

Modelagem matemática de um forno rotativo empregado na produção de clínquer

(Mathematical modeling of a rotary kiln employed in the clinker production)

D. C. Q. Rodrigues¹, A. P. Soares Jr², E. F. Costa Jr¹, A. O. S. Costa¹

¹Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Espírito Santo - CCA/UFES, Campus de Alegre, Alto Universitário, Guararema, ES 29500-000

²Fábrica de Cimento Nassau, Cachoeiro de Itapemirim, ES

diuliacaroline@hotmail.com, atiliopeixoto@hotmail.com, eslyfcjr@yahoo.com.br, andreaosc@yahoo.com.br

Resumo

Uma das principais etapas do processo de obtenção do cimento é a etapa de clinquerização, que ocorre dentro do forno rotativo. Em pleno funcionamento, o forno rotativo empregado na produção de cimento é alimentado basicamente de matéria-prima, combustível e ar. As vazões de saída são, basicamente, o clínquer e aos gases de combustão. Neste estudo, o processo de produção de clínquer por via seca é analisado, sendo a alimentação composta por 80% a 95% de calcário, 5% a 20% de argila e por pequenas quantidades de minério de ferro. O combustível empregado neste estudo é o carvão mineral. Os principais fenômenos envolvidos na obtenção do clínquer são a evaporação da água livre residual da matéria-prima, a decomposição do carbonato de magnésio, a descarbonatação, a formação da fase líquida do C_3A e do C_4AF , a formação do silicato dicálcico e a formação do silicato tricálcico. O objetivo principal deste estudo é a proposta de um modelo matemático que descreve o processo de obtenção do clínquer no forno rotativo. O modelo, composto por equações algébricas, foi desenvolvido por meio de balanços de massa e energia do forno. A modelagem foi implementada em linguagem de programação, empregando-se um programa comercial. A condição operacional considerada representa uma condição média adotada na indústria. O modelo proposto se mostrou satisfatório para a descrição do processo de clinquerização, sendo especialmente útil na realização da análise da demanda energética do equipamento.

Palavras-chave: cimento Portland, forno rotativo, modelagem matemática, análise energética.

Abstract

An important stage of the cement production is the clinkerization process that occurs in the rotary kiln. Basically, the inputs of this equipment are the raw material, the fuel and the air. The output flows are basically the clinker and the combustion gases. In this study, the clinker production process by the dry process is analyzed. The considered feed of the rotary kiln is composed by 80% to 95% of lime, 5% to 20% clay and small quantities of iron ore. The fuel used in this study is coal. The main phenomena of the analyzed process are: water evaporation the residual free of the raw material, decomposition of magnesium carbonate, the carbon removal, the formation of the liquid phase C_3A and C_4AF , the formation of dicalcium silicate and formation of tricalcium silicate. The main objective of this study is to propose a mathematical model that describes the production process of the clinker in the rotary kiln. The algebraic model proposed was developed considering the mass and the energy balances of the system. The model was solved using a commercial program (Mathcad). The operational condition considered represents a typical condition adopted in the industry. The obtained results describe the analyzed systems satisfactorily, especially the energy demand of the equipment.

Keywords: Portland cement, rotary kiln, mathematical modeling, energy demand.

INTRODUÇÃO

O setor industrial de produção de cimento Portland, definição geral usada para cimentos fabricados a partir de matérias primas calcárias e argilosas, é tradicional no país [1]. Esta rota produtiva tem sido o foco de considerável atenção mundial por causa do alto consumo de energia e dos

impactos ambientais causados pelo processo [2-10]. Sendo assim, as etapas envolvidas no processo produtivo devem ser cuidadosamente controladas, objetivando a operação ótima do sistema. Existem basicamente dois processos de produção de clínquer: por via úmida e por via seca [11]. Atualmente no Brasil toda a produção de cimento Portland é efetuada em fornos por via seca, uma vez que necessitam de

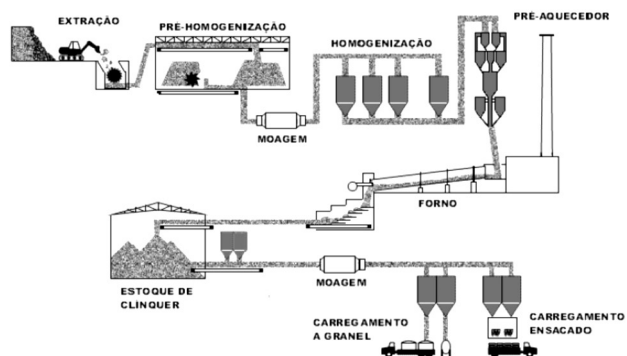


Figura 1: Representação esquemática do processo de produção de cimento Portland (adaptado [14]).

[Figure 1: Schematic representation of the Portland cement production (adapted [14]).]

menor quantidade de energia para a produção. Na produção por via seca, a mistura moída totalmente seca, alimenta o forno em forma de pó. De forma geral, o processo de produção de cimento Portland (Fig. 1), envolve a extração de matéria prima, moagem, homogeneização do calcário e argila, preparação e transporte do cru, a clinquerização (em fornos rotativos) e resfriamento dos produtos, adição de substâncias complementares e empacotamento [12, 13].

Uma das principais etapas do processo de obtenção do cimento é a etapa de clinquerização também chamada de sintetização, que ocorre dentro do forno rotativo, onde o clínter é formado [15-17]. O clínter é um material que se apresenta na forma de pelotas acinzentadas e foscas, de tamanho variado e com propriedades hidráulicas [18]. É composto basicamente por silicato dicálcio ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), silicato tricálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), aluminato tricálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e ferro-aluminato-tetracálcio ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) [19-23]. A obtenção do clínter ocorre entre 1450°C e 1550°C e envolve numerosos e complexos processos físicos e químicos. O desempenho do forno de cimento rotativo controla a qualidade do cimento e do desempenho geral da planta [24]. Os concretos atuais são compostos por uma mistura de cimento, água e agregados [25]. Os combustíveis convencionais usados no forno rotativo para a fabricação do clínter são principalmente os carvões vegetais e minerais, o coque de petróleo e óleos pesados [13, 14]. Em pleno funcionamento, o forno rotativo empregado na produção de cimento é alimentado basicamente de matéria-prima,

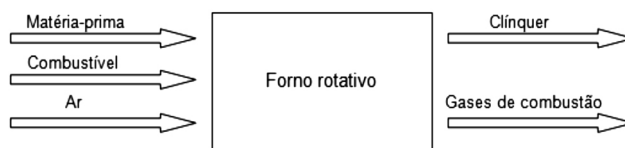


Figura 2: Representação esquemática das vazões de entrada e saída do forno rotativo.

[Figure 2: Schematic representation of the inputs and the outputs flows of the rotary kiln.]

combustível e ar. As vazões mássicas de saída são referentes ao clínter e aos gases de combustão (Fig. 2). A composição da matéria-prima alimentada no forno rotativo, utilizado na indústria de cimento, depende especificamente de cada produção, assim como também a composição do clínter obtido. Neste estudo destaca-se o processo de produção de clínter por via seca, no qual a alimentação é composta por cerca de 80% a 95% de calcário (CaCO_3), 5% a 20% de argila (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) e por pequenas quantidades de minério de ferro.

Ao ser alimentada a matéria-prima no sistema, iniciam-se a evaporação da água livre residual e da água combinada das argilas e das reações características da obtenção do clínter (Tabela I). O tempo médio de permanência é ~ 50 min [26].

Cada uma das reações intermediárias de obtenção do clínter ocorre sob determinada faixa de temperatura [29] (Tabela II). A temperaturas próximas de 1300°C , os compostos obtidos no processo de clinquerização C_3A ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e o C_4AF ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) começam a se fundir, formando uma fase líquida localizada na interface dos grãos, que envolve os cristais de C_2S ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) já formados [30]. A temperatura final da pasta varia entre 50 e 70°C e quanto mais rápido for este resfriamento, mais reativo será o cimento [16, 31]. Na Tabela III são apresentados os calores das reações que ocorrem na produção do clínter. Os gases provenientes da queima de combustível são retirados do sistema por um sistema de exaustão [14].

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo matemático fenomenológico estático, através do emprego de balanços globais de massa e energia, para a descrição do processo de obtenção do clínter em fornos rotativos empregados na rota de obtenção do cimento Portland. Os objetivos específicos consistem

Tabela I - Reações químicas do processo de obtenção do clínter (adaptado [27]).

[Table I - Chemical reactions of the process of the clinker production (adapted [27]).]

Etapa do processo de clinquerização	Fenômenos envolvidos na clinquerização
Decomposição do carbonato de magnésio	$\text{MgCO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{MgO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$
Descarbonatação	$\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$
Formação da fase líquida	$3\text{CaO}(\text{s}) + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) (\text{C}_3\text{A})$ $4\text{CaO}(\text{s}) + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) \rightarrow 4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) (\text{C}_4\text{AF})$
Formação do silicato dicálcico	$2\text{CaO}(\text{s}) + \text{SiO}_2(\text{s}) \rightarrow 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{s}) (\text{C}_2\text{S})$
Formação do silicato tricálcico	$3\text{CaO}(\text{s}) + \text{SiO}_2(\text{s}) \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{s}) (\text{C}_3\text{S})$

Tabela II - Temperaturas de obtenção das espécies químicas [27].
 [Table II - The formation temperatures of the chemical species [27].]

Acima de 800 °C	Início do processo de fabricação de CaO
Entre 800 °C e 1200 °C	Formação do C ₂ S
Entre 1095 °C e 1205 °C	Formação do C ₃ A e C ₄ AF
Entre 1260 °C e 1455 °C	Formação do C ₃ S a partir do C ₂ S com quase extinção da cal livre (CaO) Cristalização da fase líquida do C ₃ A e do C ₄ AF.
Entre 1455 °C e 1300 °C	Os silicatos C ₂ S e C ₃ S praticamente não sofrem alterações tanto na forma como na composição

Tabela III - Calores padrão de reação para o processo de obtenção de clínquer [27, 28].
 [Table III - The standard heat of reaction to the clinker production [27, 28].]

Reações	Calor de Reação (a 20 °C) (kJ/kg)
R1 CaCO ₃ ↔ CaO + CO ₂	DR1 + 1766
R1a 2CaO + SiO ₂ → 2CaO.SiO ₂	DR1a - 717
R1b 3CaO + SiO ₂ → 3CaO.SiO ₂	DR1b - 528
R1c CaO + Al ₂ O ₃ → CaO.Al ₂ O ₃	DR1c - 309
R1d 12CaO + 7Al ₂ O ₃ → 12CaO.7Al ₂ O ₃	DR1d - 169
R1e 3CaO + Al ₂ O ₃ → 3CaO.Al ₂ O ₃	DR1e - 15
R1f 4CaO + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ → 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	DR1f - 717
R2 MgCO ₃ → MgO + CO ₂	DR2 -1188
R3 C+O ₂ → CO ₂	DR3 -393,5

em calcular a temperatura final de obtenção do clínquer, considerando a perda de energia por meio da radiação, e calcular a temperatura adiabática do processo. Além disso, utilizando dados industriais, adaptar o modelo à realidade e determinar a temperatura de alimentação de ar no forno.

MATERIAIS E MÉTODOS

Como não foram encontradas em literatura aberta as equações de capacidade calorífica dos compostos C₃A₇, C₁₂A, CA, C₄AF, C₂S e C₃S, a metodologia empregada

Tabela IV - Capacidade calorífica [32, 33].
 [Table IV - Heat capacity [32, 33].]

Espécies Químicas	Capacidade calorífica (Cp) (J/mol.K)
CaCO ₃	82,2624 + 0,0497xT - (1285768)/T ²
CaO	41,8 + 0,0202xT - (451440)/T ²
MgCO ₃	70,642
MgO	45,3948 + 0,005003xT - (872366)/T ²
SiO ₂	53,504 + 0,0186846xT - (1262360)/T ²
Al ₂ O ₃	92,2944 + 0,03749878xT - (2184050)/T ²
Fe ₂ O ₃	103,3296 + 0,0670472xT - (1769812)/T ²
CO ₂	43,2212 + 0,0114532xT - (817190)/T ²
H ₂ O(l)	72,431568 + 0,0103925xT - (1496520)/T ²
H ₂ O(g)	28,84958 + 0,0120553xT - 1005994xT ²
3CaO.SiO ₂	44,884 + 0,01982367xT - (665117,42)/T ²
2CaO.SiO ₂	45,8964 + 0,01968989xT - (735262)/T ²
12 CaO.7Al ₂ O ₃	67,8046 + 0,02912206xT - (1343732,06)/T ²
CaO. Al ₂ O ₃	73,6934 + 0,031079972xT - (1555796)/T ²
3CaO.Al ₂ O ₃	60,987872 + 0,02678962xT - (1109831,8)/T ²
4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	72,708592 + 0,039229xT - (1250350,86)/T ²
C (grafite)	14,724094 + 0,006410094xT - (720823,8)/T ²
O ₂	30,254646 + 0,004206884xT - (188727,8)/T ²
N ₂	27,26992 + 0,004930202xT - (33256)/T ²

consistiu inicialmente na estimativa destes parâmetros. Considerando a composição estequiométrica destas espécies, foram propostas relações mássicas baseadas nas capacidades caloríficas dos compostos químicos mais simples, que se encontram disponíveis na literatura. As equações das capacidades caloríficas utilizadas para os compostos envolvidos no processo de sintetização são apresentados na Tabela IV.

O modelo matemático fenomenológico proposto foi desenvolvido a partir de balanços estáticos de massa e

energia do forno. As principais relações matemáticas que compõem o modelo e o fluxograma empregado em sua resolução são apresentados na Fig. 3. A solução numérica foi obtida empregando-se o programa comercial Mathcad.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Partindo de adaptações do trabalho [5], foram adotados valores das variáveis de entrada do modelo (entrada V). Tradicionalmente, a temperatura média de saída do

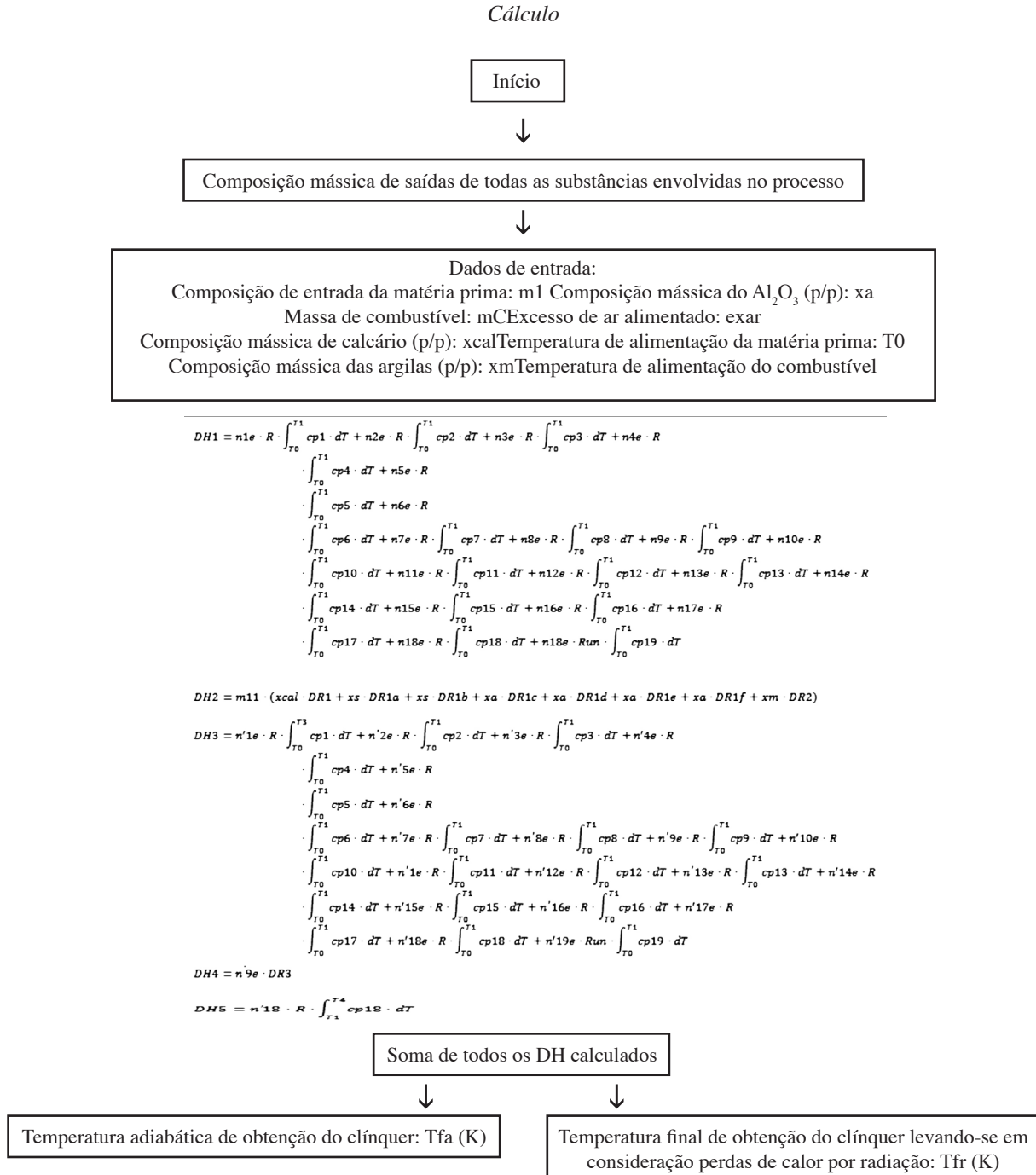


Figura 3: Principais relações matemáticas do modelo e fluxograma de resolução.
 [Figure 3: The major mathematical equations of the model and the used algorithm.]

Tabela V - Dados de entrada e saída do modelo matemático com perdas de energia devido a radiação.
 [Table V - The inputs and the outputs of the mathematical model considering radiation losses.]

Entrada	Saída
Matéria prima: 2000 toneladas/dia	Composição mássica do C_2S (p/p): 0,1626
Massa de combustível: 170 toneladas/dia	Composição mássica do C_3S (p/p): 0,5449
Composição mássica de calcário (p/p): 0,6859	Composição mássica do CA(p/p): 0,0571
Composição mássica do $MgCO_3$ (p/p): 0,0258	Composição mássica do $C_{12}A_7$ (p/p): 0,0513
Composição mássica do SiO_2 (p/p): 0,2071	Composição mássica do C_3A (p/p): 0,0940
Composição mássica do Al_2O_3 (p/p): 0,0484	Composição mássica do C_4AF (p/p): 0,0897
Composição mássica do Fe_2O_3 (p/p): 0,0278	
Composição mássica do H_2O (p/p): 0,005	Quantidade de calor perdido por radiação: 8510 W
Excesso de ar alimentado: 12%	
Temperatura de alimentação da matéria prima: 50 °C	Temperatura de saída do clínquer: 1255,85 °C
Temperatura de alimentação do combustível: 25 °C	
Temperatura de alimentação de ar: 680 °C	

clínquer é de 1200 a 1300 °C [22, 30]. De acordo com dados industriais fornecidos pelo profissional da fábrica, para um forno 2.000 t/dia de matéria-prima necessita-se de cerca de 170 t/dia de combustível, e a taxa usual de excesso de arno processo de clinquerização é de 8 a 15%. O ar alimentado no forno é pré-aquecido com o ar

Tabela VI - Composição química do clínquer (adaptado de [8, 10, 30, 34]).

[Table VI - The clinker chemical composition (adapted [8, 10, 30, 34]).]

Composição do clínquer (p/p)	
C_2S	0,15
C_3S	0,56
CA	0,055
$C_{12}A_7$	0,045
C_3A	0,09
C_4AF	0,1

quente resultante do processo de resfriamento do clínquer [27]. Comparando os valores simulados (saída, Tabela V) com os valores encontrados em literatura (Tabela VI), é possível verificar a adequação da metodologia proposta para o cálculo das composições de saída do forno.

Em um segundo momento, foi feita a simulação da temperatura adiabática do forno. O valor simulado apresentado na Tabela VII é consideravelmente maior do que o encontrado para a temperatura final de obtenção do clínquer, quando se leva em conta a perda de calor por radiação (Tabela VI). Isso já era esperado uma vez que a perda de calor por radiação diminuiu a eficiência energética do processo.

CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um modelo matemático capaz de descrever o processo de obtenção do clínquer no forno rotativo empregado na produção de cimento Portland. A condição operacional considerada para a elaboração do modelo matemático representa uma condição média adotada na indústria. A análise dos resultados obtidos

Tabela VII - Dados de entrada e saída do modelo matemático considerando processo adiabático.

[Table VII - The inputs and the outputs of the mathematical model considering adiabatic process.]

Entrada	Saída
Matéria prima: 2000 toneladas/dia	Composição mássica do C_2S (p/p): 0,1626
Massa de combustível: 170 toneladas/dia	Composição mássica do C_3S (p/p): 0,5449
Composição mássica de calcário (p/p): 0,6859	Composição mássica do CA(p/p): 0,0571
Composição mássica do $MgCO_3$: 0,0258	Composição mássica do $C_{12}A_7$ (p/p): 0,0513
Composição mássica do SiO_2 (p/p): 0,2071	Composição mássica do C_3A (p/p): 0,0940
Composição mássica do Al_2O_3 (p/p): 0,0484	Composição mássica do C_4AF (p/p): 0,0897
Composição mássica do Fe_2O_3 (p/p): 0,0278	
Composição mássica do H_2O (p/p): 0,005	Temperatura de saída do clínquer (temperatura adiabática): 1474,85 °C
Excesso de ar alimentado: 12%	
Temperatura de alimentação da matéria prima: 50 °C	
Temperatura de alimentação do combustível: 25 °C	
Temperatura de alimentação de ar: 680 °C	

indica que a metodologia proposta é adequada para o cálculo da composição de saída dos compostos. Foi possível ainda calcular a temperatura final de obtenção do clínquer considerando a perda de calor por radiação. A temperatura adiabática do forno também foi obtida e seu valor representa um limite máximo para a temperatura no interior do equipamento. O modelo matemático proposto neste trabalho não requer recursos computacionais avançados para ser resolvido e pode ser empregado na busca de novas condições operacionais para o equipamento. Diante da preocupação crescente do setor produtivo com o uso eficiente de energia, tais análises são fundamentais quando se deseja otimizar o consumo energético industrial.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) através do Programa Institucional de Iniciação Científica (PIIC).

NOMENCLATURA

cp1	Capacidade calorífica do CaCO_3	[J/(mol.K)]
cp2	Capacidade calorífica do CaO	[J/(mol.K)]
cp3	Capacidade calorífica do CO_2	[J/(mol.K)]
cp4	Capacidade calorífica do MgCO_3	[J/(mol.K)]
cp5	Capacidade calorífica do MgO	[J/(mol.K)]
cp6	Capacidade calorífica do SiO_2	[J/(mol.K)]
cp7	Capacidade calorífica do Al_2O_3	[J/(mol.K)]
cp8	Capacidade calorífica do Fe_2O_3	[J/(mol.K)]
cp9	Capacidade calorífica do C	[J/(mol.K)]
cp10	Capacidade calorífica do O_2	[J/(mol.K)]
cp11	Capacidade calorífica do N_2	[J/(mol.K)]
cp12	Capacidade calorífica do $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	[J/(mol.K)]
cp13	Capacidade calorífica do $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	[J/(mol.K)]
cp14	Capacidade calorífica do $\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	[J/(mol.K)]
cp15	Capacidade calorífica do $12\text{CaO}.\text{7Al}_2\text{O}_3$	[J/(mol.K)]
cp16	Capacidade calorífica do $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	[J/(mol.K)]
cp17	Capacidade Calorífica do $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	[J/(mol.K)]
cp18	Capacidade calorífica do $\text{H}_2\text{O}(l)$	[J/(mol.K)]
cp19	Capacidade calorífica da H_2O	[J/(mol.K)]
DH ₁	Calor sensível para levar os reagentes da temperatura de entrada até a temperatura de decomposição do CaCO_3 e do MgCO_3	[J/(mol.K)]
DH ₂	Soma do calor de reação de decomposição do MgCO_3 e calor de formação do C_3A , C_4A , C_4AF , C_2S , C_3S	[J/(mol.K)]
DH ₃	Calor sensível para levar os produtos C_3A , C_4A , C_4AF , C_2S , C_3S , CO_3 , MgO e CO_3 para a temperatura de queima do combustível.	[J/(mol.K)]

DH ₄	Calor de reação de combustão	[J/(mol.K)]
DH ₅	Calor sensível necessário para levar a água da temperatura ambiente para a temperatura de evaporação.	[J/(mol.K)]
DH ₆	Calor latente de evaporação da água	[J/(mol.K)]
DH ₇	Calor necessário para levar o vapor de água da temperatura de evaporação para a temperatura de saída do clínquer	[J/(mol.K)]
DH ₈	Calor de fusão do C_3A	[J/(mol.k)]
DH ₉	Calor de fusão do C_4AF	[J/(mol.k)]
DH ₁₀	Calor sensível para levar todos os produtos gerados no processo para temperatura final de obtenção do clínquer	[J/(mol.K)]
DR4	Calor de vaporização da água	[J/(mol.K)]
DR5	Calor de fusão do C_3A	[J/(mol.K)]
DR6	Calor de fusão do C_4AF	[J/(mol.K)]
n1e	número de mols de CaCO_3 que entram no forno	[mol]
n2e	número de mols de CaO que entram no forno	[mol]
n3e	número de mols de CO_2 que entram no forno	[mol]
n4e	número de mols de MgCO que entram no forno	[mol]
n5e	número de mols de CaO que entram no forno	[mol]
n6e	número de mols de SiO_2 que entram no forno	[mol]
n7e	número de mols de Al_2O_3 que entram no forno	[mol]
n8e	número de mols de Fe_2O_3 que entram no forno	[mol]
n9e	número de mols de C que entram no forno	[mol]
n10e	número de mols de O_2 que entram no forno	[mol]
n11e	número de mols de N_2 que entram no forno	[mol]
n12e	número de mols de $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ que entram no forno	[mol]
n13e	número de mols de $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ que entram no forno	[mol]
n14e	número de mols de $\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ que entram no forno	[mol]
n15e	número de mols de $12\text{CaO}.\text{7Al}_2\text{O}_3$ que entram no forno	[mol]
n16e	número de mols de $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ que entram no forno	[mol]
n17e	número de mols de $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ que entram no forno	[mol]
n18e	número de mols de $\text{H}_2\text{O}(l)$ que entram no forno	[mol]
n19e	número de mols de $\text{H}_2\text{O}(v)$ que entram no forno	[mol]
n'1e	número de mols de CaCO_3 presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]
n'2e	número de mols de CaO presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]

n'3e	número de mols de CO ₂ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	<i>for novel cementitious binders</i> , Cement Concr. Res. 41 (2011) 736-749.
n'4e	número de mols de MgCO presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[3] K. S. B. Mujumdara, K. V. Ganesha, S. B. Kulkarnia, V. V. Ranade, <i>Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler</i> , Chem. Eng. Sci. 62 , 9 (2007) 2590-2607.
n'5e	número de mols de CaO presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[4] Z. Utlu, Z. Sogut, A. Hepbasli, Z. Oktay, <i>Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production</i> , Appl. Thermal Eng. 26 , 17-18 (2006) 2479-2489.
n'6e	número de mols de SiO ₂ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[5] T. Engin, V. Ari, <i>Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems - a case study - Departamento de engenharia mecânica</i> , Universidade de Sakarya, Energy conversion e management (2004).
n'7e	número de mols de Al ₂ O ₃ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[7] E. Worrell, N. Martin, L. Price, <i>Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry</i> , Energy (1999) 26.
n'8e	número de mols de Fe ₂ O ₃ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[8] E. A. Mastorakos, A. Massias, C. D. Tsakiroglou, D. A. Goussis, V. N. Burganos, A. C. Payatakes, <i>CFD predictions for cement kilns including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry</i> , Appl. Mathematical Modeling (1998) 22.
n'9e	número de mols de C presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[9] A. M. M. Santi, <i>O emprego de resíduos como combustíveis complementares na produção de cimento na perspectiva da energia, da sociedade e do meio ambiente</i> , Diss. Mestrado, Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP (1997).
n'10e	número de mols de O ₂ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[10] K. E. Peray, <i>The Rotary Cement Kiln</i> , Chem. Publishing Co. (1986) 388.
n'11e	número de mols de N ₂ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[11] R. J. Silva, <i>Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland</i> , Tese Dr., Engenharia Mecânica, UNICAMP (1994) 242.
n'12e	número de mols de 2CaO.SiO ₂ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[12] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, A. Jullien, <i>Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation</i> , J. Cleaner Production (2010) 478-485.
n'13e	número de mols de N ₂ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[13] A. C. S. M. Bernardo, R. C. Carpio, R. J. Silva, <i>Otimização Multi-Objetivos da Produção de Cimento Portland com Co-Processamento e Adição de Mineralizadores</i> , Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, MG, Nono Simpósio de Mecânica Computacional (2010) 10.
n'14e	número de mols de CaO.Al ₂ O ₃ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[14] M. L. G. Renó, <i>Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento</i> , Diss. Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, MG (2007) 141.
n'15e	número de mols de 12CaO.7Al ₂ O ₃ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[15] R. Saidur, M. S. Hossain, M. R. Islam, H. Fayaz, H. A. Mohammed, <i>A review on kiln system modeling</i> , Energy (2007) 2487-2500.
n'16e	número de mols de 3CaO. Al ₂ O ₃ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[16] M. C. C. Silva, <i>Relações entre microestrutura, composição, resistência à ruptura e moabilidade de clínqueres de cimento Portland</i> , Diss. Mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ (2007).
n'17e	número de mols de 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	[17] A. A. Boateng, P. V. Barr, <i>A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed</i> , Department of Metals and Materials Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada V6T 124. Pergamon (1995) 2131-2147.
n'18e	número de mols de H ₂ O(l) presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	
n'19e	número de mols de H ₂ O(v) presentes quando ocorre a reação de combustão	[mol]	
R	Constante universal dos gases	[J/(mol.K)]	
T0	Temperatura de alimentação da matéria prima	K	
Tf	Temperatura de saída do clínquer	K	
T1	Temperatura em que ocorre a reação de formação do óxido de cálcio	K	
T3	Temperatura em que ocorre a combustão do carvão	K	
T4	Temperatura em que ocorre a vaporização do H ₂ O	K	
y5	Fração molar de CaO que segue a equação R1e	K	
y6	Fração molar de CaO que segue a equação R1f	K	

REFERÊNCIAS

- [1] ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland, <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland>, acesso em 14/11/2011.
- [2] E. M. Gartner, D. E. Macphee, *A physico-chemical basis*

- [18] A. D. S. Solteira, *Estudo de Propriedades Físicas e Químicas de um novo Cimento Selador Endodôntico*, Diss. Mestrado, Universidade Estadual Paulista, SP (2004).
- [19] G. C. R. Garcia, E. M. B Santos, S. Ribeiro, *Efeito do tempo de cura na rigidez de argamassas produzidas com cimento Portland*, Cerâmica 57, 341 (2011) 94-99.
- [20] A. B. Lima, *O processo produtivo do cimento portland*, Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG (2011) 38p.
- [21] E. Mastorakos, A. Massias, C. D. Tsakiroglou, D. A. Goussis, V. N. Burganos, A. C. Payatakes, *CFD predictions for cement kilns including ame modelling, heat transfer and clinker chemistry*, Appl. Math. Modelling 23 (1999) 55±76 (1999) 55-76.
- [22] Seminário de Operación de Hornos, Holderbank. Administración y Asesoría S.A. (1995) 292.
- [23] H. A. Spang, *A Dynamic Model of a Cement Kiln*, Automatica 8, 6 (1972) 309-323.
- [24] K. S. Mujumbara, V. V. Ranade, *Simulation of rotary cement kilns using a one-dimensional model*, Institution of Chemical Engineers, Chem. Eng. Res. Design (2006) 165-177.
- [25] A. L. de Castro, J. B. L. Liborio, V. C. Pandolfelli, *A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional*, Cerâmica 57, 341 (2011) 10-21.
- [26] M. C. C. Silva, *Relações entre microestrutura, composição, resistência à ruptura e moabilidade de clínqueres de cimento Portland*, Diss. Mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ (2007).
- [27] L. G. Paula, *Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-Processamento de Misturas de Resíduos*, Diss. Mestrado (em Conversão de Energia), Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, MG (2009) 158p.
- [28] P. Weber, "Heat Transfer in Rotary Kilns", Zement-Kalk-Gips, Bauverlag GMBH, Alemanha (1963).
- [29] R. N. Shereve, J. A. Brink, "Indústrias de Processos Químicos", Ed. Guanabara Dois, 4ª Ed., Rio de Janeiro, RJ, (1980) 717.
- [30] J. A. S. Tenório, F. G. S. Araújo, S. S. R. Pereira, A. V. Ferreira, D. C. R. Espinosa, A. Barros, *Decomposição da fase majoritária do cimento Portland - Parte II: alita com adições de Fe e Al – Esc. Minas*, Ouro Preto, MG (2003).
- [31] *Mineralogía Del Clinquer*, Seminário de cimento Lima, Holderbank Administración y Asesoría S.A. (1979) 50.
- [32] R. H. Perry, L. R. Benskow, W. E. Beimesch, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 8ª Ed., McGraw-Hill, N. York, EUA (2008).
- [33] J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott, "Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química", Ed. LCT, 7ª Ed. (2007).
- [34] G. Kabir, A. I. Abubakar, U. A. El-Nafaty, *Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant*, U. A. Energy 35, 3 (2010) 1237-1243.
(Rec. 10/07/2012, Rev. 10/12/2012, Ac. 15/12/2012)