

# OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DE CARVÕES NA PRODUÇÃO DE COQUE METALÚRGICO<sup>1</sup>

*Guilherme Liziero Ruggio Silva<sup>2</sup>  
Elton Destro<sup>3</sup>  
Rafael Ferreira Delfim Bueno<sup>2</sup>  
Paulo Santos Assis<sup>4</sup>*

## **Resumo**

O coque é um produto intermediário numa usina integrada. É produzido a partir de misturas de carvões metalúrgicos, formuladas para atender tanto as condições operacionais do processo de coqueificação como os requisitos de qualidade do processo de produção de gusa. O carvão metalúrgico, indispensável em usinas integradas a coque, é uma matéria-prima essencial para a siderurgia brasileira a coque, tanto pelo volume de material envolvido como também pelo seu impacto nos custos de produção do aço. O presente trabalho trata da otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico. Para tanto foi desenvolvido e implementado um modelo de otimização baseado em programação linear. Os resultados comprovaram a eficiência e a potencialidade desta ferramenta na minimização dos custos da mistura de carvões.

**Palavras-chave:** Otimização; Mistura de carvões; Coque metalúrgico.

## **OPTIMIZATION OF THE MIXTURE OF COAL IN METALLURGICAL COKE'S PRODUCTION**

### **Abstract**

The coke is an intermediate product in a steel plant. It is produced from mixtures of metallurgical coal, formulated to meet both the operating conditions of the coke production as the quality requirements of the production of hot metal. The metallurgical coal is vital to the integrated coke plants, is an essential raw material for the Brazilian steel industry coke, both the volume of material involved but also by its impact on production costs of steel. This paper deals with the coke mixture optimization of metallurgical coke production. For this purpose it was created and implemented a new optimization model based on linear programming. The results showed the efficiency and the potentiality of this method in order to lower the cost of coke mixture.

**Key words:** Optimization; Mixture of coal; Metallurgical coke.

1 *Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.*

2 *Mestrando em Engenharia de Materiais - REDEMAT*

3 *Doutorando em Engenharia de Materiais – REDEMAT*

4 *Doutor em Metalurgia. Prof. Titular da Escola de Minas e Prof. da REDEMAT - UFOP*

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem grande participação na produção de aço mundial, tendo produzido cerca de 33 milhões de toneladas de aço bruto em 2007, segundo dados divulgados pelo IBS (Instituto Brasileiro de Siderurgia).<sup>(1)</sup>

No atual mercado globalizado, as empresas estão cada vez mais pressionadas no sentido de aprimorar seus processos, produtos e serviços para se manterem competitivas. Isso exige eficácia gerencial e eficiência operacional. Numa indústria de transformação, como a siderurgia, a aquisição de matérias-primas é uma etapa fundamental em termos de estratégia do negócio. Para a siderurgia brasileira, este processo é de vital importância, principalmente quando se trata do carvão metalúrgico, matéria-prima importada de diversos países e responsável por uma parcela altamente significativa dos custos de produção de aço no país.

As importações anuais de carvões metalúrgicos, que atualmente são da ordem de 13 milhões de toneladas, a um custo aproximado de US\$ 600 milhões, têm reflexos importantes tanto na balança comercial como na competitividade do aço brasileiro.

A definição dos melhores carvões e respectivas quantidades para o abastecimento de uma empresa siderúrgica brasileira é um problema semi-estruturado, que apresenta uma certa complexidade por envolver um grande número de variáveis, muitas funções interdependentes, decisões conflitantes e vultuosos recursos financeiros.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia fundamentada nos princípios da programação matemática e que consiga prever o melhor plano de mistura de carvões, minimizando o custo de obtenção da mistura com o atendimento de todas as restrições de qualidade impostas pelo processo. Portanto, o trabalho desenvolvido se constitui em uma ferramenta para tomada de decisões para compra de carvões que poderá ser implementado nas empresas siderúrgicas brasileiras.

## 2 VISÃO GERAL

A formulação de misturas para coqueificação consiste na definição dos carvões e de suas proporções em cada mistura, para se obter um coque na qualidade desejada, a partir dos carvões disponíveis.

A mistura formulada deve atender às condições operacionais do processo de coqueificação e produzir um coque com características de qualidade capaz de desempenhar os papéis dele exigidos no processo de produção de gusa em alto-forno. A qualidade do coque depende das características da qualidade dos carvões utilizados na mistura e do processo de coqueificação.

Uma vez estabelecidas as propriedades do coque e o plano de produção, uma mistura de carvões deverá, então, ser estabelecida. Esta mistura, denominada macro mistura, vai ser subdividida em misturas seqüenciais que irão obedecer às mesmas regras de qualidade e produção.

Nesta fase, com auxílio de modelo matemático, simulam-se várias misturas até determinar a mistura ótima que atenda o binômio qualidade e custo. Alguns pré-requisitos básicos devem ser observados, tais como qualidade do coque definido pelo alto-forno, qualidade dos carvões, diversificação de fontes, introdução de novos carvões e contratos em exercício.

A composição da mistura e determinação do coque teórico obedece à lei da aditividade que é aplicada para todos os seus principais componentes. Basicamente,

a composição da mistura visa o equilíbrio da relação reativos e inertes, buscando uma estrutura e textura física do coque adequadas para cada tipo de alto-forno.

Segundo Carmo e Carvalho,<sup>(2)</sup> levando em conta a equação qualidade e custo, os parâmetros podem ser equacionados através de modelos matemáticos para auxiliar como base de cálculos.

Neste contexto, segundo Shamblin e Stevens Junior<sup>(3)</sup> a *Pesquisa Operacional* (PO) é, portanto, um ramo da ciência que fornece instrumentos para análise de decisões possuindo um conjunto de técnicas quantitativas para auxiliar a gerência na tomada de decisão.

A *Programação Linear* (PL), segundo Prado,<sup>(4)</sup> consiste em encontrar a melhor solução para problemas que tenham modelos representados por expressões lineares, o que torna a técnica simples e com grande aplicabilidade.

No presente trabalho, o papel do modelo de PL é minimizar a função objetivo associada ao custo da mistura de carvões, levando em consideração as qualidades intrínsecas de cada carvão, cumprindo as exigências e condições do coque para o alto-forno.

### 3 METODOLOGIA

O estudo de custo desenvolvido no presente trabalho utiliza-se da Programação Linear como ferramenta quantitativa de apoio a decisão. O modelo matemático de apoio à decisão objetiva a minimização do custo da mistura de carvões e assume como restrições a qualidade exigida pela mistura e pelo coque produzido a fim de que este desempenhe satisfatoriamente suas funções no alto-forno.

O modelo para otimização da mistura de carvões é mostrado a seguir.

#### A - Dados de entrada

$c_j$  : custo do carvão j

$x_j$  : porcentagem do carvão j na mistura

$t_{ij}$ : valor do parâmetro de controle i no carvão j

m: quantidade de parâmetros de controle (propriedades)

$tmín_i$  : limite inferior do parâmetro i na mistura

$tmáx_i$  : limite superior do parâmetro i na mistura

n: quantidade de carvões disponíveis

P: número de carvões utilizados na mistura

$Q_{min}$ : quantidade em massa mínima (t) disponível do carvão j

$Q_{máx}$ : quantidade em massa máxima (t) disponível do carvão j

$Q_T$ : quantidade total em massa (t) da mistura de carvões

#### B - Variável de decisão

$x_j$ : porcentagem do carvão j para compor a mistura

#### C - Função Objetivo

Tem por finalidade minimizar o custo da mistura de carvões.

$$min f(x) = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j$$

## D - Restrições

D.1 - Com relação ao atendimento das metas de qualidade exigidas para a mistura:

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot x_j \leq t_{\max i} \cdot \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot x_j \right) \quad \forall i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot x_j \geq t_{\min i} \cdot \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot x_j \right) \quad \forall i = 1, \dots, m$$

As propriedades avaliadas foram:

**Químicas** - Cinza (Cz), Matéria Volátil (MV), Enxofre (S), Álcalis (Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CaO, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZnO e TiO<sub>2</sub>.

- **Físicas** - Umidade, %Superfinos-SF-(<0,15mm), Índice de moabilidade (HGI), WI (*Work Index*), Petrografia - análise de macerais (%Vitrinita e Inertes) e Reflectância Máxima Média (Re).

- **Metalúrgicas** - Plastometria (Fluidez-FLZ), Dilatometria, Resistência do Coque após Reação (CSR), Reatividade (CRI), Índice de Basicidade (IB), Contração/Expansão (C/E), Índice de equilíbrio da composição reativo / inerte (CBI - *Composition Balance Index*), Índice de resistência (SI - *Strenght Index*) e o Poder Calorífico Inferior (PCI).

- **Custo** - Preços CIF (US\$) dos carvões disponíveis.

Os limites de qualidade para as propriedades mencionadas da mistura de carvões estão evidenciadas nas Tabela 1.

**Tabela 1.** Limites de qualidade da mistura de carvões

Parâmetro	MV	C/E	FLZ	Re	CSR	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S
mín	22	-14	2,3	1,13	63	50	25	2,5	0	0,5
máx	26	-10	3,0	1,21	70	55	30	3,0	1	0,8

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Vit	Inet	Umid	CRI	WI	CZ
5	0,02	0,5	0	0,2	0	0,5	55	26	3	20	0	9
8	0,05	1	0,03	0,8	1,2	2,0	65	36	10	25	8,6	10

HGI	IB	CBI	SI	SF	PCI
70	0,5	1	1	7	3000
90	1,5	2	3	15	6000

D.2 - Com relação à disponibilidade de carvão j:

$$Q_{\min} \leq x_j \cdot Q_T \leq Q_{\max} \quad \forall j = 1, \dots, n$$

D.3 - Restrição de não-negatividade:

$$x_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n$$

D.4 - Restrição quanto ao número de carvões distintos utilizados na mistura:

$$P \leq P_{\max}$$

D.5 - No modelo proposto, foram contempladas as restrições de atendimento da qualidade do coque obtido, cujas especificações estão mostradas na Tabela 2.

**Tabela 2** Especificações da qualidade do coque

Qualidade do Coque	Cinza	Rendimento	Pressão (psi)	DI (150/15)	CSR	Alcalis	S	P	Fe
mín	9	75	0,5	83	65	0	0	0	2
máx	12,5	80	1,5	87	72	1,7	0,7	0,3	5,5

#### 4 INSTÂNCIA TESTE

O modelo de programação matemática descrito acima foi aplicado para definir a mistura de menor custo que pode ser obtida com um conjunto de carvões cujas características simulam um contexto real.

Este conjunto é formado por 16 tipos de carvões, sendo utilizado como dados de entrada para o modelo de otimização as quantidades mínima e máxima disponíveis, o custo CIF (*Cost Insurance Freight* ou Preço, Seguro e Frete) associado a cada carvão e 29 parâmetros de controle, cujos limites inferior e superior definirão parte das restrições que serão consideradas no modelo.

Além das restrições relacionadas à mistura de carvões, foram levadas em conta no modelo parâmetros relativos à qualidade do coque, cujas especificações foram definidas na Tabela 2.

É importante destacar que as restrições relacionadas ao número de carvões e a uma quantidade mínima de carvão que justifica a sua compra serão consideradas como restrições a serem atendidas pelo modelo. Assim, será possível definir um limite máximo de carvões que irão compor a mistura bem como uma quantidade abaixo da qual o carvão não poderá ser considerado como integrante desta mistura. Esta segunda restrição se justifica da seguinte forma: pode ocorrer que o valor da participação do carvão seja muito baixo (p. ex. 0,1%), o que torna inviável a sua inserção como parte da mistura.

A Tabela 3 mostra as propriedades intrínsecas de cada carvão.

**Tabela 3** Dados de entrada do modelo de otimização

	TIPOS	Mín (t)	Máx (t)	CIF (US\$)	CAL (%)	MV	C/E	FLZ	Re	CSR	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
AV	AV1	0	50000	161,23	?	30,89	-16,49	3,98	1,02	59,90	43,89	23,42	4,20	1,43
	AV2	0	5000	210,12	?	29,90	-15,02	3,75	0,91	63,02	50,56	29,21	2,34	0,95
	AV3	0	30000	182,34	?	36,20	-17,01	4,98	1,08	58,75	49,82	29,12	3,02	0,92
	AV4	0	27000	179,99	?	29,89	-19,09	4,23	0,97	63,08	50,48	29,39	2,78	0,79
MV	MV1	0	12000	438,20	?	21,38	-3,99	2,89	1,29	65,10	57,67	25,78	1,09	0,49
	MV2	0	27000	456,45	?	18,56	-3,00	2,77	1,30	63,67	52,67	28,23	2,88	1,12
	MV3	0	60000	390,45	?	19,40	-12,01	1,04	1,17	64,89	52,23	27,13	4,07	0,67
	MV4	0	35000	318,50	?	29,98	-10,78	3,02	1,01	62,95	49,12	32,67	2,08	1,07
SOFT	S1	0	36000	175,34	?	21,89	-10,34	1,78	1,23	66,89	52,46	29,45	3,01	0,71
	S2	0	14000	339,56	?	24,03	-10,36	0,13	1,19	57,77	52,89	25,47	3,04	0,92
	S3	0	50000	280,20	?	20,01	-11,98	0,15	1,18	52,89	54,89	34,99	2,04	0,46
	S4	0	45000	198,45	?	22,02	-8,34	0,21	0,97	58,99	41,12	25,01	3,89	1,76
BV	BV1	0	50000	188,67	?	27,67	-10,55	1,89	1,27	67,23	54,89	25,88	4,02	0,81
	BV2	0	23000	299,12	?	13,89	-19,01	2,12	0,96	46,12	38,23	21,65	4,01	0,69
	BV3	0	17000	407,45	?	22,76	-9,12	1,71	1,43	52,89	49,46	28,65	2,88	1,11
	BV4	0	9000	392,70	?	20,00	-7,23	1,75	1,39	55,56	38,32	22,78	8,56	1,82

(continuação)

TIPOS	S	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	VIT	INET	UMID	CRI	WI
AV1	0,76	15,89	0,04	0,27	0,03	0,62	1,91	1,29	65,1	19,55	6,79	26,89	9,88
AV2	0,98	11,23	0,02	0,31	0,03	0,39	1,92	1,41	67,9	27,88	8,78	21,27	10,17
AV3	0,79	10,14	0,04	0,29	0,03	0,49	2,04	1,71	65,3	25,77	7,44	29,87	9,61
AV4	1,02	9,88	0,02	0,21	0,02	0,52	1,98	1,52	69,7	19,23	8,56	25,43	9,74
MV1	0,71	5,12	0,04	0,71	0,02	0,38	1,12	1,38	69,9	29,76	6,98	22,97	7,40
MV2	0,59	6,16	0,06	0,97	0,03	0,57	1,53	1,47	71,1	27,56	7,44	31,78	7,47
MV3	0,44	4,02	0,05	0,48	0,02	0,21	0,64	1,82	62,7	32,67	8,11	19,89	8,16
MV4	0,72	5,89	0,03	0,49	0,03	0,41	1,99	1,44	79,4	19,89	7,34	23,45	7,63
S1	0,29	3,78	0,03	1,39	0,02	0,28	0,57	1,49	51,4	56,8	12,8	19,82	7,32
S2	0,31	3,79	0,04	1,96	0,01	0,27	0,61	1,68	52,1	29,98	8,29	26,02	8,16
S3	0,31	5,89	0,08	1,02	0,03	0,47	0,64	1,78	41,3	55,34	13,62	29,78	8,45
S4	0,41	11,12	0,04	0,81	0,02	0,31	1,05	0,97	49,7	33,41	8,44	31,62	8,99
BV1	0,70	4,99	0,02	0,48	0,01	0,22	0,66	1,59	59,8	25,04	8,76	19,34	7,40
BV2	1,29	11,98	0,09	0,92	0,03	0,21	0,55	1,23	57,9	39,33	6,43	28,06	7,32
BV3	0,74	6,88	0,05	0,94	0,02	0,58	1,58	1,48	72,9	19,73	7,01	31,03	7,10
BV4	0,73	13,86	0,08	0,24	0,01	0,38	1,51	1,17	81,6	21,11	7,09	25,48	7,03

(continuação)

TIPOS	CZ	HGI	IB	CBI	SI	SF	PCI
AV1	6,99	64,00	1,747	0,98	1,42	11	3500
AV2	7,99	62,00	1,149	1,79	2,12	12	4900
AV3	7,01	66,00	1,067	1,11	1,98	11	3650
AV4	5,92	65,00	0,841	1,31	2,89	14	4800
MV1	10,01	88,00	0,674	2,21	3,56	16	4850
MV2	9,05	87,00	1,123	1,58	0,92	14	4400
MV3	9,85	79,00	1,080	1,27	0,54	13	5100
MV4	9,45	85,00	1,065	2,36	4,89	17	3980
S1	11,20	89,00	1,017	0,79	1,61	11	4120
S2	10,60	79,00	1,046	0,89	1,43	12	5280
S3	8,76	76,00	0,690	1,47	1,13	9	4990
S4	7,02	71,00	1,500	1,97	1,43	15	4120
BV1	11,30	88,00	1,293	2,89	0,89	16	4350
BV2	2,14	89,00	0,436	1,23	1,23	17	4930
BV3	6,89	92,00	0,924	1,32	1,87	16	1700
BV4	6,12	93,00	2,179	1,78	0,79	17	3930

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores calculados (cal) pelo modelo de otimização são mostrados nas Tabelas 4, 5 e 6.

**Tabela 4.** Participação percentual de cada carvão na mistura

	TIPOS	Mín (t)	Máx (t)	CIF (U\$)	CAL (%)	
AV <b>44,68</b>	AV1	0	50000	161,23	<b>10,29</b> <b>34,39</b>	<b>6 carvões</b>
	AV2	0	5000	210,12		
	AV3	0	30000	182,34		
	AV4	0	27000	179,99		
MV <b>1,95</b>	MV1	0	12000	438,20	<b>1,95</b>	<b>CIF 188,47 (para 1 t da mistura)</b>
	MV2	0	27000	456,45		
	MV3	0	60000	390,45		
	MV4	0	35000	318,50		
SOFT <b>50,18</b>	S1	0	36000	175,34	<b>43,28</b>  <b>6,90</b>	
	S2	0	14000	339,56		
	S3	0	50000	280,20		
	S4	0	45000	198,45		
BV <b>3,19</b>	BV1	0	50000	188,67	<b>3,19</b>	
	BV2	0	23000	299,12		
	BV3	0	17000	407,45		
	BV4	0	9000	392,70		
<b>100,00%</b>						

**Tabela 5.** Resultados de qualidade da mistura formulada

Parâmetro	MV	C/E	FLZ	Re	CSR	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S
mín	22	-14	2,3	1,13	63	50	25	2,5	0	0,5
máx	28	-10	3,0	1,21	70	55	30	3,0	1	0,8
cal (%)	<b>27,82</b>	<b>-12,86</b>	<b>3,00</b>	<b>1,13</b>	<b>63,12</b>	<b>50,75</b>	<b>28,82</b>	<b>3,00</b>	<b>0,88</b>	<b>0,56</b>

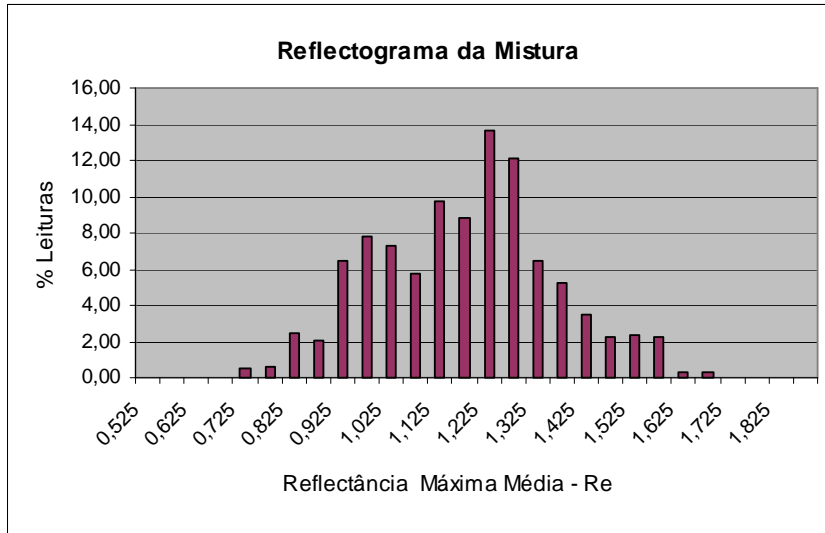
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Vit	Inet	Umid	CRI	WI	CZ
5	0,02	0,5	0	0,2	0	0,5	55	26	3	20	0	9
8	0,05	1	0,03	0,8	1,5	2,0	65	40	10	25	8,6	10
<b>7,30</b>	<b>0,03</b>	<b>0,82</b>	<b>0,02</b>	<b>0,37</b>	<b>1,26</b>	<b>1,52</b>	<b>58,39</b>	<b>40</b>	<b>10</b>	<b>24,29</b>	<b>8,52</b>	<b>9,12</b>

HGI	IB	CBI	SI	SF	PCI
70	0,5	1	1	7	3000
90	1,5	2	3	15	6000
<b>77,02</b>	<b>1,08</b>	<b>1,18</b>	<b>1,79</b>	<b>11,64</b>	<b>4060</b>

**Tabela 6.** Resultados referentes à qualidade do coque

Qualidade do Coque	Cinza	Rendimento	Pressão (psi)	DI (150/15)	CSR	Álcalis	S	P	Fe
mín	9	75	0,5	83	65	0	0	0	2
máx	12,5	80	1,5	87	72	1,7	0,7	0,3	5,5
cal (%)	<b>12,33</b>	<b>75,82</b>	<b>0,70</b>	<b>84,98</b>	<b>68,75</b>	<b>1,65</b>	<b>0,49</b>	<b>0,29</b>	<b>5,11</b>

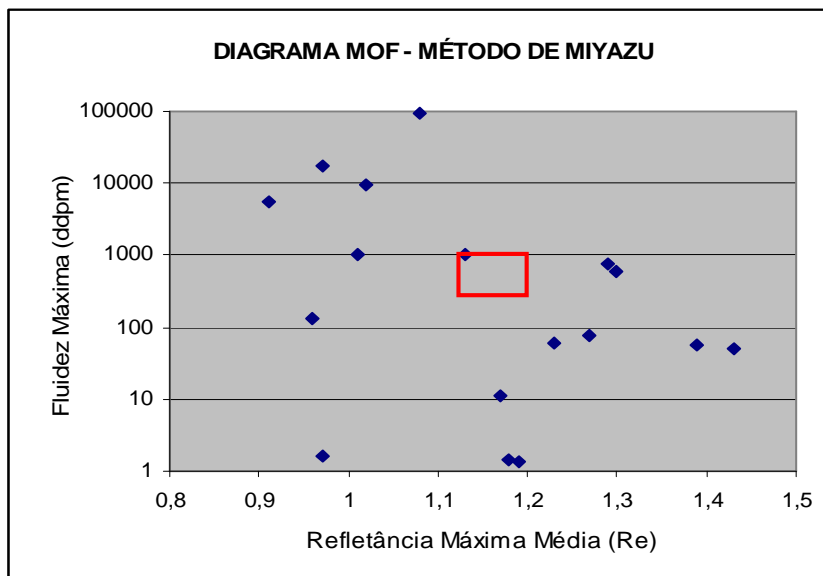
O Reflectograma obtido para a mistura calculada está representado na Figura 1.



**Figura 1** Reflectograma da mistura calculada.

Segundo Miyazu,<sup>(5)</sup> com base nos valores de Fluidez e Reflectância dos carvões e da mistura formada, pode-se construir o diagrama MOF - Método de Miyazu, Okuyama e Fukuyama, evidenciando a chamada "Janela de Coqueificação", onde a mistura deve estar localizada.

A Figura 2 mostra o Diagrama MOF referente à otimização anterior.



**Figura 2.** Diagrama MOF.

Como pode ser observado na Tabela 4, são 6 carvões que farão parte da mistura. No entanto, o modelo proposto permite que se especifique um número máximo de carvões na mistura, por exemplo 5. O resultado desta otimização pode ser visto na Tabela 7.



**Tabela 7.** Participação percentual de cada carvão na mistura, considerando número máximo de carvões igual a 5

	TIPOS	Mín (t)	Máx (t)	CIF (U\$)	CAL (%)	
AV <b>45,86</b>	AV1	0	50000	161,23	<b>22,08</b> <b>23,78</b>	<b>5 carvões</b>
	AV2	0	5000	210,12		
	AV3	0	30000	182,34		
	AV4	0	27000	179,99		
MV <b>0,71</b>	MV1	0	12000	438,20	<b>0,71</b>	<b>CIF</b> <b>188,51</b> (para 1 t da mistura)
	MV2	0	27000	456,45		
	MV3	0	60000	390,45		
	MV4	0	35000	318,50		
SOFT <b>38,66</b>	S1	0	36000	175,34	<b>38,66</b>	
	S2	0	14000	339,56		
	S3	0	50000	280,20		
	S4	0	45000	198,45		
BV <b>14,77</b>	BV1	0	50000	188,67	<b>14,77</b>	
	BV2	0	23000	299,12		
	BV3	0	17000	407,45		
	BV4	0	9000	392,70		
<b>100,00%</b>						

Considerando a mistura formada por 5 carvões, o valor do CIF aumentou U\$ 0,04/t da mistura. Nota-se, também, que a porcentagem relativa ao carvão MV1 é de apenas 0,71%. Pode-se, neste caso, otimizar a mistura considerando admissível apenas porcentagens superiores a 3%. O resultado obtido com esta otimização encontra-se na Tabela 8.

**Tabela 8.** Participação percentual de cada carvão na mistura, considerando número máximo de carvões igual a 5 e participação mínima de 3%

	TIPOS	Mín (t)	Máx (t)	CIF (U\$)	CAL (%)	
AV <b>44,08</b>	AV1	0	50000	161,23	<b>32,15</b> <b>11,93</b>	<b>5 carvões</b>
	AV2	0	5000	210,12		
	AV3	0	30000	182,34		
	AV4	0	27000	179,99		
MV <b>3,26</b>	MV1	0	12000	438,20	<b>3,26</b>	<b>CIF</b> <b>188,75</b> (para 1 t da mistura)
	MV2	0	27000	456,45		
	MV3	0	60000	390,45		
	MV4	0	35000	318,50		
SOFT <b>52,66</b>	S1	0	36000	175,34	<b>43,92</b> <b>8,74</b>	
	S2	0	14000	339,56		
	S3	0	50000	280,20		
	S4	0	45000	198,45		
BV <b>0</b>	BV1	0	50000	188,67		
	BV2	0	23000	299,12		
	BV3	0	17000	407,45		
	BV4	0	9000	392,70		
<b>100,00%</b>						

Considerando um valor máximo de 5 carvões e participação mínima de 3%, houve um aumento do custo por tonelada da mistura de U\$ 0,28.

Caso seja interessante, pode-se, ainda, considerar um valor mínimo de participação do carvão BV1 na mistura de 5%, por exemplo. Este resultado pode ser observado na Tabela 9.

**Tabela 9.** Participação percentual de cada carvão na mistura, considerando número máximo de carvões igual a 5, participação mínima de 3% e participação obrigatória do carvão BV1 com pelo menos 5%

	TIPOS	Mín (t)	Máx (t)	CIF (U\$)	CAL (%)	
AV <b>44,98</b>	AV1	0	50000	161,23	<b>8,08</b> <b>36,90</b>	<b>5 carvões</b>
	AV2	0	5000	210,12		
	AV3	0	30000	182,34		
	AV4	0	27000	179,99		
MV <b>3,75</b>	MV1	0	12000	438,20	<b>3,75</b>	<b>CIF</b> <b>189,41</b> (para 1 t da mistura)
	MV2	0	27000	456,45		
	MV3	0	60000	390,45		
	MV4	0	35000	318,50		
SOFT <b>36,81</b>	S1	0	36000	175,34	<b>36,81</b>	
	S2	0	14000	339,56		
	S3	0	50000	280,20		
	S4	0	45000	198,45		
BV <b>14,46</b>	BV1	<b>5</b>	50000	188,67	<b>14,46</b>	
	BV2	0	23000	299,12		
	BV3	0	17000	407,45		
	BV4	0	9000	392,70		
<b>100,00%</b>						

Para esta última otimização, em que foram consideradas três restrições adicionais, o custo por tonelada da mistura aumentou de U\$ 0,94.

## 6 CONCLUSÕES

Por princípio, todo modelo de otimização visa ajudar na tomada de decisões. Pode-se notar, analisando as situações discutidas anteriormente, que a ferramenta desenvolvida permite várias simulações de misturas, encontrando soluções otimizadas em cada uma delas. Isto certamente facilitará na escolha da melhor solução e, também, auxiliará naquelas situações em que a tomada de uma decisão deve ser a mais rápida possível, situações estas muito comuns quando se pretende definir mistura de carvões para produção de coque metalúrgico. É bom comentar que o tempo máximo para encontrar estas soluções não ultrapassou 2 segundos (pentium dual-core, 1GB de memória).

Acrescenta-se a isto o fato de que o modelo aborda parâmetros granulométricos, no tocante a conferir a mistura calculada um percentual de superfino (< 0,15mm) dentro dos limites pré-estabelecidos, recurso muito importante, pois se trata de um sério problema operacional na produção do coque.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e à Universidade Federal de Ouro Preto pelo apoio recebido. À FAPEMIG pelo apoio a participação dos alunos no referido seminário.

## REFERÊNCIAS

- 1 IBS. *Produção de Aço Bruto*, Jan-Dez/2008. Disponível em: [http://www.ibs.org.br/estatisticas/estatisticas\\_junho\\_2009.htm](http://www.ibs.org.br/estatisticas/estatisticas_junho_2009.htm)
- 2 CARMO, A.D e CARVALHO, C.R.V. *Otimização do Roteiro Tecnológico Aplicada no Refino do Ferro-Gusa*. XV Simpósio Anual da ABM. Belo Horizonte. 2005.
- 3 SHAMBLIN, J. E. e STEVENS Jr. *Pesquisa Operacional: Uma abordagem básica*. São Paulo. Editora Atlas. 1989.
- 4 PRADO, D . *Programação Linear*. Belo Horizonte. EDG. 1999. 205p.
- 5 MIYAZU, T. et al. *Petrographic study on coal na its application for coke making*. N Kokan Technical Report Overseas. December,1971.