

# AVALIAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE PERDAS DE ENERGIA PELAS SUPERFÍCIES DE FORNOS CATENÁRIOS UTILIZANDO TERMORGRAFIA

Silva, J. A.  
Praça Frei Orlando, 170, São João del Rei - MG, 36307-352  
Universidade Federal de São João Del Rei  
Abreu, R. D. A.  
SKF do Brasil  
Brito, J. N.  
Universidade Federal de São João Del Rei  
Figueiredo, F. J.  
Universidade Federal de São João Del Rei  
Relou, M. P. M.  
SKF do Brasil

## RESUMO

*O presente trabalho tem como objetivo apresentar a utilização da Termografia como ferramenta de quantificação da perda de energia em fornos catenários utilizados para queima de cerâmica vermelha. Os fornos catenários utilizados neste trabalho possuem volume útil entre 0,6 e 1,42 m<sup>3</sup>, podendo chegar a uma temperatura de cerca de 1100 °C. Usando a análise qualitativa, provenientes dos termogramas obtidos através Câmera Infravermelho E65 FLIR, foi possível identificar pontos críticos nas paredes dos fornos, o que permitiu avaliar o comportamento da massa refratária formulada para o isolamento. Já por meio da termografia quantitativa, calculou-se a perda térmica total pelas suas paredes, o que possibilitou inferir a suas eficiências térmicas. Adotou-se, para o cálculo de perda térmica, os mecanismos de convecção e radiação.*

Palavras-chave: Termografia, Fornos Catenários, Quantificação de Perda Térmica

## INTRODUÇÃO

A termografia infravermelha tem um extenso campo de aplicação que vai desde uma simples medida de temperatura à localização de defeitos em sistemas complexos, (1). Contudo nessas aplicações a termografia busca essencialmente as perdas qualitativas das assimetrias térmicas dos processos.

O presente trabalho tem como objetivo utilizar a Termografia como ferramenta para quantificar, através do cálculo da perda térmica, a perda de energia de fornos. Dessa forma é possível conhecer a eficiência térmica o que pode resultar numa reavaliação do revestimento do forno.

## Fornos catenários

A metodologia utilizada para os cálculos de quantificação térmica foi aplicada em dois fornos catenários construídos na Universidade Federal de São João Del Rei - UFSJ. Através da engenharia adequada dos instrumentos e materiais de construção foram construídos fornos protótipos que serão reproduzidos em algumas comunidades de artesãos do Vale do Jequitinhonha, (2).

Na Fig. (1) tem-se o primeiro forno construído (Forno 1) que possui volume por volta de  $0,4 \text{ m}^3$  de volume útil, podendo chegar a uma temperatura de cerca de  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

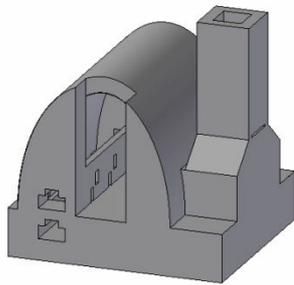


Figura 1. Forno Catenário 1

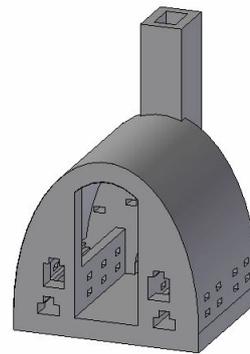


Figura 2. Forno Catenário 2

A Fig. (2) mostra o segundo forno construído (Forno 2) com volume útil por volta de  $1,42 \text{ m}^3$ , podendo chegar a uma temperatura de cerca de  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Todos os testes foram realizados com ambos os fornos contendo peças cerâmicas em seu interior. Cerca de 20% do calor útil fornecido é utilizado para aquecimento das peças cerâmicas, (3).

## PROCEDIMENTOS UTILIZADOS

Uma câmara de infravermelhos mede e reproduz em imagens a radiação de infravermelhos emitida pelos objetos. O fato de a radiação resultar da temperatura e da emissividade da superfície do objeto possibilita que a câmara calcule e mostre essa temperatura, (4).

Para medir a temperatura com precisão é, portanto, necessário compensar os efeitos de um determinado número de diferentes fontes de radiação, isto é feito online e automaticamente pela câmara através da configuração do valor da distância entre o objeto e a câmera, temperatura média refletida pelo objeto e principalmente de sua emissividade.

### Câmara Infravermelho E-65 FLIR

As temperaturas das paredes dos fornos catenários foram obtidas pelos termogramas provenientes da Câmara Infravermelho E65 FLIR, Fig. (3). Possui sensibilidade térmica de 0,10°C a 30°C, um detector matriz de Plano Focal, microbolômetro sem refrigeração de 160 x 120 pixels e amplitude espectral entre 7,5 e 13 µm. Esse equipamento permite, entre outras coisas, a identificação de uma temperatura máxima de 900 °C, (5).



Figura 3. Câmara Infravermelho E65 FLIR

Para a montagem de algumas imagens coletadas foi utilizado o software Image Builder. Utilizou-se também o software de apoio ThermaCAM Reporter 7.0, o que permitiu a realização de análises mais detalhadas dos termogramas e montagem de bancos de dados para análise.

### Métodos de Aplicação da Termografia

Usando análise qualitativa dos termogramas foi possível identificar pontos críticos nas paredes dos fornos, que não são possíveis de identificar numa inspeção visual, o que permitiu avaliar o comportamento da massa refratária formulada para o isolamento na construção dos fornos. Na construção do Forno 1 surgiram trincas na superfície das paredes, Fig. (4).



Figura 4. Trincas nas Paredes do Forno 1    Figura 5. Reposição de massa refratária

Essas imperfeições foram, aparentemente, sanadas com a reposição de massa refratária, como mostra a Fig. (5).

Contudo, através dos termogramas da Fig. (6) foi possível identificar, através das áreas mais claras, assimetrias devido aos defeitos de construção. Métodos de Aplicação da Termografia.

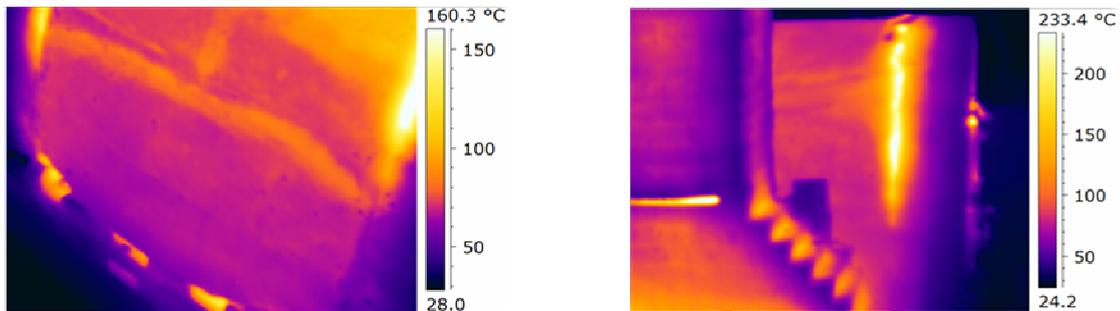


Figura 6. Pontos críticos no Forno Catenário 1

Também foram identificados pontos críticos nas paredes do Forno 2. A Fig. (7) mostra, por meio das áreas mais claras, poucos pontos críticos causados por prováveis fissuras no revestimento interno. Pode-se considerar como “pontos críticos” os orifícios de circulação de ar do forno, já que através destes tem-se uma perda maior de energia térmica.

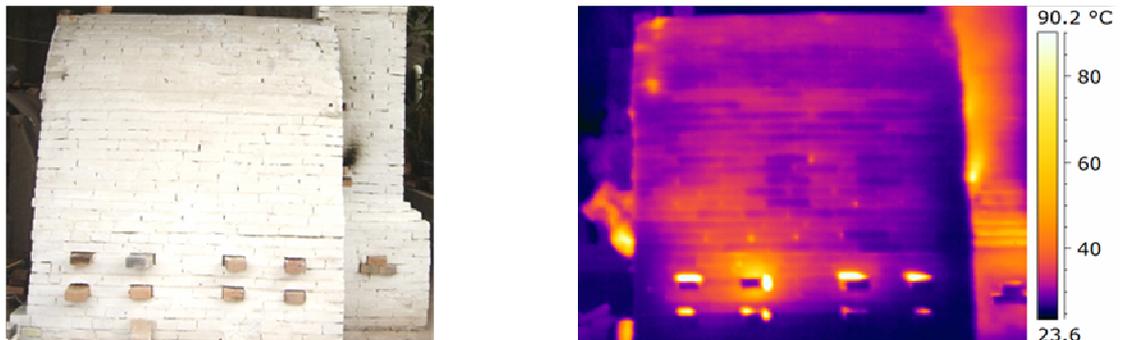


Figura 7. Pontos Crítico na superfície do Forno 2

Também é possível identificar através do termograma da Fig. (7) uma área, mais próxima a fornalha (canto inferior esquerdo do termograma), onde o combustível foi sendo depositado, o que foi corrigido com a distribuição do mesmo homogeneamente pela fornalha.

Já por meio da termografia quantitativa, calculou-se a perda térmica total pelas paredes o que possibilitou inferir a eficiência térmica dos fornos. Adotou-se, para o cálculo de perda térmica, os mecanismos de convecção e radiação.

## Mecanismo de Convecção e Radiação

Foi adotado, para o cálculo de perda térmica, o método que parte dos mecanismos de convecção e radiação. A partir da temperatura das áreas de aquecimento das paredes dos fornos, obtida pelos termogramas, foi calculada a quantidade de calor perdida pela superfície. Isto é possível através da equação (A), onde  $Q_{\text{Total}}$  é a quantidade total de calor perdida,  $Q_{\text{Convecção}}$  é a quantidade de calor perdida por convecção e  $Q_{\text{Radiação}}$  é a quantidade de calor perdida por radiação.

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{Convecção}} + Q_{\text{Radiação}} \quad (\text{A})$$

A perda de energia por convecção na parede externa do forno foi determinada pela equação (B), através da distribuição de temperaturas do termograma, proveniente do software de apoio ThermaCAM Reporter 7.0, onde  $h_{\text{Convecção}}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $T_{(x,z)}$  é a temperatura (fornecida pelo termograma) de cada área analisada,  $T_{\text{ar}}$  é a temperatura do ar; e A é a área submetida à análise.

$$Q_{\text{Convecção}} = \int_{\text{Área}} h_{\text{Convecção}} \cdot (T_{(x,z)} - T_{\text{ar}}) \cdot dA \quad (\text{B})$$

A perda de energia por radiação na parede externa do forno será determinada pela equação (C), respectivamente, através da distribuição de temperaturas do termograma, onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman igual a  $5.67 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup> k<sup>4</sup>),  $\epsilon$  ( $\lambda, T$ ) é a emissividade e  $T_{\text{mr}}$  é a temperatura média radiante (temperatura média refletida das superfícies que trocam calor por radiação com a parede externa do forno). Nos cálculos a  $T_{\text{mr}}$  é considerada igual a temperatura ambiente.

$$Q_{\text{Radiação}} = \int_{\text{Área}} \sigma \cdot \epsilon(\lambda, T) \cdot (T_{(x,z)}^4 - T_{\text{mr}}^4) \cdot dA \quad (\text{C})$$

## ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para desenvolvimento dos modelos matemáticos de troca de calor, o presente trabalho apresenta a metodologia descrita por Ozisik, (6).

Foram desenvolvidos algoritmos baseados nas teorias de convecção e radiação, implementados em Excel. Esse aplicativo permitiu, a partir das temperaturas tomadas externamente por termografia, o cálculo do número de calorias, trocados com o ambiente em um dado período de tempo.

## Quantificação de Perda Térmica nos Fornos Catenários 1 e 2

Nas análises os fornos foram divididos em cinco regiões, VISTAS A,B,C,D e a Chaminé, de acordo com a Fig. (8).

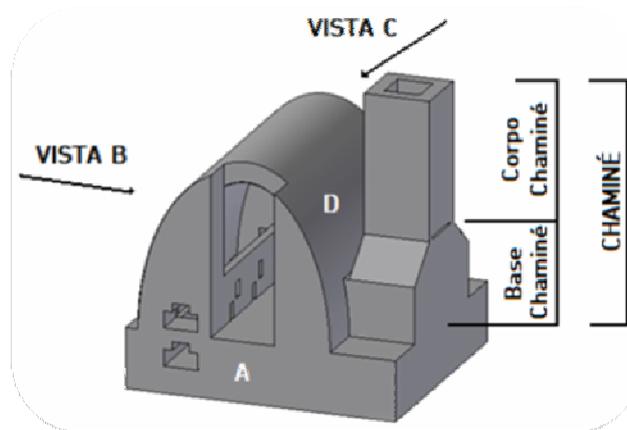


Figura 8. Vistas A,B,C,D e CHAMINÉ

A chaminé, analisada separadamente das paredes dos fornos, foi dividida em duas partes, o Corpo da Chaminé e a Base da Chaminé, Fig. (8). A Base da Chaminé do Forno 1 ainda foi subdividida em cinco regiões, VISTAS A',B',C',D' e E', como demonstra a Fig. (9)., já a Base da Chaminé do Forno 2 foi subdividida em seis regiões, VISTAS A'',B'',C'', A'' *Inclinada*, B'' *Inclinada* e C'' *Inclinada*, Fig. (10).

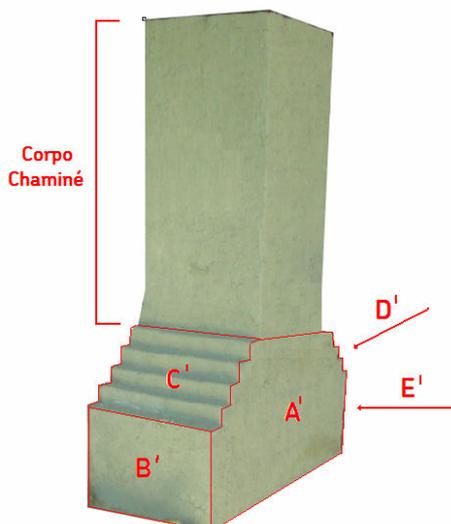


Figura 9. Vistas da Chaminé, Forno 1

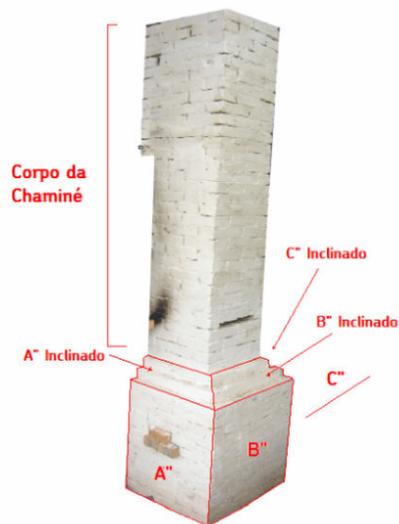


Figura 10. Vistas da Chaminé, Forno 2

As vistas C', D', A'' *Inclinada*, B'' *Inclinada* e C'' *Inclinada* foram analisadas levando em consideração um ângulo de inclinação igual a 45°. No caso das vistas B

e D de ambos os fornos considerou-se também inclinação igual a 60°. As temperaturas utilizadas para os cálculos de troca térmica correspondem às temperaturas médias de cada vista.

Para o desenvolvimento dos modelos matemáticos as paredes dos fornos foram consideradas placas verticais. O regime adotado para os cálculos deve ser o de Convecção Livre, segundo o critério para o estabelecimento do regime de convecção descrito pela Tab. (1), onde Gr é o número de Grashof e Re é o número de Reynolds, (7).

Tabela 1. Critério para Estabelecimento do Regime de Convecção

Critério	Regime de Convecção
$Gr/Re^2 \gg 1$	Livre
$Gr/Re^2 \approx 1$	Combinada
$Gr/Re^2 \ll 1$	Forçada

Convecção Livre ou Natural não sofre ações de Forças Operatrizes externas, (8). A velocidade do vento no local de construção dos fornos é desprezível. Mesmo considerando uma velocidade igual a 1 m/s, velocidade elevada para o ambiente, a relação entre o número de Grashof (Gr) e o de Reynolds (Re), para o Forno 1, seria maior que 1 para qualquer uma das vistas, que de acordo com a Tab. (1) ainda pertenceria ao regime de convecção livre.

De posse da temperatura do ambiente e da temperatura da superfície dos fornos, é possível o cálculo de Coeficiente de Expansão Térmica ( $\beta$ ,  $^{-1}K$ ), expresso pela equação (D) onde  $T_f$  é a Temperatura Pelicular (média aritmética entre a temperatura da parede do forno e a temperatura ambiente).

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (D)$$

O cálculo do número Reynolds (Re) é descrito pela equação (E) onde  $v$  é a Velocidade do Escoamento (velocidade do vento, m/s),  $L$  é a Altura da catenária e  $\nu$  a Viscosidade Cinemática do Fluido em questão ( $\nu$ ,  $m^2/s$ ). Como o regime de convecção submetido pelos fornos catenários é o de Convecção Livre o número de Reynolds foi utilizado neste caso apenas como indicador do tipo regime.

$$R_e = \frac{U L}{\nu} \quad (E)$$

O número de Grashof (Gr) é calculado pela equação (F) onde  $g$  é relativa à Força da Gravidade considerada igual a  $9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $T_w$  a Temperatura Média das Paredes dos Fornos (K) e  $T_\infty$  é considerada a Temperatura Ambiente (K).

$$G_r = \frac{g \beta L^3 (T_w - T_\infty)}{\nu^2} \quad (\text{F})$$

O número de Grashof representa a razão entre o empuxo e a força viscosa que atua no fluido, exerce o mesmo papel do número de Reynolds na convecção forçada. O número de Rayleigh (Ra) representado pela equação (Gr) onde Pr é o número de Prandtl.

$$R_a = G_r P_r \quad (\text{G})$$

Através do número de Ra determina-se o número de Nu (Nusselt) mais apropriado de acordo com a teoria que melhor descreve o comportamento dos fornos, equação (H) onde  $c$  e  $n$  são constantes da Tab. (2), que variam de acordo com o regime de escoamento (Laminar/Turbulento), (8).

$$N_u = c R_a^n \quad (\text{H})$$

Tabela 2. Constante  $c$  e expoente  $n$  da Eq. (8)

Tipo do Escoamento	Domínio de Ra	c	n
Laminar	$10^4$ a $10^9$	0,59	1/4
Turbulento	$10^9$ a $10^{13}$	0,10	1/3

O Ra comporta-se, neste caso, como uma “condição de contorno”, que determina qual o regime de escoamento, no caso das paredes dos Forno 1 e 2 (Vistas A,B,C e D) o regime de escoamento é turbulento. Já no caso da chaminé do Forno 1 e 2 o regime é laminar para a Base da Chaminé e turbulento para o Corpo da Chaminé. Esse comportamento se manteve para todas as condições de funcionamento.

Através do valor de Nu foi calculado o Coeficiente Convectivo ( $h$ ) adequado, equação (I) onde  $k$  representa a Condutividade Térmica do Fluido (W/m.K), o que permitiu, a partir da Eq. (B), o cálculo da quantidade de calor trocado com o meio por meio da convecção ( $Q_{\text{Convecção}}$ ).

$$h = \frac{N_u K}{L} \quad (\text{I})$$

Os procedimentos descritos para este cálculo foram realizados para todas as vistas dos fornos avaliados.  $\rho$ ,  $k$  e  $\nu$  são propriedades termofísicas do fluido determinadas a partir de  $T_f$ .

Com o cálculo do  $Q_{\text{Convecção}}$  e do  $Q_{\text{Radiação}}$ , equação (C), foi possível obter, através da equação (A), a quantidade total de calor perdida pelas superfícies de cada vista analisada. O que permitiu o cálculo da taxa de perda de calor para cada vista em relação à energia fornecida, pela queima do combustível. Numa queima típica são gastos 5 kg de lenha por hora, liberando de 17.500 a 22.500 kcal/h, para o pinus, (8). Adotou-se o valor médio de 20.000 kcal/h o que corresponde a 23.260 W de calor fornecido, para o Forno 1. No cálculo do calor fornecido para o Forno 2 utilizou-se o valor real de fluxo de combustível, com uma média de 33,8 kg consumidos por hora (primeira hora 43,2 kg, segunda 28 kg, terceira 48 kg e quarta 84 kg), considerando um PCI médio da madeira utilizada igual a 5000 kcal/kg. Toda massa de combustível (madeira) foi pesada, de maneira a ser obter o fluxo de combustível para a alimentação do Forno 2.

A soma de todas as taxas de perda de energia referentes a cada vista, resultou na Taxa Total de Perda de Calor pelas superfícies dos fornos, igual a 16,7 % pelas paredes e 10,9 % pelas superfícies da chaminé, valores para uma única condição de operação com temperatura interna entre 800 °C e 900 °C para o Forno 1, caso seja considerado a inclinação das paredes das Vistas B e D igual a 60° a Taxa de Perda será igual a 15,33%. Os termogramas referentes ao Forno 2 foram coletados em quatro diferentes condições de operação o que permitiu a construção da curva representada pela Fig. (11), onde tem-se a Taxa de Perda Total de Calor de acordo com a alteração da temperatura interna, nos momentos (intervalos de tempo de aproximadamente 1 hora) chamados de *Hora 1 (270 °C)*, *Hora 2 (430 °C)*, *Hora 3 (530 °C)* e *Hora 4 (600 °C)*.

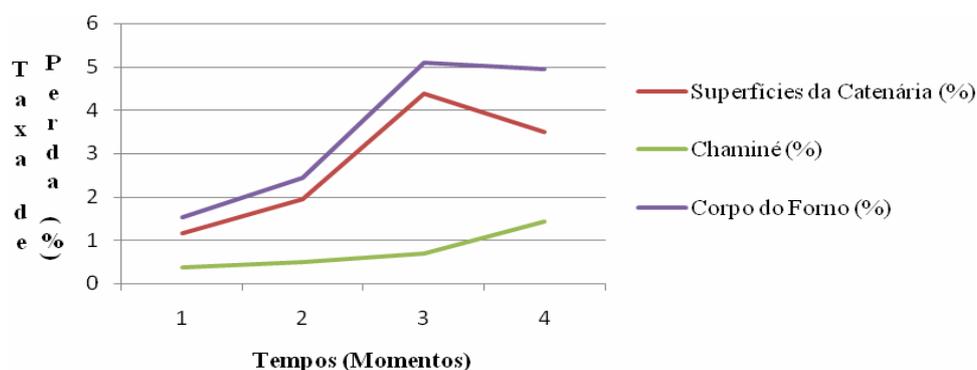


Figura 11. Taxa de Perda de Calor em Relação ao Aumento da Temperatura Interna

Até o momento 3, a Taxa de Perda aumenta de acordo com o aumento da temperatura interna. Segundo a Fig. (11), após o momento 3, mesmo com a adição de 84 kg de massa até o momento 4, tem-se um decréscimo da Taxa Total de Perda, devido ao aumento da temperatura ambiente e principalmente devido a uma queda nas temperaturas das paredes do forno (provenientes dos termogramas). Acrescenta-se a esse fato a constatação do deslocamento dos maiores pontos de temperatura para a região da chaminé do forno, inclusive com a percepção visual de labaredas de fogo saindo pela mesma, permitindo inferir um aumento da perda de calor pela chaminé, fato esse demonstrado com os valores das temperaturas da Tab. (3) e análise da curva verde (perdas pela chaminé) da Fig. (11).

Tabela 3. Aumento da Temperatura da Chaminé

Momento	Temperaturas (°C)						Corpo Chaminé
	A"	B"	C"	A" Incl.	B" Incl.	C" Incl.	
<b>3</b>	41,9	44,6	45,9	63	70,9	68,6	45,73
<b>4</b>	75,5	79,9	79,4	110,2	111,6	117,1	72,93

Esse comportamento se deve a uma provável assimetria na construção da Chaminé que no momento entre 3 e 4, “expulsava” parte do calor presente no volume útil da catenária, o que explica o fato da temperatura máxima de projeto do Forno 2, por volta de 1200°C, não ter sido atingida. Mesmo levando em consideração as conseqüências dessa assimetria, o Forno 2 apresentou Taxa Total de Perda Térmica nas quatro condições de operação, de acordo com a Tab. (4) para as superfícies da catenária, chaminé e todo o corpo do forno, muito menores em relação aos resultados demonstrados por (3).

Tabela 4. Taxa de Perda de Calor pelas Superfícies do Forno 2

Taxa de Perda de Calor (%)	Momentos			
	1	2	3	4
<b>Superfícies da Catenária</b>	1.157	1.9344	4.385	3.497
<b>Chaminé</b>	0.368	0.492	0.696	1.425
<b>Corpo do Forno</b>	1.525	2.4264	5.081	4.922

O balanço de calor dos fornos catenários mais eficientes, utilizando o calor liberado por 5 kg de lenha por hora, é geralmente igual a 18% de perda pelas paredes, (3). Esta informação demonstra que a metodologia utilizada para análise

das perdas térmicas nos dois protótipos de fornos foi adequada e que as técnicas e materiais empregados na construção do Forno 1 e Forno 2 mostram-se bastante satisfatórios.

## CONCLUSÕES

Com fundamentos conceituais firmemente estabelecidos, este trabalho é dedicado ao desenvolvimento de instrumento útil para a quantificação de perda térmica em fornos.

A realização de imagens térmicas da parede externa do forno é um auxílio eficiente, tanto pela detecção de áreas defeituosas, não consideradas na simulação do balanço energético, quanto pela possibilidade de quantificar as perdas energéticas dessas áreas. Esse procedimento permite a tomada de decisão quanto ao reparo ou substituição do revestimento de um forno.

A análise do comportamento térmico de tais fornos, através dos termogramas, possibilitam a determinação dos limites operacionais e grau de possível deteriorização do revestimento dos mesmos. A implementação da metodologia utilizada permitiu quantificar a perda de energia e conhecer a eficiência térmica das superfícies dos fornos avaliados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à SKF do Brasil, especialmente aos colaboradores Flávio Antônio Soares de Sousa (Coordenador da Engenharia de Campo) e ao Paulo Henrique Manoel (Gerente de Vendas). E ainda à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pelo suporte financeiro para a construção dos fornos, projeto EDT 2287-05.

## REFERÊNCIAS

- (1) Bezerra, L. A., Silva, R. N. T., Guerrero, J. R. H., Magnani, F. S., 2006, “Estudo Da Influência De Parâmetros Na Medição Por Termografia”, IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife-PE.
- (2) Nery, G. G., Silva, J. A., 2007, “Desenvolvimento e teste de protótipos de fornos artesanais para a cerâmica do Vale do Jequitinhonha”, Projeto Final de Iniciação Científica entre a FAPEMIG, Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Ciências Térmicas e de Fluidos.
- (3) Norton, F.H.. 1952, “Elements of Ceramics”, Addison-Wesley, Cambridge, Mass, 138 p.

- (4) Flir Systems, 2004, "Técnicas de Medição Termográfica", ThermaCAM™ P65 Manual do operador, pp. 113-117.
- (5) SKF, 2008, "Especificações Técnicas ThermaCAM™ E65", Flir Systems, 2004. Produtos SKF/Produtos Preditivos/Câmeras Termográficas. 20 de Janeiro de 2008, <[http://www.skf.com/portal/skf\\_br/home/products?contentId=290607](http://www.skf.com/portal/skf_br/home/products?contentId=290607)>
- (6) Ozisik, N., 1990, "Transferência de Calor, um Texto Básico", Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro - RJ.
- (7) Incropera, F. P., Witt P., D., 1993, "Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa", Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro - RJ.
- (8) Chiti, J.F., 1992, "Hornos Cerâmicos". Ediciones Condorhuasi, Buenos Aires.

## EVALUATION AND QUANTIFICATION OF ENERGY LOSSES BY THE SURFACES OF THE CATENÁRIO OVENS USING THERMOGRAPHY

### ABSTRACT

*The present work has as objective, to present the use of Infrared Thermography as quantification tool of the energy loss in catenários ovens. The catenários ovens used in this work possess useful volume between 0,6 and 1,42 m<sup>3</sup>, could arrive to a temperature of about 1100 °C. Using the qualitative analysis, coming from thermographic images obtained by the Infrared Camera E-65 FLIR, was possible to identify critical points in the walls of the ovens, that allowed to evaluate the behavior of the mass formulated for the isolation. Already through the quantitative thermography, the total thermal loss was calculated by their walls, the one that made possible to infer to their thermal efficiencies. For the thermal loss calculation, was adopted the convection and radiation mechanisms.*

Keywords: Thermography, Catenários Ovens, Thermal Loss Quantification