



INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO MODELO TERMOQUÍMICO-MECÂNICO NA FISSURAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO MASSA

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@labest.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

Resumo. Neste artigo é feito uma análise da influência de parâmetros na simulação de uma estrutura de concreto massa através do modelo termoquímico-mecânico. O estudo foi elaborado com base em uma laje de 50 cm de espessura, construída e ensaiada no laboratório de FURNAS em Goiânia/GO. A análise de influência foi realizada utilizando o programa de elementos finitos DAMTHE, desenvolvido no PEC/COPPE/UFRJ, variando parâmetros intrínsecos do material: módulo de elasticidade, resistência à tração, coeficiente de Poisson e coeficiente de dilatação térmica.

Palavras-chave: Termoquímico-mecânico, concreto massa, fissuração

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto massa são caracterizadas por seu comportamento diferenciado devido ao seu elevado volume de concreto, pois dado o alto consumo de cimento elas 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 estão sujeitas à variações de volume, que quando restritas, provocam tensões que podem levar a fissuração do material.

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 e Coussy, 1995; Ulm e Coussy, 1996; Ulm e Coussy, 1998; Silvoso, 2003; Fairbairn *et al.*, 2004; De Faria, 2004; Azenha, 2009).

No que se refere as 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 mecânicas do material.

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, quais causam impactos significativos no resultado das simulações avaliando o volume de elementos fissurados em comparação com a simulação de referência.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelagem numérica do concreto

O modelo numérico utilizado neste trabalho é baseado na teoria dos acoplamentos termoquímico-mecânicos proposto por Ulm e Coussy (1995). Modelo este, em que 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 e Coussy (1996), 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 diminuem (Ferreira, 2008). 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.

Considerando então a cinética dessa reação de hidratação de uma forma integrada, por meio do modelo básico para materiais cimentícios que é a lei de Arrhenius, escreve-se a Eq. (1) proposta por Ulm e Coussy (1995), Ulm e Coussy (1996), Ulm e Coussy (1998), como sendo a equação para evolução da massa do esqueleto do cimento.

$$\frac{\dot{m}}{dt} = \frac{d\xi}{dt} m_{\infty} = \frac{1}{\eta(\xi)} A(\xi) \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (1)$$

onde, $\frac{\dot{m}}{dt}$ representa a variação da massa do esqueleto do cimento; $\xi \in [0,1]$ é o grau de hidratação do concreto, que pode ser calculado como uma relação entre a massa do esqueleto em um tempo t , normalizado pela massa de esqueleto quando a reação está completa ($\xi = \frac{m(t)}{m_{\infty}}$) o termo $\eta(\xi)$ indica uma medida de viscosidade que segundo Faria (2004), com o passar do tempo é cada vez mais comandada pela difusão da água na rede porosa dos nano hidratos que se formam em torno dos grãos de cimento anidro; $A(\xi)$ é a afinidade química que é o parâmetro que indica qual potencial os reagentes possuem de se combinarem quimicamente; T é a temperatura absoluta em Kelvin; Ea é a energia de ativação ($J.mol^{-1}$) e R é a constante universal dos gases perfeitos ($8,3144 J.mol^{-1}K^{-1}$).

A afinidade normalizada, representada pela função é a propriedade intrínseca do material que governa a cinética da reação de hidratação. Tal propriedade pode ser obtida, dentre outros métodos, a partir de ensaios experimentais de elevação da temperatura do concreto em condições adiabáticas (Fairbairn et al, 2009).

A Eq. (2) é a equação padrão que calcula a evolução dos campos térmicos, onde C_ε representa o calor específico a deformação constante para concreto, Q o fluxo de calor originário de uma fonte externa de calor, k a condutividade térmica do concreto e T a temperatura.

$$C_\varepsilon \dot{T} = Q + k \nabla^2 T \quad (2)$$

Reorganizando-a, com o intuito de considerar o acoplamento termoquímico, ou seja, geração de calor de hidratação com termoativação, seguindo o quadro teórico dos acoplamentos termoquímico mecânicos de Ulm e Coussy, ela pode ser expressa pela Eq. (3), onde o termo $L\dot{\xi}$ representa o calor gerado pela reação exotérmica e L o calor latente de hidratação. O modelo numérico resolve esta equação no módulo termoquímico.

$$C_\varepsilon \dot{T} = Q + L\dot{\xi} + k \nabla^2 T \quad (3)$$

Para encontrar a solução numérica da Eq. (3) é necessário calcular o campo de hidratações, logo, é preciso conhecer o grau de hidratação para todos os passos de tempo em que se deseja obter o campo de temperaturas T .

O grau de hidratação pode ser determinado resolvendo a Eq. (1), no entanto, para isso é preciso determinar o valor de $\dot{A}(\xi) = \frac{A(\xi)}{m_\infty \eta(\xi)}$, valor este que pode ser obtido relacionando a evolução da reação de hidratação com a quantidade de calor gerado por ela através de um ensaio de elevação adiabática da temperatura.

Para encontrar a solução da Eq. (3) considera-se ainda as seguintes condições de contorno:

- i. Fluxo imposto

$$q \cdot n = q_{\text{imposto}} \quad (4)$$

Onde q representa o fluxo que atua sobre o contorno orientado pelo vetor normal a superfície externa n .

- ii. Troca com meio externo por convecção

$$q \cdot n = h(T_{\text{externa}} - T) \quad (5)$$

Onde h é o coeficiente de troca superficial.

- iii. Temperatura imposta

$$T = T_{\text{imposta}} \quad (6)$$

O problema mecânico é resolvido de modo a determinar o histórico de tensões, deslocamentos e potencial de fissuração do concreto, a partir dos resultados fornecidos pelo problema termoquímico, considerando as deformações térmicas, as deformações por retração autógena e a evolução das propriedades do material dependentes do grau de hidratação. O problema químico-mecânico é definido pela lei de evolução do grau de hidratação e pela equação incremental de tensões, dada por:

$$d\sigma = C(\xi): (d\varepsilon - d\varepsilon^{fl} - d\varepsilon^{fc} - d\varepsilon^{RA} - d\varepsilon^T) \quad (7)$$

Onde σ representa o tensor de tensões; $C(\xi)$ é o tensor de rigidez elástica do concreto, dependente do grau de hidratação de modo a simular o endurecimento do material; ε representa o tensor de deformações totais; ε^{fl} o tensor de deformações de fluência de longo prazo, ε^{RA} o tensor de deformações autógenas, no qual $d\varepsilon^{RA} = \beta 1 d\xi$, onde β é o coeficiente de retração autógena. Neste caso considerou-se, por simplificação, que a derivada de retração autógena varia linearmente com a derivada do grau de hidratação. Por fim, ε^T é o tensor de deformações térmicas, sendo $d\varepsilon^T = \alpha 1 dT$, onde α é o coeficiente de dilatação térmica do concreto.

O tensor de rigidez elástica $C(\xi)$ é função do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson (ν), que são parâmetros do material, o valor de ν pode ser considerado constante, sendo a evolução do módulo de elasticidade determinante no endurecimento do material. O valor do módulo E deve ser correlacionado com o grau de hidratação obtendo $E = E(\xi)$ a partir do conhecimento de sua evolução isoterma com a idade do material $E = E(t)$. Sabe-se que a retração autógena ocorre pelo consumo de água pela reação de hidratação estando dessa forma associada à evolução da quantidade de hidratos formados pela reação. Para a determinação das deformações decorrentes da retração autógena é necessário o conhecimento do parâmetro β da equação (7).

A extensão do modelo de acoplamento para incluir fluência básica do concreto é apresentada por Helmich (1999) e Sercombe et al. (2000). A fluência é separada em duas partes: curto prazo e longo prazo. A primeira é considerada efeito da difusão de água através dos microporos do concreto. A segunda é considerada efeito de um processo de deslocamento entre as camadas de CSH, na escala nanométrica.

A solução das equações acima permite a determinação para cada intervalo de tempo das tensões principais ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) e suas direções em relação ao sistema global. Define-se então o índice de fissuração pela relação:

$$\eta^p = \frac{\sigma_1^p(t)}{f_{ct}^p[\xi(t)]} \quad (8)$$

Onde $\sigma_1^p(t)$ é a maior tensão principal de tração em um ponto p em um certo tempo t (que depende do grau de hidratação ξ já que o módulo de elasticidade é função do grau de hidratação e o campo de temperaturas também depende da evolução do campo de hidratação - termo ativação) e $f_{ct}^p[\xi(t)]$ é a resistência à tração em um ponto p que também é função do grau de hidratação ξ no tempo t .

2.2 Programa computacional

O modelo computacional utilizado neste estudo foi implementado num código de elementos finitos tridimensional, paralelizado por Ferreira (2008), utilizando-se elementos tetraédricos lineares e possui dois módulos: um térmico e um mecânico, o primeiro permite o cálculo transiente da distribuição de temperaturas e hidratação no interior de estruturas massivas de concreto durante o endurecimento do material, considerando-se a exotermia e a termoativação da reação de hidratação. Isto é, a quantidade de calor gerada em um dado tempo depende, por sua vez, da evolução da reação de hidratação que depende do histórico de temperatura da massa de concreto.

O módulo mecânico, representa o acoplamento termoquímico-mecânico, onde a partir dos resultados fornecidos pelo módulo termoquímico, permite obter-se a resolução do problema mecânico, de forma a determinar o histórico de tensões, deslocamentos e potencial de fissuração do concreto, considerando as deformações térmicas, deformações químicas (retração autógena) e a evolução das propriedades do material de acordo com o grau de hidratação atingido. Todos os parâmetros mecânicos mais significativos (como resistência, módulo de elasticidade, velocidade de fluência, etc.) são variáveis em relação à evolução da reação de hidratação.

O código computacional permite também a simulação da construção de estruturas em camadas através de consideração de variações da geometria e das condições de contorno com o tempo decorrido desde o início da análise. A simulação do processo construtivo em camadas pode ser descrita da seguinte maneira: um plano de concretagem é estabelecido a priori, onde são estipulados o número de camadas construtivas e o instante e a temperatura de lançamento entre as camadas. Depois é efetuada a leitura de toda a malha de elementos finitos de forma que cada elemento seja associado a uma das etapas construtivas.

Sendo assim, ao longo do avanço da análise se o tempo de lançamento de uma nova camada for atingido, então os elementos associados a ela são ativados e as condições de contorno atualizadas. Os valores iniciais de deslocamento e tensão nos elementos recém lançados são considerados nulos. Ou seja, a cada camada lançada as matrizes provenientes dos problemas de elementos finitos são remontadas, incluindo os novos elementos e todos os campos de deslocamentos, tensões, temperaturas e grau de hidratação, por exemplo, são mantidos na nova estrutura de dados para a montagem dos sistemas lineares de equações.

A paralelização foi realizada no esquema subdomínio por subdomínio (SBS); foram utilizadas estruturas de dados comprimidas para o armazenamento das matrizes de coeficientes, onde utilizou-se o modelo CSRC (*Compressed Storage Row/Columns*) com um algoritmo especial para se efetuar o produto matriz-vetor. A utilização dessa estrutura de dados aliada ao algoritmo desenvolvido para efetuar o produto matriz-vetor proporcionam uma redução significativa tanto em termos de memória, como em termos de tempo de execução; e os sistemas de equações são resolvidos iterativamente através do método dos gradientes conjugados.

2.3 Extensão de fissuração

Neste trabalho busca-se determinar o grau de fissuração da estrutura simulada tendo em vista o cálculo do índice de fissuração dos elementos, pelo módulo mecânico do programa computacional (Eq. 8). Desta forma, Rita (2015) define um parâmetro denominado de extensão

de fissuração (EF) como uma estimativa do volume de elementos fissurados em relação ao volume total da estrutura.

$$EF(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{n_f} V_{iel}}{\sum_{i=1}^{numel} V_{iel}} \times 100 \quad (9)$$

Onde, n_f é o número de elementos com índice de fissuração maior ou igual a 1, $numel$ é o número total de elementos e V_{iel} é o volume de cada elemento.

2.4 Análise de influência dos parâmetros

O estudo de sensibilidade do modelo termoquímico-mecânico em estruturas de concreto massa utilizado neste trabalho relaciona o seu comportamento mecânico, isto é, a extensão de fissuração, diante das variações efetuadas nos valores dos parâmetros mecânicos 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 (1991), utilizado por Ferreira (2011) e Fraga (2016).

Segundo Almeida Filho (2006), 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 (2011) descreve um planejamento experimental de um conjunto de ações a serem realizadas com critérios estatísticos e científicos, tendo com o 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 (Montgomery, 2001), sendo os experimentos físicos ou analítico-numéricos.

Destacam-se algumas vantagens da utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental citadas por Montgomery, (2001), 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.

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, (Montgomery, 1991).

No estudo foi adotado o planejamento fatorial com 3 níveis pré-determinados: o valor de referência (concreto C90), um mínimo e um máximo, baseados nos estudos de Adriolo (1988) e Smilauer (2009), e selecionando quatro parâmetros do concreto para serem variados nos dados de entrada: módulo de elasticidade, resistência à tração, coeficiente de Poisson e coeficiente de dilatação térmica, além de ter-se selecionado o índice de fissuração do concreto como variável de resposta, originando um sistema fatorial de n^s experimentos, onde n é o número de níveis/quantidade de valores previstos para a variável, e s é o número de variáveis do problema, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Parâmetros limites de entrada

	Módulo de elasticidade	Resistência à tração	Coeficiente de Poisson	Coeficiente de dilatação térmica
	$E(MPa)$	$f_t(MPa)$	ν	$\alpha (10^{-6}.K^{-1})$
Mínimo (Min)	30000	5,29	0,24	9,25
Referência (Ref)	37500	6,61	0,30	11,56
Máximo (Max)	45000	7,90	0,36	13,90

Tabela 2. Planejamento fatorial

Número do experimento	Variáveis				Resposta (EF_i)
	E	f_t	ν	α	
1	Ref	Ref	Ref	Ref	EF_1
2	Min	Ref	Ref	Ref	EF_2
3	Min	Min	Ref	Ref	EF_3
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
80	Max	Max	Max	Ref	EF_{80}
81	Max	Max	Max	Max	EF_{81}

A análise utilizada neste estudo busca identificar a influência individual de cada parâmetro selecionado no modelo, obtida pela variação de 20% nos valores de referência (Tab. 3), associando simulações numéricas para identificar a perturbação gerada no sistema comparando com os valores de referência, conforme planejamento descrito na tabela 4.

O parâmetro de análise da perturbação foi definido pela variação na extensão de fissuração, calculado através da variação percentual absoluto médio, conforme Eq. 10.

$$\Delta EF = \frac{EF_i - EF_{ref}}{EF_{ref}} \quad (10)$$

Onde EF_i representa a extensão de fissuração da simulação com a variação de parâmetro e EF_{ref} a extensão de fissuração do modelo de referência.

Tabela 3. Valores de entrada dos parâmetros

	Módulo de elasticidade	Resistência à tração	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de dilatação térmica
	$E(MPa)$	$f_t(MPa)$	ν	$\alpha (10^{-6}.K^{-1})$
Mínimo (Min)	30000	5,29	0,24	9,25
Referência (Ref)	37500	6,61	0,30	11,56
Máximo (Max)	45000	7,90	0,36	13,90

Tabela 4. Planejamento numérico

Número do experimento	Variáveis				ΔEF
	E	f_t	ν	α	
1	Ref	Ref	Ref	Ref	ΔEF_1
2	Min	Ref	Ref	Ref	ΔEF_2
3	Max	Ref	Ref	Ref	ΔEF_3
4	Ref	Min	Ref	Ref	ΔEF_4
5	Ref	Max	Ref	Ref	ΔEF_5
6	Ref	Ref	Min	Ref	ΔEF_6
7	Ref	Ref	Max	Ref	ΔEF_7
8	Ref	Ref	Ref	Min	ΔEF_8
9	Ref	Ref	Ref	Max	ΔEF_9

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

As temperaturas medidas durante o ensaio experimental foram obtidas automaticamente através do equipamento LYNX do COPPE/LABEST (Fig. 2). Nos gráficos apresentados nas Figuras 3 e 4 podem ser vistas as temperaturas no centro e no canto da laje, respectivamente, com os termômetros em alturas variáveis de 5cm, 15 cm, 25 cm, 35 cm e 45 cm do fundo da forma.



Figura 2. Termômetros instalados no centro da forma

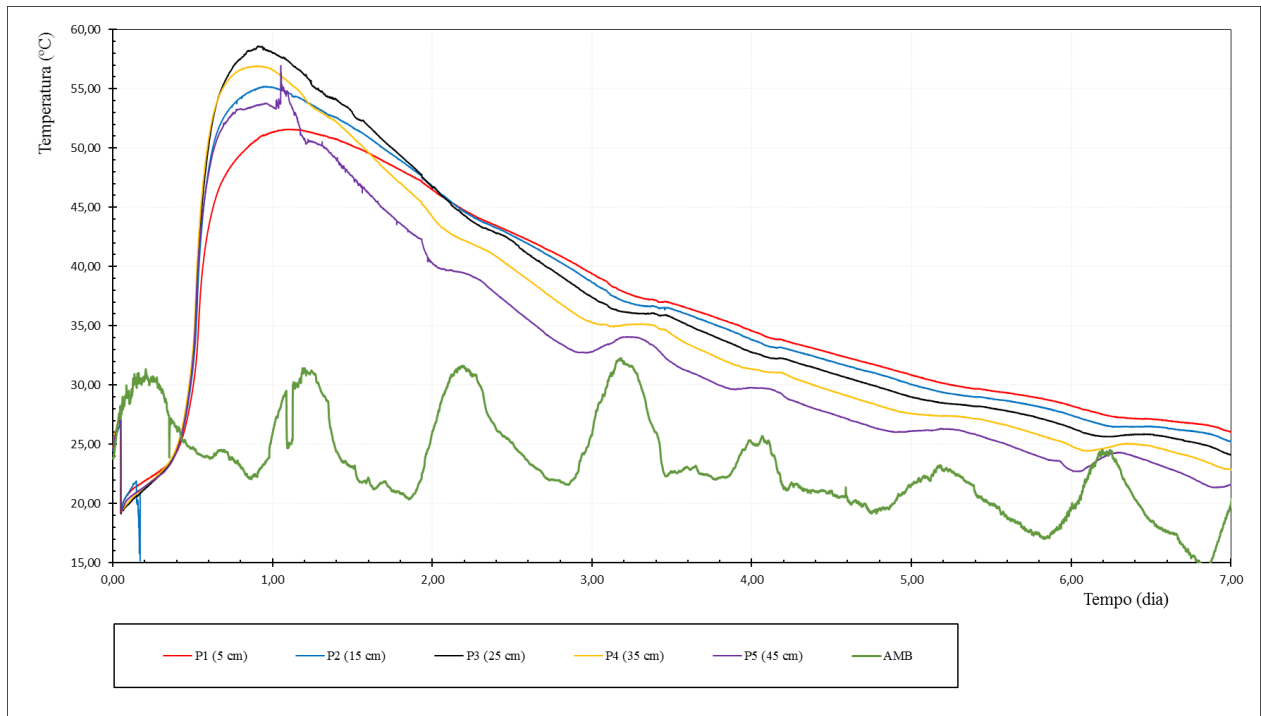


Figura 3. Temperaturas no centro da estrutura

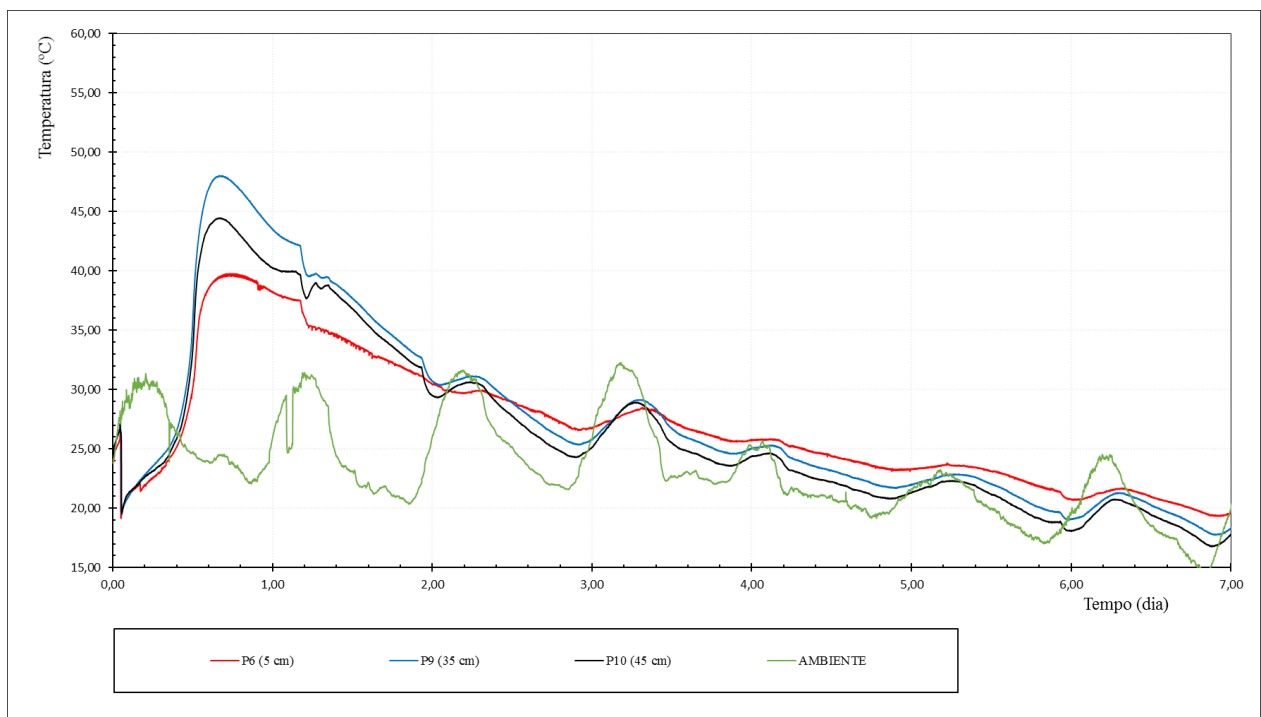


Figura 4. Temperaturas no canto da estrutura

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 expressas na Tab. 5. Já as propriedades mecânicas do concreto de referência são apresentadas na Tab. 6.

Tabela 5. Elevação adiabática (28 dias)

Tempo (dias)	Elevação adiabática (°C)
0	0
1	46,20
2	51,30
3	52,00
4	52,00
5	52,00
⋮	⋮
27	52,00
28	52,00

Tabela 6. Propriedade 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	96,9	6,61	8,03	37,5

A figura 5 apresenta a geometria adotada para simulação numérica da laje executada. Em tal modelo foi aproveitada a simetria do problema, sendo representado apenas $\frac{1}{4}$ da laje em estudo. Foram considerados três diferentes materiais, com diferentes propriedades térmicas e mecânicas: o solo, o concreto da base e a laje propriamente dita. A malha de elementos finitos utilizada apresenta 29474 nós e 163673 elementos tetraédricos lineares.

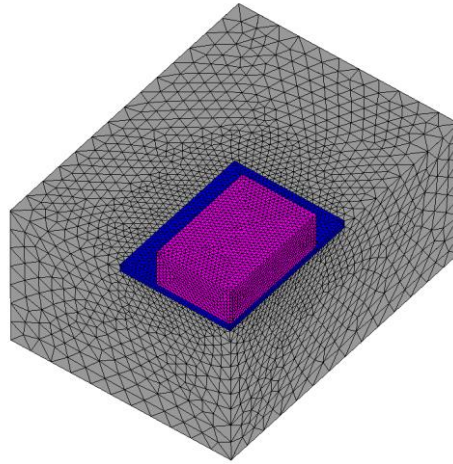


Figura 5. Características da geometria e malha de elementos finitos.

No problema térmico para as superfícies externas de concreto e da rocha foi considerada troca de calor por convecção com coeficiente pelicular $h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 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, as demais propriedades foram consideradas de acordo com a Tab. 7.

Tabela 7. Propriedades do concreto de referência utilizado

Propriedade	Concreto referência	Base	Solo
$k \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1,90	1,90	2,00
$C_e \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$	908,00	908,0	1050,0
$\frac{Ea}{R} \text{ (K)}$	4000	4000	-
$\alpha \text{ (K}^{-1})$	$11,56 \times 10^{-6}$	$11,56 \times 10^{-6}$	$11,00 \times 10^{-6}$
$E \text{ (GPa)}$	37,5	26,0	50,0
ξ_0	0,10	-	-
$\tau_{w,\infty} \text{ (dias)}$	1,00	-	-

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 8, e nos campos de fissuração relacionados à simulação dos 7 primeiros dias de evolução da reação de hidratação do concreto, e consequentemente, de sua elevação de temperatura para os 8 casos estudados além da simulação do experimento de referência .

Tabela 8. Variação do resultado obtido pelas simulações

Descrição da simulação	Variação da EF (%)
Módulo de elasticidade REF-20%	-22,75
Módulo de elasticidade REF+20%	12,24
Resistência à tração REF-20%	18,44
Resistência à tração REF+20%	-29,90
Coeficiente de Poisson REF-20%	-46,64
Coeficiente de Poisson REF+20%	20,86
Coeficiente de dilatação térmica REF-20%	-38,96
Coeficiente de dilatação térmica REF+20%	16,31

A segunda parte da visualização dos resultados está apresentada nas Figuras 6 até 18, onde comparam-se os resultados de fissuração obtidos pelo modelo termoquímico-mecânico do experimento de referência com os experimentos realizados variando-se, respectivamente, os parâmetros de módulo de elasticidade, resistência à tração, coeficiente de Poisson e coeficiente de dilatação térmica, por seus respectivos desvios de 20% para menos e para mais.

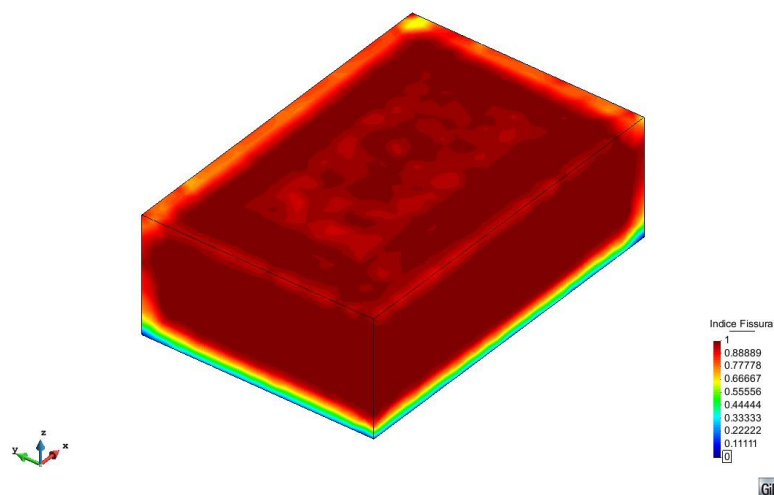


Figura 6. Índice de fissuração dos elementos da simulação de referência.

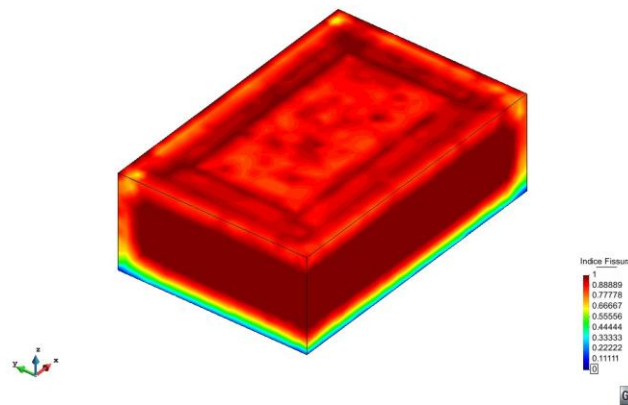


Figura 7. Índice de fissuração dos elementos para variação no módulo de elasticidade (Ref. -20%).

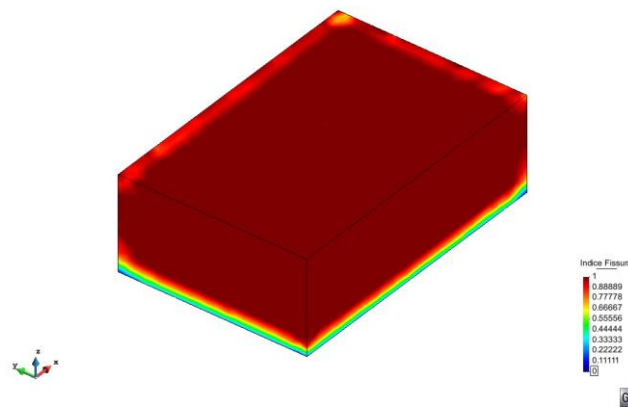


Figura 8. Índice de fissuração dos elementos para variação no módulo de elasticidade (Ref. +20%).

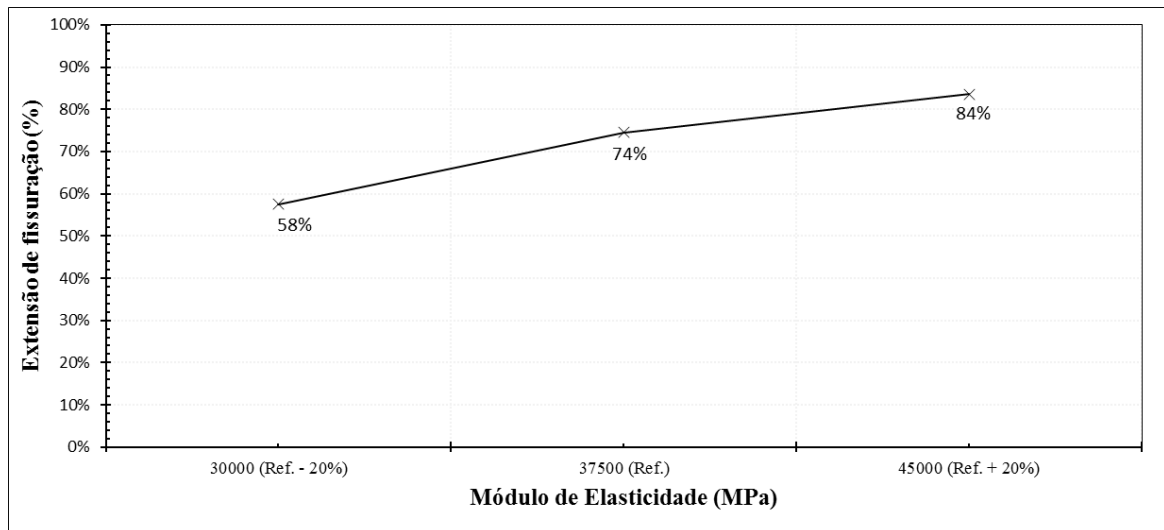


Figura 9. Comparativo da extensão de fissuração para variação no módulo de elasticidade.

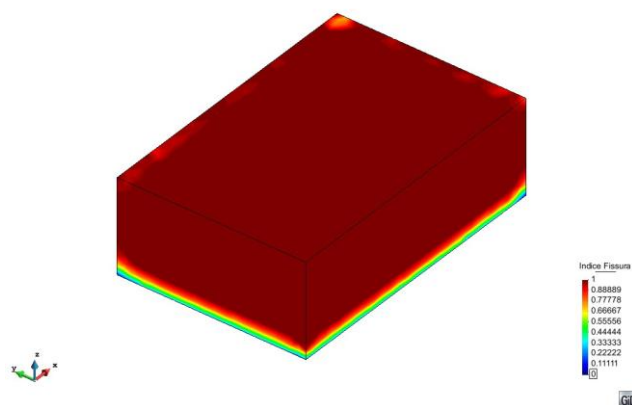


Figura 10. Índice de fissuração dos elementos para variação na resistência à tração (Ref. -20%).

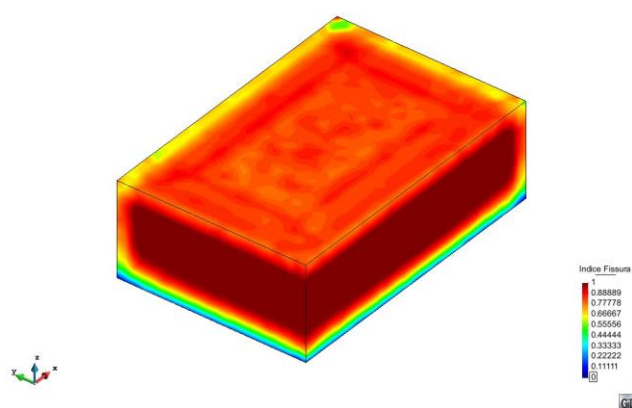


Figura 11. Índice de fissuração dos elementos para variação na resistência à tração (Ref. +20%).

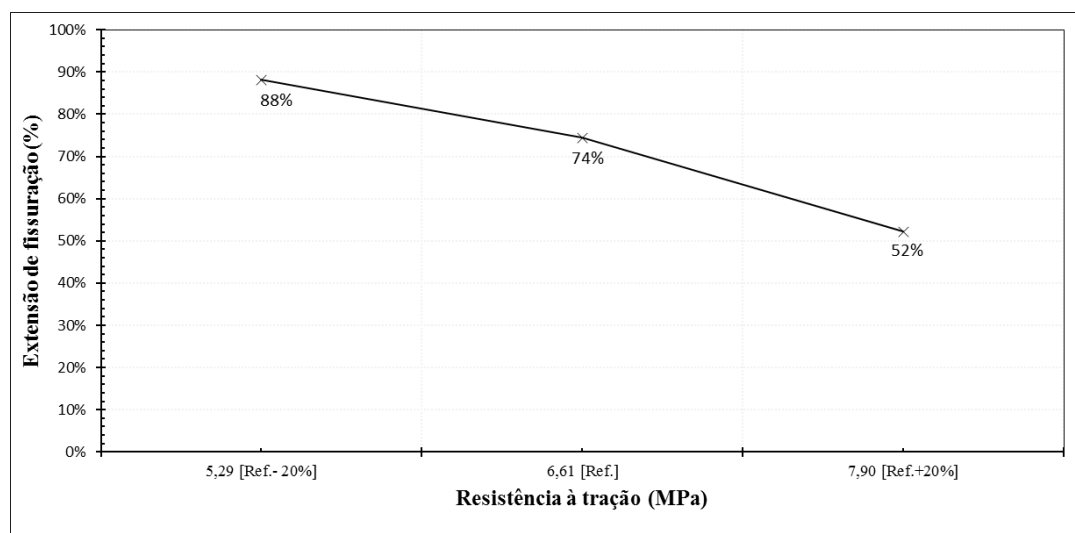


Figura 12. Comparativo da extensão de fissuração para variação na resistência à tração.

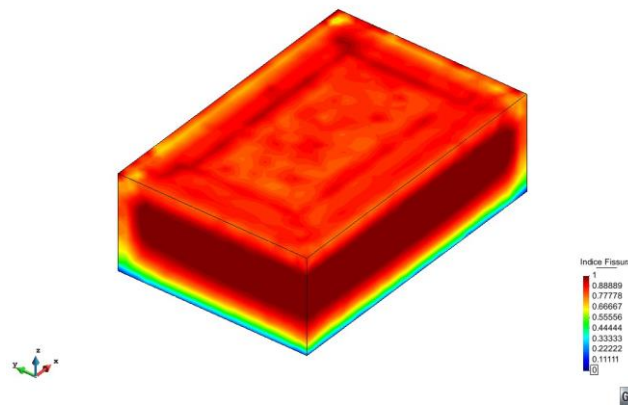


Figura 13. Índice de fissuração dos elementos para variação no coeficiente de Poisson (Ref. -20%).

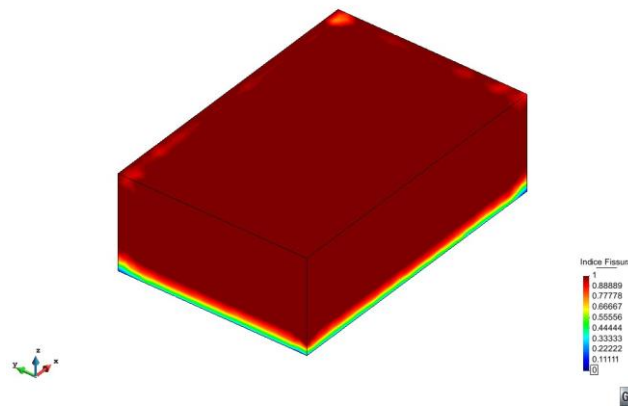


Figura 14. Índice de fissuração dos elementos para variação no coeficiente de Poisson (Ref. +20%).

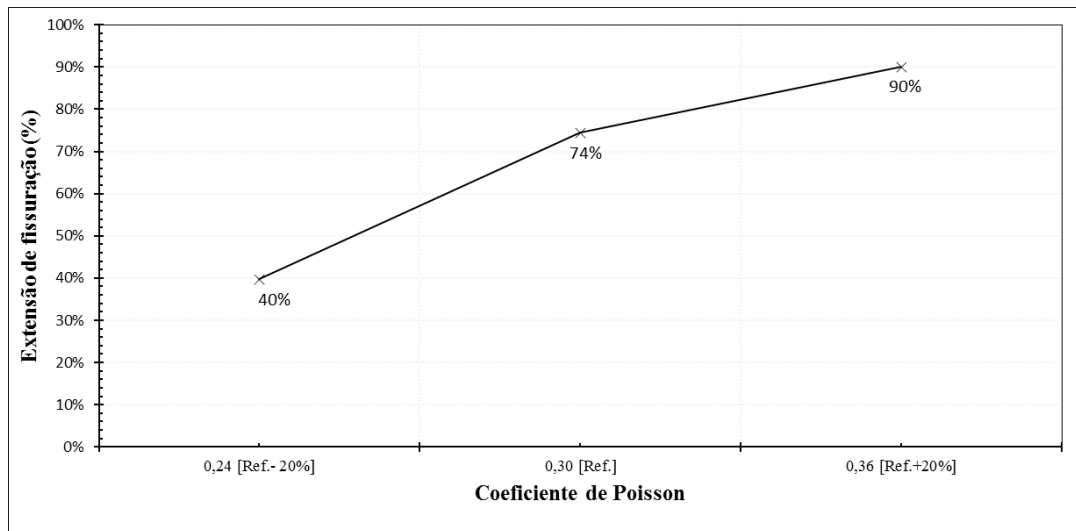


Figura 15. Comparativo da extensão de fissuração para variação no coeficiente de Poisson.

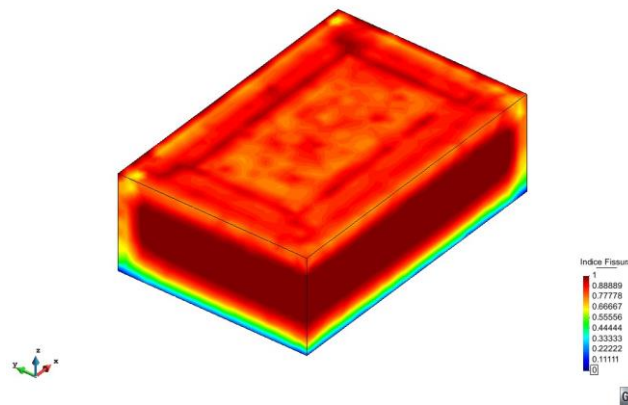


Figura 16. Índice de fissuração dos elementos para variação no coeficiente de dilatação térmica (Ref. - 20%).

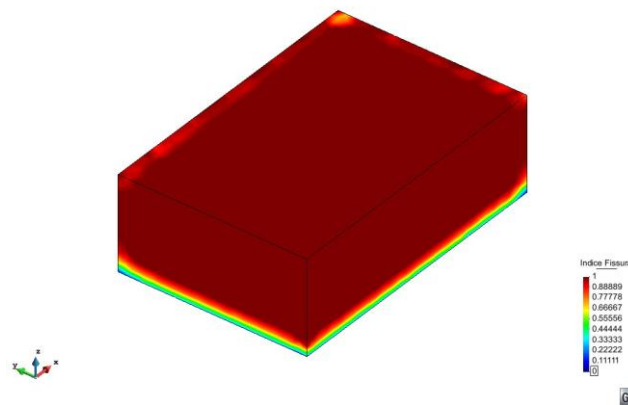


Figura 17. Índice de fissuração dos elementos para variação no coeficiente de dilatação térmica (Ref. +20%).

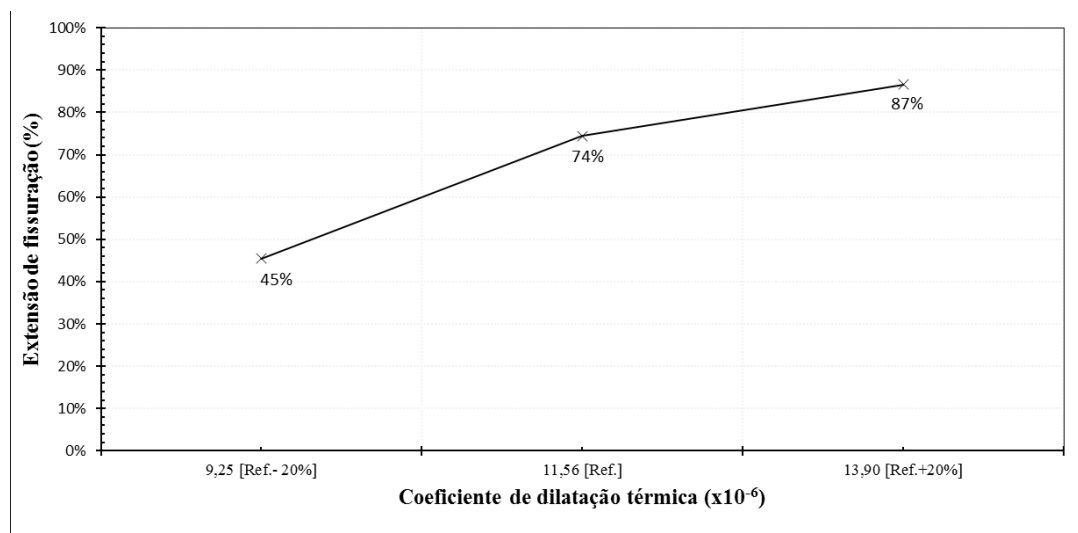


Figura 18. Comparativo da extensão de fissuração para variação no coeficiente de dilatação térmica.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no estudo permitem verificar o comportamento de fissuração da estrutura para perturbações controladas dos valores de alguns parâmetros do modelo.

A utilização de um modelo computacional é peça fundamental para análise de estruturas de concreto massa, a fim de identificar o aparecimento de fissuras, devido às tensões geradas pela variação de temperaturas, e eventuais patologias por concretagens em altas temperaturas.

A análise de influência realizada no estudo permite verificar que o parâmetro de maior influência no modelo é o coeficiente de Poisson. As simulações com variação deste fator, apresentaram a maior quantidade de elementos fissurados quando comparadas ao modelo de referência, apresentando também, o maior e o menor valor de absoluto de elementos fissurados de todas as simulações.

O coeficiente de dilatação térmica apresenta variações semelhantes às descritas sobre o coeficiente de Poisson.

As simulações que apresentam as menores variações são aquelas associadas às perturbações no módulo de elasticidade.

Observou-se também, que a variação da resistência à tração, diferente dos demais parâmetros, gera mais elementos fissurados quando os valores adotados são inferiores quando comparados aos de referência. Além disso, percebe-se que a variação dos elementos fissurados para as duas simulações não é linear.

Cabe ressaltar que os resultados expostos nesse artigo se referem à uma análise inicial dos dados disponíveis, dessa forma, estudos mais aprofundados e complexos como os descritos na metodologia serão realizados, isto é, variando-se mais de um parâmetro por vez e avaliando a influência dos tais. Além disso, deverão ser analisados em conjunto o estudo de sensibilidade dos parâmetros térmicos realizado por Fraga (2016) permitindo assim, estudo mais eficaz e completo sobre o tema.

REFERÊNCIAS

- Adriolo, F. R., & Skwarczynski, M. T., 1988. *Concreto pré refrigerado no Brasil: uma evolução com mais de 20 anos*.
- Almeida, R. G, Filho, 2006. *Planejamentos fatoriais fracionados para análise de sensibilidade de modelos de simulação de eventos discretos*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá.
- Azenha, M. A. D.; *Numerical Simulation of The Structural Behaviour of Concrete Since Its Early Ages*. 379 f. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Porto: 2009.
- De Faria, E. F., 2004. *Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- 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 & Structures, 82, 281-299
- Fairbairn, E. M. R., Toledo Filho, R. D., Silvos, M. M., Silva, E. F., 2009. *Fissuração do concreto a poucas idades modelagem mecânica, numérica e experimental*. Projeto COPPETEC – PEC 7430
- Ferreira, I. A., 2008. *Solução em Paralelo de um Modelo Termo-Químico-Mecânico Para Concreto Jovens*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Ferreira, N. S. S., 2011. *Análise de sensibilidade em estruturas lamelares*. 21º POSMEC, Universidade Federal de Uberlândia
- Fraga, I. A., 2016. *Análise de sensibilidade do modelo termoquímico-mecânico*. XXXVII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2016
- LEWIS, C. D. Demand Forecasting and Inventory Control. New York: Wiley, 1997.
- Rita, M. R., Fairbairn, E. M. R., Ribeiro, F. L. B., 2015. *Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto massa em ambiente paralelo*. CILAMCE 2015.
- Silvos, M. M., 2003. *Otimização da Fase Construtiva de Estruturas de Concreto em Face dos Efeitos da Hidratação Via Algoritmos Genéticos*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Šmilauer V. and Krejčí T. (2009). *Multiscale model for temperature distribution in hydrating concrete*. International Journal for Multiscale Computational Engineering 7(2):135-151.
- Ulm, F. J., & Coussy, O., 1995. *Modeling of thermochemomechanical couplings of concrete at early ages*. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), pp. 785–794.
- 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.
- 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