

## **ANÁLISE DA FISSURAÇÃO TÉRMICA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO MASSA ASSOCIADA ÀS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICA DO MATERIAL**

**Igor de Azevedo Fraga**

**Mariane Rodrigues Rita**

**Eduardo de Moraes Rego Fairbairn**

**Romildo Dias Toledo**

*ifraga@coc.ufrj.br*

*mariane\_rita@coc.ufrj.br*

*eduardo@coc.ufrj.br*

*toledo@coc.ufrj.br*

*Programa de Engenharia Civil (PEC), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)*

*Centro de Tecnologia - Av. Horácio Macedo, 2030 - Bloco I-116 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-450*

**Anne Neiry de Mendonça Lopes**

*anne@furnas.com.br*

**FURNAS**

*Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica - GST.E*

**Abstract.** Massive concrete structures are those for which the hydration effects of the cementitious materials at the early ages, such as heat generation and autogenous shrinkage, can lead to cracking, since the properties of the material are changing rapidly under the influence of hydration. The thermal cracking in these structures is an important phenomenon, originated and induced mainly by matters related to the hydration reaction of the cementitious binder, becoming an important issue to the durability of the structure. In this way, knowing the influence of the parameters that govern this problem is of remarkable importance for engineering, considering that the determination of the values of these parameters sometimes involves complex and not exact procedures, generally obtained by inverse analysis, or simply neglected by professionals for lack of knowledge of its impact on the project. In this work, the term massive concrete is used in a broad sense, comprising all types of concrete elements for which the effects of cement hydration can lead to thermal cracking risks. With regard to the researches using computational simulations, programs have been developed to map the temperature in the concrete, besides its transient fields of tensions and deformations, enabling the prevention of cracking, through the establishment of strategies to prevent it. In order to establish the influence of some parameters intrinsic to the material, in this work will be simulated the construction of a concrete slab, previously builded and tested in the laboratory of FURNAS (Goiânia / GO), using the finite element program DAMTHE implemented in language FORTRAN, developed by PEC / COPPE / UFRJ, using experimental data as the starting point for adjustment of the thermochemical-mechanical model, aiming at obtaining a simulation of reference that represents the most accurate tests performed and then do an factor analysis, changing intrinsic properties of the material, such as: specific heat, activation energy, thermal conductivity and convective heat transfer in order to know the influence of the correlations between the uncertainties of the input parameters of the model in the structure cracking.

**Keywords:** massive concrete, thermal cracking, thermochemical-mechanical, factor analysis

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com RILEM [1], “estruturas de concreto massa são estruturas nas quais os efeitos da hidratação dos materiais cimentícios nas primeiras idades, como a geração de calor e a retração autógena, podem levar à fissuração”. Considerando o patamar de percolação como o exato momento em que o concreto se torna sólido, o concreto na idade avançada pode ser definido como o período após esse patamar, quando as propriedades do material estão mudando rapidamente sob a influência da hidratação.

A fissuração térmica de estruturas de concreto massa é um fenômeno importante, que é principalmente originado e induzido por questões relacionadas à reação de hidratação do aglomerante cimentício presente na mistura de concreto.

Como a reação de hidratação é exotérmica e a condutividade térmica do concreto é relativamente baixa, ela normalmente suporta aumentos de temperatura que têm especial relevância em estruturas de concreto massivo. Dois tipos de gradientes térmicos relevantes podem ser identificados no concreto de massa: (i) um é relativo ao tempo, ou seja, um dado ponto da estrutura tem sua temperatura variando ao longo do tempo; (ii) outro é um gradiente espacial que corresponde à diferença de temperatura, num dado instante, entre dois pontos diferentes da estrutura. Considerando a dilatação térmica do concreto e as restrições estruturais às deformações livres, ambos os gradientes acima mencionados podem ser responsáveis pela geração e evolução de esforços e tensões nos elementos de concreto. Se tais deformações atingirem um determinado limite, podem ocorrer fissuras térmicas indesejáveis.

Além disso, como há um desequilíbrio de volume entre os reagentes e os produtos de reação, a retração autógena também impõe esforços adicionais ao concreto, que podem aumentar a tendência à fissuração.

A geração de calor e conseqüente elevação da temperatura do concreto são muito importantes, não apenas porque podem gerar gradientes térmicos no espaço e no tempo, mas também porque fenômenos deletérios como a formação de etringita retardada (DEF) têm se provado associados à existência de campos térmicos nas primeiras idades que atingem temperaturas da ordem de 65 °C. O conjunto das questões mencionadas sustenta adequadamente a alegação de que o aumento da temperatura devido à hidratação é uma questão muito importante no que diz respeito à durabilidade da estrutura.

No passado, os riscos de fissuração nas primeiras idades eram comumente enfrentados em grandes estruturas nas quais a dissipação de calor da hidratação é normalmente lenta e, portanto, altas temperaturas são observadas (condições quase adiabáticas). Os tipos de concretos usados em tais tipos de estruturas tinham relações água/cimento relativamente altas e, portanto, não suportavam tensões adicionais significativas causadas por retração autógena.

Com o advento dos concretos de alto desempenho, a fissuração nas primeiras idades não é mais uma peculiaridade das estruturas massivas. Altos teores de materiais cimentícios associados a menores relações de água/cimento resultam, respectivamente, em maior calor de hidratação e microestruturas com poros finos, potencializando maiores amplitudes de gradientes térmicos e retração autógena. Desta forma, o termo concreto massa é usado em um sentido amplo neste trabalho, compreendendo todos os tipos de elementos de concreto para os quais os efeitos da hidratação do cimento podem levar a riscos de trincas térmicas.

Na prática, acontece que várias estruturas de concreto massa, como usinas hidrelétricas e nucleares, fundações espessas, pilares de pontes, paredes espessas e quebra-mares de tetrápodes podem apresentar rachaduras induzidas pela reação de hidratação.

Portanto, a fase de construção e o período subsequente devem ser analisados com precisão. Se a tendência à fissuração for detectada, muitas ações podem ser adotadas para minimizar as tensões precoces, tais como: (i) a diminuição da velocidade de construção, permitindo maior dispersão de calor; (ii) reduzindo a temperatura de lançamento do concreto; (iii) diminuir a temperatura do concreto pela circulação de água ou ar em tubulações embutidas nas fôrmas (sistemas de pós-resfriamento); e (iv) a escolha de uma composição de material que dê menores taxas de calor de hidratação.

Devido aos altos custos e requisitos de segurança das obras de construção e infraestrutura, a fissuração térmica do concreto jovem tem sido uma preocupação da comunidade de engenharia desde

as primeiras aplicações do concreto massivo. A evolução do conhecimento sobre o assunto levou ao desenvolvimento de teorias que consideram a reação de hidratação como exotérmica e termicamente ativada. Isto significa que, com relação à geração de calor específica, há um efeito de segunda ordem, uma vez que a taxa de calor gerada por uma massa unitária, em um determinado ponto e em um dado momento, depende da extensão da reação, que varia em função do histórico térmico no ponto considerado. Além disso, as propriedades do material e fenômenos relacionados à evolução da hidratação, como força, módulo de Young, retração autógena e fluência, variarão de acordo com a extensão da reação.

Tais teorias levaram a modelos numéricos sofisticados que, juntamente com a evolução do hardware e software, permitiram o desenvolvimento de modelos de simulação muito complexos que se aproximaram da realidade em termos de geometria e modelos fenomenológicos considerados [2].

Dessa forma, uma compreensão aprofundada e específica do comportamento de tais estruturas é fundamental para a predição de fissuração do material, fato este que tem motivado diversas pesquisas nesse ramo, sejam elas aplicadas na área experimental e/ou computacional, com o intuito de estudar os efeitos dos fenômenos térmicos e mecânicos no concreto massa (Ulm and Coussy [3]; Ulm and Coussy [4]; Ulm and Coussy [5]; Silvano [6]; Fairbairn et al. [7]; Faria [8]; Azenha [9]).

No que se refere às pesquisas utilizando simulações computacionais, programas vem sendo desenvolvidos para mapear a temperatura no sólido de concreto e também seus campos transientes de tensões e deformações, o que possibilita a prevenção de fissuração, através do estabelecimento de estratégias para preveni-la.

Neste trabalho será utilizado para simulação da construção de uma laje de concreto o programa de elementos finitos DAMTHE implementado em linguagem de programação FORTRAN, desenvolvido pelo PEC/COPPE/UFRJ, cujo objetivo é a utilização dos dados de ensaios experimentais realizados em uma laje de 50 cm de espessura, construída e ensaiada no laboratório de FURNAS em Goiânia/GO, como ponto inicial para ajuste do modelo termoquímico-mecânico, visando obter uma simulação de referência que represente com a maior acurácia possível os ensaios realizados e, posteriormente, a efetuação de uma análise de influência de alguns parâmetros de entrada do programa, referentes à propriedades térmicas do material, no comportamento térmico da estrutura.

Essa análise de influência dos parâmetros pode ser denominada como análise de sensibilidade e pode ser caracterizada em termos gerais como um estudo que avalia o efeito causado pela mudança de uma variável estipulada dentro de um modelo, analisando o resultado desta variação sobre a sua concepção inicial.

Dessa forma, neste trabalho busca-se identificar, através de simulações numéricas, dentre os parâmetros de entrada intrínsecos do material selecionados, a saber: (i) energia de ativação, (ii) calor específico, (iii) condutividade térmica e (iv) taxa de troca de calor por convecção, quais causam impactos significativos no resultado das simulações, avaliando as perturbações causadas no volume de elementos fissurados em comparação à simulação de referência.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Modelagem numérica do concreto massa

O modelo numérico utilizado neste trabalho é baseado na teoria dos acoplamentos termoquímico e mecânico proposto por Ulm and Coussy [3] no qual as equações que governam o problema são deduzidas dentro do quadro teórico termodinâmico para meios porosos e consideram-se os efeitos cruzados entre a reação de hidratação, a evolução da temperatura, deformações e mudanças nas propriedades do concreto.

Ulm and Coussy [4] consideram o concreto como um meio poroso quimicamente reativo. Em sua fase inicial ele é um fluido formado por água livre e ar, tornando-se um sólido poroso após atingir seu patamar de percolação. Em sua fase sólida ele é constituído de cimento anidro e hidratos, e conforme a água livre e seus íons se difundem através das camadas de hidratos já formadas, na direção dos grãos de cimento anidro a fração volumétrica e a conexão entre grãos da matéria sólida aumentam, ao mesmo

tempo que a fração volumétrica e a conexão entre os volumes da fase fluida diminuam [10]. Diz-se então, que a reação de hidratação acontece quando este grão de cimento anidro é atingido tornando a camada de hidratos cada vez mais espessa e densa.

O grau de hidratação  $\alpha \in [0, 1]$  é uma variável normalizada que expressa a evolução da reação de hidratação. Ele pode ser escrito como uma normalização da variável  $m$  que exprime a variação da massa do esqueleto:

$$\alpha = \frac{m(t)}{m_{t=\infty}}, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (1)$$

onde  $m_{t=\infty}$  corresponde à massa de esqueleto sólido formada  $m(t)$  no tempo  $t = \infty$  quando a hidratação está completa.

Tendo definido o grau de hidratação ( $\alpha$ ) e o patamar de percolação ( $\alpha_0$ ) é possível estabelecer a relação entre as propriedades mecânicas do material e seu grau de hidratação. De forma simplificada, pode-se considerar que estas relações são descritas por um comportamento linear.

Dessa forma, definindo  $\pi$  como a variável que representa uma determinada propriedade mecânica, como, por exemplo, a resistência à tração ou o módulo de elasticidade, então a função linear que governa a relação entre a normalização de  $\pi$  e o grau de hidratação é estabelecida por:

$$\frac{\pi(\alpha)}{\pi(\alpha_{t=\infty})} = \begin{cases} 0, & \text{se } \alpha < \alpha_0 \\ \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0}, & \text{se } \alpha \geq \alpha_0 \end{cases} \quad (2)$$

onde,  $\alpha_{t=\infty} \rightarrow \alpha = 1$  e indica uma hidratação completa.

De acordo com a teoria desenvolvida por Ulm e Coussy em seus estudos ([3]; [4]; [5]), dada uma massa de concreto, a descrição da evolução da reação de hidratação é dada, de modo a considerar a exotermia e a termoativação da reação, a partir da solução da equação de evolução dos campos térmicos em um dado volume. Desta forma, a equação do calor no tempo, considerando-se o acoplamento termoquímico (geração de calor de hidratação com termoativação) seguindo o quadro teórico de acoplamentos termo-químicos, pode ser colocada sob a forma:

$$C_p \dot{T} = \dot{Q} + L_m \dot{m} + \lambda \nabla^2 T \quad (3)$$

onde:

$C_p \rightarrow$  é o calor específico;  
 $Q \rightarrow$  é o fluxo de calor originário de alguma fonte de calor;  
 $\lambda \rightarrow$  é a condutividade térmica;  
 $T \rightarrow$  é a temperatura;  
 $L_m \rightarrow$  é uma constante do material, positiva por conta da natureza exotérmica de reação;  
 $\dot{m} \rightarrow$  é a velocidade da reação representada pela velocidade com que a massa de esqueleto aumenta (derivada de  $m$  em relação ao tempo).

O termo correspondente ao acoplamento termoquímico é  $L_m \dot{m}$  que representa a geração de calor pela reação de hidratação, isto é, a exotermia. Visto que o grau de hidratação também pode ser mensurado através da massa do esqueleto formado, como descrito na equação 1, tem-se que:

$$m(t) = \alpha \cdot m_{t=\infty} \Leftrightarrow \dot{m} = \frac{dm}{dt} = m_{t=\infty} \frac{d\alpha}{dt} \quad (4)$$

Então, substituindo-se a informação obtida em 4 na equação 3, chega-se à equação 5 em função do grau de hidratação, onde o termo  $L = m_{t=\infty} \cdot L_m$  é também uma constante do material.

$$C_p \dot{T} = \dot{Q} + L \dot{\alpha} + \lambda \nabla^2 T \quad (5)$$

As condições iniciais são dadas por:

$$T(x, t_0) = T_0 \quad \text{em } \Omega \quad (6)$$

E as condições de contorno são:

$$T = \bar{T}(\Gamma_T, t) \quad \text{em } \Gamma_T \quad (7)$$

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{N} = \bar{q}(\Gamma_q, t) \quad \text{em } \Gamma_q \quad (8)$$

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{N} = h_{pr} \cdot (T - T_{amb}) \quad \text{em } \Gamma_{C,R} \quad (9)$$

onde  $\bar{q}(\Gamma_q, t)$  é o fluxo na parte  $\Gamma_q$  do contorno,  $\bar{T}(\Gamma_T, t)$  é a temperatura prescrita em  $\Gamma_T$ , a equação 9 representa a troca de calor por convecção e radiação nas fronteiras do meio contínuo com o meio ambiente considerando-se um coeficiente de troca médio ( $h_{pr}$ ),  $\Gamma = \Gamma_T \cup \Gamma_q \cup \Gamma_{C,R}$  e  $\mathbf{N}$  é a normal externa ao contorno.

Através da equação 5 é possível calcular o campo de temperaturas em função do calor gerado, representado pelo termo  $L\dot{\alpha}$ . Dessa forma, deve-se destacar que a velocidade da reação que é dada por  $\dot{\alpha}$ , depende do nível de hidratação do cimento que por sua vez depende da evolução do campo de temperaturas. Sendo assim, em uma notação mais rigorosa escreve-se  $\dot{\alpha}(\alpha)$ .

Nota-se também que para encontrar a solução numérica da equação 5 é necessário calcular o campo de hidratações, ou seja, é preciso conhecer  $\alpha$  para todos os passos de tempo em que se deseja obter o campo de temperaturas  $T$ . Sendo assim, conclui-se que para resolver a equação 5 é preciso determinar primeiramente a cinética da hidratação ( $\dot{\alpha}(\alpha)$ ) para cada passo de tempo.

Considerando então a cinética dessa reação de hidratação de uma forma integrada, por meio do modelo básico para materiais cimentícios, em uma lei do tipo *Arrhenius*, escreve-se a Eq. 10 proposta por Ulm and Coussy [3], Ulm and Coussy [4], Ulm and Coussy [5], como sendo a equação para evolução da massa do esqueleto do cimento.

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \frac{1}{\mu(m)} A(m) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (10)$$

onde,  $\dot{m}$  representa uma taxa temporal de avanço da reação, ou seja, a variação da massa do esqueleto (hidratos formados) no tempo; o termo  $\mu$  representa uma medida de viscosidade que segundo Faria [8], com o passar do tempo é cada vez mais comandada pela difusão da água na rede porosa dos nanohidratos que se formam em torno dos grãos de cimento anidro.

O efeito da termoativação é representado na equação por meio da exponencial em função da temperatura,  $\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ , explicitando que a reação se intensifica quando as temperaturas são mais elevadas.

Ainda levando em consideração a equação 10, o termo  $A(m)$  é denominado por afinidade química e é o parâmetro que indica qual o potencial que os reagentes possuem de se combinarem quimicamente. Como este potencial também varia com a evolução da reação é pertinente escrever  $A(m)$ , ou ainda,  $A(\alpha)$ . Os termos  $E_a$ ,  $R$  e  $T$  são definidos como a energia de ativação, constante universal dos gases perfeitos e temperatura, respectivamente. Cabe ressaltar que neste modelo  $E_a$  é considerado constante ao longo do tempo.

Adotando uma mudança de variáveis, e substituindo  $m$  por  $\alpha$  através da equação 1, a cinética da reação de hidratação pode ser mensurada pela variação do grau de hidratação com o tempo, e com isso, a equação 10 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} = \tilde{A}(\alpha) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (11)$$

onde  $\tilde{A}(\alpha)$  é chamada de afinidade normalizada e engloba os efeitos físicos correspondentes ao aumento da massa de hidratos, difusão, viscosidade e a afinidade química propriamente dita. Esta é a única propriedade do concreto que independe da temperatura.

Em termos formais escreve-se:

$$\tilde{A}(\alpha) = \frac{A(m(\alpha))}{m_{t=\infty}\mu(\alpha)} \quad (12)$$

Dessa forma, fica evidente que caso exista o conhecimento de uma curva  $\tilde{A}(\alpha)$  x  $\alpha$ , será possível resolver a equação 5, desde que se tenha, para cada passo de tempo, além das temperaturas  $T$ , os graus de hidratação  $\alpha$ . Conhecimento este, que é de suma importância, pois para a solução do problema mecânico (ou termomecânico) os parâmetros característicos de diversos fenômenos, como evolução da resistência, módulo de elasticidade, retração autóloga e fluência podem ser expressos em função do grau de hidratação.

Os valores de  $\tilde{A}(\alpha)$ , que são uma medida intrínseca da cinética da reação, podem ser obtidos experimentalmente, através de ensaios adiabáticos ou através de ensaios isotérmicos de compressão uniaxial realizados em diversas idades.

O acoplamento termoquímico é representado pela equação 5 que calcula os campos transientes de temperatura e grau de hidratação e o acoplamento químico-mecânico segue o modelo desenvolvido por Ulm and Coussy [3], Ulm and Coussy [4] complementado pela introdução dos efeitos de fluência, propostos por Hellmich [11] e Sercombe et al. [12]. Dessa forma, este acoplamento é representado pela equação constitutiva:

$$d\sigma = \mathbf{C}(\alpha) : (d\epsilon - d\epsilon^P - d\epsilon^f - d\epsilon^v - \mathbf{a}dT - \mathbf{b}dm) \quad (13)$$

onde,  $\mathbf{C}(\alpha)$  é o tensor de rigidez elástica dependente do grau de hidratação e representa o acoplamento elasto-químico;  $\epsilon$  é o tensor de deformações;  $\epsilon^P$  é o tensor de deformações plásticas;  $\epsilon^f$  é o tensor de deformações de fluência de longo termo;  $\epsilon^v$  é o tensor de deformações de fluência de curto termo;  $\mathbf{a} = CTD \cdot \mathbf{1}$  é o tensor de coeficientes de deformações térmicas, consideradas isotrópicas, onde  $CTD$  é o coeficiente de dilatação térmica;  $\mathbf{b} = \beta \mathbf{1}$  é o tensor de coeficientes de deformações químicas, consideradas isotrópicas, onde  $\beta$  é o coeficiente que relaciona a hidratação à retração autóloga.

As constantes elásticas, bem como os coeficientes  $CTD$  e  $\beta$  são considerados aproximadamente iguais a zero para  $\alpha < \alpha_0$ .

Contudo, como no caso do presente trabalho considera-se apenas os efeitos da elasticidade, a equação 13 se reduz a:

$$d\sigma = \mathbf{C}(\alpha) : (d\epsilon - \mathbf{a}dT - \mathbf{b}dm) \quad (14)$$

## 2.2 Parâmetros que determinam o problema térmico

As características térmicas de um concreto dependem da natureza de seus constituintes e de sua formulação. No entanto, teoricamente, uma simples lei de dosagem seria insuficiente para determinar suas propriedades, visto que com o desenvolvimento da reação de hidratação, novos produtos aparecem e fazem parte do estado termodinâmico do material. Além disso, as propriedades térmicas dos constituintes do concreto mudam com a temperatura. Portanto, em uma idade jovem, os parâmetros da equação do calor estão relacionados com a composição do concreto, o grau de hidratação e a temperatura. Um estudo abrangente sobre os métodos de determinação e valores usuais para essas propriedades foi realizado por Fraga [13].

Esses fatores geram diversas teorias e métodos para determinação destas propriedades. Este trabalho visa determinar o impacto de eventuais incertezas destes parâmetros em um modelo preditivo de fissuração para estruturas de concreto massa.

### 2.2.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica do concreto,  $\lambda$ , descreve a capacidade do concreto em conduzir calor no nível macroscópico de suas estruturas. Existem diversos métodos propostos para determiná-la.

Em RILEM [1], vemos que os fatores mais relevantes que afetam a condutividade térmica do concreto são a fração do volume de agregado na mistura, o teor de ar incorporado e a umidade do concreto. Além disso, verificou-se também que a idade em si tem um efeito desprezível na condutividade térmica do concreto, exceto em idades muito precoces, ou seja, abaixo de 2 dias (Kim et al. [14], Bentz [15], Gibbon and Ballim [16]). Segundo Bentz [15], isso ocorre porque a condutividade térmica dos

componentes da pasta de cimento (água:  $0,604 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  e cimento:  $1,55 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) e pasta de cimento hidratada são suficientemente próximos para que a percolação de sólidos e porosidade tenham apenas um impacto limitado sobre essa propriedade (em torno de 10%).

Uma lista ampla de valores de condutividade térmica para misturas de concreto com diferentes tipos de agregados medidos em várias temperaturas está disponível em ACI-Committe-207 [17]. Além disso, Fraga [13] reúne valores resumidos de diversos autores e que variam de  $1,84$  a  $3,70 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

### 2.2.2 Calor específico

O calor específico  $C_p$  é entendido como sendo a quantidade de energia em  $J$ , necessária para aumentar 1 unidade de massa,  $g$ , de um dado material por uma unidade de temperatura,  $K$ . Medições experimentais de calor específico no concreto envolvem o mesmo princípio que as medições da condutividade térmica, com medições térmicas dinâmicas (transitórias), em Pomianowski et al. [18], ou uma combinação de medições transientes e estacionárias, onde o calor específico é calculado com base no coeficiente de difusão térmica (obtido a partir do método transiente) e a condutividade térmica (obtida a partir do método de estado estacionário), proposto por Luca and Mrawira [19]. Assim como na condutividade térmica, o calor específico do concreto depende fortemente do calor específico dos seus diferentes componentes. O valor do parâmetro pode ser estimado através da dosagem [15] com base nas frações de massa dos componentes, desde que o calor específico de cada fase independente, seja conhecido.

Em Neville [20], verifica-se que a faixa de valores do calor específico para concretos usuais é de  $0,84 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$  à  $1,17 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

### 2.2.3 Troca de calor com o ambiente

Diversos modelos foram realizados para determinar as condições de contorno do problema térmico. A transferência de calor entre o concreto e o ambiente é frequentemente levada em conta por leis facilmente implementáveis em um código de elemento finito. Entretanto, a determinação dos parâmetros desses modelos é complexa e depende de diversos fatores relacionados ao ambiente externo e à geometria da estrutura. A troca de calor do concreto nas superfícies expostas ao ambiente pode ocorrer devido à radiação térmica e convecção [21].

A radiação térmica ocorre quando a energia é emitida na forma de ondas eletromagnéticas. Em convecção, o calor é trocado devido ao movimento (natural ou forçado) de fluidos, neste caso, do ar em contato com a superfície do concreto.

A troca de calor devido à convecção é aproximadamente proporcional à diferença de temperatura ( $T - T_{t=\infty}$ ) entre a superfície de concreto  $T$  e o entorno  $T_{t=\infty}$  de acordo com a Lei do Resfriamento de Newton, enquanto a troca de calor devido à radiação é proporcional às diferenças de temperatura em escala absoluta para a potência de quatro, ou seja, ( $T^4 - T_{t=\infty}^4$ ) de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann [22].

Usualmente, os dois fenômenos são considerados juntos por meio de um coeficiente,  $h_{pr}$ , que considera tanto convecção,  $h_p$  e radiação,  $h_r$  [23]:

$$h_{pr} = h_p + h_r \quad (15)$$

Além do aquecimento por radiação das superfícies de concreto pelo sol, a troca de calor por radiação é particularmente importante para estruturas de concreto massa no que diz respeito ao efeito de resfriamento noturno, levando a significativas amplitudes diárias de temperatura. Como estimado por [24], um corpo negro exposto ao céu claro à noite pode ser resfriado até  $10 - 12^\circ\text{C}$  abaixo da temperatura ambiente. Nenhuma indicação para o concreto é conhecida, mas uma diferença de temperatura similar de  $10^\circ\text{C}$  foi medida para o telhado de metal em uma noite clara por Hollick [25].

O parâmetro de convecção na superfície do concreto é influenciado por parâmetros geométricos e aerodinâmicos [14]. O coeficiente de troca de calor por convecção livre para concreto pode ser assumido como igual a  $h_p = 6,0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  em condições de ar estagnado [26].

Além disso, estudos realizados por Kwak et al. [27], Briffaut et al. [28] e Azenha [9] apontam que o parâmetro de convecção varia de acordo com a velocidade do vento. Neste caso, partindo para um conceito de convecção forçada devido à ação do vento, o coeficiente de troca de calor é definido em função da velocidade do vento,  $v$  [m/s].

Lee et al. [29], relataram coeficiente de transferência de calor convectivo de concreto expostos ao ar de 9,0 à 13,0  $W.m^{-2}.K^{-1}$  para velocidades de vento variando de 2,0 à 3,0 m/s.

#### **2.2.4 Energia de ativação**

Assim como qualquer reação química, as reações de hidratação do cimento e adições minerais são altamente influenciadas pela temperatura da pasta. Essa sensibilidade à temperatura pode ser modelada usando uma lei de Arrhenius [30]. A energia de ativação nesta formulação depende do tipo e classe de cimento, relação água-aglomerante, adições e aditivos.

A energia de ativação ( $E_a$ ) pode ser determinada experimentalmente usando ensaios mecânicos ou físicos, realizados em diferentes temperaturas de cura (resistência à compressão, calorimetria isotérmica, entre outros). Além disso, pode ser estimada utilizando fórmulas baseadas na composição química do cimento.

### **2.3 Análise de sensibilidade**

Uma possível definição de análise de sensibilidade, proposta por Saltelli et al. [31], concerne ao estudo de como a incerteza na saída de um modelo (numérico ou outro) pode ser atribuída a diferentes fontes de incerteza na entrada do modelo. Uma prática relacionada é a "análise de incerteza", que foca em quantificar a incerteza na saída do modelo. Idealmente, a incerteza e análises de sensibilidade devem ser executadas em conjunto, com análise de incerteza anterior na prática atual.

Para que esta definição de análise de sensibilidade seja útil, deve primeiro ser claro o que se entende aqui por "modelo", numérico ou outro, bem como os termos entrada e saída, que serão usados ao longo deste estudo.

O estudo de sensibilidade adotado ao modelo termoquímico em estruturas de concreto massa relaciona o seu comportamento térmico, isto é, a elevação de temperatura do concreto, diante das variações efetuadas nos valores dos parâmetros térmicos do material selecionados para esta análise. O procedimento adotado para a análise de sensibilidade e determinação dos resultados baseia-se no modelo de planejamento experimental e fatorial proposto por Montgomery [32] e utilizado por Ferreira [10].

Segundo Almeida Filho [33], o planejamento de experimentos é uma maneira de decidir, antes da realização dos mesmos, quais configurações em particular devem ser simuladas, de forma que a informação desejada possa ser obtida com a quantidade mínima de simulações. Ferreira [10] descreve um planejamento experimental de um conjunto de ações a serem realizadas com critérios estatísticos e científicos, tendo como objetivo verificar a influência de diversas variáveis nos resultados de um processo ou de um sistema. Sabe-se que a experimentação é um processo fundamentalmente iterativo [32], sendo os experimentos físicos ou analítico-numéricos.

Destacam-se algumas vantagens da utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental citadas por Montgomery [32], são elas: a redução do número de experimentos, sem perder a qualidade das informações; a possibilidade do experimento ser realizado com diversas variáveis, simultaneamente, observando-se os seus efeitos, separadamente; a seleção das variáveis que influenciam no sistema (variáveis significativas); e a elaboração de conclusões a partir dos resultados qualitativos. Baseado neste modelo adotou-se as seguintes premissas para elaboração deste estudo:

1. Reconhecimento e definição do problema;
2. Escolha dos fatores (variáveis) e das faixas de valores em que esses fatores serão avaliados, definindo-se o nível específico (valor) que será empregado em cada experimento;
3. Escolha adequada da variável de resposta, garantindo a objetividade na análise dos resultados obtidos;
4. Delineamento dos experimentos: quantidade e ordem de execução;

5. Execução dos experimentos, monitorando-os e controlando-os;
6. Análise dos resultados, com o uso de métodos estatísticos, a fim de que as conclusões estabelecidas sejam objetivas;
7. Elaboração das conclusões e recomendações a partir da análise dos resultados.

### 2.3.1 Experimentos com um único fator

A análise inicial utilizada neste estudo busca identificar a influência individual de cada parâmetro selecionado no modelo, obtida pela variação de 20% nos valores de referência (tabela 1), associando simulações numéricas para identificar a perturbação gerada no sistema comparando com os valores de referência, conforme planejamento descrito na tabela 4.

A fim de analisar a influência desses parâmetros foram adotados três possíveis valores para eles: o valor de referência (Ref.), um valor mínimo e um máximo, e baseado nos valores de entrada admitidos para os materiais, adotou-se uma variação fixa de 20% para os valores de referência, garantindo desta forma uma variação padronizada para todos os parâmetros e a garantia de não extrapolar valores, descharacterizando por exemplo, o experimento. Desta forma, os valores mínimos e máximos adotados, são função dos valores de referência, ou seja, Ref. -20% e Ref. +20%, respectivamente, conforme tabela 1.

Tabela 1. Valores de entrada dos parâmetros

	Energia de ativação	Calor específico	Condutividade térmica	Troca de calor com o ar
	$\frac{E_a}{R} (K)$	$C_p (J.g^{-1}.K^{-1})$	$\lambda (W.m^{-1}.K^{-1})$	$h (W.m^{-2}.K^{-1})$
Min. (Ref. -20%)	3600	0,726	1,520	8
Ref.	4000	0,908	1,900	10
Máx (Ref. +20%)	4400	1,090	2,280	12

Neste trabalho, a fim de caracterizar adequadamente a fissuração de uma estrutura, é analisada a fissuração em um determinado ponto da estrutura. Deve-se ressaltar que, nas primeiras idades de uma estrutura, um dado ponto pode ter fissuras abertas e fechadas por diferentes tempos. Portanto, dentro da estrutura da presente análise, por uma questão de simplicidade, um ponto é considerado como fissurado se, pelo menos por uma vez, o ponto apresentar fissuras. Nesse sentido, Rita et al. [34] introduzem a variável  $LCr(x, y, z)$ , definida como:  $LCr(x, y, z) = 0$  se  $I_c(x, y, z, t) < 1$  para todos os passos de tempo da análise, e  $LCr(x, y, z) = 1$  se  $I_c(x, y, z, t) \geq 1$  em pelo menos um passo em toda análise. Portanto, pode-se assumir  $LCr(x, y, z) \in \{0, 1\}$ .

O modelo em elementos finitos empregado utiliza tetraedros lineares com um ponto de integração. Neste caso, a variável  $LCr$  representa a fissuração de um dado elemento finito, isto é,  $LCr_{iel} = LCr(x, y, z)$ . Enfim, é possível introduzir uma variável que representa a tendência global (macroscópica) de fissuração da estrutura ( $E_{Cr}$ ) que é igual à soma dos volumes dos elementos finitos fissurados (ou seja, os elementos que têm  $LCr_{iel}(x, y, z) = 1$ ) divididos pela soma dos volumes de todos os elementos ativos, isto é, os que sofrem hidratação.

Neste sentido, a fim de verificar a influência mecânica dos parâmetros adotados nas simulações do modelo, adotou-se a extensão de fissuração ( $E_{Cr}$ ), proposta por Rita et al. [34], como segunda variável de resposta, definida conforme equação 16, a partir do índice de fissuração, definido pela Eq. ?? e

condições previamente determinadas.

$$E_{Cr} = \frac{\sum_{iel=1}^{numel} V_{iel} \cdot LC_{riel}}{\sum_{iel=1}^{numel} V_{iel}}; E_{Cr} \in [0, 1] \quad (16)$$

Onde *numel* representa o número de elementos ativos na malha e *iel* o índice do elemento.

A análise utilizada, assim como na seção anterior, busca identificar a influência individual de cada parâmetro selecionado no modelo, obtida pela variação de 20 % nos valores de referência (Tabela 1), associando simulações numéricas para identificar a perturbação gerada no sistema comparando com os valores de referência, conforme planejamento descrito na tabela 4.

### 2.3.2 Análise fatorial $z^k$

O planejamento fatorial é uma técnica bastante utilizada quando se têm duas ou mais variáveis independentes (fatores), que permite uma combinação de todas as variáveis em todos os níveis, possibilitando a análise de uma variável, sujeita à todas as combinações das demais. A partir deste planejamento, definem-se quais as variáveis que influenciam o sistema proposto e, então, parte-se para uma abordagem mais específica, somente com as variáveis realmente significativas, [32].

Neste trabalho foi adotado o planejamento fatorial com 3 níveis pré-determinados: o valor de referência, um valor mínimo e um máximo, com valores de entrada conforme na tabela 1 e selecionando quatro parâmetros do concreto para serem variados nos dados de entrada: energia de ativação, calor específico, condutividade térmica e taxa de troca de calor por convecção (concreto/ar), originando um sistema fatorial de  $z^k$  experimentos, onde  $z$  é o número de níveis/quantidade de valores previstos para a variável, e  $k$  é o número de variáveis do problema, conforme apresentado na tabela 5.

Desta forma, pretende-se verificar a sensibilidade do modelo termoquímico-mecânico para eventuais incertezas em seus parâmetros de entrada.

## 3 EXEMPLO ANALISADO

Para análise de sensibilidade dos parâmetros selecionados estudou-se a simulação da construção de uma laje de concreto com as seguintes dimensões, em metros: 3,00 x 2,00 x 0,50; instalada sobre um lastro de concreto de 100mm de espessura, conforme pode ser visto na Fig. 1.



Figura 1. Forma da laje ensaiada e termômetros de monitoramento acoplados à plataforma LYNX (COPPE/FURNAS)

As temperaturas medidas durante o ensaio experimental foram obtidas automaticamente através do equipamento LYNX do COPPE/LABEST (Fig. 1). Nos gráficos apresentados nas Figuras 2 e 3 podem ser vistas as temperaturas no centro e no bordo da laje, respectivamente, com os termômetros em alturas variáveis de 5cm, 15 cm, 25 cm, 35 cm e 45 cm do fundo da forma.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do concreto de referência (C90)

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
28	96,90	6,61	8,03	37,50

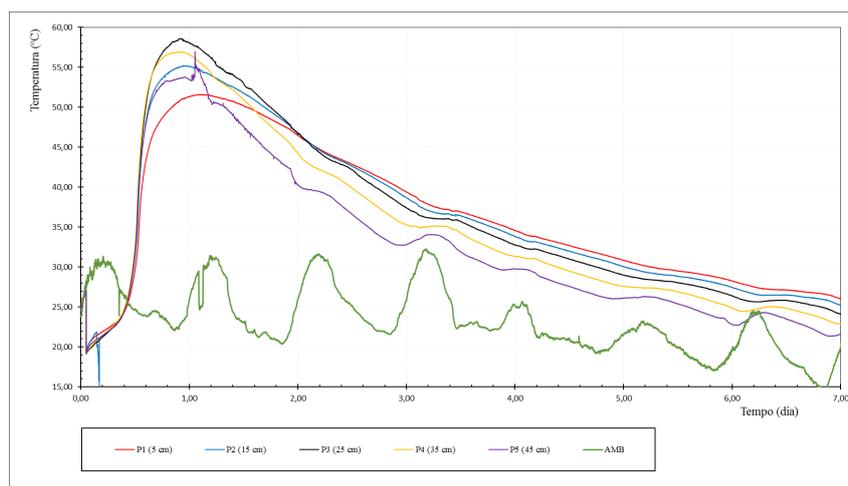


Figura 2. Temperaturas medidas no centro da estrutura (FURNAS)

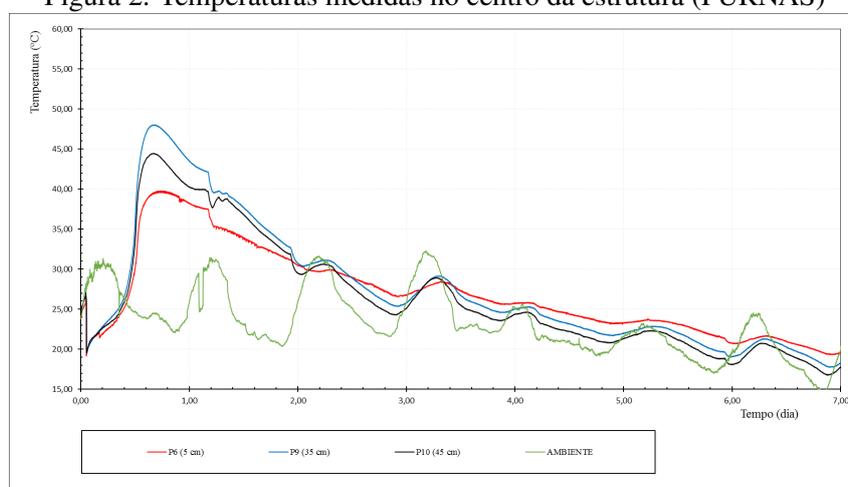


Figura 3. Temperaturas medidas no bordo da estrutura (FURNAS)

A determinação da elevação adiabática de temperatura do concreto de referência, foi realizada no calorímetro adiabático (MSI - volume 200 litros). A moldagem do corpo-de-prova para o calorímetro adiabático foi feita imediatamente após a dosagem do concreto e os dados de elevação adiabática expressos na Fig. 4. Já as propriedades térmicas e mecânicas do concreto de referência são apresentadas nas Tab. 2 e 3 para 28 dias. O desenvolvimento das propriedades mecânicas ao longo do tempo seguiram a metodologia apresentada na seção 2.1 e equação 2.

A figura 5 apresenta a geometria adotada para simulação numérica da laje executada. Em tal modelo foi aproveitada a simetria bilateral do problema, sendo representado apenas um quarto da laje em estudo. Foram considerados três diferentes materiais, com diferentes propriedades térmicas e mecânicas: o solo, o concreto da base e o concreto da laje propriamente dita. A malha de elementos finitos utilizada apresenta 29474 nós e 163673 elementos tetraédricos lineares.

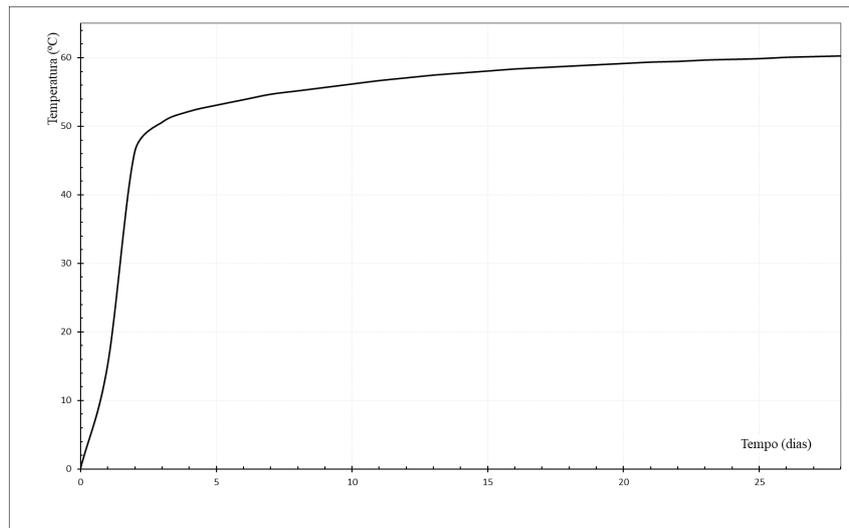


Figura 4. Curva de elevação adiabática de temperatura

Tabela 3. Propriedades do concreto de referência utilizado para 28 dias

Propriedade	Concreto referência	Base	Solo
$\lambda$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	1,900	1,900	2,000
$C_p$ ( $J.g^{-1}.K^{-1}$ )	0,908	0,908	1,050
$\frac{E_a}{R}$ (K)	4000	4000	-
$CTD$ ( $K^{-1}$ )	$11,56 \times 10^{-6}$	$11,56 \times 10^{-6}$	$11,56 \times 10^{-6}$
$E$ (GPa)	Tab.2	26,0	50,0
$\alpha_0$	0,10	-	-

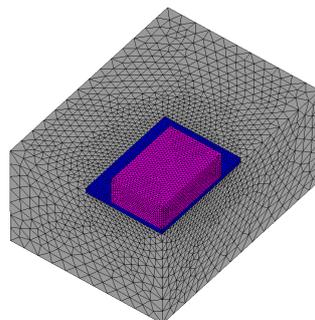


Figura 5. Características da geometria e malha de elementos finitos

No problema térmico para as superfícies externas de concreto e da rocha foi considerada troca de calor por convecção com coeficiente pelicular  $h_{pr} = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  e temperatura ambiente de acordo com as medidas de campo. As restrições do modelo mecânico foram aplicadas à fundação, nas superfícies de corte virtual (solo com solo), com deslocamentos restringidos em todas as direções da base e na direção normal às superfícies em  $x$  e  $y$ .

O comportamento termoquímico da laje de 50 cm durante o endurecimento do concreto, foi analisado numericamente considerando as propriedades do material determinadas experimentalmente, de acordo com as informações apresentadas.

A obtenção dos dados dos experimentos numéricos foram realizados em passos de tempo de 1 hora, durante 28 dias.

A critério de validação do modelo numérico desenvolvido, foi comparado a elevação de temperatura no ponto central da estrutura e plotados na Fig.6. O mapa de fissuração ( $E_{Cr}$ ) para o modelo numérico de referência é apresentado na Fig.7, apresentando uma boa resposta do modelo computacional, quando comparado aos resultados experimentais.

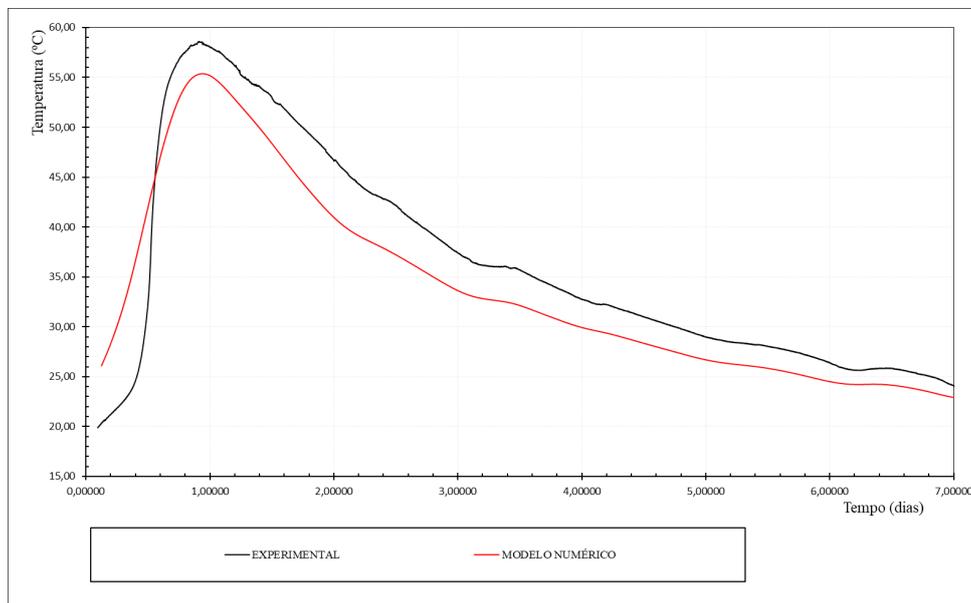


Figura 6. Comparativo da elevação de temperatura do modelo numérico e dados experimentais para 7 dias

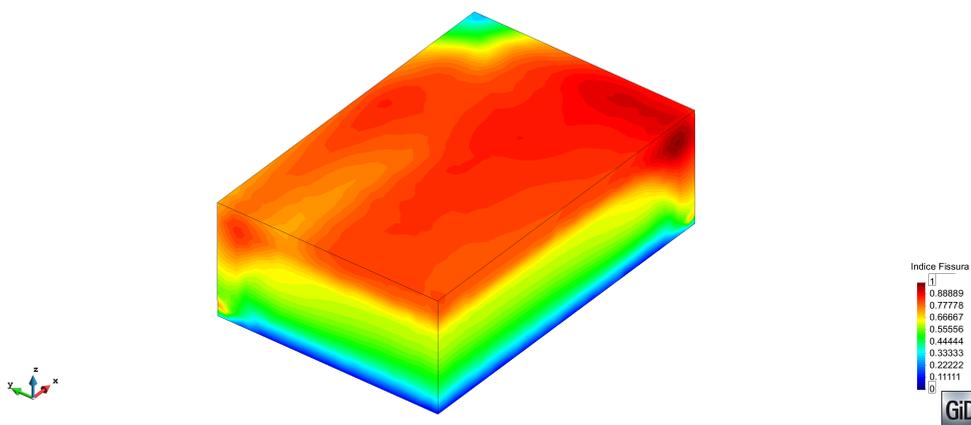


Figura 7. Mapa de fissuração ( $E_{Cr}$ ) para o modelo numérico de referência (Ref.).

### 3.1 Resultados

Os resultados analisados nas simulações efetuadas compreendem-se: na variação da extensão de fissuração em relação ao valor de referência, que podem ser vistos através da Tabela 4, e nos campos de fissuração relacionados à simulação dos 7 primeiros dias de evolução da reação de hidratação do concreto para os 8 casos estudados além da simulação do experimento de referência. Apresenta-se também na Fig. 8 um comparativo em mesma escala para todos os parâmetros sobrepostos.

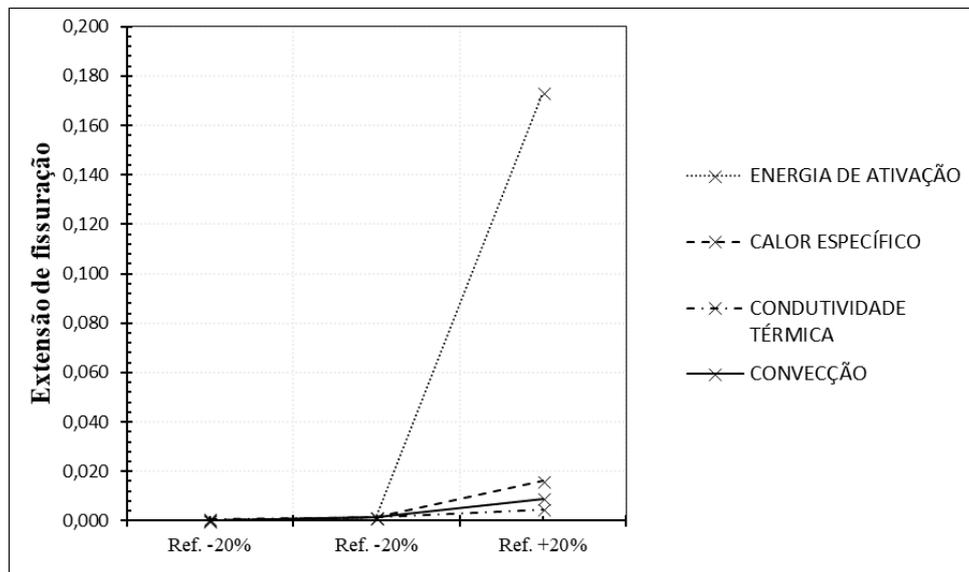


Figura 8. Comparativo da influência individual de cada parâmetro no modelo numérico.

A segunda parte da visualização dos resultados está apresentada nas Figuras 9 até 12, onde comparam-se os resultados de temperatura obtidos pelo modelo termoquímico-mecânico do experimento de referência com os experimentos realizados variando-se, respectivamente, os parâmetros de energia de ativação, calor específico, condutividade e troca de calor por convecção, por seus respectivos desvios de 20% para menos e para mais.

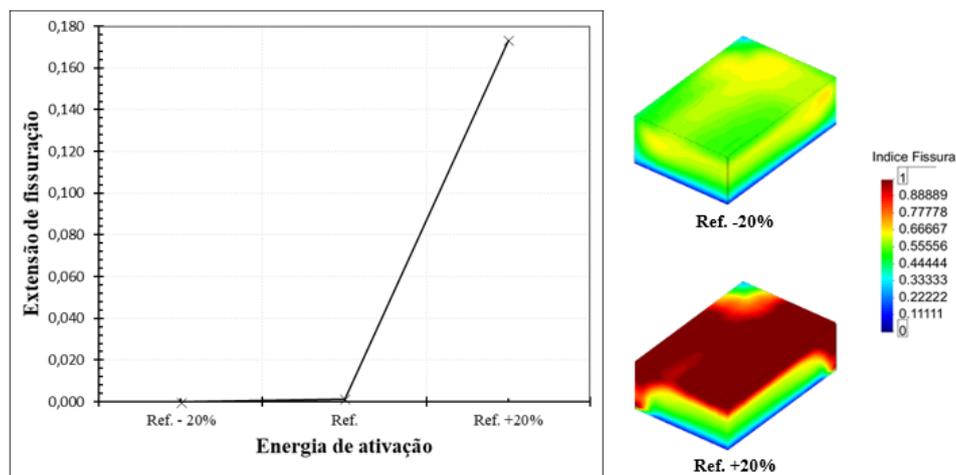


Figura 9. Mapas e extensão de fissuração para variação na energia de ativação

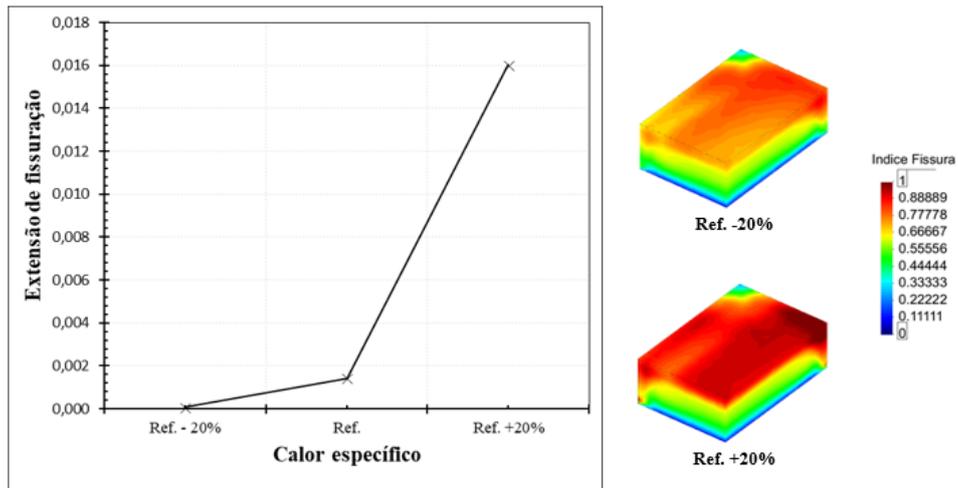


Figura 10. Mapas e extensão de fissuração para variação no calor específico

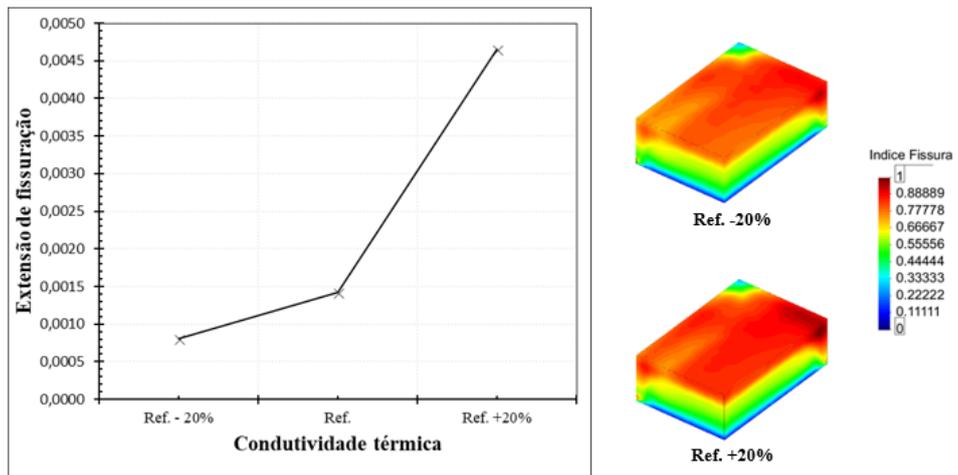


Figura 11. Mapas e extensão de fissuração para variação na condutividade térmica.

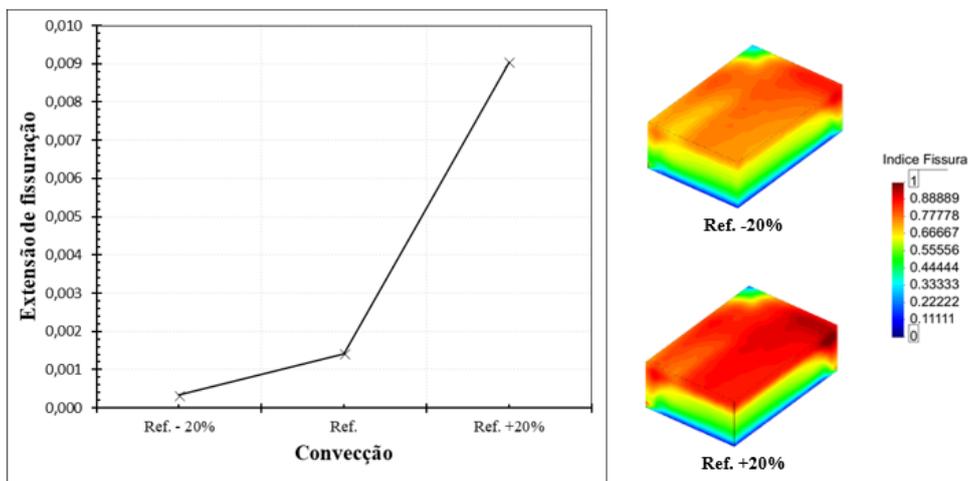


Figura 12. Mapas e extensão de fissuração para variação na convecção

Tabela 4. Extensão de fissuração obtido pelas simulações

Número do experimento	Variáveis				$E_{Cr_i}$
	$\frac{E_a}{R}$	$C_p$	$\lambda$	$h$	
1	Ref	Ref	Ref	Ref	0,001416
2	Min	Ref	Ref	Ref	0
3	Max	Ref	Ref	Ref	0,173321
4	Ref	Min	Ref	Ref	0,000081
5	Ref	Max	Ref	Ref	0,016012
6	Ref	Ref	Min	Ref	0,000805
7	Ref	Ref	Max	Ref	0,004651
8	Ref	Ref	Ref	Min	0,000338
9	Ref	Ref	Ref	Max	0,009044

### 3.1.1 Análise fatorial do modelo termoquímico-mecânico

Os resultados para a análise fatorial global do modelo termoquímico-mecânico são apresentados na tabela 5 e Fig. 13.

Tabela 5. Resultado da Extensão de Fissuração para análise de sensibilidade do modelo

Número do experimento	Variáveis				numel	$\sum_{iel=1}^{numel} LCr_{iel}$	$E_{Cr_i}$
	$h$	$E_a/R$	$C_p$	$\lambda$			
1	Min	Min	Min	Min	62139	0	0,0000000
2	Min	Min	Min	Ref	62139	0	0,0000000
3	Min	Min	Min	Max	62139	0	0,0000000
4	Min	Min	Ref	Min	62139	0	0,0000000
5	Min	Min	Ref	Ref	62139	0	0,0000000
6	Min	Min	Ref	Max	62139	0	0,0000000
7	Min	Min	Max	Min	62139	0	0,0000000
8	Min	Min	Max	Ref	62139	0	0,0000000
9	Min	Min	Max	Max	62139	0	0,0000000
10	Min	Ref	Min	Min	62139	0	0,0000000
11	Min	Ref	Min	Ref	62139	1	0,0000161
12	Min	Ref	Min	Max	62139	5	0,0000805
13	Min	Ref	Ref	Min	62139	8	0,0001287
14	Min	Ref	Ref	Ref	62139	21	0,0003380
15	Min	Ref	Ref	Max	62139	48	0,0007725
16	Min	Ref	Max	Min	62139	57	0,0009173
17	Min	Ref	Max	Ref	62139	197	0,0031703
18	Min	Ref	Max	Max	62139	433	0,0069682
19	Min	Max	Min	Min	62139	894	0,0143871
20	Min	Max	Min	Ref	62139	1363	0,0219347
21	Min	Max	Min	Max	62139	1991	0,0320411
22	Min	Max	Ref	Min	62139	3152	0,0507250
23	Min	Max	Ref	Ref	62139	4950	0,0796601

Tabela 5. Resultado da Extensão de Fissuração para análise de sensibilidade do modelo

Número do experimento	Variáveis				numel	$\sum_{iel=1}^{numel} LCr_{iel}$	$E_{Cr_i}$
	$h$	$E_a/R$	$C_p$	$\lambda$			
24	Min	Max	Ref	Max	62139	6513	0,1048134
25	Min	Max	Max	Min	62139	7917	0,1274079
26	Min	Max	Max	Ref	62139	9060	0,1458022
27	Min	Max	Max	Max	62139	10231	0,1646470
28	Ref	Min	Min	Min	62139	0	0,0000000
29	Ref	Min	Min	Ref	62139	0	0,0000000
30	Ref	Min	Min	Max	62139	0	0,0000000
31	Ref	Min	Ref	Min	62139	0	0,0000000
32	Ref	Min	Ref	Ref	62139	0	0,0000000
33	Ref	Min	Ref	Max	62139	0	0,0000000
34	Ref	Min	Max	Min	62139	0	0,0000000
35	Ref	Min	Max	Ref	62139	0	0,0000000
36	Ref	Min	Max	Max	62139	0	0,0000000
37	Ref	Ref	Min	Min	62139	1	0,0000161
38	Ref	Ref	Min	Ref	62139	5	0,0000805
39	Ref	Ref	Min	Max	62139	21	0,0003380
40	Ref	Ref	Ref	Min	62139	50	0,0008046
41	Ref	Ref	Ref	Ref	62139	88	0,0014162
42	Ref	Ref	Ref	Max	62139	289	0,0046509
43	Ref	Ref	Max	Min	62139	567	0,0091247
44	Ref	Ref	Max	Ref	62139	995	0,0160125
45	Ref	Ref	Max	Max	62139	1651	0,0265695
46	Ref	Max	Min	Min	62139	3467	0,0557943
47	Ref	Max	Min	Ref	62139	5766	0,0927920
48	Ref	Max	Min	Max	62139	7441	0,1197477
49	Ref	Max	Ref	Min	62139	9185	0,1478138
50	Ref	Max	Ref	Ref	62139	10770	0,1733211
51	Ref	Max	Ref	Max	62139	12344	0,1986514
52	Ref	Max	Max	Min	62139	13695	0,2203930
53	Ref	Max	Max	Ref	62139	14983	0,2411207
54	Ref	Max	Max	Max	62139	16149	0,2598851
55	Max	Min	Min	Min	62139	0	0,0000000
56	Max	Min	Min	Ref	62139	0	0,0000000
57	Max	Min	Min	Max	62139	0	0,0000000
58	Max	Min	Ref	Min	62139	0	0,0000000
59	Max	Min	Ref	Ref	62139	0	0,0000000
60	Max	Min	Ref	Max	62139	0	0,0000000
61	Max	Min	Max	Min	62139	0	0,0000000
62	Max	Min	Max	Ref	62139	0	0,0000000
63	Max	Min	Max	Max	62139	0	0,0000000
64	Max	Ref	Min	Min	62139	5	0,0000805
65	Max	Ref	Min	Ref	62139	26	0,0004184
66	Max	Ref	Min	Max	62139	69	0,0011104
67	Max	Ref	Ref	Min	62139	182	0,0029289
68	Max	Ref	Ref	Ref	62139	562	0,0090442

Tabela 5. Resultado da Extensão de Fissuração para análise de sensibilidade do modelo

Número do experimento	Variáveis				numel	$\sum_{iel=1}^{numel} LCr_{iel}$	$E_{Cr_i}$
	$h$	$E_a/R$	$C_p$	$\lambda$			
69	Max	Ref	Ref	Max	62139	923	0,0148538
70	Max	Ref	Max	Min	62139	1517	0,0244130
71	Max	Ref	Max	Ref	62139	2647	0,0425980
72	Max	Ref	Max	Max	62139	5266	0,0847455
73	Max	Max	Min	Min	62139	8362	0,1345693
74	Max	Max	Min	Ref	62139	10171	0,1636814
75	Max	Max	Min	Max	62139	12033	0,1936465
76	Max	Max	Ref	Min	62139	13808	0,2222115
77	Max	Max	Ref	Ref	62139	15443	0,2485235
78	Max	Max	Ref	Max	62139	16909	0,2721157
79	Max	Max	Max	Min	62139	18257	0,2938090
80	Max	Max	Max	Ref	62139	19522	0,3141666
81	Max	Max	Max	Max	62139	20671	0,3326574

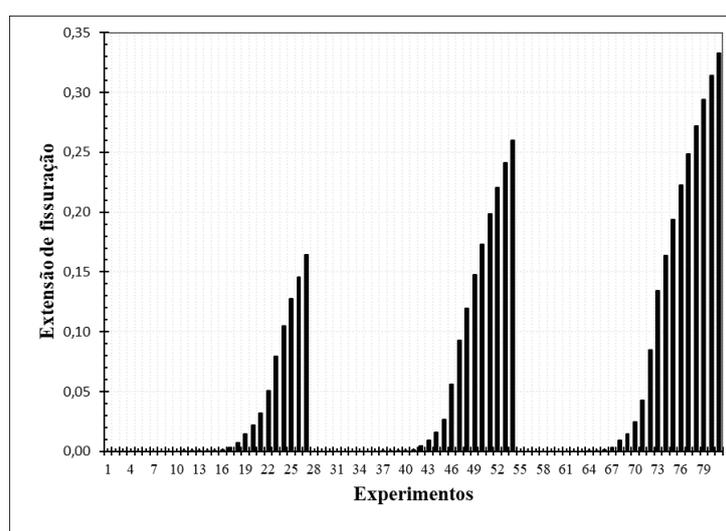


Figura 13. Extensão de fissuração para análise fatorial

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no estudo permitem verificar o comportamento térmico e mecânico ao longo do tempo para perturbações controladas nos valores de alguns parâmetros do modelo e seus impactos na integridade física da estrutura estudada. É importante lembrar que estruturas de concreto massa, por ter seu comportamento diferenciado, são mais propensas à fissuração por conta da elevação de temperatura durante a reação de hidratação do cimento. Sendo assim, por conta da natureza exotérmica e termoativada da reação de hidratação, tais estruturas são mais suscetíveis aos efeitos do aparecimento de tensões durante as primeiras idades do material. Conhecer a influência desses parâmetros em estruturas reais é de suma importância para a engenharia, tendo em vista que a determinação dos valores destes parâmetros muitas vezes envolve procedimentos complexos e não exatos, obtidos através de análises inversas, ou simplesmente negligenciados pelos profissionais por desconhecimento do seu impacto no projeto. Desta forma, a utilização de um modelo computacional é peça fundamental para análise de estruturas de concreto massa, a fim de identificar o aparecimento de fissuras, principalmente devido às

tensões geradas pela variação de temperatura, e eventuais patologias por concretagens em altas temperaturas.

A primeira parte deste estudo permite verificar a influência individual de cada parâmetro no modelo. Verificou-se que o parâmetro de maior influência na fissuração da estrutura é a energia de ativação. Apesar de não gerar os maiores gradientes térmicos, interfere diretamente na cinética da reação, antecipando o pico de temperatura para idades mais novas, nas quais provavelmente o material não possui resistência suficiente para resistir aos esforços gerados. As simulações que apresentam os menores impactos na fissuração são aquelas associadas às perturbações nos parâmetros de condutividade térmica, ou seja, a troca de calor interna. Apesar de não representarem resultados significativos na extensão de fissuração, os parâmetros de troca por convecção apresentam variação significativas quando analisa-se o aumento de elementos fissurados com sua variação. Tendo em vista que dentre os parâmetros, este é um dos mais complexos de prever, principalmente por dependerem de fatores ambientais, estudos mais específicos devem ser abordados.

Na segunda parte, durante a análise de sensibilidade evidencia-se o comportamento da estrutura para diversas combinações de parâmetros e como uma avaliação superficial destes parâmetros pode comprometer a integridade física da estrutura.

## 5 REFERÊNCIAS

- [1] RILEM, 2018. *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS*. Springer International Publishing.
- [2] Fairbairn, E. M. R., Silvos, M. M., Koenders, E. A. B., Ribeiro, F. L. B., & Toledo-Filho, R. D., 2012. Thermo-chemo-mechanical cracking assessment for early-age mass concrete structures. *Concrete International*, vol. 34, pp. 30–35.
- [3] Ulm, F. J. & Coussy, O., 1995. Modeling of thermochemomechanical couplings of concrete at early ages. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, pp. 785–794.
- [4] Ulm, F.-J. & Coussy, O., 1996. Strength growth as chemo-plastic hardening in early age concrete. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, vol. 122, pp. 1123–1132.
- [5] Ulm, F.-J. & Coussy, O., 1998. Couplings in early-age concrete: from material modeling to structural design. *International Journal of Solids and Structures*, vol. 35, pp. 4295–4311.
- [6] Silvos, M. M., 2003. *Otimização da Fase Construtiva de Estruturas de Concreto em Face dos Efeitos da Hidratação Via Algoritmos Genéticos*. PhD thesis, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- [7] Fairbairn, E. M., R. Silvos, M. M., Toledo Filho, R. D., Alves, J. L. D., & Ebecken, N. F. F., 2004. Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms. *Computers and Structures*, vol. 82, pp. 281–299.
- [8] Faria, E. F., 2004. *Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados*. PhD thesis, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- [9] Azenha, M. A. D., 2009. *Numerical Simulation of The Structural Behaviour of Concrete Since Its Early Ages*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [10] Ferreira, N. S. S., 2011. Análise de sensibilidade em estruturas lamelares. *21º POSMEC*.
- [11] Hellmich, C., 1999. *Shotcrete as part of the new Austrian tunneling method: from thermochemomechanical material modeling to structural analysis and safety assessment of tunnels*. PhD thesis, Technischen Universität Wien, Austria.
- [12] Sercombe, J., Hellmich, C., Ulm, F. J., & Mang, H., 2000. Modeling of early-age creep of shotcrete. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, pp. 284–291.

- [13] Fraga, I. A., 2018. Análise de sensibilidade do modelo termoquímico-mecânico para estruturas de concreto massa. Master's thesis, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [14] Kim, K., Jeon, S., Kim, J., & Yang, S., 2003. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement Concr Res*, vol. 33, pp. 363–371.
- [15] Bentz, D., 2008. A review of early-age properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 196–204.
- [16] Gibbon, G. & Ballim, Y., 1998. Determination of the thermal conductivity of concrete during the early stages of hydration. *Magazine of Concrete Research*, vol. 50, pp. 229–235.
- [17] ACI-Committee-207, 2002. *Mass Concrete*. ACI Manual of Concrete Practice.
- [18] Pomianowski, M., Heiselberg, P., Jensen, R., Cheng, R., & Zhang, Y., 2014. A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-pcm. *Cement and Concrete Research*, vol. 55, pp. 22–34.
- [19] Luca, J. & Mrawira, D., 2005. New measurement of thermal properties of superpave asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 17, pp. 72–79.
- [20] Neville, A., 1997. *Properties of Concrete*. 4th ed. Wiley, London, UK.
- [21] Kusuda, T., 1977. Fundamentals of building heat transfer. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 82, n. 2.
- [22] Modest, M., 2013. Radiative heat transfer. *Academic press*.
- [23] Faria, R., Azenha, M., & Figueiras, J., 2006. Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab. *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, pp. 572–585.
- [24] Michell, D. & Biggs, K., 1979. Radiation cooling of buildings at night. *Applied Energy*, vol. 5, n. 10, pp. 263–275.
- [25] Hollick, J., 2012. Nocturnal radiation cooling tests. *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 930–936.
- [26] Branco, F., Mendes, P., & Mirambell, E., 1992. Heat of hydration effects in concrete structures. *ACI Materials Journal*, vol. 89, n. 2, pp. 139–145.
- [27] Kwak, H., Ha, S., & Kim, J., 2006. Non-structural cracking in rc walls. part i: Finite element formulation. *Cement and Concrete Composites*, vol. 36, pp. 749–760.
- [28] Briffaut, M., Benboudjema, F., Torrenti, J., & Nahas, G., 2012. Effects of the early age thermal behaviour on long term damage risk in massive concrete structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 16, n. 5, pp. 598–605.
- [29] Lee, Y., Choi, M., Yi, S., & Kim, J., 1992. Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early-age concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, n. 1, pp. 60–71.
- [30] Arrhenius, S., 1915. *Quantitative laws in biological chemistry*. Bell and Sons, London.
- [31] Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S., 2008. *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley and Sons Ltd., Italy.
- [32] Montgomery, D. C., 2001. *Design and analysis of experiments*. John Wiley and Sons, New York.
- [33] Almeida Filho, R. G., 2006. Planejamentos fatoriais fracionados para análise de sensibilidade de modelos de simulação de eventos discretos. Master's thesis, UNIFEI, Itajubá.
- [34] Rita, M., Fairbairn, E., Ribeiro, F., Andrade, H., & Barbosa, H., 2018. Optimization of mass concrete construction using a twofold parallel genetic algorithm. *Applied Sciences*, vol. 8, n. 3, pp. 399.