



DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO DE CARVÕES PARA COQUERIA E PCI UTILIZANDO O MÉTODO KEPNER & TREGOE ¹

Agenor Medrado da Silva ²
Otavio Augusto de Souza ³

Resumo

O modelo foi desenvolvido para auxiliar o processo de classificação e seleção dos carvões aplicados na produção de coque e injeção em alto forno. O projeto lógico do modelo baseou-se na metodologia de análise de decisão Kepner & Tregoe, através do qual foi possível estabelecer a classe de requisitos obrigatórios e desejáveis de qualidade dos carvões utilizados na CSN. O modelo contempla também a avaliação e classificação dos carvões que não foram utilizados em escala industrial e para isso, foram desenvolvidas equações de previsão do Índice de Resistência Mecânica a Frio (D.I.) e Reatividade (CRI) em função dos parâmetros da qualidade dos carvões.

Palavras-chave: Carvão; Coque; Alto-forno; Índice de resistência mecânica a frio; Reatividade.

DEVELOPMENT OF THE MODEL TO USE IN THE CLASSIFICATION AND COALS SELECTION TO COKE PLANT AND PCI APPLICATION USING KEPNER & TREGOE METHOD

Abstract

The model was developed to aid the classification and coals selection process applied in the coke production and PCI. The logical project of the model is based on the "Analysis and Decision" methodology by Kepner & Tregoe that was possible to establish the requirements obligatory and desirable of the coals class used in the CSN plant. The model also contemplates the evaluation and classification of the coals that were not used in industrial scale and for that, forecast equations were developed of the Drum Index (DI) and Reactivity (CRI) in function of the coal quality parameters.

Key words: Coal; Coke; Blast furnace; Drum index, Reactivity.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Engenheiro Metalúrgico, Dr, MSc. – Especialista em redutores da Gerência Geral de Processos Siderúrgicos – GGPS.

³ Engenheiro Metalúrgico, MSc – Gerente Geral de Processos Siderúrgicos – GGPS.

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a CSN adquire no mercado internacional cerca de três milhões de toneladas de carvão mineral para uso na produção de coque e na injeção nos altos fornos. No processo de avaliação e seleção de carvões inseri-se elevado número de variáveis. Tal prática requer um esforço exaustivo dos especialistas em redutores na direção da convergência dos fatores que levam a elaboração de uma mistura de carvão bem estruturada. No desenvolvimento do modelo, o processo de avaliação e classificação dos carvões fundamentou-se nas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas, tendo como histórico os carvões utilizados na produção de coque e na planta do PCI. Essa modelagem também permitiu projetar de forma sistêmica o conhecimento que ficava restrito ao domínio dos especialistas em redutores.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Processo de Avaliação e Aquisição de carvões na CSN

O carvão mineral, seja de aplicação na produção de coque ou na injeção nos altos fornos, é adquirido na CSN após uma avaliação técnica dos parâmetros de qualidade. Para os carvões que não possuem histórico de utilização, o processo de avaliação técnica consiste no envio de uma amostra para teste em escala laboratorial. Ao término dos testes, é feita a avaliação dos resultados da qualidade, sendo o carvão aprovado, a área comercial inicia o processo de negociação de uma carga experimental (20.000 t.) para a realização do teste em escala industrial.

Após a realização do teste em escala industrial, é feita uma avaliação dos resultados obtidos no período de utilização do carvão, após o material ser aprovado, ele passa a pertencer ao grupo de carvões selecionados para aquisição futura.

Os dados da qualidade física, química e metalúrgica dos carvões foram obtidos do histórico de 20 anos de utilização de carvões nas baterias de fornos a coque da CSN-UPV. Para os carvões de injeção em alto forno, o banco de dados foi composto pelos resultados de qualidade obtidos nos carvões consumidos desde o início de operação da planta de PCI.

2.2 Método Kepner & Tregoe

O modelo de avaliação dos carvões foi desenvolvido utilizando como base o método de Kepner e Tregoe.⁽¹⁾ Esse método consiste na análise do problema e na tomada de decisão e segue a seqUência descrita abaixo:

- Análise da Situação (AS);
- Definição de prioridade: Método GUT (Gravidade x Urgência x Tendência);
- Análise do Problema (AP);
- Análise de decisão (AD); e
- Análise de problema potencial (APP).

O esquema lógico do modelo está ilustrado em forma de fluxograma na Figura 1.

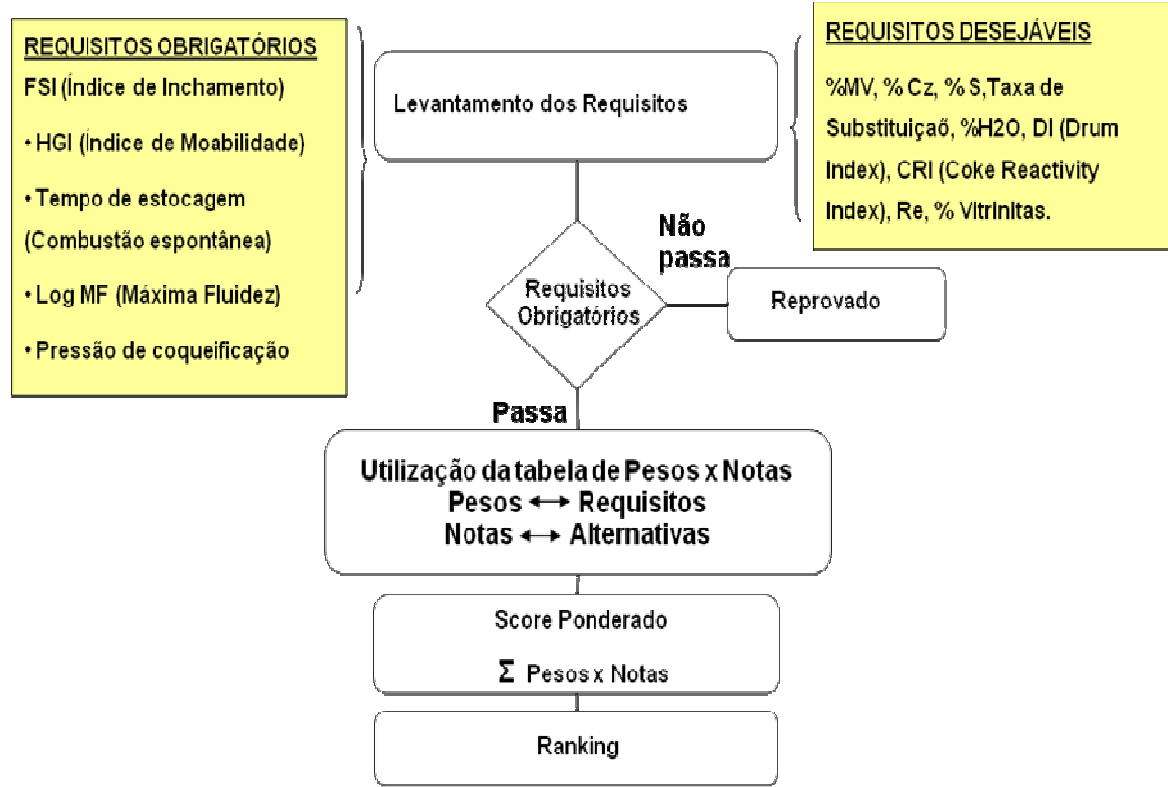


Figura 1 – Fluxograma do projeto lógico do modelo de avaliação de carvão.

O quadro sistemático de Análise de Decisão (AD) utilizado como base para a classificação dos requisitos obrigatórios e desejáveis é mostrado na Figura 2.

Propósito da decisão (Verbo de ação + objeto + agente modificador)										
Requisitos		Obrigatório / Desejável			Requisitos			Obrigatório / Desejável		
Gostaria de...Estou limitado a					Gostaria de...Estou limitado a					
Requisitos		Opções								
		A			B			C		
Obrigatórios		Informações	Passa n. passa	Informações	Passa n. passa	Informações	Passa n. passa			
Desejável	Peso(1 a 10)	Infor.	Nota	Escore	Infor.	Nota	Escore	Infor.	Nota	Escore
Opção		Opção			Opção			Opção		
Conseqüências adversas		P	G	Conseqüências adversas			P	G	Conseqüências adversas	

Figura 2 – Quadro sistemático de Análise de Decisão (AD).

Como exemplo do quadro sistemático de Análise de Decisão para os requisitos obrigatórios e desejáveis a Figura 3 mostra claramente a sua aplicação.

Quadro Sistemático de "Análise de Decisão" (AD)

Propósito da decisão(Verbo de ação + objeto + agente modificador)					
Requisitos Obrigatório / Gostaria de...Estou limitado a..Desejável		Requisitos Obrigatório / Gostaria de...Estou limitado a..Desejável			
Desejável		Peso (1 a 10)			
$DI > 85$ $CRI \leq 25$ $\%Cz \leq 11$ $\%P \leq 0,07$					
Obrigatórios		10		B	
Desejável		9		C	
		8		Informações	
				Passa n. passa	
				Informações	
				Passa n. passa	
Opção			Opção		
Conseqüências adversas		P	G	Conseqüências adversas	

Listar os requisitos desejáveis

Estipular pesos para cada requisito.
O requisito considerado mais importante recebe o peso 10, e os demais recebem peso em comparação à este.

Figura 5 – Quadro sistemático de "Análise de Decisão" com os itens desejáveis e os respectivos pesos atribuídos.

O quadro sistemático de Análise de Decisão com a pontuação e o "score" para cada item de qualidade do carvão é mostrado na Figura 6.

Quadro Sistemático de "Análise de Decisão" (AD)

Propósito da decisão(Verbo de ação + objeto + agente modificador)											
Requisitos Obrigatório / Gostaria de...Estou limitado a..Desejável		Requisitos Obrigatório / Gostaria de...Estou limitado a..Desejável		Requisitos Obrigatório / Gostaria de...Estou limitado a..Desejável		Requisitos Obrigatório / Gostaria de...Estou limitado a..Desejável		Requisitos Obrigatório / Gostaria de...Estou limitado a..Desejável		Requisitos Obrigatório / Gostaria de...Estou limitado a..Desejável	
Desejáveis		A		B		C					
Peso (1 a 10)		Infor. Nota		Infor. Nota		Infor. Nota		Infor. Nota		Infor. Nota	
DI>85		10 86 10,0 100		80 9,3 93		85 9,8 98					
CRI<=25		9 20 7,5 68		15 10,0 90		30 5,0 45					
%Cz<=11		8 13 6,9 55		15 6,0 48		9 10,0 80					
%P<=0,07		6 0,03 10,0 60		0,10 3,0 18		0,06 5,0 30				Passa n. passa	
TOTAL		291		249		253					
Justificar porque o carvão recebeu determinada nota.											
Pontuar (relativamente) a alternativa.											
A alternativa que mais se aproximar ao objetivo deve receber nota 10 neste requisito, e as outras alternativas são pontuadas em comparação à esta.											
Score = Peso do Requisito X Nota da alternativa											
Score Total da Empresa = Somatório do score de cada requisito.											

Figura 6 – Quadro sistemático de "Análise de Decisão" com os itens desejáveis e as suas respectivas notas e score.

2.3 Influência dos Parâmetros de Qualidade do Carvão na Qualidade do Coque e na Injeção em Alto Forno

O carvão mineral é uma substância complexa, os parâmetros de qualidade física, química e metalúrgica são de certa forma as principais variáveis a serem consideradas tanto no processo de produção de coque metalúrgico como na injeção nas ventaneiras de um alto forno.

A seleção de um carvão tanto para uso na coqueria quanto para injeção no alto forno é de extrema importância, e deve ser elaborada com critério, visto que o efeito negativo ao processo do alto forno pode resultar em prejuízos à empresa siderúrgica. Várias são as características de qualidade que o carvão mineral possui e que serão utilizadas na composição da mistura para a produção do coque, como também na injeção em alto forno, sendo essas:

- teor de matéria volátil; teor de cinzas e teor em carbono fixo;
- teor de carbono, hidrogênio, oxigênio;
- teor de enxofre e fósforo;
- propriedades físicas: Moabilidade (dureza) e Granulometria;
- propriedades químicas: SiO₂; Al₂O₃; Fe₂O₃; CaO; MgO; K₂O e Na₂O;
- propriedades petrográficas; e
- propriedades reológicas.

Existem vários estudos abordando a previsão da qualidade do coque metalúrgico em função das propriedades dos carvões via mistura,⁽²⁻⁵⁾ que mostram a influência dos parâmetros da qualidade do carvão na qualidade do coque produzido em forno piloto de coqueificação. São mostradas também as equações de correlação entre os resultados obtidos e os previstos para o D.I e CRI do coque produzido em forno piloto de coqueificação.

Podemos também encontrar na literatura vários trabalhos publicados sobre a influência dos parâmetros da qualidade do carvão injetado nas ventaneiras no processo de fabricação do ferro gusa em alto-forno.⁽⁶⁻⁸⁾ A avaliação e seleção do carvão injetado têm que ser feita com critério e cuidado, pois qualquer alteração da qualidade dessa matéria prima o efeito será direto na operação do alto forno.

2.4 Metodologia Aplicada no Desenvolvimento do Modelo

O modelo de classificação dos carvões foi desenvolvido utilizando o Excel como plataforma, de forma que a sua aplicação fosse simplificada e de fácil navegação. No desenvolvimento do modelo foram seguidas as seguintes etapas:

• ETAPA 1

A etapa 1 consistiu na montagem de um banco de dados, utilizando o histórico dos carvões utilizados nas baterias de fornos da CSN, como também o banco de dados e o histórico dos carvões injetados nos altos fornos. Os dados dos carvões foram incluídos no quadro sistemático de análise de decisão.

• ETAPA 2

A etapa 2 consistiu na montagem de uma tabela sistêmica para cada tipo de carvão:

- Carvão do tipo médio volátil de uso na produção de coque.

Objetivo AValiação Técnica			Carvão: MTMV								
Critérios obrigatórios (Aprov. / Reprov.)			Fornecedor: AUSTRÁLIA								
Apresentar FSI	≥	3	8.17	Avaliação Aprovado							
Apresentar HGI	≥	45	80.25	Aprovado							
FLUIDEZ (ddpm)	>	0	270.50	Aprovado							
Critérios desejáveis			Comentários								
	[%]	Peso		Média [%]	Pontos Nota Total						
log FLUIDEZ	≥	2,30	7	2,43	6,1 43						
PRESSÃO DE COQUEIFICAÇÃO (psi) ≤		3	10	0,27	10,0 100						
REFLECTÂNCIA	≥	1,00	7	1,14	7,6 53						
TEOR DE CINZAS (Cz)	≤	11	6	8,66	5,3 36						
TEOR DE FÓSFORO (P)	≤	0,07	5	0,056	6 30						
TEOR DE ENXOFRE (S)	≤	1	6	0,325	8,3 54						
HGI	≥	60,00	5	80,25	7,0 35						
FSI	≥	1,00	7	8,17	9,1 64						
TEOR DE FINOS (< 0,42mm)	≤	20,00	5	26,77	4,2 21						
DRUM INDEX (DI) - INDUSTRIAL		84,00	9	84,50	7,0 63						
REATIVIDADE (CRI) ≤		25,00	8	21,13	7,0 56						
MATÉRIA VOLÁTIL ≤			6	20,37	9,1 73						
TEOR DE VITRINITAS ENTRE V10 E V14			4	100	10,0 40						
Pontuação Máxima			Total								
Pontuação Total			667								
<input type="button" value="MENU INICIAL"/> <input type="button" value="CLASSIFICAÇÃO MTMV"/> <input type="button" value="AVALIAÇÃO DO CARVÃO"/>			Opção Consequências Adversas								
			<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>P</th> <th>G</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				P	G			
	P	G									

Figura 7 – Tabela contendo os dados do carvão coqueificável do tipo médio volátil.

- Carvão do tipo alto volátil de uso no PCI.

Objetivo AValiação Técnica			Carvão: ALTO VOLÁTIL											
Critérios obrigatórios (A / R)			Fornecedor: XXXXXX											
(OK/NOK)			Avaliação											
Apresentar FSI	≤	4.5	ok	Aprovado										
Apresentar HGI	≥	42	1.00	Aprovado										
Apresentar HGI	≥	42	56.88	Aprovado										
Critérios desejáveis			Comentários											
	[%]	Peso		Média [%]	Pontos Nota Total									
CARBONO FIXO (Cf)	≥	47	10	53,11	8,9 89									
TEOR DE ENXOFRE (S)	≤	0,450	10	0,44	4,1 41									
TEOR DE MATÉRIA VOLÁTIL (MV) ≤		42	7	41,25	7,2 50									
TEOR DE CINZAS (Cz)	≤	11	9	5,64	8,9 80									
TEOR DE FÓSFORO (P)	≤	0,050	6	0,010	9 54									
TAXA DE SUBSTITUIÇÃO (TS) ≥			10	0,79	8,4 84									
H ₂ O total	≤	12,00	8	9,81	7,1 57									
Certificação do carvão			5		10,0 50									
Pontuação Máxima			Total											
Pontuação Total			505											
<input type="button" value="MENU INICIAL"/> <input type="button" value="CLASSIFICAR"/> <input type="button" value="AVALIAÇÃO DO CARVÃO"/> <input type="button" value="SIMULAR ATMV"/>			Opção Consequências Adversas											
			<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>P</th> <th>G</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Combustão espontânea (após 3 meses entra em combustão)</td> <td>A</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>Devido ao seu elevado nível de MV sua injeção acima de 120Kgt gusa é necessário alterar os parâmetros operacionais do forno</td> <td>A</td> <td>A</td> </tr> </tbody> </table>				P	G	Combustão espontânea (após 3 meses entra em combustão)	A	A	Devido ao seu elevado nível de MV sua injeção acima de 120Kgt gusa é necessário alterar os parâmetros operacionais do forno	A	A
	P	G												
Combustão espontânea (após 3 meses entra em combustão)	A	A												
Devido ao seu elevado nível de MV sua injeção acima de 120Kgt gusa é necessário alterar os parâmetros operacionais do forno	A	A												

Figura 8 – Tabela contendo os dados do carvão alto volátil de uso no PCI.

- ETAPA 3

Essa etapa consistiu na montagem de uma rotina para a saída das informações em forma de tabela e em forma gráfica, conforme mostra a Tabela 1 e a Figura 9.

Tabela 1 – Mostra a saída dos dados com a pontuação dos carvões



GERÊNCIA GERAL DE PROCESSOS METALÚRGICOS - GGPS
 GERÊNCIA DE PROCESSOS DA METALURGIA - GMP

MENU INICIAL
 AVALIAÇÃO DO CARVÃO

CARVÕES DE PCI

PONTUAÇÃO	TIPO	CARVÃO	PAIS DE ORIGEM	UTILIZADO	SITUAÇÃO
#VALOR!	MTMV				
687	MTMV	C1	China		
683	MTMV	C2	Austrália		
673	MTMV	C3	Austrália		
667	MTMV	C4	Austrália		
665	MTMV	C5	USA		
664	MTMV	C6	Austrália		
658	MTMV	C7	Austrália		
658	MTMV	C8	Colombia		
658	MTMV	C9	USA		
657	MTMV	C10	Austrália		
654	MTMV	C11	Austrália		
647	MTMV	C12	Colombia		
645	MTMV	C13	Austrália		
632	MTMV	C14	USA		
628	MTMV	C15	Canada		
624	MTMV	C16	Canada		
620	MTMV	C17	Austrália		
620	MTMV	C18	USA		
619	MTMV	C19	USA		
606	MTMV	C20	USA		
600	MTMV	C21	Colombia		
590	MTMV	C22	USA		
587	MTMV	C23	Colombia		
581	MTMV	C24	Canada		
558	MTMV	C25	USA		
470	MTMV	C26	Austrália		



GERÊNCIA GERAL DE PROCESSOS METALÚRGICOS - GGPS
 GERÊNCIA GERAL DE PROCESSOS DA METALURGIA - GMP

MENU INICIAL
 TABELA
 AVALIAÇÃO INDIVIDUAL DOS CARVÕES

Ranking dos carvões para Coqueria MTMV

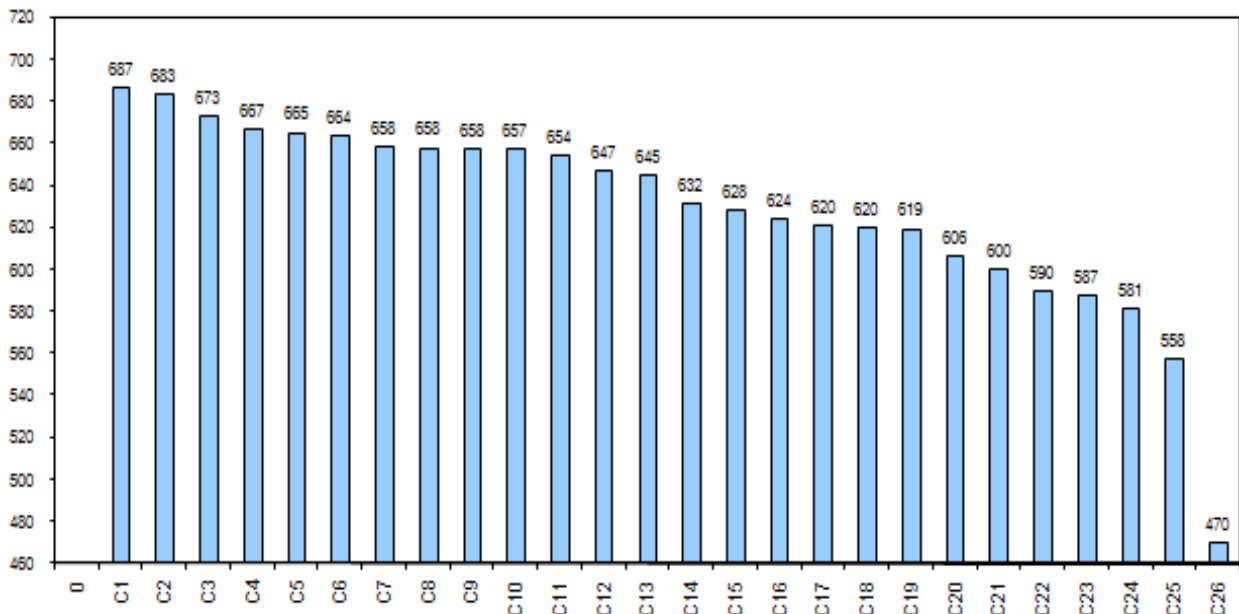


Figura 9 – Saída em forma gráfica do rank dos carvões avaliados.

• **ETAPA 4**

A etapa 4 consistiu no desenvolvimento de um simulador automático para avaliação de carvões considerados “novos” (carvão não utilizado em escala industrial);

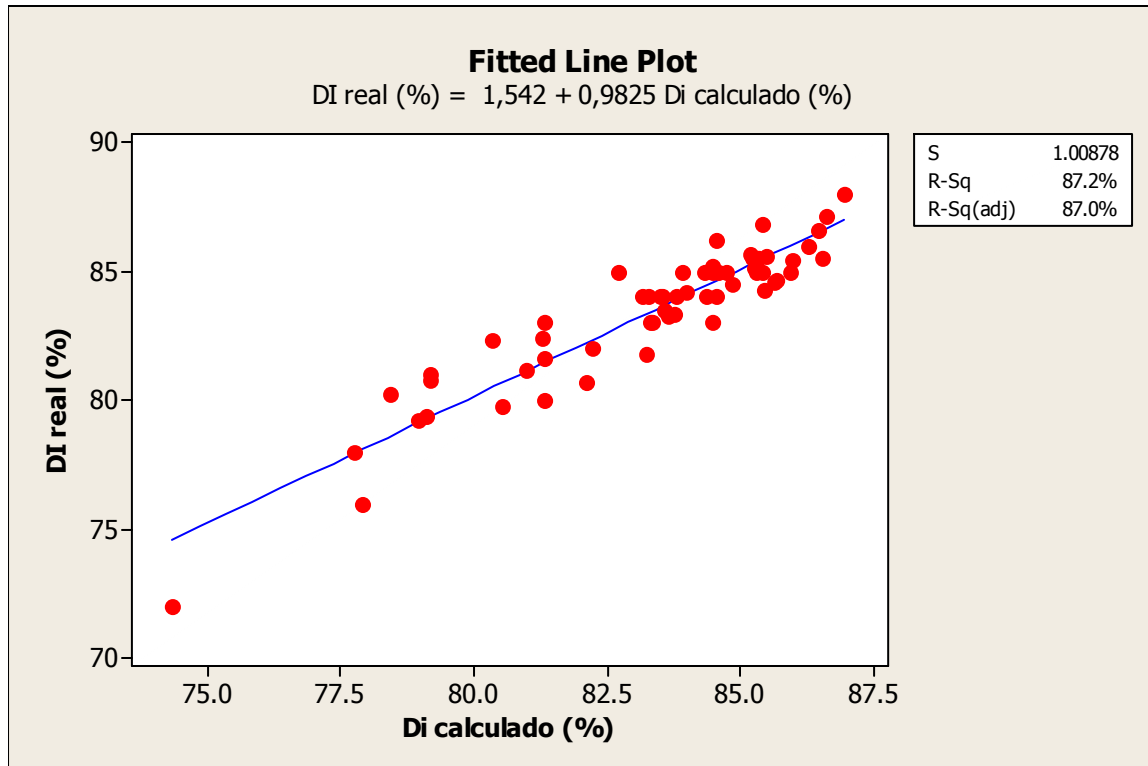


Figura 11 – Mostra a relação entre o DI calculado e o DI obtido.

As equações de previsão da reatividade do coque foram obtidas considerando os resultados dos fornos testes realizados com a participação de 100% de carvões individuais. A Tabela 3 mostra as equações obtidas.

Tabela 3 – Mostra as equações de previsão do CRI do coque produzido em forno piloto

Carvões	Equações	Coefficiente de correlação (R ²)
USA	$CRI = 15,197 - 2,459C_z + 34,429\%Fe_2O_3 + 4,601Re$	0,8442
AUS	$CRI = 17,985 - 1,919C_z + 10,182\%Fe_2O_3 - 15,405Re$	0,7823
CAN	$CRI = 68,155 - 1,919C_z + 22,345Re - 12,126\%Fe_2O_3 + 0,252\%Inertes$	0,8488
COL	$CRI = 3,009 + 0,173MV + 0,119C_z + 12,58\%Fe_2O_3 + 0,335\%Inertes$	0,8123

A relação entre os valores obtidos pelas equações e os valores reais obtidos no laboratório central da metalurgia da redução, esta mostrada na Figura 12.

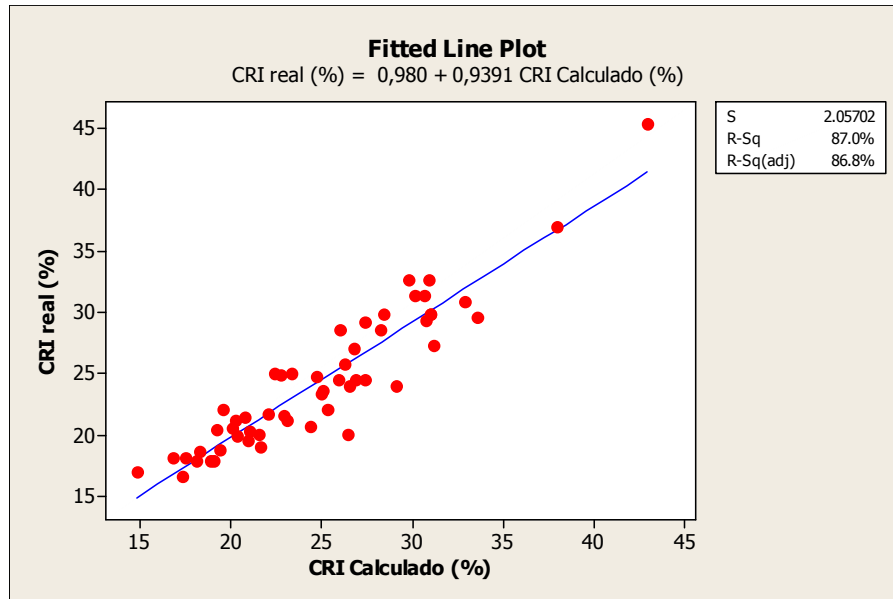


Figura 12 – Mostra a relação entre a reatividade do coque calculada e a obtida.

- ETAPA 6

Essa etapa consistiu na montagem do modelo, interligando todas as planilhas com os dados de entrada e saída, tanto para a classificação do histórico dos carvões como para a avaliação dos carvões considerados “novos”. A Figura 13 mostra a tela principal do modelo, contendo as opções.



Figura 13 – Mostra a tela principal do modelo de classificação de carvões de uso na coqueria.

A tela principal para a avaliação dos carvões de uso no PCI esta mostrado na Figura 14.

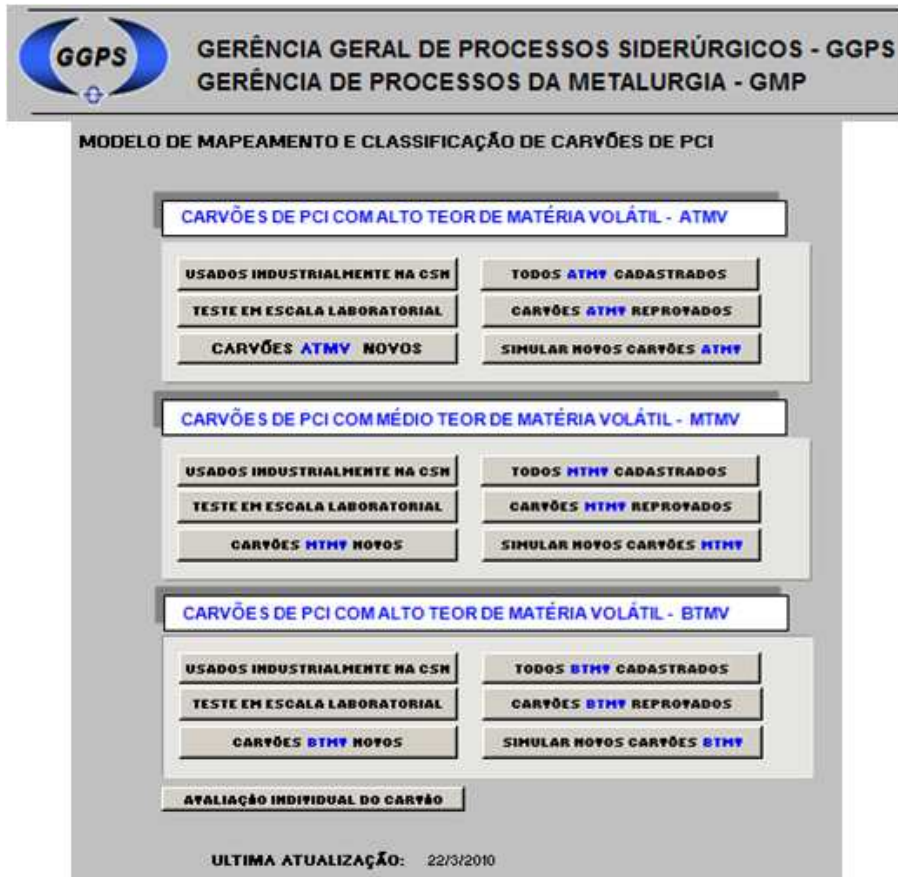


Figura 14 – Mostra a tela de opções para a avaliação do carvão de uso no PCI.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo de classificação dos carvões para aplicação na produção de coque e PCI da CSN-UPV facilitou o processo de avaliação e seleção dessa matéria prima. A sua simplicidade de aplicação permitira que profissionais não especializados em redutores da CSN tenham condições de realizar essa tarefa. A classificação dos carvões do tipo alto, médio e baixo volátil esta mostrada na Figura 15. Observamos que em todos os gráficos o ponto indicado por zero é a saída para o carvão em análise, após a obtenção da pontuação, o valor será indicado no gráfico e o carvão ficara na posição conforme a sua classificação.

Para a situação em que se tem um determinado carvão não utilizado nas misturas aplicadas na produção de coque, as equações desenvolvidas para a previsão do D.I. e Reatividade do coque ficaram compatíveis com os resultados obtidos no forno piloto de coqueificação, O elevado nível obtido nos índices de correlação das equações só foi possível com o agrupamento dos carvões por pais de origem.

Os resultados obtidos para a classificação dos carvões de aplicação no PCI estão mostrados na Figura 16, onde os carvões utilizados na planta do PCI que proporcionaram os melhores resultados no processo do alto forno foram os que obtiveram as maiores pontuações.

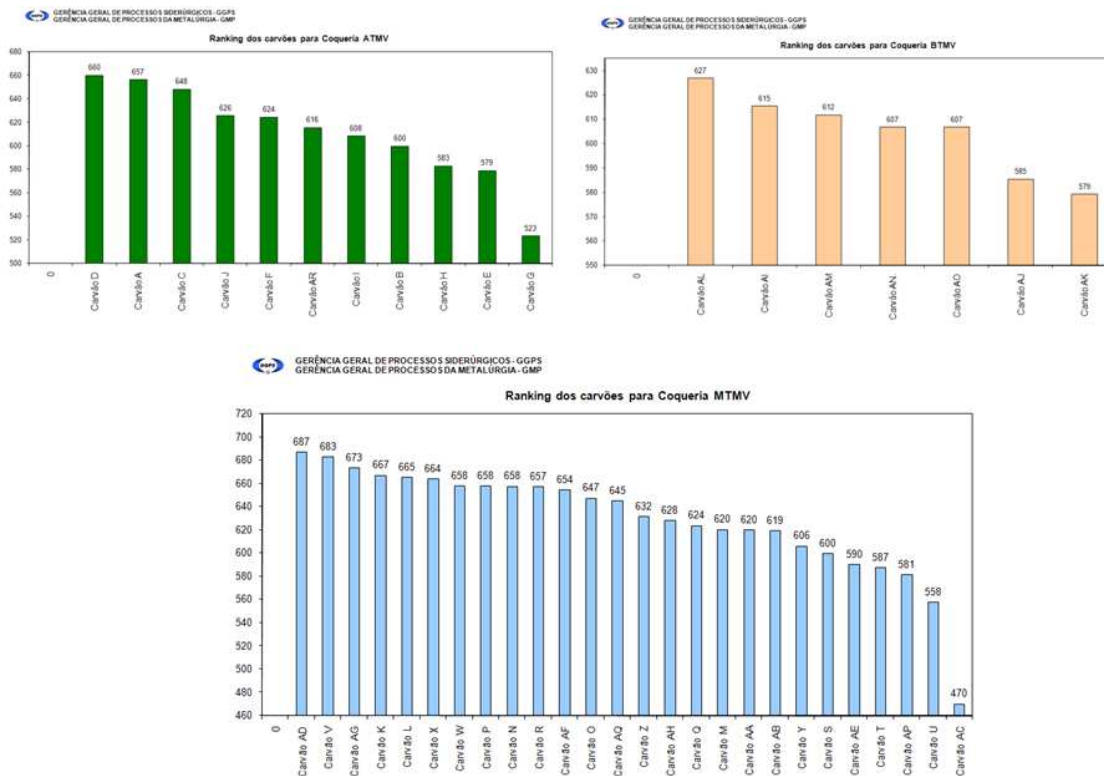


Figura 15 – Mostra a classificação dos carvões alto, médio e baixo volátil de uso na coqueria.

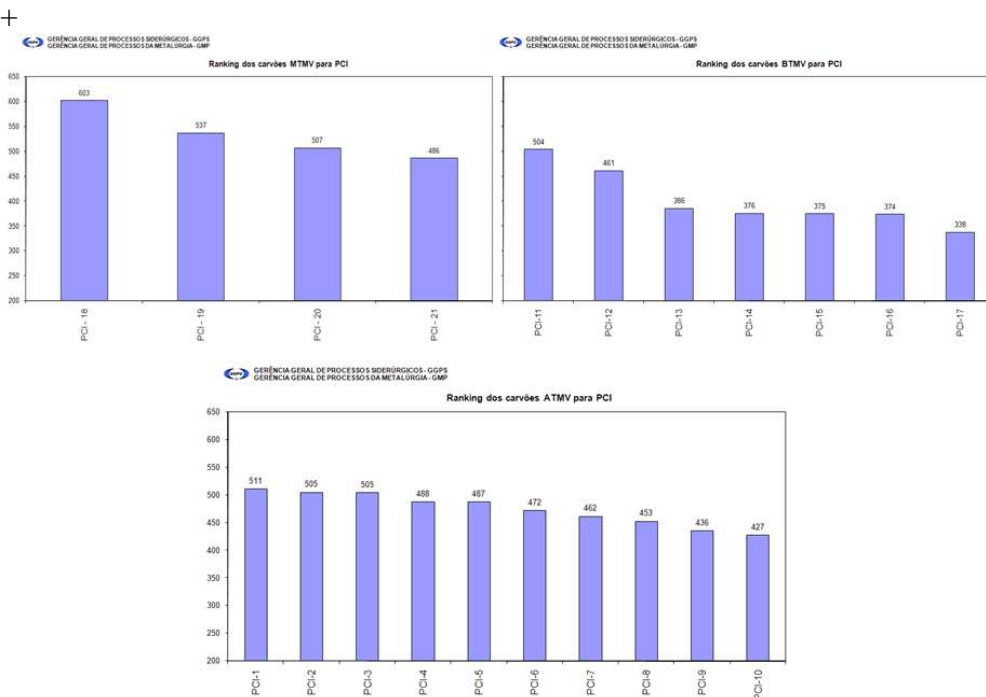


Figura 16 – Mostra o resultado da classificação dos carvões ATMV, MTMV e BTMV de uso no PCI.

4 CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido com base no quadro de “Análise de Decisão” para o processo de classificação dos carvões utilizados na produção do coque nas baterias de fornos e na planta do PCI atendeu aos requisitos necessários na avaliação dos

carvões adquiridos pela CSN. Para os carvões que não foram utilizados na CSN, o modelo avalia e o classifica dentro do quadro geral dos carvões cadastrados. As equações de previsão da Resistência Mecânica a Frio e da Reatividade do coque foram obtidas tendo como critério o país de origem dos carvões. Os índices de correlação das equações estão em níveis aceitáveis para a aplicação das mesmas. Essa modelagem permitiu projetar de forma sistêmica o conhecimento que ficava restrito ao domínio dos especialistas em redutores. Para a sua aplicação, é necessário apenas que se tenha o domínio em Excel, o domínio dos princípios da Análise de Decisão e as pontuações dos parâmetros de qualidade dos carvões utilizados no banco de dados.

REFERÊNCIAS

- 1 KEPNER C.H., TREGOE B.B. O novo administrador Racional. Editora Makron Books.
- 2 COELHO, R.J. e colaboradores. Modelos de previsão da qualidade metalúrgica do coque a partir da qualidade dos carvões individuais e do coque obtido no forno piloto de coqueificação. Rev. Esc. Minas vol.57 n.1 Ouro Preto- Jan/Mar. 2004.
- 3 M.A. DIEZ., R. ALVARES., C. BARRIOCANAL. Coal for metallurgical coke production: Predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. International Journal of coal geology. Vol. 50, pg. 389-412. May- 2002.
- 4 H. S. VALIA. Prediction of coke strenght after reaction with CO2 from coal analyses at Inland Steel Company. Transactions of the ISS Iron and Steelmaker. Vol. 11,1990.
- 5 ODILON JOSE SILVA. Caracterização tecnológica de carvões para coqueria. Dissertação de mestrado – UFOP – CETEC – UEMG. Ouro Preto – Setembro-2008.
- 6 AGENOR MEDRADO SILVA. Estudo da combustão dos carvões e misturas comcoque verde de petróleo injetada em altos fornos. Dissertação de mestrado –UNESP – FEG. Guaratinguetá – Abril de 2006.
- 7 PAULO SANTOS ASSIS. Injeção de materiais pulverizados em altos-fornos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – Belo Horizonte – 2004.
- 8 TATSUROU ARIYAMA. Combustion behavior o PC particle group. Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation. Chapter 3, pg. 37 – 62. Edited by Kuniyoshi Ishii for JPS and ISIJ – Hokkaido University, Japan-2000.