

## **SIMULAÇÃO NUMÉRICA MEDIANTE PROBLEMA INVERSO DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CONCRETO DURANTE PROCESSO DE HIDRATAÇÃO**

Oswaldo D. Quintana<sup>1</sup>, Antonio Aquino<sup>2</sup>, Rubén López<sup>3</sup>, Jean Marie Désir<sup>4</sup>  
Eduardo M. B. Campello<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Mecânica Computacional, FIUNA/UNA, San Lorenzo, Paraguay (osvquintana@gmail.com)

<sup>2</sup>Laboratório de Mecânica Computacional, FIUNA/UNA, San Lorenzo, Paraguay.

<sup>3</sup>Laboratório de Mecânica Computacional, FIUNA/UNA, San Lorenzo, Paraguay.

<sup>4</sup>DECIV/UFRGS, Rio Grande do Sul, Brasil.

<sup>5</sup>John Argyris Center for Computational Mechanics (JAC) /EP-USP, São Paulo, Brasil.

### **Abstract**

Lately there has been a development of various computational models for studying the thermo mechanical behavior of concrete, where the input data, in general, are obtained from the literature. However, the concrete properties vary according to the used components. The purpose of this study is to estimate the heat generation and thermal properties due to chemical reaction in concrete of different strengths. To obtain the thermal parameters and analyzing the results we used an inverse algorithm combined with FEM. The binder used was composite cement produced locally. The experimental program comprised in the use of thermocouples located within the test bodies seventy-five cubic centimeters sides under semi-adiabatic conditions, they were recorded temperature values generated during the hydration process in a period of twenty-eight days with a time interval of one hour. These parameters were used lately for the analysis of samples. The main objective is to provide a numerical method consisting in the use of an inverse algorithm to estimate the thermal parameters associated with the generation of heat, specific heat and thermal conductivity to use for solving the direct heat transfer problems. This methodology allows the study of thermal and mechanical behavior of concrete at early-ages. Parameters were obtained during the hydration process, performing numerical simulations with those data. The results show a good approximation to the experimental data. It is concluded from this study that this proposed method is an accurate, stable, and efficient method for the analysis of early-ages behavior of concrete structures.

### *Keywords:*

*Early age concrete behavior, thermal properties of concrete, inverse problem, finite element method*

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo das propriedades do concreto em suas primeiras idades está se tornando cada vez mais importante, já que a liberação do calor de hidratação e os efeitos associados a este, ao longo das primeiras horas, podem gerar fissuras aumentando a permeabilidade da estrutura e induzindo a problemas de durabilidade e funcionalidade. Um detalhado estudo da evolução de tensões durante este período pode ser decisivo para manter baixos os níveis de fissuração. Esta pesquisa foi realizada para identificar os fenômenos físicos relacionados ao comportamento termodinâmico de alguns tipos de concretos produzidos no Paraguai em suas primeiras idades, a fim de determinar a evolução dos campos térmicos, de hidratação e de tensões de origem térmica. A pesquisa incluiu uma etapa experimental, onde foi realizado o monitoramento da evolução do calor gerado durante o processo de hidratação do concreto e uma etapa numérica, onde através de uma ferramenta numérica (Problema Inverso) foi analisado e foram obtidos parâmetros térmicos necessários para a simulação computacional do comportamento térmico e mecânico das mostras monitoradas. Tal simulação computacional se levou a cabo através do método dos elementos finitos (MEF).

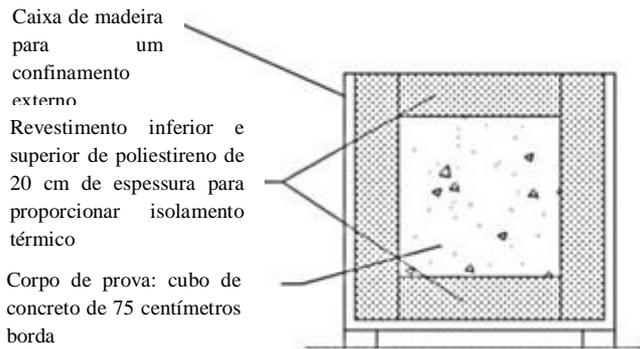
Diferenças de temperaturas são as principais causas de tensões de origem térmica e como consequência, originam-se as fissuras. Além do calor interno gerado, a massa adquire calor do meio-ambiente através da radiação solar. As temperaturas são diferentes em qualquer tempo e lugar da estrutura. A temperatura inicial do concreto é um fator principal para o posterior desenvolvimento de sua temperatura máxima. Uma alta temperatura ambiental tem como consequência uma maior demanda de água no concreto e um aumento da temperatura daquele concreto em estado fresco. O anterior tem como resultado um incremento na velocidade de perda de fluidez; as velocidades das reações de hidratação são muito maiores, e assim a formação do gel C-S-H se acelera, que por sua vez atenua de forma considerável o potencial reativo do cimento no que respeita à formação de novos silicatos de cálcio hidratados. As resistências iniciais aumentam, mas o desenvolvimento da resistência final se vê afetado negativamente [5].

Uma ferramenta numérica muito eficiente para a obtenção de parâmetros é o Método Inverso, muito utilizado em várias áreas da engenharia. O Problema Inverso se caracteriza por ser um problema matematicamente mal posto, que tem características de não-unicidade na solução e instabilidade numérica, mas que se bem utilizado pode ser muito eficiente na hora da recuperação de parâmetros baseados em observações ou resultados de um efeito dado. No problema inverso, procuram-se as causas e condições desconhecidas partindo das consequências de um fenômeno observado. A utilidade da técnica se evidencia por exemplo ao fazer predições futuras em distintas etapas do projeto.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Descrição dos Corpos de Prova

Procedeu-se à elaboração de três moldes de 75 cm x 75 cm x 75 cm para o ensaio semi-adiabático do concreto. Os moldes foram construídos com madeira de pinheiro reciclada de pallets, com as quais foram feitos cubos de 115 cm de borda; o sistema de isolamento térmico consistiu na utilização de pranchas de poliestireno expandido de 20 cm de espessura e densidade de 16 kg/m<sup>3</sup> colocados nas seis faces internas do cubo (ver Figs. 1 e 2). As juntas das pranchas foram isoladas com espuma de poliuretano para reduzir perdas de temperatura.



**Figura 1** - Corte dos Corpos de Prova

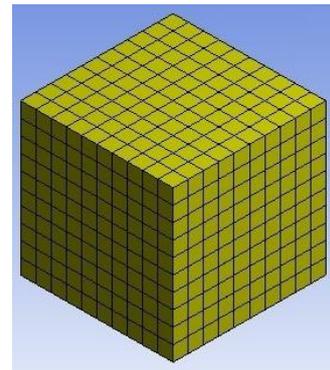


**Figura 2** - Fotografia dos Corpos de Prova

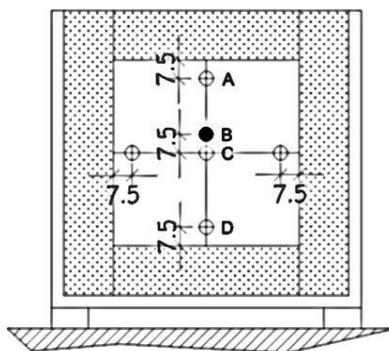
Foram colocados oito sensores no interior dos corpos de prova que foram registrando a evolução da temperatura durante a cura do concreto (ver Figs. 4 e 5). Os mesmos foram registrando valores de temperatura gerados durante o processo de hidratação num período de vinte e oito dias, com intervalo de tempo de uma hora entre cada registro (Ver Tabela 1). Para análise por elementos finitos foi utilizado um elemento tridimensional quadrático tipo hexaedro com 20 nós; distribuídos a cada 7,5 cm de distância, obtendo-se assim um total de 1000 elementos (ver Fig. 3).

**TABELA 1**

Sensores	Descrição
A	Leitura a cada 1 hora por 28
B	Leitura a cada 1 minuto por 7
C	Leitura a cada 1 hora por 180
D	Leitura a cada 1 hora por 28
E	Leitura a cada 1 hora por 28
F	Leitura a cada 1 hora por 28
G	Leitura a cada 1 hora por 28
H	Leitura a cada 1 hora por 28

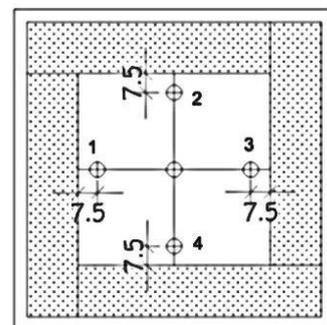


**Figura 3** - Distribuição dos elementos no Corpo de Prova



**VISTA LATERAL**

**Figura 4** – Posição dos Sensores de Temperatura no interior dos Corpos de Prova



**VISTA EM PLANTA**

**Figura 5** - Posição dos Sensores de Temperatura no interior dos Corpos de Prova

## 2.2 Proporção da Mistura

2.2.1. A dosagem do concreto Fck: 20 MPa foi realizada mediante o Método do ACI 211.1-91 (Ver Tabelas 2 e 3)

**TABELA 2**

### Concreto Fck = 20 MPa - Cimento Composto CP – II

$P_{\text{água}}$	=	193	kg
$V_{\text{ar}}$	=	15	litros
$f_{\text{cm}}$	=	28	MPa
Relação a/c	=	0,61	
Volume de agregado graúdo seco e compactado*	=	0,70	kg/m <sup>3</sup>
Volume agregado fino	=	276,5	litros

\* diferenças na quantidade de argamassa necessária, por razões de trabalhabilidade com os diferentes tipos de agregados devido a diferenças na forma de partículas, de textura e tamanho são compensados pelo volume de vazios no agregado seco e compactado.

**TABELA 3. Composição dos Componentes**

Material	Peso Seco	Umidade %	Água (Kg)	Peso Nat.	Mistura
P.T. 4 <sup>ta</sup>	525	0.20	4.20	526	368.235
P.T. 5 <sup>ta</sup>	520	0.60	4.16	524	366.501
P.T. 6 <sup>ta</sup>	323	0.90	2.91	326	228.143
Areia	398	1.50	-4.78	404	282.877
Cimento	316			316	221.475
Água	193			199	139.645

2.2.2. A dosagem do concreto Fck: 60 MPa foi realizada mediante o Método do ACI 211.1-91 (Ver Tabelas 4 e 5)

**TABELA 4**

### Concreto Fck = 60 MPa - Cimento Composto CP – II

$P_{\text{água}}$	=	155	kg
$V_{\text{ar}}$	=	15	litros
$f_{\text{cm}}$	=	70	MPa
Relação a/c	=	0,35	
Volume de agregado graúdo seco e compactado*	=	0,70	kg/m <sup>3</sup>
Volume agregado fino	=	271,6	litros

\* diferenças na quantidade de argamassa necessária, por razões de trabalhabilidade com os diferentes tipos de agregados devido a diferenças na forma de partículas, de textura e tamanho são compensados pelo volume de vazios no agregado seco e compactado.

**TABELA 5. Composição dos Componentes**

Material	Peso Seco	Umidade %	Água (Kg)	Peso Nat.	Mistura
P.T. 4 <sup>ta</sup>	525	0.20	4.20	526	368.235
P.T. 5 <sup>ta</sup>	520	0.60	4.16	524	366.501
P.T. 6 <sup>ta</sup>	317	0.90	2.86	320	224.126
Areia	391	1.50	-4.69	397	277.896
Cimento	443			443	310.000
Água	152			158	110.898
Glenium	4.43				3.100

**2.2.3.** A dosagem do concreto Fck: 100 MPa foi realizada mediante o Método do ACI 211.1-91 (Ver Tabelas 6 e 7)

**TABELA 6****Concreto Fck = 100 MPa - Cimento Composto CP – II**

$P_{\text{água}}$	=	145	kg
$V_{\text{ar}}$	=	15	litros
$f_{\text{cm}}$	=	110	MPa
Relação a/c	=	0,27	
Volume de agregado graúdo seco e compactado*	=	0,70	kg/m <sup>3</sup>
Volume agregado fino	=	249,7	litros

\* diferenças na quantidade de argamassa necessária, por razões de trabalhabilidade com os diferentes tipos de agregados devido a diferenças na forma de partículas, de textura e tamanho são compensados pelo volume de vazios no agregado seco e compactado.

**TABELA 7. Composição dos Componentes**

Material	Peso Seco	Umidade %	Água (Kg)	Peso Nat.	Mistura
P.T. 4 <sup>ta</sup>	525	0.20	4.20	526	368.235
P.T. 5 <sup>ta</sup>	520	0.60	4.16	524	366.501
P.T. 6 <sup>ta</sup>	292	0.90	2.63	294	206.035
Areia	360	1.50	-4.31	365	255.465
Cimento	483			483	338.333
Água	141			148	103.541
Glenium	5.37				3.759
Retardex	2.42				1.692
Microsilica	54				37.593

### 3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA INVERSO

Na solução do problema inverso, em primeiro lugar se busca representar a fonte interna de calor. Para realizar isto, descreve-se a fonte interna de calor como um polinômio:

$$g_p(t) = P_1 + P_2t + \dots + P_N t^{N-1}. \quad (1)$$

onde

$g_p(t)$  = representa a fonte interna de calor em função no tempo

$P$  = são os coeficientes do polinômio a serem determinadas

$t$  = é o intervalo de tempo

$N$  = número total de coeficientes desconhecidos

A função objetivo que desejamos minimizar é a diferença quadrática entre os valores experimentais e os valores estimados.

$$S(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^I [Y_i - T_i]^2. \quad (2)$$

onde

$S$  = soma dos quadrados de erro ou função objetivo

$\mathbf{P}^T \equiv [P_1, P_2, \dots, P_N]$  = vetor de coeficientes desconhecidos

$T_i(\mathbf{P}) \equiv T(\mathbf{P}, t_i)$  = temperatura estimada no tempo  $t_i$

$Y_i \equiv Y(t_i)$  = temperatura medida no tempo  $t_i$  pelos sensores colocados no corpo de prova

$I \equiv$  número total de medições, onde  $I \geq N$ .

As temperaturas estimadas  $T_i(\mathbf{P})$  são obtidos a partir da solução do Problema Térmico Direto em  $Y_i$  com os parâmetros estimados na iteração anterior.

Equação (2) pode ser escrito na forma matricial

$$S(\mathbf{P}) = [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{P})]^T - [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{P})]. \quad (3)$$

onde

onde o sobrescrito  $T$  denota a transposta e  $[\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{P})]^T$  é definido como

$$[\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{P})]^T \equiv [Y_1 - T_1, Y_2 - T_2, \dots, Y_I - T_I]. \quad (4)$$

#### 3.1 Matriz de Sensibilidade

A matriz  $\mathbf{J}$  é uma medida de sensibilidade da estimação de temperatura respeito à mudança dos parâmetros  $P_j$ . Os elementos da matriz de sensibilidade são chamados coeficientes de sensibilidade, um valor pequeno de  $J_{ij}$  indica uma grande mudança no parâmetro de  $P_j$ .

$$J_{ij} = \frac{\partial T_i}{\partial P_j}. \quad (5)$$

onde

o coeficiente de sensibilidade  $J_{ij} = \frac{\partial T_i}{\partial P_j}$  é, assim, definida como a primeira derivada da temperatura estimada no tempo  $t_i$  com respeito aos aos parâmetros desconhecidos  $P_j$ . À medida que maiores forem os termos da matriz, mais estável será a solução do Problema. Por tal motivo também se pode otimizar a localização dos sensores através de uma avaliação numérica ou experimental para otimizar os coeficientes de sensibilidade para cada um destes parâmetros maximizando a matriz **J**.

### 3.2 Método do Gradiente Conjugado (MGC)

Na solução do Problema Inverso, este trabalho utiliza um método iterativo chamado Método do Gradiente Conjugado. No procedimento do (MGC), em cada iteração, um tamanho de passo apropriado é tomado ao longo da direção descendente, a fim de minimizar a função. O sentido descendente é obtido como a combinação linear da direção do gradiente negativo na iteração atual com o sentido descendente da iteração anterior, a combinação linear é tal que se o ângulo entre direção descendente ea direção do gradiente negativo é inferior a  $90^\circ$ , a função de minimização é assegurada.

### 3.3 Apresentação do Algoritmo do Problema Inverso

#### Passo 1

Resolve-se o problema térmico direto do corpo de prova pelo método de diferenças finitas tendo como condição inicial as condições de contorno do sólido e se obtém as temperaturas estimadas  $\mathbf{T}_{(P)}$ .

$$\mathbf{T}_{(P^k)} = [T_1, T_2, \dots, T_I]. \quad (6)$$

#### Passo 2

Avaliar o critério de parada, continuar no caso de não satisfazer o critério.

$$S(\mathbf{P}) < \varepsilon \quad (7)$$

onde

$$\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$$

#### Passo 3

Determinação da matriz sensibilidade **J**

Á primeira derivada indicada na definição do coeficiente de sensibilidade, equação (5), pode ser estimado pelo método de diferenças finitas

$$J_{ij} = \frac{T_i(P_1, P_2, \dots, P_j + \varepsilon, \dots, P_N) - T_i(P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_N)}{\varepsilon} \cong \frac{\partial T_i}{\partial P_j} . \quad (8)$$

#### Passo 4

Calcular a direção do gradiente e o coeficiente de conjugação

Direção do Gradiente

$$\nabla S(\mathbf{P}^k) = -2(\mathbf{J}^k)^T [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{P}^k)]. \quad (9)$$

onde

o sinal negativo indica a mudança de direção do vetor para ir do estado quente para o estado frio.

Coeficiente de Conjugação

$$\gamma^k = \frac{\sum_j^N [\nabla S(\mathbf{P}^k)]_j^2}{\sum_j^N [\nabla S(\mathbf{P}^{k+1})]_j^2} \quad \text{para } k = 1, 2, \dots \quad (10)$$

com  $\gamma^0 = 0$  para  $k = 0$

Passo 5

Calcular a direção descendente:

$$\mathbf{d}^k = \nabla S(\mathbf{P}^k) + \gamma^k \mathbf{d}^{k-1}. \quad (11)$$

Passo 6

Calcula-se o tamanho do passo  $\beta$

$$\beta^k = \frac{[\mathbf{J}^k \mathbf{d}^k]^T [\mathbf{T}(\mathbf{P}^k) - \mathbf{Y}]}{[\mathbf{J}^k \mathbf{d}^k]^T [\mathbf{J}^k \mathbf{d}^k]}. \quad (12)$$

onde

o sobrescrito  $k$  é o número de iterações

Paso 7

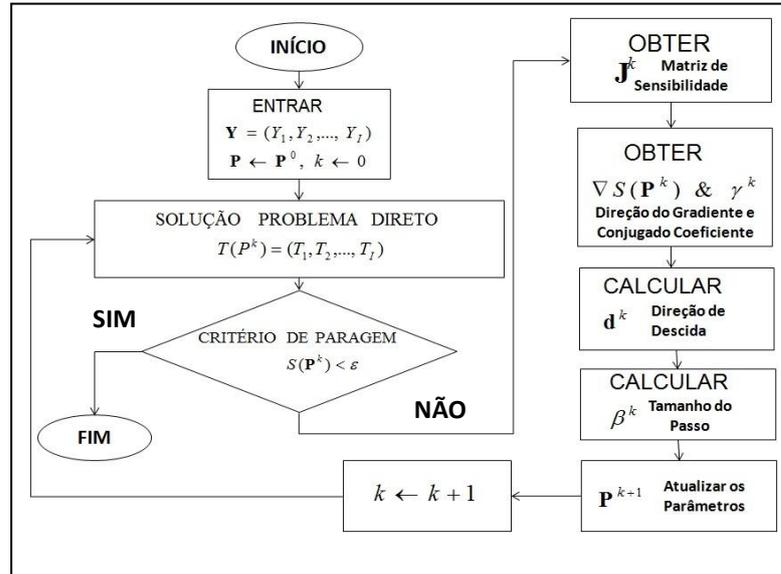
Cálculo do novo parâmetro  $\mathbf{P}_{k+1}$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}^k - \beta^k \mathbf{d}^k. \quad (13)$$

Passo 8

Substituir  $k$  por  $k + 1$  e retornar ao Passo 1

### 3.3.1 Fluxograma do Algoritmo do Problema Inverso



### 3.4 Solução do Problema Térmico Direto

Com os parâmetros recuperados mediante a solução do Problema Inverso, procede-se à solução do Problema Térmico Direto. Opta-se por utilizar diferenças finitas sem considerar o erro que este implica e ajustando a valores de intervalos de tempo adequados para o número de Fourier

$$\alpha \Delta t \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \leq \frac{1}{6}$$

onde

$\alpha$  = difusividade térmica

$\Delta x = \Delta y = \Delta z \equiv h$  e  $\Delta t \equiv k$  da malha do sólido na região  $\Omega$  para que a solução seja estável.

#### 3.4.1 Problema Térmico

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 (k_i T)}{\partial x_i^2} + g(t) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

em

$$t \geq 0 \quad (x_1, x_2, x_3) \in \Omega \quad (14.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_i} = k_i \Delta T, \quad \text{em } \partial \Omega, \quad i = 1, 2, 3 \quad (14.2)$$

$$T(x_1, x_2, x_3, 0) = f(x_1, x_2, x_3) \quad (14.3)$$

Onde  $k_i$  são os coeficientes de condutividade térmica,  $g(t)$  curva de geração de calor,  $\rho$  a densidade do material e  $C$  o calor específico. Tanto  $k_i$ , quanto  $\rho$  e  $C$  são parâmetros do material que no Problema Térmico Direto são conhecidos.

### 3.5 Recuperação de Parâmetros Térmicos

#### 3.5.1 Fonte de Geração de Calor

Com os resultados obtidos a partir da função polinomial, descobrimos que melhores aproximações foram obtidas através de uma função exponencial na simulação computacional, isso aconteceu porque a função polinomial mostrou algumas flutuações que não correspondiam com o fenômeno físico, por esta razão, o fonte de geração de calor foi obtida pela seguinte função exponencial

$$g(t) = P_1 e^{P_2 \frac{t_k}{t_N}} \quad (15)$$

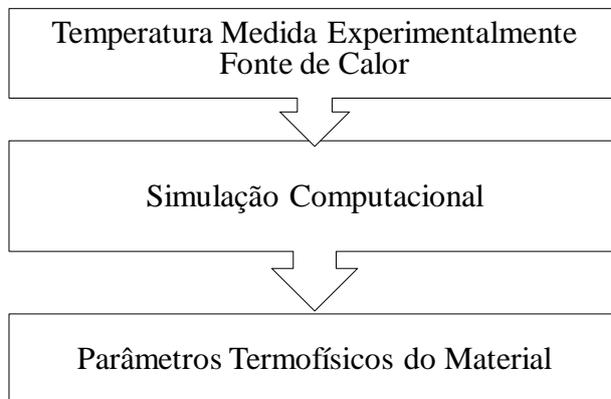
onde

$P_1, P_2$  = são os parâmetros recuperados pelo algoritmo

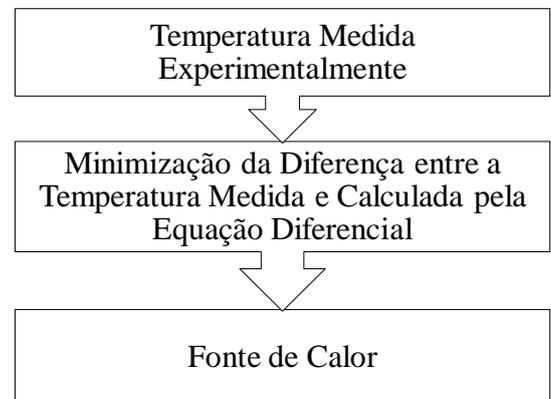
$t_k$  = é o tempo na iteração atual em segundos

$t_N$  = é o tempo final ao vinte e oito dias em segundos

#### 3.5.2 Obtenção dos Parâmetros Termofísicos



#### 3.5.3 Obtenção dos Parâmetros da Fonte de Geração de Calor



#### 3.5.4 Resumo dos Parâmetros obtidos

Concreto (MPa)	Parâmetros da Fonte de Calor		Calor Específico (J/kg °C)	Condutividade Térmica (W/mm °C)
	P1	P2		
20	0.5055	-40.9155	825	$1.12 \times 10^{-03}$
60	0.4149	-4.6830	1017	$1.97 \times 10^{-03}$
100	1.1775	-71.5336	1208	$2.1 \times 10^{-03}$

### 3.5.5 Obtenção dos Parâmetros Mecânicos

Para a obtenção do Módulo de Elasticidade do Concreto foi utilizada a recomendação de ACI 318 para concretos de 1500 e 2500 kg/m<sup>3</sup> e para a obtenção dos valores exactos procedeu-se a executar uma interpolação linear conforme a evolução do grau de maturidade. Resume-se na Tabela 5.

$$E_c = \omega_c^{1,5} \times 0,043 \sqrt{f_c}. \quad (16)$$

onde

$E_c$  = Módulo de Elasticidade Estático (MPa)

$\omega_c$  = densidade (kg/m<sup>3</sup>)

$f_c$  = Resistência a Compressão (MPa)

O coeficiente de Poisson foi de  $\nu = 0,18$  considerando que não existe relação consistente entre o coeficiente de Poisson e as características do concreto como a relação água/cimento, tempo de cura e a distribuição granulométrica do agregado [9].

**TABELA 5.** Módulo de Elasticidade Estático (MPa)

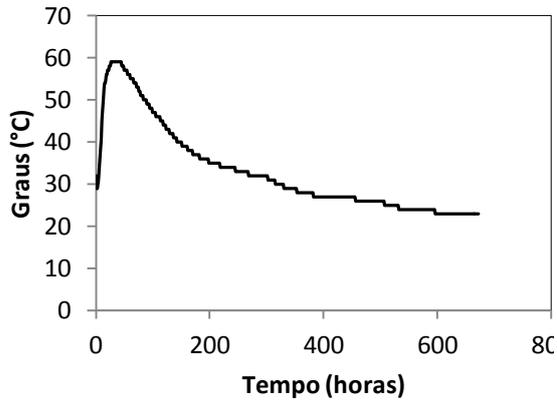
Tempo (Dia)	Concreto 20 MPa	Concreto 60 MPa	Concreto 100 MPa
1	11.596	18.690	21.047
3	18.632	26.899	35.845
7	22.913	33.862	37.001
14	25.554	35.337	39.726
28	27.183	40.422	42.438

## 4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

### 4.1 Curvas de Geração de Calor

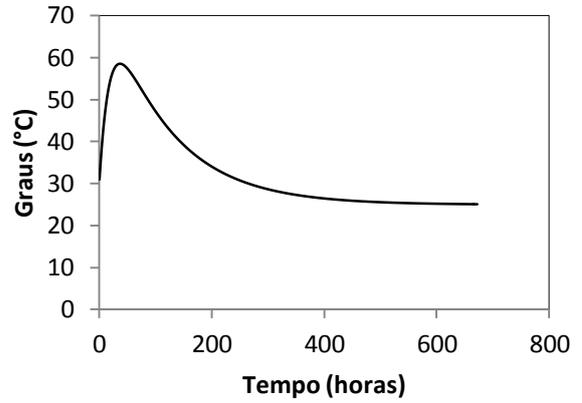
As figuras a seguir ilustram a relação entre a temperatura e o tempo obtida nesta análise para o ponto C, onde se encontra a maior geração de calor, com  $g_t$  e com os parâmetros termofísicos obtidos na minimização de (2). Procedeu-se a uma análise térmica dos corpos de prova no programa computacional de elementos finitos ANSYS. Resume-se na Tabela 6.

**Temperatura vs Tempo  
Experimental - 20 MPa**



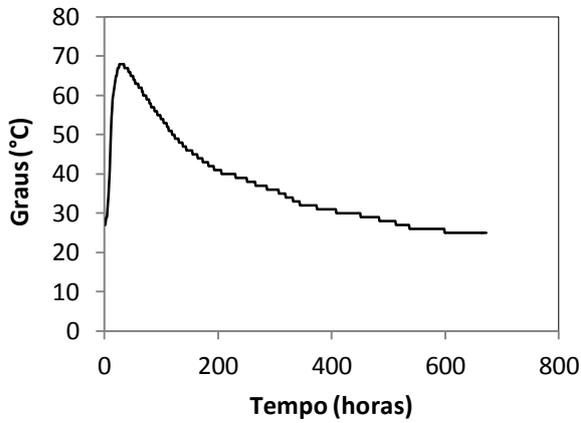
**Figura 6** – Temperatura vs tempo, medida experimental (Sensor C)

**Temperatura vs Tempo  
Simulação Computacional - 20 MPa**



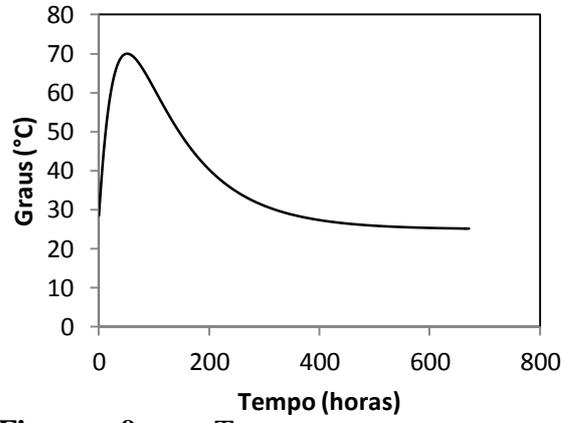
**Figura 7** – Temperatura vs tempo, recuperada (Sensor C)

**Temperatura vs Tempo  
Experimental - 60 MPa**

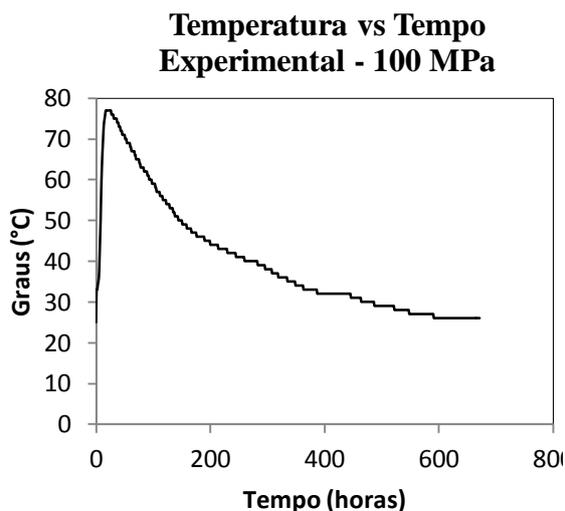


**Figura 8** – Temperatura vs tempo, medida experimental (Sensor C)

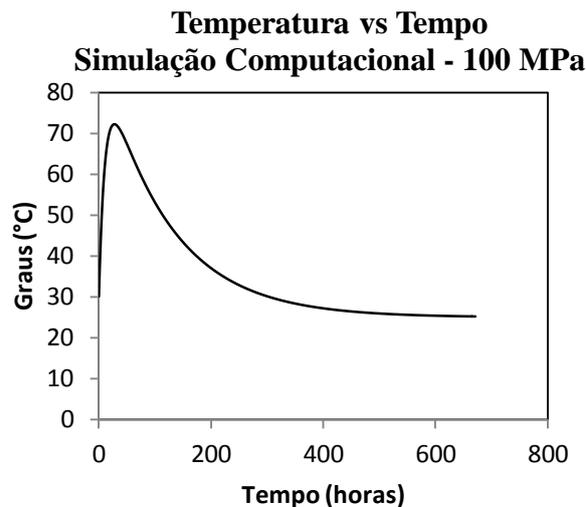
**Temperatura vs Tempo  
Simulação Computacional - 60 MPa**



**Figura 9** – Temperatura vs tempo, recuperada (Sensor C)



**Figura 10** – Temperatura vs tempo, medida experimental (Sensor C)



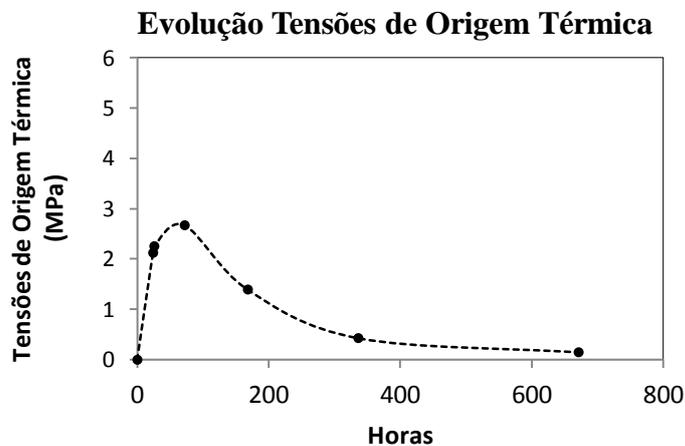
**Figura 11** – Temperatura vs tempo, recuperada (Sensor C)

**TABELA 6.** Resumo Temperatura em função do Tempo

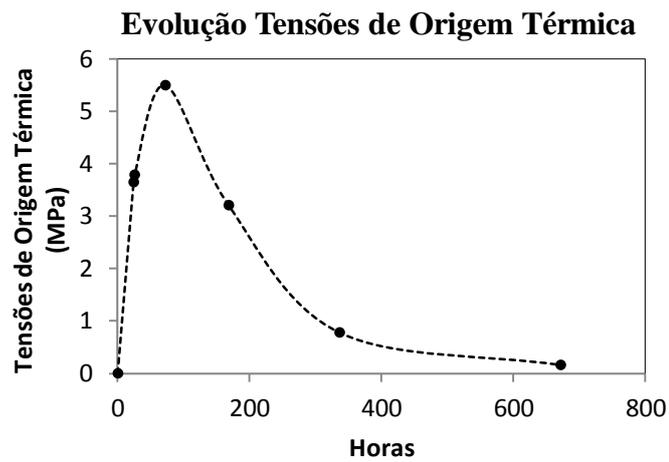
Concreto (MPa)	Experimental (°C)	Simulação Computacional (°C)	Tempo (Horas)
20	59	58.90	25.72
60	68	69.90	25.43
100	75	72.14	17.00

#### 4.2 Análise Mecânica

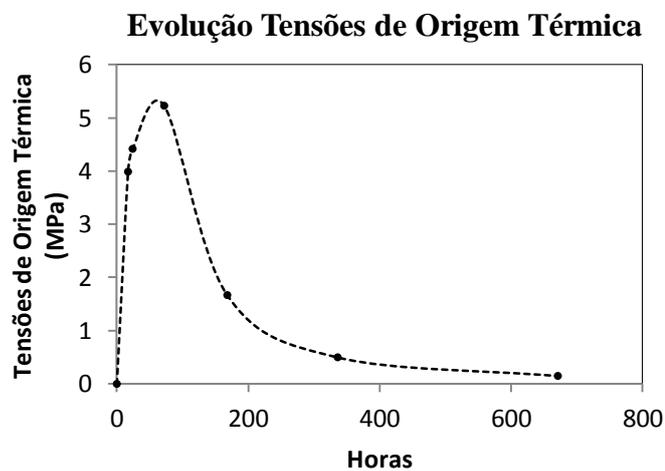
Procedeu-se a uma análise mecânica dos corpos de prova no programa computacional de elementos finitos ANSYS, para esta análise, foi considerada como condições de contorno uma restrição tipo suporte elástico entre o isolamento térmico e os corpos de prova em cinco faces e deixando a face superior livre. As figuras a seguir ilustram a evolução da tensão de origem térmica no ponto de tensão máxima conforme ao grau de maturidade do concreto. Resume-se na Tabela 7.



**Figura 11** – Concreto 20 MPa



**Figura 12** – Concreto 60 MPa



**Figura 13** – Concreto 100 MPa

**TABELA 7.** Evolução Tensões Máximas de Origem Térmica (MPa)

<b>Tempo (Horas)</b>	<b>Concreto (20 MPa)</b>	<b>Concreto (60 MPa)</b>	<b>Concreto (100 MPa)</b>
17.00			3.99*
24.00	2.12	3.65	4.42
25.43		3.79*	
25.72	2.25*		
72.00	2.67	5.50	5.23
168.00	1.39	3.21	1.67
336.00	0.43	0.78	0.50
672.00	0.14	0.16	0.15

\* Tensão na temperatura máxima.

Evolução da deformação de origem térmica conforme ao grau de maturidade do concreto. Resume-se na Tabela 8.

**TABELA 8.** Evolução Deformações no Ponto de Tensão Máxima (mm)

<b>Tempo (Horas)</b>	<b>Concreto (20 MPa)</b>	<b>Concreto (60 MPa)</b>	<b>Concreto (100 MPa)</b>
17.00			0.541*
24.00	0.389	0.426	0.559
25.43		0.436*	
25.72	0.394*		
72.00	0.337	0.478	0.413
168.00	0.165	0.248	0.203
336.00	0.065	0.081	0.076
672.00	0.038	0.038	0.039

\* Deformação na temperatura máxima.

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi levado a cabo um programa experimental para avaliar a eficácia da utilização de um método numérico consistente, via Problema Inverso, para a recuperação dos parâmetros térmicos de concretos produzidos localmente a fim de utilizar tais dados na análise termomecânica do concreto em suas primeiras idades. Dos resultados obtidos podemos dizer o seguinte;

### 5.1 Utilização do Método Inverso

Observa-se uma boa correspondência entre os dados experimentais e os simulados no Problema Térmico Direto. Podemos dizer que os dados recuperados pelo Algoritmo do Problema Inverso são bastante confiáveis.

A boa correspondência entre os dados experimentais e os simulados deve-se às condições de contorno (semi-adiabáticas) dos corpos de prova simulado; quando estas condições de contorno forem outras, esperam-se maiores variações nestes valores.

### 5.2 Análise Termomecânica

Nas primeiras horas, as tensões de origem térmica são pequenas, podemos dizer que isto se deve ao relaxamento que experimenta o material devido à fluência e às condições de contorno. As maiores tensões aparecem até os primeiros três dias após concretagem com um comportamento praticamente linear, esse detalhe é para tiver levado em conta em base que as tensões são desenvolvidos muito abruptamente. Observa-se uma rápida dissipação do calor em o concreto de 100 MPa, isto é devido a que o mesmo possui uma muito baixa porosidade e por essa razão o calor gerado é transmitido mais rapidamente ao ambiente.

Além, temos visto que o coeficiente de convecção é muito sensível e possui um comportamento fortemente não-linear, afetando os resultados fornecidos pela simulação, por isso é recomendado obter estes valores experimentalmente ou fazer um análise de sensibilidade para futuras pesquisas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Itaipu Binacional e à Reitoria da Universidad Nacional de Asunción - UNA pelo apoio financeiro para levar a cabo a pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] American Concrete Institute Committee 116 (2000), “116R-2000: *Cement and Concrete Terminology*”, *Technical Documents*, ACI Manual of Concrete Practice, Farmington Hills, Michigan.
- [2] American Concrete Institute Committee 207 (2002), “*Mass Concrete*”, ACI Manual of Concrete Practice.
- [3] American Concrete Institute Committee 207 (2002), “*Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete*”, ACI Manual of Concrete Practice.
- [4] Coussy, Olivier. (2004) *Poromechanics*. John Wiley & Sons Ltd. England.
- [5] J. Ortiz, A. Aguado, L. Agulló, T. García. (2005). *Estudio Experimental sobre la Influencia de la Temperatura Ambiental en la Resistencia del Hormigón Preparado*. Barcelona. 423 p. Tesis (Doctorado. Ingeniería Civil) – Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería de la Construcción.
- [6] Neville, A. M., (1999). “*Properties of Concrete*” Pearson Education Limited, London.
- [7] Nambiar, O. N. N. , Krishnamurthy, V., (1984). “*Control of Temperature in Mass Concrete Pours*”. In: *Indian Concrete Journal*, volume 58, N° 3. P: 67-73
- [8] Özisik, Orlande. (2000) *Inverse Heat Transfer*. Taylor & Francis. USA.
- [9] P. Kumar Metha and Paulo J.M. Monteiro (2008) *Concreto, Microestrutura, Propiedades e Materiais*. Ibracon, São Paulo, SP, Brasil.
- [10] Ulm, F.-J., Coussy, O. (1995). *Modelling of Thermochemomechanical Couplings of Concrete at Early Ages*. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 121(7): 785 – 794.
- [11] Rilem Report 15. (1998). *Prevention of Thermal Cracking In Concrete At Early Ages*. E & FN Spon. London.