

DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÃO DE PREVISÃO DA TAXA DE SUBSTITUIÇÃO COQUE/CARVÃO PARA A INJEÇÃO NO ALTO FORNO¹

Sílvio Pereira Diniz Maranhá²

Resumo

A partir de setembro de 2002, a usina da Usiminas em Cubatão começou a operar o sistema de blendagem de carvões para o PCI (*Pulverized Coal Injection*). Até então somente carvões individuais de alta volatilidade, com alta combustibilidade, mas, de baixa taxa de substituição coque/carvão, eram utilizados. Este sistema de blendagem, instalado na área de redução, permite *blendar* até quatro carvões simultaneamente. O investimento no sistema de blendagem se justificou pela expectativa de elevação da Taxa de Substituição Coque/Carvão, através do efeito sinérgico da composição de blends de carvões de alta volatilidade, e, portanto, de alta combustibilidade, com carvões de baixa volatilidade e elevado poder calorífico. No entanto, era necessário um modelo para prever a taxa de substituição coque/carvão das misturas a serem planejadas e operacionalizadas. Foi adotada a época, uma equação publicada na literatura técnica especializada, desenvolvida por uma usina siderúrgica europeia. Após três anos de operação utilizando blends de carvões Alto Voláteis (AV), Baixo Voláteis (BV) e Médio Voláteis (MV), além de Coque Verde de Petróleo e eventualmente carvões AVs a 100%, foi montado um banco de dados com cerca de 60 misturas, a partir do qual, foi possível o desenvolvimento de uma equação, a partir de dados reais, obtidos na escala industrial da operação do Alto-Forno 2 da usina de Cubatão. Este trabalho visa mostrar os resultados obtidos nestes últimos anos e principalmente o desenvolvimento da Equação de previsão da Taxa de Substituição Coque/Carvão da Usiminas Cubatão.

Palavras-chave: Taxa de substituição; Injeção de carvão; Equação de previsão.

DEVELOPMENT OF EQUATION FOR PREDICTING THE REPLACEMENT RATE COKE/COAL FOR PCI

Abstract

From September 2002, USIMINAS Cubatão began to operate the coal blend system for PCI Plant. Until then only individual high volatile coals with high combustibility but low replacement rate coke / coal, were used. The system installed at USIMINAS Cubatão Ironmaking plant can blend allows up to four coals. Investment in blending system was justified by the expectation of raising the replacement ratio Coke/Coal, through the synergistic effect of the blends composition of coals with high volatile and therefore high combustibility coals, with Low Volatile raw materials and high calorific value. But it was necessary a model to predict the replacement rate coke / coal blends for the planned and operated. In the first time was used, an equation published in specialized technical literature, developed by a European steel mill. After three years of operation using blends of High Volatiles, Low Volatiles, and Medium Volatiles coals, and Green Petroleum Coke and possibly coal High Voles to 100%, was mounted a database of about 60 blends. From which it was possible to development of an equation with real data obtained from industrial scale the operation of the Blast Furnace nº 2 at USIMINAS Cubatão steel work. This work aims to show the results in recent years and especially the development of the equation for predicting the Replacement ratio Coke / Coal of USIMINAS Cubatão ironmaking plant.

Key words: Replacement ratio; PCI; Equation predicting.

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 *Analista Industrial da Gerência de Engenharia de Processos Metalúrgicos da Usiminas.*

1 INTRODUÇÃO

O projeto original da planta de PCI da Usiminas Cubatão não contemplou a possibilidade de blendagem de carvões para injeção nos altos fornos.

A bibliografia disponível a respeito da combustão de carvões e as experiências bem sucedidas em outras usinas sobre a blendagem de carvões indicavam vantagens técnicas e econômicas da utilização do processo de blendagem de carvões. Experiências foram bem sucedidas em diversas siderúrgicas com sistemas de injeção de finos de carvão, que implantaram sistemas de blendagem, geralmente para apenas dois carvões, por dosagem em silos com dispositivos de pesagem ou durante a estocagem em pilhas utilizando métodos de blendagem (*windrow*, *chevron* etc) em camadas estratificadas dos carvões componentes nos pátios de recebimento.

Após estudos de *Lay outs* possíveis e de viabilidade econômica a usina decidiu investir cerca US\$ 300 mil na implantação de um sistema blendagem de carvões. Foram implantadas três correias transportadoras totalizando cerca de 90 m lineares de estruturas das quais cerca de 40 m foram reaproveitadas de estruturas de correias transportadoras que estavam desativadas. Foram utilizados no projeto do sistema quatro silos dosadores, anteriormente incorporados ao conjunto de 28 silos do sistema de blendagem de carvões para coqueria, que estavam subutilizados, o que reduziu significativamente o investimento. O investimento foi feito principalmente em equipamentos de pesagem, automação e controle operacional, além da implantação dos 50 m de estruturas de correias transportadoras.

O sistema de blendagem de carvões para PCI entrou em operação a partir de setembro de 2002 com capacidade para blendar até quatro carvões diferentes.

Adotou-se para previsão da taxa de substituição coque/carvão dos blends de carvão uma fórmula disponível na literatura, desenvolvida por uma grande siderúrgica da Europa. No entanto, era necessário o desenvolvimento de uma equação própria, devido à tendência de superestimação dos resultados apresentados pela fórmula adotada, que provocavam desvios nos balanços planejados de combustíveis a serem utilizados, e também, pelo fato da fórmula ser função das análises elementares dos carvões, que não eram realizados nos laboratórios da usina. Utilizava-se para previsão, dados de análise elementar informados pelos fornecedores, ou no caso de indisponibilidade dos dados reais do lote, eram utilizados dados típicos do carvão.

A partir da tabulação dos resultados reais de 60 blends consumidos a partir de 2002 até 2005, foi possível o desenvolvimento de uma Equação de Previsão da Taxa de Substituição Coque/Carvão (a partir de agora identificado como RR, sigla para *Replacement Ratio*).

2 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

2.1 Injeção de Carvão Pulverizado e Taxa de Substituição (RR)

O carvão pulverizado é injetado diretamente dentro da zona de combustão do Alto-Forno, através das ventaneiras, juntamente com o ar quente enriquecido com oxigênio. O carvão injetado absorve calor, desvolatiliza-se e inicia a combustão logo

que deixa a lança de injeção. Parte do coque que seria queimado é então substituído pela queima do pó. A Figura 1 mostra como ocorre a injeção do carvão em uma ventaneira.

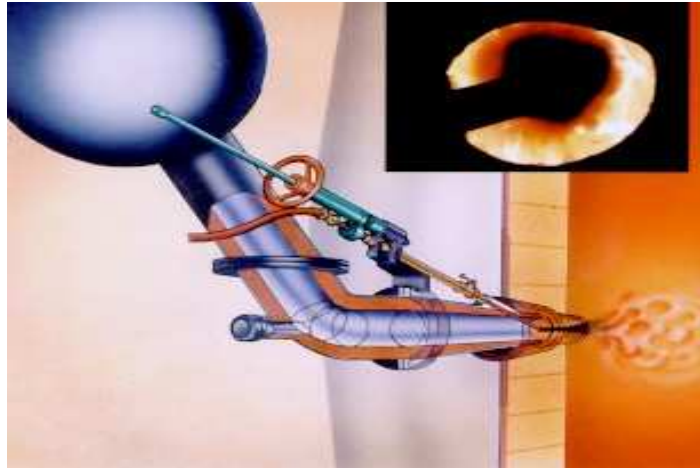


Figura 1 - Desenho esquemático e no destaque foto da lança de injeção de carvão pulverizado em uma ventaneira vista do visor (Mourão, Marcelo Breda. Introdução à Siderurgia).

O RR é a relação entre a quantidade de coque metalúrgico que é substituída para uma quantidade de carvão pulverizado injetado pelas ventaneiras mensurado em escala industrial, descontando-se a influência da variação, em relação a um padrão de operação *all coke*, das demais variáveis que influenciam no consumo de coque pelo AF, que são:

- umidade do ar soprado;
- reatividade do coque;
- percentual de hematita na carga metálica;
- teor de FeO do sinter;
- teor de cinza do coque;
- teor de silício do gusa;
- volume de escória; e
- temperatura do ar soprado.

Portanto, o RR mede a eficiência energética do carvão pulverizado de forma isolada. E quanto maior é este fator, melhor para os custos operacionais, pois para uma mesma quantidade de carvão injetado se substitui mais coque metalúrgico, cujo custo atualmente é cerca de 100% maior que o do carvão para injeção.

2.2 Evolução da Taxa de Substituição

A Figura 2 mostra como foi a evolução do RR a partir de junho de 2002 até outubro de 2005. Neste período foram operacionalizadas 60 misturas com diversos tipos de carvão em vários níveis de participação e em diferentes taxas de injeção, que também é uma variável operacional importante no resultado do RR alcançado conforme a literatura.

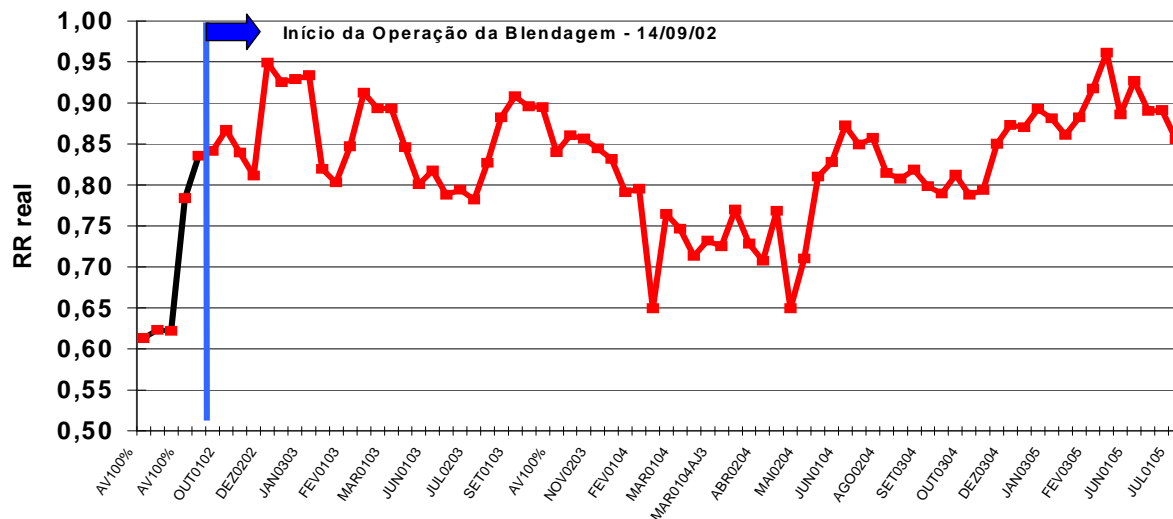


Figura 2 – Evolução do RR real do AF2 nos últimos três anos.

Observa-se que, logo após a entrada em operação da blendagem, ocorreu uma elevação substancial no RR real de um fator médio em torno de 0,70 para cerca de 0,85 até o final de 2003. A partir do início de 2004, percebe-se uma redução no patamar para cerca de 0,73, até meados de 2004, período no qual houve ocorrências de consumos de carvão AV a 100% devido problemas de abastecimento. A partir de junho de 2004 ocorreu nova elevação do RR primeiramente para o patamar de 0,83 e a partir de janeiro de 2005 para um nível médio de 0,90.

A necessidade de reduzir os custos de produção de gusa, através da redução no consumo de coque metalúrgico importado, cujo preço elevou-se para patamares acima de US\$ 250,00/t entre final de 2003 e o final de 2004, quando atingiu seu ápice no 1º semestre de 2004, (cerca de US\$ 450,00/t na base C&F), levou a necessidade de maximização no nível da taxa de injeção de finos para a substituição do coque adquirido. A Figura 3 mostra como evoluiu a taxa de injeção no período, mostrando o efeito da redução do RR, de acordo com a expectativa.

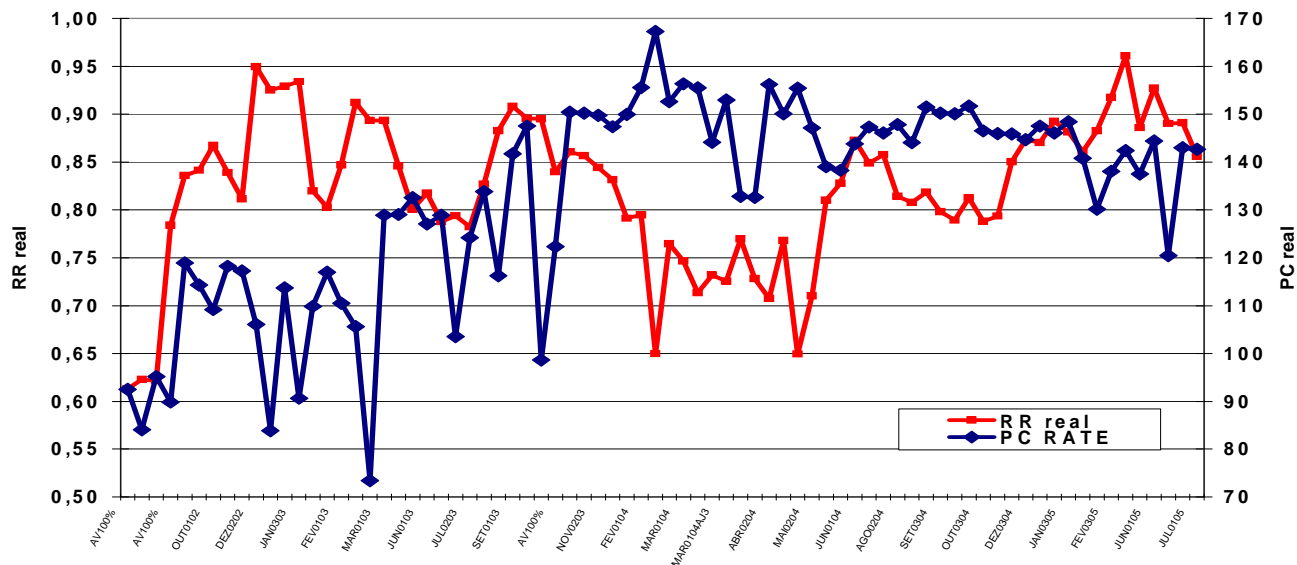


Figura 3 – Evolução do RR real versus a Taxa de Injeção (em Kg/t gusa).

Para compensar a redução verificada no RR, foi planejada alteração no blend de carvões, visando elevar a participação de carvões com poder calorífico mais elevado, o que apesar da elevação de custos implícita na aquisição deste tipo de carvões, em função de mais altas taxas de frete, a alteração se apresentava economicamente vantajosa, devido ao elevado custo do coque importado. A Figura 4 mostra como evoluiu o RR em comparação a mudança no blend com a elevação na participação de carvões com menor teor de voláteis.

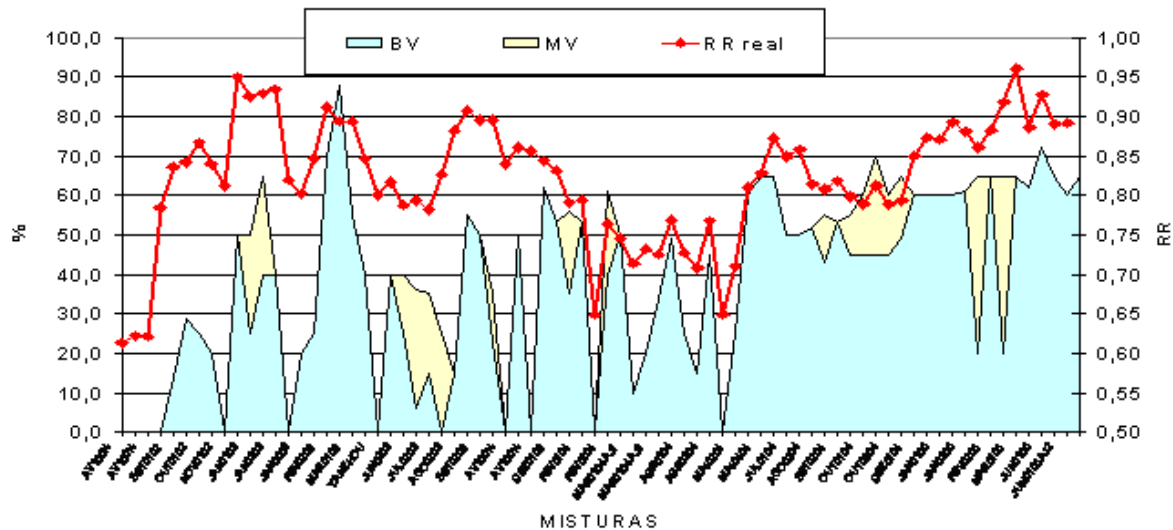


Figura 4 – Evolução do RR versus composição do blend.

O gráfico da Figura 4 mostra de forma bastante evidente que ocorreu elevação, e certa estabilização em patamar mais alto, do RR com elevação e estabilização da participação acima de 50% de carvões de menor teor de voláteis.

Fazendo as médias semestrais das taxas de injeção, do consumo de carvões com baixa volatilidade e do RR, conforme mostra a Figura 5, tem-se uma visão da relação entre as três variáveis.

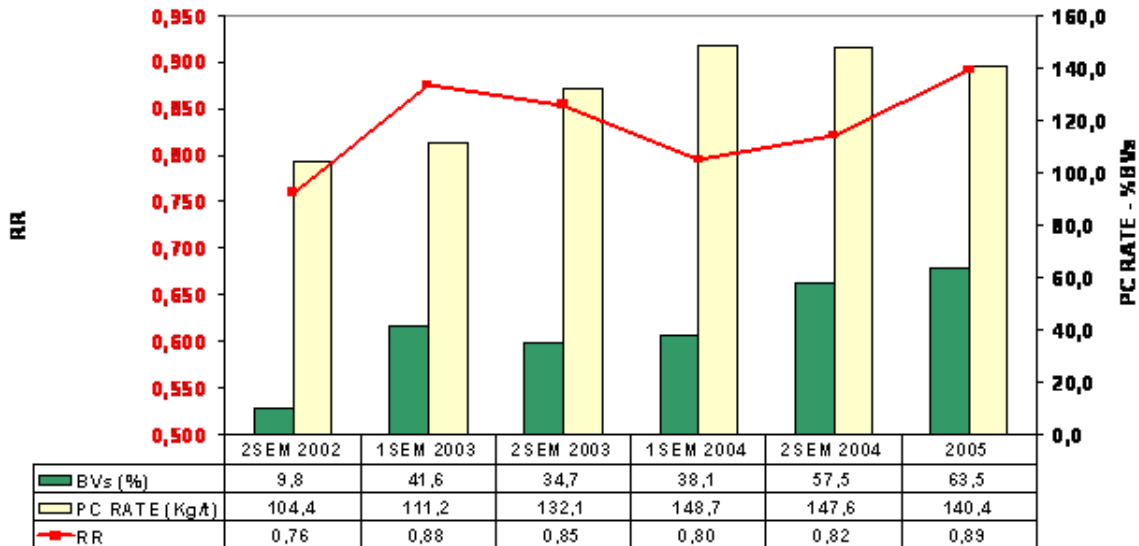


Figura 5 - Relação entre o % de BVs versus PC rate versus RR.

2.3 Desenvolvimento da Equação de Previsão do RR

O banco de dados de Blends para PCI da USIMINAS Cubatão possuem as seguintes características:

- são 60 blends consumidos no período de Set/02 a Out/05 que geraram dados industriais suficientes para o desenvolvimento de uma equação de previsão do RR;
- nesse período foram consumidos quatro tipos diferentes de AVs, 2 BVs, 4 MVs, 1 antracito e dois Coques Verdes de Petróleo (nacional e americano) em diversos níveis de consumo de cada componente; e
- estão incluídos entre os Blends, consumos de carvões AVs em níveis entre 0% a 100%.

A Tabela 1 a seguir apresenta a matriz de correlação obtida a partir do banco de dados, mostrando a relação entre o RR e mais 13 variáveis principais

Tabela 1 – Matriz de correlação entre o RR e as 13 variáveis escolhidas

MATRIZ	RR real	Poder Calorífico	HGI	MV	ALCALIS	CINZA	ENXOFRE	O	C	H	P	T/H	PC RATE	<200#
RR real	1,00													
Poder Calorífico	0,71	1,00												
HGI	0,46	0,57	1,00											
MV	-0,60	-0,76	-0,75	1,00										
ALCALIS	0,02	0,37	0,41	-0,45	1,00									
CINZA	-0,55	-0,38	-0,09	0,07	0,09	1,00								
ENXOFRE	-0,37	-0,52	0,16	0,24	0,01	0,34	1,00							
O	-0,42	-0,76	-0,57	0,81	-0,36	-0,22	0,41	1,00						
C	0,75	0,95	0,75	-0,86	0,38	-0,37	-0,39	-0,77	1,00					
H	-0,10	0,04	-0,68	0,43	-0,15	-0,26	-0,47	0,25	-0,26	1,00				
P	0,22	0,54	0,52	-0,70	0,43	0,49	-0,12	-0,88	0,57	-0,37	1,00			
T/H	-0,38	-0,06	-0,15	0,04	0,25	0,35	0,16	-0,07	-0,16	0,15	0,17	1,00		
PC RATE	-0,50	-0,11	-0,07	0,03	0,39	0,50	0,22	-0,12	-0,20	0,11	0,27	0,76	1,00	
<200#	0,45	0,08	0,05	-0,07	-0,36	-0,48	-0,15	0,12	0,16	-0,08	-0,18	-0,52	-0,70	1,00

O mosaico a seguir mostrado na Figura 6 que apresenta os gráficos de dispersão entre o RR e as variáveis escolhidas do banco de dados.

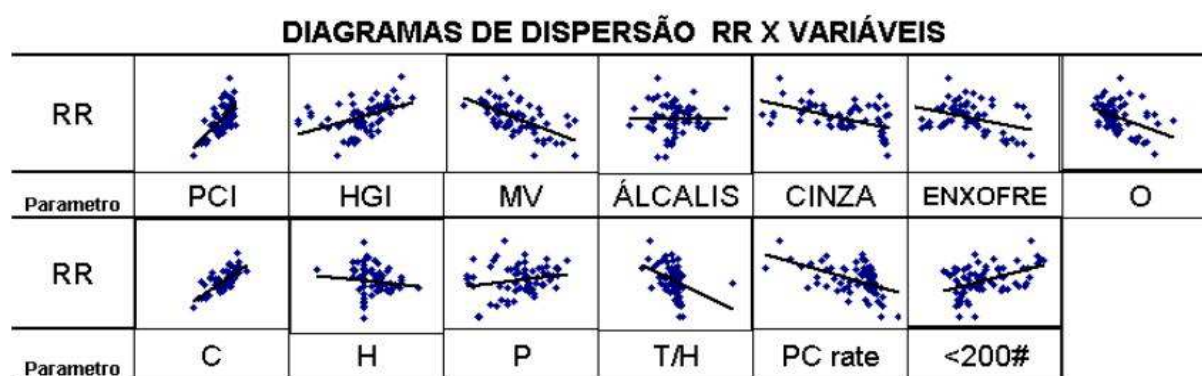


Figura 6 – Mosaico dos diagramas de dispersão entre o RR e as 13 variáveis.

Para elaboração do estudo estatístico de correlação multivariável em relação ao RR, era necessária a depuração das variáveis a serem testadas.

A partir da verificação da matriz foram feitos três níveis de classificação para se determinar as variáveis que seriam testadas na Análise de Regressão Linear Múltipla. Foi feita uma primeira classificação de variáveis que considerou apenas as variáveis com coeficientes de correlação r acima de $|0,40|$. A segunda classificação foi selecionando as variáveis controladas e/ou resultantes de análise primária feita na usina de Cubatão. E finalmente a terceira e última classificação das variáveis foi eliminando as variáveis que tinham multicolinearidade com as demais escolhidas na 2ª classificação que ocorreu entre o HGI (Hardgrove Grindability Index) e o teor de Matéria Volátil do blend. Eliminou-se a variável HGI devido ao seu menor coeficiente de correlação. A Tabela 2 mostra as variáveis selecionadas em cada etapa de classificação.

Tabela 2 – Classificação das variáveis para o estudo de correlação

	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	CRITÉRIO
1ª CLASSIFICAÇÃO	RR	PCI	HGI	MV	CINZA	O	C	PCRATE	<200#	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO $r \geq 0,40$
	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	CRITÉRIO
2ª CLASSIFICAÇÃO	RR	HGI	MV	CINZA	PCRATE	<200#				VARIÁVEIS CONTROLADAS RESULTANTES DE ANÁLISE PRIMÁRIA
	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	CRITÉRIO
3ª CLASSIFICAÇÃO	RR	MV	CINZA	PCRATE	<200#					VARIÁVEIS SEM MULTICOLINEARIDADE

Foi então realizada a Análise de Regressão Múltipla entre as variáveis RR como variável dependente e as seguintes variáveis independentes: Matéria Volátil do blend, Cinza do blend, Taxa de Injeção média e granulometria na Fração menor que 200 mesh do carvão após pulverização, considerando as 60 observações quando foi encontrado o seguinte resultado, mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados da estatística de regressão linear múltipla para o RR

Estatística de regressão	
R múltipl	0,89
R-Quadrado	0,78
R-quadrado	0,77
Erro padr	0,03
Observaçã	60,00

ANOVA					
	gl	SD	MQ	F	r de significação
Regressã	4,00	0,23	0,06	50,03	0,00
Resíduo	55,00	0,06	0,00		
Total	59,00	0,29			

	Coefficientes	Erro padrã	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseqã	1,4230	0,0996	14,29	0,00	1,22	1,62	1,22	1,62
MV	a	0,0011	-9,71	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
CINZA	b	0,0033	-4,95	0,00	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01
PC RATE	c	0,0004	-3,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<200#	d	0,0008	0,19	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00

O teste t de Student para avaliar os coeficientes das variáveis independentes mostrou que a variável de granulometria Fração menor que 200 mesh (< 200#), pode ser excluída devido a sua pouca importância na estimação do RR.

Realizada novamente a Análise de Regressão Múltipla eliminando a variável <200 mesh, encontramos o resultado conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Dados da estatística de regressão linear múltipla para o RR

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,8856
R-Quadrado	0,7843
R-quadrado ajustad	0,7727
Erro padrão	0,0336
Observações	60

ANOVA					
	gl	SD	MQ	F	r ² de significação
Regressão	3,00	0,23	0,08	67,86	0,00
Resíduo	56,00	0,06	0,00		
Total	59,00	0,29			

	Coefficientes	Erro padrãc	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	1,4395	0,0466	30,90	0,00	1,35	1,53	1,35	1,53
MV	a	0,0011	-9,85	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
CINZA	b	0,0032	-5,14	0,00	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01
PC RATE	c	0,0003	-4,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Dos resultados estatísticos obtidos na nova análise podemos verificar as seguintes interpretações:

- o coeficiente de Determinação Múltipla ajustado (r^2) é significativo para o nível industrial;
- O teste F para verificar a significância da regressão é adequado para o número de graus de liberdade; e
- os coeficientes das variáveis independentes da regressão são significativos para a estimação.

Foram realizados testes de consistência estatística para validar a equação obtida.

As seguintes verificações foram realizadas para validar o modelo a ser usado em estimações futuras:

- a Tabela 5 mostra os principais resultados obtidos para o modelo;

Tabela 5 – Resultados da regressão e da análise de resíduos

Resultados da Regressão Linear Múltipla	
R múltiplo	0,8856
R-Quadrado	0,7843
R-quadrado ajustado	0,7727
Erro padrão estimado	0,0336
Observações	60
F	67,8606
df	3,5800
P	0,0000
Beta MV	-0,6169
Beta CINZA	-0,3855
Beta PC RATE	-0,3493
Análise de Resíduos	
Média	0,000
Desvio Padrão	0,033
Teste de Autocorrelação	
d Durbin Watson Estimado	1,342
d Durbin Watson tabelado (60; 0,05)	0,984

- avaliação de correlação dos resíduos com as variáveis regressoras e estimação do RR, mostra que não existe multicorrelação conforme Figura 7;

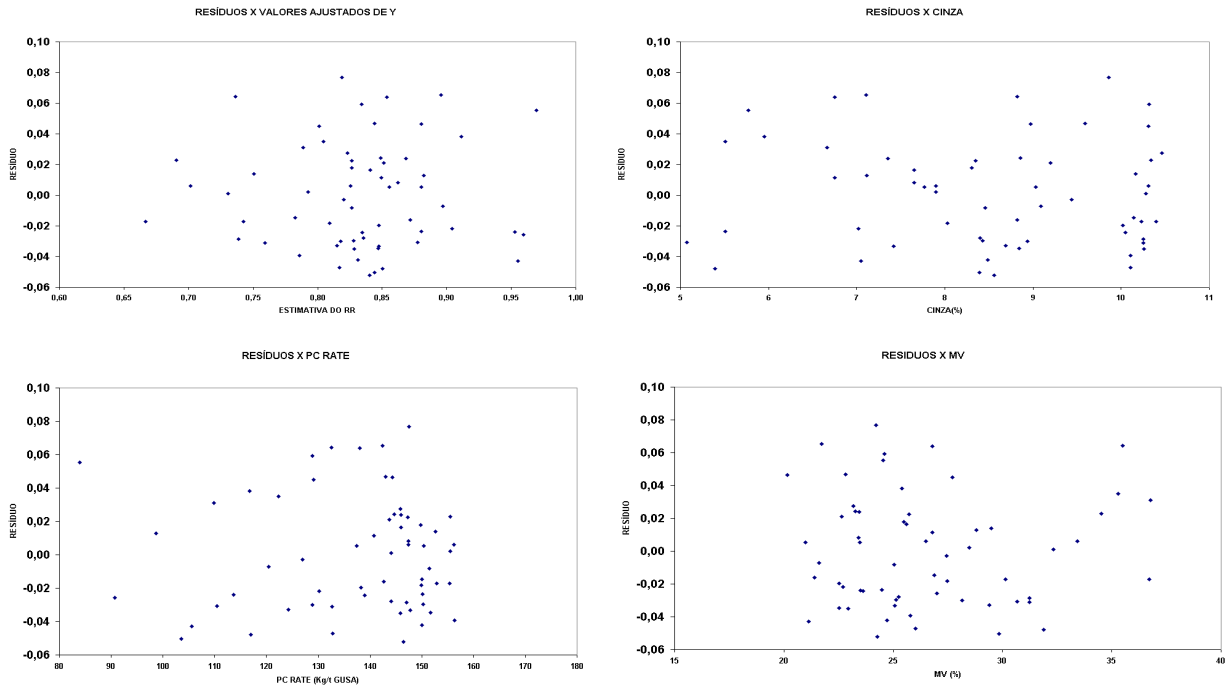


Figura 7 – Diagramas de dispersão dos resíduos da equação com as variáveis independentes.

- verificação de Autocorrelação e Distribuição dos resíduos, mostrando que, não existem sazonalidade e distribuição viciosa dos dados utilizados conforme a Figura 8;

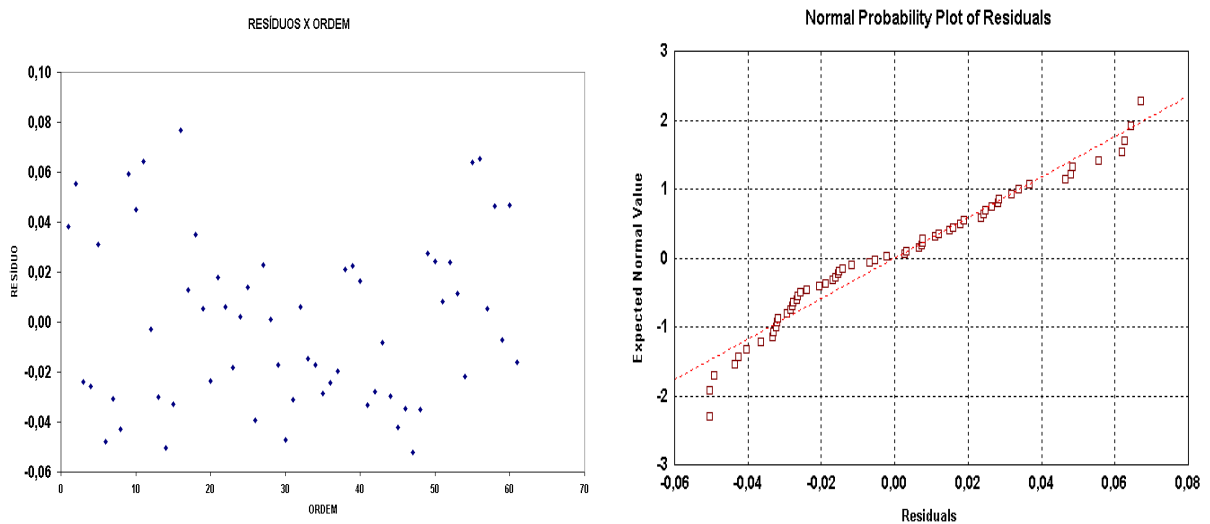


Figura 8 – Gráfico dos resíduos com o tempo (ordem) e a distribuição normal dos resíduos.

A fórmula desenvolvida na Usiminas Cubatão tem a seguinte configuração:

$$RR = (143,85 + a \times MV + b \times Cz + c \times PCR) / 100$$

Onde:

RR – Taxa de Substituição coque/carvão

a,b,c – coeficientes das variáveis independentes

MV – teor de Material Volátil (bs) ponderado do blend de carvões

Cz – teor de cinza (bs) ponderado do blend de carvões

PCR – taxa de injeção de carvão pulverizado (Kg / ton de gusa)

A Figura 9 a seguir mostra o diagrama de dispersão entre o RR calculado pela nova fórmula e os resultados reais de RR obtidos.

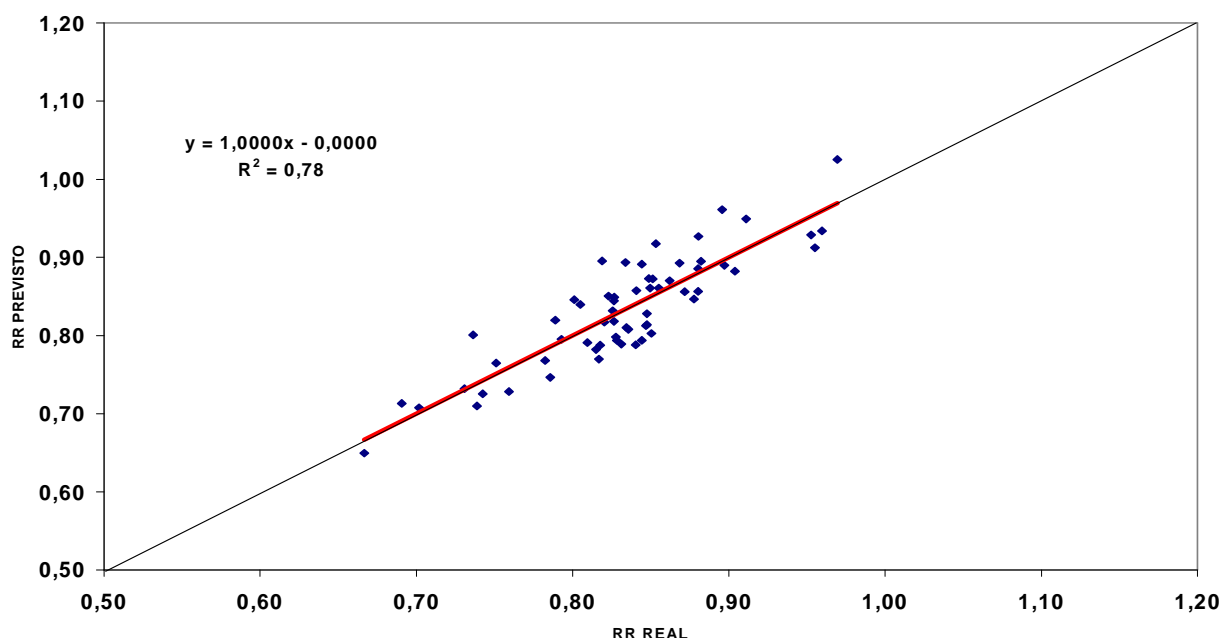


Figura 9 – Diagrama de dispersão RR real versus RR previsto pela nova fórmula

O gráfico da Figura 9 mostra que a previsibilidade da fórmula não apresenta tendenciosidade, o que é demonstrado pelo excelente ajuste da curva de tendência com a reta de idealidade.

3 CONCLUSÕES

Houve evolução no RR desde 2002 atingindo o máximo patamar em 2005.

Foram necessários ajustes no mix de carvões em função da significativa elevação da taxa de injeção a partir do segundo semestre de 2003.

Foi desenvolvida equação própria para Usina de Cubatão da Usiminas de estimação do RR a partir de resultados industriais obtidos de diversas misturas injetadas no Alto-Forno nº 2, que atende a todas as consistências estatísticas necessárias para utilizá-la em estimações futuras.

BIBLIOGRAFIA

- ¹ Bennett, P.A. (2000), "Advantages of low volatile coals for PCI", CoalTech, pp, 24
- ² Masaaki Naito (2006), "Development of Ironmaking Technology", Shin Nittitsu Siho, n° 384, pp 2-13
- ³ Werkema, Maria Cristina Catarino & Aguiar, Silvio "Análise de regressão: como entender o relacionamento entre variáveis de um processo", Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.
- ⁴ Lapponi, Juan Carlos, "Estatística usando Excel 5 e 7, São Paulo: Lapponi treinamento e editora, 1997