

OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DE COMBUSTÍVEIS SECUNDÁRIOS ALTERNATIVOS EM FORNOS DE CIMENTEIRAS USANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Ricardo Carrasco Carpio

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303 — Bairro Pinheirinho — Itajubá — MG
rcarpio@unifei.edu.br

Leandro dos Santos Coelho

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
leandro.coelho@pucpr.br

Rogério José da Silva

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303 — Bairro Pinheirinho — Itajubá — MG
rogeriojs@unifei.edu.br

Ariosto Bretanha Jorge

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303 — Bairro Pinheirinho — Itajubá — MG
ariosto.b.jorge@unifei.edu.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 artigo 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 pré-aquecedor de quatro estágios, levando-se em conta as restrições de processo e o consumo específico de calor. No procedimento de otimização para este problema com restrições foi utilizada a evolução diferencial, esta uma abordagem da computação evolucionária, com função de penalização às soluções ineficazes. Os resultados de simulação analisados mostram a eficiência do procedimento de otimização proposto.

Palavras chave: otimização, co-processamento de resíduos, indústria do cimento, evolução diferencial.

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 Fig. 1.

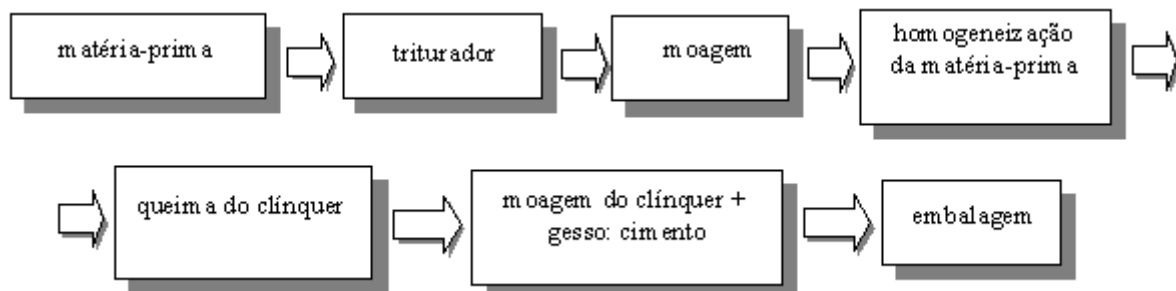


Figura 1. Etapas do processo de fabricação do cimento Portland.

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), possibilita uma redução sensível no custo final do produto. As cinzas geradas fornecem muitos 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 *et al.*, 1997).

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 (SiO₂), óxido de alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), 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 são 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 do 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:

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

1.4. Módulo hidráulico

Este Módulo pode ser 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 1 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 (Tokyay, 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.

Os 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 estudadas com critério, as influências que os metais pesados incorporados podem ter nas características e nas propriedades do cimento Portland (Trezza & 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% do coque combinados, o consumo de coque para uma fábrica de cimento moderna deverá ser de 75 a 115 toneladas para cerca de 1000 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 os seus principais constituintes é apresentada na Tab. 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 ³)	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 Tab. 2 apresenta a composição química típica para pneus de diversas origens. A Fig. 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).

Tabela 2. Características típicas e composição química de pneus.

Características típicas		Composição química	
Componentes	%	componentes	%
Borracha	36	C	70
enchimento (SiO ₂)	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 ₂ + restante	5

Fonte: Souza (2000).

3.3. Composição 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 nas seções 2 e 3 são apresentadas na Tab. 3.

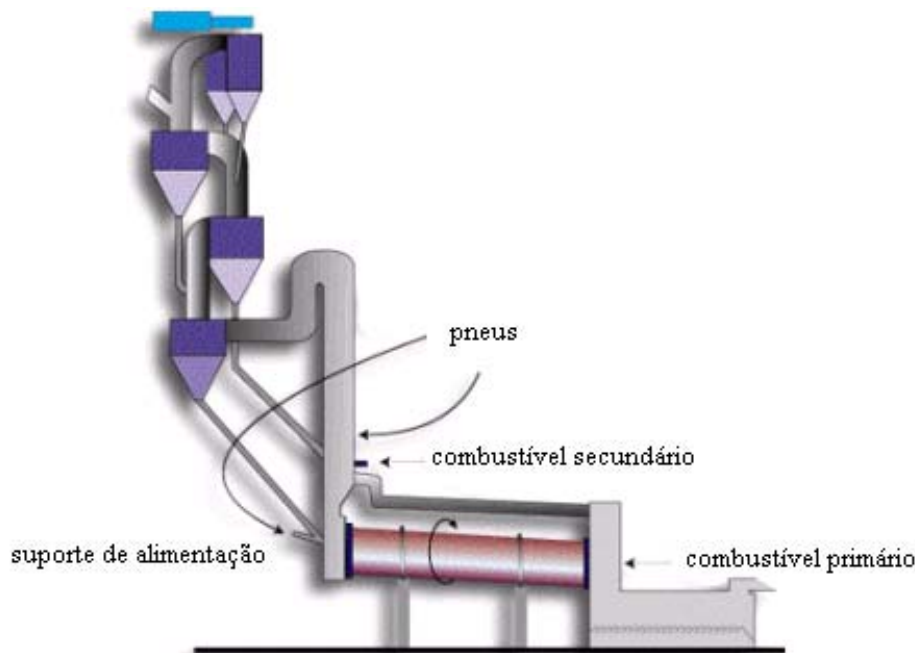


Figura 2. Forno rotativo com pré-calcinador com pontos de introdução de combustíveis e resíduos.

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:

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

A função objetivo (C) do modelo deve 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 suas respectivas porcentagens 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 cm^2/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 Tab. 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 3. Composição (% em peso) dos principais combustíveis utilizados como combustíveis primários e combustíveis alternativos em fornos de clínquer.

componentes	carvão mineral ^(a) %	coque de petróleo ^(b) %	pneus usados ^(c) %
C	63,9	80 – 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 ₂	9,32		22,0*
Al ₂ O ₃	5,08		9,09*
Fe ₂ O ₃	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

Fontes: (a) Carvalho *et al.* (1997); (b) ABCP (2002); (c) Salomon (2001); * Componente nas cinzas; ** ppm

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

material	variável	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
calcário	X ₁	50,66	5,04	1,19	0,67	0,78
argila	X ₂	1,23	61,62	16,59	9,01	-
areia	X ₃	1,13	93,00	2,87	1,20	0,10
minério de ferro	X ₄	0,71	7,60	1,13	82,97	-

Fonte: Carvalho *et al.* (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:

$$\text{Min } 0,93X_1 + 0,54X_2 + 1,54X_3 + 0,77X_4 + 35X_5 + 40X_6 - 50X_7 + 0,031 * \{(5,76(MS) - 5,82) * e^{(-0,2(MS) + 0,98)*4,0}\}$$

Onde

$$MS = \frac{5,04X_1 + 61,62X_2 + 93X_3 + 7,6X_4 + 9,32X_5 + 1,93X_7}{1,86X_1 + 25,6X_2 + 4,07X_3 + 84,1X_4 + 12,29X_5 + 0,92X_7} \quad (6)$$

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) $1,19X_1 + 16,59X_2 + 2,87X_3 + 1,13X_4 + 5,08X_5 + 0,79X_7 \geq 2$
- 6) $1,19X_1 + 16,59X_2 + 2,87X_3 + 1,13X_4 + 5,08X_5 + 0,79X_7 \leq 9$

- 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) $0,762X_1 + 2,74X_2 + 83,64X_3 - 185,83X_4 - 18,96X_5 - 0,186X_7 \geq 0$
- 11) $-0,018X_1 + 7,5X_2 - 82,011X_3 + 219,47X_4 + 23,88X_5 + 0,554X_7 \geq 0$
- 12) $0,319X_1 + 4,877X_2 + 1,31X_3 - 106,73X_4 - 4,29X_5 + 0,621X_7 \geq 0$
- 13) $0,619X_1 + 7,737X_2 + 0,37X_3 + 222,88X_4 + 14,387X_5 - 0,439X_7 \geq 0$
- 14) $38,24X_1 - 155,67X_2 - 173,6X_3 - 164,34X_4 - 37,86X_5 - 4,2X_7 \geq 0$
- 15) $-35,48X_1 + 190,65X_2 + 212,43X_3 + 201X_4 + 46,51X_5 + 5,34X_7 \geq 0$
- 16) $25392X_5 + 34436X_6 + 32100X_7 = 3600$
- 17) $0,046X_5 + 0,07X_6 + 0,0123X_7 \leq 0,05$
- 18) $25392X_5 + 34436X_6 \leq 2700$

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 SiO₂ deve ficar entre 19 e 25 % (linhas 3 e 4), o teor de Al₂O₃ deve ficar entre 2 e 9% (linhas 5 e 6), além do teor de Fe₂O₃ 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 e apresentada na linha 17. Os pneus devem ser queimados de forma a se obter pelo menos 25% de substituição do calor necessário. 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/ton de clínquer.

4.1. Metodologia de otimização do modelo

Durante os últimos anos a utilização de métodos computacionais tornou-se acentuada em procedimentos de otimização em problemas de engenharia. São nas indústrias onde se tem a maior procura por soluções que melhor se adaptam as necessidades dos problemas. É justamente nestas melhores soluções que este trabalho está focado, ou seja, produzir soluções otimizadas para problemas previamente conhecidos. Neste contexto, o desenvolvimento de algoritmos cada vez mais eficientes e robustos contribuiu para a disseminação dessa tecnologia.

Os métodos de otimização têm duas formas de configuração: os métodos determinísticos e os métodos estocásticos. As técnicas determinísticas tendem a buscar um ponto de mínimo (quando o problema é de minimização) no espaço de busca baseadas na informação do gradiente da função objetivo (função custo). A eficiência destas técnicas depende de diversos fatores, tais como: o ponto inicial, a precisão da avaliação da direção descendente e o método utilizado para executar a busca em linha, além do critério de parada. A solução obtida é geralmente um ponto de mínimo local, que pode ser mínimo global se a função apresentar apenas uma moda. As duas desvantagens principais são a necessidade de avaliações do gradiente e falta da garantia do mínimo global.

Os métodos estocásticos, dos quais os algoritmos evolucionários ou evolutivos (AEs) fazem parte, não necessitam do cálculo do gradiente e são aptos a encontrar a solução global. Contudo, o número de avaliações da função objetivo, necessárias para encontrar a solução, é geralmente maior que o número requerido pelos métodos determinísticos (Vasconcelos *et al.*, 1999).

Os AEs são ferramentas promissoras para busca, otimização, aprendizado de máquina e para resolução de problemas de projeto. Estes algoritmos utilizam a evolução simulada para busca por soluções para problemas complexos (Bäck *et al.*, 1997; Whitley, 2001). Os AEs são baseados em uma população de indivíduos, onde cada um representa um ponto de busca no espaço de soluções potenciais de um dado problema. Os AEs possuem alguns procedimentos de seleção baseados na aptidão (*fitness*) dos indivíduos mais aptos, operadores de cruzamento (*crossover*) e mutação.

Os AEs incluem algoritmos genéticos, programação evolucionária, estratégias evolutivas, programação genética, entre outras variantes (Bäck *et al.*, 1997). Dentre estes algoritmos evolucionários destaca-se o algoritmo de evolução diferencial (ED). A ED foi desenvolvida por Price & Storn (1995) visando a busca por melhores resultados com uma abordagem um pouco diferente da utilizada nos algoritmos genéticos e em estratégias evolutivas. Algumas das potencialidades da ED têm-se a rapidez de convergência da otimização, a facilidade de implementação e validação.

Neste artigo enfoca-se a ED para otimização da equação (6) com suas respectivas 18 restrições (usando funções de penalização a soluções infactíveis), que consiste de um método de busca estocástico que apesar de apresentar conceitos simples e de fácil implementação, é robusto e eficiente.

4.1.1 Evolução diferencial

Os parâmetros da função a ser otimizada na ED são codificados com variáveis representadas em ponto flutuante na população (conjunto de soluções possíveis para as variáveis X₁ a X₇ do problema da equação (6)) e são realizadas mutações simples com uma operação aritmética simples. Storn (1997) relatou resultados impressionantes que mostram que a ED supera outros AEs em diversos problemas *benchmark* de otimização de parâmetros. Na ED, cada variável é representada por um valor real (ponto flutuante) e o seu procedimento de otimização é regido pelas seguintes etapas:

- (i) gerar uma população inicial aleatória, com distribuição uniforme, de soluções factíveis à resolução do problema em questão, onde é garantido por regras de “reparo” que garantem que os valores atribuídos as variáveis estão dentro das fronteiras delimitadas pelo projetista;
- (ii) um indivíduo é selecionado, de forma aleatória, para ser substituído e outros três diferentes indivíduos são selecionados como genitores (pais);
- (iii) um destes três indivíduos é selecionado como genitor principal;
- (iv) com alguma probabilidade, cada variável do genitor principal é modificada. Neste caso, pelo menos uma variável deve ser alterada;
- (v) a modificação é realizada adicionando ao valor atual da variável uma taxa, F , regida pela diferença entre dois valores desta variável nos outros dois genitores. Em outras palavras, o vetor denominado genitor principal é modificado baseado no vetor de variáveis de dois outros genitores. Este procedimento representa o operador de cruzamento na evolução diferencial;
- (vi) se o vetor resultante apresenta uma função de aptidão (*fitness*) melhor que o escolhido à substituição, ele o substitui; caso contrário, o vetor escolhido para ser substituído é mantido na população.

Em outras palavras, adotando-se um formalismo de explicação matemático, na evolução diferencial uma solução, l , na geração w é um vetor multidimensional $X_{G=w}^l = (X_1^l, \dots, X_N^l)^T$. Uma população, $P_{G=k}$, na geração $G=k$ é um vetor de M soluções, onde $M > 4$. A população inicial, $P_{G=0} = \{X_{i,G=0}^1, \dots, X_{i,G=0}^M\}$ é gerada inicialmente, com distribuição uniforme, adotando-se

$$X_{i,G=0}^l = \lim_{\inf}(X_i) + \text{rand}[0,1] * \{\lim_{\sup}(X_i) - \lim_{\inf}(X_i)\}, \quad (7)$$

onde $\lim_{\inf}(x_i)$ e $\lim_{\sup}(x_i)$, $i=1,2,\dots,7$, são os limites inferior e superior de valores admissíveis para a variável x_i , respectivamente, M é o tamanho da população, N é a dimensão da solução e $\text{rand}[0,1]$ gera um número aleatório, com distribuição uniforme, no intervalo entre 0 e 1.

A seleção é realizada para escolher quatro diferentes índices de soluções r_1, r_2, r_3 e $j \in [1, M]$. Os valores de cada variável, na solução descendente, são modificados com uma mesma probabilidade de cruzamento, p_m , para

$$\forall i \leq N, X'_{i,G=k} = \begin{cases} X_{i,G=k-1}^{r_3} + F * (X_{i,G=k-1}^{r_1} - X_{i,G=k-1}^{r_2}) \\ \quad \text{se } (\text{rand}[0,1] < p_c \wedge i = i_{\text{rand}}) \\ X_{i,G=k-1}^j, \quad \text{nos outros casos} \end{cases} \quad (8)$$

onde $F \in (0,1)$ é uma taxa de “perturbação” a ser adicionada a solução escolhida aleatoriamente denominada genitor principal.

A nova solução substitui a solução anterior (antiga) se ela for melhor que a anterior e pelo menos uma das variáveis tenha sido modificada. Esta solução é representada na evolução diferencial pela seleção aleatória de uma variável, $i_{\text{rand}} \in (1, N)$. Depois da operação de cruzamento, se uma ou mais variáveis na nova solução estão fora das fronteiras (limites) uma regra de “reparo” é aplicada, sendo esta regida pela equação

$$X'_{i,G=k} = \begin{cases} \left[X_{i,G}^j + \lim_{\inf}(X_i) \right] / 2, & \text{se } X_{i,G}^j < \lim_{\inf}(X_i) \\ \left[\lim_{\inf}(X_i) + X_{i,G}^j - \lim_{\sup}(X_i) \right] / 2, & \text{se } X_{i,G+1}^j > \lim_{\sup}(X_i) \\ X_{i,G+1}^j, & \text{nos outros casos.} \end{cases} \quad (9)$$

4.1.2. Tratamento de restrições

A metodologia de tratamento de restrições é dividida em duas etapas. A primeira etapa visa a obtenção de soluções para as variáveis de decisão dentro dos limites inferior (\lim_{\inf}) e superior (\lim_{\sup}) impostos pelo projetista, isto é, $X \in [\lim_{\inf}, \lim_{\sup}]$. Neste caso, quando uma restrição de limite inferior não é satisfeita aplica-se a regra de “reparo”,

$$X_i = X_i + w \cdot \text{rand}[0,1] \{ \lim_{\sup}(X_i) - \lim_{\inf}(X_i) \} \quad (10)$$

De forma análoga, no caso de que uma restrição de limite superior não seja satisfeita utiliza-se a seguinte regra de reparo,

$$X_i = X_i - w \cdot \text{rand}[0,1] \{ \lim_{\text{sup}}(X_i) - \lim_{\text{inf}}(X_i) \} \quad (11)$$

onde $w \in [0,1]$ é um parâmetro de projeto e $\text{rand}[0,1]$ é um valor aleatório gerado com distribuição uniforme entre 0 e 1. Na segunda etapa as variáveis de decisão são consideradas nas desigualdades, g_i ; neste artigo adota-se um procedimento para desigualdades do tipo $g_i(X) \leq 0$, onde deseja-se minimizar uma função $f(X)$, ou seja, maximização da *fitness*. Neste caso adota-se o seguinte cálculo para a equação de *fitness*,

$$\text{aval}(X) = \begin{cases} F(X), & \text{para } g_i(X) \leq 0 \\ F(X) + r \cdot q \cdot \sum_{i=1}^n g_i(X), & \text{para } g_i(X) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

onde r é o número de restrições não atendidas, q é uma constante de penalidade (adotou-se $q=1$). A penalidade é nula se nenhuma violação de restrições ocorre e possui valor positivo em outros casos, ou seja, se $\forall g_i(X) \leq 0, i=1, \dots, p$, ONDE $p=18$ neste artigo. Usualmente, a função de penalidade é baseada na distância de uma solução da região factível (RF) ou no esforço de “reparar” um conjunto de soluções (ou seja, forçá-lo a ficar dentro de RF). Neste artigo o objetivo é maximizar a função de aptidão,

$$\text{fitness} = \frac{1}{1 + \text{aval}(X)} \quad (13)$$

onde X é conjunto de variáveis X_1 a X_7 (ou soluções) a serem otimizadas para o problema de otimização em estudo.

4.2. Resultados da otimização usando ED

A configuração adotada na otimização por ED foi de uma população de 30 indivíduos, probabilidade cruzamento de 0,8 e número máximo de gerações (iterações) de 1000. Na Tab. 5 é apresentado um estudo comparativo de formas diferentes de gerar o valor de F a cada geração da ED. O número de avaliações da função objetivo foi de 30000 vezes (tamanho da população x número máximo de gerações).

Tabela 5. Resumo dos resultados de otimização com a ED.

técnica	parâmetro de projeto F	melhor função objetivo F(X) obtida	iterações para convergir para a melhor função objetivo F(X)
ED(1)	F = 0,4 (valor constante durante as gerações)	4,71336917371888	925
ED(2)	F ∈ [0,05; 1,50] (aleatório com distribuição uniforme)	4,71331074547578	670
ED(3)	F ∈ [0,02; 1,20] (aleatório com distribuição uniforme)	4,71331074494350	599
ED(4)	F ∈ [0,10; 1,20] (aleatório com distribuição uniforme)	4,71331074496230	482

Todas as 4 abordagens de ED analisadas obtiveram soluções satisfazendo as 18 restrições impostas à equação (6). A velocidade de convergência da melhor solução (em escala logarítmica) e a diversidade da população de cada abordagem podem ser observadas nas Figs. 3 a 6. As convergências de ED(1)-ED(4) foram similares. Entretanto a ED(4) obteve o melhor valor de $F(X)$ em 482, ou seja, mais rapidamente que a ED(1), ED(2) e ED(3).

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, com o melhor resultado para X_1 a X_7 (com função objetivo $F(X) = 4,71331074496230$) usando otimização por ED são apresentados na Tab. 6.

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.

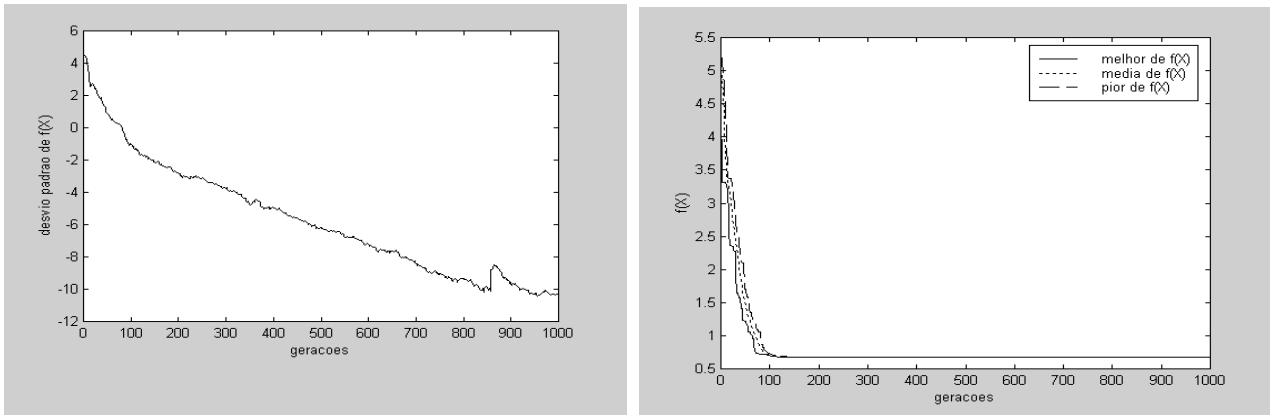


Figura 3. Convergência da ED(1).

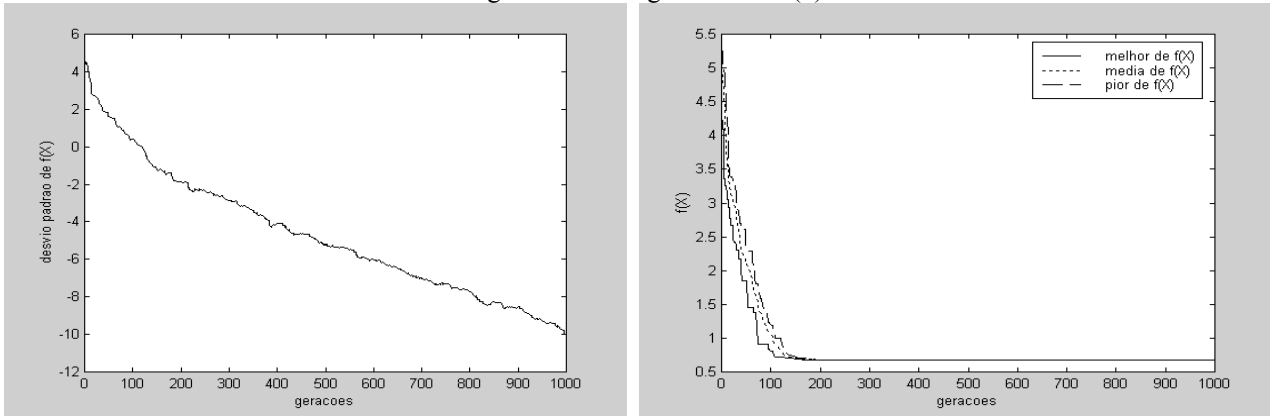


Figura 4. Convergência da ED(2).

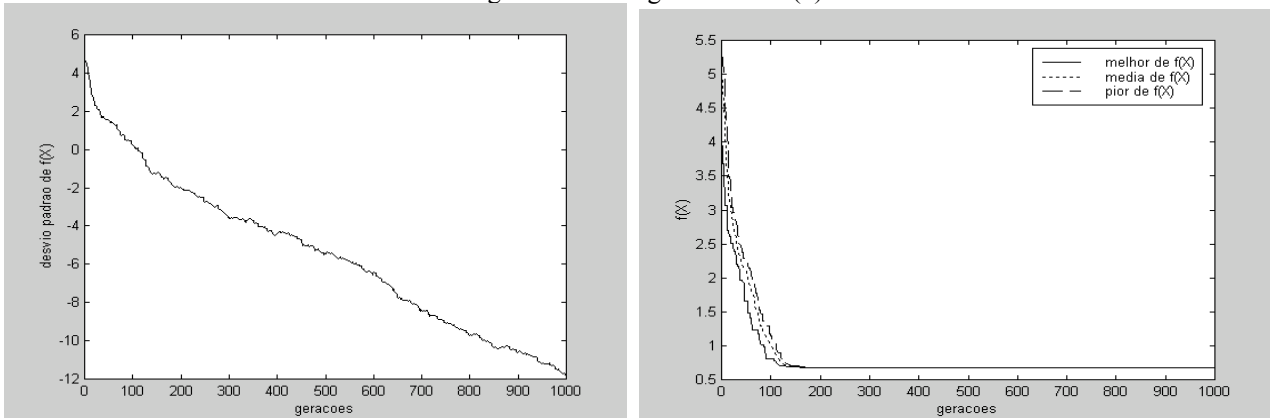


Figura 5. Convergência da ED(3).

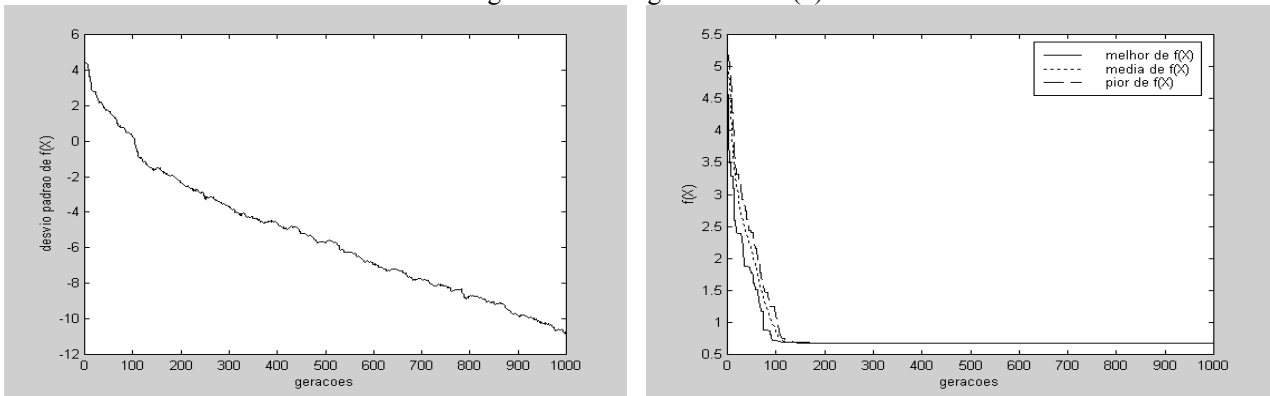


Figura 6. Convergência da ED(4).

Tabela 6. Resultado do modelo de otimização através de ED.

Função objetivo C = US\$4,712/ton	Composição dos óxidos puros no clínquer (%)	Módulos de controle	Consumo específico de calor = 3600 (kJ/kg de clínquer)
quantidade compostos (kg/kg de clínquer)			Consumo de combustíveis (kg/ton de clínquer)
X ₁ = 1,2192	CaO = 62,07	MS = 2,50	
X ₂ = 0,2263	SiO ₂ = 20,13	MA = 1,82	Coque de petróleo = 78,4
X ₃ = 0,0000	Al ₂ O ₃ = 5,22	MH = 2,20	
X ₄ = 0,0000	Fe ₂ O ₃ = 2,86		Pneus usados = 28,03
X ₅ = 0,0000	MgO = 0,95		
X ₆ = 0,0784			
X ₇ = 0,0280			

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 não desejadas no cimento (Carvalho *et al.*, 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 a 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.

Em relação ao procedimento de otimização, os resultados de otimização com a ED para otimização da equação (6) foram precisos e a ED foi robusta e rápida na busca por uma boa solução para um problema de otimização. Os resultados apresentados na seção 4 foram idênticos aos obtidos com programação linear seqüencial, usando *software* LINGO (Carpio *et al.*, 2003). O procedimento de otimização da programação linear seqüencial 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.

Em relação à programação linear seqüencial, a desvantagem foi o custo computacional maior da ED para obtenção da convergência do procedimento de otimização para o mesmo resultado da programação linear seqüencial. Neste contexto, deve mencionar que para a solução de problemas com muitos ótimos locais é quase uma arte de lidar com o conflito fundamental entre precisão, integridade e esforço computacional. O compromisso entre *exploitation* (velocidade de convergência) e *exploration* (diversidade da população) é uma constante na ED, como em outros o AE, e deve ser considerada na configuração de uma metodologia de otimização eficiente para o modelo da equação (6) em trabalhos futuros dos autores deste artigo.

6. Referências

- ABCP, 2002, "O coque de petróleo na indústria de cimento", Publicação e Análises Laboratoriais, Julho.
- Associação Brasileira de Cimento Portland, Divisão de Tecnologia do Cimento. Departamento de Físico-Química, 1984, "Curso de microscopia de clínquer de cimento Portland", ABCP. São Paulo, SP, Brasil.
- Bäck, T., D.B. Fogel, and Z. Michalewicz (eds.), 1997, Handbook of Evolutionary Computation, Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing, NY, Oxford: Oxford University Press.
- Carpio, R. C., Silva, R. J., Jorge, A. B., 2003, "Otimização da mistura de combustíveis secundários alternativos visando atender as restrições operacionais e ambientais em fornos de cimenteiras", Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Natal, RN.
- Carvalho, V. O., Silva, R. J., Menon, G. J., 1997, "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.

- Coello Coello, C.A., 2000, "Use of self-adaptive penalty approach for engineering optimization problems", *Computers in industry*, vol. 41, no. 2, pp. 113-127.
- CONAMA, 1999, Conselho Nacional de Meio Ambiente, Resolução nº. 258, de 26 de Agosto de 1999.
- Duda, W. H., 1977, "Manual tecnologico del Cemento", Editores Técnicos Asociados. Barcelona, Espanha.
- Peray, K. E., Wadell, J. J., 1972, "The rotary cement kiln", Chemical Publishing Co., Inc., New York, USA.
- Salomon, V. G., 2001, "Otimização da mistura de resíduos industriais para a produção de um combustível derivado de resíduos destinado ao co-processamento em fornos rotativos", Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- Souza, F. A., 2000, "Utilização de pneus pós-consumo como combustível em fornos de cimento", Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais – CETESB.
- Storn, R., 1997, "Differential evolution — a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341-359.
- Storn, R., Price, K., 1995, "Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces", Technical Report TR-95-012, International Computer Science Institute, Berkeley.
- Tokyay, M., 1999, "Effect of chemical composition of clinker on grinding energy requirement", *Cement and Concrete Research*, Pergamon Press.
- Trezza, M. A. and Scian, A. N., 2000, "Burning wastes as an industrial resource. Their effect on Portland cement clinker", *Cement and Concrete Research*. vol. 30, pp. 137-144.
- Vasconcelos, J. A., Saldanha, R. R., Krähenbühl, L., Nicolas, A., 1999, "Genetic algorithm coupled with a deterministic method for optimization in eletromagnetics", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, no. 3, pp. 1860-1863.
- Whitley, D., 2001, "An overview of evolutionary algorithms: practical issues and common pitfalls", *Information and Software Technology*, vol. 43, pp. 817-831.
- Xirokostas, D. A., 1997, "Mathematical programming approach to the problem of cement blending optimization", *Cement and Concrete Research*, Pergamon Press.

OPTIMIZATION OF A MIXING OF ALTERNATIVE SECONDARY FUELS IN CEMENT KILNS USING DIFFERENTIAL EVOLUTION

Ricardo Carrasco Carpio

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303 — Bairro Pinheirinho — Itajubá — MG
rcarpio@unifei.edu.br

Leandro dos Santos Coelho

Pontificia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Grad. Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
leandro.coelho@pucpr.br

Rogério José da Silva

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303 — Bairro Pinheirinho — Itajubá — MG
rogeriojs@unifei.edu.br

Ariosto Bretanha Jorge

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303 — Bairro Pinheirinho — Itajubá — MG
ariosto.b.jorge@unifei.edu.br

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. In the optimization procedure, a differential evolution technique (an evolutionary computation paradigm) with penalization function for undesired solutions is proposed. The simulation results show the effectiveness of proposed optimization procedure.

Keywords: optimization, waste co-processing, cement industry, differential evolution.