

## **OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DE COMBUSTÍVEIS SECUNDÁRIOS ALTERNATIVOS VISANDO ATENDER AS RESTRIÇÕES OPERACIONAIS E AMBIENTAIS EM FORNOS DE CIMENTEIRAS**

**Ricardo Carrasco Carpio**

Universidade Federal de Itajubá  
Av. BPS, 1303 – Bairro Pinheirinho – Itajubá-MG  
rccarpio@iem.efei.br

**Rogério José da Silva**

Universidade Federal de Itajubá  
Av. BPS, 1303 – Bairro Pinheirinho – Itajubá-MG  
rogério@iem.efei.br

**Ariosto Bretanha Jorge**

Universidade Federal de Itajubá  
Av. BPS, 1303 – Bairro Pinheirinho – Itajubá-MG  
ariosto.b.jorge@efei.br

### **RESUMO**

Os fornos de clínquer das fábricas de cimento têm sido utilizados para o co-processamento de resíduos industriais, no qual os resíduos são destruídos em altas temperaturas, ao mesmo tempo que ocorre o aproveitamento de seu potencial calorífico, além de seus componentes inertes serem incorporados às matérias-primas. Alguns resíduos apresentam condições para serem co-processados nos fornos de clínquer, sendo misturados ou atuando como combustíveis secundários, aos combustíveis fósseis normalmente utilizados. Este trabalho apresenta uma formulação para a otimização da mistura de carvão mineral, coque de petróleo e pneus usados, a ser utilizada em um forno rotativo de produção de clínquer, de via seca, com preaquecedor de quatro estágios, levando-se em conta as restrições de processo e consumo específico de calor.

**Palavras-Chave:** Otimização, Co-processamento de Resíduos, Indústria de cimento.

### **ABSTRACT**

The clinker kilns of the cement industries have been used for the co-processing of industrial waste. In this co-processing, the waste is destroyed at high temperatures. The combustion process of the waste takes advantage of its specific heat. In addition, inert components of the ashes generated from the waste are incorporated to the raw materials. Some waste materials are appropriate to be co-processed in the clinker kilns, as secondary fuels, either being mixed to fossil fuels, or partially replacing these fossil fuels as secondary fuels. This work presents a formulation for the mixture optimization of mineral coal, petroleum coke and used tires. This mixture is intended for use in a rotary kiln of clinker production, dry via, with a four stages pre-heater. The optimization procedure takes into account process restrictions such as specific heat consumption, cement quality and environmental impact.

**Key-Words:** Optimization, Waste Co-processing, cement industry.

## 1. Introdução

O cimento é um aglomerante hidráulico obtido a partir da moagem e posterior queima de calcário e argila. Além destes dois principais constituintes, adiciona-se o minério de ferro e a areia para eventuais correções da mistura, que após passar por uma alta temperatura (em torno de 1450 °C) no interior de um forno rotativo de cimento, dá origem ao clínquer, o principal constituinte do cimento Portland. Na moagem final do cimento é acrescentado gesso ao clínquer para regular o tempo de endurecimento (Duda,1977). O processo de fabricação do cimento é apresentado na Figura 1.

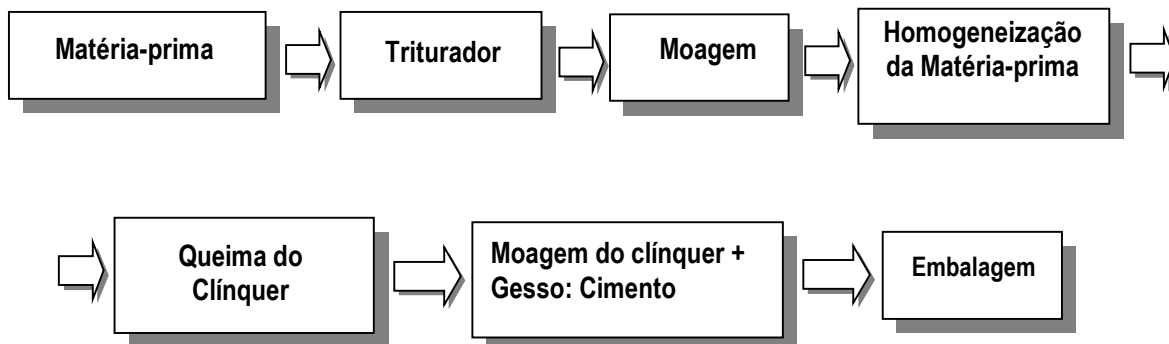


Figura 1 – Etapas do processo de fabricação do cimento Portland.

Além do calcário, argila, areia e minério de ferro, outros materiais podem ser utilizados para a fabricação do cimento Portland (Peray, 1972). Na procura por menores custos de produção, o setor cimenteiro tem procurado modernizar o seu parque industrial, através da construção de novas unidades industriais que incorporem as novas tecnologias de produção. A utilização de resíduos industriais como combustíveis secundários nos fornos rotativos de cimento (processo conhecido como co- processamento), permite uma sensível redução no custo final do produto. As cinzas geradas fornecem muitos dos constituintes presentes nas matérias-primas, e torna-se necessário compatibilizá-las com estas, a fim de que sejam absorvidas em alta temperatura na matriz do clínquer (Carvalho, 1995).

Este fato, vem contribuir para a solução parcial de alguns problemas de disposição enfrentados por muitas empresas no descarte de seus resíduos, bem como propicia uma receita adicional para as fábricas de cimento que aproveitam os mesmos, seja pelo menor custo de aquisição, ou pela remuneração do serviço de destruição térmica pelo co-processamento.

Além disso, deve-se fazer a otimização da dosagem, homogeneização, clínquerização e resfriamento do clínquer, de modo que ele atinja dimensões e dureza que facilitem a moagem e reduzam o custo. A partir dos quatro elementos principais das matérias-primas (cru ou farinha), óxido de cálcio (CaO), óxido de sílica (SiO<sub>2</sub>), óxido de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), calculam-se: o Módulo de Sílica, Módulo de Alumina, Fator de Saturação de Cal ou Módulo Hidráulico, que definem a mistura. Assim, sua otimização garante uma melhor estabilidade de operação do forno e redução no consumo de energia e, portanto, são denominadas restrições no modelo de otimização. Elas serão detalhadas à frente.

### 1.1 . Módulo de sílica

O Módulo de sílica exerce uma influência sobre: a queima da farinha, a formação de colagem, a granulometria do clínquer, a fase líquida, o desgaste dos refratários, etc. (ABCP, 1984). Tais características são otimizadas quando esta relação se apresenta no intervalo entre 2,3 e 2,7. O Módulo de sílica é obtido pela relação (% em peso) entre as proporções dos óxidos de sílica e a soma dos óxidos de alumínio e ferro, presentes na matéria-prima:

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (1)$$

## 1.2 . Módulo de Alumina

Esta relação influencia principalmente o processo de queima atuando na velocidade de reação entre o calcário e sílica (ABCP, 1984), melhorada quando este módulo se encontra entre 1,3 e 2,7. O módulo de alumina é obtido pela relação (% em peso) entre as proporções dos óxidos de alumínio e os óxidos de ferro, presentes na matéria-prima:

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (2)$$

## 1.3 . Fator de saturação de cal

Um alto fator de saturação da mistura proporciona uma queima mais difícil. Seu valor ótimo se encontra entre 90 e 100 (ABCP, 1984). O fator de saturação de cal é dado pela seguinte expressão:

$$FS = \frac{100 CaO}{2,8 SiO_2 + 1,1 Al_2O_3 + 0,7 Fe_2O_3} \quad (3)$$

### Módulo hidráulico

Este Módulo pode é uma relação similar ao do Fator de Saturação de Cal, porém sem os coeficientes usados neste, e o seu valor se encontra entre 1,8 e 2,2 (Xirokostas, 1977), sendo calculado pela seguinte expressão:

$$MH = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (4)$$

## 2. Moagem do Cimento

A moagem do clínquer para fabricação do cimento Portland é uma das principais etapas do processo e, ao mesmo tempo, o final das operações tecnológicas na fabricação do cimento. A forma de sua realização é decisiva para a qualidade do cimento. O produto moído deve estar dentro de determinados limites de granulometria, de modo a criar melhores condições para o processo de endurecimento (Duda, 1977).

Outro fator importante é a energia requerida para a moagem do clínquer juntamente com o gesso. Aproximadamente 30% da energia requerida para produzir uma tonelada de cimento é consumida na moagem. Isto é uma porcentagem significativa do custo total do cimento. A energia consumida nos moinhos está na faixa entre 16,5 – 63,5 kWh/ton com uma média de 36 kWh/ton (Tokuyay, 1999). Numerosos fatores afetam o consumo de energia durante a moagem do clínquer. Um clínquer muito duro pode consumir até 80% mais energia que um clínquer de baixa dureza. Além disso as diferentes granulometrias requeridas (finuras) resultam em um alto consumo de energia. A seguir, serão detalhadas as características que influenciam diretamente na moagem do clínquer, e levam a um menor ou maior custo de produção do cimento.

## **2.1 Porosidade do clínquer**

A alta porosidade de um clínquer normalmente indica uma queima insuficiente e zonas com indícios de reação incompleta (pouco cozimento); deficiência de elementos que facilitam a formação da fase líquida (fundentes principais: Al e Fe); e, deficiência na moagem da matéria-prima, caracterizada pela presença de CaO livre (cal não combinada). Em termos teóricos, clínqueres muito porosos indicam uma reação de clinquerização deficiente, pois a presença de poros, isto é, ausência de pontos de contato dificulta as reações.

A baixa porosidade indica tempo longo ou alta temperatura de clinquerização, fase líquida abundante, e moagem elevada (alta finura). Por outro lado, um clínquer pouco poroso apresentará dificuldades na moagem, aumento de consumo de energia e de custo (ABCP, 1984).

## **2.2 Temperatura e tempo de clinquerização**

As evidências de temperatura e tempo adequados, no momento da clinquerização, são dadas pela estrutura físico-química do clínquer, embora também sejam dependentes da composição do cru. Entretanto, parece que a temperatura de clinquerização atua predominantemente na morfologia dos cristais (ABCP, 1984).

## **3. Combustíveis Alternativos em Fornos de Clínquer**

Para que os combustíveis alternativos sejam utilizados em fornos de clínquer, resultando em vantagens econômicas, ambientais e na qualidade do produto final, é preciso se fazer uma análise das proporções de cada tipo de resíduo a ser utilizado. A proposta é utilizar uma mistura desses resíduos como combustível alternativo. A análise dos componentes de cada resíduo proporcionará a otimização das porcentagens de cada resíduo na mistura.

Contaminantes presentes nos resíduos, basicamente materiais inorgânicos e metais pesados, são combinados com os silicatos formados nos fornos de clínquer das fábricas de cimento. O processo de reciclagem, na forma de co-processamento nestes fornos, assegura a não formação de resíduos secundários. Entretanto, devem ser estudados com critérios, as influências que os metais pesados incorporados podem ter nas características e nas propriedades do cimento Portland (Trezza e Scian, 2000).

### **3.1 Coque de Petróleo**

Atualmente, grandes quantidades de coque de petróleo e óleos residuais pesados têm sido produzidas como subprodutos dos processos de refino do petróleo. Enquanto uma parte do coque de petróleo produzido é utilizada em indústrias de alumínio e aço, outra parte significativa deste subproduto está à venda no mercado mundial de combustíveis. Porém, o alto conteúdo de enxofre destes combustíveis tende a manter os preços baixos, devido ao custo que os usuários terão para controlar emissões atmosféricas prejudiciais (Salomon, 2001).

Nas indústrias de cimento o coque pode ser usado isoladamente, ou em uma mistura com o óleo combustível, carvão mineral ou gás natural, para a combustão no forno rotativo. O coque não possui material volátil bastante para produzir uma chama auto-sustentável e como resultado disto, apresenta alguma dificuldade para ser queimado sozinho em um forno de clínquer. Combinações usuais de combustíveis para indústrias de cimento são 25% de óleo ou gás e 75% de coque, ou então, 70% de carvão betuminoso e 30% de coque. Entretanto, devido a condições específicas, algumas instalações queimam 100% de coque de petróleo. O enxofre contido no coque reage com o óxido de cálcio, presente em grande quantidade na matéria-prima para produzir o clínquer formando sulfatos, e isso contribui para a redução de sulfato de cálcio (gesso) requerido no cimento. Os metais pesados, principalmente vanádio e níquel, contidos no coque não resultam em grandes problemas para o cimento. Em uma base de 25% de óleo e 75% de coque combinados, o consumo de coque para uma fábrica de cimento moderna deverá ser de

75 a 115 toneladas para cerca de 1.000 toneladas de cimento. O níquel e o vanádio são metais não voláteis, que podem incorporar-se ao clínquer, resultando em uma mudança nas características do cimento (Salomon, 2001). A composição química típica para o coque de petróleo verde e o coque de petróleo calcinado com o seus principais constituintes é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Características Típicas do Coque de Petróleo.

Constituinte	Coque Verde	Coque Calcinado
Umidade %	6 – 4	0,1
Matéria Volátil %	8-14	0,5
Carbono Fixo %	86 – 92	99,5
Enxofre %	1,0 – 6,0	1,0 – 6,0
Silício %	0,02	0,02
Ferro %	0,013	0,02
Níquel %	0,02	0,03
Cinza %	0,25	0,4
Vanádio %	0,015	0,03
Densidade mássica (kg/m <sup>3</sup> )	720 – 800	670 - 720

### 3.2 Pneus Usados

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, aprovou em 26 de agosto de 1999 a Resolução nº 258, a qual regulamenta a exigência por parte do Governo Brasileiro às indústrias fabricantes e empresas importadoras de pneus, no sentido de que estas deverão coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus fabricados, após estes se tornarem usados inservíveis. O artigo 3º da resolução estabelece no seu inciso II - *a partir de 1º de janeiro de 2003: para cada dois pneus novos fabricados no País ou pneus importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível*. Em 2005, para cada quatro pneus novos fabricados no país ou pneus novos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis. (CONAMA, 1999)

O uso dos pneus inservíveis como combustível alternativo é considerado, dentre as formas de reciclagem de pneus, como o meio mais viável para sua disposição final. A demanda pelo uso de pneus como um combustível suplementar em fornos rotativos de clínquer tem sido elevada e amplamente discutida. Os pneus usados, embora sendo um material residual especial, são excelentes fontes de energia, principalmente quando utilizados como combustíveis secundários. A alta temperatura, o elevado tempo de residência, o ambiente alcalino que neutraliza o enxofre, e a incorporação das cinzas geradas ao clínquer, são condições favoráveis para que a queima de pneus em fornos de fábricas de clínquer (Salomon, 2001).

Os pneus inservíveis são considerados combustíveis de alta qualidade, quando comparados ao carvão de melhor qualidade. A quantidade de enxofre encontrada nos pneus está entre 0,5 e 2,0 %, ou seja, menor ou igual à maioria dos carvões e coque de petróleo. O mesmo ocorre com os hidrocarbonetos que compõem a borracha dos pneus, pois estes não são mais complexos ou difíceis de destruir que os apresentados no carvão. O aço e as cintas radiais constituem 18% em peso dos pneus, o que deve ser levado em conta no balanço da mistura de cru. Além disso, os pneus contêm metais como chumbo, cádmio e zinco. Os níveis de metais pesados situam-se em uma faixa de concentração que permite que sejam facilmente incorporados ao clínquer. A Tabela 2 apresenta a composição química típica para pneus de diversas origens. A Figura 2 apresenta um esquema representativo de um forno rotativo de produção de clínquer, onde podem ser visualizados os pontos de introdução dos pneus cortados, moídos ou inteiros (Salomon, 2001).

### 3.3 Composições Química dos Combustíveis Utilizados para a Alimentação de um Forno de Clínquer

A fim de se estabelecer os parâmetros básicos para a alimentação de combustíveis no forno rotativos de clínquer, procurou-se obter alguns parâmetros essenciais para a formulação de um modelo de otimização. Para isto, foram levantados inicialmente, os dados relacionados com a composição química dos combustíveis normalmente utilizados (carvão), assim, como dos combustíveis alternativos, coque de petróleo e pneus usados. Além disto, obteve-se também a composição química das cinzas, e em especial, dos constituintes destas que também fazem parte das matérias-primas utilizadas para a fabricação do clínquer. O poder calorífico de cada um destes combustíveis e resíduos, assim como as demais informações relacionadas acima, são apresentados na Tabela 3.

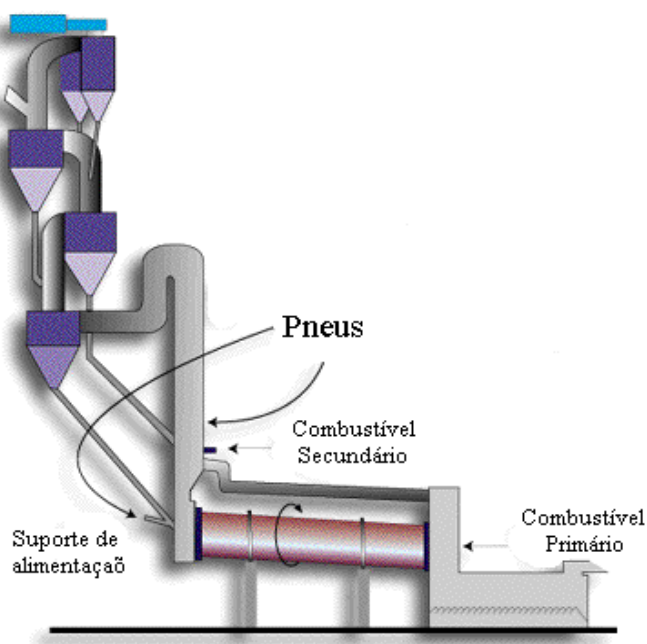


Figura 2 – Forno rotativo com precalcinador – pontos de introdução de combustíveis e resíduos.

Tabela 2 - Características Típicas e Composição Química de Pneus

Características Típicas		Composição Química	
Componentes	%	Componentes	%
Borracha	36	C	70
Enchimento (SiO <sub>2</sub> )	37	H	7
ZnO	1,2	S	1-3
Estabilizadores	3	Cl	0,2-0,6
S	1,3	Fe	15
Aço	18	ZnO	2
Restante	3,5	SiO <sub>2</sub> + restante	5

Fonte: (Souza, 2000).

#### 4. Modelo de Otimização

A otimização do cru deve considerar a operação estável do forno rotativo, a qualidade do clínquer produzido, o custo mínimo da composição utilizada, e o consumo de energia elétrica, todas estas variáveis são consideradas em nosso modelo não linear através da seguinte função objetivo:

$$C = \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i + p \cdot A \cdot \exp(B \cdot S) \quad (5)$$

Tabela 3 – Composição (% em peso) dos Principais Combustíveis Utilizados como Combustíveis Primários e Combustíveis Alternativos em Fornos de Clínquer.

Componentes	Carvão Mineral <sup>(a)</sup> %	Coque de Petróleo <sup>(b)</sup> %	Pneus Usados <sup>(c)</sup> %
C	63,9	8 – 100	72,15
H	3,6	3,5	6,74
S	4,6	0,5 – 7,0	1,23
O	0,9		9,67
N	1,8	1,5	0,36
Cl	-		0,149
Cinzas	24,9	1 – 4	8,74
CaO	1,03		10,64*
SiO <sub>2</sub>	9,32		22,0*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,08		9,09*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,21		1,45*
MgO	0,44		1,35*
Álcalis	0,85		
Zinco	0,04	1 – 85**	
Cádmio	0,001	1**	0,0006
Cromo	0,008	1 – 23**	0,0097
Níquel	0,008	30 - 420**	
Chumbo	0,027	1 – 10**	0,0065
Tálio	0,0004	1 – 80**	0,00001
Mercúrio	-	0,1 – 10**	
Arsênio	0,00017	0,1 – 10**	
Vanádio	0,0648	130-2300**	
PCI [kJ/kg]	25.392	32.447 - 36.425	32.100

(a)Carvalho, 1997, (b) Fonte: ABCP, 2002; (c) Salomón, 2001 \* Componente nas cinzas; \*\* ppm

A função objetivo (C) do modelo deverá procurar a obtenção de um custo mínimo, na produção de clínquer, levando em consideração os custos das matérias-primas, assim, como o consumo da energia requerida para moagem.

O primeiro termo (linear) representa o custo das matérias-primas e dos combustíveis (primários e alternativos) usados na produção do clínquer ( $p_i$ , é o custo das matérias-primas  $i = 1, 2, \dots, n$ , que participam na queima com seus respectivos porcentagem  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ).

O segundo termo (não linear) representa o custo da eletricidade  $p$ , e energia requerida em kWh/ton, para moagem de uma superfície específica ( $S$  é a área da superfície específica em  $\text{cm}^2/\text{g}$ ,  $A$  e  $B$  são constantes que dependem da composição do clínquer).

Com o objetivo de obter dados para a otimização da mistura crua levou-se em conta a composição química do carvão (combustível primário) ( $X_5$ ) e a composição dos combustíveis secundários: coque de petróleo ( $X_6$ ) e pneus usados ( $X_7$ ) na Tabela 3. Com base na análise química elementar das matérias-primas, foram levantados valores percentuais dos vários óxidos presentes no calcário ( $X_1$ ), argila ( $X_2$ ), areia ( $X_3$ ) e minério de ferro ( $X_4$ ), cujos dados são apresentados na Tabela 4.

O carvão mineral apresenta um custo de US\$35.00/ton, coque de petróleo US\$40/ton e os pneus usados são considerados como uma receita para a indústria do cimento a um custo de US\$50/ton. Considerou-se também, o custo do calcário US\$0,93/ton, argila US\$0,57/ton, areia US\$1,54/ton e minério de ferro US\$0,77/ton. O preço da energia elétrica fornecida pela concessionária tem um valor de US\$31/MWh.

Tabela 4 – Composição química das matérias-primas do cru (% em peso).

Material		CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
Calcário	X1	50,66	5,04	1,19	0,67	0,78
Argila	X2	1,23	61,62	16,59	9,01	-
Areia	X3	1,13	93,00	2,87	1,20	0,10
Minério de Ferro	X4	0,71	7,60	1,13	82,97	-

Fonte: Carvalho et alli, 1997.

Tomando como base estes valores, montou-se um problema de Minimização de Custos, considerando os custos e restrições de ordem operacional e também ambiental, o qual é apresentado a seguir:

$$\text{Min } 0,93X_1 + 0,54X_2 + 1,54X_3 + 0,77X_4 + 35X_5 + 40X_6 - 50X_7 + 0,031 * \{(5,76(\text{MS}) - 5,82) * e^{-0,2(\text{MS})+0,98}\}$$

Onde

$$\text{MS} = \frac{5,0X_1 + 61,62X_2 + 93X_3 + 7,6X_4 + 9,32X_5 + 22X_7}{1,86X_1 + 25,6X_2 + 4,07X_3 + 84,1X_4 + 12,29X_5 + 10,54X_7}$$

Sujeito a:

- 1)  $50,60X_1 + 1,23X_2 + 1,13X_3 + 0,71X_4 + 1,03X_5 + 0,93X_7 \geq 62$
- 2)  $50,60X_1 + 1,23X_2 + 1,13X_3 + 0,71X_4 + 1,03X_5 + 0,93X_7 \leq 67$
- 3)  $5,04X_1 + 61,62X_2 + 93X_3 + 7,6X_4 + 9,32X_5 + 1,93X_7 \geq 19$
- 4)  $5,04X_1 + 61,62X_2 + 93X_3 + 7,6X_4 + 9,32X_5 + 1,93X_7 \leq 25$
- 5)  $1,19X_1 + 16,59X_2 + 2,87X_3 + 1,13X_4 + 5,08X_5 + 0,09X_7 \geq 2$
- 6)  $1,19X_1 + 16,59X_2 + 2,87X_3 + 1,13X_4 + 5,08X_5 + 0,09X_7 \leq 9$
- 7)  $0,67X_1 + 9,01X_2 + 1,2X_3 + 82,97X_4 + 7,21X_5 + 0,13X_7 \geq 1$
- 8)  $0,67X_1 + 9,01X_2 + 1,2X_3 + 82,97X_4 + 7,21X_5 + 0,13X_7 \leq 5$
- 9)  $0,78X_1 + 0,10X_3 + 0,44X_5 + 0,12X_7 \leq 6.5$
- 10)  $0,762X_1 + 2,74X_2 + 83,64X_3 - 185,83X_4 - 18,96X_5 + 1,422X_7 \geq 0$
- 11)  $-0,018X_1 + 7,5X_2 - 82,011X_3 + 219,47X_4 + 23,88X_5 - 1,335X_7 \geq 0$
- 12)  $0,319X_1 + 4,877X_2 + 1,31X_3 - 106,73X_4 - 4,29X_5 - 0,074X_7 \geq 0$
- 13)  $0,619X_1 + 7,737X_2 + 0,37X_3 + 222,88X_4 + 14,387X_5 + 0,25X_7 \geq 0$
- 14)  $38,24X_1 - 155,67X_2 - 173,6X_3 - 164,34X_4 - 37,86X_5 - 2,93X_7 \geq 0$



- 15)  $-35,48X_1 + 190,65X_2 + 212,43X_3 + 201X_4 + 46,51X_5 + 3,78X_7 \geq 0$   
 16)  $25392X_5 + 34436X_6 + 32100X_7 = 3600$   
 17)  $0,046X_5 + 0,07X_6 + 0,0123X_7 \leq 0,05$   
 18)  $32100X_7 = 900$   
 19)  $25392X_5 + 34436X_6 \leq 2700$

As linhas numeradas de 1 a 9, representam as restrições de ordem operacional, onde o teor de CaO deve ficar entre 62 e 67% (linhas 1 e 2), o teor de SiO<sub>2</sub> deve ficar entre 19 e 25 % (linhas 3 e 4), o teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deve ficar entre 2 e 9% (linhas 5 e 6), além do teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 1 e 5% (linhas 7 e 8). O teor máximo de magnésio deve ser limitado em 6,5% (linha 9), nas linhas 10 a 15, as restrições dos Módulos de controle da mistura, referentes à qualidade do clínquer. A alimentação total de combustíveis deve atender ao consumo específico de calor, apresentado na restrição da linha 16. A restrição quanto ao enxofre é apresentada na linha 17. Os pneus devem ser queimados de forma a se obter pelo menos 25% de substituição do calor necessário (linha 22). A mistura coque de petróleo e carvão deve ficar limitada a 75% do total de calor necessário ao processo, que é de 3.600 MJ/tonelada de clínquer, o qual é representado na restrição da linha 19.

O problema a analisar trata-se de um sistema não linear, o mesmo vai ser resolvido utilizando técnicas de programação não-linear. Com isto, utilizando o programa LINGO, através de um de seus métodos, optou-se por uma Programação linear seqüencial (SLP). Este consiste em selecionar um ponto inicial para o problema, logo se lineariza o sistema utilizando a expansão da série de Taylor de primeira ordem. O sistema linear obtido é otimizado utilizando técnicas de programação linear, e o ótimo encontrado é avaliado no sistema não linear original e o sistema é novamente linearizado ao redor deste novo ponto. Este procedimento é repetido iterativamente até achar um ponto no qual o ótimo do sistema não linear tenha convergência, e assim, pode-se obter o resultado.

#### 4.1 Resultados

Os resultados do cálculo da otimização não linear para a composição química requerida para um tipo de cimento produzido em um forno rotativo de cimento de via seca, com consumo específico de calor de 3600 kJ/kg de clínquer, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado do modelo de otimização

Função Objetivo C = US\$2,99/ton	Composição dos óxidos puros no clínquer (%)	Módulos de controle	Consumo específico de calor = 3600 (kJ/kg <sub>clq</sub> )
Quantidade de compostos (kg/kg de clq.) X1 = 1,2192 X2 = 0,2263 X3 = 0,0000 X4 = 0,0000 X5 = 0,0000 X6 = 0,0784 X7 = 0,0280	CaO = 62,15 SiO <sub>2</sub> = 20,87 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 5,61 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 3,42 MgO = 0,99	MS = 2,31  MA = 1,64  MH = 2,08	Consumo de combustíveis (kg/ton <sub>clq</sub> )  Coque de Petróleo = 78,4  Pneus usados = 28,03

Por estes resultados, verifica-se que a composição final do clínquer fica dentro de valores pré-determinados. Em função do consumo específico de calor, e das restrições ambientais, o resultado do modelo também apresenta os limites máximos para utilização de combustíveis alternativos.

## 5. Conclusão

Na fase de dosagem deve-se proceder à otimização da composição da matéria-prima, bem como dos combustíveis para se atingir valores que resultem em um clínquer bem queimado, ou seja, com o mínimo de cal livre, para evitar expansões indesejadas no cimento (Carvalho et alli, 1997).

Deve-se prever através da otimização, o menor custo para se atingir a mistura de combustíveis, uma vez que estes podem representar até 30% dos custos de produção. Outro fator é o consumo de eletricidade para o moagem do clínquer que também representa cerca de 30% ou mais da energia requerida para produzir uma tonelada de cimento.

Através do modelo apresentado, é possível prever a composição do cru quando se deseja queimar resíduos como combustíveis secundários nos fornos rotativos das fábricas de cimento. Também é possível calcular os níveis de substituição do combustível primário pelo combustível alternativo derivado de resíduos, considerando-se os níveis aceitáveis de emissões de poluentes (caso do enxofre). Este modelo mostrou-se satisfatório, com base nos resultados apresentados, tanto por manter os valores de composição química dentro dos parâmetros de qualidade, como também por encontrar custos menores de produção.

## Referências Bibliográficas

- ABCP, Publicação e Análises Laboratoriais, O Coque de Petróleo na Indústria de Cimento, Julho, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Divisão de Tecnologia do Cimento. Departamento de Físico-Química. Curso de Microscopia de Clínquer de Cimento Portland. ABCP. São Paulo - SP, Brasil, 1984.
- CARVALHO, V.O., SILVA, R.J., MENON, G.J.; Aplicação das Técnicas de Otimização no Co-processamento de Resíduos em Fornos Rotativos de Fábricas de Cimento. Anais do ENEGEP Encontro Nacional de Engenharia de Produção (em CD-ROM), Gramado-RS, 1997.
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente; Resolução nº. 258, de 26 de Agosto de 1999.
- DUDA, W.H. Manual Tecnológico del Cemento. Editores Técnicos Asociados. Barcelona, Espanha, 1977.
- PERAY, K.E. and WADELL, J.J. The Rotary Cement Kiln. Chemical Publishing Co., Inc.; New York, USA, 1972.
- SALOMON, V.G., Otimização da Mistura de Resíduos Industriais para a Produção de um Combustível Derivado de Resíduos Destinado ao Co-processamento em Fornos Rotativos, SOBRAPO, 2001.
- SOUZA, F. A.; Utilização de Pneus Pós-Consumo como Combustível em Fornos de Cimento. Seminário Nacional Sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais – CETESB, 2000.
- TOKYAY, M., Effect of Chemical Composition of Clinker on Grinding Energy Requirement, Cement and Concrete Research, Pergamon Press, 1999.
- TREZZA, M.A. and SCIAN, A.N.; Burning wastes as an industrial resource. Their effect on Portland cement clinker. Cement and Concrete Research. Vol. 30, pp. 137-144, 2000.
- XIROKOSTAS, D.A, Mathematical Programming Approach to the Problem of Cement Blending Optimization, Cement and Concrete Research, Pergamon Press, 1977.