

# Importância da utilização de propriedades avaliadas em função da temperatura para a simulação computacional de cerâmicas refratárias (*The role of properties evaluated as a function of temperature in the simulation of the thermomechanical behavior of refractory ceramics*)

M. M. Akiyoshi<sup>1</sup>, A. P. da Silva<sup>1</sup>, R. Pereira<sup>2</sup>, V. C. Pandolfelli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Materiais

Universidade Federal de São Carlos

Rod. Washington Luiz, km 235, CP 676, 13565-905, S. Carlos, SP

<sup>2</sup>Cerâmica Saffran S. A.

pmmak@iris.ufscar.br ou vicpando@power.ufscar.br

## Resumo

Neste trabalho é apresentado um estudo sistemático sobre a influência da utilização de propriedades avaliadas em função da temperatura para suprir um programa de simulação computacional por elementos finitos (AEF) visando à determinação dos perfis de temperatura e tensão em uma âncora refratária. Para tanto, foram avaliados em função da temperatura, a condutividade térmica ( $k$ ), o calor específico ( $c$ ), o coeficiente de expansão térmica linear ( $\alpha_L$ ) e o módulo elástico ( $E$ ). Um planejamento fatorial  $2^u$  e a análise de variância (ANOVA) foram utilizados para avaliar a influência das interações entre as propriedades determinadas em função da temperatura sobre os perfis de temperatura e tensão normal resultantes da simulação computacional. Este estudo reforça a necessidade da avaliação das propriedades em função da temperatura para se suprir um programa de simulação computacional, destacando-se a condutividade térmica e o calor específico para propiciar uma melhor obtenção do perfil de temperatura, e o coeficiente de expansão térmica linear ( $\alpha_L$ ) e o módulo elástico ( $E$ ) para a avaliação do perfil de tensões.

**Palavras-chave:** cerâmicas refratárias, simulação computacional, propriedades termomecânicas.

## Abstract

*This paper presents a systematic study about the importance of employing properties evaluated as a function of temperature to input a computer simulation program using the finite element method (FEM), in order to access the temperature and normal stress profiles in a refractory ceramic. The properties evaluated as a function of temperature were thermal conductivity ( $k$ ), specific heat ( $c$ ), coefficient of linear thermal expansion ( $\alpha_L$ ), and elastic modulus ( $E$ ). A  $2^u$  experimental design and the analysis of variance (ANOVA) allowed to conclude that the thermal conductivity and the specific heat are important to obtain a more precise temperature profile, while the linear thermal expansion coefficient and the elastic modulus are important to evaluate the stress profile.*

**Keywords:** refractory ceramics, computer simulation, thermomechanical properties.

## INTRODUÇÃO

Para acompanhar o crescente aumento de competitividade no setor siderúrgico, grandes transformações também têm acontecido na indústria de materiais refratários. No intuito de acompanhar esta evolução, o fabricante de refratários tem sido estimulado ao uso de simulações computacionais para a avaliação de seus produtos, uma vez que análises “*in situ*” envolvem custos elevados (devido à interrupção do processo industrial e ao risco de danificar os equipamentos). Uma das técnicas que tem encontrado maior difusão é a análise por elementos finitos (AEF) que, partindo da geometria e das propriedades do material que compõem o produto, permite avaliar seu comportamento termomecânico. Todavia, a capacidade das simulações preverem o comportamento real da peça está intimamente relacionada com a precisão das propriedades utilizadas para suprir estes programas. A AEF subdivide ou discretiza

a peça em várias regiões denominadas elementos que estão conectadas entre si através de um número finito de pontos (nós) e obedecem às mesmas leis do sólido contínuo. Um exemplo de discretização é mostrado na Fig. 1 [1].

Em uma análise termomecânica os deslocamentos e as temperaturas nodais são as variáveis de interesse. Os carregamentos externos (térmicos, mecânicos, elétricos, etc.) são aplicados sobre os nós enquanto as condições de contorno podem ser aplicadas tanto sobre os nós quanto sobre os elementos.

Para a utilização de uma simulação computacional (como o AEF) é imprescindível suprir o programa com propriedades adequadas. Embora fosse ideal que todas as propriedades utilizadas fossem avaliadas em função da temperatura, isso nem sempre é possível devido ao alto custo ou à dificuldade geralmente encontrados para a determinação destas propriedades.

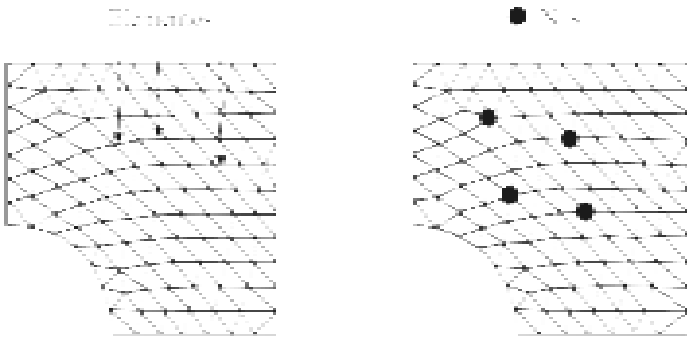


Figura 1: Discretização de um corpo para análise por elementos finitos [1].  
[Figure 1: Meshing of product for a finite element analysis [1].]

Neste trabalho, um planejamento fatorial  $2^u$  e a análise de variância (ANOVA) foram empregados para estudar a influência da utilização de propriedades avaliadas em função da temperatura, sobre o perfil de temperatura e de tensão resultantes da simulação computacional de uma âncora refratária utilizando-se a análise por elementos finitos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Simulação computacional utilizando a análise por elementos finitos (AEF)

A geometria escolhida para a análise de elementos finitos foi uma âncora de teto de forno de reaquecimento (Fig. 2) produzida pela Saffran-linco LTDA. Devido à simetria do modelo, foi utilizada apenas metade da âncora. A discretização do modelo foi realizada utilizando-se elementos tipo “solid” da biblioteca de elementos do programa Cosmos 2.0 [1] que apresentam as seguintes características:

- i) 8 nós por elemento;
- ii) material se encontra no regime linear elástico;
- iii) os deslocamentos sofridos pelos elementos são pequenos;
- iv) não ocorre fluência;
- v) as deformações sofridas são pequenas.

Na Fig. 2a tem-se o desenho tridimensional da âncora, enquanto as Figs. 2 (b-d) apresentam a discretização da âncora em elementos finitos, destacando a disposição dos carregamentos térmicos e mecânicos. Sob a face quente da âncora foi aplicada via modelagem uma curva de aquecimento padrão (com uma taxa de aquecimento média de  $17\text{ }^\circ\text{C/h}$ ) utilizada pela Saffran-linco LTDA. (Fig. 3). Sobre os dentes foi imposta uma carga estática de 864 N (referente ao peso dos blocos de teto e ao peso dos concretos isolantes) que foram distribuídos uniformemente sobre os 60 nós localizados nos dentes ( $14,40\text{ N/nó}$ ).

Utilizou-se o programa Cosmos/M 2.0 (Structural Research and Analysis Corporation, 1998) para a avaliação dos perfis de temperatura e tensão resultantes em uma âncora refratária. Neste trabalho, a análise foi realizada em duas etapas. Primeiramente, realizou-se o cálculo do perfil de temperaturas onde as propriedades necessárias foram a condutividade térmica ( $k$ ), o

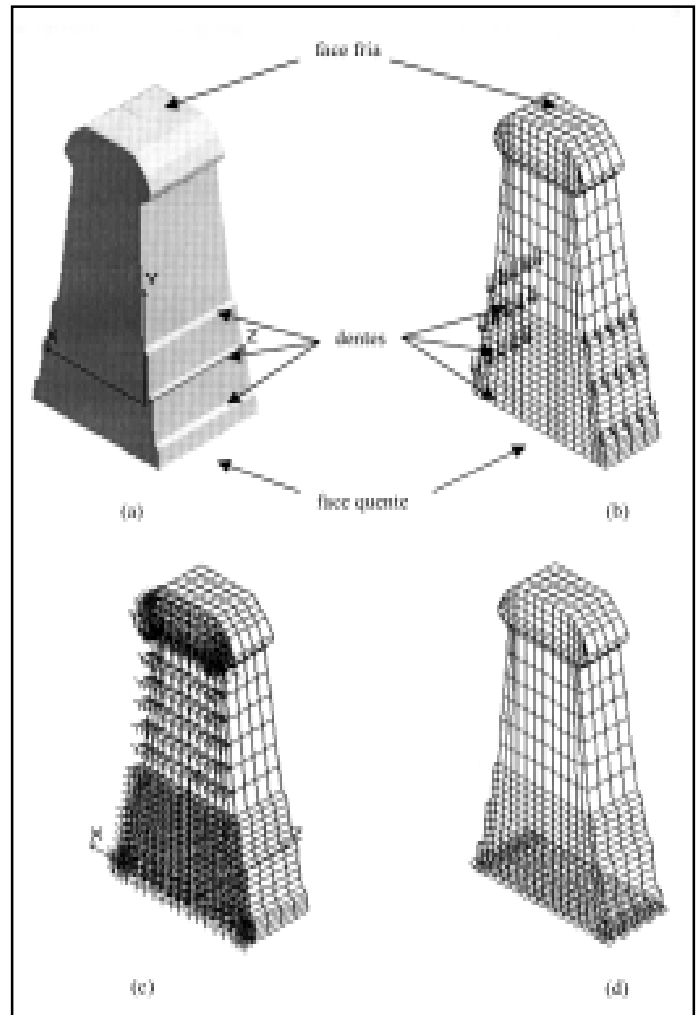


Figura 2: Âncora refratária: (a) desenho tridimensional. Modelo em elementos finitos de metade da âncora destacando: (b) a disposição das forças aplicadas ( $\downarrow$ ), (c) as restrições de deslocamento ( $\uparrow$ ) e (d) o carregamento térmico ( $\diamond$ ) [2].

[Figure 2: Refractory anchor: (a) three-dimensional plot. Finite element model for half anchor showing: (b) applied forces ( $\downarrow$ ), (c) restricted displacements ( $\uparrow$ ), and (d) thermal load ( $\diamond$ ).]

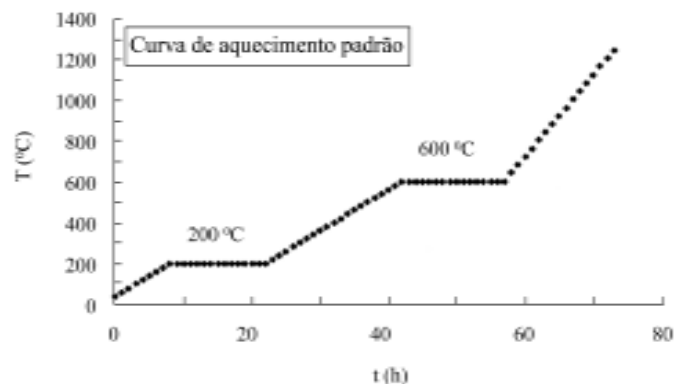


Figura 3: Curva de aquecimento padrão empregada no modelo de elementos finitos [2].

[Figure 3: Heat up curve employed in the simulation using the finite element method [2].]

calor específico ( $c$ ) e a massa específica volumétrica ( $\rho_v$ ). Em seguida, uma vez obtido o perfil térmico, o programa de simulação foi utilizado para o cálculo do perfil de tensões resultante considerando tanto os carregamentos mecânicos quanto térmicos. As propriedades necessárias foram o módulo elástico ( $E$ ), o coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) e o coeficiente de expansão térmica linear ( $\alpha_L$ ).

Neste trabalho, várias propriedades foram avaliadas, em função da temperatura, tais como a condutividade térmica ( $k$ ), o calor específico ( $c$ ), o coeficiente de expansão térmica linear ( $\alpha_L$ ) e o módulo elástico ( $E$ ). A condutividade térmica e o calor específico foram determinados através da técnica de fio quente paralelo (TCT 426 - Netzsch) [4, 5]. O coeficiente de expansão térmica linear foi avaliado utilizando-se um equipamento de refratariedade sob carga (RUL 421 - Netzsch) com uma tensão aplicada de 0,010 MPa [4]. O módulo elástico foi determinado em função da temperatura através de um equipamento de módulo de ruptura a quente (HMOR 422 - Netzsch) empregando-se o método estabelecido por Hübner [4, 6].

O coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) e a massa específica volumétrica ( $\rho_v$ ) foram avaliados à temperatura ambiente empregando, respectivamente, a técnica de ressonância de barras [3] e o método de imersão em água [7].

Maiores detalhes sobre as técnicas e os procedimentos utilizados para a avaliação destas propriedades ( $k$ ,  $c$ ,  $\alpha$ ,  $E$ ,  $\mu$  e  $\rho_v$ ) podem ser encontradas em [4].

*Propriedades térmicas e mecânicas avaliadas em função da temperatura utilizadas para suprir um programa de simulação por elementos finitos*

Como já citado, as propriedades avaliadas em função da temperatura foram a condutividade térmica ( $k$ ), o calor específico ( $c$ ), o coeficiente de expansão térmica linear ( $\alpha_L$ ) e o módulo elástico ( $E$ ), conforme expressas pelas seguintes equações [4]:

$$k = \exp \left[ \frac{-2,892 + 1,543 \cdot 10^{-3} \cdot T - 4,908 \cdot 10^{-7} \cdot T^2}{(1,555 - 9,277 \cdot 10^{-4} \cdot T + 4,095 \cdot 10^{-7} \cdot T^2) \rho_v} \right] \quad (A)$$

( $25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $0,55 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_v \leq 3,14 \text{ g/cm}^3$ ) para  $k$  expresso em  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

$$c = (9,187 \cdot 10^2 - 9,842 \cdot 10^{-1} \cdot T + 9,619 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 2,173 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) + (1,974 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 6,253 \cdot 10^{-12} \cdot T^5) \quad (B)$$

( $25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; para  $c$  expresso em  $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )

$$\alpha = 4,445 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \quad 25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha = (3,429 + 5,079 \cdot 10^{-3} \cdot T) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \quad 200 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C} \quad (C)$$

$$E = (3,410 \cdot 10^{11} + 1,337 \cdot 10^{11} \cdot T - 7,400 \cdot 10^4 \cdot T^2 + 1,278 \cdot 10^6 \cdot T^3) + (-9,019 \cdot 10^{10} \cdot T^4 + 2,178 \cdot 10^{13} \cdot T^5) \quad (D)$$

( $E$  em GPa para  $25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ )

As equações (B), (C) e (D) são válidas apenas para o material da âncora utilizada neste estudo, enquanto que a equação (A) permite estimar a condutividade térmica de cerâmicas refratárias com massas específicas volumétricas entre  $0,55 \text{ g/cm}^3$  e  $3,14 \text{ g/cm}^3$ , para temperaturas desde  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  até  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  [5].

O comportamento da condutividade térmica e do calor específico em função da temperatura pode ser observado na Fig. 4, enquanto o comportamento do coeficiente de expansão térmica

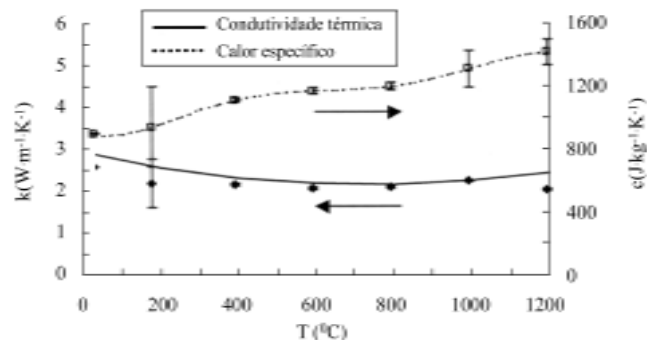


Figura 4: Condutividade térmica ( $k$ ) e calor específico ( $c$ ) em função da temperatura ( $T$ ). As linhas representam as curvas ajustadas matematicamente enquanto os símbolos  $\blacklozenge$  e  $\square$  são os pontos experimentais para  $k$  e  $c$  respectivamente [4].

[Figure 4: Thermal conductivity ( $k$ ) and specific heat ( $c$ ) as function of temperature ( $T$ ). Lines refer to the mathematical fitting and symbols  $\blacklozenge$  and  $\square$  refer to the experimental points for  $k$  and  $c$ , respectively [4].]

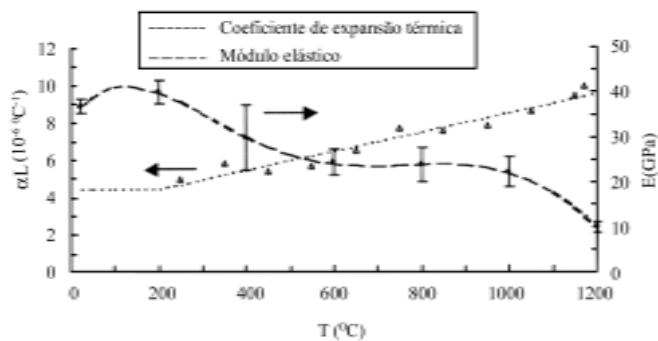


Figura 5: Coeficiente de expansão térmica linear ( $\alpha_L$ ) e módulo elástico ( $E$ ) em função da temperatura ( $T$ ). As linhas representam as curvas ajustadas matematicamente enquanto os símbolos  $\bullet$  e  $\triangle$  são os pontos experimentais para  $\alpha$  e  $E$  respectivamente [4].

[Figure 5: Linear thermal expansion coefficient ( $\alpha_L$ ) and elastic modulus ( $E$ ) as function of temperature ( $T$ ). Lines refer to mathematical fitting and the symbols  $\bullet$  and  $\triangle$  refer to the experimental points for  $E$  and  $\alpha$ , respectively [4].]

linear e do módulo elástico é apresentado na Fig. 5.

O coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) foi avaliado à temperatura ambiente através da técnica de ressonância de barras. O material utilizado apresentou coeficiente de Poisson igual a 0,25 e a massa específica volumétrica de  $2,54 \text{ g/cm}^3$  e estes foram considerados independentes da temperatura.

Com intuito de avaliar a importância de se utilizar propriedades à temperatura ambiente ou em função da temperatura para se suprir um programa de simulação por elementos finitos, utilizou-se um

planejamento fatorial 2<sup>u</sup> e a análise de variância (ANOVA).

*Planejamento fatorial*

Neste trabalho foi utilizado um planejamento fatorial de dois níveis [8]. Fatores (f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>,..., f<sub>p</sub>) são as variáveis (controladas pelo experimentador) para as quais se deseja conhecer o efeito sobre as respostas. Cada um desses fatores pode assumir diferentes valores ou níveis (n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>,..., n<sub>p</sub>). Quando os fatores podem assumir apenas dois níveis, tem-se um planejamento fatorial denominado 2<sup>u</sup>, e são necessários 2<sup>u</sup> experimentos distintos.

Os fatores empregados foram, a condutividade térmica (k), o calor específico (c), o coeficiente de expansão térmica linear (α<sub>L</sub>) e o módulo elástico (E), totalizando quatro fatores. Como se tratavam de variáveis discretas, os únicos níveis possíveis eram os valores +1 (propriedade em função da temperatura) e -1 (propriedade constante avaliada à temperatura ambiente), totalizando 2<sup>4</sup> = 16 experimentos.

A análise térmica permite obter o perfil de temperatura (T<sub>i</sub>) enquanto que a análise mecânica permite determinar o perfil de tensões resultantes dos carregamentos térmicos e mecânicos. Neste trabalho, serão utilizadas os valores das tensões normais σ<sub>i</sub> (nas

Tabela I - Planejamento fatorial em dois níveis empregado para avaliar a importância da utilização de propriedades com valores para a temperatura ambiente (-1) ou em função da temperatura (+1) para suprir um programa de simulação computacional. As propriedades empregadas foram o módulo elástico E, o coeficiente de expansão térmica linear α<sub>L</sub>, o calor específico c e a condutividade térmica k.

[Table I - Experimental design in two levels employed to evaluate the importance of using properties at room temperature (-1) or as function of temperature (+1) to input a computer simulation program. The properties employed were the elastic modulus E, the coefficient of linear thermal expansion α<sub>L</sub>, the specific heat c and the thermal conductivity k.]

Simulation	E	α <sub>L</sub>	c	k
01	-1	-1	-1	-1
02	+1	-1	-1	-1
03	-1	+1	-1	-1
04	+1	+1	-1	-1
05	-1	-1	+1	-1
06	+1	-1	+1	-1
07	-1	+1	+1	-1
08	+1	+1	+1	-1
09	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1

Tabela II - Resultados de temperatura de face fria e das tensões normais nas direções X, Y e Z para cada uma das simulações avaliadas.

[Table II - Cold face temperature profile and normal stress profile, X, Y, and Z directions, for the computer simulations.]

Simulação	T <sub>i</sub> (°C)	σ <sub>X-min</sub> (MPa)	σ <sub>X-max</sub> (MPa)	σ <sub>Y-min</sub> (MPa)	σ <sub>Y-max</sub> (MPa)	σ <sub>Z-min</sub> (MPa)	σ <sub>Z-max</sub> (MPa)
01	865,60	-1,79	0,75	-2,42	1,47	-1,68	0,29
02	865,60	-0,63	0,35	-1,35	0,87	-0,10	0,18
03	865,60	-4,94	2,64	-8,85	5,06	-5,49	1,80
04	865,60	-1,74	1,26	-5,14	2,90	-3,09	1,12
05	801,82	-2,18	0,86	-2,86	1,69	-1,99	0,34
06	801,82	-0,77	0,43	-1,68	1,03	-1,20	0,22
07	801,82	-6,19	3,08	-10,46	5,93	-6,41	2,07
08	801,82	-2,21	1,56	-6,33	3,53	-3,78	1,35
09	799,57	-1,95	0,85	-2,95	1,72	-1,99	0,36
10	799,57	-0,69	0,42	-1,74	1,06	-1,20	0,23
11	799,57	-5,53	3,08	-10,74	6,05	-6,44	2,15
12	799,57	-1,99	1,55	-6,51	3,61	-3,80	1,40
13	730,07	-2,34	0,97	-3,61	2,04	-2,34	0,44
14	730,07	-0,83	0,51	-2,20	1,28	-1,46	0,29
15	730,07	-6,86	3,56	-13,03	7,25	-7,44	2,51
16	730,07	-2,51	1,90	-8,11	4,44	-4,55	1,67

direções X, Y e Z).

A Tabela I apresenta o planejamento fatorial em dois níveis utilizado neste trabalho. Na primeira simulação (caso 1), são utilizadas todas as propriedades em seus valores para a temperatura ambiente (simbologia -1) enquanto que na última (caso 16), são empregadas todas as propriedades avaliadas em função da temperatura (simbologia +1). Nas demais simulações (casos 2 a 15), existe uma combinação de propriedades avaliadas com valores para a temperatura ambiente ou em função da temperatura.

O caso 16 foi escolhido como referência, uma vez que este representava a situação mais real, onde foram utilizadas todas as propriedades avaliadas em função da temperatura (módulo elástico, coeficiente de expansão térmica linear, calor específico e condutividade térmica). Os pontos (nós) utilizados para a avaliação da temperatura da face fria e das tensões normais para todos os casos foram aqueles onde a temperatura ou a tensão apresentaram o maior valor (em módulo) no caso 16.

Antes de se realizar o ajuste das respostas desejadas como função das variáveis estudadas através de regressão linear e subsequente análise de variância, realizou-se a normalização dos valores de temperatura da face fria e das tensões normais em relação ao caso 16. A normalização foi obtida através da equação a seguir:

$$\Delta\theta_{\text{caso } i} (\%) = 100 \cdot \frac{\Delta\theta_{\text{caso } i} - \Delta\theta_{\text{caso } 16}}{\Delta\theta_{\text{caso } 16}}, \quad (E)$$

na qual θ = T ou σ.

A significância estatística de cada uma das variáveis individuais e suas interações foi avaliada através do parâmetro  $p$ . O valor do parâmetro  $p$ , para um dado nível de confiança  $\alpha$  (usualmente 5%), é um indicativo da significância estatística da variável, baseado na relação entre o valor do coeficiente obtido e seu desvio padrão. O nível de confiança  $\alpha$  é um valor de corte, isto é, sempre que o valor de  $p$  para a variável for maior que  $\alpha$ , esta não é significativa. Neste trabalho utilizou-se  $\alpha = 5\%$ .

Como os níveis assumidos pelos fatores eram adimensionais (propriedades avaliadas à temperatura ambiente ou em função da temperatura), os coeficientes de regressão linear puderam ser utilizados como um indicativo da significância estatística de cada uma das variáveis (ou combinações de variáveis) apresentadas na Tabela I. Deste modo, quanto maior o valor do coeficiente (em módulo) maior sua significância.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A temperatura da face fria ( $T_f$ ) e as tensões normais ( $\sigma_f$ ) máximas (tração) e mínimas (compressão) são apresentadas na Tabela II para cada uma das simulações realizadas.

O perfil de temperatura para o caso de referência (16), utilizando todas as propriedades com seus valores avaliados em função da temperatura é apresentado na Fig. 6.

Nota-se, na Tabela II, que a temperatura de face fria é menor quando a condutividade térmica e o calor específico são avaliados em função da temperatura (casos 13 a 16), uma vez que para temperaturas abaixo de 1000 °C, a condutividade térmica ( $k$ ) do material utilizado decresce com o aumento da temperatura como pode ser observado pela Fig. 4.

A Fig. 7 mostra um gráfico de barras onde estão apresentadas as temperaturas da face fria obtidas para cada uma das simulações em ordem crescente de temperatura.

Considerando-se cada um dos casos isoladamente, nota-se que

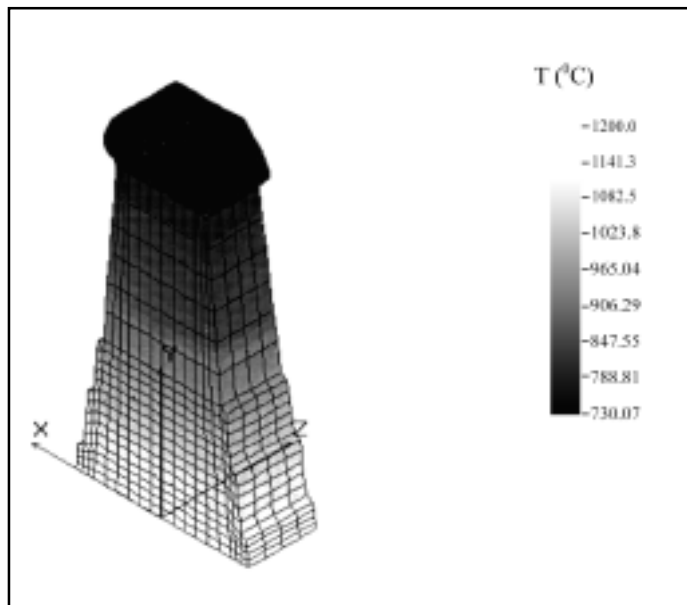


Figura 6: Perfil de temperaturas para o caso 16 (propriedades avaliadas em função da temperatura).

[Figure 6: Temperature profile for case 16 (properties evaluated as function of temperature).]

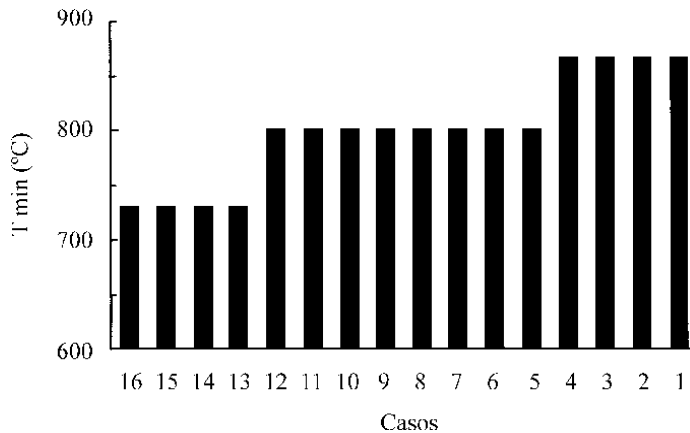


Figura 7: Temperatura da face fria para cada um dos casos avaliados. [Figure 7: Temperature of cold face for all cases.]

os menores valores para a temperatura de face fria ocorreram quando foram empregados valores de condutividade térmica ( $k$ ) e calor específico ( $c$ ) avaliados em função da temperatura (casos 13 a 16). No entanto, os maiores valores de temperatura da face fria foram obtidos para as simulações onde a condutividade térmica e o calor específico foram mantidos constantes, utilizando-se seus respectivos valores para a temperatura ambiente (casos 1 a 4). Observa-se também que o efeito de se manter a condutividade térmica constante utilizando-se seu valor para a temperatura ambiente (casos 5, 6, 7 e 8) ou o calor específico constante com o valor à temperatura ambiente (casos 9, 10, 11 e 12), foi semelhante.

Uma vez obtido o perfil térmico, o programa de simulação foi utilizado para avaliar o perfil de tensão resultante dos carregamentos térmicos e mecânicos impostos à âncora. A Fig. 8 apresenta o perfil de tensão normal na direção Y ( $\sigma_Y$ ) para o caso de referência (16) onde foram utilizados os valores das propriedades avaliadas em função da temperatura.

Ao contrário do esperado, os maiores valores de tensão normal

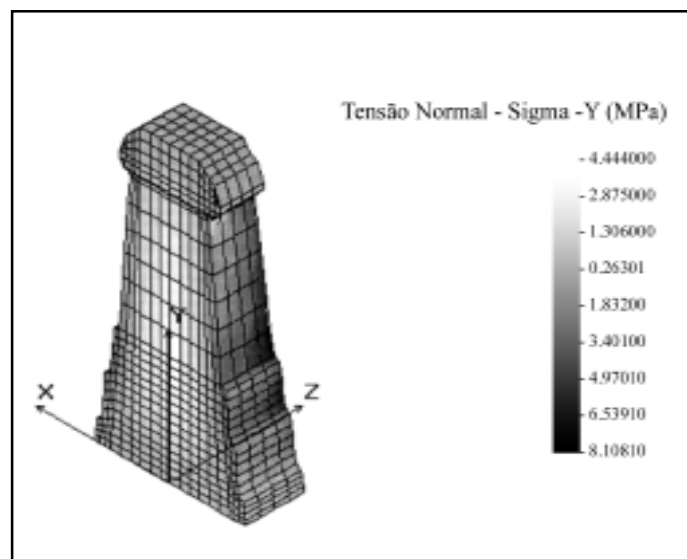


Figura 8: Perfil de tensão normal  $\sigma_Y$  para o caso 16 (propriedades em função da temperatura).

Figure 8: Normal stress profile ( $\sigma_Y$ ) for case 16 (properties evaluated as function of temperature).

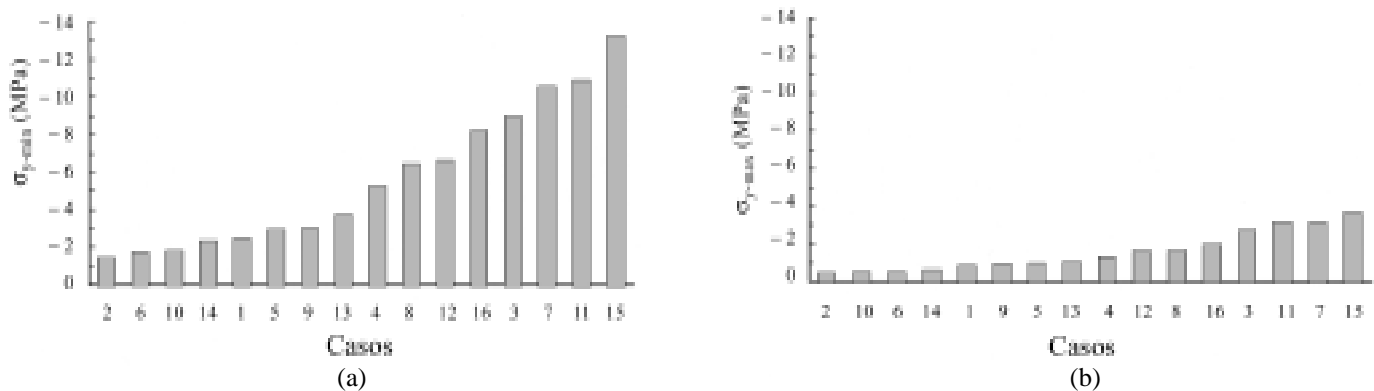


Figura 9: Tensões normais  $\sigma_Y$  para cada um dos casos avaliados: (a)  $\sigma_{Y-\min}$  e (b)  $\sigma_{Y-\max}$ .  
 [Figure 9: Normal stress at Y direction: (a)  $\sigma_{Y-\min}$  and (b)  $\sigma_{Y-\max}$ .]

Tabela III - Resultados normalizados da temperatura da face fria  $\Delta T_{\min}$  e das tensões normais ( $\Delta\sigma$  nas direções X, Y e Z) para cada uma das simulações.

[Table III - Relative values of cold face temperature  $\Delta T_{\min}$  and normal stress,  $\Delta\sigma$  at X, Y, and Z directions, for each simulation.]

Simulação	$\Delta T_{\min}$ (%)	$\Delta\sigma_{X-\min}$ (%)	$\Delta\sigma_{X-\max}$ (%)	$\Delta\sigma_{Y-\min}$ (%)	$\Delta\sigma_{Y-\max}$ (%)	$\Delta\sigma_{Z-\min}$ (%)	$\Delta\sigma_{Z-\max}$ (%)
1'	18,56	-28,53	-60,77	-70,17	-67,03	-63,06	-82,71
2'	18,56	-75,00	-81,57	-83,35	-80,48	-97,87	-89,20
3'	18,56	97,17	38,72	9,17	13,88	20,59	7,54
4'	18,56	-30,57	-34,08	-36,58	-34,79	-32,17	-32,93
5'	9,83	-12,97	-54,85	-64,70	-62,02	-56,40	-79,80
6'	9,83	-69,45	-77,43	-79,27	-76,78	-73,73	-86,79
7'	9,83	147,13	61,73	29,01	33,44	40,73	23,86
8'	9,83	-11,89	-18,22	-21,99	-20,66	-17,06	-19,30
9'	9,52	-22,11	-55,14	-63,64	-61,25	-56,22	-78,45
10'	9,52	-72,39	-77,73	-78,59	-76,26	-73,55	-86,01
11'	9,52	120,67	61,52	32,46	36,18	41,36	28,70
12'	9,52	-20,47	-18,74	-19,76	-18,88	-16,51	-16,43
13'	0,00	-6,62	-48,80	-55,46	-54,03	-48,58	-73,65
14'	0,00	-66,72	-73,01	-72,85	-71,20	-67,91	-82,40
15'	0,00	173,62	86,84	60,70	63,14	63,50	49,86
16'	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

não ocorreram para o caso 1 (todas as propriedades constantes e avaliadas com valores para a temperatura ambiente). Do mesmo modo, os menores valores de tensão normal também não foram verificados no caso 16 onde foram utilizadas todas as propriedades avaliadas com valores em função da temperatura.

Observou-se que as menores tensões normais ocorreram para os casos 2, 6 e 10 (módulo elástico avaliado em função da temperatura e coeficiente de expansão térmica linear constante com valor à temperatura ambiente), ao passo que as maiores ocorreram para a situação inversa, módulo elástico constante com o valor para a temperatura ambiente e coeficiente de expansão térmica linear avaliado em função da temperatura) (casos 7, 11 e

15), como ilustrado na Fig. 9 para o perfil de tensões normais na direção Y ( $\sigma_{Y-\min}$  e  $\sigma_{Y-\max}$ ). Semelhante comportamento foi verificado para as direções X e Z.

Nota-se que, dentre todos os casos, os maiores valores de tensão ocorreram quando apenas o módulo elástico foi mantido constante com o valor para a temperatura ambiente (caso 15), enquanto os menores valores de tensão foram obtidos quando apenas o módulo elástico foi avaliado em função da temperatura (caso 2).

No caso 15, o módulo elástico foi considerado constante com o valor para a temperatura ambiente, de modo que a simulação computacional não considerou o fenômeno de relaxação estrutural (diminuição de E) que geralmente ocorre à medida que a

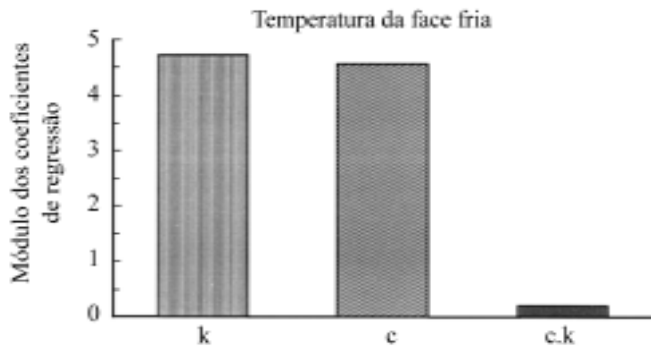


Figura 10: Módulo dos coeficientes de regressão para a temperatura da face fria.

[Figure 10: Absolute value of regression coefficients for the cold face temperature.]

temperatura é elevada. Por outro lado, no caso 2, embora a relaxação estrutural tenha sido considerada, foram desprezados todos os efeitos referentes às outras variáveis como, por exemplo, o aumento do coeficiente de expansão térmica linear com a temperatura, o que causaria um aumento da tensão à medida que a temperatura é elevada.

Esses resultados também mostram que o efeito de uma variável sobre o perfil de tensão normal é afetado pelas outras, tornando necessária a análise de todas as variáveis de forma conjunta. Para tanto, efetuou-se a normalização da temperatura da face fria e das tensões normais em relação a um caso de referência. Considerando-se que o caso mais próximo das condições reais é aquele onde o se verifica o maior número de propriedades em função da temperatura, escolheu-se como referência o caso 16. A normalização foi realizada através da equação E e seus resultados são apresentados pela Tabela III.

A partir do planejamento fatorial  $2^u$  e dos resultados das

simulações foi possível determinar as equações que regem a temperatura da face fria e as tensões normais em função das variáveis E,  $\alpha$ , c e k. A Tabela IV apresenta os coeficientes de regressão linear (significativos para  $p \leq 5\%$ ), para a temperatura de face fria e para as tensões normais nas direções X, Y e Z, respectivamente.

A Fig. 10 foi obtida a partir do módulo dos coeficientes de regressão para a temperatura da face fria enquanto as figuras 11 a 16 foram construídas com os coeficientes de regressão para as tensões normais (mínimas e máximas) para as direções X, Y e Z. Como se tratam de variáveis discretas, o módulo dos coeficientes de regressão podem ser utilizados como um indicativo da significância estatística das variáveis (ou interação de variáveis).

A Fig. 10 mostra que as duas propriedades determinantes para a temperatura da face fria são a condutividade térmica e o calor específico, ao passo que sua interação (c-k) apresenta uma importância bem menor comparada com as variáveis isoladamente. Também fica evidente, que embora a condutividade térmica apresente um coeficiente de regressão ligeiramente superior, ambas as variáveis possuem o mesmo grau de importância.

As Figs. 11 a 16 indicam que a principal variável a influenciar o perfil de tensões normais é o coeficiente de expansão térmica linear, seguido pelo módulo elástico e pela interação entre ambos ( $E \cdot \alpha_L$ ). Também nota-se que, embora apresentando menor destaque, a condutividade térmica e o calor específico também influenciam o perfil de tensões normais.

Quando apenas o módulo elástico é avaliado com valores em função da temperatura, nota-se que, em todos os casos, tanto a tensão mínima quanto a tensão máxima são subestimados. Por outro lado, quando apenas o módulo elástico é avaliado com valores para a temperatura ambiente, há uma superestimativa das tensões normais. Assim, embora o módulo elástico seja uma das propriedades que mais afete o perfil de tensões normais, a utilização de valores de E à temperatura ambiente pode ser empregado como um fator de segurança, uma vez que as tensões existentes no caso mais real são menores do que aquelas previstas pela simulação.

Tabela IV - Coeficientes de regressão para a temperatura de face fria e para as tensões normais nas direções X, Y e Z.

[Table IV - Regression coefficients for cold face temperature and normal stress at X, Y, and Z directions.]

Resposta	Coeficientes de regressão linear
Temperatura de face fria ( $T_f$ )	$T_f = -4,72 \cdot k - 4,56 \cdot c - 0,20 \cdot k \cdot c$ ( $r^2 = 1,00$ )
Tensão normal mínima na direção X ( $\sigma_{X-min}$ )	$\sigma_{X-min} = 51,84 \cdot \alpha_L - 50,93 \cdot E - 24,26 \cdot E \cdot \alpha_L + 11,52 \cdot c + 6,24 \cdot \alpha_L \cdot c + 5,63 \cdot k - 5,23 \cdot E \cdot c$ ( $r^2 = 1,00$ )
Tensão normal máxima na direção X ( $\sigma_{X-max}$ )	$\sigma_{X-max} = 44,19 \cdot \alpha_L - 25,63 \cdot E - 14,35 \cdot E \cdot \alpha_L + 6,50 \cdot c + 6,34 \cdot k + 3,84 \cdot \alpha_L \cdot k + 3,86 \cdot \alpha_L \cdot c - 1,11 \cdot E \cdot k - 1,07 \cdot E \cdot c$ ( $r^2 = 1,00$ )
Tensão normal mínima na direção Y ( $\sigma_{Y-min}$ )	$\sigma_{Y-min} = 38,82 \cdot \alpha_L - 16,86 \cdot E - 9,35 \cdot E \cdot \alpha_L + 7,55 \cdot k + 6,62 \cdot c + 4,18 \cdot \alpha_L \cdot k + 3,69 \cdot \alpha_L \cdot c$ ( $r^2 = 1,00$ )
Tensão normal máxima na direção Y ( $\sigma_{Y-max}$ )	$\sigma_{Y-max} = 38,84 \cdot \alpha_L - 17,58 \cdot E - 10,04 \cdot E \cdot \alpha_L + 7,01 \cdot k + 6,28 \cdot c + 4,06 \cdot \alpha_L \cdot k + 3,66 \cdot \alpha_L \cdot c$ ( $r^2 = 1,00$ )
Tensão normal mínima na direção Z ( $\sigma_{Z-min}$ )	$\sigma_{Z-min} = 39,86 \cdot \alpha_L - 20,05 \cdot E - 8,95 \cdot E \cdot \alpha_L + 7,57 \cdot k + 7,37 \cdot c$ ( $r^2 = 1,00$ )
Tensão normal máxima na direção Z ( $\sigma_{Z-max}$ )	$\sigma_{Z-max} = 43,77 \cdot \alpha_L - 13,02 \cdot E - 9,30 \cdot E \cdot \alpha_L + 6,31 \cdot k + 5,08 \cdot c + 4,06 \cdot \alpha_L \cdot k + 3,36 \cdot \alpha_L \cdot c$ ( $r^2 = 1,00$ )

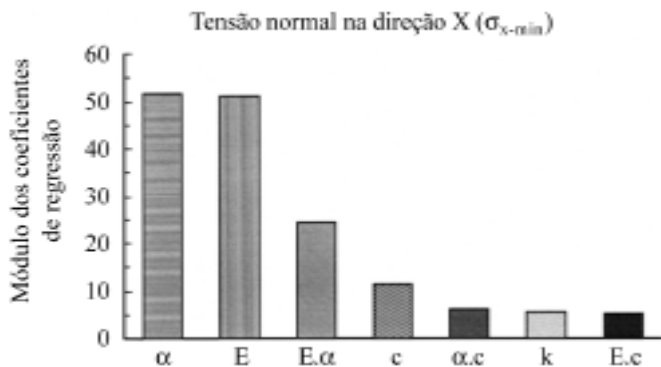


Figura 11: Módulo dos coeficientes de regressão para a tensão  $\sigma_{x-min}$ .  
 [Figure 11: Absolute value of regression coefficients for  $\sigma_{x-min}$  stress.]

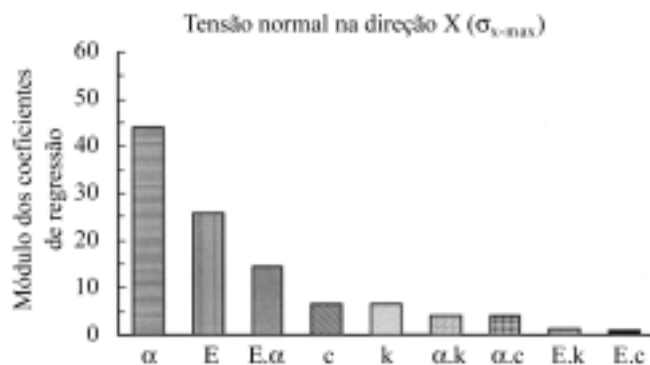


Figura 12: Módulo dos coeficientes de regressão para a tensão  $\sigma_{x-max}$ .  
 [Figure 12: Absolute value of regression coefficients for  $\sigma_{x-max}$  stress.]

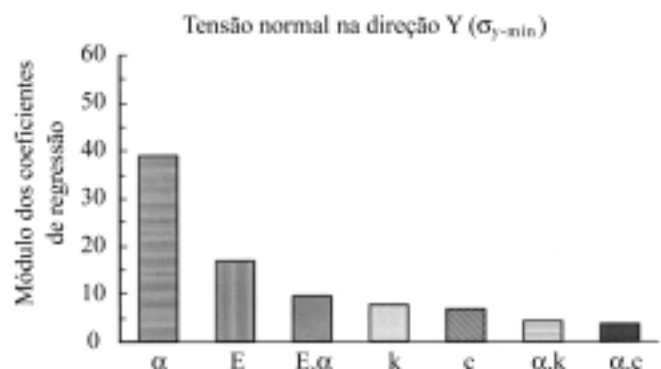


Figura 13: Módulo dos coeficientes de regressão para a tensão  $\sigma_{y-min}$ .  
 [Figure 13: Absolute value of regression coefficients for  $\sigma_{y-min}$  stress.]

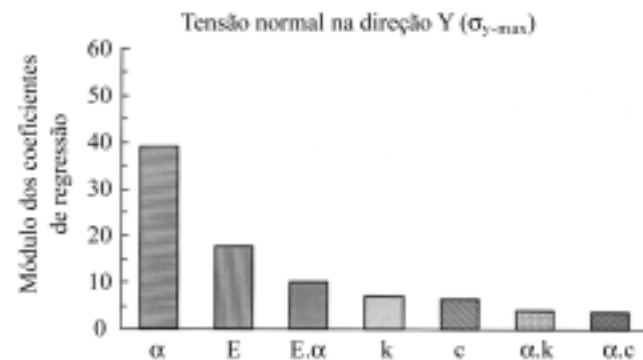


Figura 14: Módulo dos coeficientes de regressão para a tensão  $\sigma_{y-max}$ .  
 [Figure 14: Absolute value of regression coefficients for  $\sigma_{y-max}$  stress.]

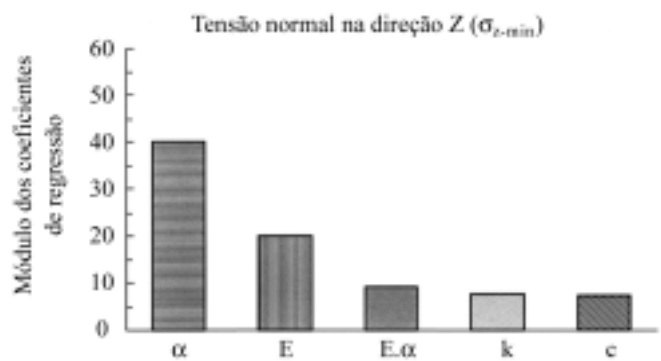


Figura 15: Módulo dos coeficientes de regressão para a tensão  $\sigma_{z-min}$ .  
 [Figure 15: Absolute value of regression coefficients for  $\sigma_{z-min}$  stress.]

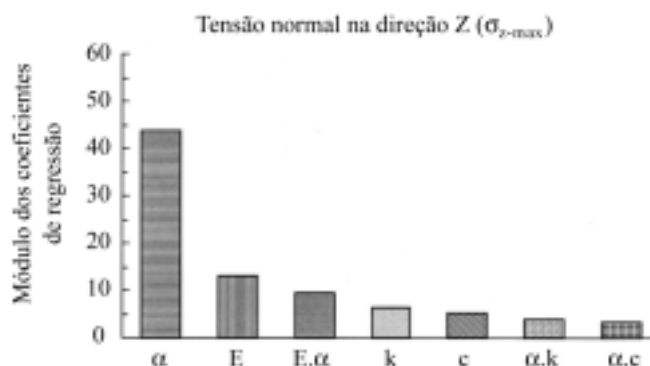


Figura 16: Módulo dos coeficientes de regressão para a tensão  $\sigma_{z-max}$ .  
 [Figure 16: Absolute value of regression coefficients for  $\sigma_{z-max}$  stress.]

## CONCLUSÕES

A análise qualitativa dos casos individuais, mostrou que o módulo elástico é a variável que mais afeta o perfil de tensões enquanto que a condutividade térmica apresenta uma influência menor sobre o perfil de tensões normais (desvios na faixa de 7-20%). A análise de variância confirmou estes resultados mostrando que as variáveis mais significativas, no sentido estatístico do termo, foram: o coeficiente de expansão térmica linear, o módulo elástico e a interação entre ambos, seguidos pela condutividade térmica e pelo calor específico avaliados em função da temperatura para

uma análise térmica seguida de uma simulação termomecânica. No caso de uma simulação térmica, somente as variáveis k e c são de maior importância. Embora apresentem uma importância menor, a condutividade térmica e o calor específico não podem ser desprezados. Deste modo, percebe-se a importância do uso da análise de variância ao invés da análise qualitativa dos casos individuais, uma vez que a ANOVA avalia simultaneamente todos os casos e permite quantificar as interações entre as variáveis. Este estudo reforça a necessidade da avaliação das propriedades em função da temperatura para se suprir um programa de simulação computacional, destacando-se principalmente o coeficiente de expansão térmica linear ( $\alpha_L$ ) e o módulo elástico (E). Ambas as



propriedades ( $\alpha$  e  $E$ ) são importantes para a determinação do perfil de tensões. Além disso, o coeficiente de expansão térmica linear é imprescindível para o cálculo de juntas de dilatação em revestimentos refratários não monolíticos.

O estudo também mostrou que quando apenas o módulo elástico é avaliado com valores para a temperatura ambiente ocorre uma superestimativa do perfil de tensões normais, ao passo que quando apenas esta propriedade é avaliada em função da temperatura, subestima-se o perfil de tensões.

## REFERÊNCIAS

- [1] S.A.R.C., COSMOS 2.0: manual eletrônico. Los Angeles, (1998). I CD-ROM.
- [2] R. Pereira, A. A. Torres, M. M. Akiyoshi, V. C. Pandolfelli, "Effect of the heating rate curve on the thermomechanical behavior of refractory materials", *Refractories Applications and News* (2001) 4-6.
- [3] A. E. Paiva, "Construção de um equipamento para a avaliação do módulo a altas temperaturas de cerâmicas refratárias através do método de ressonância de barras", Tese de Doutorado, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de S.

Carlos, S. Carlos. (a ser apresentada em 2002).

- [4] M. M. Akiyoshi, "Avaliação das propriedades térmicas e mecânicas visando à simulação computacional de cerâmicas refratárias", Diss. Mestrado, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de S. Carlos, S. Carlos (2001) 157pp.
- [5] M. M. Akiyoshi, M. G. Silva, A. P. Silva, V. C. Pandolfelli, "Condutividade térmica e sua correlação com a temperatura e a massa específica volumétrica de refratários sílico-aluminosos e aluminosos", *Cerâmica* **47**, 301 (2001) 19-27.
- [6] H. Hübner, H. Schuhbauer, "Experimental determination of fracture mechanics stress intensity calibration in four-point bending", *Engineering Fracture Mechanics* **9** (1977) 403-10.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6220: "Material refratário— determinação da massa específica aparente, massa específica aparente da parte sólida, absorção de água, porosidade aparente e porosidade total", S. Paulo, (1980) 1-4
- [8] B. Barros Neto, I. S. Scarminio, R. E. Bruns, "Planejamento e Otimização de Experimentos", 2 ed., Ed. Unicamp, Campinas, SP (1996) 133-166.

(Rec. 20/12/01, Ac. 19/04/02)