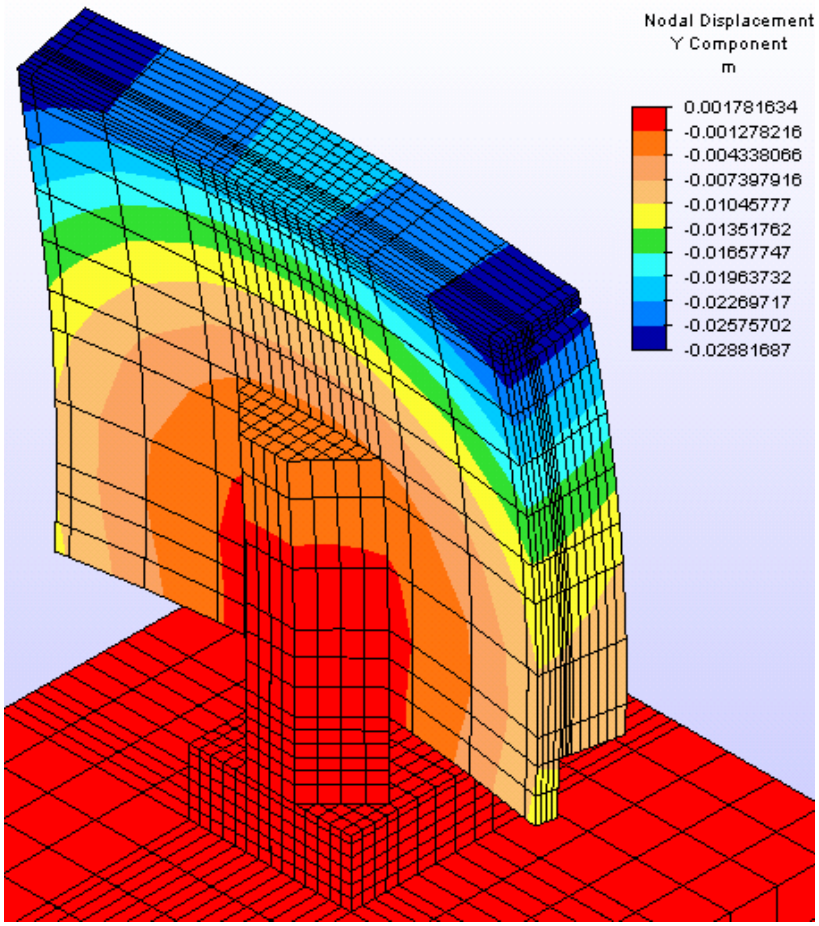


FIGURA 5.41 – Configuração do modelo deformado referente a proposta de reforço tipo 4

Este reforço foi o que menos contribuiu para a redução dos deslocamentos da estrutura. Entretanto, com este reforço, pode-se amenizar o efeito da evolução das trincas no contorno do pilar, em função da transição suave de rigidez entre o pilar e a placa.

As FIGURAS 5.42 a 5.44 ilustram a distribuição de tensões na estrutura devido ao efeito térmico.

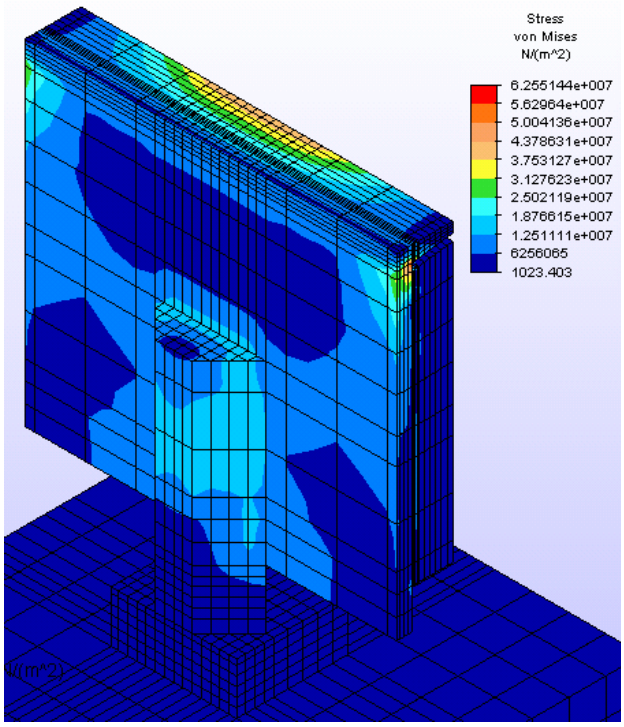


FIGURA 5.42 – Representação de tensão por von mises – reforço tipo 4

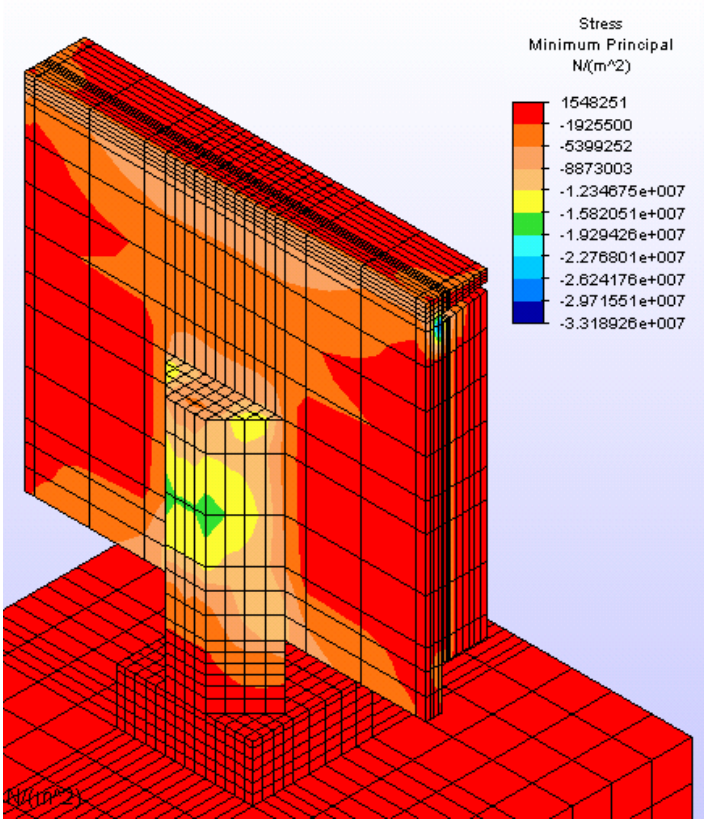


FIGURA 5.43 – Representação de tensão principal mínima – reforço tipo 4

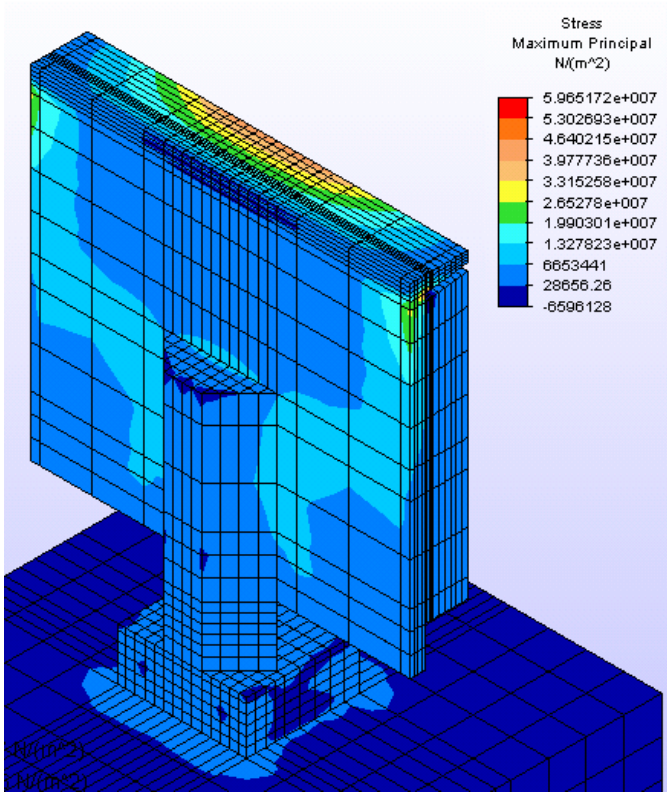


FIGURA 5.44 – Representação de tensão principal máxima – reforço tipo 4

Conforme mencionado anteriormente, esta proposta de reforço ameniza o problema de concentração de tensões na vizinhança do pilar.

5.9. Modelo com a Quinta Proposta de Reforço

A quinta proposta de reforço da estrutura real consiste na eliminação da junta de dilatação entre duas paredes tipo e no acréscimo de dois elementos estruturais inclinados para do tipo “mão francesa”, conforme ilustram as FIGURAS 5.45 e 5.46.

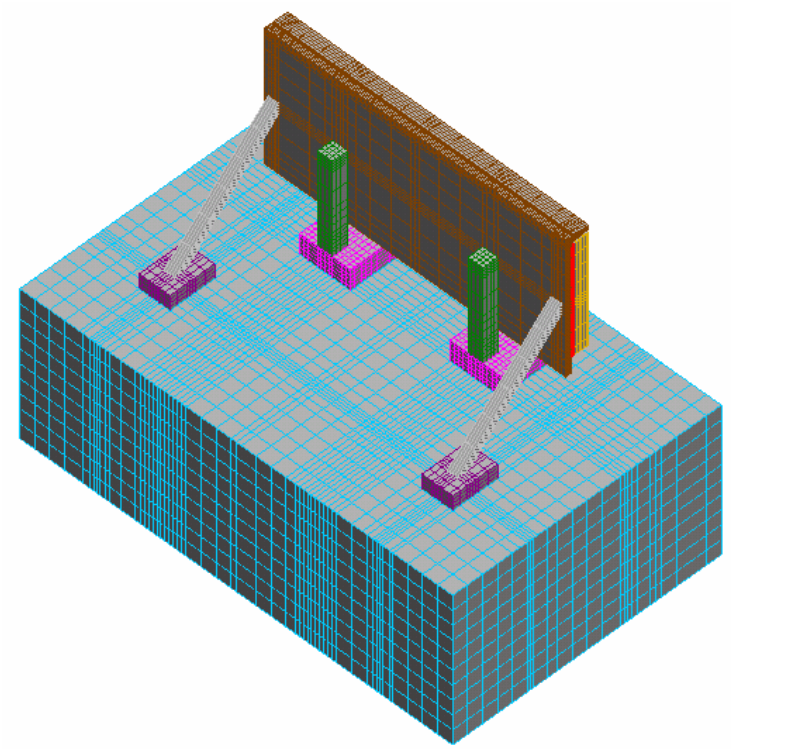


FIGURA 5.45 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 5

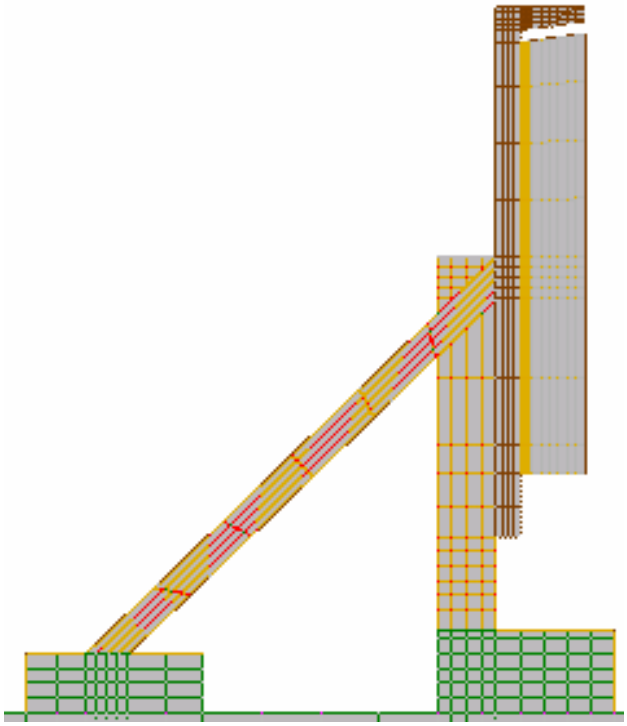


FIGURA 5.46 – Corte transversal do reforço tipo 5

A FIGURA 5.47 ilustra o projeto da estrutura com a proposta de reforço 5.

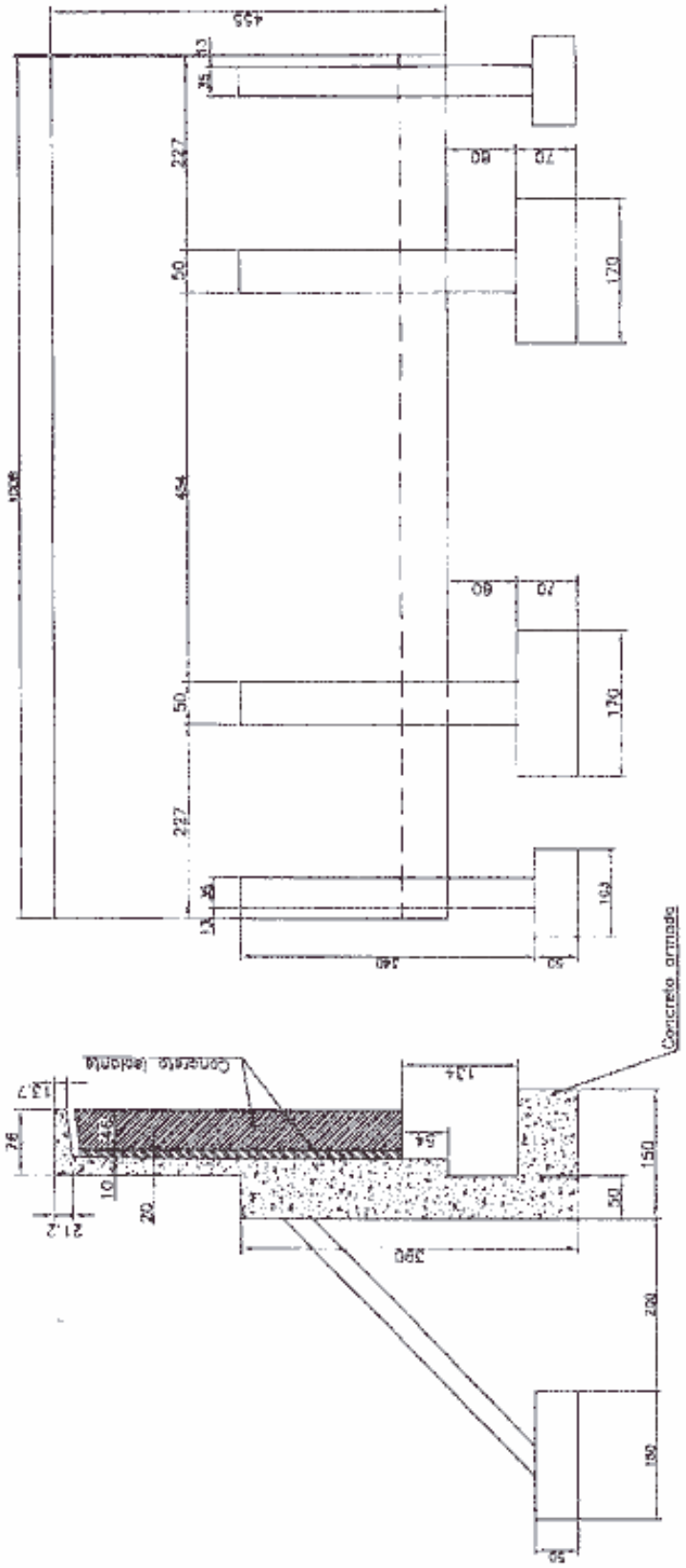


FIGURA 5.47 – Projeto de reforço tipo 5.

A configuração do modelo deformado da estrutura devido ao efeito térmico está representado pela FIGURA 5.48.

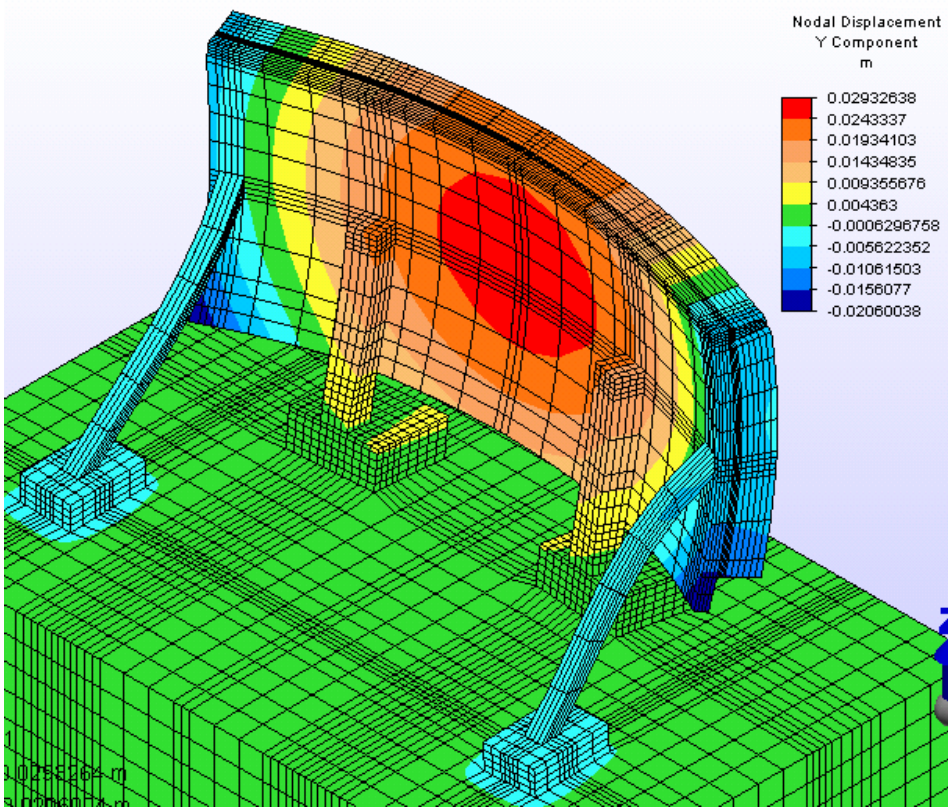


FIGURA 5.48 – Modelo deformado do reforço tipo 5

Esta proposta de reforço não é satisfatória em função do acréscimo dos deslocamentos na região central da estrutura, conforme mostra a FIGURA 8.44.

As FIGURAS 5.49 a 5.51 ilustram a distribuição de tensões na estrutura devido ao efeito térmico.

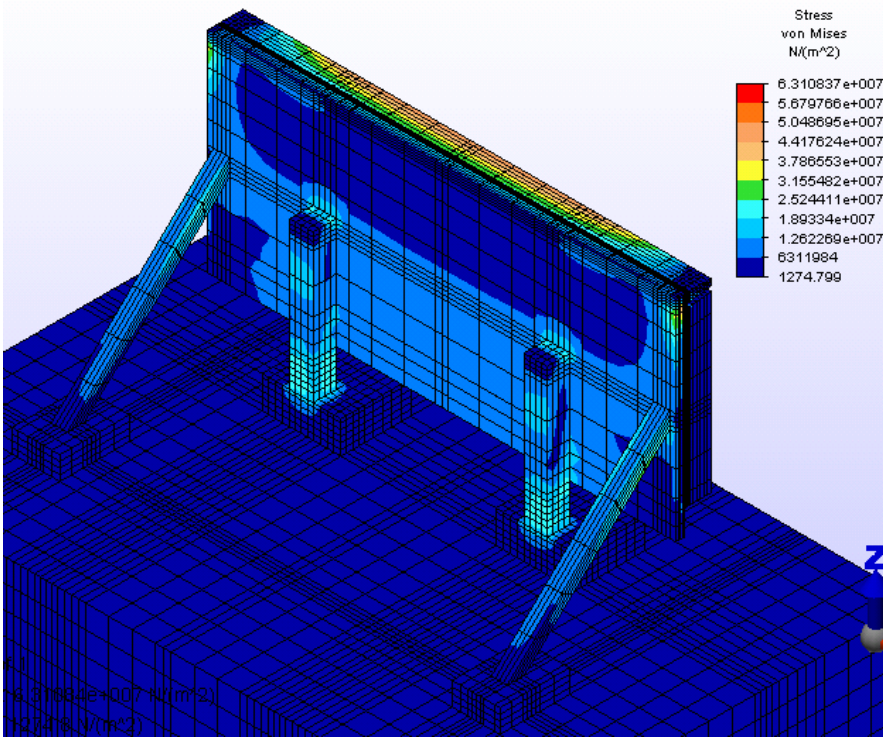


FIGURA 5.49 – Representação de tensão por von mises – reforço tipo 5

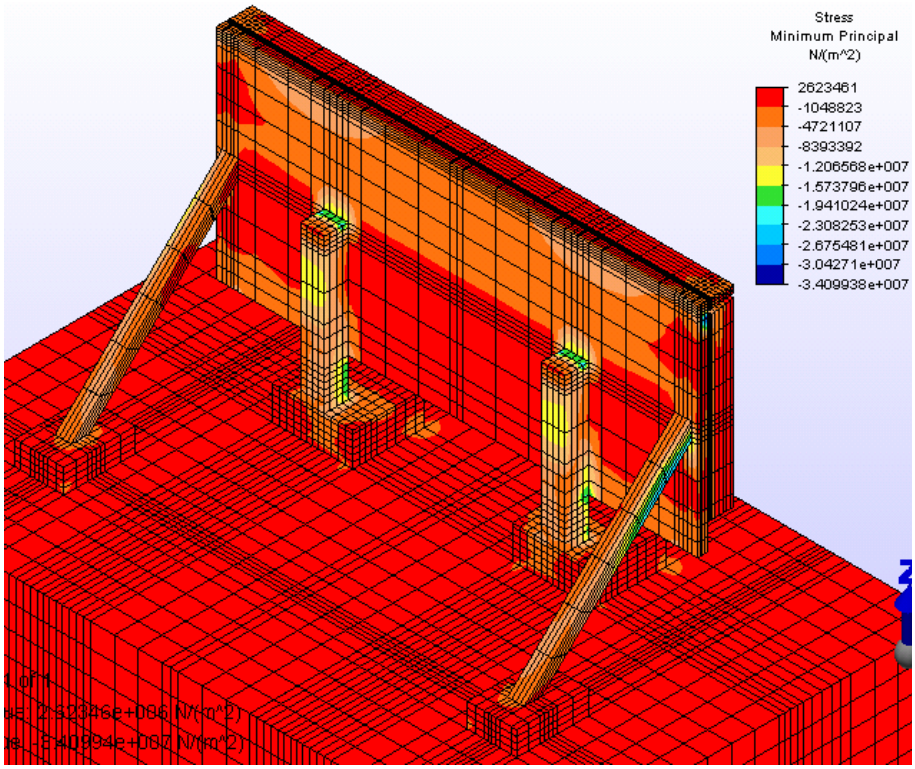


FIGURA 5.50 – Representação de tensão principal mínima – reforço tipo 5

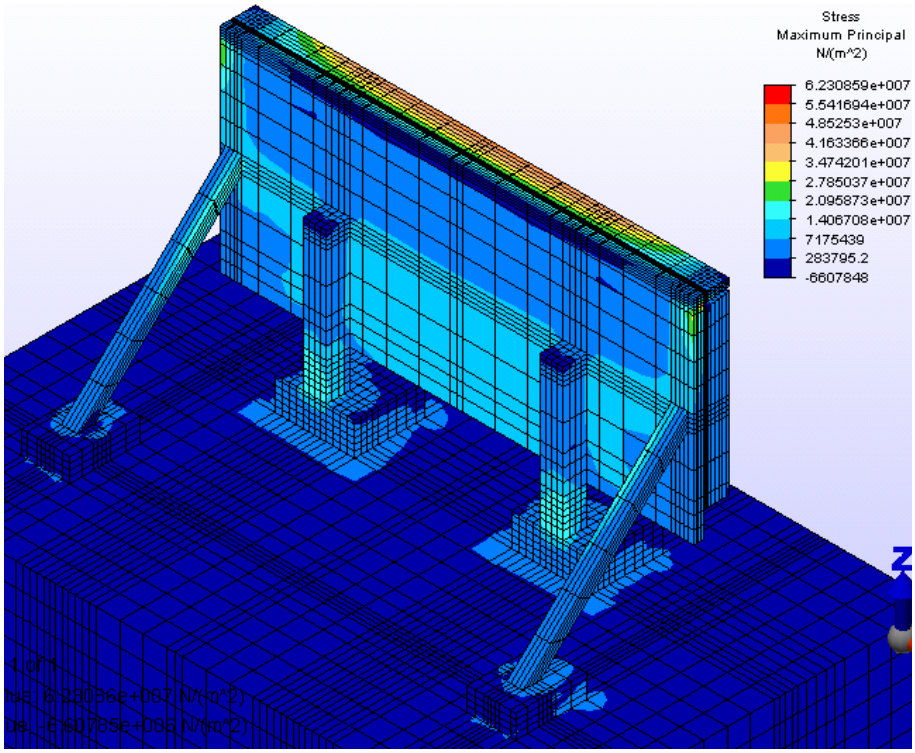


FIGURA 5.51 – Representação de tensão principal máxima – reforço tipo 5

5.10. Modelo com a Sexta Proposta de Reforço

A sexta proposta de reforço da estrutura real consiste no acréscimo de dois elementos estruturais inclinados do tipo "mão francesa", de modo análogo à quinta proposta, sem, no entanto eliminar as juntas dilatação, conforme a FIGURA 5.52.

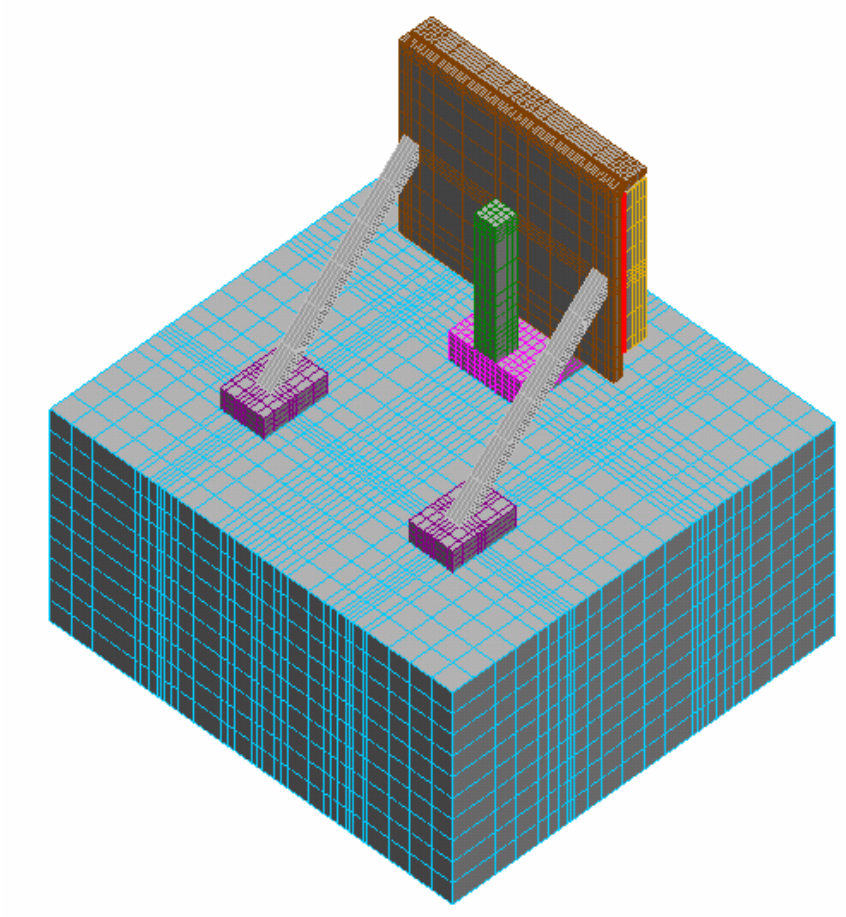


FIGURA 5.52 – Modelo em elementos finitos da proposta de reforço tipo 6

A FIGURA 5.53 ilustra o projeto da estrutura com a proposta de reforço tipo 6.

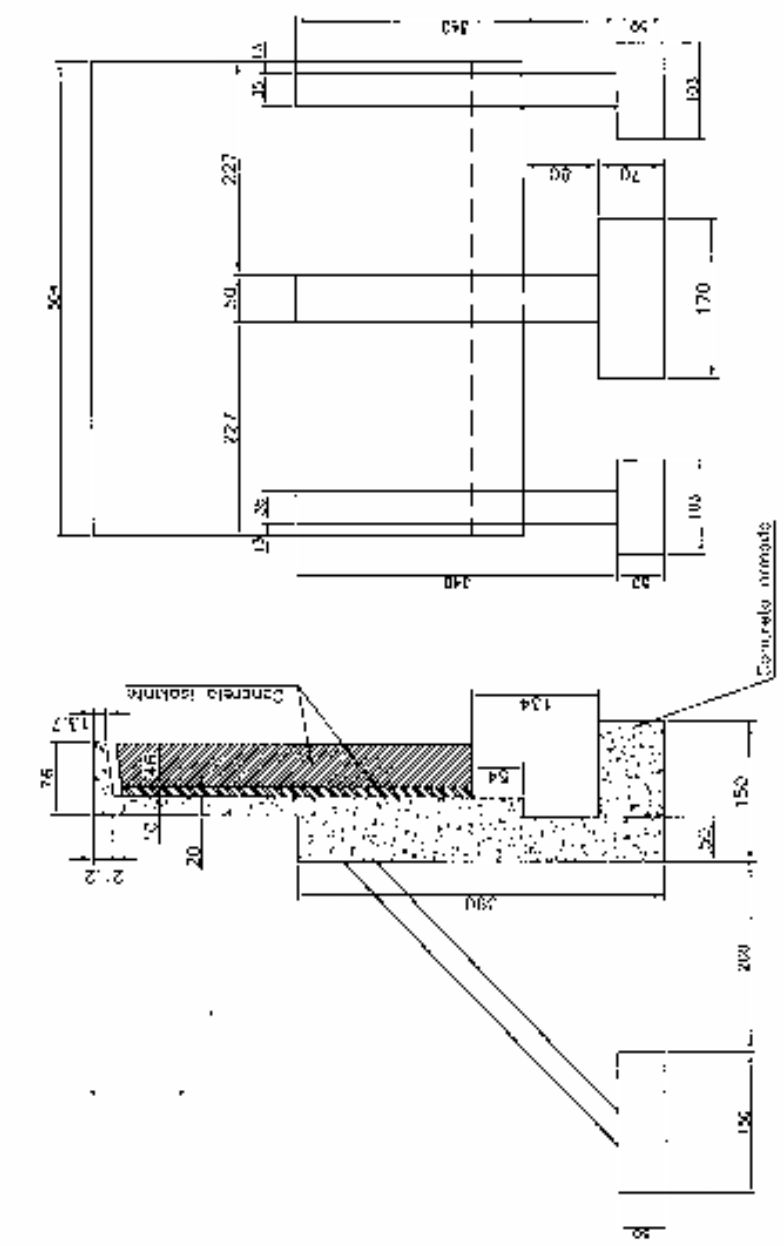


FIGURA 5.53 – Projeto de reforço tipo 6.

A configuração do modelo deformado da estrutura devido ao efeito térmico é representada na FIGURA 5.54.

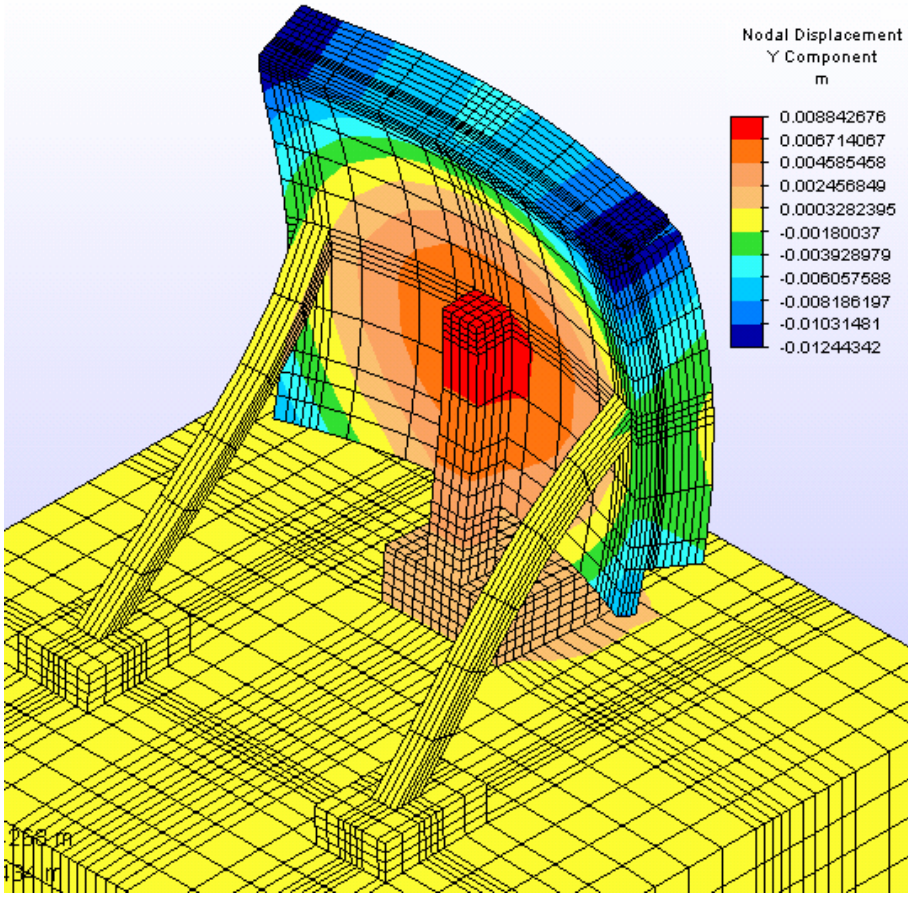


FIGURA 5.54 – Modelo deformado do reforço tipo 6

Esta proposta de reforço reduziu consideravelmente os deslocamentos da parede como um todo, limitando os deslocamentos máximos a valores ligeiramente inferiores a 1,00 cm.

As FIGURAS 5.55 a 5.57 ilustram a distribuição de tensões na estrutura devido ao efeito térmico.

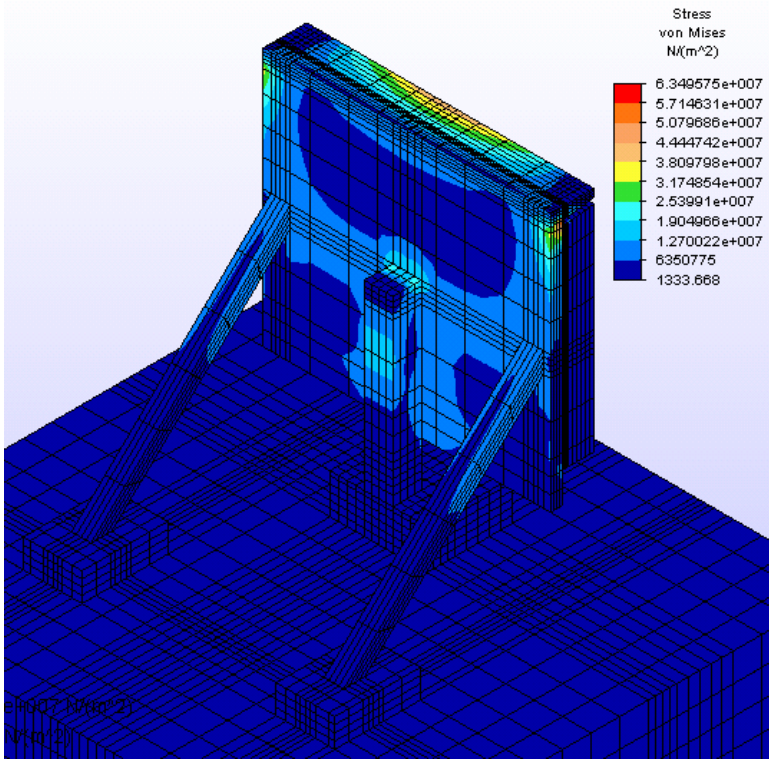


FIGURA 5.55 – Representação de tensão por von mises – reforço tipo 6

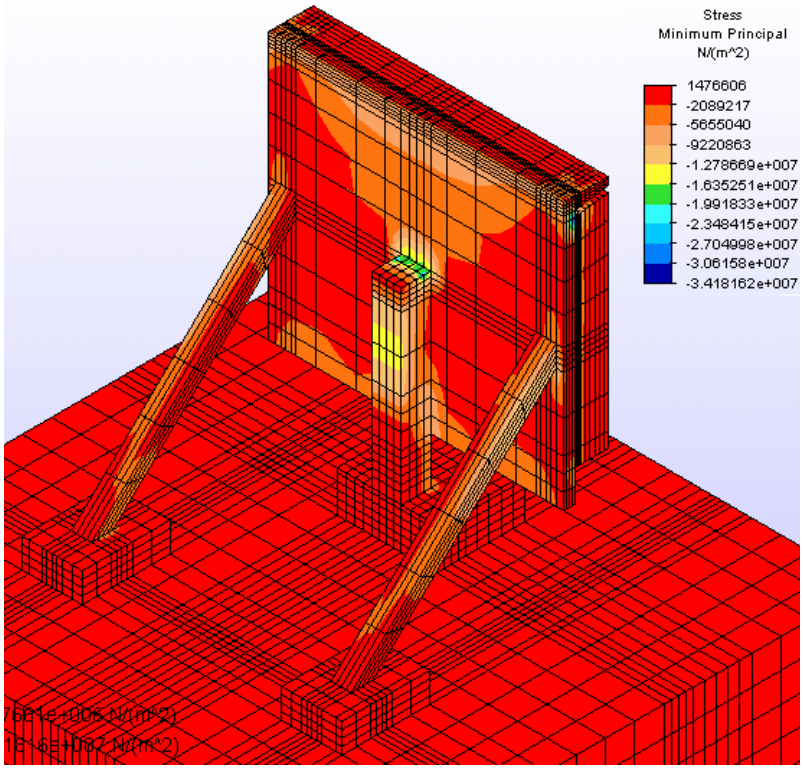


FIGURA 5.56 – Representação de tensão principal mínima – reforço tipo 6

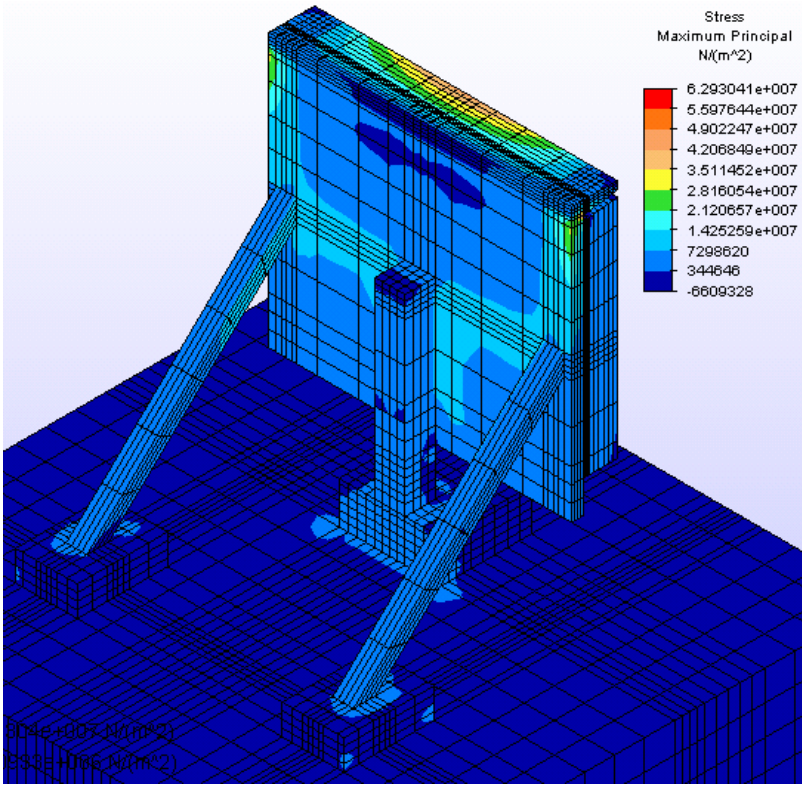


FIGURA 5.57 – Representação de tensão principal máxima – reforço tipo 6

A análise dos resultados referentes a este reforço demonstra uma melhor distribuição de tensões ao longo da parede de concreto armado. Porém, verifica-se um acréscimo das tensões na ligação bloco de fundação com o pilar.

Embora no modelo analisado, por simplicidade, os novos elementos estruturais inclinados introduzidos tenham uma seção retangular maciça, na prática devem ser utilizados perfis metálicos do tipo I, para facilitar a execução do reforço.

6. Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho e as sugestões para continuidade da pesquisa.

6.1. Monitoração da Parede

Em relação às atividades de monitoração da parede, destacam-se as seguintes conclusões:

a) Em linhas gerais observa-se nas figuras de número 4.14 a 4.28, referentes aos deslocamentos e temperaturas monitoradas, três grandes ciclos de variação dos resultados, com variação de 18 dias, os quais correspondem ao próprio ciclo de operação do forno (fogo). Além disso, observa também variações menores, correspondente ao período de um dia, as quais são ocasionadas por variações térmicas externas diárias (ciclo dia/noite). A FIGURA 6.1 ilustra estes ciclos.

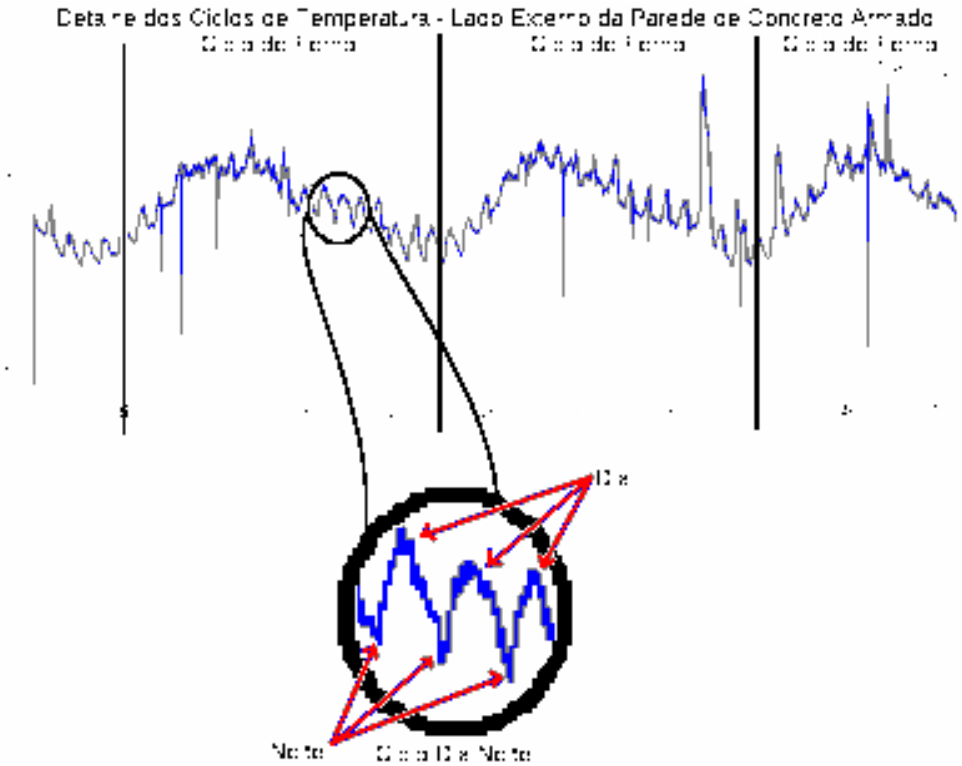


FIGURA 6.1 – Ciclos diários na face externa da parede de concreto armado

b) A deformação da parede coincide com as fases de operação do forno de cozimento de anodo (preaquecimento, fogo forçado, resfriamento forçado e resfriamento natural). Ou seja, com 6 (seis) dias de deformação crescente e 18 dias de deformação decrescente, confirmando uma relação entre a temperatura na operação do forno e a deformação da parede de concreto armado.

c) Durante a fase de fogo forçado, ocorreram acréscimos de deformações na parede, sendo que os deslocamentos máximos observados foram de 23 (vinte e três) milímetros no final desta fase (fogo forçado). Imediatamente após isto, na fase de resfriamento forçado, os deslocamentos da parede começam a reduzir, demonstrando o aspecto cíclico do processo de deformação da parede.

d) A temperatura máxima observada na parede de concreto armado foi atingida 3 (três) dias após a ocorrência do deslocamento máximo, o qual foi coincidente com a fase final do fogo forçado. Ou seja, a temperatura máxima na parede de concreto ocorre com uma defasagem de três dias em relação à temperatura máxima no interior do forno. Concluiu-se, portanto, que o tempo necessário para que o fluxo de calor atravesse a parede é de três dias.

e) Os deslocamentos da placa da parede de concreto armado são superiores aos deslocamentos do pilar. Conclui-se em função disso, que é prejudicial elevar ainda mais a rigidez do pilar, pois isto acarretará no aumento da quantidade e espessuras das trincas na parede no contorno do pilar.

f) 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 wall*s, que são originadas pela emissão dos gases desprendidos 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 6.2 e 6.3 ilustram este efeito.

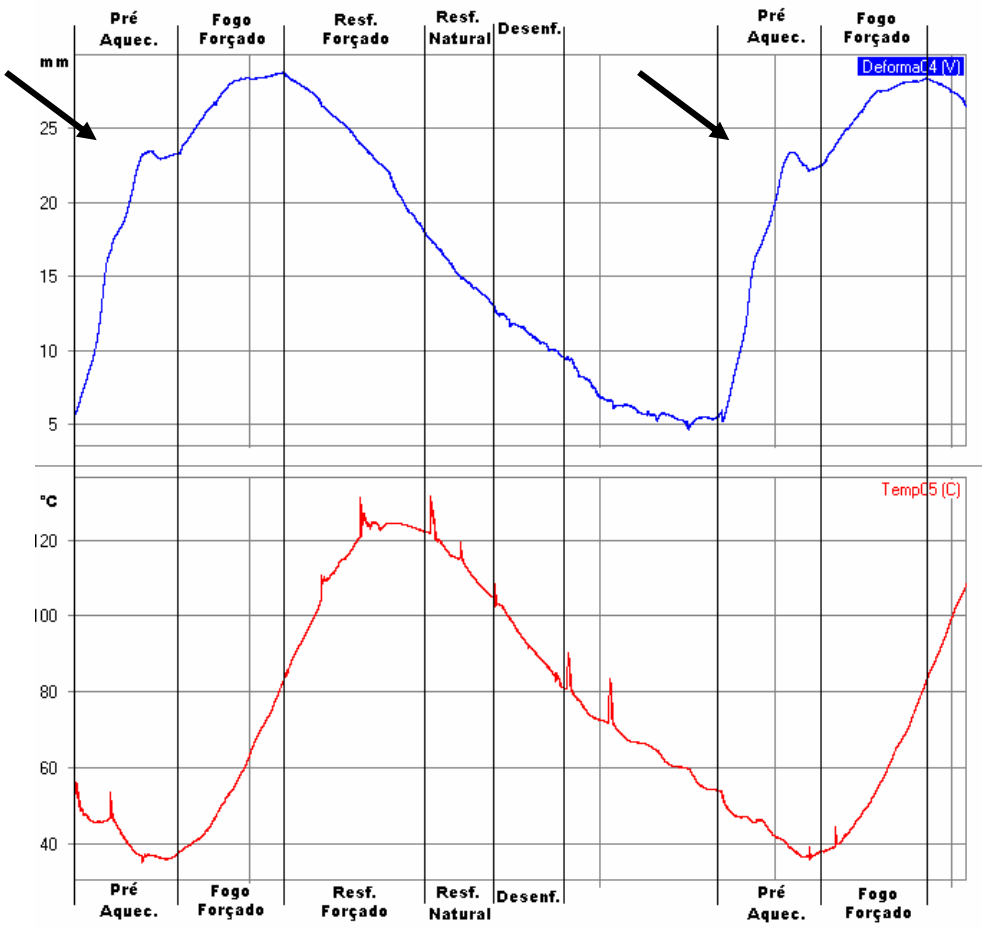


FIGURA 6.2 – Curvas obtidas na monitoração da parede de concreto armado

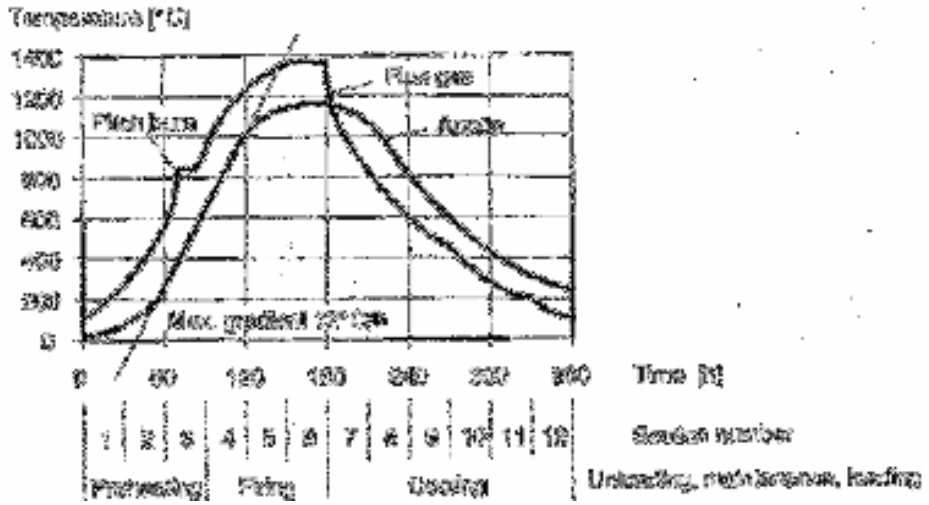


FIGURA 6.3 – Temperatura durante a operação do forno. Fonte: Meier M.W. 1996

g) 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 6.4 ilustra esse efeito.

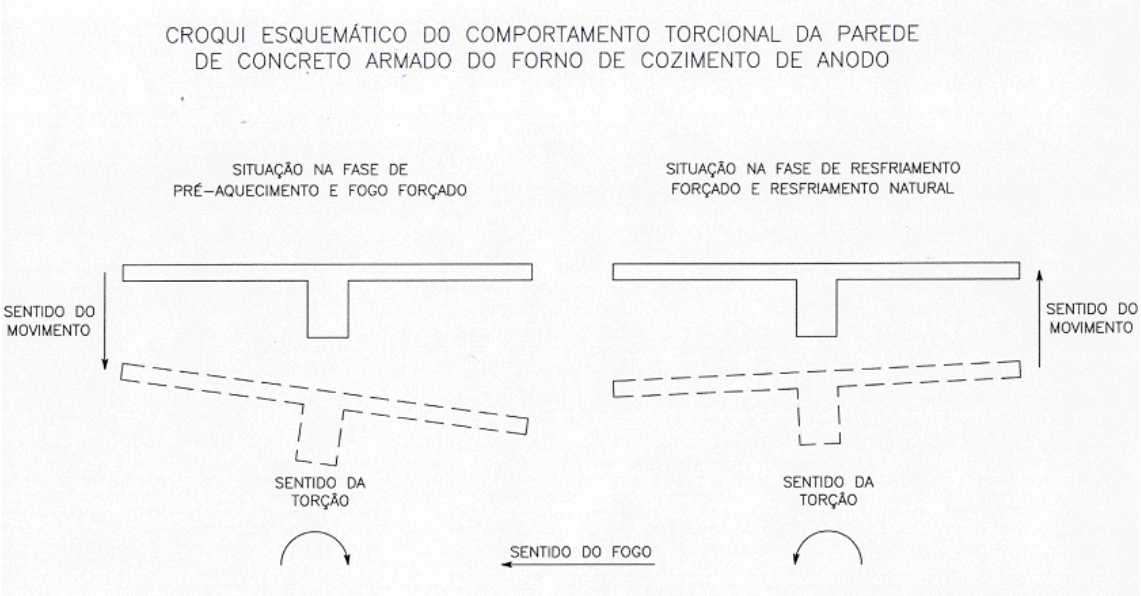


FIGURA 6.4 – Comportamento torcional da parede de concreto armado

h) Durante o período de 50 (cinqüenta) dias (ou 3 ciclos) referente a monitoração realizada, foi observado um deslocamento máximo da parede de 23mm em cada ciclo, o qual quase que completamente revertido no final de cada ciclo. Isto demonstra que a parede de concreto armado não apresenta deformações residuais significativas em cada ciclo, concluindo-se que esta se comporta bem próximo do regime elástico.

6.2. Modelos Computacionais

Em relação às simulações computacionais destacam-se as seguintes análises dos resultados e conclusões:

a) Comparando as deformações obtidas no monitoramento da estrutura e no modelo computacional desenvolvido com as dimensões reais, observou-se uma boa concordância entre os resultados, principalmente na metade superior da placa. Entrentanto, na região hachurada mostrada na FIGURA 6.5, existe uma discordância de resultados, conforme apresentado na TABELA 6.1.

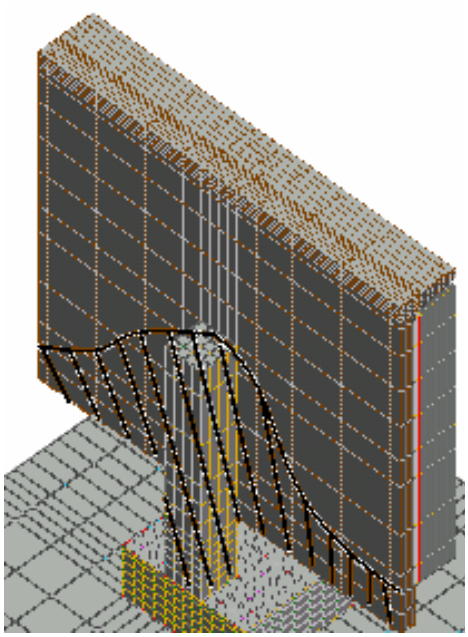


FIGURA 6.5 – Parte hachurada representando a região onde os resultados do modelo numérico não coincidem com os resultados obtidos experimentalmente para os deslocamentos.

TABELA 6.1 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos para os deslocamentos

	Exp.	Modelo Real
Sensor 01	22,20	23,44
Sensor 02	13,00	12,99
Sensor 03	4,97	9,75
Sensor 04	23,30	23,44
Sensor 05	14,00	12,99
Sensor 06	5,04	9,75
Sensor 07	17,30	15,21
Sensor 08	13,50	7,01
Sensor 09	9,42	2,61
Sensor 10	2,84	0,24
		Unidade: mm

b) A TABELA 6.2 apresenta uma comparação entre os valores dos deslocamentos devidos aos efeitos térmicos entre o modelo real e as propostas de reforço na estrutura. Conclui-se que as propostas de reforço tipo 1 e tipo 5, que propõem a eliminação da junta de dilatação entre dois segmentos, elevam a deformação em determinadas regiões, não sendo satisfatório para a estrutura.

TABELA 6.2 – Comparação do resultado experimental com os resultados dos diversos modelos computacionais

Resultados dos Modelos (unidade: mm)								
	Exp.	Modelo Real	Reforço 1	Reforço 2	Reforço 3	Reforço 4	Reforço 5	Reforço 6
Sensor 01	22,20	23,44	40,79	19,57	19,33	22,70	6,38	8,41
Sensor 02	13,00	12,99	30,22	11,04	10,80	12,35	5,15	2,21
Sensor 03	4,97	9,75	26,88	9,92	8,93	9,05	12,32	3,76
Sensor 04	23,30	23,44	6,60	19,57	19,33	22,70	-25,52	8,41
Sensor 05	14,00	12,99	-4,91	11,04	10,80	12,35	-27,58	2,21
Sensor 06	5,04	9,75	-8,87	9,92	8,93	9,05	-21,08	3,76
Sensor 07	17,30	15,21	14,61	11,22	11,30	14,67	-18,08	0,32
Sensor 08	13,50	7,01	6,30	4,27	4,66	6,59	-20,11	-5,00
Sensor 09	9,42	2,61	1,81	0,98	1,27	2,41	-19,12	-6,94
Sensor 10	2,84	0,24	-0,55	0,15	0,11	0,14	-11,67	-4,82

c) Os modelos referentes às propostas de reforço 2, 3 e 4 apresentam uma diminuição não satisfatória da deformação da parede. Com isso, não são apropriadas para solucionar o problema de deformação excessiva.

d) De acordo com as simulações computacionais realizadas, a proposta de reforço 6 proporcionou uma redução satisfatória dos deslocamentos da estrutura. Como vantagem ainda deste sistema, é previsto que os elementos estruturais inclinados sirvam para combater também o efeito torcional existente no comportamento da estrutura.

e) 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.

f) Conclui-se que as juntas de dilatação entre os segmentos tipos da parede em estudo têm uma significativa importância para diminuição da deformação, não sendo recomendável para a estrutura real a eliminação destas juntas.

6.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para continuidade da pesquisa sugerem-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

a) Realização de uma simulação computacional considerando modelos constitutivos não lineares (tanto para as propriedades térmicas quanto mecânicas);

b) Monitoração da estrutura de concreto armado do forno de cozimento de anodo com sensores de deformação (strain gages) com e sem compensação de temperatura;

c) Monitoração do comportamento da estrutura de concreto armado após a reforma do revestimento refratário do forno de cozimento de anodo;

d) Monitoração da parede de concreto armado após a execução da modificação na estrutura com a proposta de reforço 6;

e) Caracterização do concreto com ensaios de resistência mecânica a compressão, a tração e dilatação térmica;

f) Monitoramento do comportamento da flue wall;

g) Execução de um modelo computacional do comportamento da flue wall;

g) Monitoramento do comportamento da head wall;

i) Execução de um modelo computacional do comportamento da head wall;

j) Execução de um modelo computacional de uma seção completa: parede de concreto armado, *side wall*, *flue wall* e *head wall*;

k) Análise experimental do bloco de fundação da estrutura de concreto armado;

Referências

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 Continuos 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.; Rilley 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 Computacional 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. 44° 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 Appllied Mechanics and Engineering 192 páginas 1731 à 1771 – 2003.

Grjotheim, K.; Kvande, H. – Introduction to Aluminium Electrolysis. Understanding the Hall - Héroult Process. Aluminium-Verlag 2nd 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 – Termo-Physical Properties and Transient Heat Transfer of Concrete at Elevated Temperatures – Nuclear Engineering and Design 212 páginas 233 à241 – 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 Computacional Methods in Engineering. CILAMCE – 2003.

Paulo Barroso Engenharia Ltda, 4º Relatório de Monitoramento da Estrutura dos fornoa 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 Buffallo – 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., Fairbaim, 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.

ANEXO A – Tabela dos resultados experimentais da condutividade térmica do concreto armado.

Amostra	1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	4ª Leitura	5ª Leitura	Média	Desvio
1	1,03	1,17	1,04	1,06	1,07	1,07	0,06
2	1,07	0,81	0,91	0,88	0,88	0,91	0,10
3	0,79	0,92	0,88	0,86	0,79	0,85	0,06
4	1,30	1,15	1,19	1,21	1,22	1,21	0,06
5	1,78	1,75	1,81	1,83	1,85	1,80	0,04
6	0,71	0,82	0,79	0,78	0,78	0,78	0,04
7	1,53	1,50	1,62	1,61	1,61	1,57	0,06
8	1,75	1,57	1,67	1,68	1,68	1,67	0,06
9	1,67	1,63	1,58	1,55	1,60	1,61	0,05
10	0,65	0,66	0,66	0,69	0,69	0,67	0,02
11	1,32	1,40	1,34	1,19	1,14	1,28	0,11
12	0,96	0,76	0,75	0,75	0,75	0,79	0,09
13	0,80	0,65	0,96	0,91	0,88	0,84	0,12
14	0,47	0,37	0,42	0,42	0,42	0,42	0,04
15	0,50	0,66	0,59	0,58	0,58	0,58	0,06
16	1,77	1,76	1,18	Após as três primeiras leituras destas amostras, o equipamento apresentou problemas na refrigeração da água.		1,57	0,34
17	1,54	1,59	0,97			1,37	0,34
18	1,78	1,73	1,31			1,61	0,26
19	1,67	0,87	0,96			1,17	0,44
20	1,62	0,95	1,00			1,19	0,37
21	1,85	1,22	1,29			1,45	0,35
22	1,79	1,38	1,09			1,42	0,35
23	1,64	1,03	1,09			1,25	0,34
24	1,83	1,26	1,28			1,46	0,32
25	1,84	1,36	1,37			1,52	0,27
26	1,54	1,07	1,06			1,22	0,27
27	1,07	1,09	1,06			1,07	0,02
28	0,70	0,89	0,73			0,77	0,10
				Média Geral		**1,18**	

ANEXO B – Tabela dos resultados experimentais da dilatação térmica do bloco de concreto isolante.

Amostra	1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	Média	Dilatação Amostra	Desvio
Sistema	1,26	1,24	1,2	1,23333		0,03
1	1,56	1,36	1,38	1,43333	0,2	0,11
2	1,54	1,34	1,36	1,41333	0,18	0,11
3	1,57	1,35	1,36	1,42667	0,193333	0,12
4	1,58	1,37	1,38	1,44333	0,21	0,12
5	1,54	1,38	1,37	1,43	0,196667	0,10
6	1,56	1,38	1,39	1,44333	0,21	0,10
		Média Geral			**0,198333**	