

ESTUDO DO USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NO FORNO DA INDÚSTRIA DO CIMENTO

B. L. VÉRAS¹, J. I. SOLLETI¹, E.M.CARNEIRO FILHO², W.U.LEITE¹, T.A.F. ROCHA¹

¹ Universidade Federal de Alagoas, Curso de Engenharia Química

² Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: veras.bruna@hotmail.com

RESUMO – O cimento é um dos produtos mais utilizados pela humanidade nos últimos tempos, e o setor industriário responsável pela produção do mesmo visa, como toda indústria, a otimização do processo para a obtenção do produto afim de alcançar redução no custo de produção. Partindo deste princípio, este trabalho avalia, através de meio computacional, o uso de resíduos, industrial (coque de petróleo) e não industrial (pneu usado), como combustíveis alternativos para o forno de produção de clínquer, principal componente do cimento. Por meio do software Gams, gerou-se um programa que indica o melhor combustível a ser utilizado, tendo como comparativo o carvão mineral que é convencionalmente utilizado. Tal ferramenta também estabelece a composição ideal de matéria-prima e combustível para obtenção do clínquer.

1. INTRODUÇÃO

O cimento é um material utilizado na construção civil e seu uso pode ser justificado por algumas características como durabilidade, versatilidade e resistência. A indústria de cimento é um dos setores que vem crescendo nos últimos anos, movimentando bilhões de dólares anualmente em todo o mundo (FRANCO *et. al.*, 2001). O cimento *portland* é o tipo de cimento mais utilizado na construção civil. Foi descoberto em 1830 pelo inglês Joseph Aspdin (SNIC, 2003).

Na indústria do cimento, a otimização do processo é importante pois diminui custos e impactos ambientais mantendo a qualidade do produto, estes fatores podem ser estudados em vários pontos do processo, entre eles a formação do clínquer no forno. O clínquer é o principal componente do cimento *Portland* e lhe confere resistência mecânica após hidratação. (MONTEIRO; MAINIER, 2008).

A queima do clínquer é uma das partes do processo que mais tem influência na qualidade do produto, no custo de produção e nas emissões de poluentes. Nesta etapa a matéria-prima é introduzida no forno de cimento e é então sujeita a tratamentos térmicos, entre eles está a sinterização, também denominada como clinquerização, onde ocorre a

formação do clínquer à temperaturas em torno de 1500°C, para isso se é exigido uma grande quantidade de combustível (CEMBUREAU, 1999).

A escolha do combustível para queima do clínquer é algo de suma importância e tem de ser feita de forma criteriosa. Este tem influência direta ou indireta, podendo ser: na qualidade do clínquer, através da composição química do mesmo; na temperatura do forno; no meio ambiente, através da emissão de poluentes; na saúde humana, através da emissão de metais pesados; no custo de fabricação do clínquer, levando em consideração os custos do combustível como também o pré-tratamento do mesmo antes de ser lançado ao forno; entre outros (CARPIO, 2005). Levando em consideração a influência do combustível no processo de produção, tem-se estudado cada vez mais a utilização de combustíveis alternativos além dos mais usuais como o coque de petróleo e o gás natural.

A maioria das indústrias, no processo de escolha de um novo combustível, faz testes de queima, e, assim, analisam a viabilidade do mesmo. O uso de um modelo matemático, implementado computacionalmente, pode auxiliar as indústrias no estudo de novos combustíveis, aumentando a eficiência da pesquisa (CARPIO, 2005).

Na engenharia química, o uso de modelos matemáticos de otimização tem sido valorizado cada vez mais, especialmente na engenharia de sistemas de processo. No meio industrial, onde a competitividade é acirrada, visa-se sempre melhorar seus processos de produção a fim de minimizar custos para maximizar lucro, garantindo também um produto de excelência e mais acessível. Portanto, a otimização se tornou uma tecnologia importante que ajuda a indústria química para se manterem competitivas (CASTILHO, 2007).

O GAMS é um software que foi desenvolvido para solucionar problemas de otimização. O manuseio deste software é de fácil compreensão, permitindo ao usuário poder alterar a formulação do problema em estudo de forma rápida e simples, trocar o método numérico de resolução implementado. O GAMS pode ser utilizado em grandes aplicações de modelagem em escala, e possibilita o desenvolvimento de grandes modelos sustentáveis que podem ser adaptados rapidamente a novas situações (ROSENTHAL, 2008).

2. METODOLOGIA

O problema propõe a redução do custo de produção por meio da escolha do combustível utilizado. Sendo assim, determinou-se *Custo* como a variável a ser otimizada. Para tal utilizou-se a função não-linear adotada por Carpio (2005):

$$Custo = \sum_i x_i w_i + w_{ee} A e^{BS} \quad (1)$$

onde: x_i = Quantidade da matéria prima e combustível (t); w_i = preço da matérias prima e combustível por tonelada (R\$); w_{ee} = preço da energia elétrica (R\$/kWh); A = coeficiente em função do Módulo de Silica; B = Coeficiente em função do Módulo de Silica; S = Superfície específica do cimento.

Para minimização da função custo, montou-se um sistema de equações que representam as seguintes restrições:

- Composição química do clínquer;
- Emissão de poluentes;
- Calor específico no forno de cimento.

Os combustíveis avaliados neste trabalho são: Coque de Petróleo, Carvão Mineral, e Pneu usado. E para formulação das equações usou-se os dados presentes nas Tabelas 1, 2, 3, e 4:

Tabela 1 – Composição Química das matérias-primas do cru (% em peso)

Material		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Calcário	X ₁	50,60	5,04	1,19	0,67	0,78	0,1	0,1	0,3
Argila	X ₂	1,23	61,62	16,59	9,01	-	0,3	0,3	5,0
Areia	X ₃	1,13	93,00	2,87	1,20	0,1	0,5	0,5	1
Minério de Ferro	X ₄	0,71	7,60	1,13	82,97	-	-	-	-

Tabela 2 – Composição parcial dos combustíveis primários e alternativos utilizados

Componentes	Carvão Mineral % em peso	Coque de Petróleo % em peso	Pneus usados % em peso
	X ₅	X ₆	X ₇
S	4,6	0,5-7,0	1,23
CaO	1,03	-	0,93
SiO ₂	9,32	-	1,93
Al ₂ O ₃	5,08	-	0,79
Fe ₂ O ₃	7,21	-	0,13
MgO	0,44	-	0,12
Zinco	0,04	85 ppm	-
Cromo	0,008	23 ppm	0,0097
Vanádio	0,0648	130-2300 ppm	-
Poder Calorífico Inferior (KJ/Kg)	25392	32447-36425	32100

Tabela 3 – Limites dos componentes do Cimento e superfície esférica

Componente	Conteúdo (% em peso)	Superfície Mínima
------------	-------------------------	----------------------

	Mín	Máx	(cm ² /g)
Clínquer	65	75	3300
Pozolana Natural	5	20	5500
Escória de Alto Forno	10	20	2700
Cinzas Volantes	10	20	6000

Tabela 4 – Composição química mineralógica parcial do cimento

Componente	% em peso
SiO ₂	19,71 – 34,25
Al ₂ O ₃	3,76 – 6,78
CaO	63,76 – 70,14
Fe ₂ O ₃	1,29 – 4,64
MgO	0,00 – 4,51
SO ₃	0,20 – 2,07
K ₂ O	0,31 – 1,76
Na ₂ O	0,03 – 0,33

O problema não-linear foi implementado no software Gams, e os resultados obtidos serão demonstrados em tabela. Segue o problema implementado na Figura1:

3. RESULTADOS

Para resolução do problema não-linear usou-se o método de resolução *MINOS* presente no software Gams. Obteve-se então os dados apresentados na Tabela 5 referentes à produção de 1000 Kg de clínquer:

Tabela 5. Composição do material introduzido no forno para produção de cimento obtida no programa em estudo

Componente	Material	Quantidade (Kg)
Matéria-prima	Calcário	643,0
	Argila	194,0
	Areia	48,0
	Minério de Ferro	11,0
Combustível	Carvão Mineral	0,0
	Coque de Petróleo	105,0
	Pneus usados	0,0

Segundo os dados da Tabela 5, observou-se que o programa nos forneceu o Coque de Petróleo como o melhor combustível a ser utilizado para produção de clínquer, isto quando comparado aos demais combustíveis analisados, carvão mineral e pneu usado. As

composições de matéria-prima e do combustível apresentadas seguem as restrições impostas pelo problema, nos dando também a composição ótima para produção do mesmo. Quanto ao custo de produção, o programa simulou um gasto de R\$ 145,00/t de clínquer produzido. Vale ressaltar que os valores de custo atribuídos à matéria-prima são fictícios devido à dificuldade de encontrar valores reais e atualizados. Mesmo assim, o resultado encontrado valida o programa tendo em vista que o custo de matéria-prima por tonelada será constante independente do combustível utilizado.

4. CONCLUSÃO

O coque de petróleo apresentou-se como melhor opção de combustível a ser utilizado para produção de cimento em forno rotativo visando a redução de custo do processo e tendo como comparativo o carvão mineral e pneu usado. O programa gerado para resolução do problema em questão também apresentou a composição ideal para obtenção do clínquer. Logo, além de obter-se uma diminuição no custo de produção, tem-se também a garantia da qualidade do produto. Sendo assim, o Gams mostrou-se uma ferramenta ideal para resolução de problemas de mistura, tal como o estudado neste trabalho.

5. NOMENCLATURA

Tabela 6 – Nomenclatura das fórmulas moleculares

Símbolo	Nomenclatura
Al_2O_3	Óxido de Alumina
CaO	Óxido de Cálcio
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
K_2O	Óxido de Potássio
MgO	Óxido de Magnésio
Na_2O	Óxido de Sódio
SO_3	Trióxido de Enxofre
SiO_2	Óxido de Silício

6. REFERÊNCIAS

- CARPIO, R. C. Otimização no Co-processamento de Resíduos na Indústria do Cimento, envolvendo Custos, Qualidade e Impacto Ambiental. 2005. 194 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.
- CASTILHO, E. Process Optimization - A Statistical Approach. Pennsylvania: Springer, 2007.
- CEMBUREAU. Best Available Techniques for the Cement Industry. The European Cement Association, 1999. Disponível em: . Acesso em: 16/12/214.

- FRANCO JR., J. de O; KORN, M. G. A.; COSTA, A. C. S; SANTOS JR., A. de F.
Alternativas Analíticas para Determinação de Ferro e Titânio em Cimento Portland.
Química Nova, Salvador, v. 24, n. 2, 2001. Disponível em: <
<http://quimicanova.sbq.org.br/>>. Acesso em: 16/12/2014.
- MONTEIRO, L. P. C.; MAINIER, F. B. Queima de Pneus Inservíveis em Fornos de Clínquer.
Engevista, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p.52-58, Jun. 2008.
- ROSENTHAL, E. R. GAMS - A User's Guide. GAMS Development Corporation,
Washington, DC, USA, 2008.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). SNIC 50 anos: História
do cimento no Brasil. Rio de Janeiro, 2003.