



Utilização do Método dos Elementos Finitos no Estudo Térmico de Elementos Simples de Concreto

Denilson da Silva Vieira¹, Nailde de Amorim Coelho¹

¹Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) – Campus Juazeiro – BA – Brasil

denilsonvieirape@gmail.com, nailde.eng@gmail.com

Abstract. *The structural elements are constantly under the influence of thermal variations resulting from phenomena such as conduction, convection, irradiation and heat generation, making it necessary to know the temperature distribution in different bodies. It is the case of concrete bodies that, when subject to temperature differences, can undergo changes, such as expansion and retraction, which can change their initial resistance and, consequently, their durability. The objective of the study was to evaluate the thermal variation using the Finite Element Method – FEM using the ANSYS WORKBENCH software, which has a great potential to be used in engineering to solve the problems of heat transfer and stress analysis in concrete structures and sealing masonry. Thus, this work presents thermal variations collected on the wall of a chimney and on a concrete block, both in static and transient states, considering the characteristics of each material, its thermal conductivity, specific heat and mass, thermal expansion coefficients and its conditions initials and outlines. The data of the applications under study were compared with the analytical solutions for their validation, as well as with other results from the literature, in order to contribute to the scientific production already existing in the area. The results found showed to be in accordance with the expected in relation to the use of FEM in the thermal applications analyzed.*

Keywords: Concrete; FEM; Temperature; Heat transfer; ANSYS.

Resumo. *Os elementos estruturais estão constantemente sob a influência de variações térmicas decorrentes de fenômenos como condução, convecção, radiação e geração de calor, tornando necessário o conhecimento da distribuição de temperatura em diferentes corpos. Este é o caso dos corpos de concreto que, quando sujeitos a diferenças de temperaturas, podem apresentar mudanças, como dilatação e retração, as quais podem alterar sua resistência inicial e, conseqüentemente, sua durabilidade. O objetivo do estudo consistiu em avaliar a variação térmica através do Método dos Elementos Finitos – MEF com a utilização do software ANSYS WORKBENCH, que possui um grande potencial de ser empregado na engenharia para a solução dos problemas de transferência de calor e análise de tensões em estruturas de concreto e alvenarias de vedação. Assim, este trabalho apresenta variações térmicas coletadas na parede de uma chaminé e em um bloco de concreto, ambas nos estados estático e transiente, considerando as características de cada material, sua condutividade térmica, calor e massa específicos, coeficientes de dilatação térmicos e suas condições iniciais e de contornos. Os dados das aplicações em estudo foram comparados com as soluções analíticas para validação dos*



mesmos, bem como com outros resultados da literatura, de forma a contribuir com a produção científica já existente na área. Os resultados encontrados mostraram-se de acordo com o esperado em relação à utilização do MEF nas aplicações térmicas analisadas.

Palavras-chave: Concreto; MEF; Temperatura; Transferência de Calor; ANSYS.

1. Introdução

O estudo da transferência de calor é de grande importância para vários ramos da engenharia uma vez que, através de fenômenos como os de condução, convecção, radiação e geração de calor, é possível entender a transferência de energia térmica decorrente de uma diferença de temperatura entre os corpos (REDDY; GARTLING, 2010; XUE et al., 2013; ROMÃO, 2016). Quando os corpos são submetidos a uma variação de temperatura provocada por esses fenômenos, a capacidade de manutenção estrutural fica comprometida, ocasionando danos estruturais como baixa resistência e trincas em idade precoce (BRIFFAUT et al., 2012).

É conhecido que o concreto é um dos materiais mais utilizados em construções de engenharia civil e isso acontece devido à sua alta resistência, durabilidade e disponibilidade (KANEMA et al., 2007). O processo de transferência de calor é afetado por condução e convecção quando o concreto é submetido a uma alta variação de temperatura, onde as propriedades mecânicas são afetadas por apresentarem incompatibilidade dos coeficientes de expansão térmica dos seus constituintes e do gradiente de temperatura gerado através da seção (AL FADUL; MACKIE, 2018; FU et al., 2007). Quando aplicamos uma análise em regime transiente, esses são os fenômenos da transferência de calor que mais interferem no processo de comportamento térmico.

Prever o comportamento dos elementos estruturais quando submetidos a uma variação de temperatura é uma tarefa desafiadora, mesmo existindo vários trabalhos e projetos de pesquisa com a utilização do Método dos Elementos Finitos – MEF sendo aplicado em elementos de concreto simples, concreto massa e concreto de alto desempenho, todos eles em diferentes geometrias, condições iniciais e de contornos, submetidos a variação de temperatura e em análises estáticas e transientes, como os de Silva et al. (2019); Batista e Coelho (2018); Coelho (2016); Almeida, Coelho e Pedroso (2016); Maximiano et al. (2015); Hickmann et al. (2015); Coelho et al. (2014) e Kavamura et al. (2004). O MEF se mostra bastante interessante, podendo ser utilizado de forma eficiente na determinação do campo de temperaturas em estruturas com geometria e condições de contorno complexas (KRÜGER, 2001).

As simulações nas análises estacionárias e transitórias dos casos aplicados neste trabalho foram feitas através do software *ANSYS WORKBENCH*, uma ferramenta muito poderosa, com uma grande biblioteca que utiliza o MEF para várias finalidades, entre elas a análise térmica. O MEF proporciona informações completas e capacidade de simulações realistas, sendo que o software fornece uma interface gráfica simples, documentações e material de referência (SORIANO; LIMA, 1999).

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise metódica e concisa sobre o comportamento térmico e a distribuição de temperatura em elementos simples de concreto. Foi utilizado para este fim o Método dos Elementos Finitos e o software *ANSYS WORKBENCH* que permitem, com precisão e confiabilidade, prever como será o



desempenho de elementos estruturais e dessa maneira contribuir com a otimização de projetos em geral.

2. Referencial Teórico

Sabe-se que transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura provocada pelos fenômenos de condução, convecção, irradiação e geração de calor. O termo condução se refere à transferência de calor quando existe um gradiente de temperatura em um meio, podendo esse ser sólido ou fluido (BERGMAN et al., 2011), enquanto a convecção é o processo de transporte de calor proporcionado pelo fluxo dos fluidos (BEJAN, 2013) e a irradiação é a distribuição de temperaturas do sol (HOWELL; MENGÜÇ; SIEGEL, 2015). Quando se faz uma análise interna nos elementos estudados, a conversão de calor é denominada geração de calor.

Os problemas de transferência de calor são classificados em regimes estático e transiente. Um sistema encontra-se em regime estático quando as condições térmicas (temperatura e fluxo de calor) não variam ao longo do tempo mesmo tendo atingido o equilíbrio, diferente do estado transiente no qual o tempo é determinante para o resultado (ORDENES; LAMBERTS; GÜTHS, 2008).

O MEF é um método numérico bastante utilizado em problemas de transferência de calor, pois apresenta uma base sólida nos princípios variacionais e atualmente é a abordagem numérica com resultados mais confiáveis (LIU, 2008). Segundo Pepper e Heinrich (2017), esse método reduz os problemas definidos no espaço geométrico para encontrar uma solução em um número finito de pontos subdivididos em regiões menores denominadas malhas, aplicando para isso equações conhecidas.

2.1. Equação Geral da Condução de Calor em Sólidos

É possível identificar os processos de transferência de calor em termos de equações e taxas apropriadas (INCROPERA et al, 2008). Dessa forma, a distribuição de temperaturas é governada pela equação do calor (Equação 1):

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

Onde:

\dot{q} = geração de calor em função do tempo;

$\alpha = k/\rho c$ = difusividade térmica do material e representa a rapidez da propagação do calor;

k = condutividade térmica do material;

ρ = massa específica;

c = calor específico;

$\partial T/\partial t$ = variação da temperatura com o tempo;

$\nabla^2 T$ = gradiente térmico.



2.2. Problema Estático Unidimensional

A distribuição de temperaturas pode ser determinada através da solução da equação do calor com as condições de contorno (INCROPERA et al., 2008). Para condições de regime estacionário, sem geração de energia e sendo a condutividade térmica do material considerada constante, a Equação de Laplace (Equação 2) pode ser integrada duas vezes obtendo-se a Equação 3.

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2)$$

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (3)$$

Definindo as condições de contorno para $x = 0$, tem-se (Equação 4):

$$T_1 = C_2 \quad (4)$$

Analogamente, para $x = L$ (Equação 5):

$$T_2 = C_1 L + C_2 = C_1 L + T_1 \quad (5)$$

Substituindo na solução geral, a distribuição de temperatura para os problemas estáticos unidimensionais seria (Equação 6):

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1 \quad (6)$$

Em que L é o comprimento, $T(0) = T_1$ e $T(L) = T_2$.

2.3. Problema Transiente Unidimensional

As soluções analíticas de problemas de condução transiente tipicamente envolvem séries infinitas e, portanto, a avaliação de um número infinito de termos para determinar a temperatura em uma determinada posição e momento (ÇENGEL, 2009). Para condições de regime transitório, em que não apresenta geração de calor interna, pode-se desenvolver a Equação 17 a partir de tratamento matemático da Equação de Fourier (Equação 7) para os problemas de uma barra uniforme de comprimento L e com temperatura fixa nas extremidades (COELHO et al., 2014):

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Para condições de contorno $T(0, t) = 0$, $T(L, t) = 0$, condição inicial $T(x, 0) = f(x)$, $\delta^2 = k/\rho c$ e após a aplicação do método de separação de variáveis temos (Equação 8):

$$X'' - \lambda X = 0 \quad (8)$$

Substituindo $\lambda = n\pi/L$, tem-se a primeira parte (Equação 9) da equação final:

$$X_n(x) = A_n \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi}{L} x \right) \quad (9)$$

A segunda parte da equação final considera para $\lambda^2 < 0$ (Equação 10):

$$\dot{t} = -\tau \lambda^2 \delta^2 \quad (10)$$



Sendo $\mu = \delta n\pi/L$, tem-se (Equação 11):

$$\dot{\tau} + \mu^2\tau = 0 \quad (11)$$

A partir disso, a equação característica para a Equação Diferencial Ordinária (EDO) é dada por (Equação 12):

$$\tau_n(t) = B_n e^{-\mu^2 t} \quad (12)$$

Sendo $T(x, t) = X(x)\tau(t)$, tem-se que (Equação 13):

$$T(x, t) = A_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot B_n e^{-\mu^2 t} \quad (13)$$

Como A_n e B_n são constantes, então $A_n \cdot B_n = a_n$ e é possível afirmar que (Equação 14):

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot e^{-\mu^2 t} \quad (14)$$

Como visto em Laplace (Equação 15):

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \quad (15)$$

Por fim (Equação 16):

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{L} \int_0^L \left(f(x) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot e^{-\mu^2 t} \quad (16)$$

Para condições de contorno $T(0, t) = T_1$ e $T(L, t) = T_2$ e condição inicial $u(x, t) = f(x) - T_E(x)$, tem-se a equação geral da distribuição de temperatura para os problemas em regime transitório unidimensionais (Equação 17):

$$T(x, t) = T_E(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{L} \int_0^L [f(x) - T_E(x)] \operatorname{sen}\frac{n\pi x}{L} dx \operatorname{sen}\frac{n\pi x}{L} e^{-\delta^2 \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t} \quad (17)$$

Onde $T_E(x)$ é dada pela Equação de Laplace unidimensional.

3. Materiais e Métodos

3.1. Ferramenta Computacional

Para a elaboração deste trabalho foi utilizada a ferramenta computacional *ANSYS WORKBENCH* na versão 15.0. Com esse software foi possível, por meio do Método dos Elementos Finitos, obter a simulação da variação de temperatura e em seguida os resultados foram validados com soluções analíticas e com outras referências da literatura.

3.2. Bloco de Concreto

A aplicação consiste em determinar a variação da temperatura nos estados estático e transiente de um bloco de concreto nas dimensões de 1,0 m x 0,3 m x 0,1 m, massa

específica de 2300 Kg/m^3 , coeficiente de dilatação $7,07 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, calor específico $1000 \text{ J/Kg.}^\circ\text{C}$ e condutividade térmica de $1,79 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$. A condição inicial de temperatura ambiente é de 0°C e a temperatura varia no intervalo de tempo de 172800 s (tempo necessário para que o bloco de concreto chegue ao equilíbrio térmico) para o estado transiente. As condições de contorno e dimensões estão representadas na Figura 1, sendo a temperatura à esquerda de 0°C e à direita de 300°C .

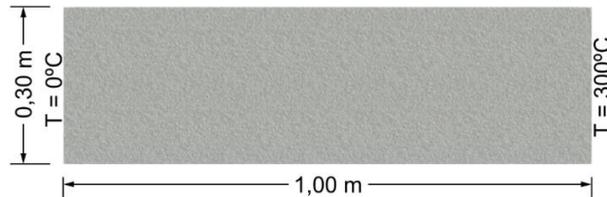


Figura 1. Ilustração da seção do bloco de concreto.

3.3. Parede de uma Chaminé

Neste caso, a variação da temperatura está sob efeito da convecção, simulação em 3D com profundidade de $0,01 \text{ in}$, análise bidimensional e nos estados estático e transiente. Os parâmetros fornecidos por Moaveni (1999) consistem em uma chaminé construída com dois materiais diferentes: a camada interna de concreto com condutividade térmica $k = 0,07 \text{ Btu/hr.in.}^\circ\text{F}$ e a camada externa de alvenaria com uma condutividade térmica $k = 0,04 \text{ Btu/hr.in.}^\circ\text{F}$. A condição inicial de temperatura ambiente é de 0°C e a temperatura varia no tempo de 172800 s para o estado transiente. As condições de contorno, dimensões e os trechos de interesse marcados em verde (I), vermelho (II) e azul (III) estão representados na Figura 2.

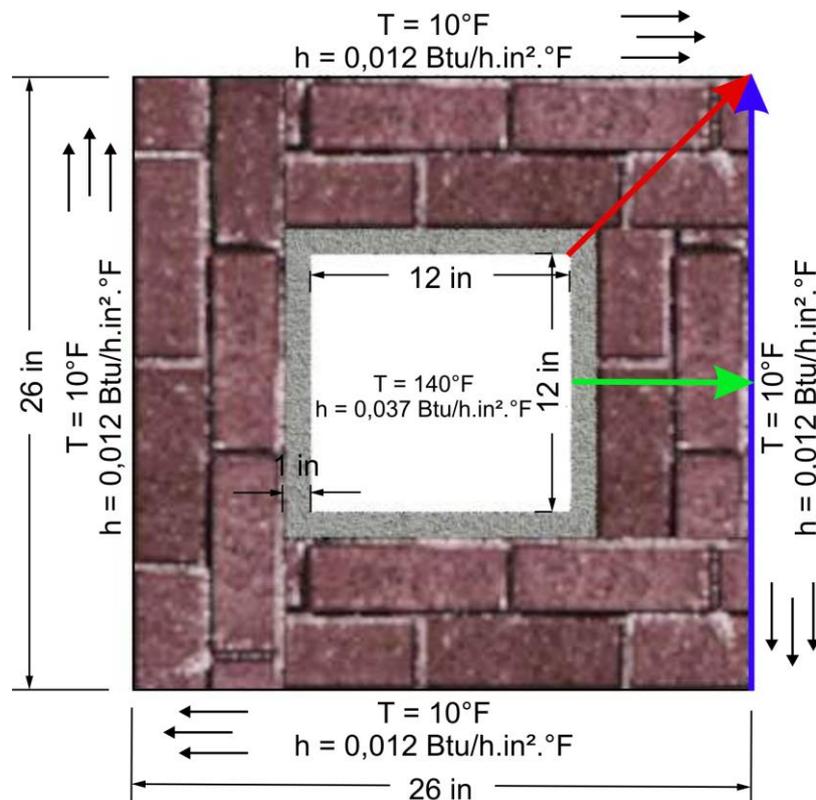


Figura 2. Ilustração da seção da parede de uma chaminé (Adaptado de MOAVENI, 1999).

4. Resultados e Discussões

O entendimento e aplicação das equações e conceitos de forma correta e nos estados ideais possibilita trabalhar através de soluções analíticas e, ao comparar com os dados que o software oferece, analisar o quão próximos ou diferentes os valores são. Quando os resultados são satisfatórios, é possível supor que em casos reais, com as mesmas condições e materiais, os resultados finais serão similares.

4.1. Bloco de Concreto

Para o primeiro caso foi possível através do *ANSYS WORKBENCH* verificar o comportamento da variação da temperatura no estado estacionário (Figura 3) com um processamento de dados de 1,0 s e a variação da temperatura no estado transiente com um processamento de dados de 172800 s (Figura 6).

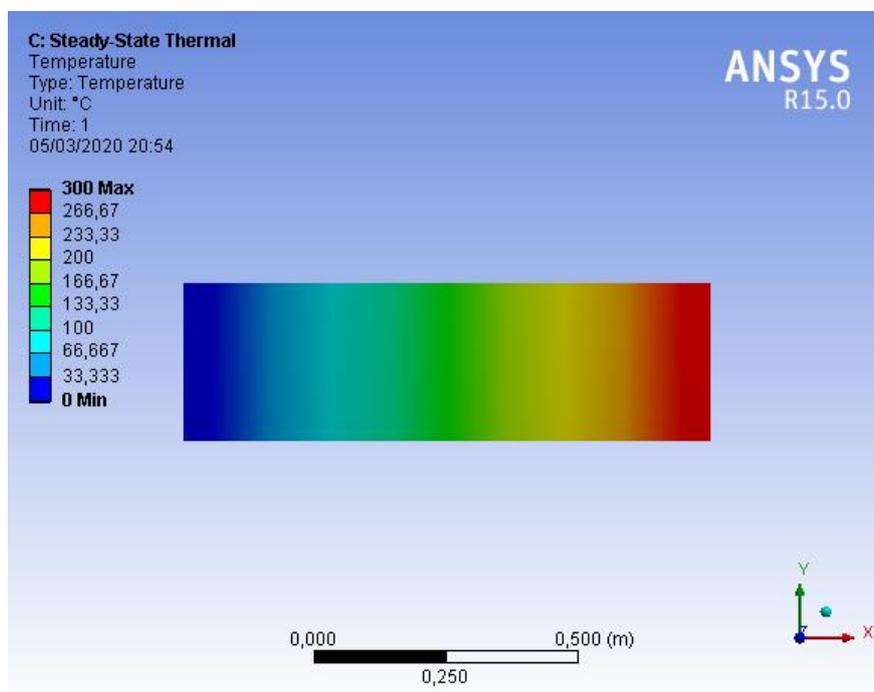


Figura 3. Resultados do *ANSYS WORKBENCH* para o bloco de concreto no estado estacionário.

Em ambos os casos, as malhas foram no formato hexaédrico com oito nós, cada malha adotada de 0,05 (Figura 4) e com o bloco de concreto composto por 1533 nós e 240 elementos. Essas informações foram suficientes para que os valores fornecidos pelo software fossem mais próximos possível dos resultados analíticos que são tidos como valores de referência, equivalentes aos valores obtidos analiticamente.

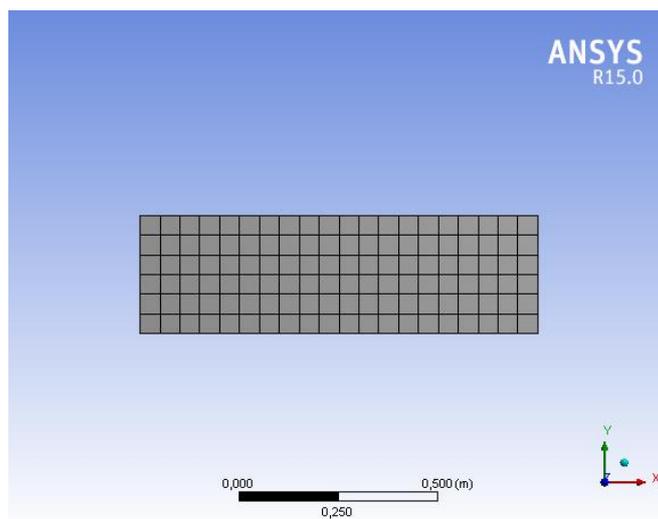


Figura 4. Malha utilizada para as análises.

Para a validação dos resultados, estes foram comparados aos resultados analíticos da Equação 6. Os resultados representam a variação da distribuição da temperatura no interior do concreto e foram obtidos levando em consideração as propriedades térmicas do concreto, principalmente, a condutividade térmica. Observando a Figura 5 é possível perceber que os valores de temperatura do software são equivalentes aos resultados obtidos analiticamente, o que demonstra a confiabilidade dos resultados.

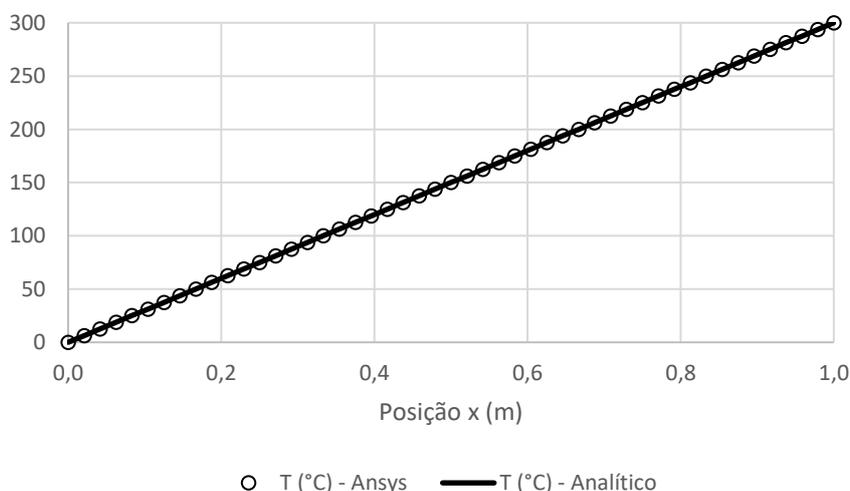


Figura 5. Comparação entre o resultado analítico e do **ANSYS WORKBENCH** para o bloco de concreto no estado estacionário.

Para o caso do bloco de concreto no estado transiente, a Figura 6 mostra a distribuição de temperaturas, que se apresenta de acordo com o esperado, ou seja, representa um aquecimento gradual da temperatura à medida que se distancia da esquerda para a direita em um intervalo de tempo de 172800 s. Com esse intervalo de tempo, após o calor ser transferido das regiões de temperaturas elevadas para as mais baixas, foi possível chegar a uniformidade da distribuição das temperaturas ao longo do bloco de concreto, ficando este em equilíbrio térmico.

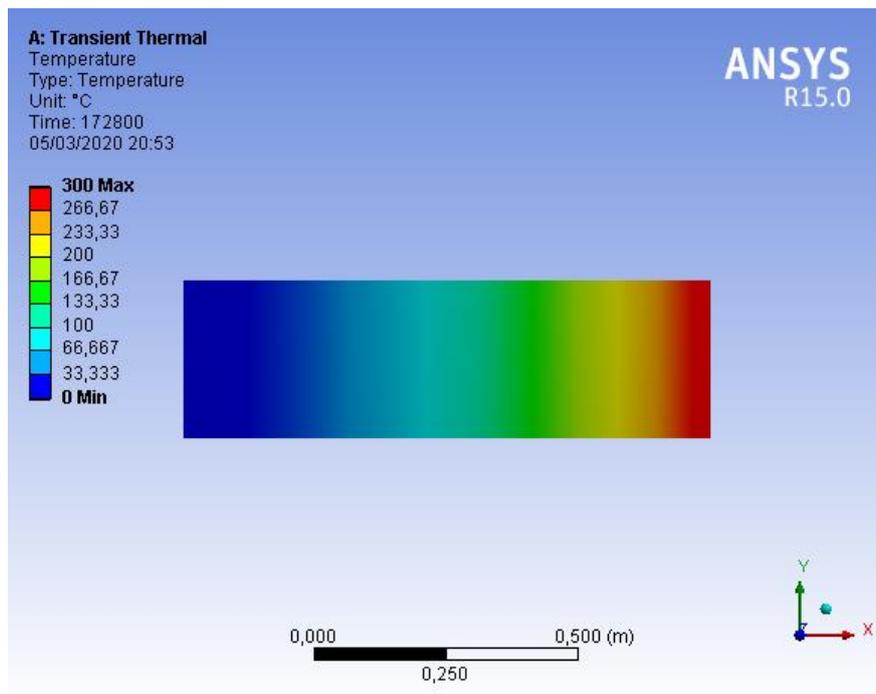


Figura 6. Resultados do ANSYS WORKBENCH para o bloco de concreto no estado transiente.

Para validação dos resultados, os dados analíticos obtidos através da Equação 17 foram comparados com os valores da variação de temperatura do MEF e, de acordo com a Figura 7, mostraram-se equivalentes.

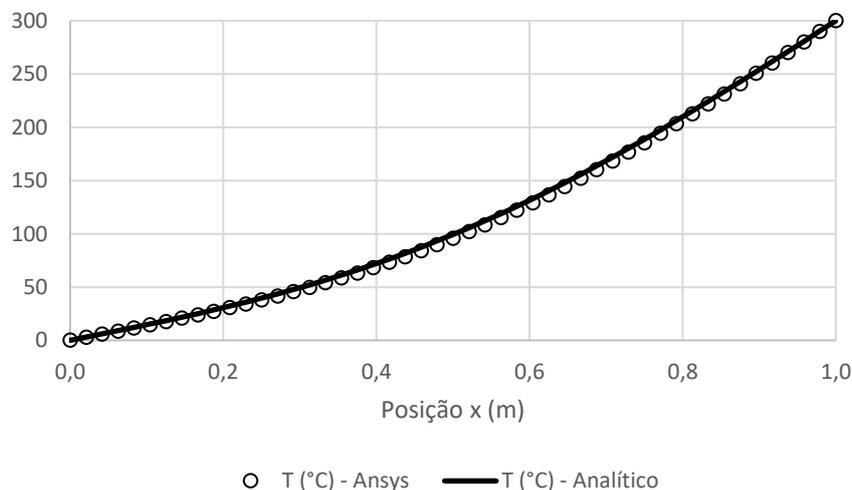


Figura 7. Comparação entre o resultado analítico e do ANSYS WORKBENCH para o bloco de concreto no estado transiente.

Ao comparar os dois casos de blocos de concreto analisados neste trabalho, é perceptível que nas extremidades as temperaturas das condições de contorno prevalecem, 0°C e 300°C. No entanto, diferente do estado estático, o estado transiente apresenta variação da temperatura de uma forma exponencial. Neste, a taxa de transferência de calor através do corpo altera-se consideravelmente em relação à posição no interior do elemento e à variação do tempo em uma mesma posição, demonstrando que em algumas

partes as temperaturas no estado transiente são mais baixas que no estado estático devido à variação da posição e do tempo.

4.2. Parede de uma Chaminé

Neste caso, os resultados foram comparados com dados de outros trabalhos, sendo possível obter informações de três métodos diferentes para avaliar o comportamento da parede dessa chaminé – o *ANSYS ADPL*, o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o *ANSYS WORKBENCH*. Foram aplicadas, nos três estudos, as mesmas condições de contorno, condições iniciais e propriedades térmicas dos materiais.

A chaminé foi estudada nos estados estático e transiente. Nos dois casos, em relação aos materiais, temos a alvenaria com 1144 nós e 132 elementos e o concreto com 360 nós e 30 elementos, bem como a malha de 0,05 (Figura 8).

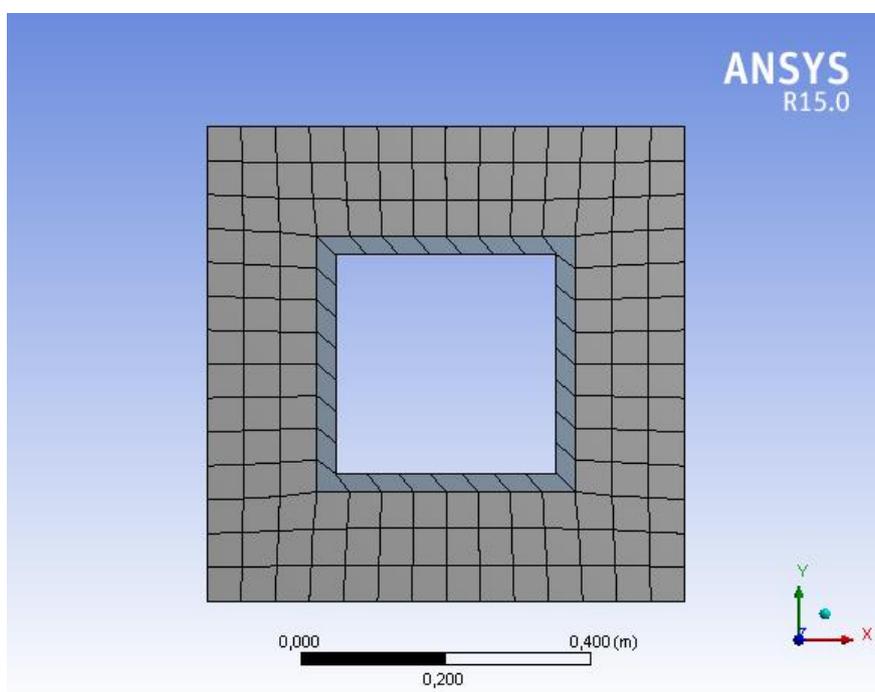


Figura 8. Malha utilizada para as análises.

Para validação dos resultados, no estado estático, foram comparadas as temperaturas máxima e mínima do MEF com os trabalhos de Batista e Coelho (2018) no estudo térmico em elementos de concreto com a utilização do MDF e Moaveni (1999) em análises e aplicações de elementos finitos no *ANSYS APDL* conforme a Tabela 1. Pode-se notar que os resultados obtidos nos três métodos se encontram bem próximos, o erro relativo evidencia a semelhança entre os valores obtidos.

Tabela 1. Comparação entre os resultados obtidos para a parede de uma chaminé no estado estático.

	Temperaturas (°C)			
	Mínima	Erro Relativo (%)	Máxima	Erro Relativo (%)
AUTORES	-6,7998	-	51,483	-
MOAVENI (1999)	-6,7350	0,96	51,483	0
BATISTA e COELHO (2018)	-6,1122	11,25	48,228	6,75

Além disso, pode-se verificar que as soluções numéricas obtidas pelo MDF em relação aos valores da variação térmica máxima e mínima estão bastante próximas, com uma diferença irrisória dos valores obtidos com a utilização do MEF. Mesmo com os valores do erro relativo, nas temperaturas mínima com 11,25% e máxima com 6,75%, os dois métodos mostraram-se bastante aceitáveis no estudo do comportamento de variação de temperatura em diversos elementos.

Para o caso transiente, os resultados mostram a variação térmica no processamento em um tempo 172800 s, que corresponde a dois dias de operação. Observa-se que a distribuição das temperaturas (Figura 9) chega ao equilíbrio estático. É possível perceber que os valores das temperaturas mínima e máxima estão próximos aos valores obtidos pelos *ANSYS WORKBENCH* (Tabela 1), com uma diferença de 0,123°C para a temperatura máxima e 0,1535°C para a mínima, considerando os valores estáticos.

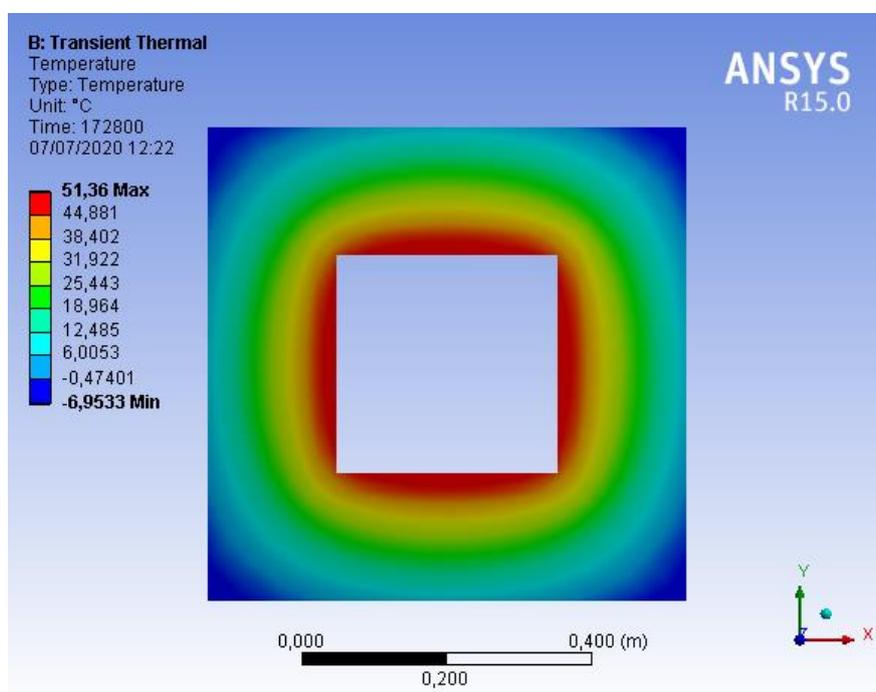


Figura 9. Resultados do ANSYS WORKBENCH para a parede de uma chaminé no estado transiente.

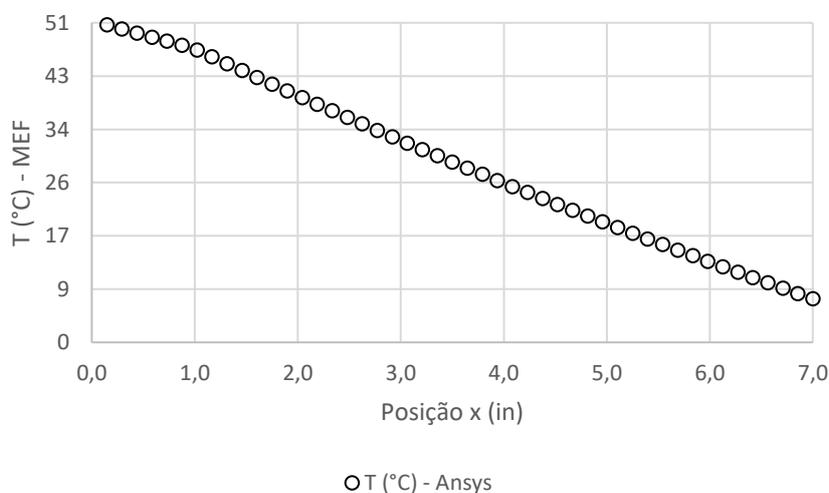
Para o caso da parede de uma chaminé que se encontra no estado transiente e no intervalo de tempo de 1728 s a 172800 s, nota-se uma diminuição de temperatura mínima de -3,9685°C para -6,9533°C e um aumento de temperatura máxima de 25,784°C para 51,36°C (Tabela 2), sendo possível chegar próximo às temperaturas de estabilidade do estado estático no tempo de 432000 s. Bem como, é perceptível que com o passar do tempo, para esse caso no estado transiente, menor será a temperatura mínima e maior a temperatura máxima até que as temperaturas se estabilizarem.

Tabela 2. Resultados obtidos para a parede de uma chaminé no estado transiente.

Tempo (s)	Temperaturas (°C)	
	Mínima	Máxima
1728	-3,9685	25,784
2479,5	-4,8685	30,177
3231	-5,4636	32,931
5485,5	-6,4886	37,212
11602	-7,7954	42,133
20370	-8,5667	45,374
33989	-8,7625	47,700
51269	-8,4922	49,175
68549	-8,1126	50,012
85829	-7,7666	50,524
103110	-7,4916	50,848
120390	-7,2863	51,060
137670	-7,1383	51,199
154950	-7,0337	51,292
163870	-6,9894	51,330
172800	-6,9533	51,360

Os trechos I, II e III analisados conforme Figura 2, têm o objetivo de avaliar o comportamento da variação de temperatura no concreto e na alvenaria no tempo de 172800 s. Os resultados mostram a capacidade da ferramenta computacional em simular o comportamento térmico com detalhes que dificilmente poderiam ser obtidos por técnicas experimentais. No trecho I (Figura 10), percebe-se que houve uma redução na temperatura de 51,36°C para 6,97°C, evidenciando que quanto mais distante da parte interna, menor a temperatura.

Aqui, bem como o concreto que precisa manter a integridade de suas propriedades mecânicas e suportar essas variações de temperatura sem que ocorram alterações, a alvenaria precisa ser observada cautelosamente, pois as propriedades e dimensões da camada de concreto não são suficientes para que consiga ter uma redução de temperatura na interface concreto-alvenaria.

**Figura 10. Resultados do ANSYS WORKBENCH para a parede de uma chaminé no trecho I.**

O mesmo ocorre com o trecho II (Figura 11), em que também há uma redução de temperatura de $44,48^{\circ}\text{C}$ para $-6,95^{\circ}\text{C}$. Para a elaboração do projeto de uma parede de chaminé têm que estar previstos, a partir de simulações computacionais, o comportamento térmico provocado pela variação de temperatura no intervalo de tempo aplicado até a estabilidade. É preciso observar principalmente as diagonais, pois esses são pontos sensíveis devido ao encontro de paredes, o que os torna suscetíveis a manifestações patológicas por fatores construtivos ou principalmente pela variação térmica.

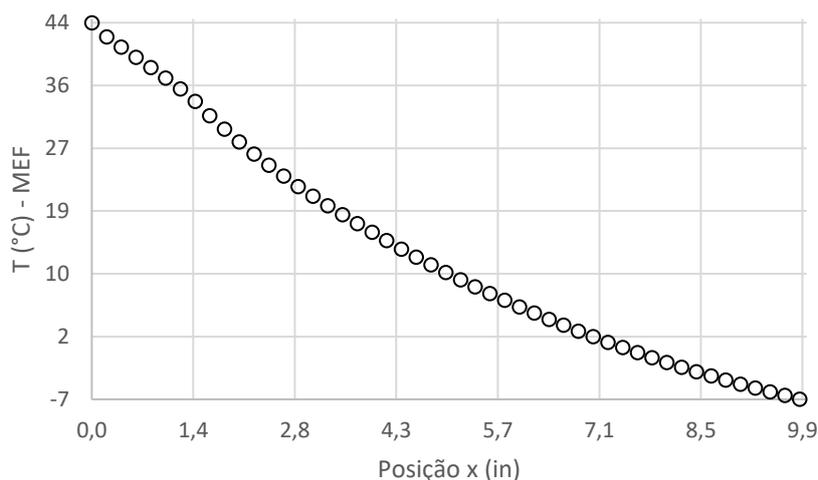


Figura 11. Resultados do ANSYS WORKBENCH para a parede de uma chaminé no trecho I.

Outro fator a ser observado é que a temperatura será menor quanto mais próximo estiver das extremidades externas, o que ocorre no trecho III (Figura 12), que analisa a variação de temperatura de uma extremidade a outra com uma temperatura máxima de $6,97^{\circ}\text{C}$.

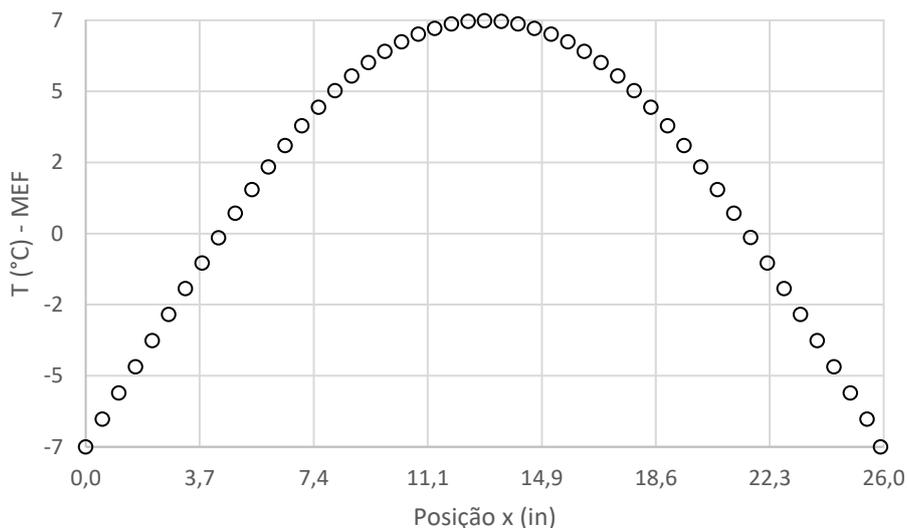


Figura 12. Resultados do ANSYS WORKBENCH para a parede de uma chaminé no trecho III.



5. Conclusões

É de extrema importância ter em mente que qualquer elemento estrutural quando submetido a altas temperaturas passa por alterações em suas propriedades mecânicas. Os materiais precisam ter propriedades que satisfaçam o comportamento térmico durante o intervalo de tempo previsto e sem que ocorra o aparecimento de manifestações patológicas.

Por meio da análise de resultados dos efeitos térmicos nos estados estacionários e transientes e, neste caso, considerando as características do bloco de concreto e da parede de uma chaminé, percebe-se a importância da previsibilidade das variações de temperaturas provocadas pela transferência de calor com o objetivo de evitar tensões térmicas e o comprometimento dos elementos estruturais. A pesquisa buscou estudar duas situações diferentes sendo submetidas aos estados estático e transiente, possibilitando analisar também situações nas quais ocorre uma grande variação de temperatura, como é o caso da parte interna da chaminé em contrapartida com a parte externa. A confiabilidade dos dados apresentados pelo método utilizado, ao analisar diferentes trechos de uma estrutura, permitiu ver até que temperatura o material suportaria em uma situação real.

Os resultados obtidos no *ANSYS WORKBENCH* mostraram-se próximos aos da literatura e das soluções analíticas e, embora as soluções analíticas apresentem-se complexas e difíceis de serem resolvidas, possibilitaram avaliar aspectos importantes nos elementos, como o comportamento da distribuição da variação da temperatura em relação ao tempo. Além disso, os resultados obtidos podem ser estendidos para diversos outros problemas, sendo o método dos elementos finitos utilizado pelo software uma escolha acertada, uma vez que isso traz rapidez, eficácia e confiabilidade à análise térmica nos diversos elementos estruturais, contribuindo para o bom desenvolvimento da pesquisa.

6. Referências

- Al Fadul, M. A. e Mackie, K. R. (2018) "Numerical Analysis of Coupled Heat and Mass Transfer Phenomena in Concrete at Elevated Temperatures", *Transport in Porous Media*.
- Almeida, G. V., Coelho, N. A. e Pedroso, L. J. (2016) "Distribuição de temperatura em placas em regime transiente: comparação entre solução analítica e numérica", XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE, Brasília.
- Batista, R. N. e Coelho, N. A. (2018) "Aplicação do método das diferenças finitas no estudo térmico de elementos de concreto", 60º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Foz do Iguaçu.
- Bejan, A. (2013) "Convection heat transfer", 4. ed., Wiley, Hoboken, 704 p.
- Bergman, T. L., Incropera, F. P., Lavine, A. S. e Dewitt, D. P. (2011) "Introduction to heat transfer", 6. ed., Wiley, Hoboken, 992 p.
- Briffaut, M., Bendoudjema, F., Torrenti, J. M. e Nahas, G. (2012) "Effects of early-age thermal behaviour on damage risks in massive concrete structures", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Coelho, N. A., Gomes, F. M. P., Pedroso, L. J. e Rêgo, J. H. S. (2014) "Uma análise comparativa analítico-numérica dos efeitos térmicos em concreto massa para



- geometrias simples", XXXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE, Fortaleza.
- Coelho, N. A. (2016) "Métodos analíticos e numéricos para o estudo dos efeitos termomecânicos no concreto massa orientados às barragens de gravidade", Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília - UnB, Brasília.
- Çengel, Y. A. (2009) "Transferência de calor e massa: uma abordagem prática", 3. ed., McGraw-Hill, São Paulo, 902 p.
- Fu, Y. F., Wong, Y. L., Poon, C. S. e Tang, C. A. (2007) "Numerical tests of thermal cracking induced by temperature gradient in cement-based composites under thermal loads", Cement and Concrete Composites.
- Hickmann, T., Gramani, L. M., Kaviski, E. e Garcia, E. L. (2015) "Análise da transferência de calor transiente em barragem de concreto através do método dos elementos finitos", Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, Lisboa.
- Howell, J. R., Mengüç, M. P. e Siegel, R. (2015) "Thermal radiation heat transfer", 6. ed., Taylor & Francis, New York, 1016 p.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. e Lavine, A. S. (2008) "Fundamentos de transferência de calor e de massa", 6. ed., LTC, Rio de Janeiro.
- Kanema, M., Morais, M. V. G. D., Noumowe, A., Gallias, J. L. e Cabrillac, R. (2007) "Experimental and numerical studies of thermo-hydrous transfers in concrete exposed to high temperature", Heat and Mass Transfer/Waerme-und Stoffuebertragung.
- Kavamura, E. E., Carvalho, N. F., Hecke, M. B., Machado, R. D., De Lacerda, L. A. e Krüger, D. A. V. (2004) "Análise termo-mecânica bidimensional de estruturas de concreto executadas por camadas", Métodos Computacionais em Engenharia, Lisboa.
- Krüger, D. A. V. (2001) "Análise térmica transiente de estruturas de concreto executadas por camadas", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba.
- Liu, G. R. (2008) "A generalized gradient smoothing technique and the smoothed bilinear form for galerkin formulation of a wide class of computational methods", International Journal of Computational Methods.
- Maximiano, D. P., Barros, R. C., Lemes, Í. J. M., Silveira, R. A. M. e Rocha, P. A. S. (2015) "Análise térmica de seções transversais via método dos elementos finitos", XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE, Rio de Janeiro.
- Moaveni, S. (1999) "Finite element analysis: theory and application with ANSYS", Prentice-Hall, New Jersey.
- Ordenes, M., Lamberts, R. e Güths, S. (2008) "Transferência de calor na envolvente da edificação", Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFSC, Florianópolis, 40 p.
- Pepper, D. W. e Heinrich, J. C. (2017) "The finite element method: basic concepts and applications with MATLAB, MAPLE and COMSOL", 3. ed., CRC Press, New York, 628 p.



- Reddy, J. N. e Gartling, D. K. (2010) "The finite element method in heat transfer and fluid dynamics", 3. ed., CRC Press, Boca Raton, 524 p.
- Romão, E. C. (2016) "Efficient Alternative for Construction of the Linear System Stemming from Numerical Solution of Heat Transfer Problems via FEM", Mathematical Problems in Engineering.
- Silva, K. K. D. S., Silva, F. A. N., Filgueira Filho, A. D. C. e Alves, E. F. d. S. (2019) "Análise do comportamento do concreto de alto desempenho (CAD) quando submetido a temperaturas elevadas", Aplicação do Conhecimento Científico nas Engenharias.
- Soriano, H. L. e Lima, S. S. (1999) "Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas", Escola de Engenharia da UFRJ, Rio de Janeiro.
- Xue, B. Y., Wu, S. C., Zhang, W. H. e Liu, G. R. (2013) "A smoothed FEM (S-FEM) for heat transfer problems", International Journal of Computational Methods.