



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA  
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING  
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil  
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

## ANÁLISE TERMOECONÔMICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND UTILIZANDO UMA MISTURA DE COMBUSTÍVEIS E O COPROCESSAMENTO DE PNEUS USADOS

Paula, Luiz Gonzaga, [lgpaula@oi.com.br](mailto:lgpaula@oi.com.br)<sup>1</sup>  
Silva, Rogério José, [rogeriojs@unifei.edu.br](mailto:rogeriojs@unifei.edu.br)<sup>2</sup>  
Bernardo, Ana Carla de Souza Masselli, [anacarlaz@yahoo.com.br](mailto:anacarlaz@yahoo.com.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNIVAS – Univ. do Vale do Sapucaí – Av. Prefeito Tuany Toledo, 470 – B. Fatima I, Pouso Alegre-MG, 37550-000

<sup>2</sup>UNIFEI – Univ. Federal de Itajubá, IEM – Inst. de Eng. Mecânica - Av. BPS, 1303, Itajubá-MG, 37500-903

**Resumo:** A indústria de cimento Portland apresenta como característica um elevado consumo de energia térmica no processo de produção de clínquer nos fornos rotativos. Com o propósito de redução deste consumo de energia, novas tecnologias têm sido incorporadas, tais como melhorias nos pré-aquecedores e no número de estágios de pré-aquecimento, e a introdução de pré-calcinadores com queima secundária de combustível e fornecimento de ar terciário para esta queima. Estas novas tecnologias tem permitido uma significativa redução no consumo de combustíveis e permitido o controle da formação de NOx no processo. Para a geração de calor necessário ao processo geralmente se utiliza uma mistura de: carvão mineral, coque de petróleo nacional, coque de petróleo importado de alto enxofre, e moinha de carvão vegetal, como combustíveis em fornos rotativos de fábricas de cimento. Além disto, o coprocessamento de pneus inservíveis permite a destruição térmica de pneus sem causar danos ao meio ambiente e sem alterar a qualidade do cimento produzido, com menores custos de energia. Assim, o coprocessamento de pneus é uma técnica que se consagrou nas indústrias de cimento por promover simultaneamente a redução de custo na produção devido à redução no consumo dos combustíveis principais, e também, por reduzir o volume destes resíduos que poderiam ser dispostos de forma incorreta no meio ambiente. Este trabalho apresenta uma análise termoeconômica do processo de produção de clínquer para a fabricação de cimento Portland, utilizando uma mistura de combustíveis com a adição de pneus inservíveis. O estudo foi realizado considerando os parâmetros de uma instalação de produção de clínquer. A instalação possui um forno rotativo dotado de pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador com duto de ar terciário, onde 40% do combustível necessário ao processo é queimado no queimador do forno rotativo e 60% no pré-calcinador. Com base nos resultados apresentados são analisadas as eficiências exergéticas dos componentes da instalação e o resultado da análise termoeconômica do processo de produção de clínquer.

**Palavras-chave:** Indústrias de cimento; Fornos rotativos; Coprocessamento; Pneus inservíveis; Exergia; Termoeconomia

### 1. INTRODUÇÃO

A indústria de cimento é uma indústria de consumo intensivo de energia. Nas melhores tecnologias, o consumo específico de energia térmica para fabricação do clínquer é de 2900-3200 MJ/t de clínquer e o consumo de energia elétrica para movimentação mecânica dos equipamentos é de aproximadamente 90 a 120 kWh/t cimento (Batthy, 1995). Nas fábricas brasileiras que utilizam os “processos por via seca”, com sistemas de pré-aquecimento e pré-calцинаção, verificam-se consumos específicos de energia térmica em torno de 3300 MJ/t clínquer.

Os combustíveis convencionais ou fósseis atualmente utilizados pela indústria de cimento para fabricação do clínquer são: coque de petróleo; carvão mineral; carvão vegetal; óleos combustíveis; gás natural. Parte do combustível principal pode ser substituída por combustíveis alternativos. Tais como: moinha de carvão vegetal; pneus inservíveis; resíduos de madeira; resíduos industriais, agrícolas e urbanos, possíveis de serem co-processados.

A escolha de um determinado tipo de combustível se faz em função do seu custo, de sua disponibilidade no mercado e fatores técnicos como temperatura de chama, poder calorífico inferior, composição químicas elementares e constituintes que não afetem a qualidade do clínquer e conseqüentemente do cimento.

A reação de sinterização acontece após os materiais alcançarem temperatura de aproximadamente 1450 °C, numa atmosfera oxidante de gases no interior do forno rotativo. A maior parte do calor transferido aos materiais se dá por radiação a uma temperatura de chama por volta de 2000 °C. A fim de manter este padrão, combustíveis com baixo

poder calorífico são queimados juntamente com outros de maior poder calorífico, quando não atendam aos requisitos necessários para sua queima individual no queimador principal do forno (Silva, 1994).

O combustível atualmente mais utilizado pelas cimenteiras brasileira é o coque de petróleo (BEN, 2008), substituindo combustíveis convencionais tradicionais, como o óleo combustível. A partir de meados da década de 70, houve um aumento considerável no custo do óleo em consequência da crise do petróleo. Desde então, o setor cimenteiro vem desenvolvendo novas tecnologias, com o propósito de reduzir o consumo de energia e substituir os combustíveis convencionais por outros de menor custo.

## 2 - COMBUSTÍVEIS CONVENCIONAIS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO

Para apresentar uma melhor visão dos combustíveis utilizados no setor cimenteiro, são apresentadas as características dos principais combustíveis utilizados, o poder calorífico e os problemas operacionais decorrentes de seus componentes.

### 2.1- Coque de Petróleo

O coque de petróleo, que era considerado combustível alternativo pela indústria de cimento, atualmente é um dos combustíveis mais utilizados, e a tendência é o uso cada vez mais intensivo devido sua alta disponibilidade e preço atrativo. A indústria de cimento pode utilizar o coque de petróleo com alto teor de enxofre devido às condições alcalinas existente no seu processo de produção. O dióxido de enxofre, originado da queima do coque de petróleo, reage com os compostos de cálcio, sódio e potássio, contidos no cru, resultando os compostos  $\text{CaSO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , que são incorporado ao clínquer. No processo seco com forno rotativo equipado com pré-aquecedor e pré-calcinador a taxa de dióxido de enxofre que reage com os compostos de cálcio, sódio e potássio, ocorrem em níveis superiores a 90% pois a combustão no pré-calcinador tem um ambiente extremamente alcalino (Silva, 1994).

O coque de petróleo é caracterizado pelo seu alto teor de carbono, alto poder calorífico, alto conteúdo de enxofre, baixos conteúdos de voláteis e baixos teores de cinzas.

A Tabela (1) mostra os dados de 10 tipos de coques de petróleo de origens diferentes, analisados pelos pesquisadores Commandré e Salvador (2005), em laboratórios na França. A Tabela (2) mostra as características dos coques de petróleo consumidos pelas fábricas brasileiras.

**Tabela 1 – Composição elementar de 10 tipos diferentes de coque de petróleo de alto teor de enxofre.**

Coque Tipo	C %	H %	O %	S %	N%	MV%	Cinza %	PCI kJ/kg
01	81,20	3,30	---	5,97	1,80	11,43	5,88	32950
02	87,85	3,51	1,10	7,47	1,61	10,48	0,33	34450
03	87,95	3,71	0,90	7,23	1,51	9,95	0,36	34400
04	87,90	3,51	1,10	7,08	1,51	10,09	0,38	34350
05	87,05	3,89	2,43	4,05	2,03	12,63	1,25	34500
06	83,96	3,60	1,72	7,14	1,21	10,91	0,91	34400
07	83,39	3,89	3,11	6,62	1,31	14,47	0,44	33400
08	87,65	4,16	1,52	4,67	1,52	11,97	1,40	34900
09	86,69	3,66	1,53	4,37	1,42	9,69	1,75	34050
10	82,18	3,75	2,02	5,89	1,32	8,99	1,22	34300

Fonte: Commandré e Salvador (2005).

**Tabela 2 - Resultados de análise de coque de petróleo consumido nas fábricas de cimento brasileiras.**

Coque Tipo	Umidade %	Voláteis %	Cinzas %	Carbono Fixo %	Enxofre %	PCI kJ/kg
01	2,60	17,68	0,79	78,93	4,70	35337
02	4,72	---	---	78,50	6,20	32938
03	5,95	16,07	0,70	77,28	5,80	35538
04	3,30	16,25	0,53	85,90	6,70	34637
05	6,30	16,38	1,52	75,80	6,00	34939
06	0,57	15,93	2,13	85,60	6,10	34738
07	5,90	15,70	2,14	83,60	6,20	34838
08	6,70	15,33	1,79	86,20	6,30	34637
09	9,20	14,62	1,38	89,60	6,90	35039
10	---	16,11	0,47	86,90	6,80	35240

Fonte: ABCP (2001) apud Paula (2009).

## 2.2- Carvão Mineral

O carvão mineral é um combustível fóssil, utilizado na indústria de cimento, moído puro ou em mistura com outros combustíveis. O percentual da mistura está ligado às diversas propriedades do carvão, que variam de acordo com a procedência do carvão, com as propriedades dos outros combustíveis, e também com as características do forno rotativo em que será utilizado.

O carvão brasileiro, de um modo geral, é de qualidade inferior porque a flora que lhe deu origem e o regime de deposição trouxe, simultaneamente, matéria vegetal e mineral, o que deu origem ao alto teor de cinza, reduzindo seu poder calorífico. A Tabela (3) mostra as principais características dos carvões brasileiros.

As cinzas presentes no carvão podem ser consideradas como matérias-primas argilosas para fabricação do clínquer, são altamente reativas, fornecendo ao cimento excelentes propriedades de resistência à compressão, às águas agressivas e à impermeabilidade (Silva, 1994). Quando é queimado um carvão com alto teor de cinzas e alto conteúdo de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o conteúdo de  $\text{CaCO}_3$  do cru deve ser aumentado de forma correspondente, para que o Fator de Saturação de Cal do clínquer se mantenha constante (Silva, 1994).

Além dos elementos principais a cinza do carvão contém elementos traços que podem causar maior impacto ao meio ambiente e merecem considerações especiais. Os elementos traços comumente encontrados nas cinzas do carvão são: Cloro, Flúor, Bromo, Iodo, Zinco, Cromo, Níquel, Chumbo, Arsênio, Cádmio, Tálcio e Vanádio.

**Tabela 3 – Características dos diversos carvões minerais brasileiros.**

Procedência	C %	S %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %	Cinzas %	Umidade %	Mat. Voláteis %	PCS kJ/kg
Butiá	42,88	1,35	---	---	---	13,59	11,51	32,02	---
Jacuí	49,82	0,85	---	---	---	21,18	9,58	19,42	---
Tubarão	40,79	1,10	---	---	---	28,21	1,90	29,10	---
Criciúma	46,90	1,63	---	---	---	23,64	1,50	27,96	---
RGS	46,0	12,99	4,05	0,29	9,27	27,4	11,0	---	19883,50
Paraná	56,6	2,0	3,11	0,80	17,73	25,76	15,0	---	26539,24
Sta. Catarina	51,8	3,6	3,34	0,52	7,58	33,09	10,0	---	26413,66
Cabo Frio (a)	20,5	---	---	---	---	21,7	15,8	42,0	12118,47
Cabo Frio (b)	17,6	---	---	---	---	13,7	13,2	49,5	14525,42
Resende	12,6	---	---	---	---	42,2	12,0	33,2	10548,72

Fonte: Singer (1981) apud Paula (2009). --- Representam propriedades não avaliadas

## 2.3 - Carvão Vegetal

O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, produzindo, segundo o Balanço Energético Nacional (2008), 10,5 milhões de toneladas/ano. Este insumo energético é usado preponderantemente na produção de ferro-gusa e aço. A indústria de cimento do Brasil vem utilizando nos últimos anos a moimha de carvão vegetal ou moimha de carbono, não utilizada na indústria siderúrgica. O seu uso é geralmente em mistura com outro combustível como o carvão mineral ou coque de petróleo, permitindo também o uso de calcário com menor teor de carbonato de cálcio (Silva, 1994). Por ser muito facilmente desagregado, o carvão vegetal produz muitos finos, devido sua quebra durante a produção, transporte e manuseio, chegando a 20% em peso do total produzido (Carneiro, 2007). O sistema de peneiramento para o carvão vegetal existente nas usinas gera finos com fração abaixo de 6 mm, denominado moimha. A moimha não tem aplicação industrial nos altos fornos, sendo considerado um subproduto, é vendida a terceiros por um preço mais baixo. Esses finos possuem praticamente as mesmas vantagens do carvão vegetal em valor energético, constituindo-se em um combustível alternativo interessante para a indústria de cimento. A madeira para a produção do carvão mais utilizada é o eucalipto. A produtividade média é de 14 t/ha.

## 2.4 - Óleo Combustível

O óleo combustível foi uma das principais fontes energéticas na fabricação de cimento, tendo sido considerado um combustível padrão para o setor. Atualmente devido ao seu alto custo é utilizado quase que exclusivamente para dar partida ao forno rotativo. Em 2006, representou apenas 0,7% do consumo total de combustíveis utilizados pela indústria de cimento brasileira (BEN, 2008).

## 2.5 – Coprocessamento de Pneus Inservíveis

Os pneus usados quando atingem o fim da sua vida útil, ficam impróprios para uso e não podem ser mais recauchutados, tornando-se inservíveis. Os pneus inservíveis são resíduos que possuem poder calorífico em torno de 33 MJ/kg, superior a maioria dos carvões que têm em média 27 MJ/kg (Ferrer, 1997 apud Carpio, 2005). Além disso, os pneus inservíveis apresentam teor de cinzas menor do que a maior parte dos tipos de carvão, e menos enxofre do que o carvão betuminoso. Os pneus inservíveis têm sido utilizados como fonte alternativa de combustível na produção de clínquer de cimento Portland em vários países.

No Brasil o coprocessamento de pneus na fabricação de cimento ganhou força a partir de 2002, quando entrou em vigor a resolução CONAMA 258 – aprovada em 26/08/99, que exige dos fabricantes e importadores de pneus a coleta e de destinação adequada dos pneus inservíveis.

Segundo a REICLANIP, empresa criada pela Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), para atender a Resolução CONAMA 258, o Brasil possui um passivo ambiental de mais de 100 milhões de pneus inservíveis. A partir de 1999, quando teve início o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis até Junho de 2008, foram recolhidos 780 mil toneladas de pneus inservíveis equivalente a 156 milhões de pneus de passeio. A Tabela (4) mostra a equivalência em pesos dos pneumáticos, conforme Instrução Normativa nº 8 do IBAMA.

**Tabela 4 – Equivalência em peso dos pneumáticos.**

Pneumáticos	Equivalência em peso (kg)
Bicicleta	0,45
Motocicleta	2,50
Automóvel	5,00
Camioneta	12,00
Caminhão e ônibus	40,00
Trator	41,00
Fora -de- estrada e terraplenagem	84,00

Fonte: IBAMA (1999).

No Brasil, a utilização de pneus inservíveis está dividida no uso como combustível alternativo no coprocessamento da indústria cimenteira (84%), na utilização para fabricação de pó de borracha, artefatos e asfalto (12%) ou ainda como matéria-prima para solado de sapato e dutos fluviáteis, entre outras aplicações.

Mercado de pneus inservíveis estimado nos Estados Unidos é de 250 milhões de toneladas/ano; na União Européia, 300 milhões de toneladas ano; e no Brasil, 45 milhões de toneladas ano.

Nos Estados Unidos 30% dos TDF (Tire Derived Fuel) são utilizados pelas fábricas de cimento como combustível alternativo, e o TDF, corresponde a 57% dos pneus inservíveis descartados anualmente (Amari et al., 1999).

Na Europa, 40% dos pneus inservíveis são utilizados pelas fábricas de cimento como combustível alternativo.

Os pneus em geral são constituídos de 40-50% por borracha e elastômeros, negro de fumo, metal, nylon, poliéster, aditivos químicos, e diferentes elementos como enxofre, cloro, zinco e chumbo. Tem um elevado poder calorífico, porém muitos dos elementos presentes atuam como contaminantes no processo de combustão.

O coprocessamento de pneus inservíveis em fornos rotativos para produção de clínquer é, uma aplicação ambientalmente correta e que garante economia de combustíveis fósseis e redução no custo de produção do cimento. Os pneus são queimados em fornos fechados. As altas temperaturas internas do forno (acima de 1200°C) e a atmosfera oxidante propiciam uma combustão completa dos pneus. Os materiais não queimados na combustão, como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e outros componentes, e não volatilizados, são incorporados ao clínquer. Entretanto, existem as emissões de metais voláteis, o que exige atenção quanto aos níveis máximos de pneus alimentados no forno.

A Tabela (5) mostra a análise da composição de pneus inservíveis (TDF), picados em pedaços de 1,25 cm e 5 cm, com e sem reforço de arame de aço, e de um carvão mineral da região oeste dos Estados Unidos (Granger e Clark, 1991 apud Amari et al., 1999).

**Tabela 5 – Análise química de TDF e comparação como um carvão mineral americano.**

Tipo do TDF	Poder Calorífico MJ/kg	Concentração % em massa							
		Umidade	Cinzas	S	C	H	N	O	Voláteis
Flocos de borracha de 1,25 cm	32,10	2,26	16,48	1,30	69,74	6,30	0,45	3,40	64,66
Flocos de borracha de 5 cm com arame	31,05	0,75	23,19	1,33	67,00	5,81	0,25	1,64	54,23
Flocos de borracha de 5 cm sem arame	32,58	1,02	8,74	1,23	72,15	6,74	0,36	9,67	67,31
Carvão Mineral	28,23	7,76	11,05	2,30	67,69	4,59	1,13	5,47	34,05

Fonte: Adaptado de Amari et al. (1999).

Hansen 2003 apud Carpio (2003), afirma que mais de 25% da energia térmica utilizada nos fornos rotativos para produção de clínquer pode ser proveniente da queima de pneus. Isso só se tornou possível após o desenvolvimento de dispositivos para introdução de TDF no pré-calcinador. Entretanto, existem restrições devidas às emissões de poluentes. Segundo alguns autores os controles existentes sobre as emissões de poluentes nas cimenteiras são suficientes se a queima de pneus não exceder 20% do valor calorífico total do combustível utilizado como principal, valores maiores que este percentual pode agravar as emissões (a experiência internacional marca um limite máximo de

substituição em torno de 20%). Por outro lado, não está sendo considerado a presença nos pneus, de cloro e outros elementos perigosos, assim como diversos metais pesados. É, portanto imprescindível fazer testes de combustão e medir as emissões do processo. Segundo Carpio (2005), várias fábricas de cimento no Brasil utilizam pneus inservíveis como combustíveis, com níveis de substituição térmica próximos aos referenciados. Nos Estados Unidos a Genstar Cement da Califórnia substitui 25% da energia térmica que necessita, queimando 20.000 t/ano de pneus inservíveis. Na Europa, 40% dos pneus inservíveis são utilizados pelas fábricas de cimento como combustíveis alternativos.

### 3 - MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NOS FORNOS ROTATIVOS.

Foi realizada uma análise exergética de uma instalação dotada de forno rotativo com pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador, que co-processa pneus, conjuntamente com a queima de moinha de carvão mineral e coque de petróleo importado. A Tabela (6) mostra os percentuais da mistura dos três combustíveis, considerando o calor fornecido ao processo pelos combustíveis. A Tabela (7) apresenta as características de cada combustível.

**Tabela 6 - Percentual das misturas de combustíveis em energia requerida.**

Combustíveis	MIX-C Composição %
Moinha de carvão vegetal	50,41
Coque de petróleo importado	36,25
Rasps de pneus	13,34
Total	100,00

**Tabela 7 - Composição química elementar individual dos combustíveis, em % de peso.**

Componentes		Moinha de carvão vegetal	Carvão mineral	Coque de petróleo importado	Coque de petróleo nacional	Rasps de pneus
Carbono	C	70,64	70,12	87,97	97,83	72,15
Hidrogênio	H	3,21	4,51	3,31	0,36	6,74
Enxofre	S	0,29	1,28	4,69	0,96	1,23
Oxigênio	O	---	1,13	0,90	---	9,67
Nitrogênio	N	1,02	2,25	1,52	---	0,36
Umidade	H <sub>2</sub> O	1,78	0,85	0,30	0,36	1,02
Cinzas	CZ	23,00	19,85	1,09	0,48	8,74
Voláteis	MV	22,29	33,60	11,30	8,71	67,31
PCI (kJ/kg)	PCI	21648	26928	33974	34930	32580

Fonte: Adaptado de Assis (2008), Silva (1994), Amari (1999).

### 4 - ANÁLISE DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE CLÍNQUER COM FORNO ROTATIVO COM PRÉ-AQUECEDOR DE QUATRO ESTÁGIOS E PRÉ-CALCINADOR

As seguintes hipóteses foram feitas para a análise exergética neste trabalho: o calor não está determinado fora do sistema, as energias cinéticas e potenciais dos materiais que entram e saem do sistema foram desprezadas. Assim os valores para a exergia dos sólidos e gases podem ser calculados levando-se em conta a variação da exergia física e química dos compostos sólidos e gasosos.

#### 4.1 – Cálculo da Exergia dos Gases e sólidos

Segundo Kotas (1985) os valores para a exergia dos gases e sólidos podem ser calculados pela Eq. (1):

$$B_g = n_{m_g} b_{M_g}^o + \sum n_k \cdot [(h - h_o) - T_o(s - s_o)]_k \quad (1)$$

Onde:

$B_g$  é a exergia dos gases (kJ/s);  $n_{m_g}$  é número de moles da mistura dos gases ou sólidos;  $b_{M_g}^o$  é exergia química da mistura, calculada pela Eq. (2) para o caso de gases;  $T_g$  é a temperatura dos gases em K;  $T_o$  é a temperatura do estado de referência em K;  $[(h - h_o) - T_o(s - s_o)]_k$  é a exergia que leva em conta a variação da entalpia e entropia num dado intervalo de temperatura.

$$b_{M_g}^o = \sum_k (y_{g_k} \cdot b_{g_k}^o) + R \cdot T_o \cdot \sum_k (y_{g_k} \cdot \ln y_{g_k}) \quad (2)$$

Onde  $b_{g_k}^o$  é exergia química padrão, definida por Szargut (1988) conforme a Eq. (3):

$$b_{g_k}^o = \Delta G^o + \sum_{el} n_{el} \cdot b_{el}^o \quad (3)$$

A composição do gás de combustão necessária ao cálculo da exergia pode ser obtida através de um balanço estequiométrico das reações de combustão do combustível, considerando 2 a 4,5% de oxigênio livre, no sistema de exaustão da instalação. A composição original dos gases de combustão é alterada ao longo da passagem destes pelo interior do sistema forno/pré-calcinador/pré-aquecedor, devido à incorporação do CO<sub>2</sub> oriundo da reação de calcinação do CaCO<sub>3</sub> e da descarbonatação do carbonato de magnésio (Silva, 1994). A Equação (4) mostra o cálculo da exergia para os sólidos.

$$B_s = n_{m_s} \cdot b_{M_s}^o + \sum n_k \cdot \left[ \int_{T_o}^{T_s} C p_k \cdot dT - T_o \int_{T_o}^{T_s} C p_k \cdot \frac{dT}{T} \right]_k \quad (4)$$

A instalação analisada possui um forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios e pré-calcinador. A capacidade máxima de produção é de 3000 t/dia de clínquer e consumo específico de 3150 kJ/kg de clínquer. A instalação está equipada com queimador e dispositivos para o coprocessamento de pneus.

#### 4.2 - Principais Características Técnicas da Instalação e do Processo de Produção

- Diâmetro na zona de clínquerização 3,80 m; comprimento da parte rotativa do forno 80,00 m; inclinação do forno 4,0%; rotação variável de 0,8 a 4,0 rpm; pré-aquecedor de ciclone de 4 estágios; pré-calcinador com 7,0 m de diâmetro, com 3 queimadores; resfriador do clínquer tipo grelhas horizontais de três estágios.
- Produção de clínquer: 3000 t/dia correspondente a 34,72 kg/s; alimentação de farinha no 1º estágio: 54,39 kg/s; grau de calcinação no pré-calcinador: 70%; calor de formação: 1777,19 kJ/kg clínquer; poder; consumo específico de calor no sistema: 3150 kJ/kg clínquer; consumo de combustível no forno: 1,67 kg/s; consumo de combustível no pré-calcinador: 2,5 kg/s; Módulo de Alumina da farinha, MA = 1,846; Módulo Sílica da farinha, MS = 2,413; Fator de Saturação de cal da farinha, FSC = 128,18; Cal livre: 0,99%.

#### 4.3 - Fluxo de Gases e Sólidos

O volume de ar necessário à combustão foi calculado levando-se em conta uma porcentagem de 2,4% de O<sub>2</sub> livre no queimador do forno e de 1,7% de O<sub>2</sub> livre nos queimadores do pré-calcinador, na base seca. O CO<sub>2</sub> oriundo da calcinação do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e da descarbonatação do carbonato de magnésio (MgCO<sub>3</sub>), é somado à composição dos gases de combustão, assim como o vapor de água oriundo da umidade do cru (1,7%). O ar primário é introduzido no queimador do forno a 59 °C e corresponde a 15% do total do ar necessário a combustão. O ar secundário é introduzido no forno pré-aquecido a 1115 °C e corresponde a 85%, o ar terciário é introduzido no pré-calcinador a 764°C e corresponde a 85% do total do ar necessário a combustão no pré-calcinador. O ar é pré-aquecido no trocador de calor do resfriador de clínquer. A Tabela (8) apresenta a composição dos gases nas diversas etapas do processo.

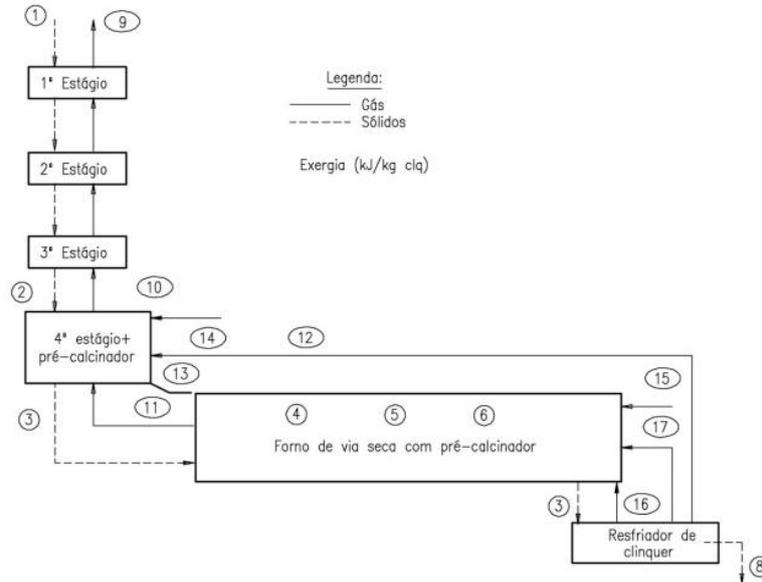
Tabela 8 - Composição elementar dos gases, ar primário e ar secundário, em kmol/s.

Gás	Saída do Primeiro Estágio	Saída do Quarto Estágio	Saída do Forno	Ar Primário Calcinador	Ar Terciário Calcinador	Ar Primário Forno	Ar Secundário Forno
CO <sub>2</sub>	0,695090	0,671947	0,145899	---	---	---	---
H <sub>2</sub> O	0,078247	0,078247	0,031299	---	---	---	---
SO <sub>2</sub>	0,002112	0,002112	0,000845	---	---	---	---
O <sub>2</sub>	0,0338	0,0338	0,016417	0,029645	0,16799	0,020770	0,117698
N <sub>2</sub>	1,266006	1,266006	0,52155	0,111523	0,631961	0,078136	0,442768

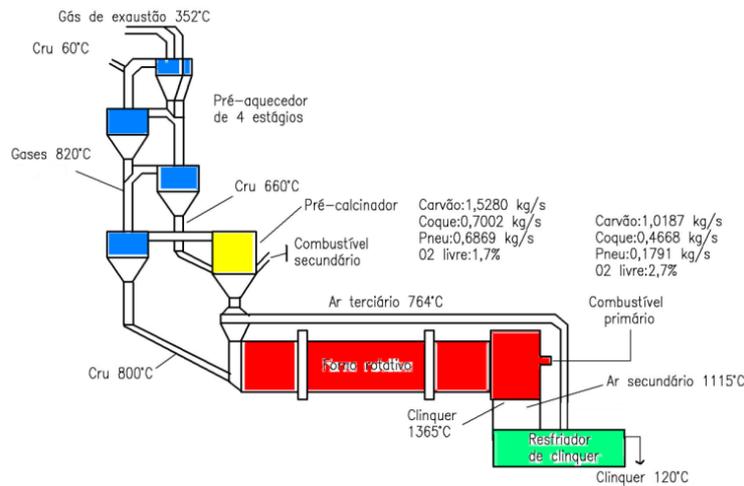
#### 4.4 - Cálculo da exergia dos fluxos

Para efeito do cálculo da exergia dos fluxos de sólidos e gases. O sistema foi subdividido em seis volumes de controle, sendo: quatro volumes de controle para o pré-aquecedor, um volume de controle para o forno rotativo e um volume de controle para o resfriador de clínquer. Para o cálculo da eficiência foi considerados mais dois volumes de controle. O primeiro engloba os três primeiros estágios do pré-aquecedor e o segundo engloba o forno rotativo e o quarto estágio do pré-

aquecedor, onde ocorrem as principais reações do processo. A Figura 1 mostra os pontos considerados para os cálculos dos fluxos de exergia. A Figura 2 apresenta os dados relativos às temperaturas de operação em alguns pontos da instalação e os dados de alimentação de combustíveis. A Tabela (9) apresenta o fluxo molar dos sólidos utilizados no cálculo das exergias. A Tabela (10) apresenta os valores calculados para os diferentes fluxos do sistema.



**Figura 1 - Esquema dos volumes de controle com os fluxos dos sólidos e gases para a instalação com forno rotativo equipado com pré-calcinador e pré-aquecedor de 4 estágios.**



**Figura 2 – Dados de operação do forno com pré-aquecedor e precalcinador.**

#### 4.5 - Eficiência térmica do sistema

Utilizando os valores calculados para entalpia e exergia e as Eqs. (5) e (6) para o cálculo das eficiências da 1ª Lei e da Eficiência Racional, substituindo-se os valores correspondentes a cada volume de controle, foram calculadas as eficiências do sistema cujos resultados são mostrados na Tab. (11).

$$k = \frac{\text{Custo Exergético}}{\text{Exergia}} \quad (5)$$

$$\eta_B = 1 - \frac{\text{PERDAS (L)} + \text{DESTRUIÇÃO (D)}}{\text{FUEL (F)}} \quad (6)$$

**Tabela 9 - Composição química elementar da farinha e do clínquer, em kmol/s, para uma produção de 34,72 kg/s de clínquer em forno com pré-aquecedor de 4 estágios e pré-calcinador.**

Composto da farinha e clínquer	Peso da farinha (kg/s)	PM kg/kmol	Entrada 1º estágio 60 °C	Entrada 4º estágio e pré-calcinador 660 °C	Entrada no forno 800°C	Saída do forno 1365°C	Peso do clínquer kg/s
CaCO <sub>3</sub>	40,954969	100	0,409550	0,409550	0,040955	---	---
SiO <sub>2</sub>	6,964686	60	0,116078	0,116078	0,116078	---	---
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,873223	102	0,018365	0,018365	0,018365	---	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,012847	160	0,006330	0,006330	0,006330	---	---
MgCO <sub>3</sub>	1,944013	84	0,023143	0,000000	0,000000	---	---
SO <sub>3</sub>	0,500978	80	0,006262	0,006262	0,006262	---	---
Na <sub>2</sub> O	0,016336	62	0,000263	0,000263	0,000263	---	---
K <sub>2</sub> O	0,435633	94	0,004634	0,004634	0,004634	---	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,070790	142	0,000498	0,000498	0,000498	---	---
CaO	---	56	---	---	0,368595	---	---
MgO	---	40	---	0,023143	0,023143	0,023143	0,925720
C2S	---	172	---	---	---	0,009536	1,640192
C3S	---	228	---	---	---	0,106547	24,292716
C3A	---	270	---	---	---	0,012035	3,249351
C4AF	---	486	---	---	---	0,006330	3,076523
Cl	0,007624	72	0,000106	0,000106	0,000106	---	---
CO <sub>2</sub>	---	44	---	---	---	---	---
CaSO <sub>4</sub>	---	136	---	---	0,003132	0,003132	0,425952
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	---	142	---	---	---	0,000264	0,037488
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	---	174	---	---	---	0,004634	0,806316
Cal livre	---	56	---	---	---	0,006200	0,347200
CaCl <sub>2</sub>	---	112	---	---	---	0,001060	0,118720
Total	53,781100	---	0,585231	0,585231	0,588363	0,172881	34,920178

**Tabela 10 – Resultados dos cálculos de exergia para a instalação do forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios e pré-calcinador, para uma produção de 34,72 kg/s de clínquer.**

SÓLIDOS			GASES		
Fluxo	Temperatura K	Exergia kW	Fluxo	Temperatura K	Exergia kW
1	333,15	8931,27	9	623,15	18235,27
2	933,15	26689,50	10	1093,15	42900,75
3	1073,15	56957,80	11	1273,15	16180,04
4	1368,15	57669,86	12	1037,15	11181,41
5	1478,15	60458,82	13	332,15	108,08
6	1728,15	70322,84	14	Combustível - calcinador	65620,68
7	1638,15	67368,6	15	Combustível forno	43728,25
8	393,15	37288,50	16	1388,15	11520,64
---	---	---	17	332,15	75,72

**Tabela 11 - Resultados dos cálculos das eficiências térmica baseada na 1ª Lei e na 2ª Lei**

Volume de Controle	Eficiência pela 1ª Lei $\eta_{IL}$	Eficiência pela 2ª Lei (Eficiência Racional $\psi$ )
Pré-aquecedor (1º ao 3º Estágio)	91,95%	71,99%
Pré-calcinador + 4º Estágio	89,71	60,44%
Forno Rotativo	51,38	25,41%
Pré-calcinador + 4º Estágio + Forno	79,73	44,67%
Resfriador de Clínquer	84,09%	75,10%
Eficiência Global	58,51%	24,50%

## 5 - ANÁLISE TERMOECÔMICA EM UM FORNO COM PRÉ-AQUECEDOR DE QUATRO ESTÁGIOS E PRÉ-CALCINADOR UTILIZANDO COMBUSTÍVEL MIX-C

As vantagens oferecidas pelo sistema constituído pelo forno rotativo com pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador, residem num menor carregamento térmico, quase o dobro de produção em relação a outro processo para um mesmo diâmetro de forno, possibilidade de operar com vários tipos de combustíveis e coprocessamento de resíduos (Silva, 1994). A mistura de combustível denominada MIX-C, contém 13,34% em raspa de pneus para ser coprocessado. Com a finalidade de realizar a análise termoeconômica o processo de produção foi dividido em 4 volumes de controle (subsistemas), conforme mostra a Tab. (12).

**Tabela 12 - Resultados dos cálculos de rendimento e custos unitários nos subsistemas, para produção de 34,72 kg/s de clínquer em forno com pré-aquecedor de quatro estágios e pré-calcinador utilizando como combustível o MIX-C.**

V.C.	INSUMO (F) kJ/s	PRODUTO (P) kJ/s	IRREV. (I) kJ/s	$\eta_b$	k	$\delta$	$K^*_{Fi}$	$K^*_{Pi}$
Pré-aquecedor (1° ao 3° Estágio)	40552,58	17758,23	22794,35	0,4379	2,284	0,1911	1,524	3,480
Pré-calcinador + 4° Estágio	50081,38	30268,30	19813,08	0,6044	1,655	0,1661	1,552	2,568
Forno Rotativo	41005,33	10410,80	30594,53	0,2539	3,939	0,2565	1,716	6,761
Resfriador de Clínquer	30080,10	11520,64	18559,46	0,3830	2,611	0,1556	3,437	4,553
PLANTA	119281,41	28841,00	90440,41	0,2418	4,136	0,7582	1,049	4,341

## 6 - CONCLUSÕES

Analisando os resultados apresentados na Tab. (12), verifica-se que a destruição de exergia nesse sistema é dividida entre o pré-aquecedor (1° ao 3° estágios), com 19,11%, o forno rotativo com 25,65%, o pré-calcinador mais o quarto estágio, com 16,61% e o resfriador de clínquer 15,56%. Nota-se que as irreversibilidades geradas nesse processo estão distribuídas nos quatro principais volumes de controle. Convém lembrar que a queima do combustível no pré-calcinador ocorre em temperaturas mais baixas que no forno (entre 900 e 1200 °C), e que existe uma intensa troca de calor com os sólidos em suspensão, o que contribui para uma diminuição da geração de irreversibilidade na etapa de calcinação. Isto mostra que a divisão das etapas do processo, reduz a irreversibilidade gerada no forno rotativo e aumenta a eficiência da planta.

Ao permitir a queima de 60% dos combustíveis no pré-calcinador, onde a queima ocorre em temperaturas entre 900 e 1200 °C, ocorre uma redução na geração de NOx, e a queima de pneus, ao gerar CO, reduz ainda mais estas emissões, devido às reações concorrentes entre NOx e CO.

## 7 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio financeiro.

## 8 - REFERÊNCIAS

- Amari, T., Themelis, N. J. and Wernich, I. K., 1999. “Resource Recovery from Used Rubber Tires”, Resources Policy, v. 25, pp 179-188. Pergamon Press, Elsevier Science Ltd,
- Assis, C. F. C., 2008. “Caracterização de carvão vegetal para sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte”. Dissertação Mestrado. Escola de Minas. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 165p
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, 2003. “Procedimentos para análises químicas do cimento e suas matérias-primas”. São Paulo-SP.
- Bhatthy, Javed I., 1995. “Role of Minor Elements in Cement Manufacture and Use”. Research and Development Bulletin RD109T. Portland Cement Association. Skokie, Illinois, U.S.A.
- BEN - Balanço Energético Nacional, 2008. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Energia. Disponível em <www.mme.gov.br>, acessado em 15/01/2009.
- Carneiro, A. C. O., 2007. “Aproveitamento de finos de carvão vegetal como fonte energética”. Centro Brasileiro para a Conservação da Natureza e Desenvolvimento Sustentável. In: IV Simpósio de meio ambiente, Universidade Federal de Viçosa, UFV.
- Carpio, R. C., 2005. “Otimização no Co-processamento de Resíduos na Indústria do Cimento Envolvendo Custos, Qualidade e Impacto Ambiental”. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 194P.
- Commandré, J. M., and Salvador, S., 2005. “Lack of Correlation between the Properties of a Petroleum Coke and its Behavior During Combustion”, Fuel Processing Technology, v 86.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 1999. “Resolução 258°, de 26 de agosto”, MMA – Ministério do Meio Ambiente, disponível em <http://www.mma.gov.br>, acessado em 12/03/2007

- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 2006. “Resolução 382º, de 26 de dezembro”, MMA –Ministério do Meio Ambiente, disponível em acessado em 10/12/2007 <http://www.mma.gov.br>, 156.
- Kotas, T. J., 1985. “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”. London: Butterworths, 294p.
- Paula, L.G., 2009. “Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-Processamento de Misturas de Resíduos”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.
- Silva, D. C., 2004. “Análise Termoeconômica de uma Usina Termelétrica a Carvão Mineral”, Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 275p.
- Silva, R. J., 1994. “Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland”, Tese de Doutorado em Eng. Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 242p.
- Szargut, J., Morris, D. R., Steward, F. R., 1988. “Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes”, New York: HEMISPHERE, 324p.

## 10 - DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# THERMOECONOMICS ANALYSIS OF THE PROCESS OF PRODUCTION OF PORTLAND CEMENT USING A MIXTURE OF FUELS AND THE CO-PROCESSING OF TIRES USED

Paula, Luiz Gonzaga, [lgpaula@oi.com.br](mailto:lgpaula@oi.com.br)<sup>1</sup>  
Silva, Rogério José, [rogeriojs@unifei.edu.br](mailto:rogeriojs@unifei.edu.br)<sup>2</sup>  
Bernardo, Ana Carla de Souza Masselli, [anacarlasz@yahoo.com.br](mailto:anacarlasz@yahoo.com.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNIVAS – Univ. do Vale do Sapucaí – Av. Prefeito Tuany Toledo, 470 – B. Fatima I, Pouso Alegre-MG, 37550-000

<sup>2</sup>UNIFEI – Univ. Federal de Itajubá, IEM – Inst. de Eng. Mecânica - Av. BPS, 1303, Itajubá-MG, 37500-903

**ABSTRACT:** *The Portland cement industry presents as characteristic a high consumption of thermal energy in the process of clinker production in the rotary kilns. With the purpose of reduction of this consumption of energy, new technologies have been incorporate, such as improvements in the preheaters and in the numbers of cyclones preheaters, and the introduction of precalciners with it burns secondary of fuel and supply of tertiary air for this burns. These new technologies have been allowing a significant reduction in the consumption of fuels and allowed the control of the formation of NOx in the process. For the generation of necessary heat to the process a mixture is used usually of: coal, petroleum coke of high sulfur, and fines of charcoal, as fuels in rotary kilns of cement factories. Besides, the co-processing of used tires allows the thermal destruction of tires without causing damages to the environment and without altering the quality of the produced cement, with smaller costs of energy. Like this, the co-processing of tires is a technique that was consecrated in the cement industries by promoting the cost reduction simultaneously in the production due to the reduction in the consumption of the main fuels, and also, for reducing the volume of these residues that they could be willing of incorrect form in the environment. This work presents an thermo-economic analysis of the productive process in Portland cement kiln, using a mixture of fuels with the addition of used tires. The study was accomplished considering the parameters of an installation of clinker production. The installation possesses a rotary kiln endowed with preheater of cyclones and precalcinator with tertiary air, where 40% of the necessary fuel to the process are burned in the burner of the rotary kiln and 60% in the precalciner. With base in the presented results the exergetic efficiencies of the components of the installation and the result of the thermo-economic analysis of the process of clinker production are analyzed.*

**Keywords:** *cement industry; rotary kilns; co-processing; used tires; exergy; thermo-economy.*