

# APLICAÇÃO DE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA VERIFICAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE ALGARAVIZ\*

Roberto Abreu Alencar<sup>1</sup>  
Dimas Henrique Barros Andrade<sup>2</sup>

## Resumo

O algaraviz é uma parte importante do sistema de sopro de um Alto-Forno, utilizado para direcionar o sopro e combustíveis injetados para a ventaneira, por conseguinte o interior do forno. O algaraviz consiste em uma carcaça metálica revestida de material refratário com resistência ao calor e uma camada de isolante térmico entre o refratário e a carcaça. Falhas em serviço de algaravizes costumam a gerar grandes danos materiais, financeiros e com grande risco à vida dos operadores, por isso o controle e inspeção da integridade estrutural e térmica dos algaravizes é de suma importância. A inspeção nos algaravizes é realizada a fim de se detectar precocemente pontos quentes que são indicativos de falhas estruturais no algaraviz. Portanto este artigo foi feito um modelo numérico de transferência de calor, a fim de se averiguar as condições do algaraviz, de forma a verificar se o algaraviz em condições normais de operação mantém as condições térmicas. O modelo revelou resultados satisfatórios de forma que em comparação com resultados de inspeções em peças em operação se obteve um erro de cerca de 8%.

**Palavras-chave:** Algaraviz; Transferência de Calor; Simulação; Pontos Quentes; Alto-Forno

## APPLICATION OF NUMERICAL METHODS FOR VERIFICATION OF BLOWPIPE OPERATING CONDITIONS

### Abstract

The blowpipe is an important part of the hot blast system of a blast furnace, where it directs the blast and injected fuels to the blast furnace, therefore inside of the furnace. It consists of a metal shell filled with refractory castable with heat resistance and a layer of thermal insulation between the refractory and the casing. Failures while in operation, the blowpipes usually generate great material damages, financial and great risk for the life of the operators, so the control and inspection of the structural and thermal integrity of the blowpipe is of great importance. Inspection in the blowpipe is performed in order to detect early hot spots that are indicative of structural failures in the blowpipe. Therefore, a numerical model of heat transfer was made, in order to analyze the conditions of the blowpipe to verify if, in normal conditions of operation, it maintains the thermal acceptance. The model showed satisfactory results, so when compared with the results of inspections on operating parts was obtained an error of about 8%

**Keywords:** Blowpipe; Heat Transfer; Simulation; Hot Spots; Blast Furnace

<sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica, Bacharel, Analista, Gerência Geral de Redução, Companhia Siderúrgica do Pecém, São Gonçalo do Amarante, Ceará e Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Metalúrgica, Mestre, Especialista, Gerência Geral de Redução, Companhia Siderúrgica do Pecém, São Gonçalo do Amarante, Ceará e Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O algaraviz é um componente vital do sistema de sopro de um alto-forno, onde o mesmo direciona o sopro de ar quente e a injeção de combustíveis para as ventaneiras e, por conseguinte o interior do forno. O algaraviz consiste em uma carcaça de aço revestida com material refratário, com uma camada de material isolante no meio a fim de aumentar a eficiência térmica do mesmo. Na figura 1 pode-se observar um desenho esquemático de um algaraviz.

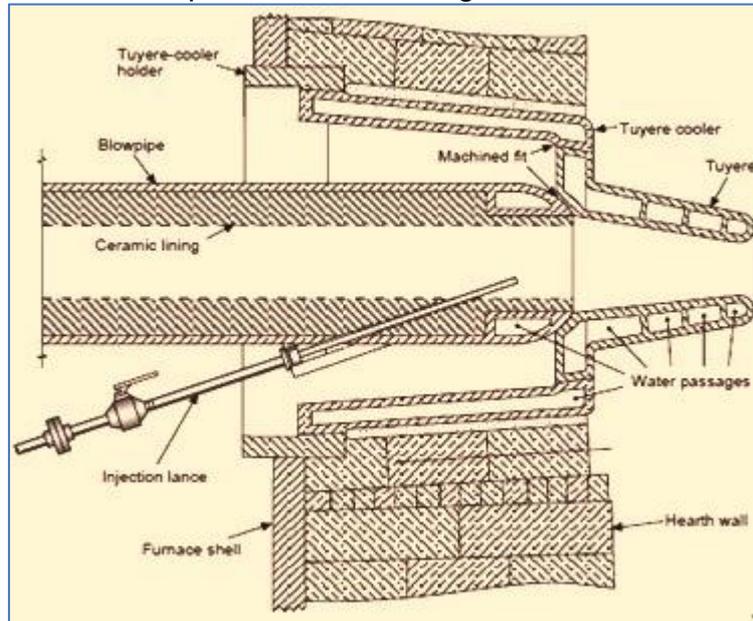


Figura 1. Desenho esquemático algaraviz e ventaneira. Fonte: [1]

Devido à natureza de sua operação, um algaraviz é uma peça que deve ter uma alta confiabilidade operacional e de segurança, pois acidentes envolvendo rompimentos de carcaça de algaravizes geram grandes danos materiais e possivelmente às pessoas. Portanto, a confiabilidade operacional de um algaraviz não pode ser facilmente melhorada por vias tradicionais, visto que é uma peça que não tem grande frequência de falha e suas falhas são sempre catastróficas, além de não existirem muitas peças em serviço e as mesmas terem longa vida útil.[2]

Um dos maiores indicativos de fim de vida útil dos algaravizes é o aparecimento de pontos quentes na estrutura da carcaça, estes pontos quentes aparecem devido, problemas com o retratamento, desde desgaste até trincas e micro trincas formadas no processo.

Estes pontos quentes podem gerar deformações na carcaça e alterar seu estado de tensão. Visto que o algaraviz, trabalha com pressões de ordem de 4 kgf/cm<sup>2</sup>. Podendo gerar trincas na mesma e por fim seu rompimento, por isso é de suma importância o rastreamento dos pontos quentes nas peças em operação.

Os impactos das falhas em algaravizes foi mapeado por [2] e resumido na tabela 1.

**Tabela 1.** Impactos da falha de algaraviz [2]

Falha	Exemplo	Tempo de Parada	Impacto na Produtividade	Impacto Financeiro Estimado
Súbita, parcial	Ponto quente na carcaça, falha na lança de carvão, Sopro no flange, inchaço na carcaça	90-120 min	400-540t	US\$ 105.000
Degradação	Termografia detectando desgaste precoce do refratário	90-120 min	400-540t	US\$ 85.000
Disruptiva	Rompimento da carcaça	90-120 min	400-540t	US\$ 105.000
Catastrófica	Rompimento da carcaça com danos ao sistema de sopro.	16h a 3d	4.300 – 18.500 t	US\$ 750.000 – 3.700.000

Neste artigo foi proposta a confecção de um modelo matemático tridimensional de transferência de calor, a fim de se averiguar o estado térmico de um algaraviz em condições de trabalho, em um alto-forno com produção de 8800 t/d.

O modelo foi desenvolvido utilizando o método dos elementos finitos, para as condições de contorno do modelo foram feitas medições em área de forma direta e indireta. Também foi feito um modelo fluidodinâmico a fim de se calcular os coeficientes de transferência térmica gerado pelo sopro de ar quente.

A comprovação do modelo foi realizada baseando-se em medições por termografia das peças, retirando da comparação peças que já estivessem em condição final de vida útil.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

#### 2.1.1 Modelo Matemático.

Para o desenvolvimento do modelo matemático foi utilizado o método dos elementos finitos para a resolução das equações de transferência térmica com modelagem acoplada fluidodinâmica da transferência térmica do sopro de ar quente.

A equação de um balanço térmico em um sólido pode ser dada pela Equação (1), em coordenadas cartesianas.

$$\rho C_p \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} K_x + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} K_y + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} K_z + q''' \quad (1)$$

Em que  $C_p$  é a capacidade térmica do material,  $q'''$  é a geração de calor do material por unidade de volume e  $K_i$  é a condutividade térmica do material. Para este modelo

foi considerada que a transferência de calor se dá no estado estacionário e sem geração de calor interna onde temos que a equação se resume a Equação (2).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} K_x + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} K_y + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} K_z = 0 \quad (2)$$

As condições de contorno propostas, são em que todas as superfícies têm condições de convecção, em que:

$$\{q\}\{\eta\} = -h(T_a - T_s) \quad (3)$$

Em que  $h$  = coeficiente de convecção da superfície e  $\{\eta\}$  é o vetor normal da superfície.

A superfície externa do modelo do algaraviz está sujeito a radiação, Equação (4):

$$\{q\}\{\eta\} = -\varepsilon\sigma(T_a - T_s) \quad (4)$$

Em que  $\varepsilon$  é o coeficiente de emissividade da superfície e  $\sigma$  é o coeficiente de Stefan-Boltzman.

Para a resolução desta equação foi utilizado o método dos elementos finitos no qual, utilizando o princípio variacional as equações do balanço térmico podem ser reduzidas, mediante a discretização do modelo, a Equação (5).

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (5)$$

No qual se tem que  $[K]$  é a matriz de condução térmica,  $\{T\}$  é o vetor global de temperatura e  $\{Q\}$  é o vetor global de fluxo de calor. Para calcular as matrizes de condução e fluxo de calor é feito como o descrito na Equação (6) [3].

$$\begin{aligned} [K] &= \sum [K^e] \\ \{Q\} &= \sum \{Q^e\} \end{aligned} \quad (6)$$

Em que  $[K^e]$  é a matriz geral da condução térmica nos elementos e  $\{Q^e\}$  é o vetor de fluxo de calor dos elementos, então fazendo estas equações na forma integral se em que se tem as Equações (7) e (8) :

$$\begin{aligned} [K^e] &= \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_S h [N]^T [N] dS + \int_S \varepsilon\sigma [N]^T [N] dS \\ &= \iiint [B]^T [D] [B] dx dy dz + \iint h [N]^T [N] dx dy \\ &\quad + \iint \varepsilon\sigma [N]^T [N] dx dy \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \{Q\} &= \int_S q^*[N^s]dS_q + \int_{S_c} hT_a[N^s]dS_c + \int_{S_c} \varepsilon\sigma T_a[N^s]dS_c \\ &= \iint_S q^*[N^s]dxdy + \iint_S hT_a[N^s]dxdy + \iint_S \varepsilon\sigma T_a[N^s]dxdy \end{aligned} \quad (8)$$

Em que a matriz [B] é a matriz de operador diferencial, a matriz [D] é uma matriz de condutividade térmica e a matriz  $[N^s]$  é a matriz da função de forma da interpolação entre os valores nodais das superfícies do modelo [3].

### 2.1.2 Geometria em CAD utilizada

Foram desenvolvidas as condições de operação e a geometria em *software* de CAD 3D. Nas figuras 2 e 3, seguem os desenhos em 2D e 3D.

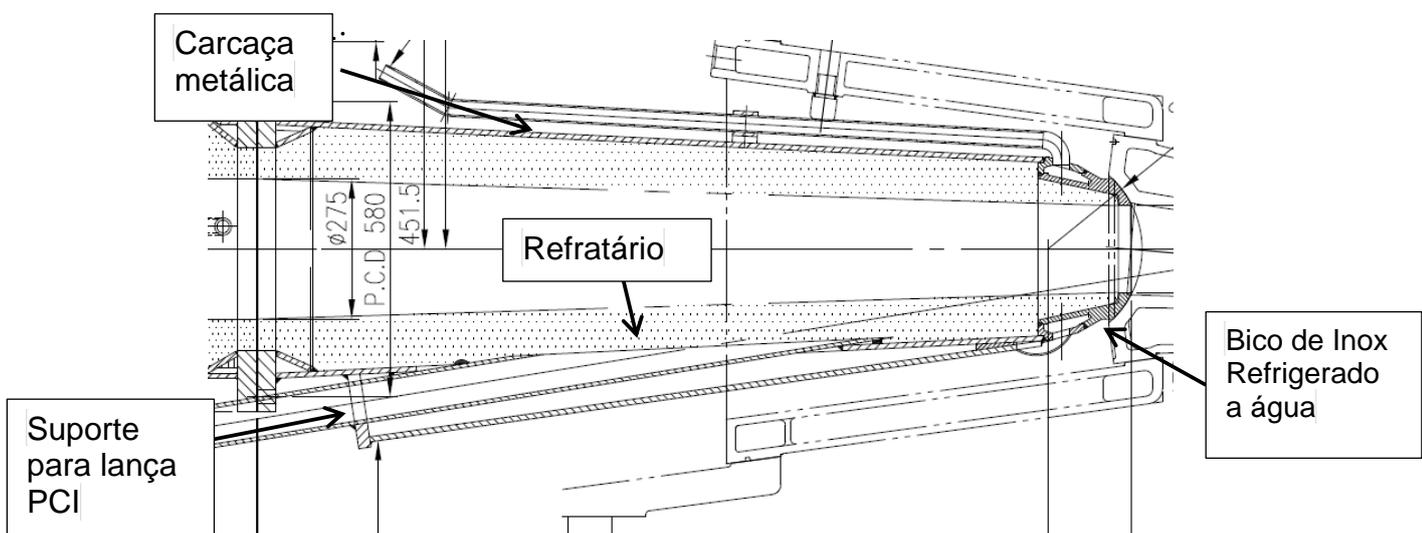


Figura 2. Desenho 2D do algaraviz modelado.

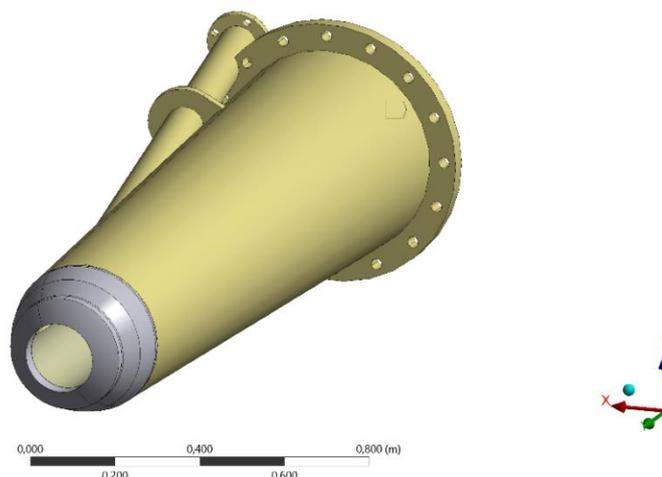


Figura 3. Modelo 3D utilizado para a modelagem matemática do algaraviz.

### 2.1.3 Condições de contorno do modelo

As condições de contorno utilizadas são mostradas na tabela 2 e figura 4.

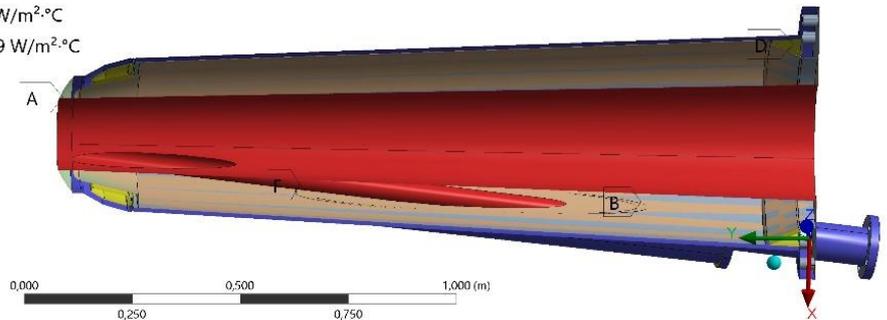
#### C: Steady-State Thermal

Steady-State Thermal

Time: 1, s

02/12/2018 18:22

- A** Sopros de Ar quente
- B** Convecção externa algaraviz: 45, °C, 25, W/m<sup>2</sup>.°C
- C** Resfriamento Bico Algaraviz: 28,5 °C, 45159 W/m<sup>2</sup>.°C
- D** Resfriamento Flange algaraviz: 28,5 °C, 45159 W/m<sup>2</sup>.°C
- E** Radiação externa : 45, °C, 0,89
- F** Convecção PCI



**Figura 4.** Condições de contorno do modelo aplicadas na geometria do algaraviz.

Foi considerado 1250°C de temperatura de sopro, com pressão de sopro a 3,85 Kg/cm<sup>2</sup>.

Segue na tabela 2 as condições de contorno utilizadas no modelo apontadas na figura 4.

**Tabela 2.** Valores das condições de contorno utilizadas no modelo matemático.

Condições de Contorno utilizadas no modelo		
Letra da Condição	Descrição	Valor
<b>A</b>	Convecção do sopro de Ar quente	123 ~ 291 [W/m <sup>2</sup> .°C]
<b>B</b>	Convecção da superfície externa do algaraviz	25 [W/m <sup>2</sup> .°C]
<b>C</b>	Convecção de resfriamento a água do bico do algaraviz	46.967 [W/m <sup>2</sup> .°C]
<b>D</b>	Convecção de resfriamento a água do flange do algaraviz	46.967 [W/m <sup>2</sup> .°C]
<b>E</b>	Coefficiente de emissividade da superfície externa do algaraviz	0,89
<b>F</b>	Convecção do fluxo da injeção de PCI	591 [W/m <sup>2</sup> .°C]

Os valores utilizados para as condições A e F presentes na tabela 2, foram calculadas via simulação numérica fluidodinâmica, para utilizar valores para o coeficiente de convecção mais próximos das condições em operação.

O valor utilizado para a condição B foi retirado da referência [4].

Para as condições C e D, foi necessária a realização de medida indireta, realizada de acordo com as Equações de (9) a (12).

Para a dedução foi considerado o balanço térmico da Equação (9).

$$Q_{superfícies} = Q_{água} \quad (9)$$

O sistema de resfriamento do algaraviz é baseado no fenômeno de convecção então, tem-se:

$$Q_{superficies} = h \cdot A \cdot (T_{superficies} - T_{\infty}) \quad (10)$$

sendo

$h$  = coeficiente convectivo

$A$  = área de contato

Considerando que todo o calor ganho pela água do sistema seja exclusivamente para o aumento da sua temperatura, se tem:

$$Q_{\acute{a}gua} = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i) \quad (11)$$

sendo

$m$  = massa de água no sistema em determinado momento;

$C_p$  = capacidade termica da agua.

Manipulando as equações se obtém para o cálculo do coeficiente convectivo da água baseado somente na variação de temperatura da água:

$$h = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)_{\acute{a}gua}}{h \cdot A (T_{superfície} - T_i)} \quad (12)$$

Para o cálculo do resultado das condições de contorno C e D da tabela 2 a fórmula indicada pela Equação (12) foi aplicada em planilha eletrônica e alimentada com os dados de temperatura das águas de entrada e retorno do sistema de resfriamento dos algaravizes.

## 2.2 Resultados e Discussões

Os resultados de pós processamento do modelo foram divididos por cada peça do modelo em CAD do algaraviz, pois o algaraviz utilizado como base do modelo é feito de três peças com materiais diferentes:

- Carcaça feita de aço estrutural SAE 1020;
- Revestimento Refratário de refratário baseado em sílica;
- Bico de Inox Austenítico para alta temperatura (Alto Níquel).

Segue na tabela 3 as propriedades térmicas consideradas para os materiais utilizados no modelo.

**Tabela 3.** Propriedades térmicas dos materiais utilizados.

Peça	Material	Condutividade térmica
Armadura	ASTM 1015	60,5 W/m.K
Refratário	CEKAST-70-ALG	1,18 W/m.K
Bico	ACI-ASTM CN3M (J94652)	13 W/m.K

Não foram considerados defeitos de fabricação na peça, por tanto o trabalho é feito em condições ideais de projeto.

Sendo a carcaça a região do algaraviz que tem a menor resistência térmica e também a região onde se pode fazer inspeções, é onde se pode obter dados sobre a condição de vida do algaraviz.

A temperatura máxima permitida, em operação do algaraviz é de 350°C, onde com 300°C já se acionam dispositivos de segurança, para manter a segurança do mesmo até a troca.

Com o aumento da temperatura os aços tendem a uma perda de resistência mecânica.

De acordo com [5], a faixa de temperatura onde os elementos de aço formados a frio têm uma redução de propriedades mecânicas é por volta de 550°C à 600°C.

Segundo a norma NBR 8800 [6] para projetos de estruturas e peças metálicas, as cargas não próprias e não causadas por eventos como vibração e ventos, tem de ser majoradas por um fator de 1,5 vezes. Assim as cargas limites de projeto são por volta de 67% das cargas reais limite para os materiais.

Considerando a carga gerada pela temperatura como uma carga não natural, isto é, não gerada pelo peso da estrutura, e considerando as informações dadas nas referências [5] e [6], a temperatura limite para o projeto, com fator de segurança, é de 368°C.

Sendo este um valor bem próximo ao definido como limite pela definição operacional do equipamento.

A figura 5 é mostrado o resultado das temperaturas para a carcaça do algaraviz.

**C: Steady-State Thermal**

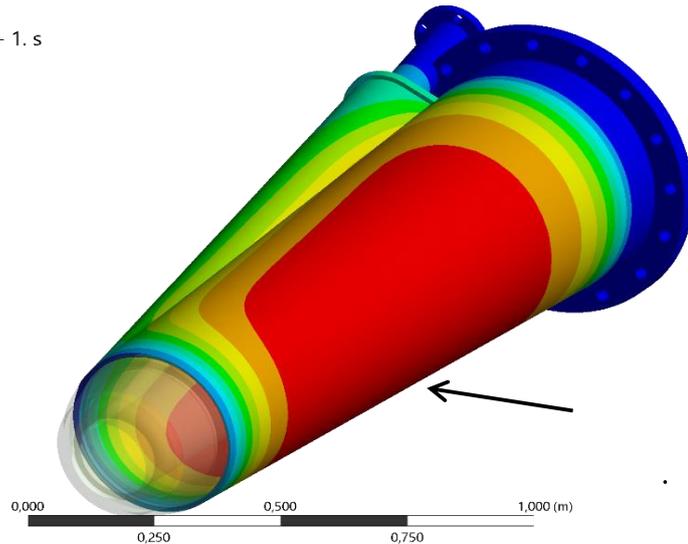
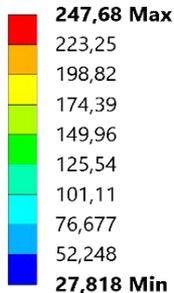
Temperature - armadura .1|PartBody|Chamfer.2 - 1. s

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1

02/12/2018 18:30



**Figura 5.** Contorno de temperatura da Carcaça do Algarviz, a seta apresenta campo de região com mais alta temperatura.

Pode-se observar que a região de maior carga térmica se encontra na área lisa oposta a região de posição da lança de PCI onde, nesta região tem uma convecção de resfriamento devido ao fluxo de ar do PCI, mais frio que o fluxo provindo do sopro de ar quente. As regiões com menor temperatura são as regiões mais próximas do sistema de resfriamento do algarviz, que se encontra no bico e no flange.

Na figura 6 pode -se observar o contorno de temperatura do bico do algarviz.

**C: Steady-State Thermal**

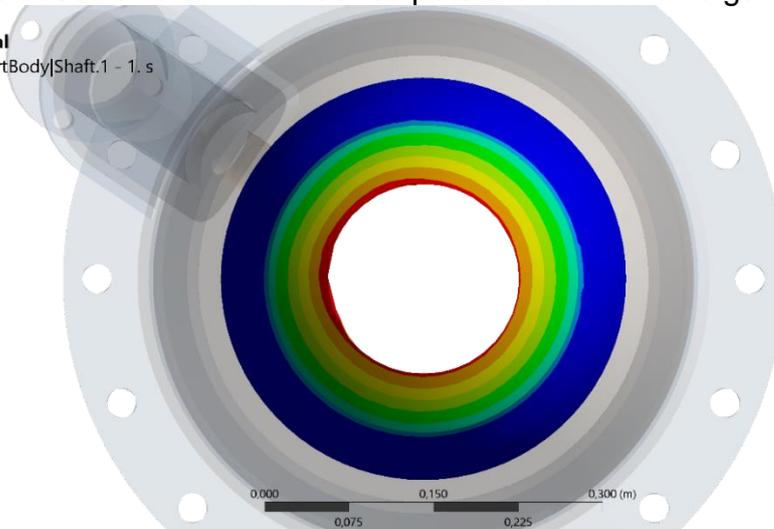
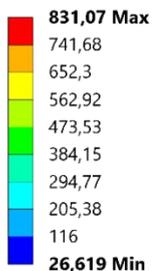
Temperature - bico.1|PartBody|Shaft.1 - 1. s

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1

02/12/2018 19:07



**Figura 6.** Contorno de temperatura do bico do algarviz.

Pode-se observar que a região mais próxima da passagem do fluxo do bico é a região mais quente, devido a esta região ser menos protegida por refratário, figura 7.

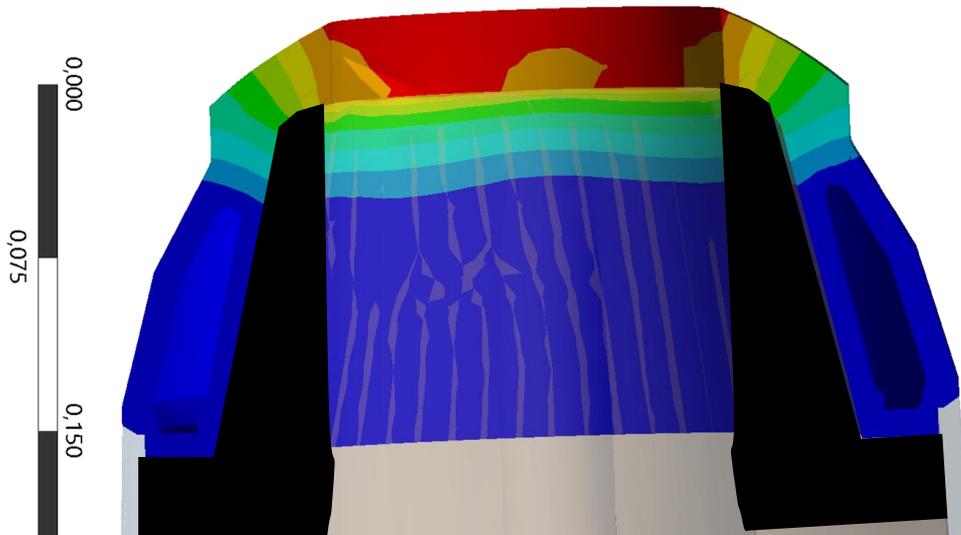


Figura 7. Região em preto indica como o refratário está posicionado em relação ao bico do algaraviz.

Devido o bico do algaraviz sofrer esta alta carga térmica, tem-se que além de ser resfriado a água, é feito de um material diferente da armadura, normalmente feito de uma liga de aço inox de alto teor de níquel, com capacidade de manter as propriedades mecânicas mesmo em altas temperaturas, assim mantendo estabilidade mecânica da peça mesmo a temperaturas da ordem de 800°C.

Na figura 8 tem-se o contorno térmico da peça refratária do algaraviz.

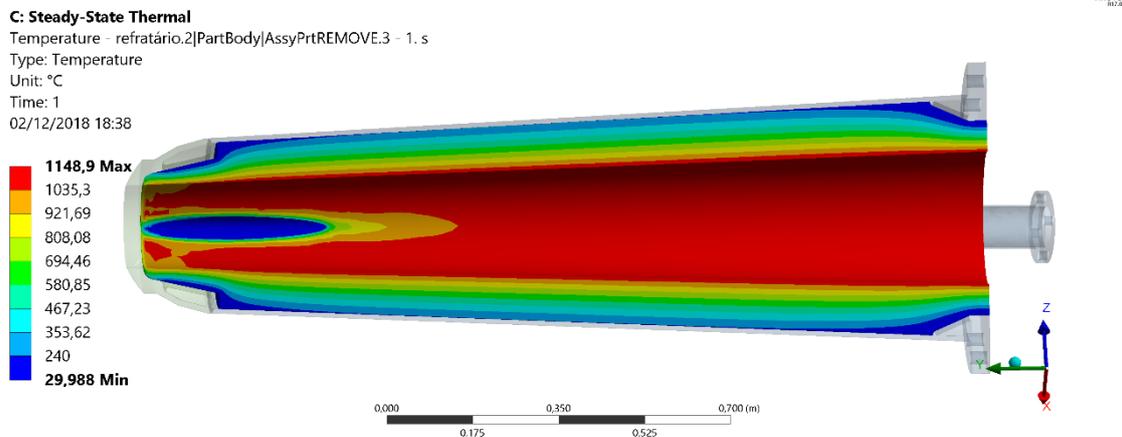
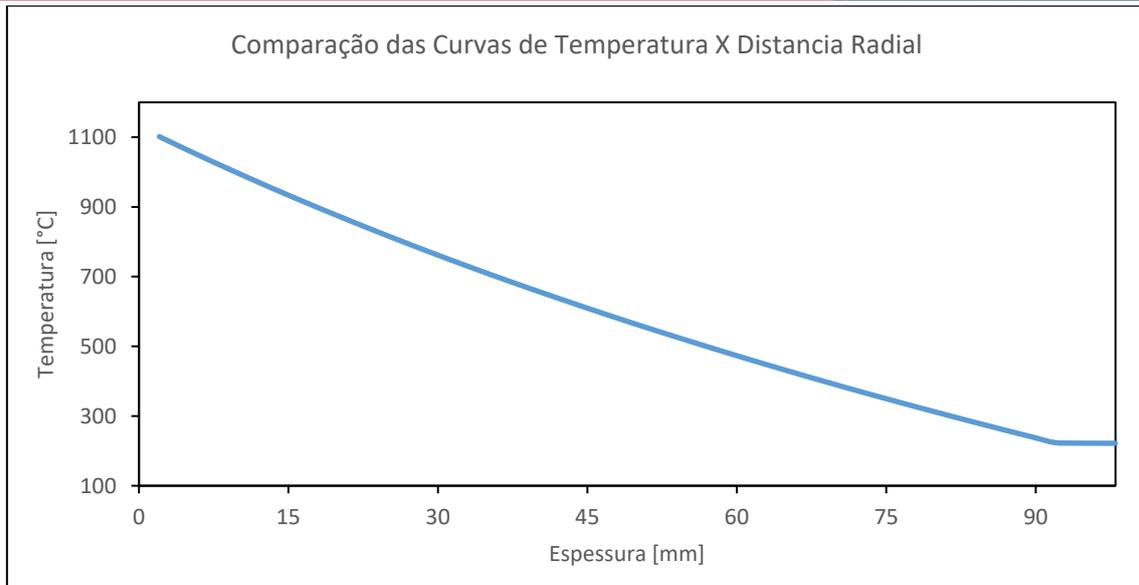


Figura 8. Contorno de temperatura para o revestimento refratário.

Pode-se observar que o refratário tem grande capacidade de isolamento térmico, justamente a proposta de seu uso, suportando gradientes térmicos de cerca de 1150°C até aproximadamente 250°C, mostrando a importância da integridade física do refratário, além da importância de sua fabricação, visto que a camada de refratário no modelo não tem defeitos.

Observa-se que se houver qualquer desvio em relação a sua construção, espessura e integridade, pode comprometer a confiabilidade de todo o algaraviz. No gráfico 1 é mostrada a curva de temperatura por espessura de refratário.



**Gráfico 1.** Temperatura x espessura do revestimento refratário.

A validação dos resultados do modelo, foi feita baseada nos resultados de inspeção termográfica dos conjuntos de sopro, durante o período do mês de setembro de 2018. Foram excluídos dos dados os algaravizes em condição crítica, isto é já com resfriamento força na região da carcaça.

Na tabela abaixo segue a comparação entre a média dos valores obtidos pela inspeção na área e o valor obtido pela simulação.

**Tabela 4.** Valores obtidos no modelo e em inspeção na área.

Valor Simulação	Média Operação	Erro
247,98	269,0	7,81%

### 3 CONCLUSÃO

A aplicação do método dos elementos finitos tem grandes horizontes na indústria. Devido a sua capacidade de modelar e prever resultados em inúmeras aplicações. O modelo utilizado para prever a temperatura de um algaraviz durante uso em processo, gerou resultados compatíveis com o que é encontrado nas inspeções no chão de fábrica.

Assim, o modelo pode ser utilizado para projeto de melhoria do projeto atual do algaraviz, fazendo que a validação de mudanças, seja mais rápida e confiável.

### AGRADECIMENTOS

Agradeço todo o apoio e suporte da equipe de técnicos e analistas do Alto-Forno da Companhia Siderúrgica do Pecém, onde a sua ajuda foi essencial para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Satyendra IG. Blast Furnace Tuyeres and Tuyeres Stocks; Available from: <http://ispatguru.com/blast-furnacetuyeres-and-tuyere-stocks/>.
- [2] Copeland C, Street S. Improving the Reliability of Blast Furnace Blowpipes. 2015; p. 43 – 55
- [3] Kumar S. Heat Transfer Analysis and Estimation of Refractory Wear in an Iron Blast Furnace. ISIJ International. 2005 janeiro;8(45):1122 – 1128.
- [4] B Neto C. Transferência de Calor. São José: Instituto Federal de Santa Catarina; 2010.
- [5] de Castro Almeida SJ, Munaiar, Neto J ,de Moura Correia AJP, Nardin SD, Malite M. Análise do comportamento a temperaturas elevadas de elementos de aço formados a frio comprimidos considerando restrição ao alongamento térmico [Doutorado em Engenharia Civil]. Universidade de São Paulo; 2012. Available from: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-10012013-085122/>.
- [6] 8800 N. NBR 8800 - Projeto em estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios; 2008.