

Modelagem do concreto a poucas idades com aplicações a barragens:

Novos paradigmas e suas soluções

E. A. Gambale, M. A. S. Andrade, A.N.M.Lopes, M.A.Traboulsi, S. B. Santos, E. F. Faria, E. M. R. Fairbairn, R. D. Toledo-Filho, F. L. B. Ribeiro, M. M. Silvos, I. A. Ferreira, E. A. Guerra, João M. Silva, Maria C. Souza e José P. Barbosa

Resumo – Neste trabalho estão apresentados alguns dos resultados obtidos no Projeto de P&D intitulado “Modelagem do concreto a poucas idades com aplicações a barragens: novos paradigmas e suas soluções” e corresponde ao desenvolvimento e implementação de procedimentos teóricos, experimentais e numéricos do modelo acoplado termo-químico-mecânico visando a análise de estruturas de materiais a base de cimento quando os carregamentos devidos aos efeitos da reação de hidratação são predominantes. Tais carregamentos são deformações impostas por efeitos térmicos (gradientes espaciais e temporais dos campos de temperatura) e por efeitos químicos (deformações correspondentes à retração autógena).

Palavras-chave — Barragens, concreto a poucas idades; modelos acoplados, modelagem numérica.

I. INTRODUÇÃO

A reação de hidratação do cimento provoca, durante o endurecimento do concreto, variações dimensionais que, quando restritas, podem levar a fissuração do material. Tratam-se, basicamente, de deformações de origem térmica, decorrentes do calor gerado pela reação de hidratação, e da retração autógena. Elementos de concreto de grandes dimensões, que consomem um grande volume de material e geram uma grande quantidade de calor, estão, portanto, sujeitos a fissuração nas primeiras idades. Em tais casos, o comportamento acoplado termo-químico-mecânico da estrutura é determinante em seu projeto. Isso ocorre também em elementos estruturais de concreto de alto desempenho, onde há um elevado consumo de cimento e a retração autógena do material é considerável.

Inúmeras pesquisas têm sido realizadas de modo a entender a natureza da fissuração no concreto nas primeiras idades e propor medidas de prevenção. No entanto, em função da complexidade da natureza do problema, que envolve fenômenos químicos, térmicos e mecânicos, alguns aspectos da fissuração do concreto nas primeiras idades ainda não são completamente compreendidos. Acrescente-se a tal comple-

xidade os recentes avanços de processos construtivos, e novas concepções de cimentos e dosagens que influem diretamente na fissuração do concreto a poucas idades.

Do ponto de vista da engenharia, diversas medidas podem ser tomadas de modo a prevenir a fissuração do concreto nas primeiras idades provocada pelos efeitos da reação de hidratação. Citam-se algumas dessas medidas, de acordo com o ACI Committee 224 [0] e ICOLD, International Commission on Large Dams [0]: Escolha da composição do concreto; Controle do ritmo de execução da estrutura, isto é, da espessura das camadas de concretagem e do intervalo de lançamento entre camadas consecutivas; Diminuição da temperatura de lançamento do concreto. Trata-se, portanto, de um problema de otimização, no qual se busca executar uma estrutura de concreto, evitando que sua segurança e durabilidade sejam comprometidas, e minimizando o custo de execução.

Para a solução de tal problema, foi proposto o projeto intitulado “Modelagem do concreto a poucas idades com aplicações a barragens: Novos paradigmas e suas soluções” desenvolvido no ciclo 2001/2002 com código ANEEL 0394-139/2002, e que faz parte do programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, com suporte financeiro de Furnas Centrais Elétricas S.A. Neste trabalho é apresentado um quadro que procura abranger os principais aspectos no estudo e controle da fissuração do concreto nas primeiras idades destacando a necessidade de reunir sofisticados modelos numéricos e adequados procedimentos experimentais. Para tratar consistentemente o problema, é necessário considerar a reação de hidratação como o fenômeno responsável tanto pelas variações dimensionais sofridas pelo concreto, quanto pela evolução das propriedades térmicas e mecânicas do material.

O comportamento termo-químico-mecânico do concreto nas primeiras idades é analisado numericamente utilizando modelo de ULM e COUSSY [0] onde a reação de hidratação, tratada em sua natureza exotérmica e termo-ativada, é parametrizada através do grau de hidratação $0 \leq \xi \leq 1$. O modelo desenvolvido por Ulm e Coussy considera os efeitos cruzados entre a reação de hidratação, a evolução da temperatura, variações dimensionais e mudanças nas propriedades do concreto. Este modelo vem sendo desenvolvido e aplicado no Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, em diversos trabalhos [0], [0], [0], [0]. Tal modelo, implementado em uma plataforma de elementos finitos, em conjunto com um algoritmo genético, permitiu ainda, desenvolver

¹Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

E. A. Gambale, M. A. S. Andrade, A.N.M.Lopes, M.A.Traboulsi, S. B. Santos, E. F. Faria trabalham em FURNAS, Centrais Elétricas S.A., Brasil.

E. M. R. Fairbairn, R. D. Toledo-Filho, F. L. B. Ribeiro, M. M. Silvos, I. A. Ferreira, E. A. Guerra trabalham na COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

uma ferramenta de otimização para a fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação [0].

Para sua aplicação, a evolução das propriedades do concreto deve ser parametrizada com relação ao grau de hidratação. Nesse sentido, foi desenvolvido um procedimento experimental que submete os corpos-de-prova utilizados na determinação experimental das propriedades do concreto ao histórico de temperatura dado pela curva de elevação adiabática da temperatura. Tal curva, obtida experimentalmente em calorímetro adiabático, permite a determinação da evolução do grau de hidratação, possibilitando a correlação com a evolução das propriedades do concreto [0].

Para a aplicação do modelo, em fases preliminares de projeto, antes da realização de ensaios calorimétricos, foi desenvolvido uma ferramenta preditiva, através de redes neurais, utilizando o banco de dados com os ensaios adiabáticos realizados pelo Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S.A.. Tal ferramenta determina a elevação adiabática da temperatura para um dado concreto, caracterizado a partir de sua dosagem [0]. Tal ferramenta, em conjunto com os demais modelos numéricos, auxilia no estudo de dosagem do material que minimiza os efeitos da hidratação na fissuração do concreto nas primeiras idades.

Todos esses procedimentos compõem um quadro de análise do concreto nas primeiras idades, acoplando modelos numéricos e métodos experimentais, incluindo: um programa de elementos finitos para determinação do comportamento termo-químico-mecânico (*DamStr*), um modelo de otimização, e uma ferramenta preditiva, e procedimentos experimentais. Neste trabalho, tal quadro é apresentado em seus diferentes aspectos.

II. MODELO DE ACOPLAMENTO TERMO-QUÍMICO MECÂNICO.

O modelo de Ulm e Coussy considera o concreto como um meio poroso quimicamente reativo, formado por um esqueleto sólido, composto de grãos de cimento anidro e hidratos CSH, e poros preenchidos por ar ou água. A evolução da reação de hidratação é representada por uma lei do tipo Arrhenius, dada pela equação (0), que considera a exotermia e a termo-ativação da reação de hidratação.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d\xi}{dt} m_{\infty} = \frac{1}{\eta(\xi)} A(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (0)$$

Onde: dm/dt é a variação da massa de esqueleto; ξ é o grau de hidratação, ou em outras palavras, a relação entre a massa de esqueleto em um determinado tempo t , normalizada pela massa de esqueleto para hidratação completa, isto é $\xi(t)=m(t)/m_{\infty}$; $\eta(\xi)$ é um termo de viscosidade que representa o aumento da barreira física de acesso da água livre ao cimento anidro, provocado pelo aumento dos hidratos CSH; $A(\xi)$ é a afinidade química da reação, em outras palavras, a ação termodinâmica associada a velocidade de formação de hidratos, que também depende do estado da reação; E_a é a energia de ativação aparente da reação, considerada constante com relação ao grau de hidratação; R é a constante univer-

sal dos gases e T é a temperatura absoluta.

A equação (0), pode ser escrita de modo mais apropriado, como dado pela equação (0), onde surge o termo $\tilde{A}(\xi)$ que é a afinidade química normalizada e é uma função intrínseca do material que descreve a evolução da reação de hidratação.

$$\frac{d\xi}{dt} = \tilde{A}(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (0)$$

A equação que representa o acoplamento termo-químico, permitindo a determinação dos campos de temperatura e hidratação é dada a seguir:

$$C_e \dot{T} = Q + L \dot{\xi} + k \nabla^2 T \quad (0)$$

Aqui, a forma padrão da equação de calor pode ser reconhecida, com C_e sendo o calor específico, e k a condutividade térmica. O termo $L \dot{\xi}$ representa o calor gerado pela exotermia da reação de hidratação, com L sendo o calor latente de hidratação, determinado através de testes experimentais. A equação (0) pode ser resolvida através de um esquema de solução passo-a-passo, se os valores de $\dot{\xi}$ são determinados, para cada passo de tempo, através da equação (0). Para esse propósito é necessário conhecer a curva da afinidade normalizada que caracteriza o material, a qual pode ser obtida através de ensaios de elevação adiabática da temperatura. A solução da equação (0) possibilita o conhecimento dos campos de temperatura e de grau de hidratação para cada passo de tempo, possibilitando a determinação das propriedades mecânicas, tais como resistências, módulo de elasticidade, e parâmetros de fluência, como uma função da evolução da hidratação para cada ponto da estrutura.

O acoplamento químico-mecânico segue os desenvolvimentos de ULM e COUSSY [0], com consideração de superfícies de plastificação dependentes do grau de hidratação, complementado pela introdução dos efeitos da fluência como proposto por HELLMICH [0], e SERCOMBE et al. [0], considerando a deformação de fluência como composta por uma fluência de curto prazo e uma fluência de longo prazo.

$$d\sigma = C(\xi) : \begin{pmatrix} d\epsilon - d\epsilon^p - d\epsilon^f - \\ d\epsilon^v - \alpha \mathbf{1}dT - \beta(\xi)\mathbf{1}d\xi \end{pmatrix} \quad (0)$$

Onde: σ é o tensor de tensões; $C(\xi)$ é o tensor de rigidez elástica; ϵ é o tensor de deformações; ϵ^p é o tensor de deformações plásticas; ϵ^f é o tensor de deformações de fluência de longo prazo; ϵ^v é o tensor de fluência de curto prazo; α é o coeficiente de dilatação térmica; e $\beta(\xi)$ é o coeficiente que correlaciona a evolução da reação de hidratação com a retração autógena.

O desenvolvimento da solução da equação (0), que permite a determinação dos campos de tensão em toda estrutura, é descrito em detalhes nos trabalhos [0], [0], [0].

III. LEIS DE EVOLUÇÃO

O quadro teórico descrito brevemente acima formula o problema termo-químico-mecânico através do grau de hidratação ξ , que é um parâmetro que descreve a maturidade do material. O grau de hidratação considera os efeitos do tempo, da temperatura, e tendência intrínseca de desenvolvimento do material e de suas propriedades. É necessário, portanto, estabelecer leis de evolução para as propriedades do material como uma função do grau de hidratação ξ .

Uma das principais variáveis que intervém no problema é a afinidade normalizada, que corresponde a tendência intrínseca do material de reagir, isto é, a tendência de desenvolvimento da reação sem a influência da temperatura. Tal propriedade pode ser determinada a partir do resultado da evolução adiabática da temperatura do concreto, do modo descrito a seguir.

Em condições adiabáticas obtemos um acoplamento termo-químico linear. Neste caso a equação do calor torna-se:

$$C_\varepsilon \dot{T}^{ad} = L \dot{\xi} \quad (0)$$

Onde: $L = L_m m_\infty$ = Calor latente por unidade do grau de hidratação. O valor de L é igual ao calor total gerado pela hidratação de uma unidade de volume. T^{ad} representa a temperatura do concreto em condições adiabáticas e sua variação com o tempo deve-se à natureza exotérmica da reação de hidratação. Fazendo $\xi(t=0) = 0$ e $T(t=0) = T_0^{ad}$, determina-se uma relação entre T^{ad} e ξ . Integrando a equação (0), obtém-se:

$$C_\varepsilon \int_0^t \dot{T}^{ad}(\tau) d\tau = L \int_0^t \dot{\xi}(\tau) d\tau \Rightarrow \quad (0)$$

$$C_\varepsilon (T^{ad} - T_0^{ad}) = L \xi(t)$$

$$\xi(t) = (T^{ad} - T_0^{ad}) \frac{C_\varepsilon}{L} \quad (0)$$

Considerando para hidratação completa $\xi = 1$ e $T^{ad} = T^{ad}(\infty)$, onde $T^{ad}(\infty)$ representa o valor assintótico da curva de temperatura, e operando as expressões anteriores chega-se a equação que determina o histórico do grau de hidratação a partir dos valores de T^{ad} .

$$\frac{L}{C_\varepsilon} = [T^{ad}(\infty) - T_0^{ad}]; \quad \xi(t) = \frac{T^{ad}(t) - T_0^{ad}}{T^{ad}(\infty) - T_0^{ad}} \quad (0)$$

Com a equação (0) é possível determinar o calor latente de hidratação e o grau de hidratação para qualquer tempo em condição adiabática, se a elevação adiabática da temperatura do concreto e seu calor específico são conhecidos. Agora, invertendo a equação (0), a afinidade normalizada pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$\tilde{A}(\xi) = \frac{d\xi}{dt} \exp\left(\frac{E_a}{RT^{ad}}\right) \quad (0)$$

Dessa forma o ensaio de elevação adiabática da temperatura do concreto possibilita a determinação da afinidade normalizada, através da equação obtida operando (0) e (0):

$$\tilde{A}(\xi(t)) = \frac{1}{T^{ad}(\infty) - T_0^{ad}} \frac{dT^{ad}(t)}{dt} e^{\left(\frac{E_a}{RT^{ad}(t)}\right)} \quad (0)$$

É importante observar que a curva afinidade normalizada obtida em condição adiabática, pode ser utilizada para a determinação do grau de hidratação em qualquer histórico de temperatura resolvendo as equações (0) e (0), uma vez que, por hipótese, a afinidade química normalizada é considerada como uma característica intrínseca do material.

Para a determinação da afinidade química normalizada, bem como para sua aplicação no cálculo do grau de hidratação, é necessária a determinação da energia de ativação aparente E_a , que pode ser determinada por meio de ensaios de resistência à compressão, ou por meio de ensaios de elevação adiabática da temperatura conduzidos a partir de diferentes temperaturas iniciais, isto é, diferentes valores de T_0^{ad} .

A. Evolução das Propriedades – Modelos Simplificados

As leis de evolução para as outras propriedades do concreto como função do grau de hidratação pode ser tomada de acordo com a bibliografia, ou através de ensaios experimentais. Por exemplo para a evolução da resistência à compressão pode ser representada de modo simplificado por meio de uma lei bi-linear, com a dada pela expressão seguinte [0]:

$$f_c(\xi(t)) / f_c(\infty) = \begin{cases} 0 & \text{para } \xi(t) \leq \xi_0 \\ \frac{(\xi(t) - \xi_0)}{(1 - \xi_0)} & \text{para } \xi(t) > \xi_0 \end{cases} \quad (0)$$

Onde: $f_{c,\infty} = f_c(\xi=1)$, é a resistência à compressão para a hidratação completa, e ξ_0 é o grau de hidratação no patamar e percolação, isto é, o momento a partir do qual o concreto passa a ser um sólido ACKER [0], e que será tratado em detalhe posteriormente.

Outros modelos simplificados podem ser usados para a predição da resistência à tração, módulo de elasticidade, retração autógena, fluência, parâmetros das superfícies de plastificação, etc., e são encontrados na bibliografia [0], [0], [0], [0]. Tais modelos, no entanto podem não representar precisamente a relação entre as propriedades do concreto e a evolução do grau de hidratação, fundamental para a aplicação do modelo acoplado descrito, daí a necessidade do desenvolvimento de um procedimento experimental capaz de fornecer tais dados.

B. Novos ensaios para determinação das leis de evolução

Para uma análise mais precisa, testes experimentais podem ser realizados de modo a determinar as leis de evolução. Assim sendo, um procedimento experimental foi desenvolvido para a determinação das relações entre o grau de hidratação, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

dade. Tal procedimento pode ser utilizado para outras propriedades como, por exemplo, resistência à tração, permeabilidade, retração autógena e distribuição do tamanho de poros.

O procedimento desenvolvido consiste em determinar as propriedades do concreto em várias idades, utilizando corpos-de-prova mantidos até o momento do ensaio dentro do calorímetro a ar, sendo os corpos-de-prova submetidos ao mesmo histórico de temperatura obtido no ensaio de elevação adiabática da temperatura do concreto, para o qual a evolução do grau de hidratação é conhecida. Para tanto, foi adaptado o calorímetro do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS, de forma que estantes foram colocadas em seu interior para alojar os corpos-de-prova para os quais desejam-se conhecer as propriedades em função do grau de hidratação (Figura 1).

É importante considerar que existe um aumento da massa de concreto dentro do calorímetro, mas esta massa é também reativa e exotérmica contribuindo para a geração de calor dentro do calorímetro. O equipamento adaptado para os desenvolvimentos reportados neste trabalho é descrito em detalhe em [0].



Figura 1 – Calorímetro adiabático adaptado para determinação das leis de evolução com o grau de hidratação.

Alguns resultados obtidos através do procedimento descrito são apresentados nas Figuras seguintes. Na Figura 2 está mostrada a elevação adiabática da temperatura para três diferentes temperaturas iniciais, das quais a energia de ativação aparente e a curva de afinidade normalizada da Figura 3 foram determinadas. Nas Figuras 4, 5 e 6 estão apresentadas, respectivamente, a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade normalizados. Os detalhes do programa experimental podem ser encontrados no trabalho em [0].

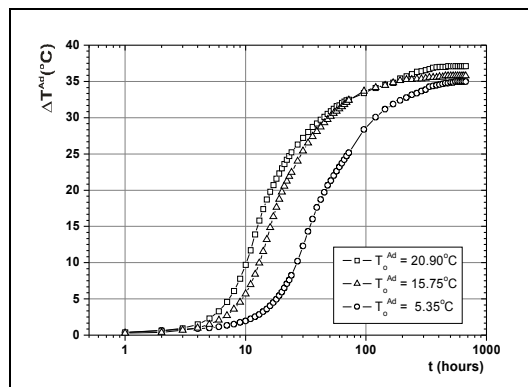


Figura 2 – Elevação adiabática da temperatura para diferentes temperaturas iniciais.

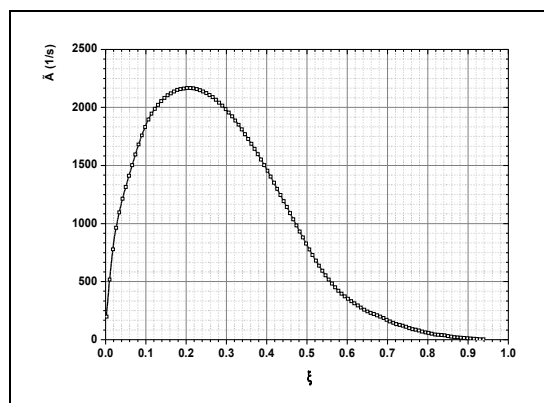


Figura 3 – Curva de afinidade química normalizada.

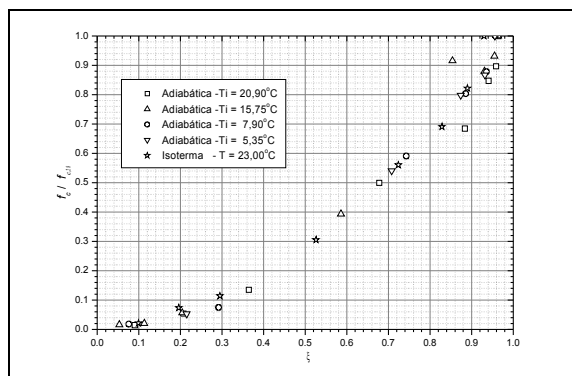


Figura 4 – Resistência à compressão normalizada, obtida como uma função do grau de hidratação.

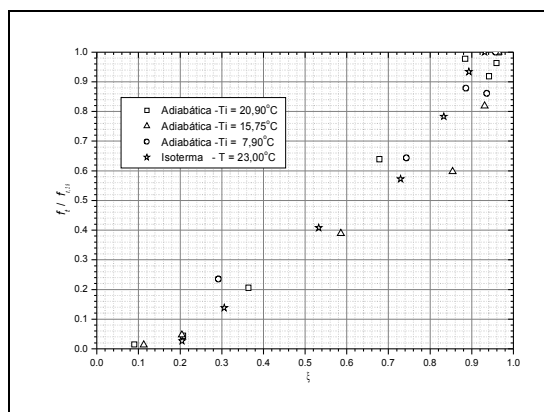


Figura 5 – Resistência à tração normalizada, obtida como uma função do grau de hidratação.

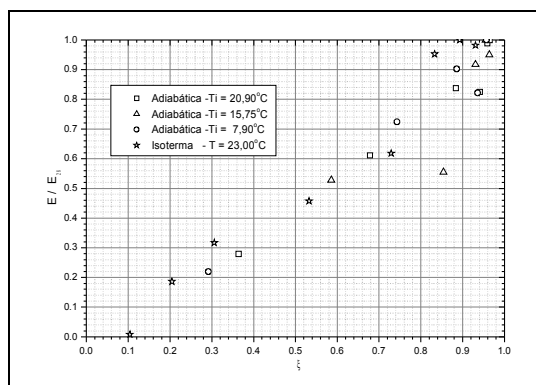


Figura 6 – Módulo de elasticidade normalizado, obtido como uma função do grau de hidratação.

Com base nos resultados obtidos no calorímetro a ar do DCT.C de FURNAS, foi implementado um procedimento semelhante no PEC-COPPE/UFRJ, utilizando um calorímetro adiabático a água.

Na Figura 7 está apresentado o desenho esquemático do sistema para determinação das propriedades do concreto em função do grau de hidratação, implementado Laboratório de Estruturas do PEC-COPPE/UFRJ. Na Figura 8 está mostrado o tanque de cura com o calorímetro adiabático a água ao fundo.

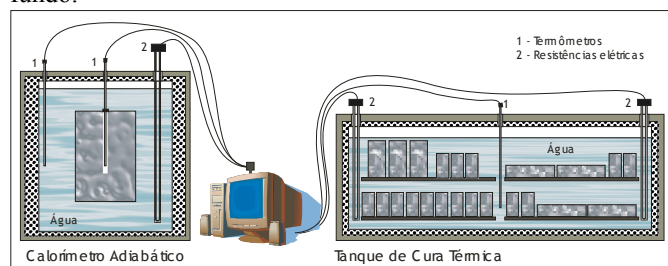


Figura 7 - Sistema para determinação das propriedades do concreto em função do grau de hidratação.

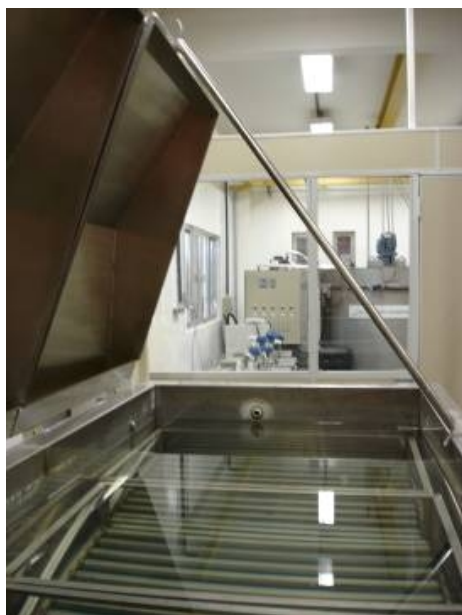


Figura 8 – A câmara de cura e o calorímetro adiabático ao fundo e a unidade de controle.

IV. IDADES EXTREMAS

A. Idades extremas : determinação do patamar de percolação.

O grau de hidratação, que corresponde à evolução da reação, também pode ser correlacionado aos estados de suspensão de partículas sólidas e estado sólido que assume o concreto desde a mistura dos componentes até o seu endurecimento. Desde que os componentes do concreto (cimento, areia, brita, água, aditivos, etc.) são misturados, o material apresenta-se em um período inicial como uma suspensão que pode ser assimilada a um fluido não-newtoniano de *Bingham* ou de *Herschel-Bulkley*. Em seguida passa a apresentar-se como um sólido. Para determinados problemas simples de engenharia é suficiente que se considere um período de transição entre suspensão e sólido que geralmente é chamado de “pega”. Entretanto, para a utilização de modelos mais sofisticados e também para a implementação de procedimentos experimentais (para concretos a poucas idades) mais precisos é necessário que se considere o período da pega de forma mais detalhada, procurando correlacionar as mudanças no comportamento do material à evolução de sua microestrutura.

Sendo assim, considera-se a teoria da percolação [0] para descrever a passagem do estado de suspensão de partículas a sólido. O patamar de percolação acontece então em um momento exato do processo de hidratação (e não em um longo período como a pega), sendo o grau de hidratação correspondente denominado ξ_0 . O patamar de percolação é importante tanto para os procedimentos numéricos quanto para os procedimentos experimentais que determinam os parâmetros dos modelos acoplados termo-químico-mecânicos. Assim, por exemplo, a definição de um aparato experimental para a determinação da retração autôgena passa necessariamente por uma separação clara e precisa deste fenômeno e da contração *Le Chatelier* sob risco de os valores da retração autôgena serem superestimados já que a leitura zero não será determinada com precisão.

Neste projeto de pesquisa utilizou-se inicialmente um procedimento experimental com base na leitura do sinal de um extensômetro *Carlson* para a determinação do patamar de percolação. Imaginou-se que enquanto estivesse na fase líquida o extensômetro não responderia a deformações já que o líquido se adapta à forma de seu recipiente. Entretanto, tal fato não se verificou por existirem ruídos de leitura nesta fase inicial da hidratação, já que a rigidez do sólido é próxima de zero, sendo menor que a rigidez do extensômetro. A rigidez do sólido varia bruscamente durante os primeiros momentos da hidratação sendo que a precisão da leitura fica comprometida por um estado de tensões e de deformações difícil de ser determinado. Desta forma, decidiu-se pelo estabelecimento de outro procedimento experimental que fosse mais robusto para a determinação do patamar de percolação. Tal procedimento, baseado em um experimento com emissão de ultra-som é descrito a seguir.

A relação mais geral entre a velocidade do som em um sólido e sua densidade e constantes elásticas é dada pela seguinte equação:

$$V_s = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}} \quad (0)$$

Onde: V_s é a velocidade do som, C_{ij} é a constante elástica e ρ é a massa específica do sólido em questão.

O conceito acima, traduzido pela equação (0) é utilizado para a realização de ensaios não destrutivos em pastas, argamassas e concretos com o fim de determinar características elásticas e a transição entre o estado de suspensão e o estado sólido. Para tal é medida a velocidade de pulso ultra-sônica (VPU) com o emprego de um equipamento que contém um transmissor, um receptor e um circuito de medição e leitura de velocidade, conforme esquema mostrado na Figura 9.

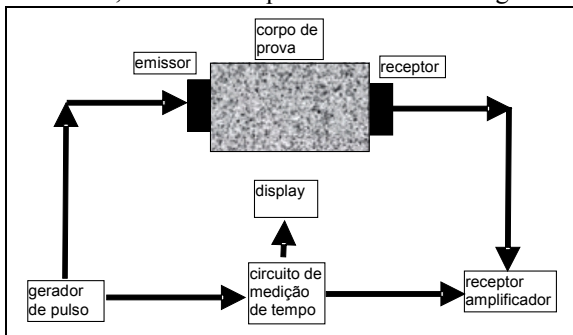


Figura 9 – Esquema do equipamento de medição de VPU.

A hidratação do cimento é um processo complexo que envolve a mudança de um estado de suspensão a um estado sólido. Durante o período de suspensão, a Velocidade de Pulso Ultra-sônica (VPU) não é muito sensível ao crescimento da estrutura sólida na pasta. A fase água/ar, especialmente as bolhas de ar presentes na água atuam como fator dominante que determinam a velocidade do pulso ultra-sônico. Ao ser atingido o patamar de percolação, existe uma nítida mudança da evolução da VPU, apresentando um notável aumento após ser atingido o estado sólido. A partir de então, a VPU segue por uma curva similar à evolução do módulo elástico, conforme indicado pela equação (0). Tendo em vista que as propriedades mecânicas são dependentes da evolução do esqueleto sólido, pode-se imaginar que é possível correlacionar a VPU com propriedades como a resistência à compressão.

O equipamento desenvolvido para utilização nesta pesquisa consta de uma unidade de leitura conectada ao emissor e ao receptor que são instalados em uma caixa de madeira que contém uma amostra do material que está em estado de suspensão. Na Figura 10 está mostrado o equipamento de medição e a título ilustrativo, na Figura 11 são apresentados resultados obtidos pela medição para um concreto estudado, identificando a determinação do patamar de percolação.



Figura 10 – Foto da montagem do ensaio.

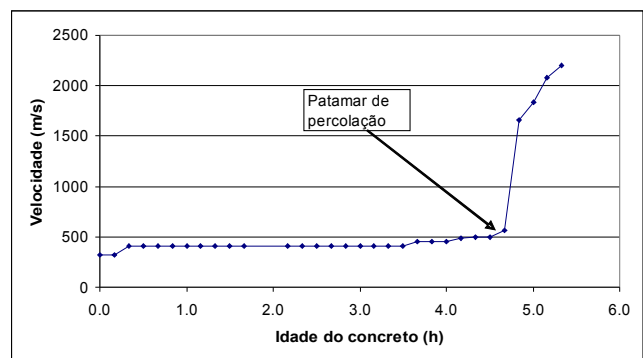


Figura 11 – Exemplo de gráfico da evolução da VPU.

O gráfico acima indica claramente a passagem do estado de suspensão ao estado sólido definido como patamar de percolação e fica evidente que o equipamento desenvolvido é capaz de determinar com precisão este importante parâmetro para os modelos de acoplamento termo-químico-mecânico.

B. Idades extremas : determinação das propriedades para grau de hidratação igual a 1.

A caracterização experimental da cinética de hidratação de um concreto, de acordo com o ensaio adiabático, apresenta alguns valores que devem ser corrigidos para graus de hidratação próximos de 1. Ocorre que, após a estabilização da temperatura no teste adiabático, o que é considerado na formulação teórica como grau de hidratação igual a 1, isto é, 100%, o material ainda continua desenvolvendo rigidez e resistência, e esta variação de resistência após a aparente estabilidade térmica pode ser consideravelmente grande. Isto mostra que o aparato experimental não capta todo o fenômeno envolvido e a variação de temperatura que ocorre ao final da elevação adiabática, na velocidade em que ela ocorre, está aquém da precisão dos calorímetros. Dessa forma buscou-se determinar uma relação entre curva de elevação adiabática da temperatura obtida experimentalmente e o grau de hidratação, de modo a considerar a limitação de ensaio descrita anteriormente, com o objetivo de determinar uma melhor previsão da evolução das propriedades mecânicas do material, para grau de hidratação igual a 1.

Através da equação (0) é possível determinar o histórico do grau de hidratação a partir dos resultados obtidos no ensaio de elevação adiabática da temperatura do concreto, T^{ad} . Ao considerar $T^{ad}(\infty)$ igual ao valor de elevação adiabática da temperatura obtido experimentalmente após a estabilidade térmica, obtém-se grau de hidratação igual a 1 (100%) para idades onde o material ainda continua desenvolvendo rigidez e resistência. De modo a considerar esse fato, buscou-se determinar uma relação entre $T^{ad}(\infty)$ e o valor obtido experimentalmente após a estabilidade térmica, chamado aqui de $T_{\infty,exp}^{ad}$. Para isso foi adotada a seguinte relação:

$$\alpha h = \frac{T_{\infty,exp}^{ad}}{T^{ad}(\infty)}; \quad \alpha h \leq 1 \quad (0)$$

O parâmetro αh da equação (0), foi analisado com base nos resultados experimentais do banco de dados do Laboratório de Concreto de Furnas. Deste banco de dados foi selecionado um conjunto de noventa e três dosagens para as quais foram determinadas a elevação adiabática da temperatura, e a evolução da resistência à compressão para diferentes idades (7, 28, 91, 180 e 360 dias).

Para cada conjunto de resultados foi determinado o valor de αh que minimiza o erro na previsão das propriedades mecânicas de corpos-de-prova mantidos em condição isoterma, adotada como 21°C. No procedimento foi utilizado um algoritmo genético, que para cada possível valor de α , realizava a seguinte sequência de cálculos:

1. Cálculo da afinidade normalizada através da expressão:

$$\tilde{A}(\xi(t)) = \frac{1}{T^{ad}(\infty) - T_0} \frac{dT^{ad}(t)}{dt} e^{\left(\frac{Ea}{RT^{ad}(t)} \right)}, \text{ onde}$$

$$T^{ad}(\infty) = T^{ad}_{28} / \alpha h; \quad \alpha h \leq 1$$

2. Cálculo da evolução do grau de hidratação em condição isoterma (21°C), utilizando a afinidade normalizada já calculada.
3. Cálculo da previsão da resistência à compressão do concreto, através de modelo quadrático, utilizado em função das evidências experimentais obtidas no presente projeto de P&D [0]:

$$f_c(\xi(t)) / f_c(\infty) = \begin{cases} 0 & \text{para } \xi(t) \leq \xi_o \\ \frac{(\xi(t) - \xi_o)^2}{(1 - \xi_o)^2} & \text{para } \xi(t) > \xi_o \end{cases}$$

Adotando $f_c(\infty)$ como sendo a resistência à compressão obtida na idade de 360 dias

4. Cálculo do erro médio:

$$Er = \sum_{i=1}^n \frac{|f_c(\xi(t_i)) - f_{c,exp}^i|}{f_{c,exp}^i} / n$$

Onde n representa o número de idades para as quais são conhecidos os valores experimentais da resistência à compressão ($f_{c,exp}^i$). Na análise realizada foram analisadas cinco idades de modo que $n = 5$, e $t_i = \{7, 28, 91, 180, 360\}$.

Dessa forma foi possível obter para cada dosagem analisada um valor de αh que minimiza o erro médio na previsão da resistência à compressão. Os resultados obtidos indicam uma variação de α entre 0,8 e 1, conforme a Figura 11. Foi obtido um valor médio para alfa (figura 12 e 13), $\alpha_m = 0,919$, com um desvio padrão de 0,051.

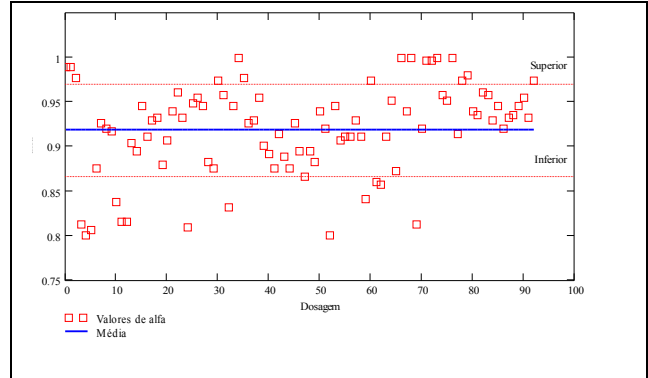


Figura 12 – Valores de obtidos de αh , média e desvio padrão.

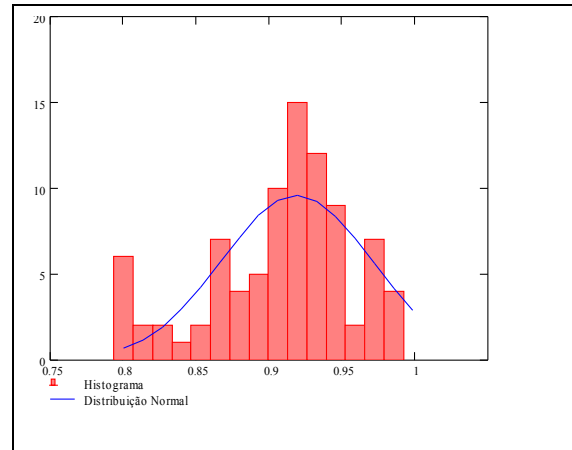


Figura 13 – Histograma e distribuição normal dos valores obtidos para αh .

V. MODELOS DE DADOS

Todos os modelos anteriormente referenciados, têm como um dos mais importantes parâmetros de entrada, a caracterização da cinética e da amplitude da geração de calor de hidratação, o que é tradicionalmente obtido através de ensaios em calorímetros adiabáticos ou semi-adiabáticos. Sendo assim, visto a importância, para a simulação dos efeitos térmicos em estruturas de concreto massa e da quantificação da geração de calor pelo volume do material, alguns modelos numéricos têm sido propostos para determinação da exotermia (amplitude e cinética) da reação de hidratação do concreto. Dentre os modelos disponíveis podemos citar os modelos macroscópicos desenvolvidos por WALLER [0] e DE LARRARD [0], e o modelo de MAEKAWA *et al.* [0].

O modelo de WALLER e DE LARRARD depende ainda de informações obtidas de alguns ensaios adiabáticos, o que indica que não seria um modelo totalmente preditivo. O modelo de MAEKAWA *et al.* considera o concreto como um material multifásico com diversas reações ocorrendo simultaneamente, e foi elaborado para permitir a predição da cinética e da amplitude da geração de calor de hidratação. Entre-

tanto, utiliza parâmetros determinados especificamente para os concretos para os quais o modelo foi calibrado [0].

No presente projeto utilizou-se a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) para o estabelecimento de um modelo preditivo de determinação da elevação adiabática da temperatura do concreto. Para tal foram utilizados os resultados experimentais, obtidos ao longo dos últimos 30 anos, no calorímetro adiabático do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS Centrais Elétricas S. A. [0] que foram organizados sob a forma de um banco de dados. Os bons resultados obtidos pelo modelo de redes neurais indicam que a predição da elevação adiabática pode ser realizada com boa aproximação constituindo-se em uma importante ferramenta para o projeto das estruturas de concreto massa.

Uma Rede Neural Artificial (RNA) é um sistema composto por elementos de processamento relativamente simples conectados entre si formando uma rede. Desta forma, por analogia, uma unidade da rede é chamada de neurônio e as conexões são chamadas de sinapses. Assim como no cérebro, as sinapses entre os neurônios podem ser excitatórias ou inibitórias e os neurônios têm um potencial de ativação que transmitem ou inibem o sinal recebido.

Uma RNA é um modelo matemático que possui parâmetros que podem ser ajustados para que a rede tenha um comportamento desejado. Este ajuste de parâmetros é conhecido como o treinamento da rede. Após o treinamento, a rede é capaz de reconhecer os padrões “aprendidos”, a partir de uma entrada semelhante [0]. As RNAs são modelos computacionais eficientes e têm se mostrado capazes de resolver problemas complexos de reconhecimento de padrões e aproximação de funções em diversas aplicações, como engenharia de estruturas e materiais [0], [0].

Neste trabalho foram utilizados 136 resultados experimentais obtidos no calorímetro adiabático do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS Centrais Elétricas S.A.. Para poder utilizar uma Rede Neural Artificial como uma ferramenta preditiva da exotermia da reação de hidratação, esses resultados foram organizados num conjunto de treinamento, na forma de uma tabela, na qual cada registro contém os fatores da dosagem que influenciam diretamente na liberação de calor e os dados das curvas de elevação adiabática da temperatura do concreto correspondente [0].

Os fatores de dosagem considerados foram: o tipo de cimento, caracterizado por sua composição química; a finura do cimento; o consumo de cimento na dosagem; o consumo das adições minerais de escória, cinzas volantes e outras pozolanas; o consumo de água; o consumo de adições químicas; o consumo de agregados e a temperatura inicial do concreto.

A dosagem do concreto foi caracterizada através do consumo (kg/m^3) de cada um de seus constituintes, representando cada um deles um neurônio de entrada. Tais consumos deram origem a sete diferentes neurônios de entrada, relativos aos seguintes materiais constituintes: cimento, água, agregados, outras pozolanas, escória, cinza volante e adições químicas.

O tipo de cimento foi identificado por sua composição química e por sua finura. A composição química do cimento,

isto é, o teor percentual de cada um dos óxidos normalmente presentes no cimento Portland, deu origem a cinco neurônios de entrada, representando os seguintes compostos: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e SO_3 . Foram adotados diretamente os teores dos óxidos, uma vez que não se dispunham de resultados de determinação direta da composição potencial, e a aplicação das equações de BOGUE representaria um mapeamento dos teores de óxidos, além de não ser aplicável para todos os tipos de cimento. A finura do cimento representa outro neurônio de entrada e foi caracterizada através do módulo de “Finura de Blaine”. Finalmente, o último neurônio de entrada corresponde à temperatura inicial do concreto ($^{\circ}\text{C}$), totalizando $p = 14$ unidades de entrada.

Os resultados experimentais de elevação adiabática da temperatura [0] apresentam leituras efetuadas de hora em hora nas primeiras 24 h e diariamente até a estabilização da temperatura ou até completar 28 dias, totalizando 52 valores. Seria impossível ajustar um modelo de rede neural com 14 unidades de entrada e 52 unidades de saída com apenas 136 registros. A solução ideal seria uma topologia recorrente para simular a evolução dinâmica da temperatura. Entretanto um modelo recorrente implica em algoritmos de treinamento complexos nem sempre encontrados em ferramentas comerciais. Optou-se então por uma solução aproximada, na qual o modelo de RNA foi construído em duas etapas: inicialmente a curva de elevação adiabática da temperatura foi aproximada por uma função paramétrica para cada ensaio do conjunto de treinamento; em seguida os parâmetros de cada curva foram utilizados para ajustar a RNA.

Na primeira etapa, buscou-se identificar uma função capaz de ajustar os dados experimentais da curva de elevação adiabática da temperatura que refletisse da melhor forma possível o comportamento esperado. A equação (0), caracterizada por três parâmetros, representa tal função, chamada aqui de função *Hill*.

$$T^{ad}(t) = T_{\infty}^{ad} \frac{t^n}{\tau_0^n + t^n} \quad (0)$$

Onde:

T_{∞}^{ad} é o valor assintótico da temperatura durante o ensaio de elevação adiabática, em $^{\circ}\text{C}$;

τ_0 constante dada em unidade de tempo;

n é uma constante adimensional.

A curva de elevação adiabática da temperatura de cada um dos ensaios foi ajustada através de uma função *Hill* (0), identificando-se para cada um deles os parâmetros T_{∞}^{ad} , τ_0 e n . Esse modelo mostrou-se satisfatório para as diversas curvas presentes no conjunto de treinamento, descrevendo bem as diversas cinéticas e amplitudes. Os parâmetros da função *Hill* substituíram os dados das curvas de elevação de temperatura do conjunto de treinamento, constituindo a saída desejada do modelo de RNA. O modelo de RNA a ser ajustado contém então $m = 3$ neurônios de saída. Na Figura 14 está apresentado, esquematicamente, o modelo de RNA para

previsão da exotermia da reação de hidratação desenvolvido neste trabalho. Nela são apresentados os dados de entrada, organizados em forma de quatorze neurônios de entrada ($X_1 \dots X_{14}$), e a resposta do modelo, dada em três neurônios de saída (Y_1, Y_2, Y_3) (Figura 14).

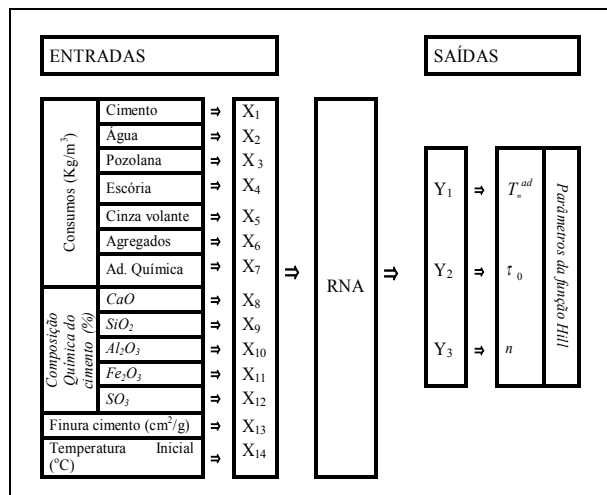


Figura 14 – Representação esquemática dos dados de entrada e saída do modelo de RNA

Os resultados, apresentados em detalhe em [0], demonstraram que o modelo de dados desenvolvido mostrou-se bastante eficaz para a predição da elevação adiabática da temperatura dos concretos. É importante ressaltar que as RNAs não são modelos físicos e sim modelos de ajuste, devendo sempre ser usadas dentro de um universo que tenha correspondência com o conjunto de treinamento. Tomada esta precaução, pode-se considerar que o modelo aqui proposto, se situado dentro do quadro dos concretos massivos, constitui-se em uma excepcional ferramenta para dimensionamento e verificação das tensões térmicas em barragens e outras estruturas em que as tensões térmicas são uma imposição de projeto. É ilustrado nas Figuras 15 e 16, respectivamente, o melhor e o pior ajuste obtido pelo modelo preditivo de dados desenvolvido.

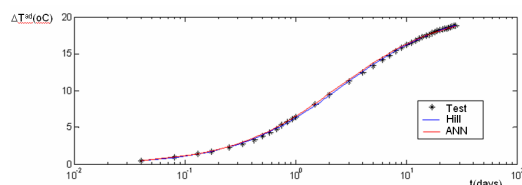


Figura 15 – Melhor ajuste, comparando os resultados experimentais com a função de ajuste hill e o modelo de RNA.

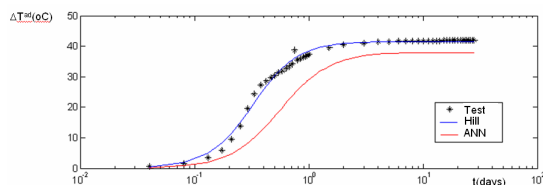


Figura 16 – Pior ajuste, comparando os resultados experimentais com a função de ajuste hill e o modelo de RNA.

Ainda dentro do quadro do presente projeto foi desenvolvido um modelo baseado em técnicas neuro-fuzzy para a ele-

vação adiabática do concreto, apresentado por EVSUKOFF *et al.* [0].

VI. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O modelo de acoplamento termo-químico-mecânico foi implementado em um programa de elementos finitos tridimensional (elementos tetraédricos lineares), o *DamStr*. O programa utiliza uma estrutura de dados CSR, com solucionador por gradientes conjugados, preconditionado com pré-condicionador diagonal. Tal programa foi paralelizado em uma arquitetura de memória distribuída usando protocolo MPI [0]. O código computacional é composto de dois módulos: o primeiro módulo calcula os campos transientes de temperatura e de grau de hidratação de uma estrutura massiva durante sua execução; o segundo módulo calcula, a partir dos campos de temperatura e hidratação, os campos de tensão e deformação para cada passo de tempo. Para simular o processo construtivo através das camadas de concretagem, cada elemento é associado a uma fase construtiva, que é ativada quando é atingido o respectivo tempo de lançamento.

VII. APLICAÇÃO NUMÉRICA

Como exemplo de aplicação numérica do programa *DamStr* é apresentado um estudo realizado no bloco do AHE Peixe-Angical. O bloco estudado refere-se à parte da estrutura do Aproveitamento Hidroelétrico (AHE) de Peixe-Angical, no rio Tocantins, situado na divisa dos municípios de Peixe e São Salvador do Tocantins, no estado de Tocantins, a jusante da UHE Cana Brava e à montante da UHE Lajeado, sendo a potência total a ser instalada de 452 MW. O bloco situado encontra-se na tomada d'água. Esta estrutura foi construída em 3 blocos com aproximadamente 32 m de comprimento cada e uma Casa de Força abriga três unidades geradoras, tipo Kaplan de aproximadamente 150 MW cada uma. O concreto convencional lançado nas estruturas do empreendimento foi refrigerado, através do uso de gelo em escamas e água gelada, com temperaturas de lançamento variando entre 16°C e 18°C. O bloco analisado possui dimensões conforme esquema apresentado na Figura 17. Nesta figura observa-se ainda a localização do termômetro instalado durante a concretagem do bloco, na elevação 236,25 m e a 4,5 m da superfície lateral direita.

O concreto (dosagem apresentada na Tabela 1) possui dimensão máxima característica do agregado ($D_{máx}$) igual a 19 mm, e cimento do tipo CP IV-32. A litologia do agregado graúdo é granito-gnaiss.

As propriedades térmicas e a elevação adiabática utilizadas no estudo, baseadas em dosagens do concreto lançado em obra, estão apresentadas na e Figura 18. A temperatura ambiente foi estimada, de forma simplificada, como sendo constante e igual a 30 °C. O coeficiente de troca de calor por convecção foi assumido como sendo 15 W/m²K, para trocas entre concreto e ar.

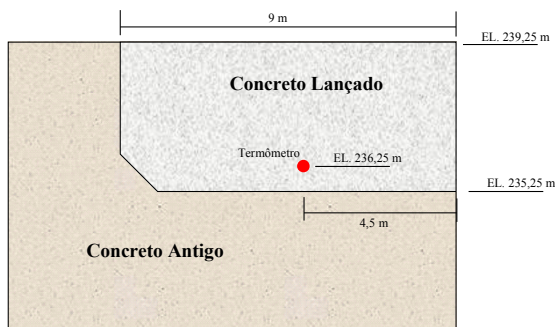


Figura 17 – Representação esquemática do bloco analisado.

Tabela 1 – Dosagem do Concreto.

Composição	Valores
Cimento	291 kg/m ³
Água	173 kg/m ³
Relação A/C	0,593
Areia natural	671 kg/m ³
Brita 19mm	1151 kg/m ³
Incorporador de ar	0,74 kg/m ³
Aditivo polifuncional	2,95 kg/m ³

Tabela 2 – Propriedades Térmicas do Concreto.

Propriedades	Resultados
Calor Específico (kcal/kg.°C)	0,260
Difusividade Térmica (m ² /dia)	0,100
Condutividade Térmica (kcal/m.d.°C)	57,88
Coefficiente de Dilatação Térmica (10 ⁻⁶ /°C)	10,46

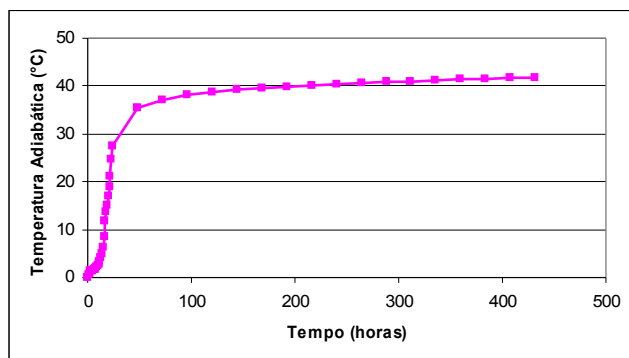


Figura 18 – Elevação adiabática da temperatura.

A geometria e a malha do modelo tridimensional em elementos finitos são mostrados na Figura 19. A malha é lançada de tal forma que permita a simulação do processo de concretagem. Simulou-se o lançamento do concreto através de camadas de 0,25m, com intervalo de 0,08 horas, procurando simular a taxa de lançamento do material.

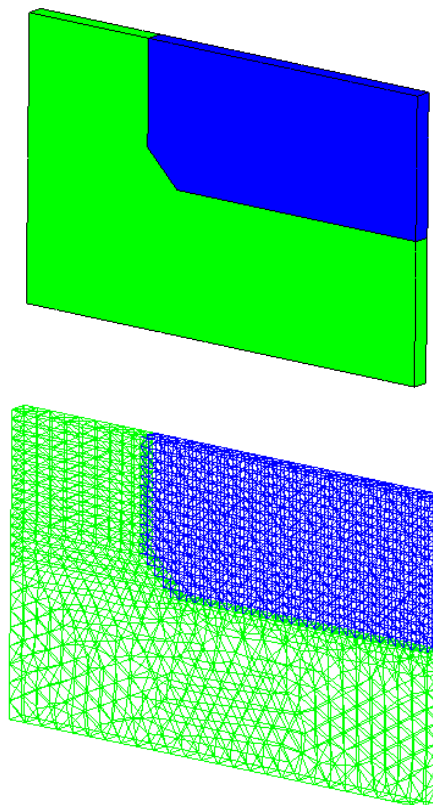


Figura 19 – Geometria e malha de elementos finitos tridimensional

Na Figura 20 é apresentado o gráfico da evolução da temperatura no ponto medido com o termômetro, comparado com a análise numérica com consideração da construção em camadas, e outra análise sem a consideração da construção em camadas indicando a precisão do modelo termo-químico-mecânico que se ajusta quase que exatamente às medições no campo. A título ilustrativo, na Figura 21 estão apresentados os campos de temperatura obtidos.

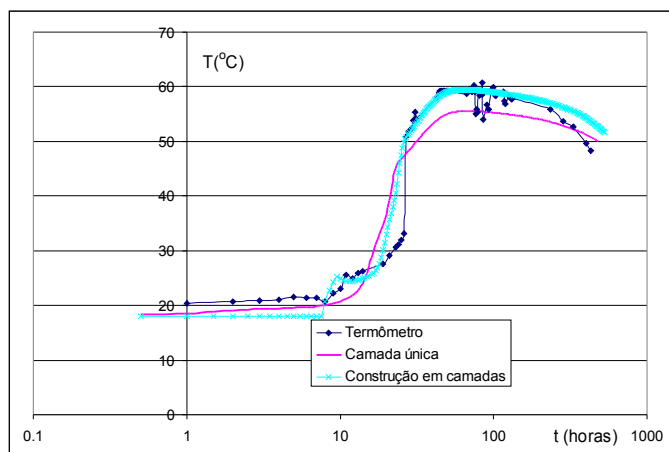


Figura 20 – Comparação entre análise numérica e temperatura lida com o termômetro.

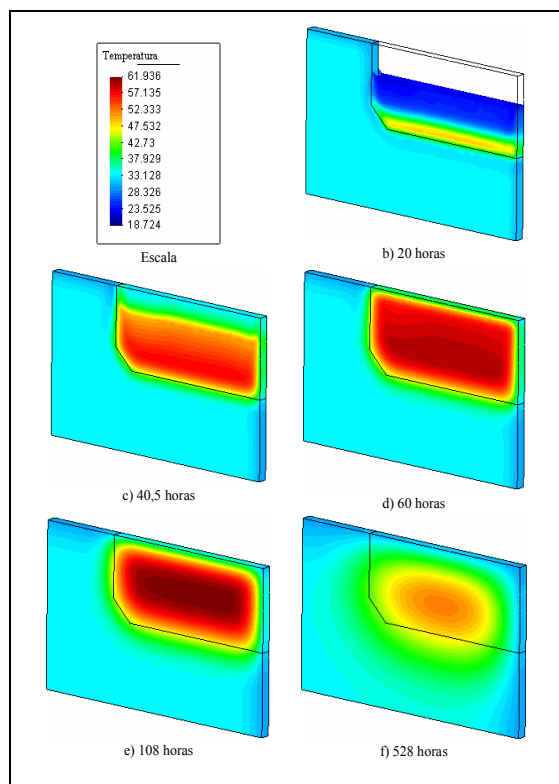


Figura 21 – Campos de temperatura (°C)

VIII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Projeto de P&D “Modelagem do concreto a poucas idades com aplicações a barragens: Novos paradigmas e suas soluções” correspondeu, não apenas a desenvolvimentos sobre o tema do concreto a poucas idades, mas ao estabelecimento de um novo quadro teórico-experimental-numérico que determina efetivamente um novo paradigma para a análise das estruturas massivas de concreto onde se situam as estruturas de usinas hidrelétricas. Sendo assim cabe ressaltar as seguintes realizações do referido Projeto de P&D:

- Foi estabelecido um novo procedimento experimental, que integra o ensaio de elevação adiabática da temperatura (termo-químico) aos ensaios mecânicos permitindo a determinação precisa das propriedades termo-químico-mecânicas, que alimentam o modelo numérico. Tal procedimento experimental integrado foi instalado tanto no calorímetro e cura a ar do Departamento de Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. como para o calorímetro e cura a água na COPPE/UFRJ;
- Foram realizados diversos ensaios de caracterização de concretos dentro do novo quadro teórico experimental, permitindo o aperfeiçoamento de modelos previamente utilizados;
- Foi desenvolvido um aparato experimental para determinação por ultra-som do patamar de percolação que define o momento exato da passagem de estado de suspensão para estado sólido do concreto;
- Foi organizado um banco de dados com os ensaios calorimétricos realizados por FURNAS no DCT.C, relacionando-os às características dos cimentos e pozolanas uti-

lizados assim como a outras propriedades dos concretos. Com base neste banco de dados foram desenvolvidos modelos preditivos para a elevação adiabática da temperatura utilizando técnicas da inteligência artificial como neuro-fuzzy e redes neurais. Os modelos permitem a previsão tanto da cinética quanto da amplitude da elevação adiabática;

- Foi desenvolvido um modelo que considera a evolução do grau de hidratação após o término do ensaio adiabático;
- Foi desenvolvido um código numérico baseado no Método dos Elementos Finitos, tridimensional, em arquitetura paralela, que permite o cálculo termo-químico-mecânico de estruturas reais de concreto massa. O código é otimizado permitindo a rápida execução de exemplos com grande número de graus de liberdade.

Com base no modelo desenvolvido, a equipe do DCT.C de FURNAS dedicada à análise numérica do concreto, em conjunto com o PEC-COPPE/UFRJ, aplicou o código computacional desenvolvido em casos reais, através exemplos de estruturas de usinas hidrelétricas e de concreto massa.

IX. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a FURNAS Centrais Elétricas S. A. pelo suporte dado a esta pesquisa. Os autores agradecem ainda, as agências CNPq, CAPES e FAPERJ.

X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [0] ACI COMMITTEE 207, “Mass concrete”, ACI Manual of Concrete Practice, 2002.
- [0] ICOLD (International Commission on Large Dams), “Concrete dams – Control and treatment of cracks – review and case histories”, Bulletin 107, Paris, 1997.
- [0] ULM, F.-J., COUSSY, O., “Modeling of thermochemomechanical couplings of concrete at early ages”, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 121, 785-794, 1995.
- [0] SILVOSO, M. M., “Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação vai Algoritmos Genéticos”, Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, (<http://www.coc.ufrj.br/silvoso>), 2003.
- [0] FAIRBAIRN, E. M. R., SILVOSO, M. M., ALVES J. L. D., TOLEDO FILHO, R. D., EBECKEN, N. F. F., “Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms”, *Computers & Structures*, 82, 281-299, 2004.
- [0] SILVOSO, M. M., FAIRBAIRN, E. M. R., TOLEDO FILHO, R. D., “Early-age analysis of a foundation slab: sensitivity to creep parameters”. in: CONCREEP7 - International conference on creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures, 2005, Nantes. Concreep7, 2005.
- [0] SILVOSO, M. M., FAIRBAIRN, E. M. R., TOLEDO FILHO, R. D., GUERRA, E. A., SANTOS, S. B., “Análise experimental da evolução das propriedades térmicas e mecânicas do concreto massa aplicando a teoria dos acoplamentos termo-químico-mecânicos”. In: Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2005, 2005, Recife.v. 2, p. 1-16, 2005b.
- [0] FARIA, E. F.; FAIRBAIRN, E. M. R.; SILVOSO, M. M.; TOLEDO FILHO, R. D.; EVSUKOFF, A., “Modelo de previsão de elevação adiabática de temperatura do concreto através de redes neurais artificiais”. In: XXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2004, Recife. XXV CILAMCE, v. CD, p. 1-16, 2004.
- [0] HELLMICH, C. 1999. “Shotcrete as part of the new Austrian tunneling method: from thermochemomechanical material modeling to structural

- analysis and safety assessment of tunnels”. Ph.D. thesis. Wien: Technischen Universität Wien, 1999.
- [0] SERCOMBE, J., HELLMICH, C., ULM, F.-J., MANG, H. 2000. “Modeling of early-age creep of shotcrete I: Model e model parameters”. *ASCE Journal of Engineering Mechanics* 126(3): 284-291, 2000.
- [0] SIMO, J. C., HUGHES, T. J. R., *Computational Inelasticity*, Springer-Verlag, 1998.
- [0] FERREIRA, I. A., FAIRBAIRN, E. M. R., RIBEIRO, F. L. B., SILVOSO, M. M., TOLEDO FILHO, R. D. “A coupled numerical model for concrete parallelized with MPI”, *Proceedings of The XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, 2006, Belém, Pará, Brazil, 1-15, 2006.
- [0] ACKER, P., *Comportement mécanique du béton: apports de l’approche physico-chimique*, Res. Rep. LCPC 152, Paris, 1988.
- [0] LAPLANTE, P. 1993 *Mechanical properties of hardening concretes: compared analysis of normal and ultra-high performance concretes*. Ph.D. Paris: École Nationale des Ponts et Chaussées. (in French), 1993.
- [0] BYFORS, J. 1980. *Plain concrete at early ages*. Technical report S-100 44. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Re-search Institute, 1980.
- [0] ANDRADE, W. P., e Equipe do Laboratório de Concreto de FURNAS. *CONCRETOS massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e Propriedades*, 1a. ed. Editora PINI, 1997.
- [0] WALLER, V., *Relations entre Composition des Betons, Exothermie en Cours de Prise et Resistance en Compression*, Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité Structures et Matériaux, France., 1999.
- [0] DE LARRARD, F., LE ROY, R., *Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances*, *Materiaux et Construction*, RILEM, v.25, pp.464-475, 1992.
- [0] MAEKAWA, K., CHAUBE, R., KISHI, T., *Modelling of concrete performance. Hydration, microstructure formation and mass transport*. E & FN Spon, 1999.
- [0] HAYKIN, S. *Neural Networks – A Comprehensive Foundation*, Macmillian College Publishing Comany, 1994.
- [0] FAIRBAIRN, E. M. R.; GOULART, E.; COUTINHO, A. L. G. A.; EBECKEN, N. F. F.; GUEDES, Q. M.; VIANNA, D., M. *Durability assessment of an arch dam using inverse analysis with neural networks and high performance computing*. in: 13th ASCE-Engineering Mechanics Divison conference, Baltimore, pp. 1-6, 1999
- [0] FAIRBAIRN, E. M. R., EBECKEN, N. F. F.; PAZ, C. N. M.; ULM, F. J., *Determination of probabilistic parameters of concrete: solving the inverse problem by using artificial neural networks*. *Computers & Structures*, v. 78, n. 1-3, pp. 497-503, 2000.
- [0] EVSUKOFF, A. G., FAIRBAIRN, E. M. R., FARIA, E. F., SILVOSO, M. M., TOLÊDO-FILHO, R. D., *Modeling adiabatic temperature rise during concrete hydration: a data mining approach*. *Computers & Structures*, v.84, p.2351 - 2362, 2006.