UTILIZAÇÃO DA LINGUAGEM PARAMÉTRICA PARA O ENSINO DA ENGENHARIA CIVIL

Alfonso Pappalardo Jr.[1], *Simão Priszkulnik*[2], *Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti*[3], *Fábio Raia*[4]

Abstract — *This paper deals with the use of simulation tools in Engineering education. It is shown how the parametric language available within a well-known finite element program can provide a powerful tool for the teaching of some fundamental concepts approached in typical engineering curricula. The proposed methodology is exemplified by the construction of mathematical models for the analysis of the transient thermal behavior of mass concrete structures subjected to the heat generated during the process of hydration of the cement.*

Index Terms — *Finite Element Method, Transient Thermal Analysis, ANSYS Parametric Design Language (APDL), Simulation Tools.*

INTRODUÇÃO

O Método dos Elementos Finitos (MEF) permite o desenvolvimento de ferramentas numéricas para a análise de problemas de Engenharia, sendo considerado a base da tecnologia CAE (*Computer Aided Design*). O MEF é amplamente empregado para a análise de diversos problemas de Engenharia, principalmente os problemas estruturais e de transferência de calor [1]. Em essência, o método corresponde à solução aproximada de equações diferenciais governantes do problema a ser analisado por meio de um sistema equivalente de equações algébricas lineares ou não-lineares.

A seqüência de comandos, que pode ser acionada com uma única instrução, utilizando-se o programa ANSYS Multiphysics, permite a construção de modelos matemáticos de elementos finitos a partir da simples introdução dos parâmetros de projeto.

Problemas complexos da Termodinâmica e da Teoria da Elasticidade podem ser parametrizados e, a partir da simples introdução dos dados de projeto, pode-se buscar a solução do problema e disponibilizá-la para a análise e interpretação dos resultados. Tal recurso facilita a sedimentação dos conceitos relacionados a estas disciplinas por parte do acadêmico, livrando-o do esforço de construção dos modelos, e permite a realização de uma análise de sensibilidade.

O problema a ser exemplificado refere-se à geração interna de calor produzido pela hidratação do cimento em concreto utilizado em estruturas massivas ou delgadas suscetíveis à fissuração de origem térmica.

LINGUAGEM PARAMÉTRICA

A construção de um modelo de elementos finitos envolve as seguintes etapas: definição da geometria, materiais, carregamentos e condições de contorno. Em seguida, o problema será resolvido e os resultados serão interpretados para a tomada de decisões de Engenharia. Na maioria dos casos, é necessário efetuar algumas alterações no projeto e todas as etapas deverão ser repetidas. Este procedimento envolve um alto custo operacional, principalmente, se o modelo apresenta uma geometria complexa ou um grande número de adaptações para uma solução viável tecnicamente.

O módulo de otimização do programa ANSYS (ambiente *Multiphysics*) permite a parametrização dos modelos de elementos finitos por meio da Linguagem Paramétrica de Projeto (*APDL*). Tal recurso é uma importante ferramenta para o reconhecimento do espaço das soluções e agilizar a busca da solução factível do problema analisado, calibração de modelo de elementos finitos a partir de ensaios de campo ou laboratoriais, além de ser uma ferramenta de ensino para as diversas teorias implementadas nesta plataforma computacional.

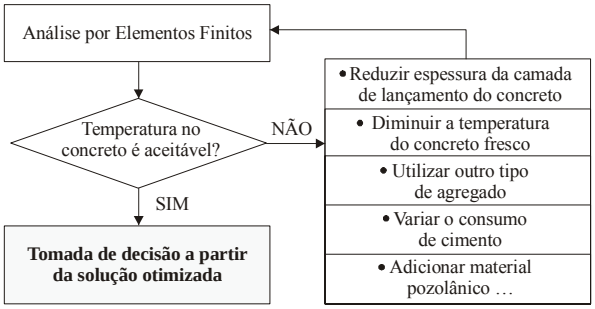

FIGURA 1
CICLO DE PROJETO UTILIZANDO A LINGUAGEM PARAMÉTRICA

1 Alfonso Pappalardo Junior. Professor at the Engineering School of the Mackenzie Presbyterian University, Rua da Consolação, 896, Prédio 6, CEP 01302-907, São Paulo, SP, Brazil, alfonso@mackenzie.br
2 Simão Priszkulnik. Professor at the Engineering School of the Mackenzie Presbyterian University, São Paulo, SP, Brazil, prisz@mackenzie.br
3 Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti. Associate Professor at the Polytechnic School of the University of São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado, travessa.2, n.83 CEP05508-900, São Paulo, SP, Brazil, pauletti@usp.br
4 Fabio Raia. Professor at the Engineering School of the Mackenzie Presbyterian University, São Paulo, SP, Brazil, raia@mackenzie.br

Análise Transiente de Transferência de Calor

O Princípio da Conservação da Energia para problemas térmicos em regime transitório pode ser expresso por

$$Q + \Delta U = W \tag{1}$$

onde Q é o saldo entre a energia térmica absorvida e a dissipada, ΔU é a mudança de energia interna do material e W é a geração interna de calor.

A Equação de Fourier, que governa os problemas térmicos em regime transiente, é escrita a partir de (1) sob a forma diferencial:

$$k\nabla^2 T + \rho c\dot{T} = \ddot{Q} \tag{2}$$

onde k (condutividade térmica), ρ (massa específica) e C (calor específico) são propriedades físicas do material. A difusividade térmica é definida como:

$$\kappa = \frac{k}{\rho c} \tag{3}$$

e quanto mais elevada, mais facilmente o calor poderá mover-se através do material.

Aplicando-se o Método de Galerkin em (2), e se introduzindo a aproximação por elementos finitos para o campo de temperatura, por meio das funções de interpolação $\boldsymbol{N}(x,y,z)$, chega-se à equação integral:

$$\int_{S_1} q^* \boldsymbol{N}\, dS_1 - \int_{S_2} h\, \boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^T dS_2\, \boldsymbol{T}_i + \int_{S_2} h\, T_m\, \boldsymbol{N}\, dS_2 \cdots$$

$$- \int_V \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{D}\, \boldsymbol{B}\, dV\, \boldsymbol{T}_i + \int_V \rho\, c\, \boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^T dV\, \dot{\boldsymbol{T}}_i = \int_V \boldsymbol{N}\, \ddot{Q}\, dV. \tag{4}$$

Agrupando-se, convenientemente, os termos da expressão (4) e na forma matricial, após a montagem das matrizes dos elementos para o domínio analisado, tem-se:

$$\boldsymbol{K}\, \boldsymbol{T}_n + \boldsymbol{C}\, \dot{\boldsymbol{T}}_n = \boldsymbol{Q}_n \tag{5}$$

sendo n o instante de tempo analisado. Para cada instante de tempo, regrado pelo incremento de tempo Δt, determina-se a temperatura em todos os pontos do material, resolvendo-se (5). Utilizando-se o Método de Crank-Nicolson (ou da Diferença Central) combinado com o Método de Newton-Raphson obtém-se a solução do problema não-linear a cada instante de tempo [4].

Elevação Adiabática da Temperatura no Concreto Massa

A primeira publicação do MEF para a análise de tensões em barragens de gravidade é creditada a Ray W. Clough, no Simpósio Internacional para o Uso do Computador para a Engenharia Civil, ocorrida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC (Lisboa) em 1962. Poucos anos antes, em 1960, o mesmo autor batizou o método em um congresso sobre Computação Eletrônica em Pittsburgh (Pennsylvania/EUA) [1].

Entende-se que a revelação do campo de temperatura no concreto-massa nas primeiras idades seja uma das maiores preocupações dos projetistas de barragens de concreto. As fissuras geradas pela elevação adiabática da temperatura do concreto, devida a reação de hidratação do cimento, podem levar ao comprometimento da estanqueidade da estrutura e, conseqüentemente, da segurança da mesma.

A elevação da temperatura do concreto-massa é um fenômeno complexo e influenciado, principalmente, pela espessura da camada de lançamento, intervalo de lançamento entre camadas sucessivas, temperatura do concreto no lançamento, tipo de agregado utilizado, consumo de cimento, adição de material pozolânico, tipo de cura do concreto, e outros fatores [2].

Modelo Paramétrico para Simulação da Geração Interna de Calor

O controle do aumento da temperatura do concreto em estruturas que envolvem um volume de material, suficiente para que sejam tomadas medidas para controlar a geração interna de calor, é um dos maiores desafios que os projetistas enfrentam. Existem diversas maneiras de mitigar o fenômeno da elevação adiabática da temperatura produzida pela hidratação do cimento, sendo apresentadas na Figura 1.

Para verificar a influência destes fatores no aumento da temperatura do concreto será desenvolvido um modelo de elementos finitos para análise térmica em regime transiente. O modelo consiste em um bloco de concreto executado sobre uma fundação rochosa. As dimensões consideradas são apresentadas na Figura 2, onde se leva em conta uma porção de fundação que não afete a distribuição de temperatura do concreto-massa [2]. Adota-se para o modelo inicial que a espessura da camada de lançamento seja igual a três metros (esp=3).

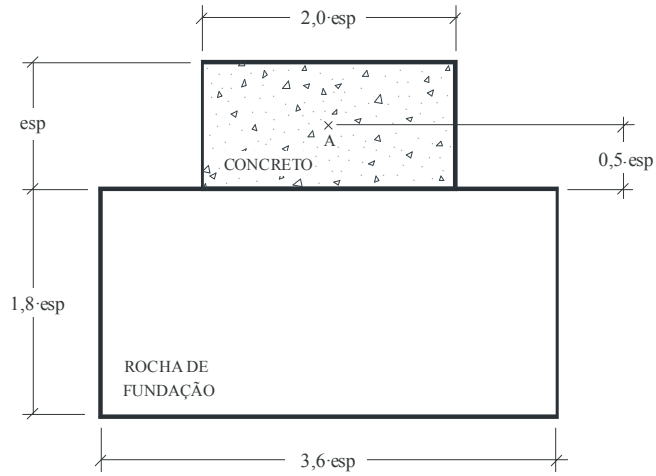

FIGURA 2
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DA ESTRUTURA E FUNDAÇÃO

As propriedades físicas e condições de contorno iniciais do problema são dadas na Figura 3. Assume-se que o coeficiente de transmissão superficial por convecção na interface concreto-meio vale h=15 W/m^{2o}C, sendo constante ao longo do tempo [3].

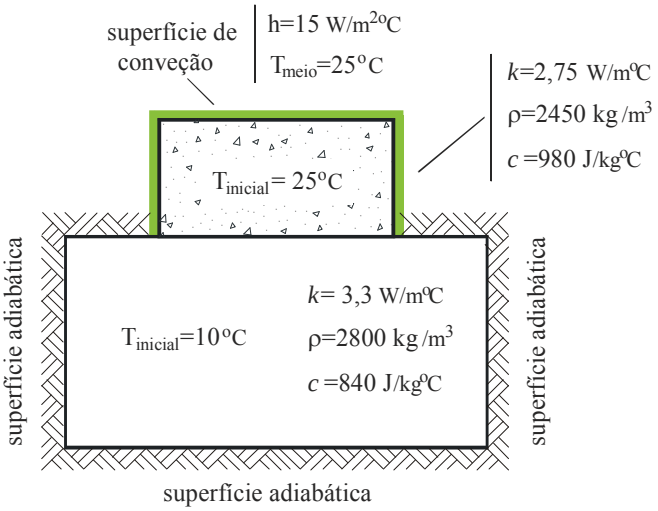

FIGURA 3
PROPRIEDADES FÍSICAS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para o concreto elaborado com uma certa dosagem, tipo de cimento, diâmetro máximo do agregado (granito) e sem adição de aditivos ou outro tipo de material, com massa específica ρ=2450 kg/m^3, calor específico c=980 J/kg^{o}C, condutividade térmica 2,75 W/m^{o}C e consumo de cimento 300 kg/m^3 a curva de elevação adiabática da temperatura do mesmo, medida experimentalmente com calorímetro adiabático, é apresentada na Figura 4 [2]. Os modelos matemáticos necessitam desta curva para o processamento.

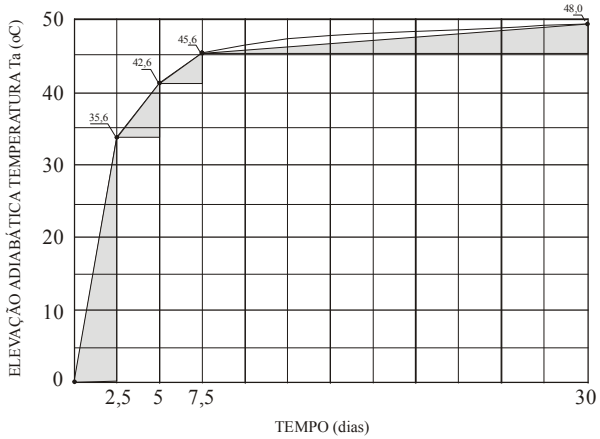

FIGURA 4
CURVA DE ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DO CONCRETO

A elevação adiabática da temperatura é relacionada à taxa de geração interna de calor, devida a reação de hidratação do cimento, pela seguinte equação:

$$\dot{\dot{\dot{Q}}} = \rho c \frac{dT_a}{dt} . \qquad (6)$$

Os dados referentes à taxa de geração interna de calor para a análise térmica transiente nos primeiros dois meses após o lançamento do concreto, obtidos a partir dos dados experimentais (Figura 4) e a equação (6), são apresentados na Tabela I.

TABELA I
TAXA DE GERAÇÃO INTERNA DE CALOR [3]

Tempo (dias)	Taxa de geração de calor (W/m^3)
0	0
2,5	389
5,0	77
7,5	33
30	6
60	0

A partir dos dados anteriores, procede-se com uma análise térmica transiente por elementos finitos, utilizando-se o programa ANSYS, adotando-se os parâmetros apresentados na Tabela II:

TABELA II
PARÂMETROS DE PROJETO [3]

Parâmetro	Descrição
tlan=25	Temperatura de lançamento
cond= 2,75	Condutividade térmica
esp=3	Espessura da camada de lançamento
cons=300	Consumo de cimento
poz=0	Adição de material pozolânico

Assume-se o tamanho dos elementos finitos igual a um décimo da espessura da camada de concreto, ou seja, Δx=esp/10 e o incremento de tempo para a análise térmica transiente Δt=15 horas, para a estabilidade numérica do método de integração numérica no tempo.

A temperatura máxima do concreto, obtida na análise térmica por elementos finitos, vale 61°C sendo atingida 135 horas após o lançamento do concreto. A Figura 5 apresenta o histórico da temperatura do ponto A, indicado na Figura 2.

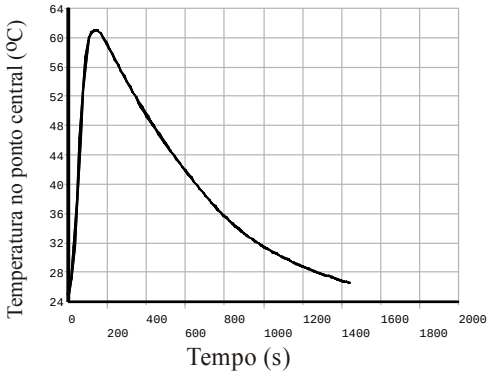

FIGURA 5
VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO PONTO CENTRAL AO LONGO DO TEMPO (1440 h = 60 DIAS)

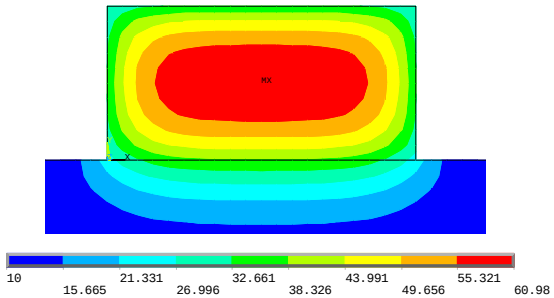

FIGURA 6
CURVAS DE ISOVALORES DO CAMPO DE TEMPERATURA NO CONCRETO APÓS 135 HORAS

ANÁLISES PARAMÉTRICAS

O módulo de otimização do programa ANSYS permite que todos os comandos utilizados na análise anterior sejam reproduzidos em um arquivo, escrito na linguagem *APDL* (*ANSYS Parametric Design Language*), que pode ser editado pelo usuário.

Considera-se como restrição de projeto que, para o tipo de concreto considerado, uma temperatura acima de 50°C levará a uma variação excessiva do volume do concreto e, conseqüentemente, a um estado de fissuração indesejável.

Serão realizadas análises paramétricas, de modo que não seja atingida a temperatura máxima de 50°C, nas primeiras idades do concreto, variando-se, individualmente, os parâmetros de projeto apresentados na Tabela II.

ESPESSURA DAS CAMADAS DE CONCRETAGEM

A espessura das camadas de concretagem é um parâmetro importante na obtenção da temperatura máxima a ser atingida no concreto. Camadas espessas são desejáveis para agilizar a construção e atender o cronograma da obra mas, por outro lado, podem implicar em temperaturas elevadas gerando tensões de origem térmica. Caso estas tensões forem superiores ao limite de resistência à tração do concreto ocorrerá fissuração, levando à necessidade de reparos ou até mesmo demolição da camada muito espessa.

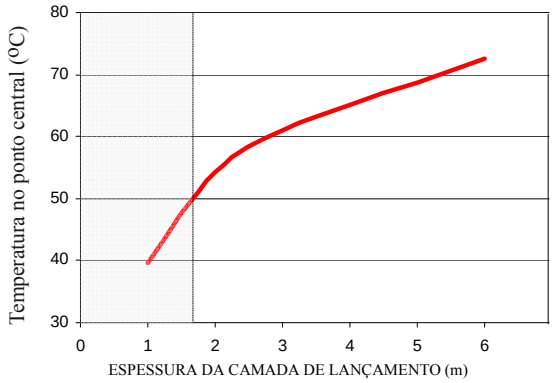

FIGURA 7
TEMPERATURA MÁXIMA NO PONTO A EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE CONCRETAGEM

Para estas análises, assumiu-se os valores fixos para a temperatura do concreto fresco 25°C, a condutividade do concreto 2,75 W/m°C (agregados de granito), nenhuma adição de pozolana e consumo de cimento 300 kg/m^3.

A partir da análise da Figura 7, pode-se concluir, para esta estrutura, que se deve impedir que sejam lançadas camadas superiores a 1,60 m.

DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO CONCRETO

A condutividade térmica controla a difusividade térmica do concreto, definida em (3), uma vez que a massa específica e o calor específico não variam muito para diferentes tipos de concreto [2]. A condutividade térmica do concreto é influenciada pelas características do agregado. A Tabela III apresenta a faixa de variação da condutividade térmica do concreto composto por diferentes tipos de agregados.

TABELA III
CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO CONCRETO EM FUNÇÃO DO TIPO DE AGREGADO

Tipo de agregado	Condutividade térmica (W/m°C)
Quartzito	3,5
Dolomita	3,2
Calcário	2,6 - 3,3
Granito	2,2 – 2,7
Riolito	2,2
Basalto	1,9 – 2,2

Fonte: (ACI-207,1986 apud [2])

Para estas análises, assumiu-se os valores fixos para a temperatura do concreto fresco 25°C, a espessura da camada de concretagem 1,5 metros, nenhuma adição de pozolana e consumo de cimento 300 kg/m^3.

A partir da análise da Figura 8 pode-se concluir, para esta estrutura, que se deve impedir o uso de agregados que levam a condutividade do concreto a valores inferiores a 2,25 W/m°C, de modo que não seja ultrapassada a resistência à tração do concreto e cause fissuras inaceitáveis.

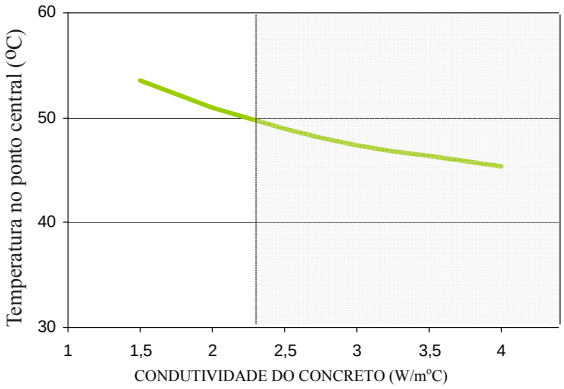

FIGURA 8
TEMPERATURA MÁXIMA NO PONTO A EM FUNÇÃO DA CONDUTIVIDADE DO CONCRETO

TEMPERATURA DO CONCRETO FRESCO

Um dos métodos mais eficientes para o controle da elevação da temperatura no concreto massa é a diminuição da temperatura do concreto fresco, podendo-se utilizar gelo em substituição à água de amassamento ou pré-resfriar o agregado [2].

Para as análises realizadas, assumiu-se os valores fixos para a espessura da camada de concretagem 3 metros, a condutividade do concreto 2,75 W/m°C (agregados de granito), nenhuma adição de pozolana e consumo de cimento 300 kg/m^3. A partir da análise da Figura 9, pode-se concluir neste caso, que se deve lançar o concreto fresco a uma temperatura inferior a 10°C.

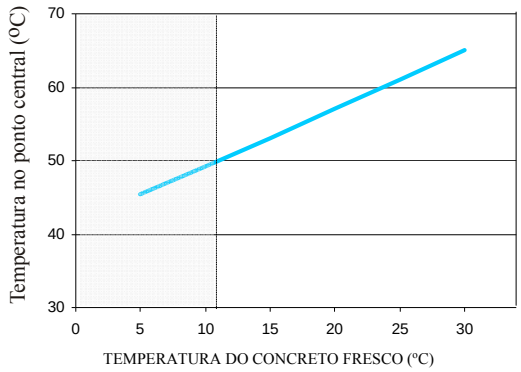

FIGURA 9
TEMPERATURA MÁXIMA NO PONTO A EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE LANÇAMENTO DO CONCRETO

VARIAÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO

O consumo de cimento está diretamente associado ao calor de hidratação por unidade de massa do concreto. Assume-se os seguintes valores fixos: espessura da camada de concretagem 2 metros, temperatura do concreto fresco 25°C, condutividade do concreto 2,75 W/m°C (agregados de granito) e nenhuma adição de pozolana. A partir da análise da Figura 10, pode-se concluir neste caso, que se deve impedir a utilização de concretos com consumo de cimento acima de 250 kg/m^3.

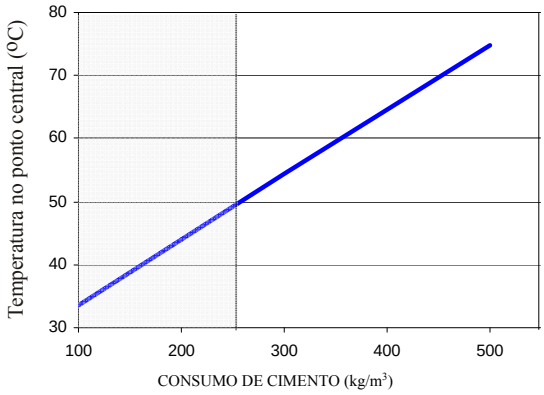

FIGURA 10
TEMPERATURA MÁXIMA NO PONTO A EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO DO CONCRETO

ADIÇÃO DE MATERIAL POZOLÂNICO

As pozolanas podem reduzir significativamente a temperatura do concreto massa. Adota-se os seguintes valores fixos: espessura da camada de concretagem 2 metros, temperatura do concreto fresco 25°C, condutividade do concreto 2,75 W/m°C (agregados de granito) e consumo de cimento 300 kg/m^3. A partir da análise da Figura 11, recomenda-se neste caso a substituição de pelo menos 20% de cimento com material pozolânico.

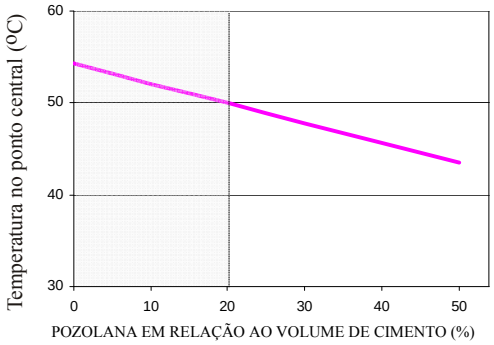

FIGURA 11
TEMPERATURA MÁXIMA NO PONTO A EM FUNÇÃO DA ADIÇÃO DE POZOLANA EM RELAÇÃO AO VOLUME DE CIMENTO

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho aponta a necessidade de utilização de programas de simulação para aprimorar o desempenho de aprendizagem das disciplinas dos cursos de Engenharia. O exemplo de aplicação analisado trata de uma geometria regular, podendo-se estender os mesmos conceitos para geometrias e carregamentos mais complexos.

Deve-se lembrar que os ensaios laboratoriais são imprescindíveis para aproximar o comportamento dos modelos matemáticos a uma situação real e possibilitar a tomada de decisão adequada, baseada na redução dos custos e do tempo de construção. Deverão ser discutidas as alternativas tecnológicas para minimizar o risco de fissuração de origem térmica, conforme exemplificadas na figura 1.

Aproximar o acadêmico ao exercício profissional simulando situações reais em plataformas computacionais leva à formação adequada para a atuação no mercado globalizado da Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BATHE, K. J. "Finite Element Procedures". New Jersey: Prentice Hall, 1996.

[2] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. "Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais". 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2005.

[3] PAPPALARDO JR., A. "Método dos Elementos Finitos aplicado à Engenharia Civil: Teoria e Prática". 2 ed. São Paulo: Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2009.

[4] ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. "The Finite Element Method for Solid and Fluid Mechanics, Dynamic and Non-Linearity. 6th ed. London, 2005.