

Comportamento Térmico e Tensional Durante a Construção de Barragens de CCR

S. B. Santos, FURNAS; E. A. Gambale, FURNAS; M. A. S. Andrade, FURNAS; J. L. Calmon, UFES

Resumo- A análise numérica do problema de elasticidade bi-dimensional associado ao problema de condução de calor em estruturas de concreto massa é de grande importância para a prevenção da formação de fissuras de origem térmica, decorrente da evolução de temperatura ao qual o concreto massa é submetido quando é lançado, até idades mais avançadas. Desta forma foi elaborado um software denominado PFEM2D_AT de análise térmica e tensional capaz de prever com certa precisão e de forma satisfatória aos anseios para o qual foi idealizado. Inicialmente fez-se um estado da arte de todo o problema, reunindo informações e conhecimentos suficientes para a estruturação do programa. Posteriormente, após finalizado a implementação computacional, foi realizado vários estudos de casos reais, sendo alguns monitorados, permitindo a validação do aplicativo e concebendo adaptações ao programa com a finalidade de torná-lo acessível ao usuário final.

Palavras-chave— Análise Tensional. Cálculo Térmico. Concreto Massa. Fissuras de Origem Térmica. Método dos Elementos Finitos. Propriedades do Concreto.

I. INTRODUÇÃO

Segundo referência [1], ao longo do processo de aquecimento do concreto, o calor de hidratação do aglomerante origina um significativo incremento de temperatura no interior da massa de concreto. Considerando que a condutividade do concreto é certamente baixa, é de se esperar que em estruturas fortemente maciças se desenvolvam, em suas primeiras idades, gradientes térmicos elevados entre o interior e o exterior. Tais gradientes, associados a distribuições não-lineares de temperatura, podem ocasionar tensões térmicas de tração na fase de resfriamento que podem provocar a fissuração do concreto em suas primeiras idades. Por conseguinte, nestes tipos de estruturas e, em particular, em barragens de concreto, faz-se especialmente necessário determinar a distribuição de temperatura existente e sua evolução com o tempo. Isso permitirá quantificar os potenciais riscos de fissuração térmica nas primeiras idades, durante a execução destas estruturas, e facilitará a tomada de decisões referente às medidas a adotar para eliminar, ou reduzir ao possível, os efeitos prejudiciais da fissura de origem térmica.

Existem poucos programas voltados a esta área de análise térmica e tensional, pois esta análise, envolve, normalmente,

obras com grande volume de concreto, tais como: barragens, pontes, túneis, etc, ou estruturas de caráter não rotineiro, como por exemplo: vigas robustas, fundações para equipamentos industriais, peças estruturais com elevado consumo de cimento. Isto leva, muitas vezes, a obras de grande vultuosidade, o que restringe e inibe o mercado à criação de softwares específicos com este fim. Dentro deste foco procurou-se desenvolver um programa, ao qual possui características e interfaces específicas ao usuário que tem por finalidade analisar tais estruturas.

Dentro deste contexto será apresentado neste artigo um estudo de caso onde foi possível comparar resultados monitorados *in loco* com os fornecidos pelo programa, permitindo desta forma validá-lo com resultados reais de campo.

II. PROBLEMA TERMO-MECÂNICO DESACOPLADO ASSOCIADO AO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Qualquer corpo quando submetido à energia calorífica tende-se a modificar sua geometria, fato este relacionado ao grau de agitação das moléculas (temperatura) fazendo com que as mesmas afastem-se uma das outras (aquecimento) ou aproximem-se (resfriamento). Esta modificação da geometria pode ser interpretada como sendo uma deformação positiva (dilatação) ou negativa (contração).

Uma vez impedido este movimento natural da massa do corpo, quer seja por restrições físicas externas ou internas, ocorre à tendência do aparecimento de tensões internas, que se desenvolvem heterogeneamente a partir do princípio que suas restrições internas variam conforme as dimensões do corpo e onde estão localizadas as restrições externas.

Desta forma, dado o conhecimento do campo de temperaturas é possível determinar o campo de tensões associado aos efeitos térmicos originados pelo calor de hidratação do concreto ou qualquer outra fonte externa que venha a interferir no comportamento tensional da estrutura. Porém nesta pesquisa é importante destacar que não se considera a influência do problema de elasticidade pode ter na análise térmica (problema desacoplado).

Sendo assim a análise termo-mecânica pode ser desmembrada em duas partes:

A. Problema de Transmissão de Calor

O problema de condução de calor no regime transitório em um meio anisotrópico e não-homogêneo pode ser dada pela equação geral de Fourier (1), adotando as seguintes hipóteses simplificadoras: meio contínuo e homogêneo, isotropia térmica, homogeneidade térmica e permanência térmica ([2], [3]).

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Este projeto foi apoiado financeiramente pelo Programa Anual de P&D de FURNAS Centrais Elétrica S.A., sob gestão da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

Os três primeiros pesquisadores fazem parte da equipe de engenheiros do Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas S.A. (concreto@furnas.com.br).

J. L. Calmon é professor doutor engenheiro civil da Universidade Federal do Espírito Santo (calmont@npd.ufes.br).

Na equação (1), T é o vetor de temperaturas, \dot{q} é o calor gerado por unidade de volume e de tempo, ρ é a densidade do material, c é o calor específico do material e k é a condutividade térmica do material. Para a resolução desta equação necessitam-se condições iniciais e de contorno, sendo esta última adotada as condições de contorno de Dirichlet, ou de temperatura prescrita, e Neumann.

A equação (1) em conjunto com as condições iniciais e de contorno pode ser representada através do método dos elementos finitos (2), para a resolução de qualquer domínio bidimensional de transmissão de calor.

$$[K].\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

Sendo $[K]$ a matriz de rigidez global, $\{u\}$ o vetor temperatura a ser alcançado e $\{F\}$ o vetor força que representa a contribuição calorífica interna ou externa ao domínio.

B. Problema de Elasticidade Bidimensional

A expressão intergral de equilíbrio em problemas de elasticidade bidimensional pode ser obtido através do uso do *Princípio dos Trabalhos Virtuais* (PTV), tomando como base as tensões e deformações que contribuem no trabalho virtual da estrutura.

Aplicando a expressão do trabalho virtual da estrutura para um elemento finito do domínio estudado, considerando as forças que nele podem interagir, chega-se a expressão global para obtenção dos deslocamentos em um domínio bidimensional (3).

$$[K].\{a\} = \{q\} - \{f\} \quad (3)$$

onde:

K : Matriz de rigidez para o estado plano de deformações;

a : Vetor de deslocamentos a ser determinado;

q : Componente do vetor carga referente à carga distribuída (cargas externas);

f : Componente do vetor carga referente às forças internas (força de volume e devida às deformações iniciais).

Assim, obtêm-se as tensões em função das deformações alcançadas (as quais por sua vez são obtidas em função dos deslocamentos (3)) em (4) através da formulação:

$$\{\sigma\} = [D].[B].\{a\} - [D].\{\varepsilon_0\} \quad (4)$$

onde:

$[\sigma]$: Matriz tensão nos nós dos elementos;

$[D]$: Matriz de elasticidade do estado plano de deformações;

$[B]$: Função forma de deformação;

$[\varepsilon_0]$: Vetor de deformação inicial.

III. DESCRIÇÃO DO APLICATIVO PFEM2D_AT

O programa PFEM2D_AT, que engloba a análise térmica e tensional, foi concebido utilizando a técnica de Programação Orientada a Objetos (POO) através da linguagem de programação *Object Pascal*, herdada da linguagem *Turbo Pascal*. O ambiente de programação utilizado foi o DELPHI® 5.0.

Todo o software foi baseado nos modelos de transmissão de calor e no problema de elasticidade bidirecional associados ao Método de Elementos Finitos (ver seção II).

A técnica de Programação Orientada à Objetos considerada na implementação do programa permitiu melhorar significativamente a organização do código fonte. Esta técnica também favoreceu a programação modular em um único aplicativo, com possibilidade do uso desses módulos ou componentes em múltiplos propósitos, devido à propriedade de herança adotada no conceito desta técnica.

Atualmente o software PFEM2D_AT é capaz de analisar os seguintes casos:

- Determinação do campo de temperaturas nas estruturas de concreto nas primeiras idades, considerando o calor de hidratação do cimento;
- Determinação do campo de temperaturas em sistemas de isolamento térmico (painéis, paredes de tijolos cerâmicos, de concreto, ou outros materiais) expostos aos ambientes externos e internos;
- Obtenção do campo de tensões associados aos gradientes térmicos de estruturas de concreto ou de outros materiais que estão sujeitos a este tipo de problema.

Deve-se destacar que o programa diferencia-se dos demais existentes no mercado, pois, além das aplicações acima, ele permite a análise de problemas construtivos envolvendo concreta massa considerando diversos parâmetros:

- Diferentes condições de lançamento (concretagem em camadas com diferentes alturas, temperaturas e intervalo de lançamento e composição do concreto);
- Concretagem com fôrma deslizante sob uma determinada velocidade de lançamento;
- Condições ambientes e de contorno variadas conforme necessidades da análise;
- Consideração da pós-refrigeração através da imposição de temperatura prescrita em nós determinados da malha;
- Consideração da maturidade do concreto na análise tensional;
- Variação de algumas propriedades do concreto com o tempo (módulo de elasticidade, fluência e retração)

Outros módulos foram desenvolvidos, porém ainda não foram associados ao programa PFEM2D_AT:

- Análise térmica de estruturas expostas ao fogo;
- Predição da penetração de cloretos no concreto armado através do mecanismo de difusão-convecção.

O aplicativo foi elaborado utilizando várias ferramentas visuais com a finalidade de tornar a sua interface com o usuário o mais amigável o possível (ver figuras 1 e 2).

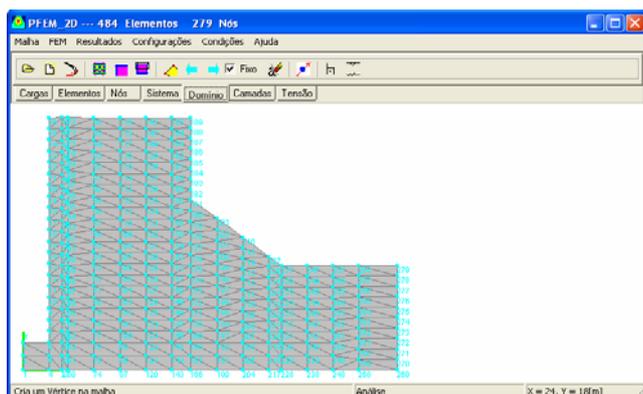


Figura 1. Tela principal do programa PFEM2D_AT

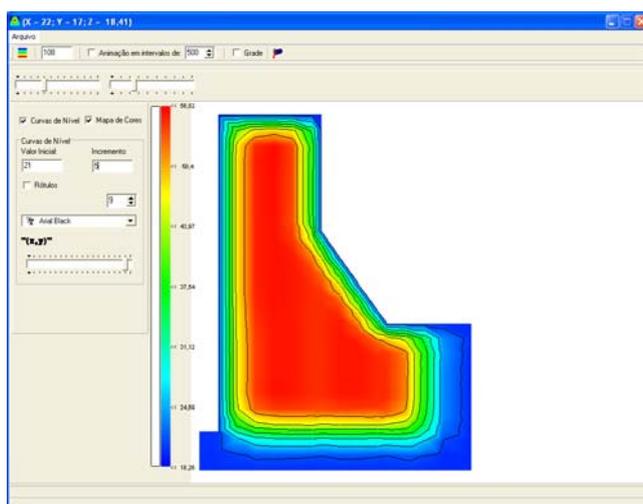


Figura 2. Tela exemplo de resultados gerados pelo programa

IV. ESTUDO DE CASO - VALIDAÇÃO DO APLICATIVO

A. Introdução

A etapa de validação de um novo modelo computacional para a análise de qualquer fenômeno físico, químico ou biológico, é de imprescindível importância em uma pesquisa envolvendo a implementação de um software, pois dela poder-se-á avaliar e analisar os resultados por ela gerados, podendo em consequência desta fase, apenas ocorrerem ajustes no software para que ele se enquadre na precisão e praticidade da qual o mesmo é exigido, podendo chegar, até mesmo, caso verifique essa necessidade, remodelar seu problema numérico de tal forma que se adeque às condições a ela requeridas.

B. Informações Gerais sobre o Estudo de Caso

Foram instalados nas vigas suportes de rolamento da ponte rolante da casa de Força da Usina Hidroelétrica de Serra da Mesa (ver foto 1), dois extensômetros elétricos tipo Carlson, com 20 cm. Um extensômetro corretor, localizado em uma caixa atensorial, e outro, denominado extensômetro ativo, disposto na direção do eixo longitudinal de um dos tramos da viga, ao qual foi subdividida sua concretagem para facilitar a sua construção. As dimensões da viga assim como a posição dos extensômetros podem ser verificadas na figura 3.



Foto 1. Viga da Ponte Rolante [4].

Para a concretagem da viga, esta foi subdividida em seis tramos, os quais foram concretados em diferentes etapas e com a circulação de água para a pós-refrigeração do concreto [4].

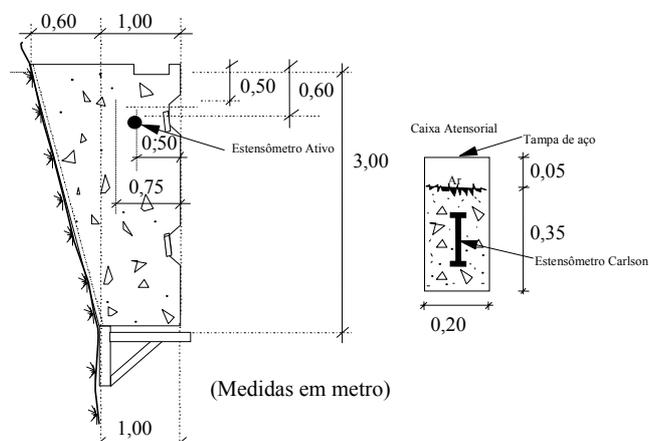


Figura 3. Seção transversal de um dos tramos da Viga da Ponte Rolante.

C. Dados Gerais para Análise

1) Propriedades Térmicas do Concreto

A análise bidimensional foi avaliada baseando nas seguintes propriedades mostradas na Tabela I a seguir [5].

TABELA I
PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO

| Propriedade | Parâmetros |
|---|------------|
| Calor Específico (Kcal/kg.°C) | 0,25 |
| Condutividade Térmica (Kcal/m.s.) | 54,48 |
| Coef. de Dilatação Térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) | 12,5 |
| Massa Específica (kg/m^3) | 2295 |

A curva de elevações adiabáticas (temperatura x tempo) do concreto foi determinado no calorímetro adiabático do laboratório de concreto de Furnas e está apresentado na Tabela II.

TABELA II
ELEVAÇÕES ADIABÁTICAS DE TEMPERATURA DO CONCRETO

| Idade | Temperatura | Idade | Temperatura |
|-------|-------------|-------|-------------|
| 0 | 0 | 4 | 29,96 |
| 1 | 16,02 | 5 | 30,94 |
| 2 | 24,75 | 10 | 32,79 |
| 3 | 28,22 | 28 | 33,84 |

As propriedades térmicas da rocha foram consideradas iguais ao do concreto, pelo fato do agregado ser do mesmo tipo litológico [4].

2) Propriedades Mecânicas e Viscoelástica do Concreto

As equações adotadas para o coeficiente da função de fluência (5), módulo de elasticidade (6) e resistência à tração na flexão (7), foram estabelecidas e os seus respectivos valores dos coeficientes (Tabela III) através regressão numérica baseados em resultados pontuais de ensaios realizado pelo Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S.A (ver figuras 4, 5 e 6).

$$F(z) = a_F + \frac{b_F}{z} \quad (5) \quad E(z) = \frac{z}{a_E + b_E \cdot z} \quad (6)$$

$$f_{tf}(z) = \frac{z}{a_{TF} + b_{TF} \cdot z} \quad (7)$$

TABELA III
PARÂMETROS MECÂNICOS E VISCOELÁSTICO DO CONCRETO

| Parâmetros | a | b |
|---|-------|-------|
| Módulo de Elasticidade (Gpa) | 8,609 | 4,225 |
| Coefficiente de Fluência ($10^{-6}/\text{MPa}$) | 5,976 | 14,7 |
| Resistência Tração na Flexão (MPa) | 1,053 | 0,281 |
| | | 6 |

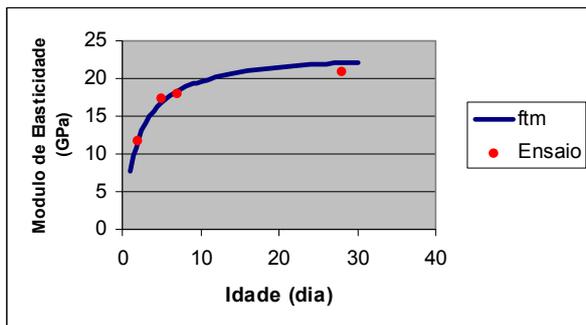


Figura 4. Módulo de Elasticidade

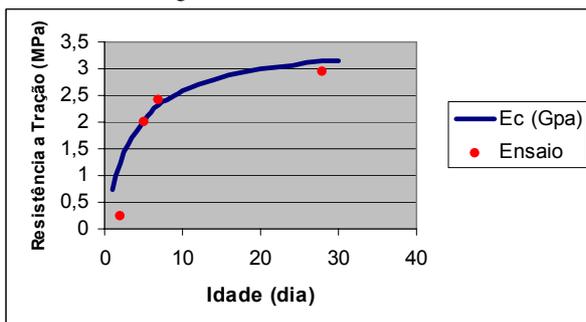


Figura 5. Tração na Flexão

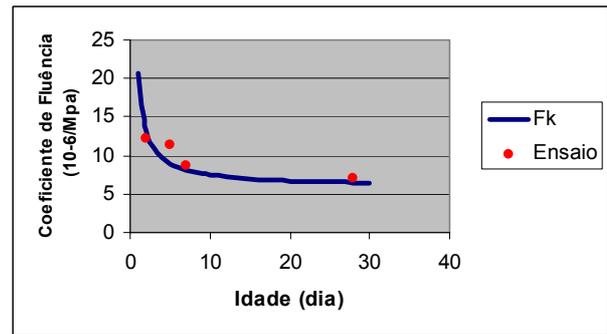


Figura 6. Coeficiente de Fluência

Adotou-se o módulo de elasticidade igual a 25 MPa e não foi considerado fluência na rocha.

3) Condições Iniciais e de Contorno

No estudo de caso, a temperatura ambiente e a temperatura de lançamento do concreto adotada foi de 30°C. Foi considerado o coeficiente de convecção do concreto com o ambiente sob cura de 300 W/m² .°C.

Adotou-se por restringir os deslocamentos dos nós de fronteira do domínio do material rochoso, acreditando que desta forma possa representar mais fielmente o que ocorre “in loco” (ver figura 7).

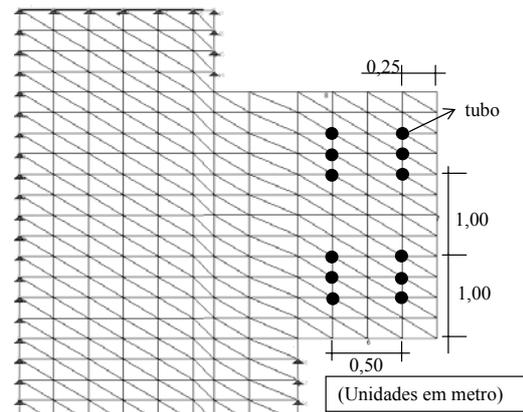


Figura 7. Malha de Elementos Finitos ilustrando as restrições dos nós na rocha e localização dos tubos de pós-refrigeração.

Os tubos de pós refrigeração foram locados previamente, nas posições indicadas na figura 7, antes da concretagem, sendo circulada água a temperatura ambiente (30°C), com a finalidade da amenização da temperatura máxima na estrutura.

O domínio foi discretizado (dividido) em 400 elementos finitos triangulares de 3 nós, cujo número total de nós foi de 233.

O tempo total de análise para este fim foi de 720 horas (30 dias), com análise em passos de tempo de 12 horas.

4) Resultados

A evolução de temperatura com o tempo no nó onde foi instalado o extensômetro pode ser averiguado na figura 8 e na figura 9, verifica-se as isotemperaturas geradas pelo PFEM2D para distintos passos de tempo.

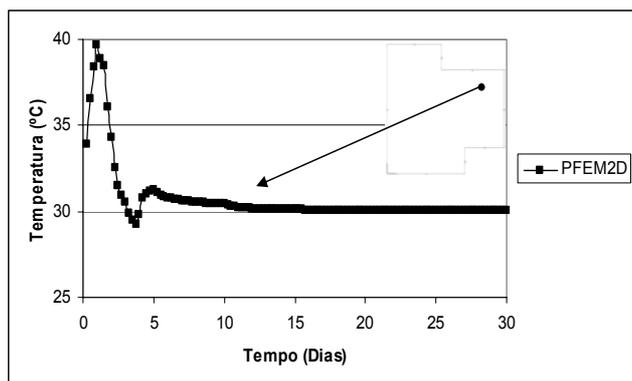


Figura 8. Evolução da Temperatura com o tempo

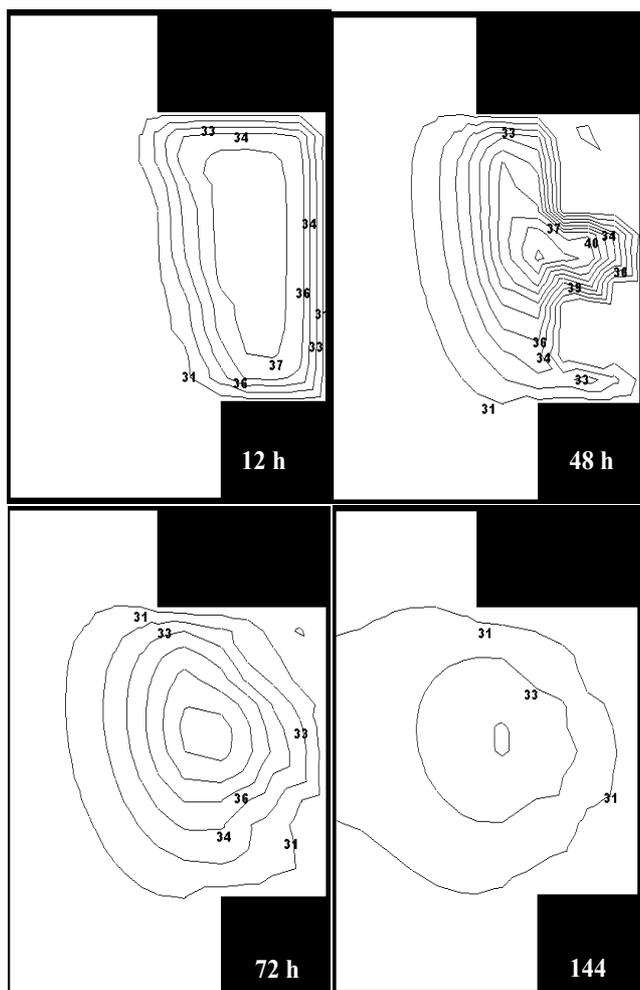


Figura 9. Isotemperaturas na viga para várias idades.

Na figura 10 é apresentada a evolução da tensão normal de origem térmica na direção vertical calculada pelo programa PFEM2D_AT e as obtidas segundo leituras no extensômetro.

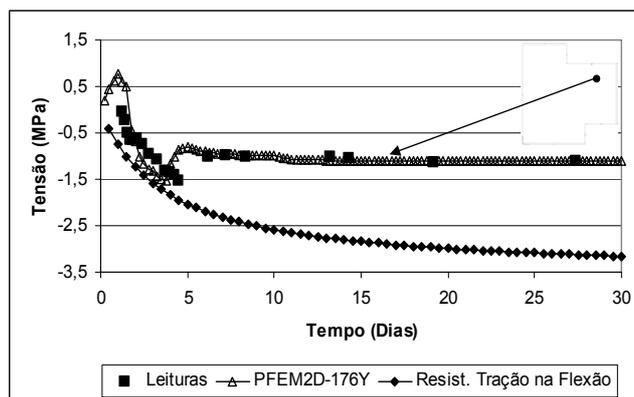


Figura 10. Evolução das Tensões verticais no nó 176, onde localiza-se o extensômetro.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se observar na figura 10 que o resultados apresentados pelo programa PFEM2D_AT apresentaram uma boa coerência com o comportamento auscultado através do extensômetro embutido na viga. Isto mais uma vez, vem comprovar a validade do software como um programa de análise térmica e tensional profissional, cuja aplicação pode ser amplamente explorada e utilizada para diversas situações de concretagem de estruturas envolvendo concreto massa.

É importante destacar que o projeto não se limitou apenas em elaborar e validar o aplicativo, mas ainda em fazer vários testes com casos reais, como também executar um pequeno estudo paramétrico, avaliando alguns modelos de fluência e retração e verificar a importância de cada um desses modelos no estudo termo-tensional.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Furnas pelo patrocínio da pesquisa, aos engenheiros Moacir Alexandre de Souza Andrade, chefe do Laboratório de Concreto de Furnas, e Eduardo de Aquino Gambale pela sua vasta experiência em análises térmicas e tensionais. Agradece-se ainda ao mestre engenheiro Cláudio José da Silva por ser um dos precursores do programa PFEM2D_AT e que muito contribuiu para solucionar dúvidas no andamento das pesquisas.

Por fim os autores agradecem ao consultor deste projeto (professor, doutor e engenheiro, João Luiz Calmon) por acreditar desde o início das pesquisas que o sucesso e finalização do mesmo seria alcançado.

Dissertações e Teses:

- [1] CALMON, J. L. Estudio térmico y tensional en estructuras masivas de hormigón. Aplicación a las presas durante la etapa de construcción. 1995. Tesis Doctoral - Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 1995.
- [2] MIRAMBELL, E. Criterios de diseño en puentes de hormigón frente a acción térmica ambiental, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Enero del 1987.

Periódicos:

- [3] GONZÁLEZ, F. P. Campo térmico en obras de hormigón: Ecuaciones de recinto e condiciones de contorno, Cuestiones térmicas en recintos de hormigón. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Santander, Santander - España, Noviembre 1981.

Artigos em Anais de Conferências (Publicados):

- [4] GAMBALE, E. A.; SANTOS, S. B., ANDRADE, M.A.S.; BITTENCOUT, R.M. Validação dos resultados do cálculo das tensões instaladas de origem térmica no concreto massa, com resultados reais. In: V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2003, São Paulo – SP, Brasil. Anais do V Simpósio Epusp Sobre Estruturas De Concreto. São Paulo – SP, Brasil.

Livros:

- [5] EQUIPE DE FURNAS, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico; **Concretos : massa, estrutural, projetado e compactado com rolo : ensaios e propriedades** - editor Walton Pacelli de Andrade - São Paulo: Pini, 1997.