

METODOLOGIA DE ANÁLISE ENERGÉTICA EM FORNOS CERÂMICOS

V. P. Nicolau, T. S. Possamai, R. Oba, A. T. Nunes

Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos (LabCet),

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina
(UFSC), Florianópolis, Santa Catarina-SC, Brasil.

vicente@emc.ufsc.br

RESUMO

A queima corresponde à etapa de maior custo energético nos processos de fabricação de cerâmicas em geral. A análise energética dos fornos cerâmicos visa o aumento de sua eficiência e conseqüente economia de combustível. Este trabalho apresenta uma metodologia para tal, baseada em medições nos fornos em operação e aplicação de modelos numéricos a fim de otimizar o equipamento. Resultados da aplicação da metodologia em fornos túnel para a fabricação de telhas são apresentados, indicando possíveis melhorias no âmbito de economia de combustível a partir do isolamento do forno e aproveitamento de gases da combustão.

Palavras-chave: análise energética, eficiência, economia de combustível, forno cerâmico, otimização.

INTRODUÇÃO

Os fornos destinados à queima das peças cerâmicas possuem tamanhos que variam de poucos metros, até mais de uma centena, de acordo com o tipo de produto fabricado e da produção desejada. Independente de suas dimensões, tais equipamentos possuem como características intrínsecas o uso de combustíveis de alto poder calorífico, paredes refratárias, queima a altas temperaturas - acima de

800°C - com conseqüente liberação de gases resultantes da combustão a elevadas temperaturas.

A queima da cerâmica se dá a partir do processo de combustão e das trocas de calor por radiação e convecção entre o forno e a carga. Devido à diferença de temperatura entre o equipamento e o ambiente, perdas de calor para o meio são inevitáveis ao longo do processo.

De posse dos dados de operação, de sua configuração, bem como ciente dos fenômenos que ocorrem durante a queima, uma análise energética do forno pode ser realizada, a fim de diagnosticar termicamente seu funcionamento e indicar formas de otimização.

Segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento (1), a etapa de queima dos produtos cerâmicos corresponde a aproximadamente 30% do custo total no processo de fabricação da cerâmica. Assim, otimizações destes equipamentos acarretam grande economia para todo o processo produtivo. A partir dessa informação, e de modelos numéricos, a simulação dos fornos cerâmicos se apresenta como uma ferramenta bastante vantajosa para a indústria, pois modificações visando à redução do consumo de combustível são estudadas, sem danos à produção.

Baseando-se em um forno túnel operando com biomassa e óleo de xisto na queima de telhas, uma metodologia de análise energética em fornos cerâmicos é apresentada neste trabalho, podendo a mesma ser estendidas a diferentes tipos de fornos. Contemplando os modelos físicos que regem o problema, bem como medições em campo - empregadas na validação do código numérico desenvolvido - o trabalho apresenta sugestões de configuração do equipamento com foco na otimização de seu funcionamento.

METODOLOGIA

Caracterizados por sua ação contínua e extenso comprimento, os fornos túnel empregados na indústria cerâmica possuem três regiões distintas responsáveis por diferentes etapas do processo de queima, são elas zona de pré-aquecimento, de queima e de resfriamento, conforme a figura 1. Na primeira região, parte dos gases provenientes da combustão é injetada em contra corrente, para elevar e

homogeneizar a temperatura das peças, além de retirar a umidade restante da argila.

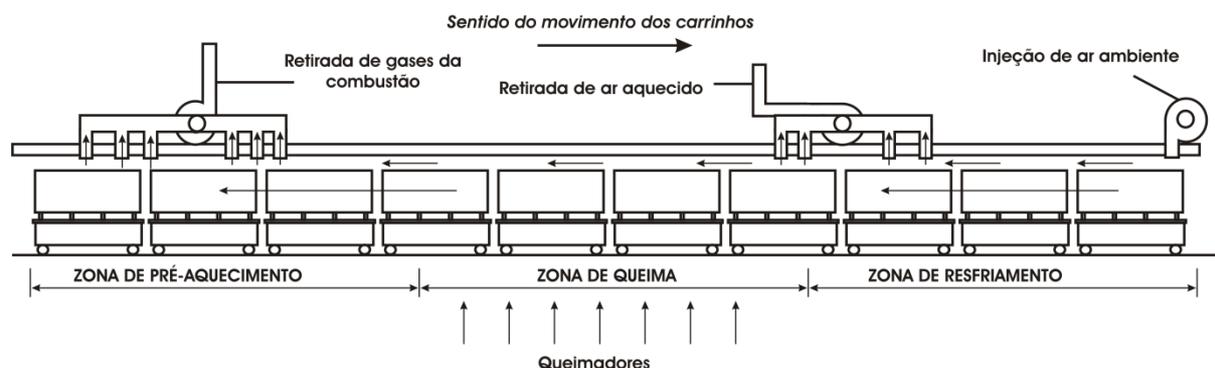


Figura 1 – Esquema de forno túnel (3).

A segunda região é a zona onde ocorre a queima das peças, a sinterização do material e as reações químicas que fornecem suas características permanentes, atingindo as maiores temperaturas do processo, em função da presença de fornalhas ou queimadores nas laterais e/ou teto. Por último, as peças passam pela zona de resfriamento, onde ar ambiente é injetado a fim de reduzir a temperatura.

Uma vez conhecida a configuração do forno, a análise energética tem como ponto de partida o balanço global de energia do equipamento em operação, a partir de tomadas de pressões, temperaturas, vazões e velocidades nos pontos de entrada e saída de energia, conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Pontos de medição e instrumentação para o balanço de energia.

Variável	Instrumentação	Ponto de medição
Vazão de ar injetado no forno – resfriamento, ar de combustão	Tubo de Pitot, micromanômetro, termômetro	Tubulação de injeção
Vazão de ar saindo do forno - gases de exaustão	Tubo de Pitot, micromanômetro, termômetro	Chaminé
Temperatura das superfícies externas	Termômetro (digital e infravermelho), termopar	Paredes e teto
Temperatura de saída das peças	Termômetro (digital e infravermelho), termopar	Saída do forno
Quantidade e tipo de combustível	Dados fornecidos pela empresa	
Produção média	Dado fornecido pela empresa	

De posse das trocas de calor em cada ponto, bem como de suas respectivas participações no montante total de energia, torna-se possível o estudo de alternativas para a redução do consumo de combustível e otimização do equipamento, visando o aumento de sua eficiência.

Como mencionado anteriormente, simulações numéricas são de grande valia no setor industrial por permitirem o teste de diversas configurações sem prejuízo à produção e ao equipamento. Com base no método dos volumes finitos um código numérico em CFD - Mecânica dos Fluidos Computacional - foi desenvolvido em linguagem Fortran, apresentando, como principais resultados, a curva de queima do forno, seu campo de temperatura, as trocas de calor e o balanço energético do equipamento.

A seguir uma breve descrição do modelamento matemático empregado para simular a queima da cerâmica no interior do forno, bem como as trocas de calor entre as superfícies externas e o meio é apresentada. Na sequência resultados experimentais e numéricos de um forno em operação são apresentados, a fim de demonstrar a validade do código, bem como sua capacidade. Finalizando o trabalho, uma breve discussão dos resultados obtidos é feita, seguida da conclusão.

Modelagem matemática

Os fenômenos que regem o problema da queima da cerâmica podem ser descritos por equações diferenciais, as quais devem ser discretizadas a fim de serem numericamente resolvidas. No Método dos Volumes Finitos (4), os pontos discretos nos quais as equações serão resolvidas são centrados no interior de pequenos volumes, os quais compreendem todo o domínio de interesse, formando a malha.

O comportamento térmico do forno é resultado da interação entre quatro sub-domínios: peças, vagonetas, gases no interior do forno e paredes do equipamento, com a simulação abrangendo todos estes domínios.

A energia necessária para a queima da cerâmica provém do processo de combustão, o qual pode ser modelado de acordo com a equação (A), para obtenção do campo de temperatura no interior do forno.

$$T_{gases} = T_{Ref} + \frac{\dot{m}_{comb} \cdot PCI}{(\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{ar}) \bar{c}_p} \quad (A)$$

onde T_{gases} é a temperatura dos gases, T_{Ref} corresponde à temperatura de referência (25°C), \dot{m} à vazão de ar ou combustível, e PCI ao poder calorífico inferior do combustível. Vale ressaltar que tal cálculo é iterativo, pois o calor específico dos gases, \bar{c}_p , é variável com a temperatura, devendo ser corrigido.

Com base na combustão, a equação da energia (B) é resolvida para os sub-domínios anteriormente citados, sendo o índice i referente às coordenadas:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c_p U_i T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(q''_{conv,i}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(q''_{cond,i}) + \frac{S_{rad}}{V} = 0 \quad (B)$$

onde o primeiro termo se refere às variações da temperatura conforme o tempo - termo transiente - o segundo membro representa o transporte de energia a partir da massa - termo advectivo - enquanto os terceiro e quarto termos são as taxas de energia por convecção e condução, respectivamente. Já o último termo diz respeito a fontes ou sorvedouros de energia, como a radiação térmica.

Algumas hipóteses e simplificações são adotadas a fim de resolver a equação da energia, sendo elas para o meio fluido: (i) comportamento de gás perfeito, (ii) fluido incompressível, (iii) meio não absorvedor ou emissor de radiação. Já para os demais sub-domínios são considerados: (i) meio contínuo e homogêneo, (ii) propriedades constantes.

Uma vez que o forno túnel trabalha de forma contínua, assume-se não ocorrerem alterações de temperatura com o tempo depois de estabelecido seu regime de operação; assim, admite-se nulo o primeiro termo da equação (B).

O transporte de energia com a massa ocorre no meio fluido - no interior do forno - e nas peças e vagonetas - ambas consideradas porosas - sendo um dos fenômenos responsáveis pela queima da cerâmica. Obtendo-se das medições de vazão de ar injetado ou extraído os campos de velocidade - seus valores e direções.

O termo convectivo é não nulo apenas nas interfaces sólido-fluido (peças/vagonetas/parede-gases), e no interior das peças e vagonetas, devido à

porosidade das mesmas. Assim, o terceiro termo da equação da energia (B), é modelado de acordo com (C):

$$q_{conv,i}'' = h_{conv} (T_{par} - T_{fluido}) \quad (C)$$

com o coeficiente de convecção - h_{conv} - definido segundo a literatura (Incropera e DeWitt, 2003). Adota-se convecção forçada no interior do forno devido à ação dos ventiladores que impõem o sentido do escoamento. Chama-se ainda T_{par} a temperatura da superfície sólida (peça, vagoneta ou parede) na interface, e T_{fluido} a temperatura do fluido.

Ainda no interior do forno, ocorre também o fenômeno da condução de calor nos domínios sólidos - peças, vagonetas e paredes. Representada a partir da Lei de Fourier, a taxa de condução (quarto membro da equação da energia), é dada conforme a equação (D):

$$q_{cond,i}'' = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (D)$$

onde k é condutividade térmica, propriedade dos materiais usados, e apresentada na tabela 2 para cada sub-domínio.

Devido às elevadas temperaturas de operação do forno, a troca de calor por radiação tem importante participação na queima das peças, sendo equacionada segundo (E):

$$S_{Rad} = F_{ij} \varepsilon \sigma A_i (T_i^4 - T_j^4) \quad (E)$$

com F_{ij} sendo o fator de forma entre a superfície que emite e recebe a radiação, ε a emissividade e A_i a área da superfície emissora, enquanto σ é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Considerando que a troca radiativa no interior do forno ocorra apenas entre as paredes e peças frontalmente posicionadas, pode-se adotar a hipótese de placas planas infinitas, tendo, neste caso, o fator de forma o valor unitário (6).

A diferença de temperatura entre as superfícies externas do forno e o meio gera também trocas de calor a partir dos processos convectivo e radiativo, os quais são modelados pelas equações (F), e (G), respectivamente.

$$Q_{conv} = h_{ext} A_{sup} (T_{sup} - T_{amb}) \quad (F)$$

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_{sup} (T_{sup}^4 - T_{amb}^4) \quad (G)$$

onde o coeficiente de convecção externo é calculado conforme os respectivos modelos (2). ε , A_{sup} , e T_{sup} são a emissividade, área e temperatura da superfície emissora, respectivamente, e T_{amb} a temperatura ambiente. A tabela 2 concentra os valores das propriedades para todos os sub-domínios considerados na análise.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais considerados.

Propriedades		
Condutividade térmica, k [W / mK]	Telhas	1,0
	Paredes	1,0
	Vagoneta	0,5
PCI [MJ / kg]	Lenha [30% de umidade]	10,3
	Óleo de xisto	34,9
Massa específica, ρ [kg/m ³]	Telhas	1920
	Vagoneta	1920
	Paredes	1920
	Ar	1,24
Calor específico, c_p [J / kgK]	Gases da combustão	1200
Emissividade, ε	Paredes	0,8
	Telhas	0,8
	Vagoneta	0,8

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia de análise energética é aplicada a um forno túnel a título de exemplo. O forno analisado queima telhas utilizando lenha e óleo de xisto como combustível. As fornalhas de lenha são laterais na zona de queima enquanto os queimadores de xisto são posicionados no teto do forno. Duas chaminés são utilizadas para a extração dos gases da combustão e ar quente de dentro do forno:

uma posicionada no início da zona de aquecimento (Chaminé 1) e outra na zona de resfriamento (Chaminé 2).

A figura 2 apresenta os resultados das medições realizadas no forno, indicando as temperaturas, vazões e energia em cada ponto de entrada e saída do forno. Os mesmos resultados são compilados na tabela 3.

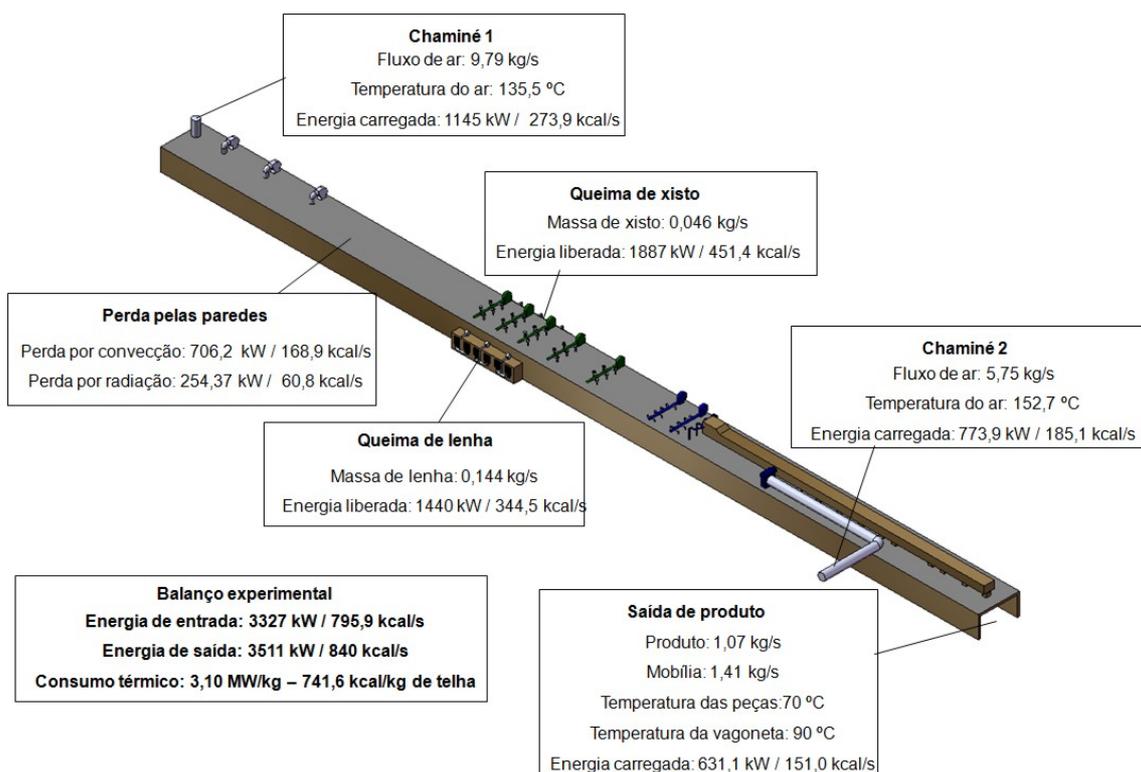


Figura 2 – Distribuição de energia medida no forno analisado.

Tabela 3 – Balço de energia no analisado.

	Energia [kW]	Energia [kcal/s]	%
Energia liberada pela combustão da lenha	1440	344,5	43,3
Energia liberada pela combustão do xisto	1887	451,4	56,7
Energia total de entrada	3327	795,9	100
Perda pelas paredes laterais e teto	960,6	230,0	27,4
Energia na chaminé 1	1145	273,9	32,6
Energia na chaminé 2	773,9	185,1	22,0
Energia com produtos na saída	631,5	151,0	18,0
Energia total de saída medida	3511	840	100,0
Diferença entrada – saída medida	184	44	+5,5
Consumo térmico [Energia/kg de produto]	3100 kJ/kg	742 kcal/kg	-

Produção (base argila crua e seca)

1,07 kg/s

O consumo térmico do forno é calculado como a energia fornecida ao mesmo para processar 1 kg de telha crua e seca, estimado em 3,10 MJ/kg ou de 742 kcal/kg de telha. O fornecimento de energia para o forno se dá na forma de 43% através da lenha e 57% pelo óleo de xisto. A maior parte desta energia é liberada para fora do equipamento através da chaminé 1, localizada no início da zona de aquecimento, e estimada em 1,15 MW de energia, ou 34% do total. Uma parte da energia associada aos gases de combustão já foi extraída para aquecer a carga, representando grande aproveitamento energético. Embora um aproveitamento maior ainda possa ocorrer, pois os gases passam na chaminé 1 com temperatura de 135 °C, há o problema da condensação da umidade extraída do material, da lenha e da própria combustão. Deste modo, a temperatura dos gases expelidos pela chaminé não pode estar muito baixa, mas um aproveitamento adicional é possível.

As perdas pelas paredes representam a segunda maior parcela de energia do forno - em torno de 29% - devido às altas temperaturas nas superfícies externas. Um maior isolamento, neste caso, reduziria esta perda. A segunda chaminé retira em média 770 kW, representando 23% da energia introduzida no forno. Um valor de perda também elevado ocorre com os produtos na saída, estando a carga a 70°C e a vagoneta a 90 °C. Esta parcela poderia ser diminuída através de um aumento da taxa de resfriamento final – seja com alterações na injeção de ar, seja com um aumento do comprimento do forno, medida esta nem sempre praticável. Assim, deve-se estudar a possibilidade de alterar o escoamento, enviando este volume de ar quente ao secador, e assim aumentando o percentual de 23 % da chaminé 2.

A figura 3 apresenta a curva de temperatura dos gases dentro do forno medida experimentalmente, bem como sua equivalente obtida a partir do modelo numérico. A curva de temperatura na superfície da carga obtida numericamente também é apresentada.

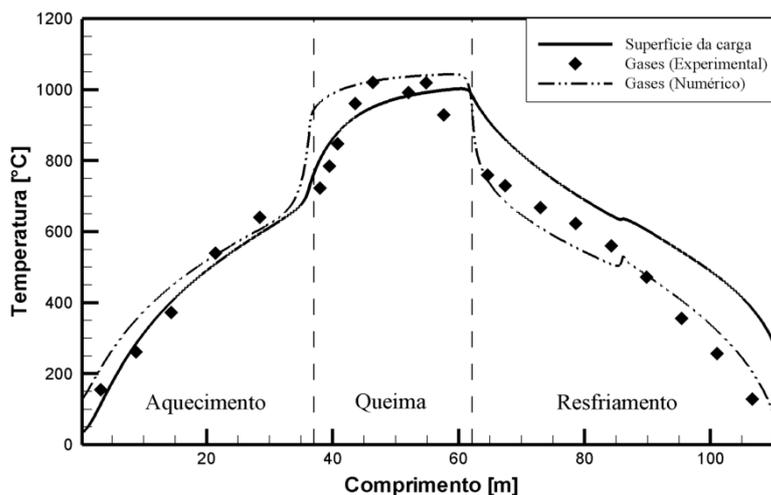


Figura 3 – Curva de temperatura dos gases e carga: experimental e numérico.

Nota-se uma grande semelhança entre as curvas de temperatura dos gases obtida com o modelo numérico e a medida no forno, comprovando a capacidade do modelo em estimar o comportamento do equipamento.

Partindo desta premissa é possível estimar diversos resultados interessantes com base em dados de entrada como produção, tipo de produto, vazão de combustível e ar, dentre outros. A vantagem deste método é a possibilidade de testar diferentes configurações para um mesmo forno, sem a necessidade de modificá-lo na prática.

CONCLUSÕES

Uma metodologia para análise térmica de fornos cerâmicos com base na coleta de dados do forno em operação e utilização de um modelo numérico foi apresentada. Breves resultados para um caso exemplo de um forno túnel para queima de telhas, indicam o potencial desta ferramenta, que permite estimar valores diversos, bastante difíceis de serem obtidos na prática.

Para o caso abordado, demonstraram-se alguns pontos onde há a possibilidade de otimização, visando reduzir o consumo de combustível, sendo eles: melhoria do isolamento das paredes; a possibilidade de aproveitamento dos gases da combustão na chaminé 1 (início da zona de pré-aquecimento); e a maior injeção

de ar de resfriamento a fim de resfriar mais as peças antes da saída do forno e conseqüentemente dispor maior energia à chaminé 2 (zona de resfriamento).

A curva de temperatura dos gases dentro do forno foi comparada com sua equivalente, obtida com o modelo numérico, demonstrando a validade do mesmo. A partir deste ponto, diversos casos podem então ser testados com o modelo numérico possibilitando melhores configurações de operação do equipamento. As otimizações sugeridas com base nos dados experimentais podem ser testadas a priori no modelo numérico a fim de comprovar sua eficiência.

Valores ainda mais específicos, como a variação de temperatura em cada seção da carga, variação de temperatura da base da carga ou de qualquer outro ponto ao longo do forno, também podem ser estimados. A eficiência de diferentes detalhes construtivos, como o uso de lajes ventiladas, pode também ser analisada. Por fim, os resultados têm demonstrado que a metodologia proposta se apresenta bastante útil na otimização de fornos cerâmicos.

AGRADECIMENTOS

Este estudo contou com o apoio financeiro do SEBRAE e da FINEP. Os autores agradecem ao Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás Natural – PRH09 – ANP/MME/MCT e ao programa CAPES pelas bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANFACER; Anuário da Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, 2009.
- [2] INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.
- [3] OBA, R.; Análise Térmica Numérica e Experimental de um Forno Túnel; dissertação de mestrado, Engenharia Mecânica; UFSC; 2011;
- [4] PATANKAR S. S.; SPALDING, B.; *Simultaneous Predictions of Flow Patterns and Radiation for Three-Dimensional Flames, in Heat Transfer in Flames*, N. H. Afgan and J. M. Beer, Eds., Scripta Book Co., Washington, D.C., 1974.

[5] PATANKAR, S. V.; *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* McGraw-Hill, New York, 1980.

[6] SIEGEL, R. HOWELL, R. J.; *Thermal Radiation Heat Transfer*, Third Edition, New York, 1992.

ENERGETIC ANALYSIS METHODOLOGY IN CERAMIC KILNS

ABSTRACT

Firing is the most energy consuming step during the ceramic production. Energy analysis of the kilns aims their efficiency improvement, therefore fuel economy. This work presents an energetic analysis methodology for ceramic kilns based on measurements in operating kilns, as well as numerical models for optimization of the equipments. Results of this methodology for tunnel kilns producing roof tiles and construction blocks are presented, showing that kiln's isolation and flue gases usage can improve fuel economy. Other aspects like load's density and combustion efficiency are also analyzed.

Keywords: energy analysis, energetic efficiency, fuel economy, ceramic kiln.