



XXIV CREAM
Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica



Universidade Federal
do Rio Grande



INSTITUTO FEDERAL
RIO GRANDE DO SUL
Campus Rio Grande

XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS

Análise das perdas térmicas em um forno cilíndrico na secagem de artesanato do Alto do Moura

Nome do(s) autor(es) Maycon Ferreira Silva, Felipe Vilar Silva, Hugo Augusto Marino Moreira

Instituição Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Endereço Completo da Instituição Estrada do Alto do Moura, KM 3,8, s/n - Distrito Industrial III, Caruaru - PE, 55040-120

E-mail para correspondência mayconferreirasilva7@gmail.com

RESUMO: *O presente trabalho tem como objetivo o estudo das perdas de energia térmica de um forno a lenha usado na produção de artesanato do barro no bairro do Alto do Moura em Caruaru-PE. Primeiramente, realizou-se um levantamento prévio com os artesãos em relação a quantidade de lenha usada, por meio de questionários aplicados aos artesãos. Assim, realizou-se a análise experimental de um forno durante seu funcionamento, medindo-o e marcando vários pontos nele. Posteriormente, efetuou-se a leitura periódica da temperatura e velocidade do vento registrando todos os dados obtidos. O forno foi tratado como um volume de controle que opera em regime transiente. E com base nas equações da conservação da energia, transferência de calor e na equação de balanço estequiométrico da combustão da lenha foram efetuados cálculos auxiliados por softwares, como o Excel, para a estimar as perdas de calor para o ambiente por convecção e radiação. Por fim, avaliou-se as perdas energéticas, representando em porcentagem o quantitativo de energia perdida com o objetivo de propor modificações nos fornos, aos artesãos, visando o aumento da eficiência do forno.*

Palavras-Chave: Perdas energéticas, energia, fornos.

ABSTRACT: *The present work has the objective of studying the thermal energy losses of a wood-fired furnace used in the production of clay artesanate in the district of Alto do Moura in Caruaru-PE. Firstly, a previous survey was carried out with the artisans regarding the amount of firewood used, through questionnaires applied to artisans. So, perform an experimental analysis of one for its operation, measuring it and marking several points on it. Subsequently, the temperature and speed of the recording of all the data obtained were periodically read. The oven was treated as a control volume that operates in a transient regime. And based on the equations of Energy Conservation, Heat Transfer and in the equation of Stoichiometer Balance of firewood combustion with performed calculations aided by software like Excel, for an estimate as heat losses to the environment by convection and radiation. Finally, it was evaluated as losses of energy, being able to propose modifications to the artisans in the furnaces, aiming at the increase of the efficiency of the furnace.*

Keywords: Energy losses, energy, oven.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Caruaru como cidade cultural

Conhecida como a Capital do Agreste, Caruaru é a maior cidade do interior de Pernambuco; com uma população de 342.328 habitantes, segundo o IBGE8, sendo o quarto município mais populoso do Estado. Nos últimos anos, a cidade tem avançado bastante no que diz respeito ao desenvolvimento urbano e a economia. Ela possui um acervo cultural extremamente rico e diversificado; das suas terras surgiram: músicos, escritores, artistas e artesãos. Como Mestre Vitalino, que incluiu Caruaru no cenário cultural internacional (INTERCOM, 2015).

1.2 A arte do barro no Alto do Moura



O Alto do Moura é um bairro de Caruaru, município do agreste pernambucano, onde se concentra uma comunidade de artistas do artesanato do barro. Situado a cerca de 7 km do centro da cidade, é considerado, pela Unesco, o maior centro de arte figurativa das Américas (GASPAR, 2011). Que segundo dados da Prefeitura Municipal mais de 1.000 artesãos que vivem da arte do barro. Nesta comunidade o Barro se faz presente como “Cultura Viva” diante as peças fabricadas pelos artesãos, que se unificaram em uma associação a AABAMM – Associação dos Artesões e Moradores do Alto do Moura (RODRIGUES, 2013).

Os artistas trabalham nas suas casas, modelando o barro e criando diversos objetos e figuras de todos os tipos (GASPAR, 2011). Os temas básicos dos artesãos são motivos folclóricos e que retratam o cotidiano do homem sertanejo: o bumba-meu-boi, o maracatu, as bandas de pífano, os retirantes da seca, o cangaço e os cangaceiros, principalmente os famosos Lampião e Maria Bonita, o vaqueiro, a vaquejada, o casamento e o enterro na zona rural (GASPAR, 2011).

Foi no Alto do Moura que criou-se Vitalino Pereira dos Santos, ou simplesmente Mestre Vitalino, um dos maiores destaques da produção do barro, cultuando sua obra mundialmente. Mestre Vitalino expressava o folclore nordestino através do barro, e mesmo falecido em 1963, sua obra ainda é destaque ao redor do mundo. A Casa-Museu Mestre Vitalino possui artefatos da vida do Mestre Vitalino e está situada no Alto do Moura; a mesma casa onde viveu o mestre do barro (INTERCOM, 2015).

Eles utilizam como principal matéria-prima o barro, com ele molhado eles esculpem a escultura de diferentes modos. Posteriormente eles queimam as esculturas em grandes fornos a base de lenha, que podem ser individuais (quando é utilizado pelo próprio artesão e, no máximo sua família) ou coletivo (quando usado por um grupo de artesãos). A lenha usada é vendida por terceiros, que extraem em locais próximos a região. Ultimamente também está sendo usada restos de madeiras e móveis, disponíveis em serralherias e madeireiras respectivamente. O forno a lenha usado pelos artesãos é cilíndrico, podendo ser dividido em: abobada (cilindro fechado na parte superior) e um cilindro com abertura na parte superior. Alguns possuem ambos os tipos, outros apenas de um tipo, depende da categoria da peça -isto é, o tipo de escultura, panela ou boneco por exemplo- que o artesão trabalha.

1.3 Problemas do combustível usado pelos artesãos e importância do estudo

Como foi dito acima os artesãos usam fornos a base de lenha para queimar suas esculturas e, são extremamente dependentes da lenha como combustível. Décadas de extração desse material das reservas próximas da região – somadas a extração para outras atividades- resultou na extinção de certas espécies de lenha e, consequente proibição por parte do IBAMA, de extração de lenha. Isso tem trazendo diversas dificuldades para os artesãos –que já sofrem com a crise vivida por todo país-, o que tem levado os artesãos a buscarem em serralherias e madeireiras restos de madeiras ou mesmo de móveis. Outros agravantes podem ser observados: como o monopólio na venda da lenha, o que permite que os vendedores variem muito o preço, aumentando-o.

Diante disso, um estudo dos com base em conceitos e conhecimentos da engenharia térmica poderá trazer inúmeros benefícios para os artesãos, tanto econômico, como social.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

O principal objetivo é o estudo energético do processo de queima do artesanato do Alto do Moura, visando realizar uma estimativa das perdas energéticas. Por conseguinte, será proposto aos artesãos modificações nos fornos visando diminuir suas perdas.

2.1.1 Objetivos específicos

- a) Realizar a análise experimental durante o funcionamento de um forno;
- b) Com base nos resultados da análise experimental, por intermédio das equações propostas estimar as perdas de energia térmica do forno durante todo o processo de queima;

c) Com base nos resultados obtidos, futuramente propor medidas aos artesãos para o melhoramento do forno, visando a diminuição das perdas;

3. METODOLOGIA

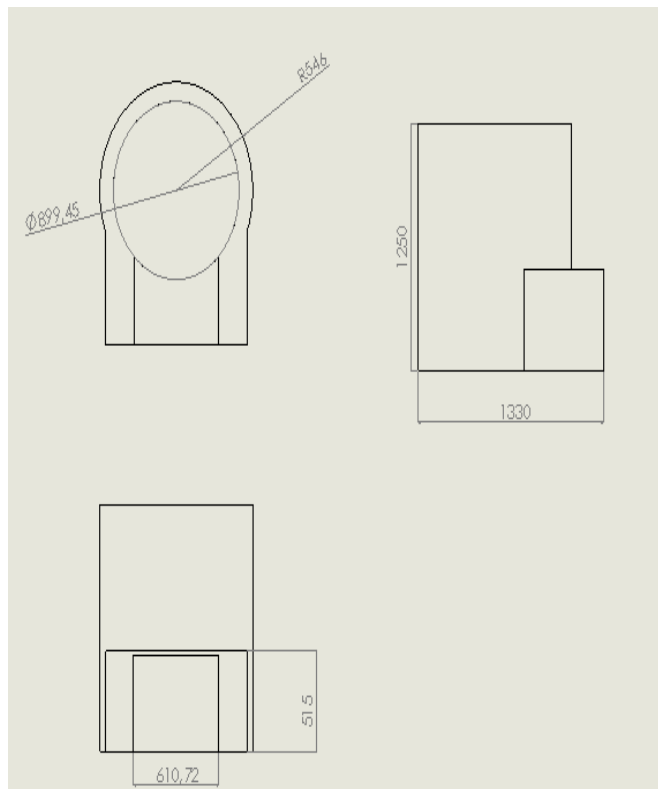
3.1 Levantamento dos dados

Inicialmente foi elaborado um questionário, com 7 (sete) questões com respostas pré-definidas, para facilitar a análise estatística dos dados. Essas questões tem caráter quase que unicamente extrair informações quantitativas da produção de artesanato. Com exceção de três questões, as duas primeiras que são questões subjetivas e a última, que pergunta se o artesão utiliza um forno individual ou coletivo. A aplicação está sendo feita constantemente nas principais ruas do bairro do Alto do Moura, como a Mestre Vitalino, buscando atingir o máximo de artesãos possíveis. Foi solicitado também o nome e endereço de trabalho de cada artesão que respondeu o questionário.

3.2 Caracterização do forno

O forno analisado tem um formato cilíndrico com uma abertura na parte superior, por onde as esculturas cerâmicas são colocadas, ele tem também uma espécie de caixa na região frontal, que serve como entrada para o túnel onde a lenha é colocada para ser queimada, conforme a Fig. (1)-a. Ademais, a Fig. (1)-b a seguir, exhibe as medidas mais importantes do forno:

Figura 1- a) Forno do tipo cilíndrico com abertura na parte superior e “caixa” frontal b) Vista lateral, frontal e superior



do forno com medidas principais Fonte: autoria própria.

3.3 Análise experimental

A análise experimental consistiu medição geométrica e na divisão do forno em várias regiões (faixas) e marcação de pontos com gesso em toda região externa do forno. Foram feitas 6 (seis) faixas no corpo do forno denominadas entre faixa A e faixa F. Sendo 2 (duas) com 7 (sete) pontos e 4 (quatro) com 12 (doze) pontos, alinhados e distante aproximadamente 30° (trinta graus) um do outro, totalizando 62 (sessenta e dois) pontos. Mais 30 pontos foram marcados na caixa de entrada, onde a lenha é colocada resultando em um total de 92 pontos marcados. Que foram medidos periodicamente com um Termopar da Incoterm. A Figura (2) a seguir apresenta o forno depois de marcado, no dia análise experimental:



Figura 2. Forno com os pontos marcados, imagem frontal (esquerda) e, imagem lateral direita do forno (direita)

Fonte: autoria própria

Também foram marcados com gesso 5 regiões na saída de ar superior para as medições de velocidade do vento, 4 a uma distância aproximada de 90° uma da outra e uma no centro, formando um círculo. E outra na entrada da caixa de lenha.

3.4 Cálculo das perdas térmicas

O forno foi modelado como um volume de controle que opera em regime transiente. Foi aplicado a equação da Conservação da Energia conforme na Eq.(1) a seguir:

$$\Delta E = Q[\text{ent}] - Q[\text{sai}]; \quad (1)$$

Onde $Q[\text{ent}]$ foi definido como a quantidade de energia liberada na combustão completa da lenha, de acordo com a Eq.(2) a seguir:

$$Q[\text{ent}] = m[L] \cdot \text{PCI} \cdot \Delta t[t]; \quad (2)$$

onde tem-se que:

$m[L]$ = massa de lenha [kg];

PCI = poder calorífico inferior da lenha [kJ/kg];

$\Delta t[t]$ = variação do tempo total de queima [s];

Por sua vez o $Q[\text{sai}]$ é definido como o somatório da quantidade de calor transferida por convecção e radiação em todos os pontos, conforme a Eq.(3) a seguir:

$$Q[\text{sai}] = \Sigma q[\text{conv}] + \Sigma q[\text{rad}]; \quad (3)$$

Para o cálculo das perdas de energia térmica transferidas por convecção e radiação em todo o forno, modelou-se cada ponto como o centro de um retângulo. Para a transferência de calor por radiação, foi usada segundo a literatura Incropera (2007), a Lei de Stefan Boltzmann demonstrada na Eq.(4) a seguir:

$$q[\text{rad}] = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_s)^4 - (T_{\text{viz}})^4] \cdot \Delta t; \quad (4)$$

onde tem-se que:

$q[\text{rad}]$ = quantidade de energia térmica transferida por radiação no ponto [W];

k = condutividade térmica do material [W/(m.K)];

σ = Constante de Stefan Boltzmann;

ε = emissividade da superfície do forno

A_s = Área superficial [m²];

T_2 = Temperatura do ponto interno [K];

T_1 = Temperatura do ponto externo [K];

Δt = intervalo de tempo periódico entre a medição de cada ponto [s];

Já para o cálculo da transferência de calor por convecção, primeiramente teve que se descobrir o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção ($h[\text{conv}]$) que varia com a temperatura. Segundo a literatura, a expressão de Morgan é definida de acordo com a Eq.(5) a seguir:

$$h[\text{conv}] = (\text{Nus} \cdot k) / D; \quad (5)$$

Onde tem-se:

k = condutividade térmica do material constituinte do forno [W/(m.K)];

D = diâmetro do forno [m];

Nus = número de Nusselt;

Assim sendo, para a obtenção do número de Nusselt foi usada a expressão de Churchill e Chil para o número de Rayleigh definida como a Eq.(6) a seguir:

$$\text{Nus} = (0,6 + (0,387 \cdot (\text{Ray})^{1/6}) / (1 + (0,559/\text{Pr})^{9/16})^{8/27})^2; \quad (6)$$

Onde tem-se:

Pr = número de Prandtl;

Ray = número de Rayleigh;

Desse modo, para a obtenção do número de Prandtl interpolou-se os valores disponíveis na tabela do (Incropera, 2007) com os medidos no experimento. Foi usada a relação empírica para o número de Rayleigh de acordo com a Eq. (7) a seguir, e por sua vez, como se fez necessário, para o número de Grashof foi usada a relação da Eq. (8) a seguir:

$$\text{Ra} = \text{Pr} \cdot \text{Gr}; \quad (7)$$

$$\text{Gr} = (g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\text{inf}}) \cdot L_c^3) / (\nu)^2; \quad (8)$$

Onde tem-se que:

Gr = número de Grashof;

g = aceleração da gravidade;

β = condutividade térmica;

ν = viscosidade cinemática;

L_c = comprimento característico;

Por fim, para a transferência de calor por convecção foi usada a Lei de Resfriamento de Newton, conforme mostrado na Eq (9) a seguir:

$$q[\text{conv}] = h[c] \cdot A \cdot (T - T_{\text{amb}}) \cdot \Delta t; \quad (9)$$

Onde:

$q[\text{conv}]$ = Quantidade de energia transferida por convecção no ponto [W];

$h[c]$ = coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/(\text{k} \cdot \text{m}^2)$];

A = Área do retângulo analisado ao redor do ponto [m^2];

T = Temperatura do ponto marcado no forno [K];

T_{amb} = Temperatura ambiente [K];

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foi proposto que iria medir a temperatura de todos os pontos em intervalo regulares de 15 (quinze) minutos. Todavia, em virtude de serem muitos pontos e boa parte da queima ter sido no período da noite –o que dificultou o registro das temperaturas no caderno-, as medições e registros das temperaturas demoraram em torno de 30 minutos. Desse modo, acrescentando o intervalo entre cada medição, considerou-se o tempo padrão de 45 (quarenta e cinco) minutos. Como artesão que auxiliou cedendo o forno para análise experimental, costumava iniciar a queima de suas peças pelo final da tarde. Entre colocar as peças e a lenha, a queima iniciou às 17 (dezesete) horas. A Tabela 1 a seguir, apresenta os horários de início e fim das sessões de medição:

Tabela 1. Horário das medições

Horário das medições (em horas e minutos)							
1	2	3	4	5	6	7	8
17:20-17:45	18:00-18:34	18:50-19:25	19:48-20:35	20:45-21:20	21:35-22:10	22:25-22:55	23:00-23:25

A Figura 3 a seguir, apresenta um gráfico Temperatura (em Kelvin) versus o número do horário de medição, para um ponto na faixa A – a faixa mais interna-. Mostrando a temperatura máxima atingida nesse ponto:

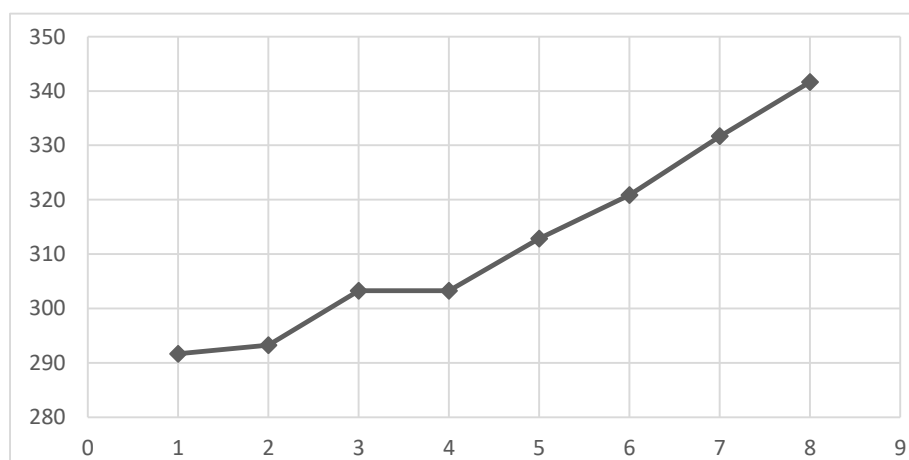


Figura 3. Temperatura em Kelvin X intervalo de medição da temperatura para o primeiro ponto da faixa A.

Fonte: autoria própria

A temperatura ambiente medida no horário variou entre 17°C e 18°C, com uma média aproximada para 18°C. Os sistemas de meteorologia forneceram uma mínima de 18°C, assim, considerou-se a temperatura ambiente de 18°C

durante toda a queima. Posteriormente, registrou todas as temperaturas e os respectivos horários de medição em uma planilha do Excel. O mesmo software também foi usado para a interpolação linear do número de Prandtl, fornecido pelo Incropera (2007) em temperaturas restritas. A Tabela 2 a seguir, apresenta os valores das propriedades termofísicas, o intervalo do número de Rayleigh, Prandtl, Nusselt, Grashof para as temperaturas consideradas e, também o intervalo área dos retângulos com centro nos pontos marcados, todos obtidos por literaturas ou artigos:

Tabela 2. Valores de constantes, propriedades e área considerados

k (W/m.K)	PCI (kJ/kg)	D (m)	Gr	Nu	Ray	Pr	Área (m ²)
0,9	14644	1,092	534177- 5,276exp8	11,06-86,63	374549- 3,893exp8	0,7012- 0,7379	0,02-0,087

Em suma, por intermédio do Excel, a Tab. 3 a seguir, apresenta as quantidades totais de energia de entrada, de saída por convecção, radiação e total, além da porcentagem perdida:

Tabela 3. Tipos e valores de energia obtido

ENERGIA DA COMBUSTÃO COMPLETA DA LENHA (MJ)	7322,00
QUANTIDADE DE ENERGIA PERDIDA POR CONVECÇÃO(MJ)	74,46
QUANTIDADE DE ENERGIA PERDIDA POR RADIAÇÃO (MJ)	15,20
PERDA DE ENERGIA TOTAL (MJ)	89,65
PORCENTAGEM DE ENERGIA PERDIDA	12,24%

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho faz parte de um projeto que ainda está em fase de execução, mas até então pode se concluir que:

- A eficiência do forno é baixa em relação a quantidade de energia liberada na combustão da lenha;
- A maior parte da energia é perdida pela transferência de calor por convecção. Desse modo, o maior isolamento do forno pode permitir a diminuição das perdas térmicas;
- A quantidade de energia perdida por radiação é insignificante em relação a quantidade perdida por convecção.
- Os resultados das estimativas abrirá um leque de medidas que poderão ser feitas, para diminuir as perdas térmicas e consequentemente aumentar a eficiência do forno dos artesãos. Trazendo economia de lenha e financeira;

6. AGRADECIMENTOS

- Quero primeiramente agradecer a Deus, grande responsável de tudo e, detentor de toda minha capacidade e inteligência. Sem Ele nada conseguiria fazer;
- Ao meu orientador, por todo o apoio e ajuda. Além de ser o grande responsável pelo projeto;
- Ao IFPE, por todo apoio financeiro, instrumental e informacional;
- Ao artesãos do Alto do Moura, tanto os que responderam os questionários como os do experimento. Pela prestatividade, acolhimento e simpatia;

7. REFERÊNCIAS



XXIV CREEM
Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica



**Universidade Federal
do Rio Grande**



INSTITUTO FEDERAL
RIO GRANDE DO SUL
Campus Rio Grande

CENGEL, Yunus A. Transferência de Calor e Massa, Uma Abordagem Prática. 4ed**. Porto Alegre: AMGH, 2011.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Termodinâmica. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 1048p.

CONEM, 6., 2010, Campina Grande-PB. ANÁLISE COMPARATIVA DA PERDA DE CALOR ENTRE O FORNO CAIEIRA E FORNO ABÓBADA COM ISOLAMENTO. Campina Grande – PB: ABCM, 2010.

GASPAR, Lúcia. Alto do Moura, Caruaru, Pernambuco. Pesquisa Escolar Online. Fundação Joaquim Nabuco. Recife. Disponível em: <http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar>. Acesso em: 02 de novembro de 2016.

IMCROPERA, Frank P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6ed.**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Intercom – Sociedade Brasileira de Estudos Interdisciplinares da Comunicação, 17, 2015, Natal-Rio Grande do Norte. O Cenário Cultural de Caruaru: Uma Perspectiva Sobre Cidade Criativa. Natal-Rio Grande do Norte: Intercom, 2015. 14 p.

OBA, Renato. ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM FORNO TÚNEL. Florianópolis: UFSC, 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

GASPAR, Lúcia. Alto do Moura, Caruaru, Pernambuco. Pesquisa Escolar Online. Fundação Joaquim Nabuco. Recife. Disponível em: <http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar>. Acesso em: 25 de janeiro de 2017.

ReCont. UM ESTUDO SOBRE A PERSPECTIVA DO CONHECIMENTO EMPÍRICO PARA O CONTROLE PATRIMONIAL EM CARUARU – PERNAMBUCO. Recife-PE: ReCont, 2013, 19p

SCHURHAUS, Patrick. Produtos e propriedades energéticas da madeira. Centro Universitário União da Vitória: 2007. Disponível em: www.hasten.eng.br. Acesso em: 20 de outubro de 2017.

8. DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Certifico que o artigo representa um trabalho inédito e que nem este manuscrito, em parte ou na íntegra, nem outro trabalho com conteúdo substancialmente similar, de minha autoria, foi publicado ou está sendo considerado para publicação em outra revista, seja no formato impresso ou eletrônico. Atesto que, se solicitado, fornecerei ou cooperarei na obtenção e fornecimento de dados sobre os quais o artigo está sendo baseado, para exame dos editores. Certifico que todos os autores participaram suficientemente do trabalho para tornar pública sua responsabilidade pelo conteúdo.