

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

“Estudo para o uso de matérias-primas  
nacionais em misturas de carvões para obtenção  
de coque com características requeridas em  
altos-fornos de alta produtividade”

Autor: Olney Amorim Viana Filho  
Orientador: Prof. Varadarajan Seshadri

Novembro - 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Olney Amorim Viana Filho

**ESTUDO PARA O USO DE MATÉRIAS-PRIMAS NACIONAIS  
EM MISTURAS DE CARVÕES PARA OBTENÇÃO DE  
COQUE COM CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS EM  
ALTOS-FORNOS DE ALTA PRODUTIVIDADE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica  
e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Extrativa  
Orientador: Prof. Varadarajan Seshadri

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2007

*“Agradeço à Deus pela sua “Infinita Sabedoria”, à minha esposa Ana Paula, ao meu filho Matheus e aos meus Pais Irlene e Olney por serem meus Alicerces na minha vida”.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais mais especificamente ao Departamento de Metalurgia e Materiais e ao Grupo Gerdau no qual a Gerdau Açominas faz parte, instituições essas que me honraram por poder apresentar meu trabalho, acreditando que o “conhecimento” é um dos fundamentos para o sucesso da nossa sociedade e instituições.

Ao meu orientador e Professor Emérito da Universidade Federal de Minas Gerais Varadarajan Seshadri, pelo exemplo de dedicação à Ciência, pelas orientações, paciência e conselhos tão importantes para a realização deste trabalho.

Ao colegiado da Pós Graduação pela compreensão da realização das análises essenciais da tese que ocasionaram atrasos no cronograma do trabalho.

À banca examinadora formada pelo Doutor Luiz Fernando de Andrade de Castro, Phd Roberto Parreiras Tavares, Dr. Ing. Varadarajan Seshadri e o Mestre José Luiz Rodrigues de Oliveira pela lisura e atenção na avaliação desta tese.

Ao Diretor de Mineração da Gerdau Açominas Marcus Rocha Duarte, maior incentivador deste trabalho que sempre acreditou no conhecimento técnico de uma equipe para alavancar resultados, atingir metas e na minha pessoa.

Aos meus gestores Antônio Pinto Segreto, Gerente de Área da Redução e ao Marcelo Alves de Carvalho, Chefe de Área do Desenvolvimento Técnico da Redução, por toda a disponibilidade de Recursos e crendo que a “Capacitação” é uma ferramenta essencial para uma empresa atingir metas com sustentabilidade.

Ao Sérgio Nascimento Leal, Chefe de Área da Coqueria, pelo incentivo e disponibilidade de recursos, alinhado com suas convicções e da Gerdau Açominas para a formação técnica.

Aos meus amigos Henrique Guilherme Lucas Bastos e Hilton Luis Pereira Lopes, primeiramente pela amizade, depois pelo companheirismo, comprometimento, discussões, aprendizado contínuo e cumplicidade, adjetivos que magnificam e muito a palavra “amizade”. Muito Obrigado!

Aos meus amigos e companheiros do “Grupo de Carvão”, José Luiz R. de Oliveira, Geraldo Magela Marinho, José Mário Ribeiro Costa Júnior e Wilian José Antonioli pela experiência transmitida, apoio, dicas e idéias fornecidas no trabalho e no dia-a-dia.

Aos colegas da Equipe de Laboratório de Matérias Primas coordenadas pelo Claudio Sidiney dos Santos, e em especial ao Ivan Renato Ribeiro, pela responsabilidade e zelo na condução dos testes no forno Piloto.

Aos colegas do Desenvolvimento Técnico da Área de Oficinas Cristiano Baia e Sebastião Afonso pelo projeto de adaptação do Forno Piloto para o Enfornamento em “*Stamp Charging*”.

Aos colegas do Desenvolvimento Técnico da Redução pelo companheirismo e amizade.

Aos companheiros da Ormec liderados pelo grande “Manso” pela preciosa ajuda no manuseio e preparação das amostras das misturas no forno piloto.

Aos autores de grandes artigos e trabalhos feitos nas áreas de carvão e redução que sustentou toda a minha tese.

Ao Dr. Amit Chaterjee, especialista e consultor da Tecnologia “Stamp Charging” em Coquerias da Tata Steel, pelo desprendimento na transmissão de conhecimento em um encontro pessoal que a equipe da Gerdau Açominas teve em Setembro deste ano, na qual eu fazia parte.

À “Carbonífera Criciúma” pelo fornecimento da amostra do carvão Nacional Santa Catarina para testes na Gerdau Açominas.

E finalmente a todos os outros colegas que não foram colocados aqui, porém estão certamente presentes neste trabalho e lembrados pelo apoio dado a mim.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xvi
1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – OBJETIVO.....	3
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Origem e Formação do Carvão.....	4
3.1.1 - Estágios dos linhitos (macios e duros).....	7
3.1.2 - Estágio dos carvões propriamente ditos (linhito a carvão).....	8
3.1.3 - Estágios dos Antracitos.....	8
3.2 Reservas Brasileiras de Carvões Minerais.....	8
3.3 Qualidade do Coque X Alta Produtividade no Alto-forno.....	9
3.4 Os Papéis do Coque no Alto-forno.....	9
3.5 Principais Características do Forno Piloto de Coqueificação da Açominas.....	11
3.6 Caracterização dos Carvões Minerais.....	14
3.6.1 - Análise Imediata de Carvões.....	14
3.6.2 - Petrografia de Carvões.....	15
3.6.3 – Inclusões Inorgânicas em Carvão.....	24
3.6.4 - Comportamento dos Macerais Durante a Coqueificação.....	25
3.6.5 - Características Petrográficas de Carvão.....	26
3.6.6 - Características plásticas dos carvões.....	27
3.7 Beneficiamento de Carvões.....	30
3.7.1 - Máxima Fluidez.....	31
3.7.2 - Degradação por fissuração.....	33
3.7.3 - Método de previsão do Índice de Resistência a Frio do Coque.....	33
3.7.4 - Uso do Coque Petróleo.....	35
3.8 Processos para Utilização de Carvões de Baixo Poder Coqueificante .....	35
4 – METODOLOGIA.....	42
4.1 Misturas de Carvões.....	44
4.2 Metodologia para avaliação de características coqueificantes de carvão.....	47
4.3 Metodologia para enformamento em escala piloto para " <i>Stamp Charging</i> " .....	48
5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	51
5.1 Resultados e Discussões da 1ª Etapa Caracteriza ções.....	51
5.2 Resultados e Discussões da 2ª Etapa Testes no F orno Piloto.....	72
5.3 Resultados e Discussões da 3ª Etapa Análises do s Coques Produzidos.....	74
5.4 Discussão sobre a Comparação dos Resultados dos Processos de Coqueificação Convencional e com Compactação de Carga " <i>Stamp charging</i> " .....	86

6 – CONCLUSÕES.....	90
7– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
8 – ANEXOS.....	94

## RESUMO

Este estudo foi elaborado através de avaliação de matérias-primas alternativas nacionais (que juntamente com outros carvões minerais componentes da mistura, possam produzir um coque de qualidade requerida em altos-fornos com altas taxas de produtividade).

Foram feitas caracterizações de carvões individuais e das misturas elaboradas, como também análise completa do coque produzido usando um forno de escala piloto (Modelo da “*Carbolite Furnace*” para a Gerdau Açominas de 250kg de capacidade) pelo processo normal e pelo processo com compactação de carga “*stamp charging*”, e foram usados o coque verde petróleo da REGAP (Petrobrás) e carvão oriundo de Santa Catarina.

As misturas foram montadas através de um modelo matemático de otimização nas quais foram levadas como premissa a qualidade do coque para alto-forno da Gerdau Açominas, e estas contemplaram até 30% desses insumos a serem testados.

Os resultados foram avaliados e concluiu-se que para o processo de coqueificação convencional sem “*stamp charging*” é possível usar na mistura até 10% de matéria-prima nacional não coqueificável, e para o processo que tenha compactação de carga essa proporção é elevada para 30%, para se ter um coque com qualidade desejável para um alto-forno de alta produtividade como o da Gerdau Açominas.



## **ABSTRACT**

*This study has the objective of exploring the possibility of utilizing alternative raw materials available in the country in the coal blends with high quality coals for producing high quality coke for the blast furnaces of Gerdau Acominas, Ouro Branco, Brasil.*

*Characterization of the constituents of the blends (Low grade coal from Santa Catarina, Petroleum coke from REGAP Petrobras) has been carried out. Different blends were prepared with different percentages of the above with high grade coal were prepared and charged into the pilot furnace (carbolite furnace) of the Gerdau, Acominas and the coke produced was analyzed for different properties. The above pilot plant experiments were carried out for conventional cokemaking and also stamp charging of the coal blends.*

*A mathematical model developed was taken as a reference for the quality of coke that would result in the prototype and this was used for predicting the coke properties on the basis of the pilot plant experiments.*

*The results of the experiments show that it is possible to use noncoking coal of national origin up to 30 % in the coal blend with use of stamp charging to produce good quality coke for the blast furnaces, whereas in the conventional process only up to 10 % of the same can be used for maintaining the same quality.*

**LISTA DE FIGURAS**

	Página
FIGURA 3.1 - Eras e períodos geológicos: “possibilidade de formação de carvão ao longo de diferentes eras e períodos” .....	7
FIGURA 3.2 - Representação esquemática do corpo do Forno Piloto.....	12
FIGURA 3.3 - MICROGRAFIA DO MACERAL TELINITA .....	18
FIGURA 3.4 - MICROGRAFIA DO MACERAL COLINITA .....	18
FIGURA 3.5 - MICROGRAFIA DO MACERAL ESPORINITA .....	20
FIGURA 3.6 - MICROGRAFIA DO MACERAL CUTINITA.....	20
FIGURA 3.7 - MICROGRAFIA DO MACERAL ALGINITA.....	21
FIGURA 3.8 - MICROGRAFIA DO MACERAL RESINITA.....	21
FIGURA 3.9 - MICROGRAFIA DO MACERAL FUSINITA.....	22
FIGURA 3.10 - MICROGRAFIA DO MACERAL SEMIFUSINITA.....	23
FIGURA 3.11 - MICROGRAFIA DO MACERAL MICRINITA.....	23
FIGURA 3.12 - MACERAL ESCLEROTINITA.....	24

FIGURA 3.13 - Esquema de um microscópio petrográfico.....	26
FIGURA 3.14 - Esquema de um Plastômetro Gieseler e a Curva de Fluidez.....	28
FIGURA 3.15 - Esquema de um dilatômetro Audibert-Arnu e a curva característica.....	29
FIGURA 3.16 - Esquema de um ensaio de aglutinação da NSC.....	30
FIGURA 3.17 - Parâmetros básicos das propriedades coqueificantes e petrográficas.....	31
FIGURA 3.18 - Curvas das características da fluidez de diversos carvões....	32
FIGURA 3.19 - Diagrama MOF (Miazu, Okuyama e Fukuyama).....	34
FIGURA 3.20 - Imagem da Coqueria <i>Heat Recovery</i> com <i>Stamp Charging</i> ,na San Jia Coking Company, Cidade de Gao Ping, Província de Shanxi –China (Setembro de 2007).....	38
FIGURA 3.21: Gráfico de Desempenho da Produtividade do alto-forno da Tata Steel com uso de coque “Stamp Charging”.....	39
FIGURA 3.22: Martelos mecânicos para uma coqueria <i>Heat Recovery</i> com Compactação de Carga, na San Jia Coking Company, Cidade de Gao Ping, Província de Shanxi – China (Setembro de 2007).....	41
FIGURA 3.23: Martelos mecânicos para uma coqueria Convencional com Compactação de Carga.....	41

FIGURA 4.1: Esquema mostrando as dimensões da lata de 18l usada para a compactação de carga.....	48
FIGURA 4.2: <i>Lay out</i> dos furos feitos para a saída da matéria volátil da mistura de carvão.....	49
FIGURA 4.3: Operador “compactando” mistura na lata para teste “Stamp Charging” no forno piloto.....	50
FIGURA 5.1: Diagrama MOF para as Misturas Testes (Calculadas pelo Modelo).....	58
FIGURA 5.2: Diagrama MOF das Misturas Testes (Analisadas em Laboratório).....	59
FIGURA 5.3: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinetas para a Mistura#1.....	61
FIGURA 5.4: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinetas para a Mistura#2.....	63
FIGURA 5.5: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinetas para a Mistura#3.....	65
FIGURA 5.6: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinetas para a Mistura#4.....	67
FIGURA 5.7: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinetas para a Mistura#5.....	69
FIGURA 5.8: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinetas para a Mistura#6.....	71

FIGURA 5.9: Seqüência de fotos de um enforamento “ <i>stamp charging</i> ” no forno piloto da Gerdau Açominas.....	73
FIGURA 5.10: Seqüência de fotos do desenforamento de um forno com a carga compactada.....	74
FIGURA 5.11: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#1 em escala industrial.....	76
FIGURA 5.12: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#1 em escala industrial.....	76
FIGURA 5.13: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#2 em escala industrial.....	78
FIGURA 5.14: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#2 em escala industrial.....	78
FIGURA 5.15: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#3 em escala industrial.....	80
FIGURA 5.16: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#3 em escala industrial.....	80
FIGURA 5.17: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#4 em escala industrial.....	81
FIGURA 5.18: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#4 em escala industrial.....	82

FIGURA 5.19: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#5 em escala industrial.....	83
FIGURA 5.20: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#5 em escala industrial.....	84
FIGURA 5.21: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#6 em escala industrial.....	85
FIGURA 5.22: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#6 em escala industrial.....	85
FIGURA 5.23: Comparativo de Matéria Volátil do Coque entre as Coqueificações Convencional X Compactada.....	86
FIGURA 5.24: Comparativo de Cinzas entre as Coqueificações Convencional X Compactada.....	87
FIGURA 5.25: Comparativo de Enxofre entre as Coqueificações Convencional X Compactada.....	87
FIGURA 5.26: Comparativo de Ganhos de DI entre as Coqueificações Convencional X Compactada.....	88
FIGURA 5.27: Comparativo de Ganhos de CSR entre as Coqueificações Convencional X Compactada.....	89
FIGURA 5.28: Comparativo de Ganhos de CRI entre as Coqueificações Convencional X Compactada.....	90
FIGURA 8.1: Carta de Valores Individuais para o DI em escala industrial.....	94

FIGURA 8.2: Carta de Valores Individuais para o DI em escala piloto.....	95
FIGURA 8.3: Carta de Valores Individuais para o CSR em escala industrial...96	
FIGURA 8.4: Carta de Valores Individuais para o CSR em escala piloto.....97	
FIGURA 8.5: Carta de Valores Individuais para o CRI em escala industrial.....98	
FIGURA 8.6: Carta de Valores Individuais para o CRI em escala piloto.....99	
FIGURA 8.7: Carta de Avaliação dos Resíduos para a equação de correlação do DI em escala industrial.....	101
FIGURA 8.8: Carta de Avaliação dos Resíduos para a equação de correlação do CSR em escala industrial.....	103
FIGURA 8.9: Carta de Avaliação dos Resíduos para a equação de correlação do CRI em escala industrial.....	105
FIGURA 8.10: Carta de Avaliação dos Resíduos para a equação de correlação do CRI em escala industrial após tratamento.....	107

## LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA III.1 - Composição Química da Madeira e dos Combustíveis Fósseis Sólidos.....	6
TABELA III.2 - Sistema Stopes-Heerlen de Classificação.....	16
TABELA III.3 – Classificação da capacidade de coqueificação(4).....	29
TABELA III.4: Quadro Comparativo de Características entre Coqueiras ( <i>Heat Recovery</i> X Convencional) .....	37
TABELA III.5: Comparação da qualidade do coque entre baterias Convencionais ( <i>top charge</i> ) e com “ <i>stamp charging</i> ” na Tata Steel (15).....	39
TABELA IV.1 - Normas das análises para carvões da ASTM(4).....	43
TABELA IV.2 - Conjunto de Amostras para Análises.....	44
TABELA IV.3 - Metodologia a ser empregada para o estudo, baseado na proposta de caracterização de carvões.....	47
TABELA IV.4 : Dados do cálculo da densidade de carga para simular “ <i>stamp charging</i> ” .....	49
TABELA V.1: Comparativo de Resultados do Carvão Santa Catarina (Química das Cinzas).....	53
TABELA V.2: Comparativo de Resultados do Carvão Santa Catarina (Análises Físico Química e Imediata).....	53



TABELA V.3: Comparativo de Resultados do Carvão Santa Catarina (Análise Petrográfica).....	54
TABELA V.4: Comparativo dos Resultados da Análise Imediata para os <i>Blended's Coals</i> testados.....	55
TABELA V.5: Tabela de composição das Misturas testes.....	56
TABELA V.6: Características calculadas da Mistura #1.....	60
TABELA V.7A, B e C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#1.....	61
TABELA V.8: Características calculadas da Mistura #2.....	62
TABELA V.9A, B e C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#2.....	63
TABELA V.10: Características calculadas da Mistura #3.....	64
TABELA V.11A, B e C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#3.....	65
TABELA V.12: Características calculadas da Mistura #4.....	66
TABELA V.13A, B e C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#4.....	67
TABELA V.14: Características calculadas da Mistura #5.....	68
TABELA V.15A, B e C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#5.....	69
TABELA V.16: Características calculadas da Mistura #6.....	70

TABELA V.17A, B e C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#6.....	71
TABELA V.18: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #1.....	75
TABELA V.19: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #1 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%.....	75
TABELA V.20: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #2.....	77
TABELA V.21: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #2 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%.....	77
TABELA V.22: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #3.....	79
TABELA V.23: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #3 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%.....	79
TABELA V.24: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #4.....	81
TABELA V.25: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #4 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%.....	81
TABELA V.26: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #5.....	82

TABELA V.27: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #5 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%.....	83
TABELA V.28: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #6.....	84
TABELA V.29: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #6 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%.....	84

## 1 – INTRODUÇÃO

O coque é o principal combustível usado nos altos-fornos nas usinas integradas, o principal processo usado hoje para a coqueificação é através de baterias de fornos horizontais de coque e recuperação do Gás de Coqueria usado também como fonte energética nas usinas. Com a crescente demanda do mercado de aço, impulsionado principalmente pela China, as usinas siderúrgicas integradas a coque, têm buscado em seus departamentos de pesquisa modelos e tecnologias para que se busque sempre um aumento de produtividade de seus processos (Coqueria, Sinterização, Alto-forno, Aciaria e etc.), como também a redução de custo principalmente na aquisição de matérias-primas como o Minério de Ferro e o Carvão Mineral, este responsável pela maior parcela do custo de produção do aço.

Para se ter altos-fornos operando com altas taxas de produtividade, suas operações deverão ter baixas taxas de *fuel rate*, isso quer dizer, há uma necessidade que se tenha altas taxas de injeção de carvão pulverizado, como também uma qualidade altíssima do coque enornado.

Dentro dessas qualidades, a resistência após reação do  $CO_2$  (CSR – *Coke Strength after Reaction of  $CO_2$* ), a resistência mecânica à frio (*Drum Index* pela Norma JIS), e também o tamanho médio do Coque são parâmetros de qualidade de alta exigência, pois garantem o cumprimento das funções do coque no alto-forno.

Diante de tudo isso é necessário que a mistura de carvões contemple premissas que sustentem essa qualidade e da mesma forma busque uma redução de custos, e isso só ocorre quando se tem uma redução na proporção da mistura de carvões *hard* (carvões com poder coqueificante). No caso do Brasil, as grandes usinas siderúrgicas integradas a coque têm o seu *mix* de carvões quase todo ele oriundo dos Estados Unidos, Canadá, Austrália, Nova Zelândia e China. E devido à elevação do custo destes carvões, aliado à exigência das especificações pelos alto-fornos, há necessidade de se estudar novas tecnologias e matérias-primas que possam reduzir o uso de carvões *hard* ou aumente a proporção de carvões *soft* (Carvões com baixo poder coqueificante) ou *non-coking* (Carvões não coqueificáveis).

Na época da Siderbrás, as usinas siderúrgicas se viam na obrigação de consumir em uma proporção mínima o carvão nacional oriundo do estado de Santa

Catarina, que tem seu nome vinculado ao estado e conhecido como Carvão Santa Catarina. Este carvão é um Médio-alto Volátil (28~30% de MV), que tem uma Máxima Fluidez elevadíssima (> 30.000 ddpm), porém seu enxofre (~1,8%) e sua cinza (~17%) são os seus maiores inibidores para o consumo na mistura.

Outra matéria-prima nacional encontrada em abundância no Brasil é o Coque Verde de Petróleo, resultado final como um subproduto da destilação do petróleo, atualmente as usinas têm procurado aumentar a participação do Coque Petróleo dentro da mistura de carvões, em sua análise maceral é impossível se verificar a presença de vitrinitas e se caracteriza principalmente pela quantidade de inertes. Apesar de ser um corretor de cinzas devido a sua quantidade mínima, o coque petróleo nunca foi usado em grande escala na mistura de carvões na qual se exige uma qualidade do coque ótima (máximo de 40% na Siderar).

A idéia principal deste trabalho é se testar misturas de carvões nas quais contemple uma quantidade significativa de insumos nacionais (até 50% da mistura) nas quais consiga produzir um coque de qualidade para um alto-forno de alta produtividade, na qual possamos a vir produzir em escala industrial em fornos convencionais, ou até determinar qual o melhor processo de coqueificação é o mais adequado para essa aplicação. Atingindo com isso dois objetivos importantes para o processo de coqueria no Brasil:

- Redução do custo de matérias primas para a produção do gusa;
- Independência maior do carvão estrangeiro, aumentando a segurança operacional tanto da coqueria como do próprio alto-forno, no caso de algum problema de corte de fornecimento do carvão importado.

## 2 – OBJETIVO

### Geral:

O objetivo deste trabalho é obter novas alternativas de matérias primas para o *blend* de carvões, no sentido de reduzir o custo de nossa mistura de carvões e garantir alternativas para o processo de coqueria.

### Específicos:

Aumentar a participação de insumos nacionais na mistura de carvões;

Diagnosticar os melhores processos de coqueificação para uma mistura de menor custo, porém mantendo a boa qualidade do coque exigida;

Aplicar os conceitos teóricos de caracterização de carvões e novas matérias primas, como também um modelo de otimização e previsão do coque a ser obtido pela mistura.

### 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 -Origem e Formação do Carvão

De acordo com os geólogos o carvão mineral é o resultado da decomposição de florestas e seres vivos depois de milhões de anos, acompanhados pela atuação da temperatura e pressão referentes às condições geológicas na qual o planeta passou durante o período de sua existência.

Os detritos vegetais provenientes de troncos, raízes, folhas e outras partes das plantas, recobertos em maior ou menor extensão por uma lâmina d'água na bacia de sedimentação, sofreram em maior ou menor grau, ataque biológico. As bactérias e outros microorganismos atacam a celulose e a lignina da madeira, se apoderando do oxigênio, da matéria nitrogenada e do fósforo necessários aos seus desenvolvimentos e subsistências, resultando com isso o que chamamos de Processo de Carbonificação.

A decomposição da matéria vegetal nem sempre origina turfa. Segundo Potonié apud Ulhôa, indica quatro hipóteses para a transformação de matéria vegetal:

- ❖ **Desintegração total da matéria orgânica**, por ataque microbiano e ação do oxigênio, que é na realidade um processo de combustão lento e tendo como gases produzidos o CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> e CH<sub>4</sub>, sem a formação de sedimentos;
- ❖ **Humificação**, em que a ação do oxigênio é menor, com menor formação de gases que são, ainda, o CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> e CH<sub>4</sub>, e tendo a formação de sedimentos chamados húmus que formam camadas do solo pela alta rotatividade da matéria orgânica que morre;
- ❖ **Formação de turfa**, com ação ainda menor do oxigênio, formação dos mesmos gases citados em quantidades ainda menores, com maior quantidade de resíduo sólido, a turfa, pois a matéria orgânica é rapidamente coberta, e
- ❖ **Putrefação**, em que o ambiente e as condições químicas são diferentes, pois acontece em bolsões de água estagnada com baixa presença de oxigênio. Os gases formados em pequena quantidade são o CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S e H<sub>2</sub> (as bactérias que atuam nesse ambiente são as anaeróbias) e o resíduo sólido é chamado de sapropel. O sapropel é um sedimento constituído, essencialmente, de matéria orgânica que não sofreu decomposição total. Ele origina a rocha sedimentar sapropélito, que é uma rocha formadora de petróleo.

As turfeiras são freqüentes e não originam, necessariamente, o carvão. A hipótese de que essa transformação se deu apenas por via biológica é descartada pois: "a partir de certa profundidade, a ação bacteriana e de fungos é completamente impossível", sendo necessário, portanto, a ocorrência de outros fenômenos. Um que é considerado importante é a subsidência, isso é, o lento abaixamento, mais ou menos regular da turfeira, com a atuação concomitante do tempo, pressão e temperatura.

O tempo teve uma influência de menor importância na carbonificação. A evidência dessa afirmação é dada pelo fato de que num mesmo período geológico, por exemplo, no carbonífero são encontrados carvões de diferentes tipos. Assim, na bacia de Moscou, que é do carbonífero, são encontrados linhitos e nas bacias do Ruhr e da Polônia, também do carbonífero, encontrados desde o linhito até o antracito.

A pressão exercida pelas camadas sobrepostas às de carvão não é, geralmente, a origem única da carbonificação. A uma mesma profundidade, ou seja, sob uma pressão de compactação similar, são encontrados carvões de diferentes graus de carbonificação. Um exemplo disso é que a 1000 metros de profundidade na região da Lorena são encontrados carvões alto voláteis - segundo a classificação AFNOR - com teores de oxigênio de 8,5% e, em regiões próximas e mais ao norte dessa região, encontrados carvões baixo voláteis com teores de oxigênio de cerca de 2%.

A temperatura é considerada o fator mais importante para que um carvão tenha atingido um determinado grau de carbonificação. A temperatura aumenta, em média, de 3 a 5 °C para cada 100 metros de profundidade. Ou seja, conforme a profundidade, as camadas de carvão podem ter sido levadas a temperaturas de até 200 °C, que são consideradas como suficientes para a formação de antracito.

O gradiente geotérmico é variável de uma região para outra do globo terrestre, ou seja, de uma bacia carbonífera para outra. Portanto, as camadas de carvão foram submetidas a tratamentos térmicos diferentes: "a taxas diferentes de elevação de temperatura", o que permite explicar a grande variedade de carvões existente. A grafite é formada a partir do antracito, sob temperaturas da ordem de 2000 a 3000°C e pressão de 1000 atm, o que leva a uma organização do carbono e formação de grafite.



A tabela III.1 abaixo mostra a proporção de carbono nos diversos estágios desde a madeira até o antracito, evidenciando as fases nas quais passa a matéria orgânica vegetal durante o processo de Carbonificação. Embora não existam evidências concretas da conversão de um componente em outro, visto que os processos que originaram os carvões duraram milhões de anos, considera-se que os carvões pertencem a uma série de combustíveis fósseis sólidos, que começa na turfa e termina no antracito.

TABELA III.1 - Composição Química da Madeira e dos Combustíveis Fósseis Sólidos

Combustível Composição	Madeira	Turfa	Linhito	Carvão	Antracito	Grafite
Carbono (%)	44 - 52	50 - 68	55 - 75	74 - 96	90 - 96	100
Oxigênio (%)	43 - 42	35 - 28	26 - 19	20 - 3	3 - 0	0
Hidrogênio (%)	5 - 6	7 - 5	6 - 9	5 - 1	3 - 1	0

Constata-se que: "partindo-se da madeira em direção ao antracito, há um aumento do teor de carbono (o processo de enriquecimento em carbono é chamado de carbonificação) e diminuição dos teores de oxigênio e nitrogênio". Para que essas transformações pudessem ocorrer foram necessárias condições geológicas particulares, temas de estudos que levaram às muitas teorias existentes sobre a formação do carvão.

Conforme a figura 3.1 a provável formação de carvão se deu, principalmente, durante o período carbonífero no hemisfério norte. Durante o carbonífero, o hemisfério sul estava coberto de gelo e não havia florestas. Assim, essa formação de carvão nesse hemisfério só pôde ocorrer a partir do período permiano. Esse esquema das transformações que ocorreram de tal modo a possibilitar a formação de carvão ao longo dos diferentes períodos e eras geológicas está ilustrado abaixo.

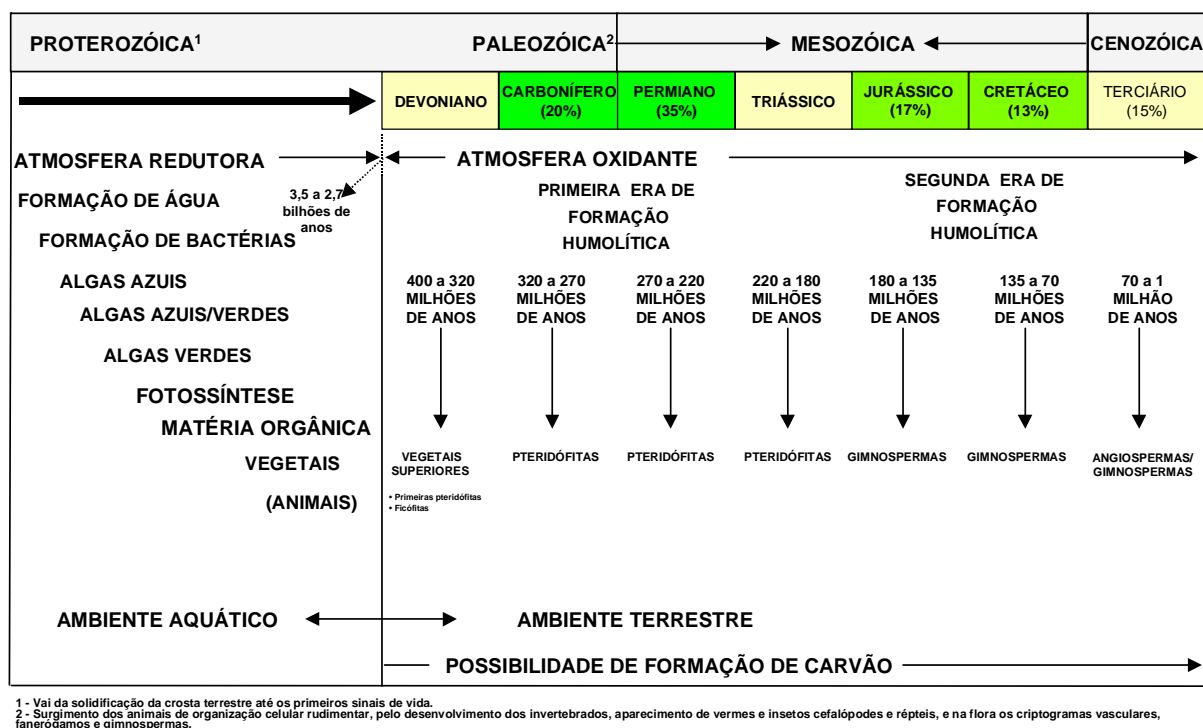


FIGURA 3.1 - Eras e períodos geológicos: “possibilidade de formação de carvão ao longo de diferentes eras e períodos” (8)

A turfa não é considerada, por alguns autores, como pertencente à série dos carvões, uma vez que se trata de material na fase inicial de transformação da matéria orgânica e mantêm muitas das características dos vegetais de origem. A matéria vegetal pode ser reconhecida com detalhes na turfa. Os poros são grandes, existe celulose e o teor de umidade é da ordem de 70%.

### 3.1.1 - Estágios dos linhitos (macios e duros)

- ❖ Compactação, produzida pelo aumento dos sedimentos sobrepostos e cujo principal efeito é a redução do volume de vazios do material depositado e a conseqüente expulsão da água.
- ❖ Mudança de coloração, em que o material passa, gradualmente, de marrom a preto.
- ❖ Aumento gradual da dureza.
- ❖ Mudança do aspecto superficial, que passa de fosco a brilhante.

### **3.1.2 - Estágio dos carvões propriamente ditos (linhito a carvão)**

- ❖ Aumento do teor de carbono fixo.
- ❖ Redução dos teores de oxigênio e nitrogênio.
- ❖ Diminuição do teor de matéria volátil.
- ❖ Aumento do poder calorífico, em função do aumento do teor de carbono.
- ❖ A elevação de temperatura se reflete na composição química do carvão, e o aumento da pressão, ocasionado pelo peso dos sedimentos sobrepostos e por movimentos tectônicos, atua sobre as propriedades físicas, como a dureza, resistência mecânica, anisotropia ótica e porosidade.

### **3.1.3 - Estágios dos Antracitos**

- ❖ Caracterizado, sob o ponto de vista químico, pela redução do teor de matéria volátil, especialmente no estágio final, e pela diminuição do teor de hidrogênio, com a correspondente formação de  $\text{CH}_4$ , eliminado sob a forma gasosa.

## **3.2 - Reservas Brasileiras de Carvão Mineral**

De acordo com os dados do relatório de Balanço Energético Mundial de 2002 do Ministério das Minas e Energia, o carvão mineral é responsável por cerca de 23,5% da oferta mundial de energia e de 39,1% da eletricidade gerada no mundo, sendo com isso considerado a maior fonte de energia para uso local, em razão principalmente da estabilidade nos preços, abundância e distribuição geográfica das reservas.

No Brasil, as principais reservas de carvão mineral estão concentradas no Sul do país. As reservas nacionais de carvão são da ordem de 32,37 bilhões de toneladas, sendo este o maior recurso fóssil do país, correspondendo mais do dobro das reservas de petróleo em equivalência energética. Atualmente, a oferta de carvão mineral por ano é da ordem de 5,96 milhões de toneladas, sendo que quase toda sua totalidade é para o consumo em termoelétricas, correspondendo tão somente a 1,4% da matriz energética brasileira.

O seu uso restrito para energia e não para outros fins como siderúrgico, se deve ao fato deste carvão ter altos teores de enxofre e cinzas, sendo os principais entraves para a sua mineração, beneficiamento e o aproveitamento.

### **3.3 - Qualidade do Coque X Alta produtividade do Alto-forno**

Segundo Großpietsch *et alli* a média anual de produção por alto-forno aumentou em 63,5% de 0,85 para 1,39 milhões t de gusa e a produtividade em 30% de 1,9 para 2,47t/m<sup>3</sup> de volume útil em 24 horas.

Por definição, a produtividade do alto-forno é o quociente entre possível gás inserido por unidade de tempo e geração de gás específico por uma tonelada de gusa produzido. Por consequência, um aumento da produtividade, por um lado, requer um aumento de gás inserido, no qual implica na melhora da permeabilidade do forno, mas a redução do gás necessário, nas quais significa uma redução no consumo específico dos agentes redutores.

As campanhas dos Alto-fornos atualmente estão se estendendo de 8 a 10 anos para 15 anos ou mais. Com isso a diminuição do *coke rate*, a alta produtividade do alto-forno e o aumento da campanha operacional somente podem ser alcançados com o uso de matérias-primas de alta qualidade, que implica carga metálica com alto teor de ferro e alta qualidade de coque.

### **3.4 - Os papéis do Coque no alto-forno**

O alto-forno é um reator químico que opera em contra corrente donde os materiais ferrosos e o coque descem e são pré-aquecidos pelos gases quentes oriundos da zona de combustão do *raceway* em frente as ventaneiras, onde o coque (e injetantes) sofrem reações de combustão com oxigênio do sopro quente.

Os gases quentes oriundos da zona do *raceway* passam através de uma zona de coque ativo, através das camadas de coque na zona coesiva e fluem para cima através das camadas de minério e coque. Os materiais ferrosos e fundentes fundem fora da zona coesiva na margem interna, gotejam para baixo através da zona de

coque ativo e se juntam no cadinho como metal quente e escória. Portanto, abaixo da margem interna da zona coesiva, o coque é o único material sólido no forno.

O coque exerce três importantes funções no alto-forno, sendo:

### **-Funções Química e Térmica**

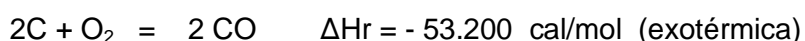
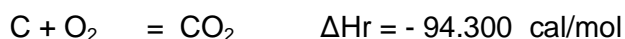
Fornecer o carbono para as reações químicas do processo e suprir a maior parte do calor requerido pelo processo, sendo que o perfil térmico característico do alto-forno é influenciado diretamente pela ocorrência da reação de Boudouard ou *solution loss* ou reatividade do coque:



- Principal reação que ocorre no alto-forno, em termos térmicos
- Reação altamente endotérmica (consome grande quantidade de calor)
- Ocorre em larga escala
- Só ocorre acima de uma temperatura específica de 1000°C para o coque devido a sua alta energia de ativação.

Além disso, existem as reações de combustão na qual a região das ventaneiras, ar soprado pré-aquecido a 1100°C entra em contato com o coque, que é o único material sólido existente nesta região (a carga metálica já fundiu).

Nesta região é gerado todo calor e gases necessários ao processo



### **-Função Física**

Fornecer o meio permeável para a subida dos gases em direção ao topo e descida do metal e escória para o cadinho, sendo este talvez a sua principal função, pois:

- Fornece a camada permeável no topo do forno para que o gás passe por ela;
- Fornece a separação das camadas mais pesadas, mais densas e menos permeáveis de sinter, fundentes, minério granulado e pelotas;

- Fornece a camada permeável (janelas) na parte inferior do forno através das quais os líquidos podem gotejar e os gases quentes podem passar;
- Sustenta o peso da coluna de carga;
- Fornece a camada permeável para que o gusa e a escória fluam para os furos de corrida.

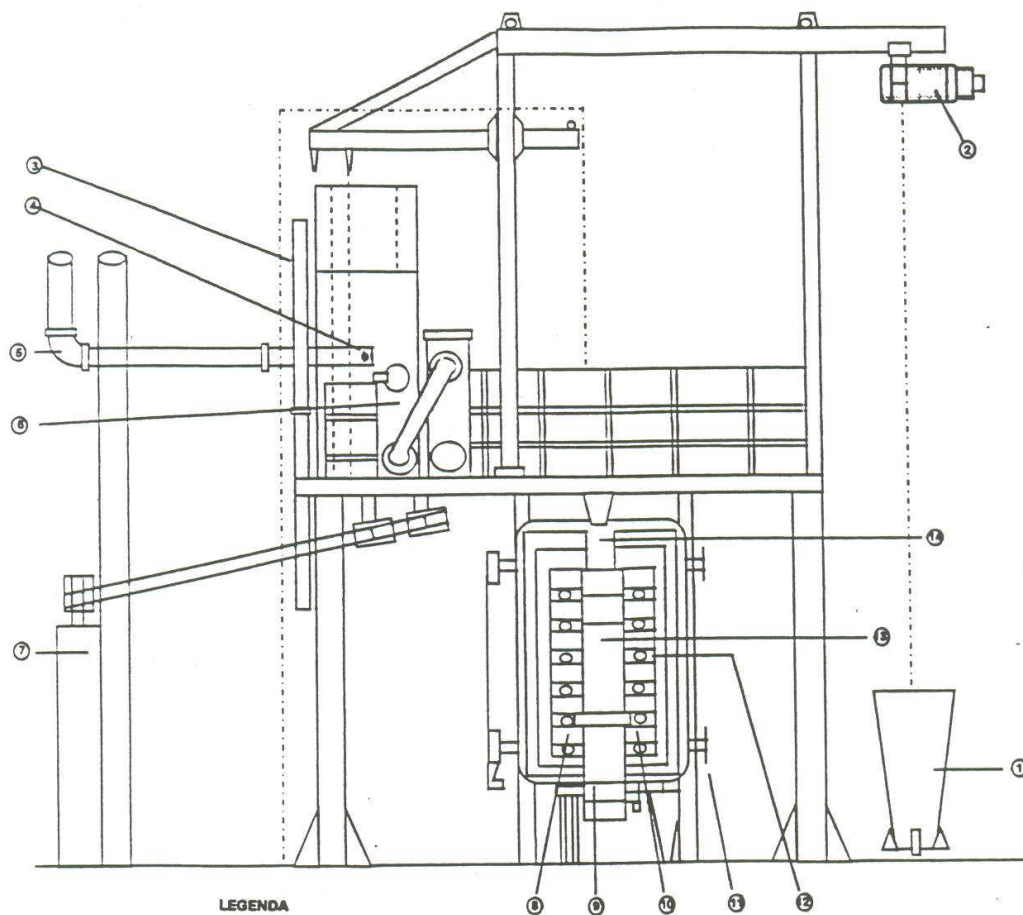
Além dessas funções o coque deve também apresentar outros requisitos nas quais se faz necessário a para que não haja contaminação do gusa como também prejudicar a marcha do alto-forno ou causar problemas ambientais /ou operacionais, para isso se controla também o:

- Enxofre;
- Cinzas;
- Umidade;
- Fósforo;
- Álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{ZnO}$ )

### **3.5 - Principais Características do Forno Piloto de Coqueificação da Açominas**

O forno piloto de coqueificação da Açominas foi fabricado pela "*Carbolite Furnace*" em conjunto com a "*Coal Research Establishment*" na Inglaterra. Sendo constituído de 5 regiões principais o seu corpo, conforme figura

- i) soleira constitui o pavimento do ferro
- ii) parede fixa
- iv) teto ou ferradura
- v) portas, em ambos os lados



**LEGENDA**

- |                                                        |
|--------------------------------------------------------|
| 1 - CARRO DE CARREGAMENTO (RECIPIENTE CÔNICO)          |
| 2 - MOTOR PARA ELEVACÃO DE CARGA PARA O TOPO DO FORNO  |
| 3 - CONTRA PESOS DA "FERRADURA"                        |
| 4 - VÁLVULA PNEUMÁTICA DE CONTROLE DE PRESSÃO DO FORNO |
| 5 - CHAMINÉ                                            |
| 6 - LAVADOR DE GAS                                     |
| 7 - DECANTADOR                                         |
| 8 - PAREDE FIXA                                        |
| 9 - SOLEIRA                                            |
| 10 - PAREDE MÓVEL                                      |
| 11 - BARRAS DE SUSTENTAÇÃO DAS PAREDES LATERAIS        |
| 12 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA                              |
| 13 - FORNO                                             |
| 14 - BOCA DE CARGA                                     |

FIGURA 3.2 - Representação esquemática do corpo do Forno Piloto (4)

#### - Características do corpo do forno

O forno é constituído em estrutura de chapas grossas e de ferro fundido perfilado, em formato retangular, possui uma parede fixa e outra parede móvel montada sobre mancais lineares.

As portas são articuladas a partir da estrutura principal de modo que a parte quente permaneça longe do operador. A abóbada do forno é suspensa por quatro parafusos que facilitam o deslocamento da parede móvel. Para medir a pressão de coqueificação e permitir a mudança do núcleo da soleira, dispõe de duas aberturas no centro, uma para carregamento e outra para saída de gases, onde é interligado o tubo de ascensão e dois lavadores de gases, conforme figura.

#### - Sistema de aquecimento

O aquecimento do forno é elétrico, feito por meio de setenta e duas resistências de carbeto de silício, em formato espiral duplo, divididas em seis zonas. Cada zona tem um sistema de ventilação que proporciona uma distribuição homogênea de temperatura.

Em cada uma das seis zonas do forno existe um termopar, Pt/ Pt-Rh 13%, ligado a um controlado de temperatura. O programa de controle de temperatura é feito em um microprocessador com ajuste digital e mostrador de valores programados.

O microprocessador quando em remoto comanda outros cinco controladores de temperatura. Em cada uma das zonas centrais do forno existe um controlador contra excesso de temperatura que desliga o sistema de alimentação de energia quando a temperatura atinge 50°C acima da programada.

O sistema de aquecimento do forno permite trabalhar com temperatura até 1250°C. As temperaturas em diferentes pontos de carga são medidas e indicadas no painel de controle e registradas em cartas gráficas.



### **3.6 - Caracterização de Carvões Minerais**

Um carvão para ser incorporado a uma mistura para coqueificação passa por diversas análises e caracterizações necessárias para que se avalie o seu poder de coqueificação e suas principais características que irão alimentar o modelo matemático para misturas.

#### **3.6.1 - Análise Imediata de Carvões**

A análise imediata de carvões foi desenvolvida com intuito de se determinar os componentes de composição destes, através de um aquecimento em ambiente sob condições padrões, é feita a determinação de carbono fixo, umidade, matéria volátil, enxofre e cinzas.

A umidade pode se apresentar de duas maneiras: a primeira está sob forma superficial ou livre, isso quer dizer apresenta pressão de vapor normal; a segunda está sob a forma de umidade inerente, isso quer dizer que essa umidade está situada nos poros e capilar menores, sendo que sua pressão de vapor é menor que a normal.

A matéria volátil é determinada pelo aquecimento da amostra de carvão/mistura em ausência de oxigênio (ar) e condições normais para coqueificação. Essa matéria volátil é composta principalmente por uma variedade de hidrocarbonetos, dióxido de carbono e vapor d'água combinado, a importância de se saber o teor da matéria volátil se dá principalmente no cálculo de rendimento do processo de coqueificação, na qual se obtém a quantidade de coque produzido.

O enxofre é outro elemento que influencia diretamente a qualidade do gusa, e esse se apresenta sob três formas deferentes no carvão: enxofre sulfático, enxofre pirítico e enxofre orgânico.

A cinza do carvão contém inclusões inorgânicas intimamente ligadas à parte orgânica, sendo formada após calcinação, e os compostos formados são:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  , Cão,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  ,  $\text{Na}_2\text{O}$  ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  ,  $\text{ZnO}$  e  $\text{SO}_3$  . Sendo que esses compostos influenciam na operação do alto-forno, os álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{ZnO}$ ), são responsáveis na formação de cascão, o fósforo oriundo do  $\text{P}_2\text{O}_5$  influencia diretamente na qualidade do gusa produzido.

Finalmente o carbono fixo, que é parte resultante da coqueificação em forma sólida, e é obtida através da subtração de 100 do somatório das porcentagens da umidade, matéria volátil e cinzas.

### 3.6.2 - Petrografia de Carvões

O desenvolvimento da petrografia do carvão durante os últimos anos, resultou em variados tipos de métodos e sistemas de classificação dos carvões. Esses estudos basicamente foram divididos em dois tipos na área de microscopia.

- Por luz refletida; baseia-se na reflexão de um feixe de luz sobre uma superfície devidamente polida de carvão, atualmente é o método mais usado dentro das usinas para a caracterização destes e o que será utilizado neste estudo para a caracterização dos carvões;
- Por luz transmitida; adota o processo de se fazer passar um feixe de luz através de uma lâmina delgada de carvão ( espessura inferior a 8 microns)

#### Microscopia em Luz Refletida

Neste método empregam-se os princípios e técnicas adaptadas e usadas em metalografia, as superfícies polidas de carvão são examinadas microscopicamente por luz refletida.

Nas primeiras caracterizações de carvões, foi proposta uma classificação dos componentes do carvão baseando-se em conceitos litológicos (considerando o carvão como uma rocha). Em 1935, Stopes apresentou uma classificação mais detalhada, introduzindo o termo “maceral” para designar as substâncias elementares na formação do carvão. A tabela III.2 mostra a classificação segundo o sistema Stopes-Heerlen de Classificação.

Observando-se essa classificação, a caracterização do carvão é feito de acordo com os constituintes macroscópicos (litotipos), na qual estes são leitos que podem ser reconhecidos a olho nu e diferenciados pelo brilho, já o grupo de macerais são constituintes microscópicos e a natureza original parte da planta da qual o maceral foi derivado.

As caracterizações desses componentes macroscópicos litológicos são:

- ✓ Vitrênio, são os leitos mais brilhantes, contínuos e com 3 a 5mm de espessura.
- ✓ Durênio são os leitos foscos mais duros e cor variando de cinza a marrom escuro.
- ✓ Clarênio tem aspecto intermediário entre o vitrênio e o durênio, espessura inferior a 3 mm (é o componente mais freqüente nos carvões betuminosos).
- ✓ Fusênio tem o brilho sedoso, cor variando de preto a cinza escuro, muito friável, único componente que suja a pele, podendo conter grande proporção de matéria mineral.

Para o grupo de macerais (componentes microscópicos), a tabela III.2 segue a mesma classificação de Stopes-Heerlen.

Tabela III.2: Sistema Stopes-Heerlen de Classificação, Segundo Stopes-Heerlen apud Ulhôa

Litotipo	Maceral	Grupo de Maceral
Vitrênio	Colinita Telinita	Vitrinita
Clarênio	Colinita e telinita	Vitrinita dominante
	Esporinita, cutinita, resinita e alginita	Exinita
	Fusinita, micrinita, esclerotinita e semifusinita	Inertinita em presença menor
Durênio	Fusinita, micrinita, esclerotinita e semifusinita	Inertinita dominante
	Colinita e telinita	Vitrinita
	Esporinita, cutinita, resinita e alginita	Exinita em presença menor
Fusênio	Fusinita	Inertinita

Macerais são os constituintes microscópicos elementares do carvão, distintos com base em diferenças de propriedades como refletância, cor, morfologia, tamanho, anisotropia e dureza. São originados de restos de diferentes órgãos e tecidos de plantas e suas propriedades físicas e químicas variam conforme a carbonificação se processa. Para fins práticos, notadamente na coqueificação, os macerais que apresentam refletância aproximadamente vizinhas são reunidos em um dos três seguintes grupos: o grupo da vitrinita com refletância média, o grupo da exinita e o grupo da inertinita com refletâncias, respectivamente, inferior e superior à da vitrinita correspondente. A seqüência de fotomicrografias da figura 1 mostra os principais grupos de macerais e submacerais encontrados nos carvões.

**Vitrinita.** É o grupo de macerais mais abundante, principalmente, nos carvões do hemisfério norte (aproximadamente  $75 \pm 20\%$ ). Ele compreende três submacerais:

- ❖ Telinita com estrutura celular botânica ainda visível, as cavidades são vazias ou preenchidas de inclusões orgânicas (colinita, resinita) ou inorgânicas (argila, pirita etc.),
- ❖ Colinita que não apresenta estrutura celular visível nas condições de observação, e
- ❖ Vitrodetrinita que corresponde a microfragmentos (< 10 micrômetros) de telinita ou colinita.

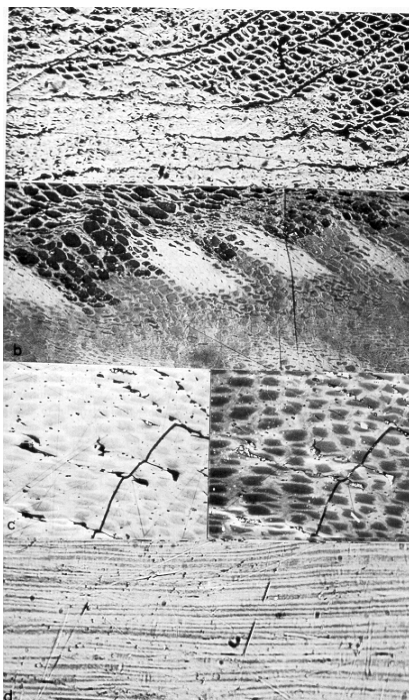


FIGURA 3.3 - MICROGRAFIA DO MACERAL TELINITA: Apresenta estrutura botânica celular (tipo madeira), sua cor varia de cinza a branco e a refletância de 0,6 a 8,0%. (Aumento de 500x.)

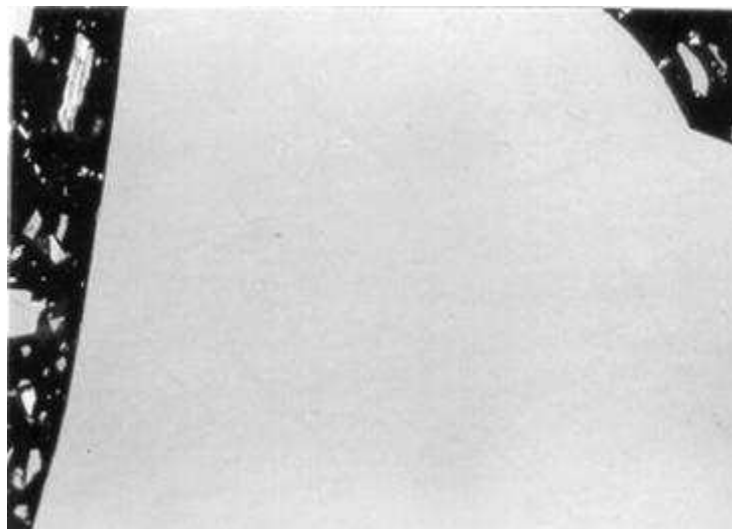


FIGURA 3.4 - MICROGRAFIA DO MACERAL COLINITA: Não apresenta estrutura celular, cor variando de cinza a branco e refletância de 0,6% a 8,0%. (Aumento de 500x.)

A diferenciação entre colinita e telinita depende parcialmente do modo de observação. A distinção é mais fácil em lâmina delgada ou após ataque químico da superfície polida. Em luz refletida há sempre alguma incerteza, sendo conveniente identificar apenas como vitrinita (às vezes com forte aumento é possível distinguir a estrutura que a ela deu origem). A cor da vitrinita varia de cinza a branco em reflexão. A refletância máxima evolui de 0,6 a 8%.

**Exinita.** A exinita apresenta cor de negra a cinza escuro em luz refletida e refletância bastante inferior à da vitrinita. A partir de valores de refletância de vitrinita superiores a 1,3 ou 1,4%, a exinita não é mais distinta da vitrinita, salvo em luz polarizada, nos antracitos. Sua percentagem nos carvões coqueificantes é bastante inferior à da vitrinita. Nesse grupo são reconhecidos cinco submacerais:

- ❖ Esporinita formada de exinas de esporos aplainados paralelamente à estratificação, apresenta cor amarronzada em carvões de baixo *rank*, passando por cinza escuro a preto, e finalmente a cinza claro com o aumento do *rank*;
- ❖ Cutinita (cutícula é uma fina camada impermeável que recobre externamente as folhas), perpendicular à estratificação aparece na forma de bandas estreitas (final serrilhado) e em outros planos, as seções de cutículas podem às vezes ser confundidas com macroesporos. Apresenta cor variando de cinza escuro a preto;
- ❖ Alginita, é de difícil distinção em luz normal, podendo aparecer como corpos marrons ou translúcidos com reflexões internas (similar à argila) ou como corpos de cor preta ou cinza de baixa refletância (similares à resinita);
- ❖ Resinita, ocorre como pequenos corpos de vários formatos que, em seção transversal, são arredondados ou ovais, com cor variando de preto a cinza, e
- ❖ Liptodetrinita, que corresponde a fragmentos da exinita cuja natureza precisa não é determinável.

Os três primeiros são facilmente identificáveis por suas formas bem definidas, e a resinita se apresenta, em geral, como impregnações mais ou menos difusas da vitrinita ou como matéria de preenchimento de cavidades celulares.

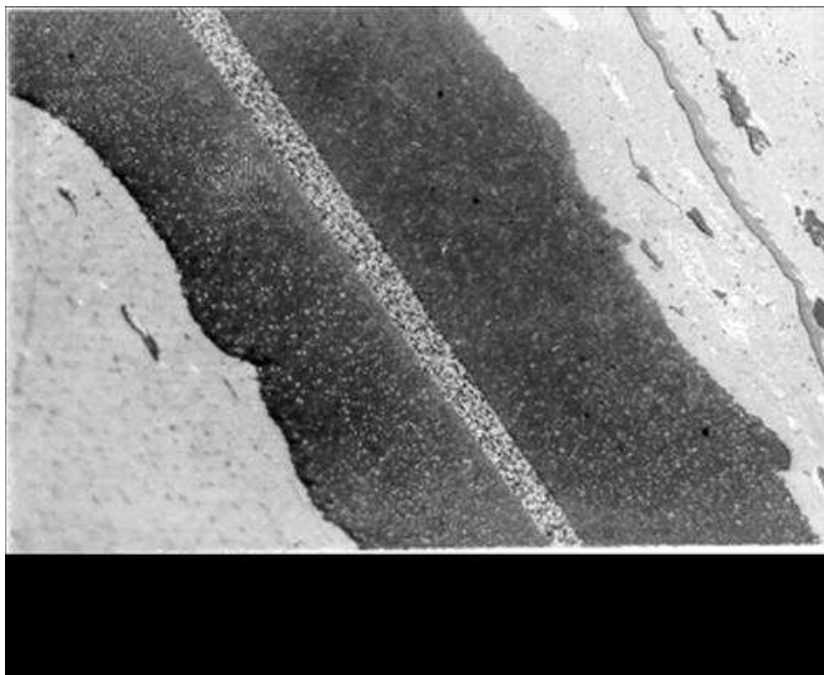


FIGURA 3.5 - MICROGRAFIA DO MACERAL ESPORINITA: Exinas de esporos, cor amarronzada em carvões de baixo “rank”, passando por preto, cinza escuro e cinza claro com refletância mais alta. (Aumento de 500x.)

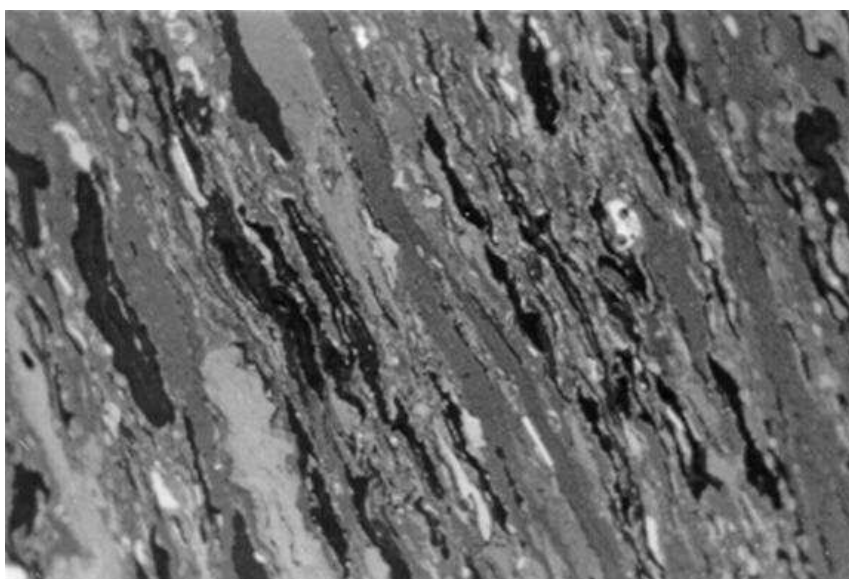


FIGURA 3.6 - MICROGRAFIA DO MACERAL CUTINITA: Bandas estreitas, às vezes serrilhadas, cor variando de cinza escuro a preto. (Aumento de 500x.)

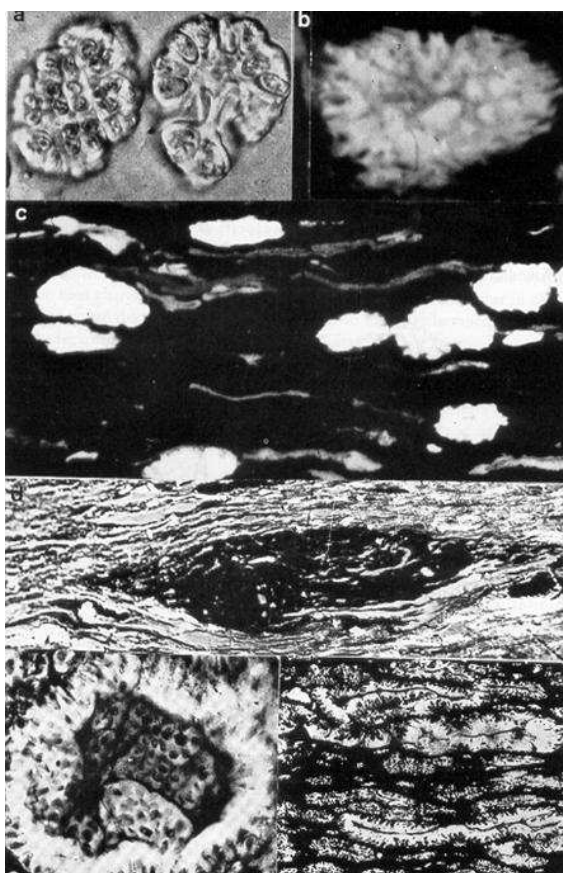


FIGURA 3.7 - MICROGRAFI DO MACERAL ALGINITA: Corpos marrons ou transparentes com reflexões internas, ou corpos de cor preta ou cinza de baixa refletância. (Aumento de 500x.)

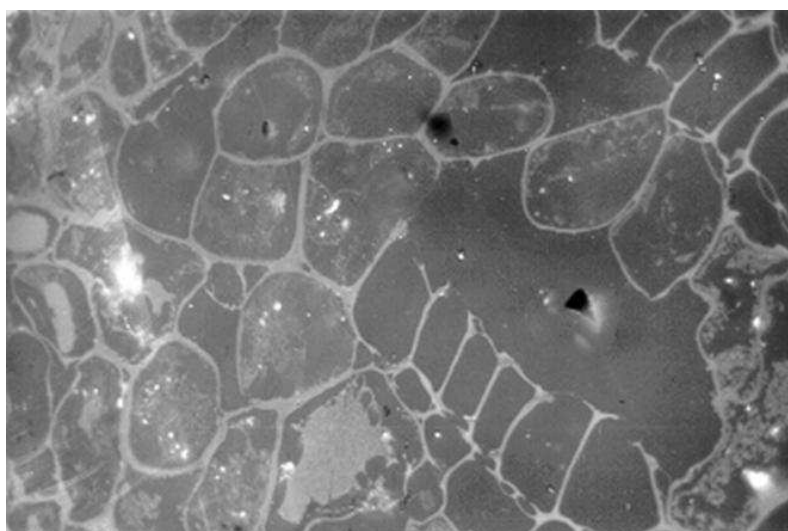


FIGURA 3.8 - MICROGRAFIA DO MACERAL RESINITA: Pequenos corpos arredondados ou ovais, cor variando de preto a cinza. (Aumento de 500x.)



**Inertinita.** Os macerais do grupo da inertinita são brancos e apresentam refletância mais elevada que a da vitrinita correspondente. A proporção de inertinita nos carvões do hemisfério norte varia de 5 a 30%, aproximadamente. Nesse grupo, são distintos os seguintes submacerais:

- ❖ Fusinita, de estrutura celular muito visível e refletância mais elevada de todos os macerais. As cavidades celulares são geralmente vazias e as paredes sobretudo quebradas (estrutura estrelada), assemelha-se a um carvão vegetal fossilizado,
- ❖ Semifusinita, semelhante à fusinita mas com refletância mais baixa, dureza menor e estrutura celular com cavidades de variadas dimensões e seção arredondada, oval ou alongada, geralmente menor e às vezes menos aparente que da fusinita,
- ❖ Inertodetrinita, que corresponde a conjuntos de microfragmentos de paredes da fusinita e semifusinita,
- ❖ Micrinita que se apresenta sob a forma de minúsculos grãos claros, da ordem do micrômetro (donde seu nome) e são encontrados sob forma dispersa na colinita ou às vezes em inclusões celulares da telinita, e
- ❖ Esclerotinita, que corresponde à pseudo-estruturas vegetais devidas ao entrelaçamento de tecidos de cogumelos.

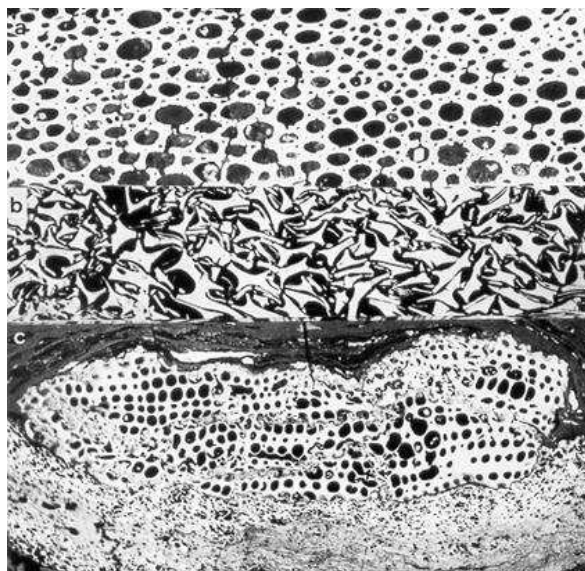


FIGURA 3.9 - MICROGRAFIA DO MACERAL FUSINITA: Estrutura celular visível, refletância mais alta de todos os macerais, cavidades celulares geralmente vazias, paredes muitas vezes quebradas. (Aumento de 500x.)

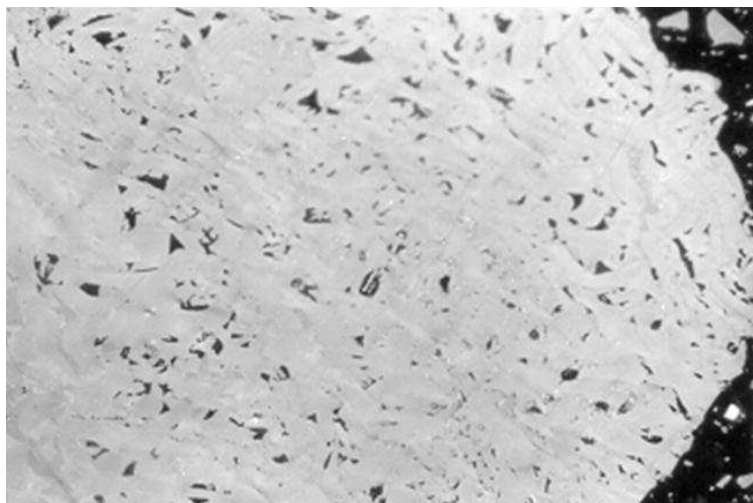


FIGURA 3.10 – MICROGRAFIA DO MACERAL SEMIFUSINITA Similar à fusinita, refletância menor, dureza menor, estrutura celular com dimensões variadas e seção arredondada, oval ou alongada. (Aumento de 500x.)

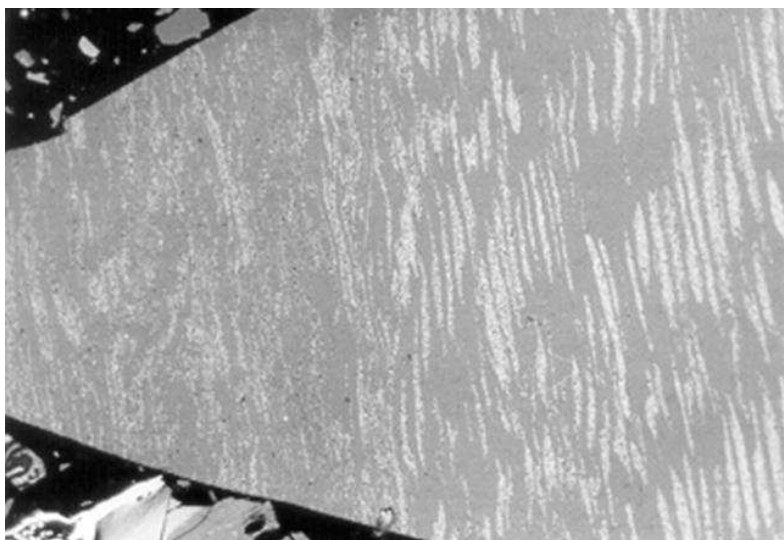


FIGURA 3.11 – MICROGRAFIA DO MACERAL MICRINITA Minúsculos grãos brancos (da ordem do micrometro), encontrados dispersos na colinita ou em inclusões celulares da telinita. (Aumento de 500x.)

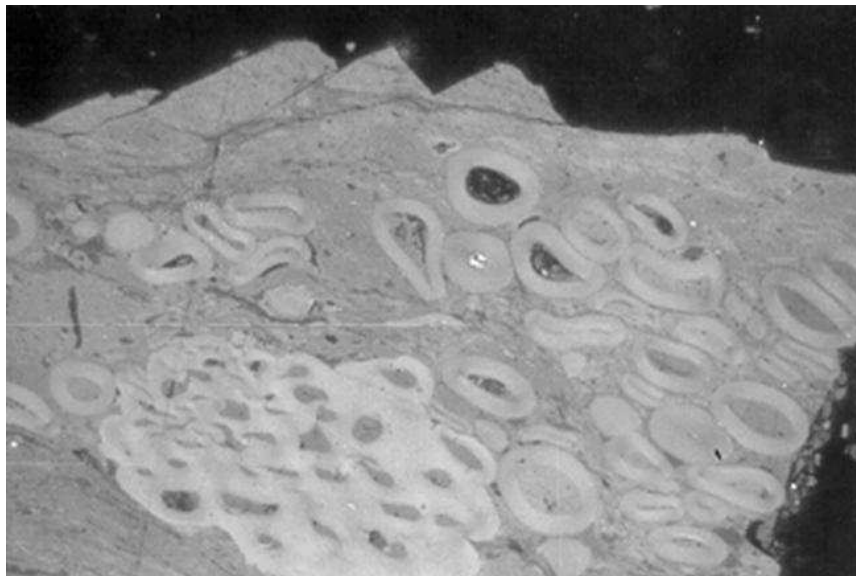


FIGURA 3.12 - MACERAL ESCLEROTINITA Pseudo-estruturas de vegetais devidas ao entrelaçamento de cogumelos (Aumento de 500x.)

### 3.6.3 – Inclusões Inorgânicas em Carvão

As inclusões inorgânicas relacionam-se à matéria mineral que se tornou associada ao carvão, por vários processos, durante diferentes estágios da carbonificação. Todos os carvões contêm matéria mineral em maior ou menor quantidade, que conforme a origem pode ser dividida em três grupos:

- ❖ Matéria inorgânica existente nas plantas originais (a madeira seca, dependendo da espécie, contém 0,5% ou mais de cinza, as cascas e folhas podendo atingir 10%),
- ❖ Complexos orgânico-inorgânicos e minerais que se formaram durante os estágios iniciais da carbonificação ou que foram introduzidos por agentes de formação nos depósitos de turfa à medida que estes iam se formando e
- ❖ Minerais depositados durante a fase pós-consolidação do carvão, por soluções ascendentes ou descendentes em fraturas, fissuras, falhas ou por alteração dos minerais primariamente depositados.

Os minerais encontrados no carvão são: os argilosos (muscovita, illita, caulinita), os carbonatos (calcita, dolomita e siderita), os sulfetos (pirita e marcassita), os cloretos (silvita e halita) e os óxidos (quartzo, hematita e magnetita).

#### **3.6.4 - Comportamento dos Macerais Durante a Coqueificação**

Os diversos macerais durante a coqueificação se comportam especificamente da seguinte maneira:

##### a) Grupo da Vitrinita

Os macerais do grupo vitrinita são as principais substâncias do carvão, eles tornam-se plásticos e atuam como material ligante que envolve os constituintes inertes durante a coqueificação. Quando o carvão está oxidado, a vitrinita se comporta como um material inerte, durante a coqueificação.

##### b) Grupo da Exinita

Os macerais do grupo exinita tornam-se muito fluidos e se volatilizam mais que qualquer outro constituinte, durante a carbonização, exceto as resinitas de baixa reflectância. Eles também auxiliam na formação da estrutura porosa do coque, e aumentam a fluidez das vitrinitas reativas e eles associados.

##### c) Grupo da Inertinita

Os macerais do grupo inertinita possuem um alto teor de carbono, permanecem inertes durante a carbonização, e mantêm sua estrutura uniforme e livre em coque de alta temperatura.

##### d) Semifusinita

O maceral semifusinita atua em parte como reativo e em parte como inerte. A porção reativa é amolecida e fundida na estrutura do coque quando em contato com as vitrinitas reativas durante a coqueificação (carbonização), enquanto a porção inerte é pobremente amolecida e permanece inalterada, porém ambas as partes não perdem suas características estruturais.

### 3.6.5 - Características Petrográficas de Carvão

A avaliação petrográfica é feita em microscópio de luz refletida, usando-se seções polidas de amostras granuladas de carvão embutidas em resina epoxy ou poliéster. A quantificação dos constituintes básicos do carvão (macerais) é feita pela técnica de contagem de pontos e a avaliação do grau de carbonização (“rank”), envolve a determinação de refletância média do maceral vitrinita, sob imersão em óleo. O equipamento usado é um microscópio óptico adaptado com um contador de pontos e um fotômetro.

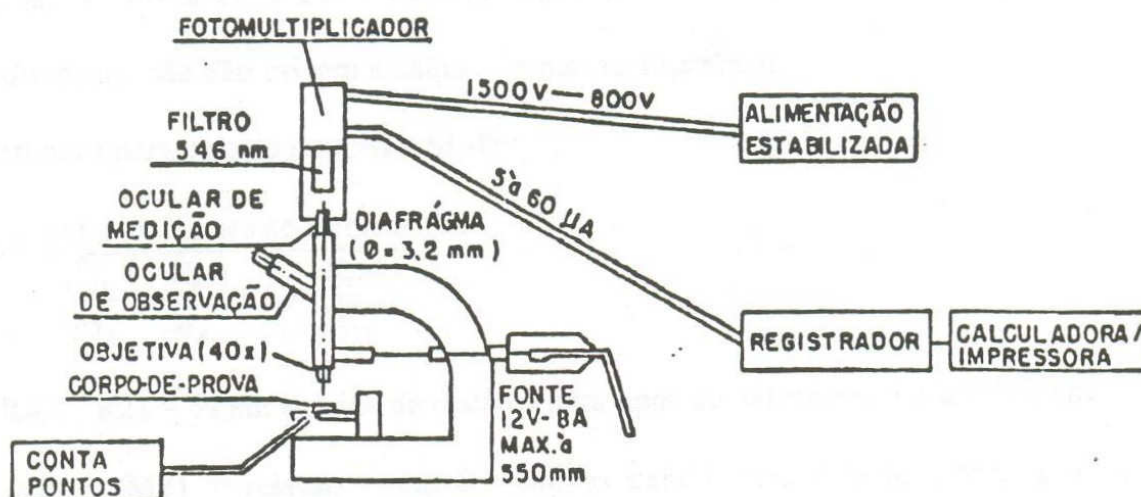


FIGURA 3.13 - Esquema de um microscópio petrográfico, segundo Oliveira (1996)

Baseando-se nos seus comportamentos durante a coqueificação os macerais são divididos em dois grupos: reativos (vitrinita, exinita e 1/3 da Semifusinita), que sofrem fusão e posterior ressolidificação, funcionando como ligantes e os inertes ( o restante da Semifusinita, fusinita, micrinita, inertodetrinita, esclerotinita e matéria mineral ) que não sofrem fusão, permanecendo, praticamente inalterados e são aglomerados durante o processo.

Diversos métodos de avaliação petrográfica de carvões e misturas foram desenvolvidos baseando-se no conceito de reativos e inertes, sendo que, o que teve maior notoriedade foi o de Shapiro-Gray. Onde são os índices:

- ✓ CBI – índice de composição de balanço ou índice de inertes, fundamentado no fato de que é improvável que um carvão, como ele ocorre na natureza, contenha a qualidade ótima de inertes para um máximo de resistência do coque;
- ✓ SI – índice de resistência ou índice de “rank”, com base na afirmativa de que os diferentes tipos de vitrinitas, mesmo quando misturados com seus teores ótimos de inertes individuais, não dão origem a coques de mesma resistência.

As fórmulas para cálculo do CBI e SI são:

CBI = Total de Inertes no Carvão

$$R_3/M_3 + R_4/M_4 + \dots + R_{21}/M_{21}$$

$R_3, R_4, \dots, R_{21}$  = % em volume de reativos para tipos de vitrinitas – V3 a V21 (Rn)

$M_3, M_4, \dots, M_{21}$  = relação ótima de reativos para as vitrinitas V3 a V21 ( Rn/ In).

$$SI = \frac{(K_3 \cdot R_3) + (K_4 \cdot R_4) + \dots + (K_{21} \cdot R_{21})}{\text{Total de Reativos no Carvão}}$$

Total de Reativos no Carvão

$K_3, K_4, \dots, K_n$  = índice de resistência de vitrinitas V3 a V21.

### 3.6.6 - Características plásticas dos carvões

A resistência do coque é controlada pelo “rank” médio e propriedades plásticas da mistura. Os fatores mais usados para avaliar as propriedades plásticas dos carvões são fluidez, dilatação e aglutinação.

#### - Fluidez (Plastometria Gieseler)

A fluidez aparente do carvão aglutinante coqueificante é válida por teste em plastômetro Gieseler, de toque constante, segundo ASTM D-2639. Este equipamento mede a rotação de um agitador de projeto especial (submetido a um torque 100g.cm)

numa carga compactada de 5g de carvão – 0,42mm. A medida que o carvão está sendo aquecido ( a 3°C min. Entre 300 e 500°C), é registrada a fluidez em divisões por minuto de um “ dial” (ddpm), acoplado ao agitador. Os parâmetros dos testes são a fluidez máxima (em ddpm ou log ddpm), temperatura de amolecimento, temperatura de fluidez máxima e temperatura de ressolidificação. A fluidez máxima é usada na formulação de misturas, devido da alta sensibilidade, apesar de baixa reprodutibilidade interlaboratorial.

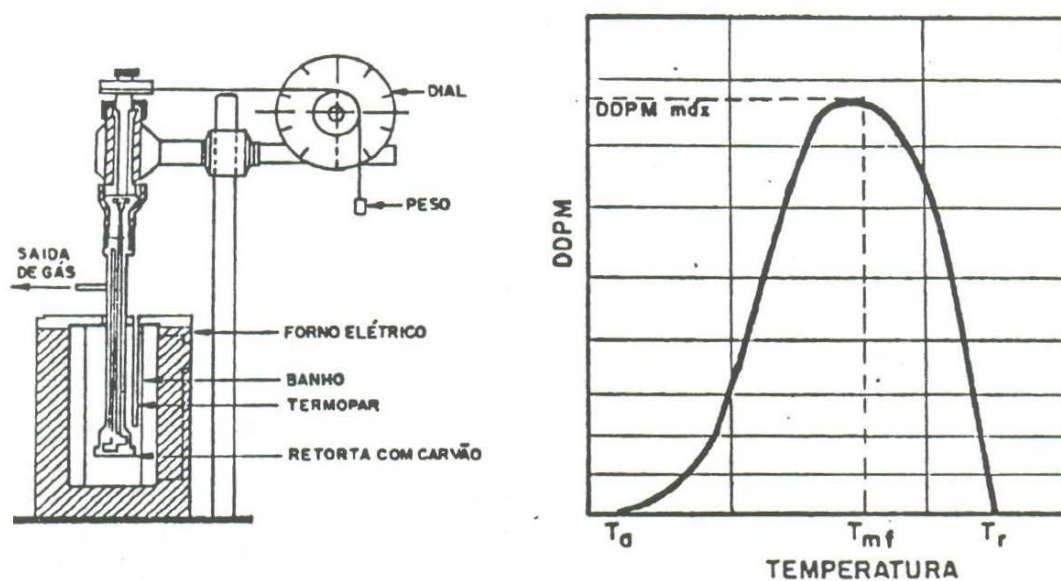


FIGURA 3.14 - Esquema de um Plastômetro Gieseler e a Curva de Fluidez, segundo Berkowitz, N apud Oliveira

#### - Dilatação (Dilatometria Audibert-Arnu)

As mudanças volumétricas que acompanham o aquecimento de um carvão aglutinante através de seu estágio plástico são convenientes medidas em um, dentre muitos dilatômetros concebidos em diversos países, dos quais o de maior aceitação é o Audibert-Arnu. O carvão – 0,2mm é o comprimido sob a forma de um lápis (6,5mm de diâmetro e 60mm de comprimento) com pequena conicidade, inserido m um tubo de metal de 80mm de diâmetro. Sobre o lápis é colocado um pistão de 7,8mm de diâmetro que juntamente com sua barra de extensão, aplica um peso de 150g sobre a carga do carvão. Geralmente, o interesse maior é acompanhar o comportamento do carvão aquecido entre 300 a 500°C a 3°C min. A variação do comprimento do lápis (

transmitida pelo pistão que se apóia sobre ele) em relação à temperatura é continuamente registrada em gráfico definido como parâmetro do teste a contração (a) e dilatação (b) e as temperaturas de amolecimento ( $T_a$ ), Temperatura de contração máxima ( $T_{mc}$ ) e de ressolidificação ( $T_r$ ).

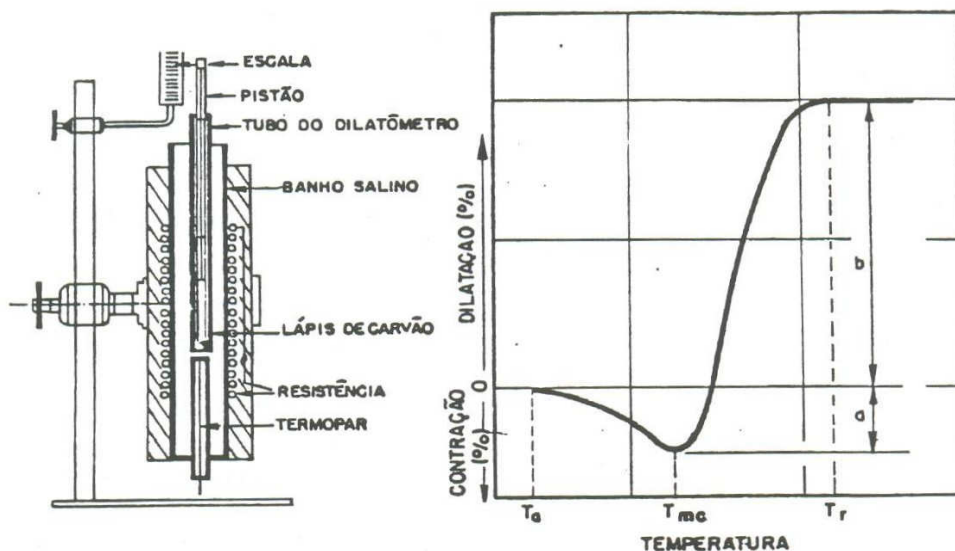


FIGURA 3.15 - Esquema de um dilatômetro Audibert-Arnu e a curva característica, segundo Berkowitz, N apud Oliveira

O carvão pode ser classificado em 6 grupos, de acordo com sua contração e dilatação, conforme é ilustrado pela tabela III.4, mostrando a capacidade do carvão coqueificar.

TABELA III.3 – Classificação da capacidade de coqueificação(4)

Resultado do Ensaio Dilatométrico	Grupo	Classificação
Não tem poder de amolecimento	0	Não coqueificável
Tem só contração	1	Muito pequeno poder coqueificante
Dilatação negativa	2	Pequeno poder coqueificante
Dilatação de zero a 50%	3	Médio poder coqueificante
Dilatação de 50% a 140%	4	Bom poder coqueificante
Dilatação 140%	5	Excelente poder coqueificante



### - Aglutinação (“Caking Index” da NSC)

Os testes de aglutinação de inertes foram os primeiros a serem utilizados sistematicamente na caracterização do poder aglutinante coqueificante de carvões. Eles visam determinar a capacidade de aglutinação de partículas de carvão no estágio plástico, quando misturadas às partículas de inertes. O teste de “caking index” foi desenvolvido pela *Nippon Steel Corporation*, e o valor obtido indica a quantidade de moinha de coque que é aglomerada por uma amostra de carvão em razão de seus constituintes aglutinantes, sendo medido pelo seguinte método.

“9g de moinha de coque são adicionadas a 1g de carvão e depois de adequado misturamento, é carbonizada por 7 min a 950°C. O produto é peneirado e a relação da quantidade de superior na peneira de 0,297mm para os 10g iniciais é tomada como índice de aglutinação”.

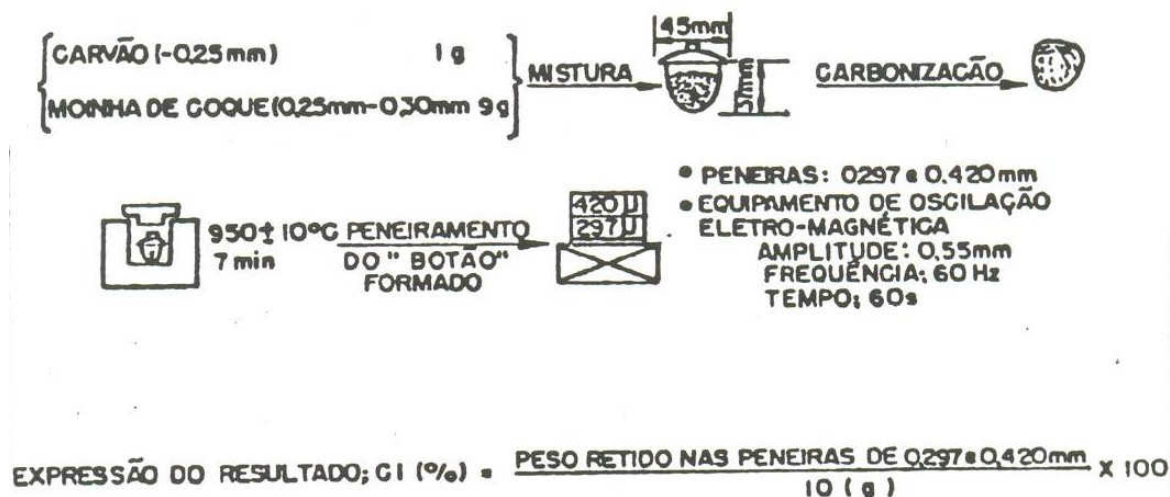


FIGURA 3.16 - Esquema de um ensaio de aglutinação da NSC (4)

Existem outros tipos de testes de aglutinação, por exemplo, o teste de Roga desenvolvido na Polônia e fornece um parâmetro opcional para a divisão em grupos da classificação internacional de carvão. Ainda pode-se citar o Teste Gray King, bastante usado no Reino Unido (1). Todos medem a capacidade de aglutinação do carvão.

### 3.7 - Beneficiamento de Carvões

A britagem de carvões é efetuada, para que se distribua mais homogeneamente a massa de carvões, durante o processo de misturamento. Assim, durante a coqueificação, quando os grãos se fundirem, proporcionam a suficiente quantidade de massa plástica, formando uma ligação intergranular mais forte, dando origem coques de alta resistência.

### 3.8 - Misturas de Carvões

As propriedades fundamentais na determinação das misturas ótimas para produção de coque metalúrgico conduzem ao estabelecimento de um tipo de mistura clássica.

Essa mistura clássica se baseia em dois aspectos mais importantes, como se vê a seguir:



FIGURA 3.17 - Parâmetros básicos das propriedades coqueificantes e petrográficas, segundo Oliveira (1996)

Os parâmetros acima são fundamentais na formação do coque resultante e são esses parâmetros que determinam o comportamento do coque quanto à micro e macro fissuração, porosidade e textura.

#### 3.7.1 - Máxima Fluidéz:

Numa mistura, é fundamental a presença de carvões que tenham a amplitude entre as temperaturas de amolecimento e de solidificação superior aos demais carvões, para que não haja descontinuidade entre ressolidificação e amolecimento.

Segundo Sakawa, qualquer descontinuidade seria responsável pela queda da resistência do coque, devido à má aglomeração das partículas, na fase plástica, conforme figura abaixo:

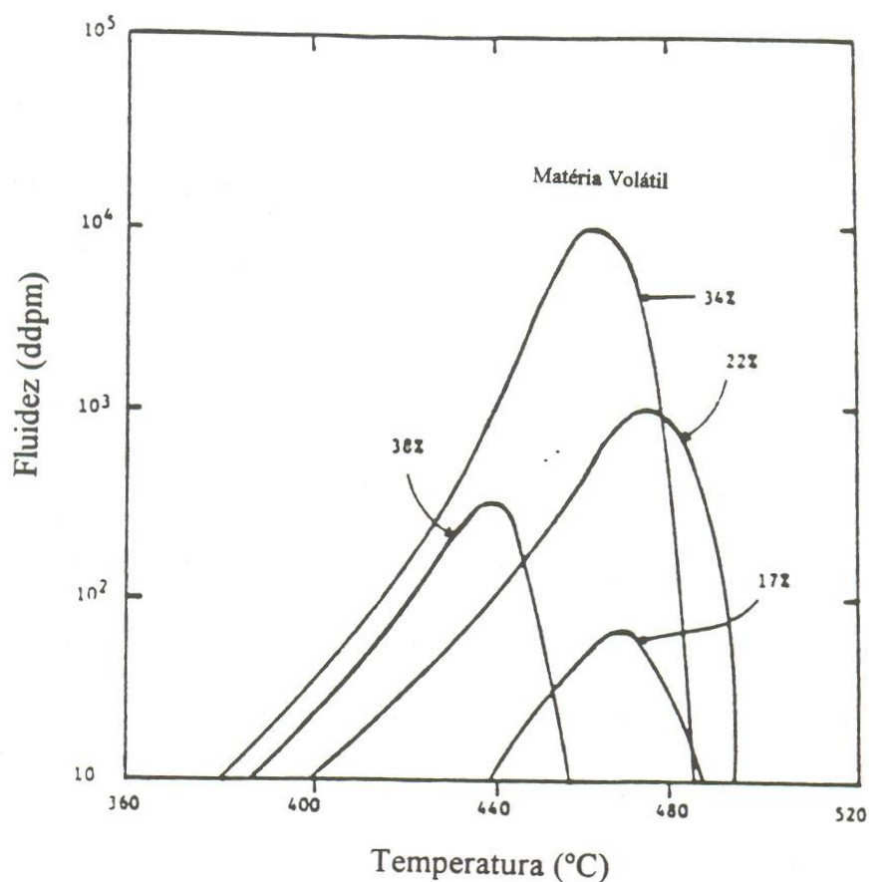


FIGURA 3.18 - Curvas das características da fluidez de diversos carvões (5)

A presença de carvões de alta fluidez torna-se indispensável, principalmente se existe a presença de carvões de baixo poder coqueificante na mistura, os quais possuem fluidez nula, de modo geral, significativa durante todo o processo de coqueificação, conferido à mistura uma boa aglomeração e conseqüentemente um coque resistente.

Os constituintes petrográficos influem diretamente sobre a fluidez da mistura. Os macerais dos grupos da vitrinita tornam-se plásticos e atuam como material ligante que envolve os constituintes inertes durante a carbonização. Os constituintes do grupo da exinita tornam-se muito fluidos e se volatilizam mais que os constituintes dos outros grupos. E, finalmente, os constituintes do grupo da inertita permanecem inalterados durante a coqueificação exercendo um efeito depressivo sobre a fluidez, efeito este sendo mais significativo quanto mais finamente estiverem britados. Se os grãos inertes se apresentarem demasiadamente grossos, poderão causar centros de fissuração em função das diferentes velocidades de contração que possuem em relação aos constituintes reativos. A fluidez o total de inertes devem ser, portanto, bem dimensionados para cada índice de operação das baterias.

### **3.7.2 - Degradação por fissuração**

Neste processo de degradação, o coque solicitado a esforço intenso provocado por forças de compressão, sofrerá uma redução granulométrica devido ao rompimento das fissuras. As fissuras desenvolvem-se na fase final da coqueificação resultantes de contrações diferenciais no semicoque.

Para se reduzir o número de fissuras, pode-se atuar na participação dos carvões de alto "*rank*" ou baixo voláteis. É medida que adições crescentes de carvão de "alto" *rank* são feitas, eleva-se a temperatura de ressolidificação e reduz-se a velocidade de contração do semicoque, reduzindo assim o processo de formação de fissuras. A mistura deve, portanto, apresentar um *rank* máximo, a partir do qual, adições posteriores de carvões de elevado *rank* não produzam melhoras apreciáveis à resistência a fissuração do coque.

### **3.7.3 - Método de previsão do Índice de Resistência a Frio do Coque**

Segundo Miyazu et alli, o conceito de fluidez como um fator importante na mistura, combinada com a reflectância das vitrinitas são o que definem o método de previsão a frio do coque. Inicialmente o modelo contemplava somente carvões americanos, australianos e japoneses, porém esse modelo foi atualizado a partir da entrada de outros carvões de outros países que foram incorporados na mistura.

Neste modelo foi desenvolvida uma área ótima para obtenção de coque com boa resistência mecânica a frio, situado a uma faixa de 200 a 1000 ddpm. A figura 3.9 apresenta o diagrama MOF onde estão localizados alguns carvões individuais e ressaltando o campo de mistura de carvões para a produção de coque com boa resistência mecânica.

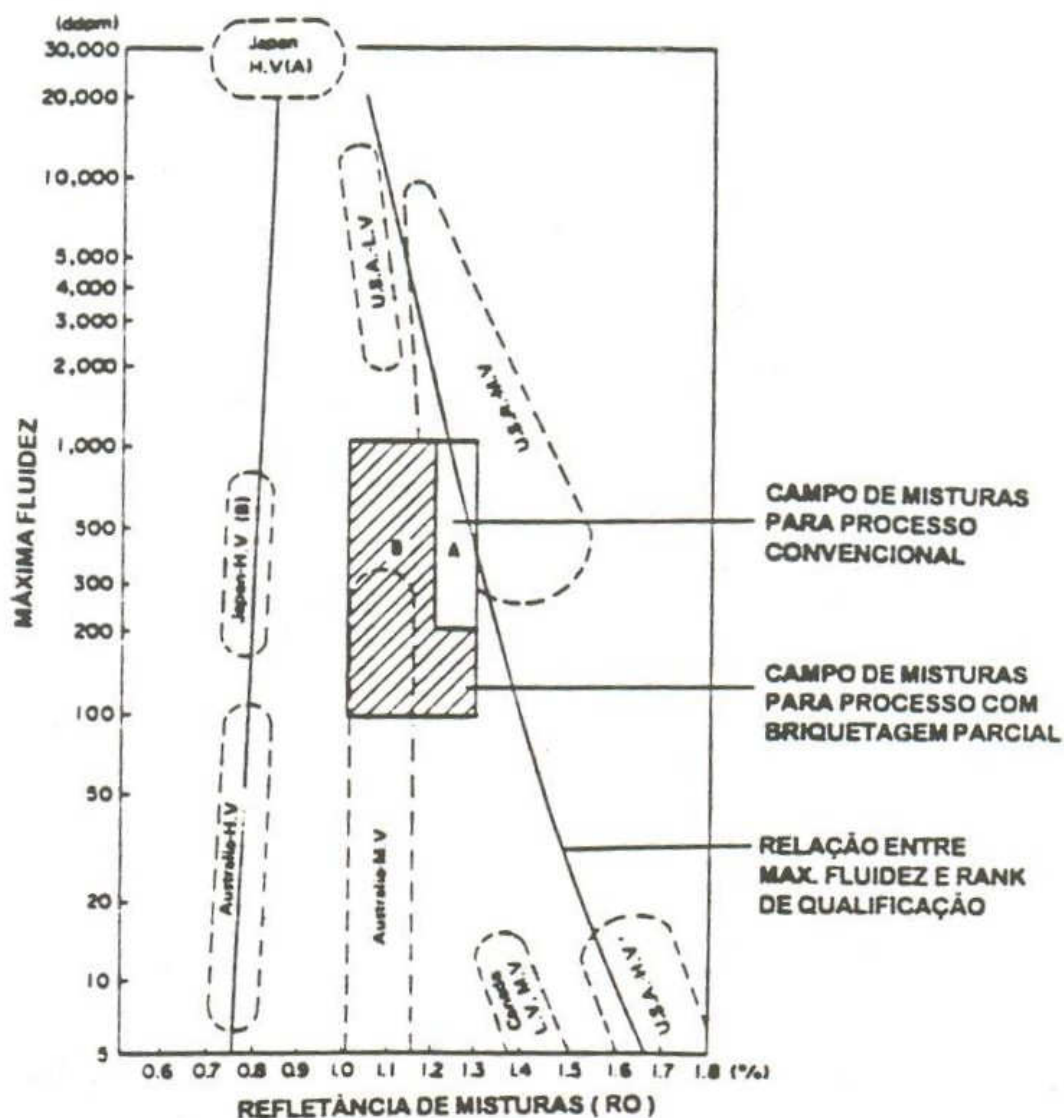


FIGURA 3.19 - Diagrama MOF (Miazu, Okuyama e Fukuyama)(8)

Para que se tenha um coque coeso, com boa resistência mecânica e abrasão, é necessário que a mistura e coqueificação tenha suficiente massa flexível, permitindo aglomerar os grãos que permanecerem sólidos, e devem apresentar também, uma fluidez mínima que capacite à mistura, durante a desgaseificação primária, fluir com

facilidade e ocupar os espaços vazios entre os grãos aglomerando-os. Mas, acréscimos na fluidez mínima não trazem benefícios, pelo contrário, podem ser até prejudiciais quando excessivos, desencadeando um processo de efervescência e gerando um coque poroso e de baixa resistência. À abrasão, baixa densidade e alta reatividade.

#### **3.7.4 – Uso de Coque Petróleo**

O coque petróleo é um resíduo resultado da destilação do petróleo, na qual é usado na mistura de carvões principalmente como corretor, sendo um aditivo inerte. Caracteriza-se por baixo teor de matéria volátil.

O coque petróleo usado na Gerdau Açominas é oriundo da REGAP (Refinaria Gabriel Passos – Betim – MG), e além dessas características possui um baixo teor de enxofre, devido às características do petróleo refinado, diferenciando-se dos demais coques petróleos que possuem altas taxas de enxofre.

Por ser um aditivo inerte, o coque petróleo age como elemento antifissurante, diminuindo a contração média do semicoque e conseqüentemente, a formação de fissuras, favorecendo um aumento do tamanho médio e da resistência mecânica, com isso é importante uma granulometria muito fina (<0,5mm), a fim de não causar problemas durante o processo de aglutinação do carvão/coque <sup>(13)</sup>.

#### **3.8 – Processos para Utilização de Carvões de Baixo Poder Coqueificante**

Uma coqueria pode produzir coque com menor custo possível, e ao mesmo tempo atendendo as necessidades do cliente. O principal fator de custo para a produção de coque é justamente o preço de carvões HCC (*Hard Coking Coals*), e o que determina a diferença entre este tipo de carvão com outros com poder de coqueificação menor é a propriedade de aglutinação durante a coqueificação. Quando somamos processos suplementares como briquetagem, briquetagem parcial ou pré-aquecimento de carvões, todos eles são eficientes para o aumento da carga de carvões com baixo poder coqueificante na mistura, isso para o processo de coqueificação em fornos convencionais.

Mas o melhor processo que permite atingir uma maior densidade de carga é o de *Stamping Charge* (Carga Estampada) <sup>(12)</sup>, este método permite a maior utilização de carvões com baixo poder coqueificante e carvões com alto teor de inertes, esse método pode ser aplicado tanto em fornos convencionais como em plantas *Heat Recovery*, que tem a grande vantagem de ser um processo com um nível mínimo de poluição, pois trabalha com pressão negativa nos fornos.

A planta *Heat Recovery* (com recuperação de calor), conforme figura III.4, difere de uma planta convencional (sem recuperação de calor) nos seguintes aspectos <sup>(16)</sup>:

- a) A chama é localizada na parte superior da carga, fornecendo calor e gerando gases, mas não prejudicando a atmosfera redutora nos locais onde o coque está sendo fabricado.
- b) Os gases gerados precisam ser somente parcialmente oxidados diretamente acima da massa carvão / coque, mas totalmente queimado nas câmaras de combustão abaixo do piso das soleiras. Ainda, a transferência do calor radiante do topo e condução do calor a partir do piso da soleira deverá facilitar na colocação equidistante da junção da camada plástica contida na massa do coque, resultando na qualidade uniforme do coque.
- c) A transferência da massa de convecção dos gases oxidantes ( $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$ ) para o carvão sendo carbonizado abaixo, necessita ser minimizada.
- d) A expansão voltada para cima da massa do carvão em um espaço aberto livre sobre a coroa necessita ser minimizada para se obter uma qualidade melhor do coque.

Além disso, existe aspectos de projetos que diferem conferindo algumas diferenças importantes para definição de qual melhor processo, isso é mostrado na tabela III. 4.

TABELA III.4: Quadro Comparativo de Características entre Coquerias (*Heat Recovery* X Convencional) <sup>(17)</sup>

	Convencional	<i>Heat Recovery</i>
Investimentos	Similar	Similar
Consumo de água industrial	Grande	Pequena
Consumo de energia elétrica	Pequena	Maior em 20% em relação à coqueria convencional
Staff	50% maior que a <i>Heat Recovery</i>	Menor
Produção de Carboquímicos	Produz: COG, alcatrão, óleo leve, BTX	Vapor para geração de energia
Controle ambiental	Necessita de equipamentos para controle ambiental	Não polui, opera com pressão negativa
Custo da Mistura	Usa carvões de 1ª linha ( <i>Hard Coking Coals</i> )	Mistura mais barata (55% HCC, 10% antracito, 35% <i>Soft e noncoking coal</i> )





Figura 3.20: Imagem da Coqueria *Heat Recovery* com *Stamp Charging* ,na San Jia Coking Company, Cidade de Gao Ping, Província de Shanxi –China (Setembro de 2007) (17)

Segundo Dr. Amit Chatterjee (18), especialista de coquerias com uso de *Stamp Charging* e consultor da Tata Steel salienta que definitivamente o processo de produção de coque, usando-se o processo de “*Stamp Charging*” é o mais conveniente para aumentar o uso de carvões de fraco poder coqueificantes como os “*Non-Coking Coals* ou *Soft Coking Coals*” sem prejuízo da qualidade previamente requerida pelo alto-forno(17).

O Processo de estampagem do bolo a coqueificar confere a massa de coque um estupendo aumento da resistência mecânica e do CSR do Coque, permitindo assim o empobrecimento da mistura, com introdução de carvões mais baratos. Esse acréscimo de qualidade é demonstrado diretamente na operação dos altos-fornos da Tata Steel, aumentado a produtividade e maior estabilidade operacional a partir de 1992 (FIGURA 3.21).

TABELA III.5: Comparação da qualidade do coque entre baterias Convencionais (*top charge*) e com “*stamp charging*” na Tata Steel <sup>(17)</sup>

Parâmetros de Qualidade do Coque	Coqueria Convencional	Coqueria Convencional com “ <i>Stamp Charging</i> ”
CSR (%)	60,58	65,28
CRI (%)	25,33	25,04
Rendimento Coque/Carvão (%)	66,42	68,02
Cinzas (%)	18,65	19,07
Umidade (%)	5,36	4,9

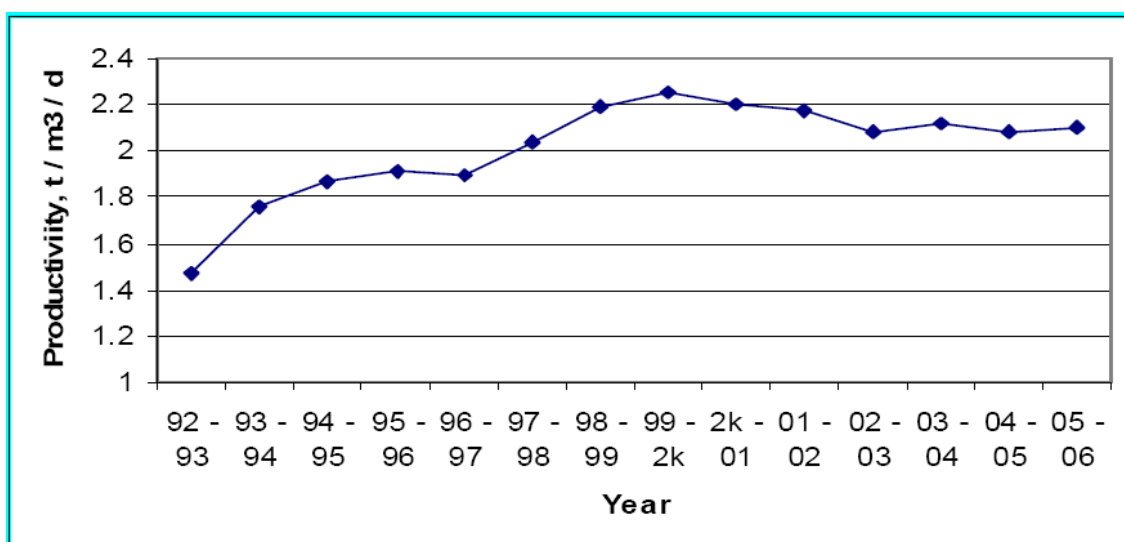


FIGURA 3.21: Gráfico de Desempenho da Produtividade do alto-forno da Tata Steel com uso de coque “*Stamp Charging*”

No caso da Índia, o processo de “*Stamp Charging*” nas baterias de 4,5 m de altura está com a tecnologia totalmente dominada, e para as baterias com 6 m de altura de forno há um fenômeno chamado de “Fenômeno do Colapso da Carga”, fato que mostra um colapso no bolo de carvão compactado durante o enformamento, no qual esse bolo acaba se desmoronando parcialmente em sua entrada do forno, perdendo a densidade de carga compactada como também causando atrasos operacionais dependendo do colapso.

Durante o processo de coqueificação com a carga compactada a alta densidade aparente do leito do carvão afetaria a qualidade do coque das seguintes formas <sup>(16)</sup>:

a) Isto ajudaria a reter os produtos de decomposição de peso molecular baixo; fornecendo componentes plasticificantes (reativos) os quais promoveriam as interações de aglutinação e umidificação;

b) Isto produziria espaços vazios mais baixos no leito do carvão, pelo qual a dilatação mais baixa seria necessária para produzir coque totalmente fundido o qual, por sua vez ajudaria a controlar a formação de fissuras menores e maiores.

Em adição, a matéria mineral altamente refratária, disseminada no carvão por compactação de carga, em bateria convencional, afetaria a qualidade do coque.

a) abaixando a taxa Base / Ácida a qual não catalisaria a reação de gaseificação do CO<sub>2</sub>.

b) Incorporando bem dentro da matriz da parede da célula, resultando em paredes de células mais espessas.

c) Derretendo e por isso protegeria o carbono da gaseificação do CO<sub>2</sub>.

Também deverá ser também mencionado, que o alto conteúdo inerte, fluidez e *rank* da mistura por compactação de carga sem recuperação de calor fez um papel importante no desenvolvimento de uma estrutura de parede de célula mais espessa através da incorporação e fusão, segundo Valia.

A compactação de carga em ambos os projetos de coqueria, seja convencional ou *Heat Recovery* é feita através de martelos mecânicos ou hidráulicos, conforme figuras abaixo, conferindo uma densidade de carga entre 1000 e 1100 kg/m<sup>3</sup>.



FIGURA 3.22: Martelos mecânicos para uma coqueria Heat Recovery com Compactação de Carga, na San Jia Coking Company, Cidade de Gao Ping, Província de Shanxi –China (Setembro de 2007)(17)



FIGURA 3.23: Martelos mecânicos para uma coqueria Convencional com Compactação de Carga (18)

Os benefícios adquiridos com a adoção da compactação de carga <sup>(15)</sup> na Tata Steel foram os seguintes:

- Qualidade do Coque (CSR e CRI) melhoraram consideravelmente;
- Insignificantes efeitos da mistura de carvões nas propriedades do coque;
- Custo eficaz (o coque de “*Stamp charging*” é por volta de 25% mais barato do que o coque de uma coqueria convencional sem compactação de carga);
- A produtividade do alto-forno tem alcançado até agora níveis imprevisíveis, superando expectativas.

#### 4 – METODOLOGIA

A metodologia a ser empregada consistirá em três etapas nas quais serão feitas as caracterizações necessárias das matérias primas (Carvão Santa Catarina e Coque Petróleo) e carvões *hard*, como também das próprias misturas formuladas, além disso, será analisado o coque em escala piloto obtido pelas caracterizações e misturas, as conclusões serão feitas a partir da teoria revisada, a através das equações de correlação do Forno Piloto de Coque com a planta industrial.

**1ª Etapa: Caracterizações:** Serão feitas as caracterizações individuais das matérias primas (Carvão Nacional Santa Catarina, Carvão Colombiano Cundinamarca e Coque Petróleo) e das misturas que serão elaboradas com diferentes proporções, essas caracterizações serão feitas em laboratório e seguindo as normas conforme tabela IV. 1

**2ª Etapa: Testes no Forno Piloto:** As misturas serão testadas em escala piloto simulando duas situações: i) A primeira situação é o enforamento no sistema convencional, na qual se simulará a coqueificação das cargas de acordo com as baterias da Gerdau Açominas; ii) A segunda situação será feita baseada nos artigos da Tata Steel (10) e (11), na qual será simulada para as mesmas misturas uma compactação de carga, aumentando sua densidade, conforme a tecnologia de *Stamping Charge*.

**3ª Etapa: Análises dos Coques Produzidos:** Nessa etapa serão feitas as análises dos coques dos testes realizados em escala piloto conforme a etapa anterior,



e os resultados farão parte da conclusão do trabalho, comparando os processos de coqueificação e as necessidades do alto-forno.

TABELA IV. 1: Normas das análises para carvões da ASTM(4)

<b>ANÁLISES E ENSAIOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS CARVÕES E MISTURAS</b>			
<b>ANÁLISES E ENSAIOS</b>	<b>CONTEÚDO</b>	<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>MÉTODO</b>
<b>PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS</b>	<b>REPRESENTATIVIDADE DO LOTE</b>	<b>1 / Carvão e 1 / Mistura</b>	<b>JIS M 8811</b>
ANÁLISE IMEDIATA	CINZA	1 / carvão	ASTM - D - 3174
	MATÉRIA VOLÁTIL	e	ASTM - D - 3175
	ENXOFRE TOTAL	1 / mistura	ASTM - D - 2492
	UMIDADE	1 / carvão / forno	ASTM - D - 3173
COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CINZA	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, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, TiO <sub>2</sub>	1 / carvão e 1 / mistura	Absorção atômica
SOLE HEAT OVEN	Contração / expansão (pressão Coq. - psi)	1 / carvão 1 / mistura	ASTM - D - 2014
PLASTOMETRIA GIESELER	Fluidez em Log. da máx. DDPM	1 / carvão 1 / mistura	ASTM - D - 2639
MICROSCOPIA ÓTICA	Composição maceral poder refletor	1 / carvão 1 / mistura	Adaptação das normas ASTM - D - 2798 e ASTM - D - 2799
PREVISÃO DO CSR	Prever a resistência por equação teórica	1 / carvão 1 / mistura	NSC / AÇOMINAS
GRANULOMETRIA	Percentual retido na série de peneiras	1 / carvão 1 / mistura	AÇOMINAS
BULK DENSITY	Densidade de carga	1 / mistura	ASTD - D - 291

O quadro abaixo mostra todas as análises que serão feitas para a conclusão do estudo.

Tabela IV. 2: Conjunto de Amostras para Análises

Amostras	Coqueificação	Produtos
Carvão Santa Catarina Coque Petróleo Carvão Colombiano Misturas-testes	<b>Forno Piloto</b>  <b>Misturas-testes</b>  <b>(Coqueificação com densidade normal, coqueificação com alta densidade de carga – Stamp Charging)</b>	Coque das misturas

#### 4.1 - Misturas de Carvões

O modelo de cálculo da mistura da Gerdau Açominas baseia-se pela confecção do reflectograma da mistura através do cálculo baseado na caracterização dos carvões individuais, sempre buscando seguir a forma da curva de Gauss (curva normal) na qual , de acordo com Sakawa e Miazu esse formato faz com que se obtenha a resistência mecânica máxima do coque. Para os demais parâmetros aplicam-se as equações abaixo, para que se tenha o coque de qualidade adequada para o alto-forno:

Rendimento Coque /carvão

Onde,

$\eta$  = rendimento coque/carvão

MV =Matéria volátil da mistura

Cinza da Mistura

$$C_{zmist} = \sum_{i=1} X_i C_{zi}$$

Onde,

$X_i$  = % de contribuição do carvão na mistura C

$C_{zi}$  = Cinza do carvão i

Cinza do Coque

$$C_{zc} = (C_{z\ mist} / \eta)$$

Onde,

$C_{zmist}$  = cinza da mistura

$\eta$  = rendimento coque/carvão

Matéria Volátil da Mistura

$$MV_{\ mist} = \sum_{i=1}^n V_i x_i$$

Onde,

$MV_i$  = matéria volátil do carvão

Enxofre do Coque (Eq. Experimental da Gerdau Açominas)

$$S_c = 0,501 \times S_{\ mist} + 0,207$$

Reflectância Estatística Média

$$Re_{\ mist} = \sum_{i=1}^n x_i Re_i$$



Onde,

Re= Reflectância estatística média do carvão i

Fluidez da mistura

$$\text{Log MF} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \text{Log Mfi}$$

Onde,

Log Mfi = logaritmo da máxima fluidez do carvão i

Carbono fixo do Coque

$$\text{CF} = 100 - (\text{CZc} - \text{MVc})$$

Onde,

MVc = matéria volátil do coque

#### 4.2 - Metodologia para avaliação de características coqueificantes de carvão.

**TABELA IV.3 : Metodologia a ser empregada para o estudo, baseado na proposta de caracterização de carvões (8)**

Carvão	Coqueificação	Coque
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carvão Colombiano</li> <li>• Coque Petróleo REGAP</li> <li>• Carvão Santa Catarina</li> <li>• <i>Blended Coal # 1</i></li> <li>• <i>Blended Coal # 2</i></li> <li>• <i>Blended Coal # 3</i></li> <li>• Mistura # 1</li> <li>• Mistura #2</li> <li>• Mistura #3</li> <li>• Mistura #4</li> <li>• Mistura #5</li> <li>• Mistura #6</li> </ul>	<p><b>Forno Piloto</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carvão Colombiano</li> <li>• Coque Petróleo REGAP</li> <li>• Carvão Santa Catarina</li> <li>• <i>Blended Coal # 1</i></li> <li>• <i>Blended Coal # 2</i></li> <li>• <i>Blended Coal # 3</i></li> <li>• Mistura # 1</li> <li>• Mistura #2</li> <li>• Mistura #3</li> <li>• Mistura #4</li> <li>• Mistura #5</li> <li>• Mistura #6</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise Granulométrica</li> <li>• Reflectância Média</li> <li>• Análise de Macerais</li> <li>• Teor e Composição de Cinzas</li> <li>• Teor de Enxofre</li> <li>• Matéria Volátil</li> <li>• Fluidez Gieseler</li> <li>• Teste de Contração/Expansão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle de Temperatura de Parede e carga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise Granulométrica</li> <li>• Tamanho médio do Coque</li> <li>• Teor de Cinzas</li> <li>• Matéria Volátil</li> <li>• Resistência Mecânica (DI)</li> <li>• Resistência Mecânica após reação (CSR)</li> <li>• Teor de Enxofre</li> <li>• Umidade</li> </ul>

A representatividade de amostra e as freqüências para a metodologia são conforme padrões já mostrados na TABELA IV. 1: Normas das análises para carvões da ASTM(4), sendo usados na rotina operacional da Gerdau Açominas para caracterização de carvões, misturas e coques.

### 4.3 Metodologia para enformamento em escala piloto para "*Stamp Charging*"

Para a preparação do enformamento no forno piloto simulando o "*stamp charging*", usou-se lata de 18l conforme figura abaixo, devido à dificuldade de deslocar a carga compactada de carvão para dentro do forno, haja vista que o projeto deste forno piloto não contempla equipamentos periféricos para a simulação de enformamento com carga compactada, essa lata é normalmente usada em testes tanto no forno piloto como em escala industrial para mensurar qualidade do coque durante enformamento ou calcular rendimento coque/carvão, sendo esse tipo de teste conhecido como "*box test*". As latas foram preparadas conforme desenho abaixo:

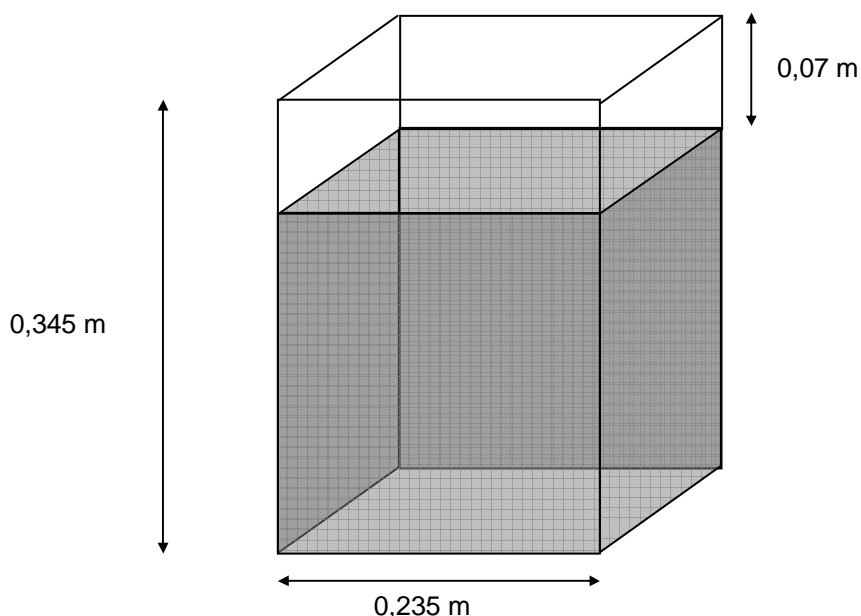


FIGURA 4.1: Esquema mostrando as dimensões da lata de 18l usada para a compactação de carga.

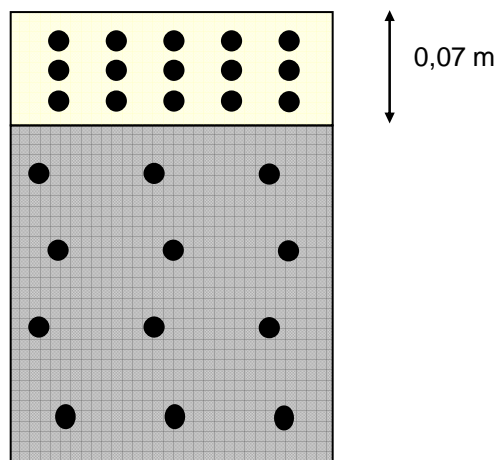


FIGURA 4.2: *Lay out* dos furos feitos para a saída da matéria volátil da mistura de carvão

TABELA IV.4 : Dados do cálculo da densidade de carga para simular “*stamp charging*”

Altura (lata)	m	0,275
Área da base (lata)	m <sup>2</sup>	0,055225
Volume utilizado (lata)	m <sup>3</sup>	0,015187
Massa da Mistura (base úmida a 8% de H <sub>2</sub> O)	kg	16,5
Densidade de Carga Esperada	kg/m <sup>3</sup>	1086,464

Além disso, foi montada uma mesa conforme medida da altura de base do forno para que se realizassem os enforamentos com a ajuda da máquina desenforadora do forno piloto, as fotos a seguir mostram a seqüência para enforamento desde a preparação da carga até o enforamento.

Para a compactação foi usada uma ferramenta feita exclusivamente para essa tarefa de forma manual conforme a FIGURA 4.3.



FIGURA 4.3: Operador “compactando” mistura na lata para teste “Stamp Charging” no forno piloto.

## 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Conforme procedimento mostrado no Capítulo 4, abaixo estão listados os principais resultados e discussões das caracterizações, testes e análises feitos em laboratório da Gerdau Açominas, que serão apresentados nas três etapas propostas (Caracterizações, Testes do Forno Piloto (Convencional e “Stamp Charging”) e Análise dos Coques Produzidos)

### 5.1 Resultados e Discussões da 1ª Etapa Caracterizações

#### Carvão Colombiano

Este carvão entrou no plano de testes, devido a oportunidade econômica da Gerdau Açominas em adquirir Minas de Carvão no continente sul-americano, podendo este ter o mesmo tratamento que um carvão nacional, porém os carvões colombianos diferente dos nacionais, têm características coqueificantes muito melhores, mas sua extração por ter um relevo altamente acidentado é mais custosa, além da situação econômica deste país, não ser melhor que o Brasil, principalmente no aspecto logístico, podendo ser este um fator penalizador para a redução de custo de matérias-primas na mistura.

Conforme anexos 7.1 e 7.2, na qual temos os resultados em laboratório deste carvão, os que mais se destacam são os seguintes parâmetros:

- Dilatometria Audibert-Arnu: o resultado de contração de -16,5% e expansão de 13,0%; mostra que é um carvão de bom poder coqueificante, que durante a coqueificação ajuda na aglutinação dos reativos com os inertes da mistura.

- Plastometria Gieseler: O resultado de 2,2 no log de máxima fluidez, mostra ser um carvão que reforça esse parâmetro importante para o aumento de resistência mecânica à frio do coque.

- Análise Petrográfica e Refletância das Vitrinitas: a quantidade de 68% de vitrinita é um fator característico de reatividade deste carvão durante a coqueificação, e os tipos de vitrinita mostrado em sua refletância média de 1,29; é altamente favorável na mistura para a resistência mecânica à frio do coque.

- Análise Imediata: o parâmetro de Cinzas de 7,99% é considerado de boa proporção ajudando no equilíbrio deste na mistura, a matéria volátil de 22,17% mostra que é um carvão médio-baixo volátil contribuindo no rendimento coque/carvão.

E para um enxofre de 0,64 % apesar de ser um pouco alto, não chega a comprometer no balanço de enxofre para a mistura de carvões.

- Composição química das Cinzas: os teores de  $FE_2O_3$ , CaO e álcalis favorecem e muito a resistência à quente do coque (CSR), tornando esse carvão interessante para reforço deste parâmetro na mistura.

Principalmente por esses resultados e já tendo testado este carvão em escala industrial na mistura da Gerdau Açominas, considerarei este carvão como *hard* ou de alto poder coqueificante, para o teste em mistura do forno piloto.

### Coque Petróleo

Como já comentado nas referências bibliográficas o coque petróleo é um aditivo inerte na mistura que tem como objetivos aumentar o rendimento coque/carvão e reduzir o percentual de cinzas na mistura, fora essas vantagens não contribui em nenhum parâmetro coqueificante da mistura, e dependendo da proporção chega a depreciar estes parâmetros. Já há alguns anos que a Gerdau Açominas utiliza em sua mistura o coque petróleo da Petrobrás, oriundo principalmente da REGAP (Refinaria Gabriel Passos) em Betim – MG, contribuindo com esses objetivos já citados e também uma maior independência de carvões importados.

Os resultados apresentados no anexo FIGURA 7.5 mostram como resultados a destacar, o percentual de cinzas de 0,33% e a matéria volátil de 10,31%.

### Carvão Santa Catarina

Os resultados deste carvão cabem alguns importantes comentários, a expectativa que se tinha em testar este carvão na mistura era em cima do histórico técnico que se tinha deste carvão na época da Siderbrás, que apesar ter alto teor cinzas, alta proporção de enxofre e matéria volátil, tinha em contrapartida uma fluidez elevada e um certo poder coqueificante avaliado na dilatométrica. Porém de acordo com os resultados da caracterização, estes foram bem diferentes do esperado (histórico) conforme as tabelas V.1, V.2 e V.3, e isso se devem aos seguintes fatos:

-O fornecedor da amostra deste carvão não teve como preparar a amostra, isso quer dizer não pode fazer uma lavagem deste carvão, isso segundo o fornecedor que produz carvão exclusivamente para abastecer termoelétrica em Santa Catarina, não pode parar a rota para que se fizesse esse tratamento devido a alta demanda de fornecimento;

- Mesmo que fosse feita essa lavagem que pelo menos favoreceria na redução do percentual de cinzas e enxofre, provavelmente não se teria as mesmas características metalúrgicas encontradas no passado, isso porque não existe mais a estação de tratamento de carvão, que desempenhava a função de enriquecer as propriedades coqueificantes para as usinas siderúrgicas integradas a coque.

- No teste de dilatométrica o resultado da amostra não apresentou dilatação, mostrando que essa amostra não tem poder coqueificante algum, comparado com o histórico do Carvão Santa Catarina em que apresentava um bom desempenho neste teste, nas tabelas a seguir mostram outras e grandes diferenças entre o Santa Catarina (histórico) e a amostra recebida,

- Para a refletância média o valor anterior de 0,88 passou para 0,958 na amostra atual,

- e o outro importante fato é a quase exaustão do veio na qual se fazia a extração deste carvão metalúrgico que é o Barro Branco, essas atuais extrações atingem também veios adjacentes, que não tem as boas características metalúrgicas do carvão, contribuindo também com essa diferença na qualidade.

TABELA V.1: Comparativo de Resultados do Carvão Santa Catarina (Química das Cinzas)

Análise Química das Cinzas												
	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	Alcalis
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Histórico	<b>8,35</b>	<b>54,9</b>	<b>26,9</b>	<b>0,06</b>	<b>1,92</b>	<b>0,79</b>	<b>0,16</b>	<b>3,1</b>	<b>0,31</b>	<b>2,12</b>	<b>0,16</b>	<b>3,57</b>
Amostra Atual	<b>4,76</b>	<b>55,7</b>	<b>30,8</b>	<b>0,03</b>	<b>0,97</b>	<b>0,66</b>	<b>0,13</b>	<b>2,26</b>	<b>0,36</b>	<b>1,61</b>	<b>0,02</b>	<b>2,64</b>

TABELA V.2: Comparativo de Resultados do Carvão Santa Catarina (Análises Físico química e imediata)

	Análise Físico Química									
	Análise Imediata			Plastômetro Gieseler						
	Cinzas	MV	S	Máxima Fluidiez (ddpm)	log. Max. Fluidiez	Temp. Máx. Fluidiez	Temp. Amolecimento	Temp. Solidificação	Faixa Plástica	
	%	%	%	ddpm	log ddpm	°C	°C	°C	°C	
Histórico	<b>17</b>	<b>33</b>	<b>1,59</b>	<b>30000</b>	<b>4,48</b>	<b>453</b>	<b>440</b>	<b>493</b>	<b>53</b>	
Amostra Atual	<b>35,24</b>	<b>23,02</b>	<b>1,61</b>	<b>59558</b>	<b>4,77</b>	<b>444</b>	<b>388</b>	<b>488</b>	<b>100</b>	



TABELA V.3: Comparativo de Resultados do Carvão Santa Catarina (Análise Petrográfica)

Análises Petrográficas da Mistura Enfornada na Piloto																
Grupo Maceral	Análise dos Macerais															
	Reativos					Inertes										
	Exinita				Total de Reativos	Inertinita										Total de Inertes
	Telinita e Colinita	Esporinita	Cutininita	Resinita		Semifusinita	Esclerotinita	Micrinita	Macrinita	Fusinita	Inertodetrinita	Mat. Mineral	Vit. Oxidada	Vit. Alterada		
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
Histórico	54	12	0	0	72	9	0	0	0	1	15	9	0	0	28	
Amostra Atual	42,2	2,2	0	0	67,6	34,8	0	0	0	0,2	15	16,2	0	0	43	

### Blended Coal

Conforme metodologia foram propostos três *blends* de coque petróleo com o carvão Santa Catarina, para que um fosse escolhido e seja o representante “nacional” das misturas-testes. E a análise imediata abaixo mostra como ficou a caracterização destes *blends*.

TABELA V.4: Comparativo dos Resultados da Análise Imediata para os *Blended's Coals* testados

Proporção do <i>Blended Coal</i>	Matéria Volátil (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Blended Coal 50%CP e 50%SC	18,29	19,33	1,20
Blended Coal 35%CP e 65%SC	18,39	23,82	1,21
Blended Coal 65%CP e 35%SC	15,28	10,73	1,00

Comentários: O *blended coal* escolhido para os testes nas misturas foi o de proporção 50/50, isso devido ao interesse de se ter testado em iguais proporções o desempenho metalúrgico das matérias-primas nacionais. Em anexo as análises laboratoriais destes *blends* (anexos 7.6 até 7.10)

### Demais Carvões e Montagem das Misturas

Para a caracterização dos demais carvões serão usadas as avaliações da Gerdau Açominas, já dentro do modelo de cálculo da mistura, os seus nomes serão preservados por questões estratégicas, e a construção das misturas também será usado o aspecto econômico (custo), para o uso de determinados carvões. A tabela V.5

mostra como será classificado cada carvão, o país de origem e a proporção em cada mistura teste.

Na montagem das misturas, buscou-se cumprir todas as restrições para a montagem de uma mistura de carvões na rotina operacional das baterias de fornos de coque, porém para buscar um maior retorno econômico, como também fazer alguns testes que estejam no limite da qualidade alguns desses parâmetros não foram seguidos à risca, com exceção da contração/expansão por ser um parâmetro que envolve a segurança das baterias de fornos de coque, pois este garante que o coque após sua coqueificação estará descolado da parede, garantindo que não haverá engaiolamento durante o desenformamento do forno.

**Restrições gerais para a Mistura de Carvões para coque de alta qualidade (Gerdau Açominas):**

- Poder refletor (% Rm):  $>1,10\%$ ;
- Máxima Fluidez:  $2,5 < \log \text{ddpm} < 3$  (320-1000ddpm)
- Matéria volátil:  $< 26\%$
- Cinzas:  $< 8,2\%$
- Contração/Expansão:  $< -8\%$  (Segurança Operacional das Baterias)
- Granulometria:  $>78\%$  (abaixo de 3 mm)

TABELA V.5: Tabela de composição das Misturas testes

Classificação	Nomenclatura	País	Mistura #1	Mistura #2	Mistura #3	Mistura #4	Mistura #5	Mistura #6
<i>Hard Coking Coal</i>	AV1	EUA	20	25	30	30	30	30
<i>Hard Coking Coal</i>	MV1	Austrália	0	13	15	15	13	20
<i>Hard Coking Coal</i>	MV2	Austrália	0	5	0	0	0	0
<i>Hard Coking Coal</i>	MV3	Canadá	0	20	0	18	20	0
<i>Hard Coking Coal</i>	MV4	EUA	0	3	0	0	5	0
<i>Hard Coking Coal</i>	MV Teste	Colômbia	30	0	0	0	0	0
<i>Hard Coking Coal</i>	BV1	EUA	5	16	10	5	10	0
<i>Hard Coking Coal</i>	BV2	EUA	5	8	15	12	12	25
<i>Soft Coking Coal</i>	Soft1	Austrália	20	0	0	0	0	0
<i>Semi Hard Coking Coal</i>	Soft2	Canadá	0	10	0	0	0	0
<i>No Coking Coal</i>	Coque Petróleo (BCP)	Brasil	20	0	0	0	0	0
<i>No Coking Coal</i>	Blend Nacional 5050 (SBN5050)	Brasil	0	0	30	20	10	25
Total		(%)	100	100	100	100	100	100

Comentários: As misturas foram montadas sem uma ordem lógica de uso de carvões e/ou matérias primas nacionais, para que não seja criada uma expectativa ou tendência nos resultados durante testes e análises.

Para a caracterização de cada mistura teste, será mostrado primeiramente o plano de mistura calculado pelo modelo Gerdau Açominas e depois gráficos e quadros comparando os resultados da mistura calculada e a mistura analisada em laboratório. Nos anexos estão todas as análises das misturas feitas conforme normas.

O modelo matemático da Gerdau Acominas segue o modelo japonês do Diagrama MOF, conforme FIGURA 3.19 (8). Esse modelo é mais representativo e indicado quando se usa mais de oito carvões na mistura, mas, porém todas as misturas têm menos de 8 carvões, podendo aumentar o erro de previsão.

Nesse caso, foi montado dois gráficos MOF contemplando as misturas calculadas pelo modelo e contemplando as análises feitas pelo laboratório. Sendo que nestes diagramas estão discriminados as regiões que deverão estar as misturas que produzem um coque com melhor resistência mecânica à frio pelo processo de coqueificação convencional, e a região na qual se usa misturas com maior dispersão para coqueificação que possa contemplar um aumento da densidade de carga.

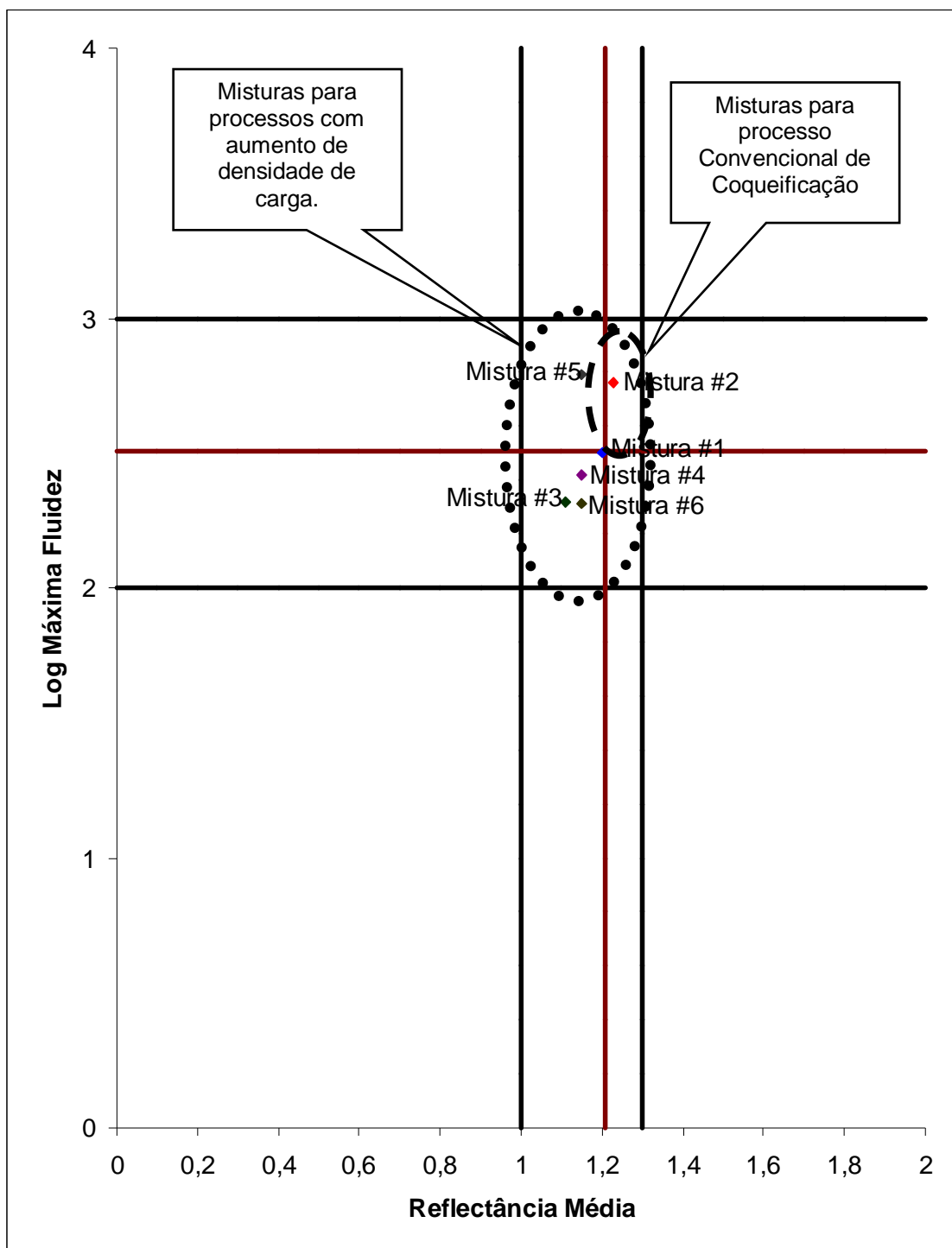


FIGURA 5.1: Diagrama MOF para as Misturas Testes (Calculadas pelo Modelo)

Comentários: Esse gráfico mostra que a mistura #2 é a única que se encontra dentro da região para processo convencional de coqueificação, e as outras misturas se

encontram na região maior que contempla misturas que tem que ser coqueificadas com tecnologias que aumentem a densidade de carga (briquetagem parcial, peneiramento seletivo, *stamp charging*).

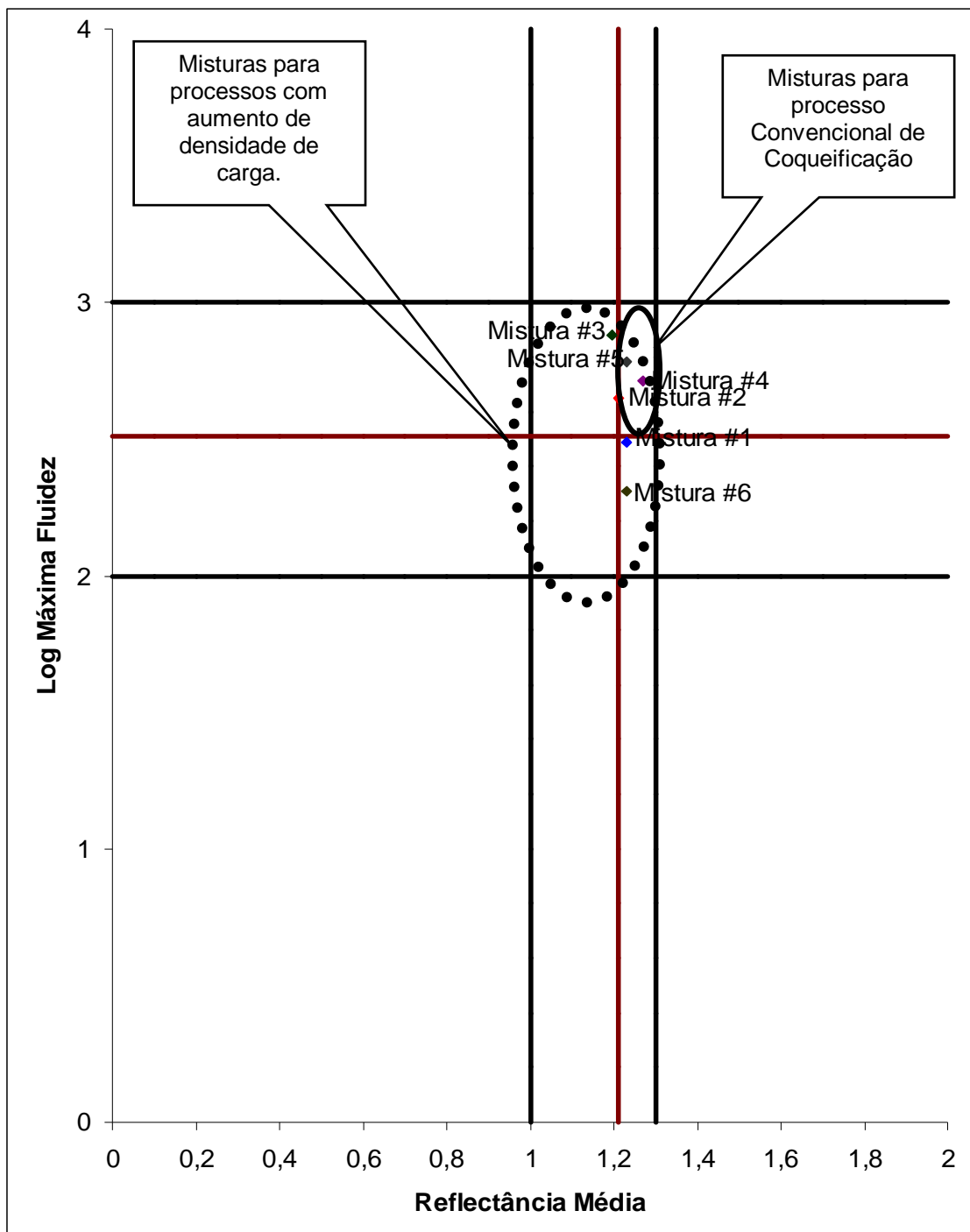


FIGURA 5.2: Diagrama MOF das Misturas Testes (Analisadas em Laboratório)

Comentários: Já para esse gráfico MOF verifica-se que as misturas depois de compostas em laboratório #4 e #5 se encontram na região de processo convencional,

e a mistura #2 no limite das regiões dos processos convencional e com tecnologia de aumento de densidade de carga.

#### Mistura #1

A mistura # 1 foi montada para se testar o desempenho do Carvão Colombiano, como se fosse um carvão nacional, e devido ao bom poder coqueificante, ele foi testado com uma proporção de 30%, somado 20% de coque petróleo e 20% de carvão soft (australiano), com isso o objetivo desta mistura é avaliar a qualidade do coque, em uma composição que visa maior independência de carvões *hard* externos, ou seja, menor custo.

TABELA V.6: Características calculadas da Mistura #1

SIGLA/PILHA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	HGI
AV1		20	5,93	33,18	0,79	-18,87	4,42	0,93	65,70	65,07
<b>20</b>										
MV1		0	8,66	20,42	0,60	-4,25	2,20	1,35	66,39	91,00
MV2		0	8,88	20,65	0,35	-20,24	1,49	1,30	63,98	88,00
MV3		0	9,06	22,67	0,39	-11,00	1,75	1,21	62,48	80,00
MV4		0	8,40	30,80	0,74	-18,33	4,42	1,09	64,22	80,00
MVTeste		30	8,54	22,30	0,64	-12,00	2,20	1,29	68,29	88,00
<b>30</b>										
Soft2		0	10,13	21,44	0,32	-9,08	0,90	1,19	64,14	92,00
Soft1		20	10,10	20,05	0,34	-22,42	0,70	1,21	59,42	75,00
SBN 5050		0	19,33	18,29	1,20	-18,00	0,00	0,93	40,00	99,00
<b>20</b>										
BV1		5	8,95	20,67	0,61	-2,46	3,09	1,35	61,29	86,00
BV2		5	4,76	19,29	0,80	9,63	1,91	1,46	58,83	95,00
<b>10</b>										
BCP		20	0,10	12,00	0,80	-20,00	2,50	1,00	40,00	90,00
<b>20</b>										
QUALIDADE DA MISTURA CALCULADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	INERTE
		100	6,47	21,53	0,65	-15,50	2,50	1,20	59,52	29,54
QUALIDADE DA MISTURA TESTADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	
		100	6,47	21,53	0,65	-15,50	2,50	1,20	59,52	
QUALIDADE DO COQUE		S CARREG.	CINZA	REND	ENX.	p.s.i	DI		CSR	
		6,64	8,06	81,16	0,53	0,41	84,89		66,12	
Fe2O3	SiO2	Al2O3	MNO	CaO	MgO	P2O5	ZnO	Na2O	K2O	TiO2
6,93	48,95	27,70	0,05	3,07	0,87	0,87	0,01	0,49	1,07	1,37
FE			MN			P				ALC.
4,84			0,03			0,30				1,57

TABELA V.7A: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#1

Análise Química das Cinzas												
	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	Alcalis
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Calculado	6,93	48,92	27,7	0,05	3,07	0,87	0,87	1,07	0,49	1,37	0,01	1,57
Laboratório	5,36	55,52	31,15	0,04	2,57	0,93	0,93	1,16	0,61	1,2	0,02	1,79

TABELA V.7B: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#1

	Análise Físico Química											
	Análise Imediata			Granulometria (<2,80mm)	Plastômetro Gieseler							
	Cinzas	MV	S		Máxima Fluidez	log. Max. Fluidez	Temp. Máx.	Temp. Amolecim	Temp. Solidificaç	Faixa Plástica		
	%	%	%	%	ddpm	log ddpm	°C	°C	°C	°C		
Calculado	6,7	21,53	0,65			2,50						0
Laboratório	6,8	21,02	0,64	77,61	310	2,491	455	398	491			93

TABELA V.7C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #1

Análises Petrográficas da Mistura Enfornada na Piloto																	
Grupo Maceral	Análise dos Macerais																
	Reativos					Inertes											
	Vitrinita e Colinita	Exinita			Total de Reativos	Inertinita											Total de Inertes
		Esporinita	Cutinita	Resinita		Semifusinita	Esclerotinita	Micrinita	Macrinita	Fusinita	Inertodetrinita	Mat. Mineral	Vit. Oxidada	Vit. Alterada			
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
Laboratório	47,6	1,4	0	0	65,2667	24,4	0	0	0	1	23,8	1,8	0	0	34,7333		
Calculado	60,26														29,54		

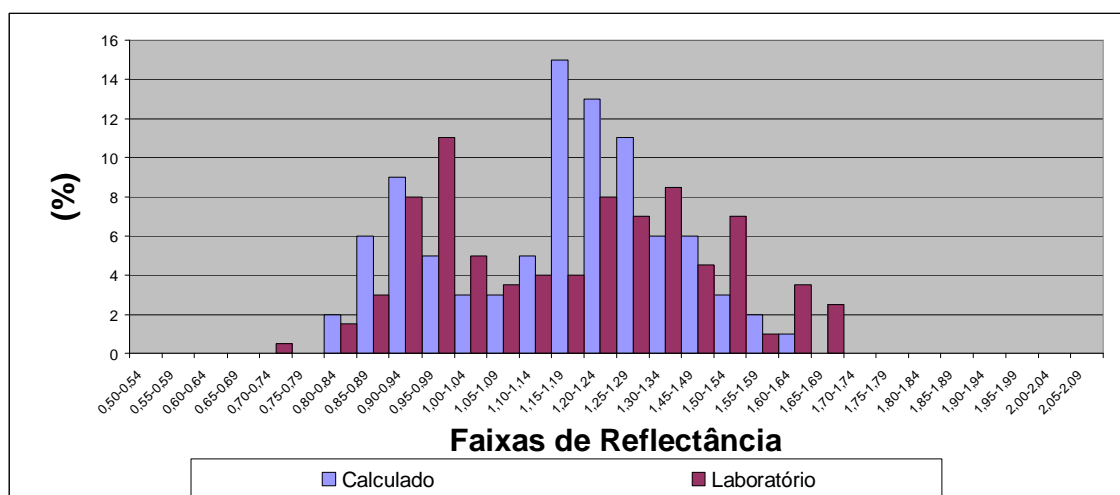


FIGURA 5.3: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinitas para a Mistura#1

Comentários: A mistura composta em laboratório representa bem o plano de mistura calculado, a refletância medida em laboratório foi de 1,23; mas nota-se pelo gráfico



comparativo das vitrinitas um desvio maior da refletância do laboratório, sendo que há uma maior proporção de refletância nas faixas de 1,15 a 1,29 do calculado em relação ao medido.

## Mistura #2

Mistura que busca ser referência de qualidade, sem se preocupar com custo, serve como comparativo técnico para as outras misturas e acerto do modelo matemático. Resultados do coque dentro da qualidade esperada pelo modelo.

TABELA V.8: Características calculadas da Mistura #2

SIGLA/PILHA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	HGI
AV1		25	5,93	33,18	0,79	-18,87	4,42	0,93	65,70	65,07
<b>25</b>										
MV1		13	8,66	20,42	0,60	-4,25	2,20	1,35	66,39	91,00
MV2		5	8,88	20,65	0,35	-20,24	1,49	1,30	63,98	88,00
MV3		20	9,06	22,67	0,39	-11,00	1,75	1,21	62,48	80,00
MV4		3	8,40	30,80	0,74	-18,33	4,42	1,09	64,22	80,00
Mvteste		0	8,54	22,30	0,64	-12,00	2,20	1,29	68,29	88,00
<b>41</b>										
Soft2		10	10,13	21,44	0,32	-9,08	0,90	1,19	64,14	92,00
Soft1		0	10,10	20,05	0,34	-22,42	0,70	1,21	59,42	75,00
SBN 5050		0	19,33	18,29	1,20	-18,00	0,00	0,93	40,00	99,00
<b>10</b>										
BV1		16	8,95	20,67	0,61	-2,46	3,09	1,35	61,29	86,00
BV2		8	4,76	19,29	0,80	9,63	1,91	1,46	58,83	95,00
<b>24</b>										
BCP		0	0,10	12,00	0,80	-20,00	2,50	1,00	40,00	90,00
<b>0</b>										
QUALIDADE DA MISTURA CALCULADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	INERTE
		100	7,94	24,23	0,59	-9,56	2,76	1,23	63,60	24,02
QUALIDADE DA MISTURA TESTADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	
		100	7,94	24,23	0,59	-9,56	2,76	1,23	63,60	
QUALIDADE DO COQUE		S CARREG.	CINZA	REND	ENX.	p.s.i	DI		CSR	
		4,92	10,26	78,90	0,50	1,07	84,99		69,10	
Fe2O3	SiO2	Al2O3	MNO	CaO	MgO	P2O5	ZnO	Na2O	K2O	TiO2
6,41	51,69	28,99	0,04	3,16	0,90	0,84	0,01	0,50	1,30	1,58
FE			MN			P				ALC.
4,48			0,03			0,28				1,81

TABELA V.9 A: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#2

Análise Química das Cinzas												
	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	Alcalis
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Calculado	6,41	51,69	28,99	0,04	3,16	0,9	0,84	1,3	0,5	1,58	0,01	1,81
Laboratório	5,46	54,58	29,02	0,06	3,15	0,81	0,86	1,27	0,29	1,48	0,02	1,58

TABELA V.9B: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#2

Análise Físico Química										
	Análise Imediata			Granulometria (<2,80mm)	Plastômetro Gieseler					
	Cinzas	MV	S		Máxima Fluidez (ddpm)	log. Max. Fluidez	Temp. Máx. Fluidez (°C)	Temp. Amolecimento (°C)	Temp. Solidificação (°C)	Faixa Plástica
Calculado	7,94	24,23	0,59			2,76				0
Laboratório	8,61	23,61	0,59	77,61	450	2,653	454	403	491	88

TABELA V.9C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura#2

Análises Petrográficas da Mistura Enfornada na Piloto															
Grupo Maceral	Análise dos Macerais														
	Reativos					Inertes									
	Vitrinita e Colinita	Exinita			Total de Reativos	Inertinita									Total de Inertes
		Esporinita	Cutinita	Resinita		Semifusinita	Esclerotinita	Micrinita	Macrinita	Fusinita	Inertode trinita	Mat. Mineral	Vit. Oxidada	Vit. Alterada	
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
Laboratório	62,4	3	0	0	85	29,4	0	0	0	0,4	2,4	1,6	0	0,8	15
Calculado	63,51														24,02

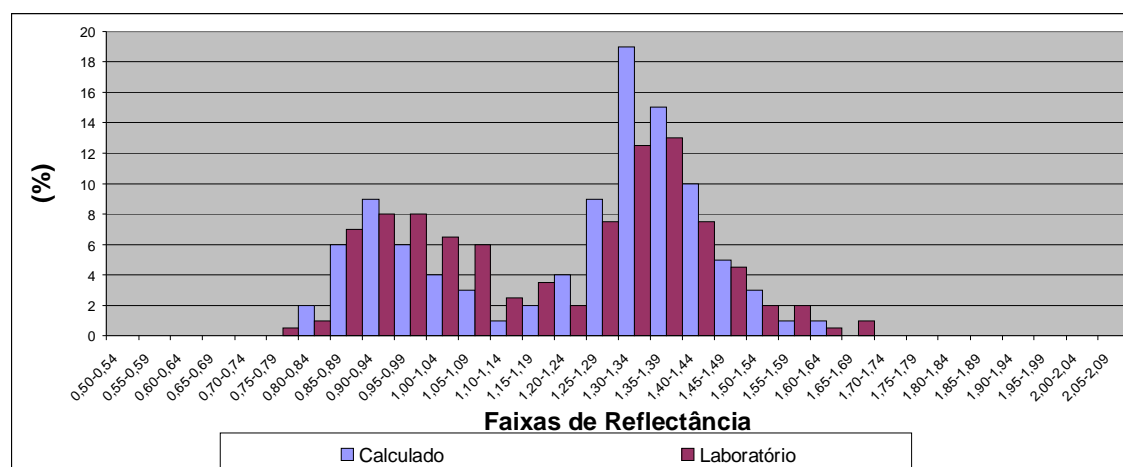


FIGURA 5.4: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinitas para a Mistura#2

Comentários: Essa mistura tem por objetivo ser a referência de qualidade para um processo de coqueificação convencional, os resultados das análises estão conforme cálculo, sendo que os pequenos desvios não descaracterizam a mistura.

### Mistura-teste#3

Mistura que testa o desempenho do *blend* nacional em uma proporção de 30% com carvões tradicionais, buscando um acerto da fluidez (mesmo abaixo de 2,5) e da refletância média, visando um desempenho do coque conforme calculado.

TABELA V.10: Características calculadas da Mistura #3

SIGLA/PILHA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	HGI
AV1		30	5,93	33,18	0,79	-18,87	4,42	0,93	65,70	65,07
<b>30</b>										
MV1		15	8,66	20,42	0,60	-4,25	2,20	1,35	66,39	91,00
MV2		0	8,88	20,65	0,35	-20,24	1,49	1,30	63,98	88,00
MV3		0	9,06	22,67	0,39	-11,00	1,75	1,21	62,48	80,00
MV4		0	8,40	30,80	0,74	-18,33	4,42	1,09	64,22	80,00
MV Teste		0	8,54	22,30	0,64	-12,00	2,20	1,29	68,29	88,00
<b>15</b>										
Soft2		0	10,13	21,44	0,32	-9,08	0,90	1,19	64,14	92,00
Soft1		0	10,10	20,05	0,34	-22,42	0,70	1,21	59,42	75,00
SBN 5050		30	19,33	18,29	1,20	-18,00	0,00	0,93	40,00	99,00
<b>30</b>										
BV1		10	8,95	20,67	0,61	-2,46	3,09	1,35	61,29	86,00
BV2		15	4,76	19,29	0,80	9,63	1,91	1,46	58,83	95,00
<b>25</b>										
BCP		0	0,10	12,00	0,80	-20,00	2,50	1,00	40,00	90,00
<b>0</b>										
QUALIDADE DA MISTURA CALCULADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	INERTE
		100	10,49	23,26	0,87	-10,50	2,32	1,11	56,62	30,38
QUALIDADE DA MISTURA TESTADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	
		100	10,49	23,26	0,87	-10,50	2,32	1,11	56,62	
QUALIDADE DO COQUE		S CARREG.	CINZA	REND	ENX.	p.s.i	DI		CSR	
		4,79	13,51	79,71	0,64	0,97	84,80		64,01	
Fe2O3	SiO2	Al2O3	MNO	CaO	MgO	P2O5	ZnO	Na2O	K2O	TiO2
7,28	50,15	29,05	0,04	2,99	0,98	0,29	0,01	0,56	1,89	1,51
FE			MN			P				ALC.
5,09			0,03			0,05				2,46

TABELA V.11A: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #3

Análise Química das Cinzas												
	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	Alcalis
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Calculado	7,28	50,15	29,05	0,04	2,99	0,98	0,29	1,89	0,56	1,51	0,01	2,46
Laboratório	5,92	55,81	29,39	0,06	2,33	0,89	0,36	1,87	0,47	1,49	0,02	2,36

TABELA V.11B: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #3

Análise Físico Química												
	Análise Imediata			Granulometria (<2,80mm)	Plastômetro Gieseler							
	Cinzas		MV		S	Máxima Fluidez (ddpm)	log. Máx. Fluidez	Temp. Máx. Fluidez (°C)	Temp. Amolecimento (°C)	Temp. Solidificação (°C)	Faixa Plástica	
	%		%		%	%	ddpm	log ddpm	°C	°C	°C	°C
Calculado	10,49		23,26	0,87			2,32					0
Laboratório	9,93		22,63	0,83	79,14	758	2,88	451	395	491		96

TABELA V.11C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #3

Análises Petrográficas da Mistura Enfornada na Piloto																	
	Grupo Maceral	Análise dos Macerais															
		Reativos					Inertes										
		Vitrinita	Exinita			Total de Reativos	Inertinita									Total de Inertes	
			Esporinita	Cutinina	Resinita		Semifusinita	Esclerotinita	Micrinita	Macrinita	Fusinita	Inertodetrinita	Mat. Mineral	Vit. Oxidada	Vit. Alterada		
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%			
Laboratório		57,2	4,4	0	0	71,2	14,4	0	0	0	0,4	19,2	4,4	0	0	28,8	
Calculado		57,71															

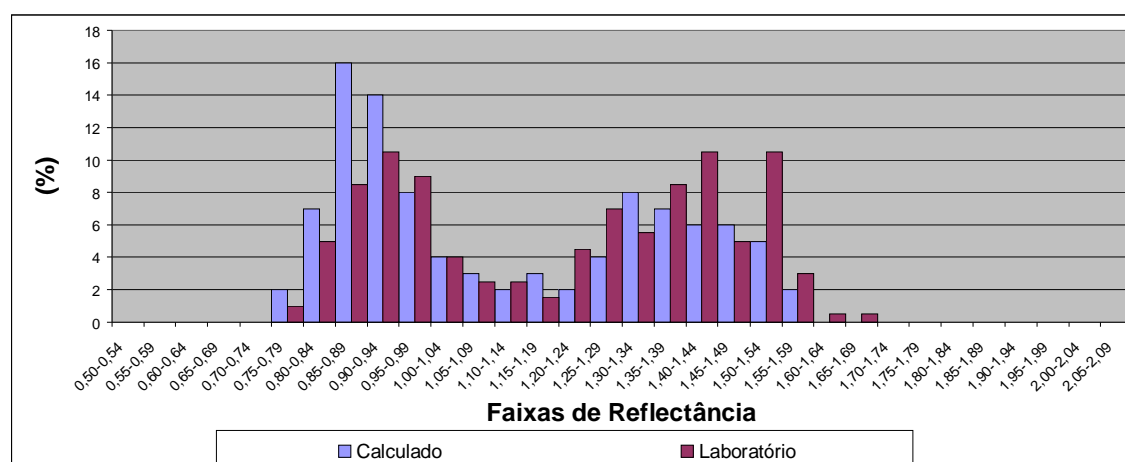


FIGURA 5.5: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinitas para a Mistura #3

Comentários: A fluidez apresentou um desvio maior que o calculado, podendo influir em um coque de melhor qualidade, principalmente para o processo convencional de coqueificação.

#### Mistura-teste#4

Mistura que testa o desempenho do *blend* nacional em uma proporção de 20% com carvões tradicionais, mesmo assim o mínimo para a fluidez não foi atingido, para o cálculo da mistura.

TABELA V.12: Características calculadas da Mistura #4

SIGLA/PILHA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	HGI
AV1		30	5,93	33,18	0,79	-18,87	4,42	0,93	65,70	65,07
		30								
MV1		15	8,66	20,42	0,60	-4,25	2,20	1,35	66,39	91,00
MV2		0	8,88	20,65	0,35	-20,24	1,49	1,30	63,98	88,00
MV3		18	9,06	22,67	0,39	-11,00	1,75	1,21	62,48	80,00
MV4		0	8,40	30,80	0,74	-18,33	4,42	1,09	64,22	80,00
MVTeste		0	8,54	22,30	0,64	-12,00	2,20	1,29	68,29	88,00
		33								
Soft2		0	10,13	21,44	0,32	-9,08	0,90	1,19	64,14	92,00
Soft1		0	10,10	20,05	0,34	-22,42	0,70	1,21	59,42	75,00
SBN 5050		20	19,33	18,29	1,20	-18,00	0,00	0,93	40,00	99,00
		20								
BV1		5	8,95	20,67	0,61	-2,46	3,09	1,35	61,29	86,00
BV2		12	4,76	19,29	0,80	9,63	1,91	1,46	58,83	95,00
		17								
BCP		0	0,10	12,00	0,80	-20,00	2,50	1,00	40,00	90,00
		0								
QUALIDADE DA MISTURA CALCULADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	INERTE
		100	9,59	23,90	0,76	-10,85	2,42	1,15	59,04	28,72
QUALIDADE DA MISTURA TESTADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	
		100	9,59	23,90	0,76	-10,85	2,42	1,15	59,04	
QUALIDADE DO COQUE		S CARREG.	CINZA	REND	ENX.	p.s.i	DI		CSR	
		4,79	12,42	79,18	0,59	0,93	84,85		65,77	
Fe2O3	SiO2	Al2O3	MNO	CaO	MgO	P2O5	ZnO	Na2O	K2O	TiO2
6,51	51,56	28,84	0,04	3,00	0,91	0,52	0,01	0,50	1,65	1,54
FE			MN			P				ALC.
4,55			0,03			0,15				2,16

TABELA V.13 A: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #4

Análise Química das Cinzas												
	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	Alcalis
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Calculado	6,51	51,56	28,84	0,04	3	0,91	0,52	1,65	0,5	1,54	0,01	2,16
Laboratório	4,9	55,08	28,84	0,05	2,32	0,81	0,49	1,92	0,42	1,49	0,02	2,36

TABELA V.13B: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #4

Análise Físico Química											
	Análise Imediata			Granulometria (<2,80mm)	Plastômetro Gieseler						
	Cinzas		MV		S	Máxima Fluidez (ddpm)	log. Max. Fluidez	Temp. Máx. Fluidez (°C)	Temp. Amolecimento (°C)	Temp. Solidificação (°C)	Faixa Plástica
	%		%		%	%	ddpm	log ddpm	°C	°C	°C
Calculado	9,59		23,9	0,76		2,42					0
Laboratório	9,64		23,07	0,75	79,14	510	2,708	452	404	496	92

TABELA V.13C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #4

Análises Petrográficas da Mistura Enfornada na Piloto																
Grupo Maceral	Análise dos Macerais															
	Reativos					Inertes										
	Vitrinita	Exinita			Total de Reativos	Inertinita										Total de Inertes
	Telinita e Colinita	Esporinita	Cutinita	Resinita		Semifusinita	Esclerotinita	Micrinita	Macrinita	Fusinita	Inertodetrinita	Mat. Mineral	Vit. Oxidada	Vit. Alterada		
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
Laboratório	53,4	2,4	0	0	71,933	24,2	0	0	0	0,2	13,6	5,2	0	1	28,067	
Calculado	58,85														28,72	

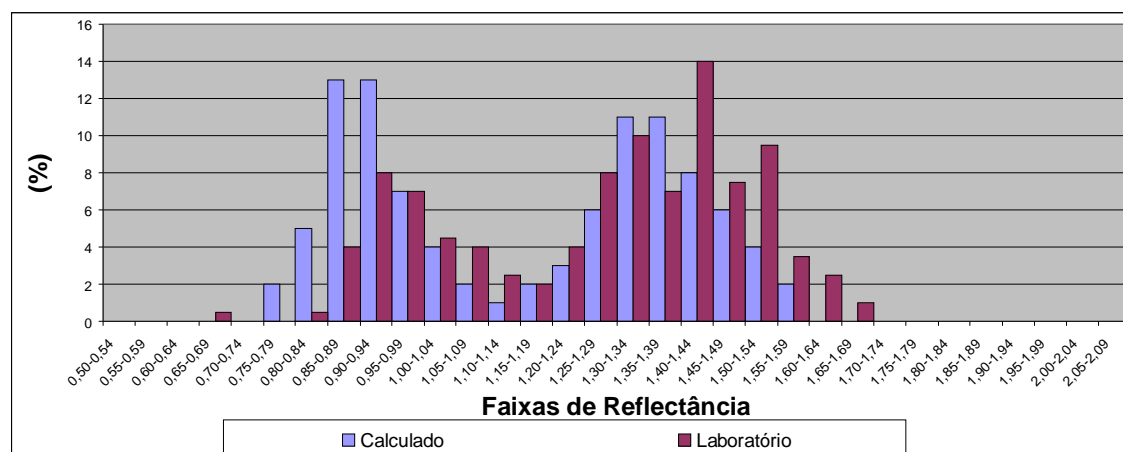


FIGURA 5.6: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinitas para a Mistura #4

Comentários: A refletância das vitrinitas (1,15 – calculado e 1,27 - analisado) apresentou uma diferença para um maior valor analisado, juntamente com a fluidez, podendo favorecer um melhor coque que o previsto na coqueificação convencional.

#### Mistura-teste#5

Mistura que visa o desempenho do blend nacional em uma menor proporção de 10% e o restante com carvões tradicionais.

TABELA V.14: Características calculadas da Mistura #5

SIGLA/PILHA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	HGI
AV1		30	5,93	33,18	0,79	-18,87	4,42	0,93	65,70	65,07
<b>30</b>										
MV1		13	8,66	20,42	0,60	-4,25	2,20	1,35	66,39	91,00
MV2		0	8,88	20,65	0,35	-20,24	1,49	1,30	63,98	88,00
MV3		20	9,06	22,67	0,39	-11,00	1,75	1,21	62,48	80,00
MV4		5	8,40	30,80	0,74	-18,33	4,42	1,09	64,22	80,00
MVTeste		0	8,54	22,30	0,64	-12,00	2,20	1,29	68,29	88,00
<b>38</b>										
Soft2		0	10,13	21,44	0,32	-9,08	0,90	1,19	64,14	92,00
Soft1		0	10,10	20,05	0,34	-22,42	0,70	1,21	59,42	75,00
SBN 5050		10	19,33	18,29	1,20	-18,00	0,00	0,93	40,00	99,00
<b>10</b>										
BV1		10	8,95	20,67	0,61	-2,46	3,09	1,35	61,29	86,00
BV2		12	4,76	19,29	0,80	9,63	1,91	1,46	58,83	95,00
<b>22</b>										
BCP		0	0,10	12,00	0,80	-20,00	2,50	1,00	40,00	90,00
<b>0</b>										
QUALIDADE DA MISTURA CALCULADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	INERTE
		100	8,54	24,69	0,71	-10,22	2,79	1,15	61,24	24,69
QUALIDADE DA MISTURA TESTADA		%	CINZA	M.V	ENXO	C/E	FLUIDEZ	REFLEC.	CSR	
		100	8,54	24,69	0,71	-10,22	2,79	1,15	61,24	
QUALIDADE DO COQUE		S CARREG.	CINZA	REND	ENX.	p.s.i	DI		CSR	
		5,09	11,11	78,52	0,56	1,00	85,00		67,37	
Fe2O3	SiO2	Al2O3	MNO	CaO	MgO	P2O5	ZnO	Na2O	K2O	TiO2
6,86	50,80	28,63	0,04	3,22	0,94	0,60	0,01	0,51	1,56	1,54
FE			MN			P				ALC.
4,79			0,03			0,18				2,08

TABELA V.15A: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #5

Análise Química das Cinzas												
	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	Alcalis
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Calculado	6,86	50,8	28,64	0,04	3,22	0,94	0,6	1,56	0,51	1,54	0,01	2,08
Laboratório	6,26	53,9	28,21	0,11	3,2	0,93	0,64	1,96	0,42	1,48	0,02	2,4

TABELA V.15B: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #5

Análise Físico Química											
	Análise Imediata				Granulometria (<2,80mm)	Plastômetro Gieseler					
	Cinzas		MV	S		Máxima Fluidez (ddpm)	log. Máx. Fluidez	Temp. Máx. Fluidez (°C)	Temp. Amolecimento (°C)	Temp. Solidificação (°C)	Faixa Plástica
	%		%	%		%	ddpm	log ddpm	°C	°C	°C
Calculado	8,54		24,69	0,71			2,79				0
Laboratório	8,95		23,79	0,68	78,53	599	2,777	452	405	493	88

TABELA V.15C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #5

Análises Petrográficas da Mistura Enfornada na Piloto															
Grupo Maceral	Análise dos Macerais														
	Reativos					Inertes									
	Vitrinita	Exinita			Total de Reativos	Inertinita									Total de Inertes
		Telinita e Colinita	Esporinita	Cutininita		Resinita	Semifusinita	Esclerotinita	Micrinita	Macrinita	Fusinita	Inertodetrinita	Mat. Mineral	Vit. Oxidada	
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
Laboratório	50	3,8	0	0	75,8	33	0	0	0	0,2	8	4,6	0	0,4	24,2
Calculado	63,13														24,69

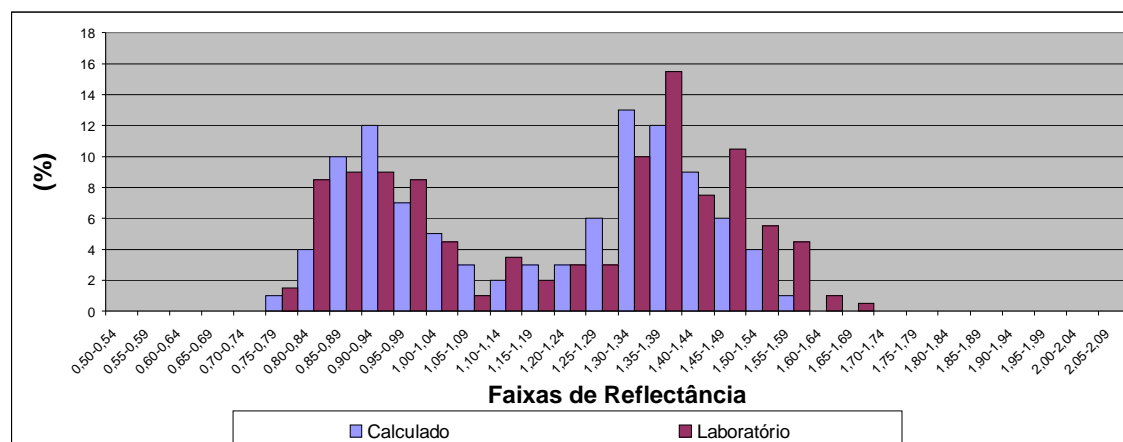


FIGURA 5.7: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinitas para a Mistura #5



Comentários: os resultados da análise estão em conformidade com o modelo de mistura.

#### Mistura teste#6

Mistura que visa o desempenho do *blend* nacional na proporção de 25% e o restante com carvões tradicionais, com uma participação maior do BV americano (BV2) de alta refletância, outro ponto importante é o uso de somente quatro carvões para a composição.

TABELA V.16: Características calculadas da Mistura #6

<b>SIGLA/PILHA</b>		<b>%</b>	<b>CINZA</b>	<b>M.V</b>	<b>ENXO</b>	<b>C/E</b>	<b>FLUIDEZ</b>	<b>REFLEC.</b>	<b>CSR</b>	<b>HGI</b>
AV1		30	5,93	33,18	0,79	-18,87	4,42	0,93	65,70	65,07
		30								
MV1		20	8,66	20,42	0,60	-4,25	2,20	1,35	66,39	91,00
MV2		0	8,88	20,65	0,35	-20,24	1,49	1,30	63,98	88,00
MV3		0	9,06	22,67	0,39	-11,00	1,75	1,21	62,48	80,00
MV4		0	8,40	30,80	0,74	-18,33	4,42	1,09	64,22	80,00
MVTeste		0	8,54	22,30	0,64	-12,00	2,20	1,29	68,29	88,00
		20								
Soft2		0	10,13	21,44	0,32	-9,08	0,90	1,19	64,14	92,00
Soft1		0	10,10	20,05	0,34	-22,42	0,70	1,21	59,42	75,00
SBN 5050		25	19,33	18,29	1,20	-18,00	0,00	0,93	40,00	99,00
		25								
BV1		0	8,95	20,67	0,61	-2,46	3,09	1,35	61,29	86,00
BV2		25	4,76	19,29	0,80	9,63	1,91	1,46	58,83	95,00
		25								
BCP		0	0,10	12,00	0,80	-20,00	2,50	1,00	40,00	90,00
		0								
<b>QUALIDADE DA MISTURA CALCULADA</b>		<b>%</b>	<b>CINZA</b>	<b>M.V</b>	<b>ENXO</b>	<b>C/E</b>	<b>FLUIDEZ</b>	<b>REFLEC.</b>	<b>CSR</b>	<b>INERTE</b>
		100	9,53	23,23	0,86	-8,60	2,31	1,15	57,70	28,39
<b>QUALIDADE DA MISTURA TESTADA</b>		<b>%</b>	<b>CINZA</b>	<b>M.V</b>	<b>ENXO</b>	<b>C/E</b>	<b>FLUIDEZ</b>	<b>REFLEC.</b>	<b>CSR</b>	
		100	9,53	23,23	0,86	-8,60	2,31	1,15	57,70	
<b>QUALIDADE DO COQUE</b>		<b>S CARREG.</b>	<b>CINZA</b>	<b>REND</b>	<b>ENX.</b>	<b>p.s.i</b>	<b>DI</b>		<b>CSR</b>	
		5,23	12,25	79,74	0,64	1,18	84,80		64,79	
<b>Fe2O3</b>	<b>SiO2</b>	<b>Al2O3</b>	<b>MNO</b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>P205</b>	<b>ZnO</b>	<b>Na2O</b>	<b>K2O</b>	<b>TiO2</b>
8,36	48,35	28,17	0,05	3,76	1,06	0,24	0,02	0,57	1,81	1,47
<b>FE</b>			<b>MN</b>			<b>P</b>				<b>ALC.</b>
5,84			0,03			0,02				2,39

TABELA V.17A: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #6

Análise Química das Cinzas												
	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	Alcalis
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Calculado	8,36	48,35	28,17	0,05	3,76	1,06	0,24	1,81	0,57	1,47	0,02	2,4
Laboratório	7,07	50,5	26,84	0,13	4,58	0,93	0,23	1,69	0,46	1,38	0,01	2,16

TABELA V.17B: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #6

Análise Físico Química										
	Análise Imediata			Granulometria (<2,80mm)	Plastômetro Gieseler					
	Cinzas	MV	S		Máxima Fluidez (ddpm)	log. Max. Fluidez	Temp. Máx. Fluidez (°C)	Temp. Amolecimento (°C)	Temp. Solidificação (°C)	Faixa Plástica
	%	%	%	%	log ddpm	log ddpm	°C	°C	°C	°C
Calculado	9,53	23,23	0,86		2,31					0
Laboratório	9,6	23,1	0,8	75,78	205	2,312	456	410	489	79

TABELA V.17C: Comparação dos resultados calculados e analisados em laboratório para a mistura #6

Análises Petrográficas da Mistura Enfornada na Piloto																
Grupo Maceral	Análise dos Macerais															
	Reativos					Inertes										
	Vitrinita	Exinita			Total de Reativos	Inertinita										Total de Inertes
	Telinita e Colinita	Espornita	Cutinina	Resinita		Semifunita	Esclerotina	Micrinita	Macrinita	Fusinita	Inertotetrinita	Mat. Mineral	Vit. Oxidada	Vit. Alterada		
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
Laboratório	60	3,4	0	0	71,667	12,4	0	0	0	0,4	17	5	0	1,8	28,333	
Calculado	57,71														28,39	

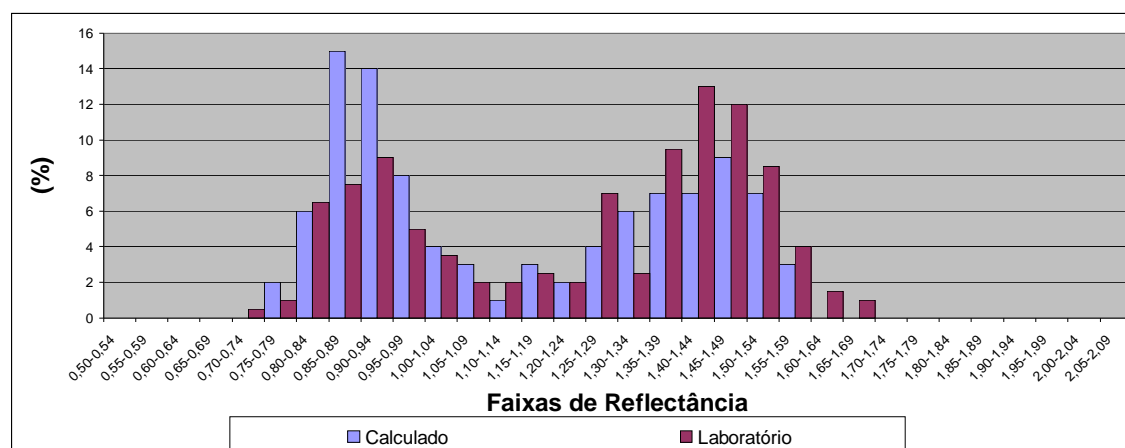


FIGURA 5.8: Gráfico Comparativo de Refletância das Vitrinitas para a Mistura #6

Comentários: os resultados da análise estão em conformidade com o modelo de mistura.

## 5.2 Resultados e Discussões da 2ª Etapa Testes no Forno Piloto

Nessa etapa foram realizados os enforamentos das misturas tanto para o processo convencional, como para o processo “*stamp charging*”.

Nos enforamentos das misturas pelo processo convencional seguiu os procedimentos normais operacionais para esse enforamento, o peso enforado de mistura foi de 240 kg em base úmida, com uma umidade padrão de 8%, para uma temperatura de 1100°C.

Já para os enforamentos com “*stamp charging*” foi seguido o procedimento através do uso de lata de 18l, usadas para fazer a compactação de carga pré-determinada com 16,5 kg de mistura em base úmida com 8% de umidade, para um volume e peso constantes, foi compactado com uma densidade de carga de 1086 kg/m<sup>3</sup>, densidade essa que fica entre 1050 e 1100 kg/m<sup>3</sup> que é usado na prática em coquearias “*stamp charging*” sejam elas *Heat Recovery* ou convencionais com fornos de 4 m de altura. Foram enforados oito caixas com uma mistura, sendo aproximadamente a metade da carga de um forno piloto convencional (~132 kg), porém sem comprometer a quantidade de coque necessária que seja representativo para análise em laboratório.

Os procedimentos foram adaptados para o enforamento sendo esse feito pelo lado máquina desenforadora, com uso de uma mesa para ajudar a enforar a carga, o tempo de coqueificação foi mantido o mesmo de dezoito horas, e as latas foram furadas para garantir a saída da matéria volátil durante a coqueificação. As fotos a seguir mostram como foi feito o enforamento com a carga compactada.



FIGURA 5.9: Seqüência de fotos de um enformamento “*stamp charging*” no forno piloto da Gerdau Açominas



FIGURA 5.10: Seqüência de fotos do desenformamento de um forno com a carga compactada

### 5.3 Resultados e Discussões da 3ª Etapa Análises dos Coques Produzidos

Nesta seção serão mostrados, os resultados obtidos dos coques das misturas tanto do coque pelo processo convencional quanto do processo de coqueificação por compactação de carga. Sendo que os resultados do DI, CSR e CRI serão analisados através das fórmulas de correlação do forno piloto com os fornos em escala industrial, especificadas no item 4.2, sendo que esses parâmetros são importantes para caracterização de um coque de alta qualidade.

#### **Especificação de Qualidade do Coque (Gerdau Açominas):**

- Tamanho Médio: >45 mm
- CSR: >65%
- CRI: <24,5%
- Enxofre: <0,75%

- Matéria Volátil: <1,5%
- Cinzas: <10,5%
- $DI_{150}^{15}$ : >83,9%

#### Resultados da Mistura #1

TABELA V.18: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #1

Análises do Coque Piloto											
	H <sub>2</sub> O	MV	DI	CSR	CRI	S	Cinzas	<25 mm	>25<75 mm	>75 mm	TM
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm
<b>Calculado</b>						0,53	8,06				
<b>Coqueificação Convencional</b>		1,65	69,94	53,81	23,79	0,58	8,5	18,92	70,09	10,97	45
<b>Coqueificação Compactada</b>		1,04	82,57	67,21	23,15	0,58	8,31	6,38	89,47	4,14	47,72

TABELA V.19: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #1 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%

	Parâmetros de Correlação para a Escala Industrial								
	DI (Intervalo de confiança de 95%)			CSR (Intervalo de confiança de 95%)			CRI (Intervalo de confiança de 95%)		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>Coqueificação Convencional</b>	<b>78,863</b>	<b>80,296</b>	<b>81,729</b>	<b>64,63</b>	<b>66,385</b>	<b>68,14</b>	<b>20,302</b>	<b>21,92</b>	<b>23,534</b>
<b>Coqueificação Compactada</b>	<b>85,036</b>	<b>85,798</b>	<b>86,56</b>	<b>70,287</b>	<b>72,557</b>	<b>74,827</b>	<b>19,971</b>	<b>21,59</b>	<b>23,209</b>

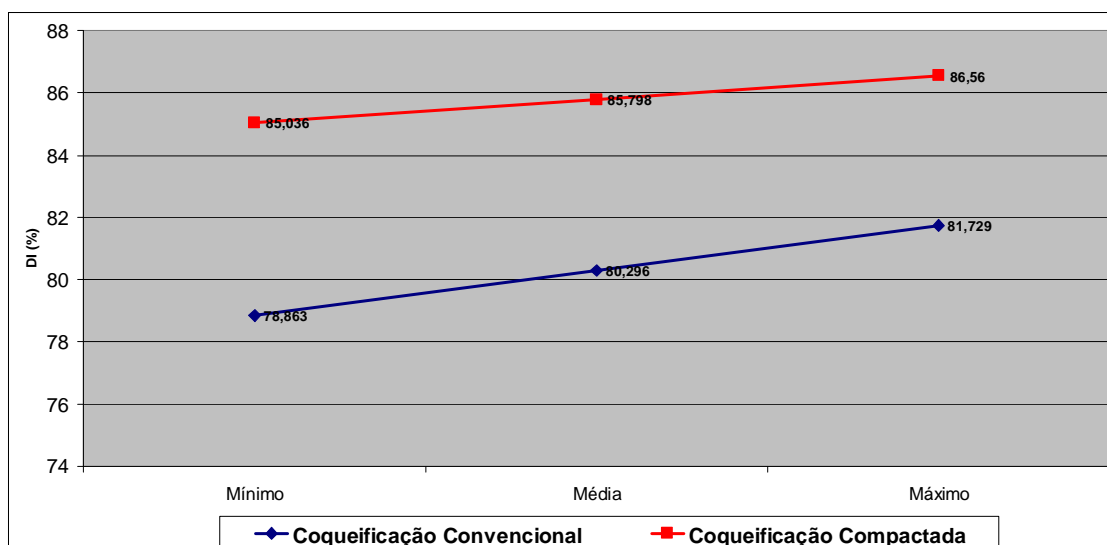


FIGURA 5.11: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#1 em escala industrial

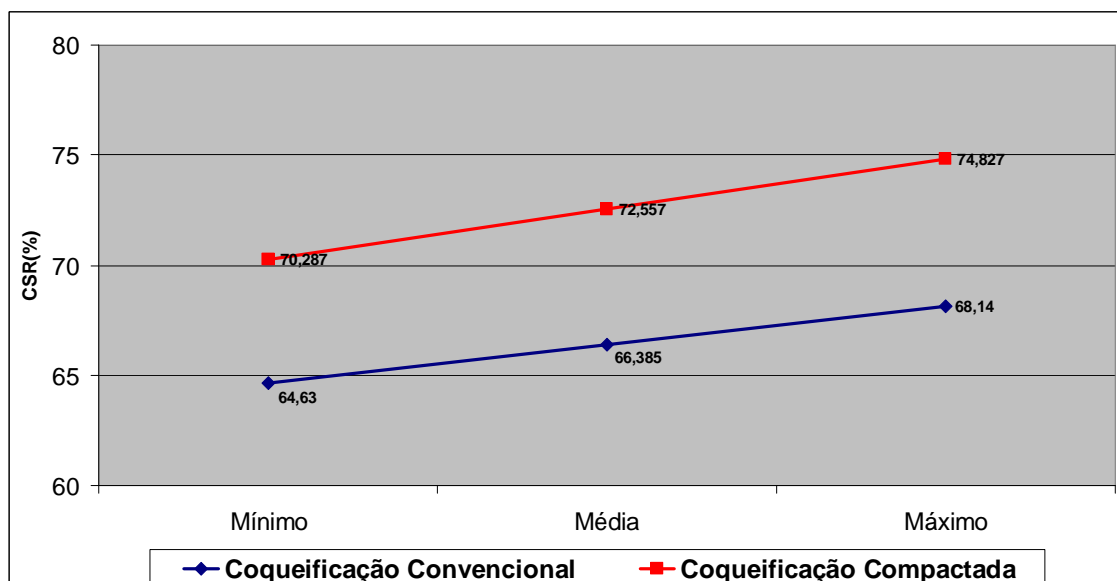


FIGURA 5.12: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#1 em escala industrial

Comentários: Essa mistura para o processo convencional não cumpriu a qualidade requerida para o coque principalmente por ser uma mistura com 20% de inerte (coque petróleo e acrescentando 20% de carvão soft), certamente é uma mistura que não responde bem principalmente pelo balanço de inerte e baixo poder coqueificante menor, mesmo que a matéria volátil não tenha cumprido a meta (<1,5%) certamente não foi fator preponderante para a baixa qualidade principalmente na resistência



mecânica à frio (DI). Já a qualidade do coque com a compactação dessa mistura, foi cumprida com enormes ganhos tanto para DI como para o CSR, comparado com o convencional, principalmente o DI mostrando que a mistura fraca para convencional ela otimizada sua condição para coqueificação com a compactação de carga.

## Resultados da Mistura #2

TABELA V.20: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #2

Análises do Coque Piloto											
	H <sub>2</sub> O	MV	DI	CSR	CRI	S	Cinzas	<25 mm	>25<75 mm	>75 mm	TM
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm
<b>Calculado</b>						<b>0,5</b>	<b>10,26</b>				
<b>Coqueificação Convencional</b>		<b>0,97</b>	<b>80,36</b>	<b>67,26</b>	<b>19,44</b>	<b>0,49</b>	<b>10,79</b>	<b>14,01</b>	<b>80,9</b>	<b>5,1</b>	<b>44,21</b>
<b>Coqueificação Compactada</b>		<b>0,92</b>	<b>81,36</b>	<b>59,21</b>	<b>26,25</b>	<b>0,65</b>	<b>11,32</b>	<b>6,04</b>	<b>86,7</b>	<b>7,28</b>	<b>50,18</b>

TABELA V.21: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #2 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%

	Parâmetros de Correlação para a Escala Industrial								
	DI (Intervalo de confiança de 95%)			CSR (Intervalo de confiança de 95%)			CRI (Intervalo de confiança de 95%)		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>Coqueificação Convencional</b>	<b>84,36</b>	<b>84,98</b>	<b>85,6</b>	<b>70,383</b>	<b>72,66</b>	<b>74,937</b>	<b>17,763</b>	<b>19,4</b>	<b>21,037</b>
<b>Coqueificação Compactada</b>	<b>84,764</b>	<b>85,434</b>	<b>86,104</b>	<b>67,021</b>	<b>68,872</b>	<b>70,723</b>	<b>21,724</b>	<b>23,33</b>	<b>24,944</b>



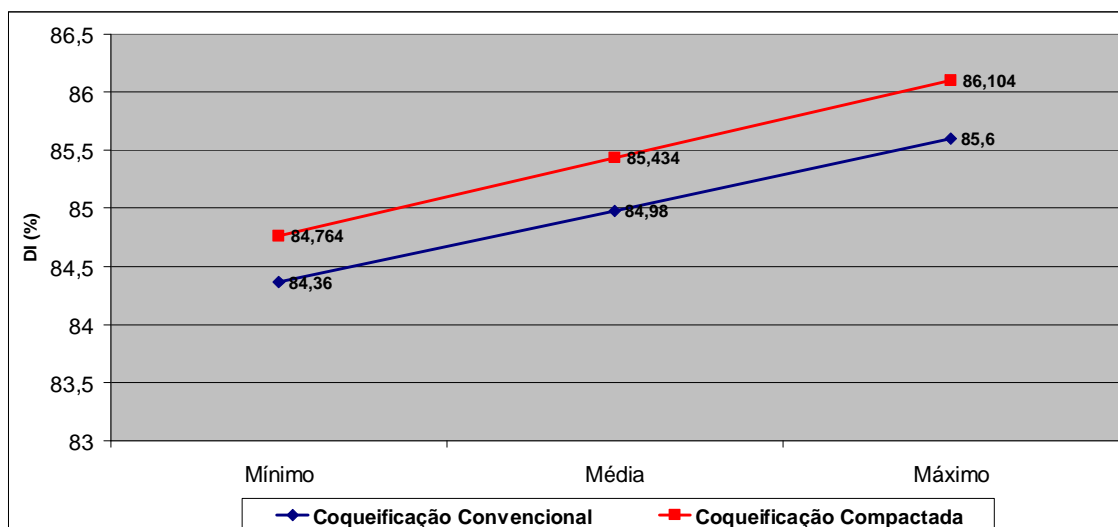


FIGURA 5.13: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#2 em escala industrial

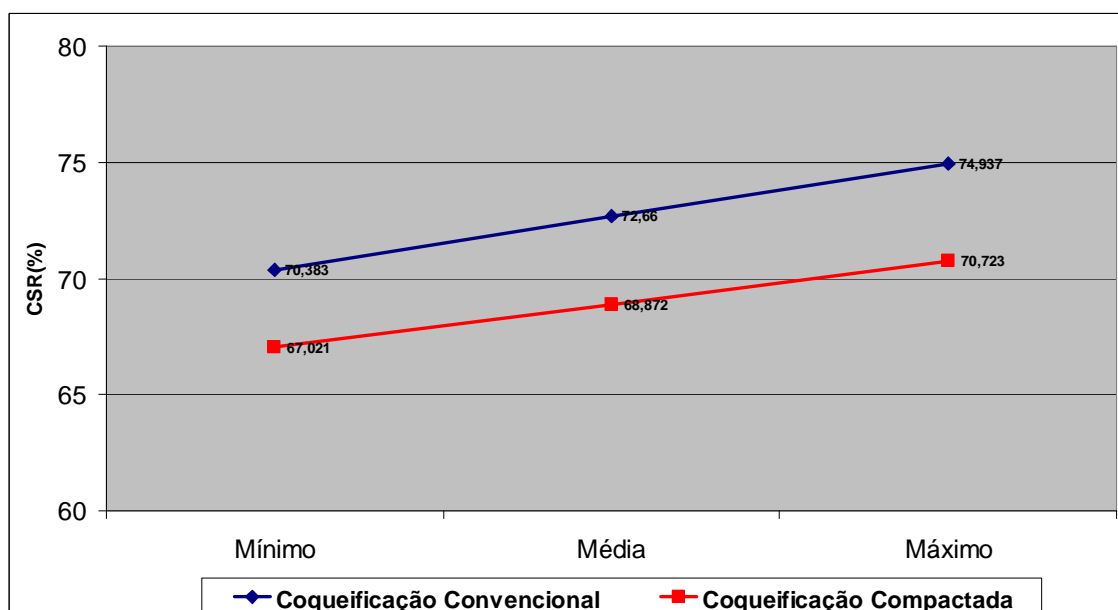


FIGURA 5.14: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#2 em escala industrial

Comentários: Conforme esperado essa mistura como referência, cumpriu os parâmetros acordados na coqueificação convencional, pois em sua estrutura tem os parâmetros necessários para o acerto do modelo (fluidez, refletância, balanço de reativos e inertes) se equiparando as características das misturas de rotina da Gerdau

Açominas. Já os resultados dessa mistura tendo sua carga compactada apresentam resultados até certo ponto surpreendentes como a redução do CSR e ganho da reatividade, mesmo tendo um aumento modesto no DI e um razoável para tamanho médio do coque.

### Resultados da Mistura #3

TABELA V.22: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #3

Análises do Coque Piloto											
	H <sub>2</sub> O	MV	DI	CSR	CRI	S	Cinzas	<25 mm	>25<75 mm	>75 mm	TM
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm
<b>Calculado</b>						<b>0,64</b>	<b>13,51</b>				
<b>Coqueificação Convencional</b>		<b>1,07</b>	<b>68,77</b>	<b>49,89</b>	<b>24,57</b>	<b>0,67</b>	<b>12,74</b>	<b>15,93</b>	<b>60,97</b>	<b>23,11</b>	<b>54,44</b>
<b>Coqueificação Compactada</b>		<b>0,97</b>	<b>83,97</b>	<b>71,33</b>	<b>23,77</b>	<b>0,5</b>	<b>10,77</b>	<b>7,24</b>	<b>90,45</b>	<b>2,31</b>	<b>45,46</b>

TABELA V.23: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #3 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%

	Parâmetros de Correlação para a Escala Industrial								
	DI (Intervalo de confiança de 95%)			CSR (Intervalo de confiança de 95%)			CRI (Intervalo de confiança de 95%)		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>Coqueificação Convencional</b>	<b>78,217</b>	<b>79,77</b>	<b>81,323</b>	<b>62,778</b>	<b>64,579</b>	<b>66,38</b>	<b>20,753</b>	<b>22,367</b>	<b>23,981</b>
<b>Coqueificação Compactada</b>	<b>85,712</b>	<b>86,608</b>	<b>87,504</b>	<b>71,878</b>	<b>74,455</b>	<b>77,032</b>	<b>20,289</b>	<b>21,906</b>	<b>23,523</b>

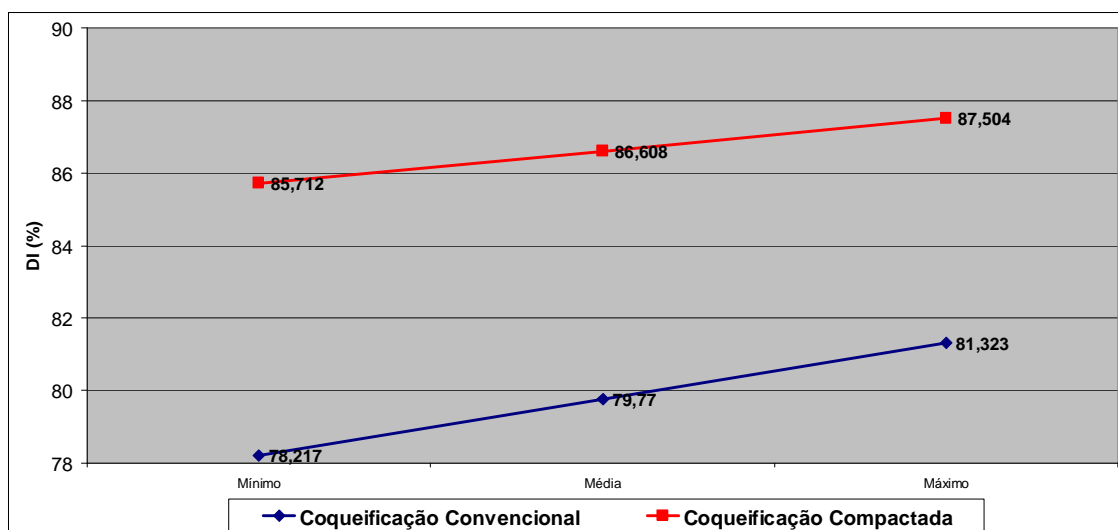


FIGURA 5.15: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#3 em escala industrial

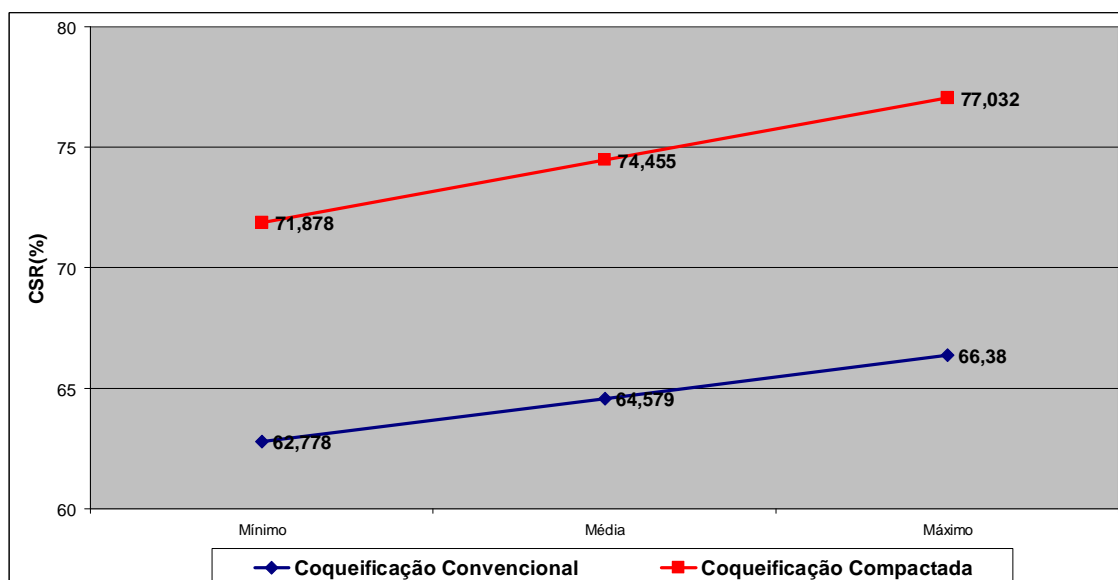


FIGURA 5.16: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#3 em escala industrial

Comentários: A expectativa do não cumprimento da qualidade na coqueificação convencional se confirmou, sabendo ser uma mistura que apesar do modelo prever qualidade, não tem eficácia, pois o modelo contempla somente a fluidez e refletância, porém contemplando que essa tenha outros requisitos como balanço de inertes, proporção de reativos, rank de carvões. Para o processo com compactação de carga, o resultado supera as expectativas, cumprindo os parâmetros de qualidade com folga,

excetuando o tamanho médio que reduziu, mas mesmo assim ficou acima do especificado.

#### Resultados da Mistura #4

TABELA V.24: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #4

Análises do Coque Piloto											
	H <sub>2</sub> O	MV	DI	CSR	CRI	S	Cinzas	<25 mm	>25<75 mm	>75 mm	TM
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm
Calculado						0,59	12,42				
Coqueificação Convencional		0,99	73,15	55,79	25,92	0,59	15,15	14,12	66,3	19,6	52,08
Coqueificação Compactada		1,04	79,36	59,42	26,01	0,66	12,46	7,4	86,21	6,38	50,68

TABELA V.25: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #4 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%

	Parâmetros de Correlação para a Escala Industrial								
	DI (Intervalo de confiança de 95%)			CSR (Intervalo de confiança de 95%)			CRI (Intervalo de confiança de 95%)		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Coqueificação Convencional	80,699	81,74	82,781	65,528	67,297	69,066	21,533	23,14	24,755
Coqueificação Compactada	83,934	84,534	85,134	67,11	68,969	70,828	21,585	23,2	24,807

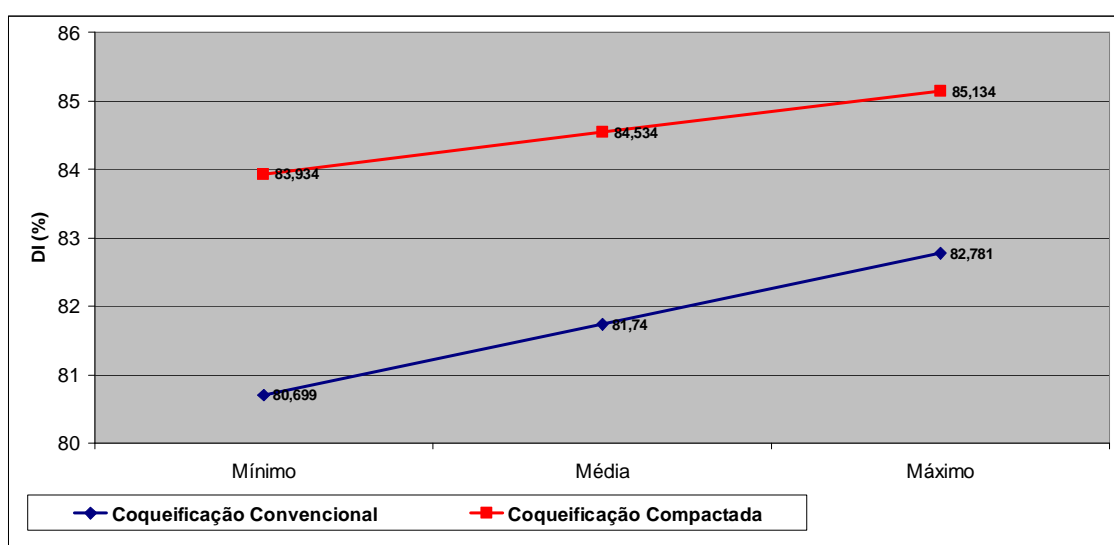


FIGURA 5.17: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#4 em escala industrial

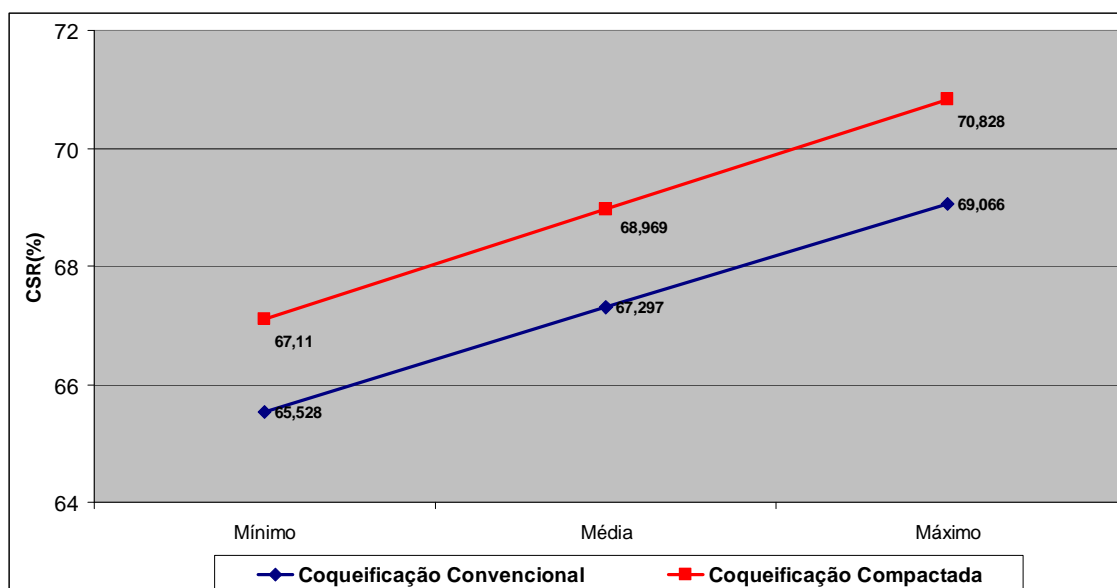


FIGURA 5.18: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#4 em escala industrial

Comentários: Desempenho similar ao da mistura #3, para o processo convencional principalmente o DI comprometeu a qualidade do coque seguindo a mesma explicação anterior, e o desempenho similar se repetiu para a compactação de carga com o ganho maior para o parâmetro de resistência mecânica à frio do coque, cumprindo a qualidade exigida pelo alto-forno.

#### Resultados da Mistura #5

TABELA V.26: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #5

Análises do Coque Piloto											
	H <sub>2</sub> O	MV	DI	CSR	CRI	S	Cinzas	<25 mm	>25<75 mm	>75 mm	TM
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm
Calculado						0,56	11,11				
Coqueificação Convencional		0,9	78,36	59,37	25,37	0,62	11,02	14,46	75,98	9,55	44,85
Coqueificação Compactada		1,15	81,56	68,23	23,78	0,62	11,38	6,19	90,24	3,57	47,46

TABELA V.27: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #5 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%

	Parâmetros de Correlação para a Escala Industrial								
	DI (Intervalo de confiança de 95%)			CSR (Intervalo de confiança de 95%)			CRI (Intervalo de confiança de 95%)		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>Coqueificação Convencional</b>	<b>82,651</b>	<b>84,084</b>	<b>85,517</b>	<b>67,185</b>	<b>68,94</b>	<b>70,695</b>	<b>21,212</b>	<b>22,828</b>	<b>24,444</b>
<b>Coqueificação Compactada</b>	<b>84,841</b>	<b>85,524</b>	<b>86,207</b>	<b>70,682</b>	<b>73,027</b>	<b>75,372</b>	<b>20,296</b>	<b>21,912</b>	<b>23,528</b>

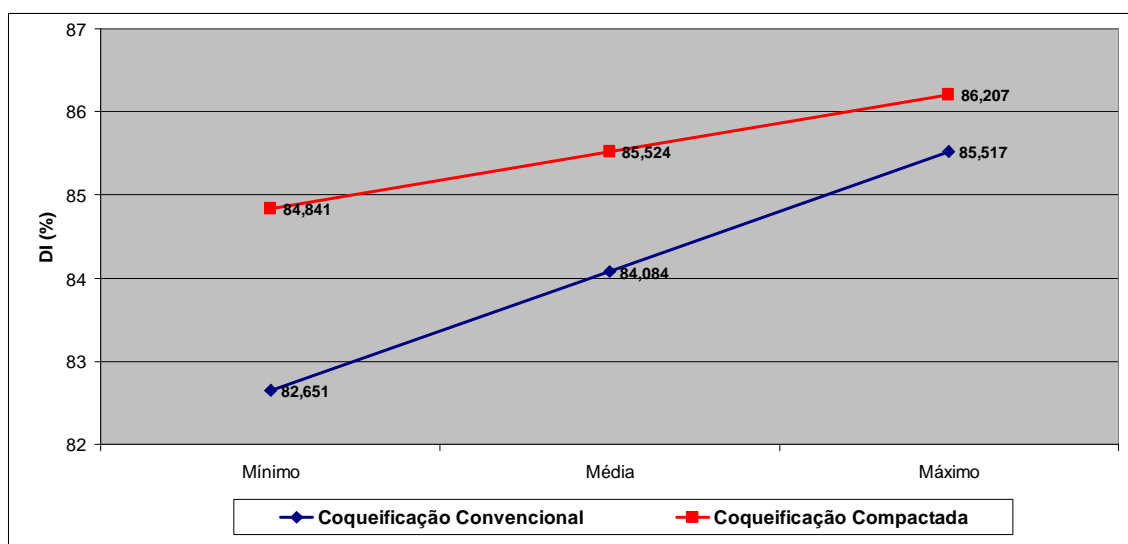


FIGURA 5.19: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#5 em escala industrial

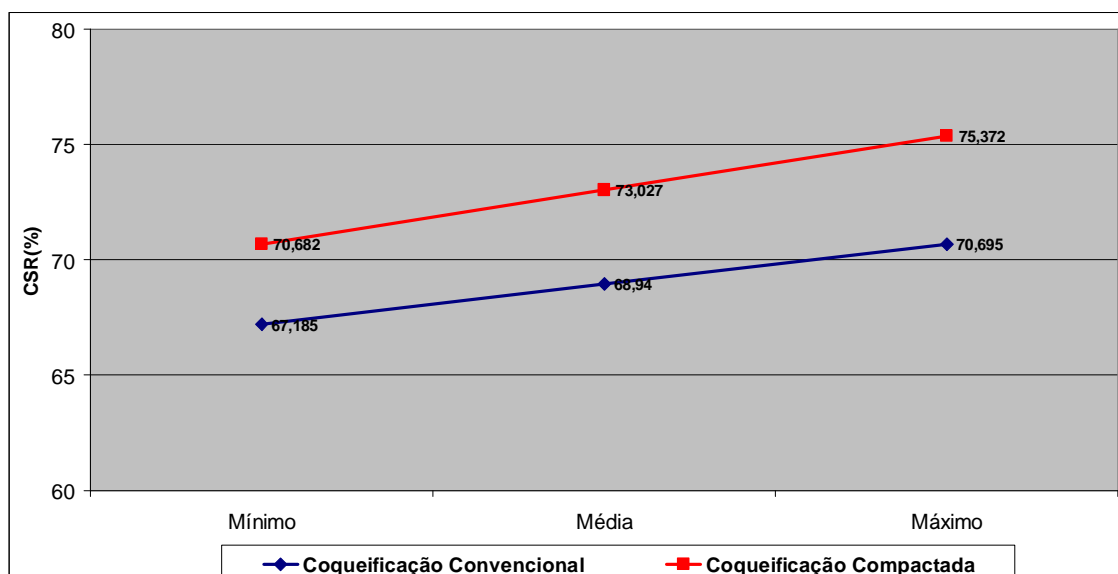


FIGURA 5.20: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#5 em escala industrial

Comentários: Essa mistura tem uma estrutura similar com o perfil usado na rotina operacional da Gerdau Açominas, porém para o processo convencional uma faixa do DI (valor mínimo não cumprido) e o tamanho médio comprometeram a qualidade geral, mas essa qualidade ficou garantida compactando-se a sua carga.

#### Resultados da Mistura #6

TABELA V.28: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #6

Análises do Coque Piloto											
	H <sub>2</sub> O	MV	DI	CSR	CRI	S	Cinzas	<25 mm	>25<75 mm	>75 mm	TM
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm
<b>Calculado</b>						0,64	12,25				
<b>Coqueificação Convencional</b>		1,12	73,95	48,6	29,13	0,72	11,39	14,19	64,41	21,4	53,14
<b>Coqueificação Compactada</b>		1,08	77,35	56,76	28,23	0,74	11,91	6,96	84,67	8,38	51,31

TABELA V.29: Tabela de Resultados dos Coques obtidos pelos dois tipos de coqueificação da mistura #6 no forno piloto, convertidos usando as equações de correlação com os fornos em escala industrial e estimando o intervalo de confiança em 95%

	Parâmetros de Correlação para a Escala Industrial								
	DI (Intervalo de confiança de 95%)			CSR (Intervalo de confiança de 95%)			CRI (Intervalo de confiança de 95%)		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>Coqueificação Convencional</b>	<b>81,148</b>	<b>82,1</b>	<b>83,052</b>	<b>62,148</b>	<b>63,985</b>	<b>65,822</b>	<b>23,384</b>	<b>24,99</b>	<b>26,602</b>
<b>Coqueificação Compactada</b>	<b>82,976</b>	<b>83,63</b>	<b>84,284</b>	<b>65,959</b>	<b>67,744</b>	<b>69,529</b>	<b>22,866</b>	<b>24,48</b>	<b>26,084</b>

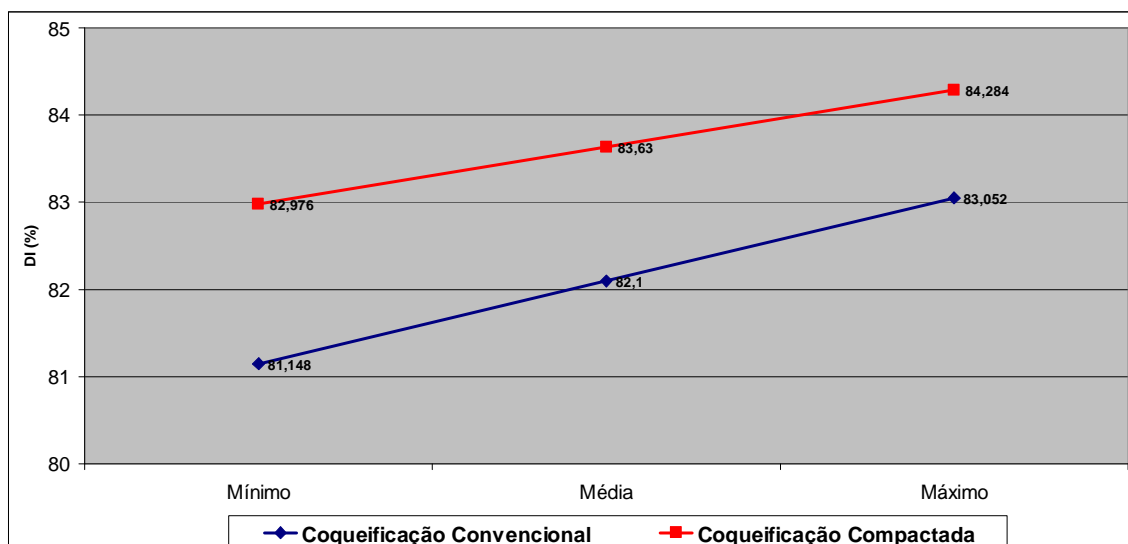


FIGURA 5.21: Diferenças da Previsão de DI em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#6 em escala industrial

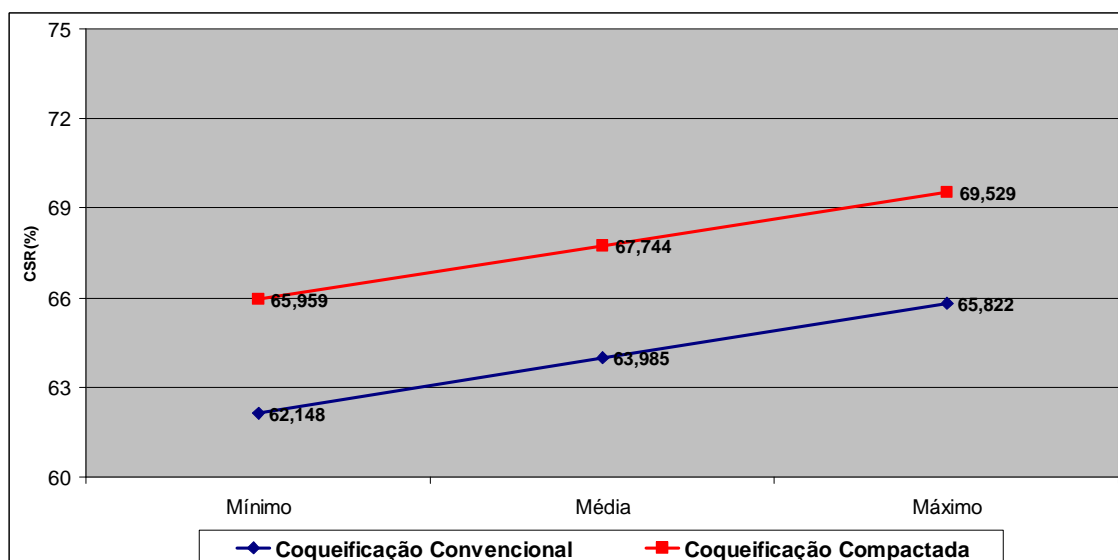


FIGURA 5.22: Diferenças da Previsão de CSR em Escala Industrial para as Diferentes Coqueificações para a Mistura#6 em escala industrial



Comentários: A expectativa para essa mistura era principalmente para o cumprimento do CSR seja na convencional ou com compactação de carga, isso por causa da participação maior do BV2 americano em 25% que tem baixo CSR, mas além destes valores baixos, o DI também ficou abaixo da expectativa e mesmo com a compactação de carga o aumento atingido não foi suficiente para atingir a qualidade necessária.

#### 5.4 Discussão sobre a Comparação dos Resultados dos Processos de Coqueificação Convencional e com Compactação de Carga “Stamp Charging”

Nessa seção estão colocados dados comparativos de dos coques obtidos pelos dos processos e discutido os principais resultados mostrando as diferença entre processos como vantagens e desvantagens em ambos.

Na primeira discussão, faremos uma comparação dos resultados para validação da qualidade de coqueificação, comparando os valores obtidos na análise imediata.

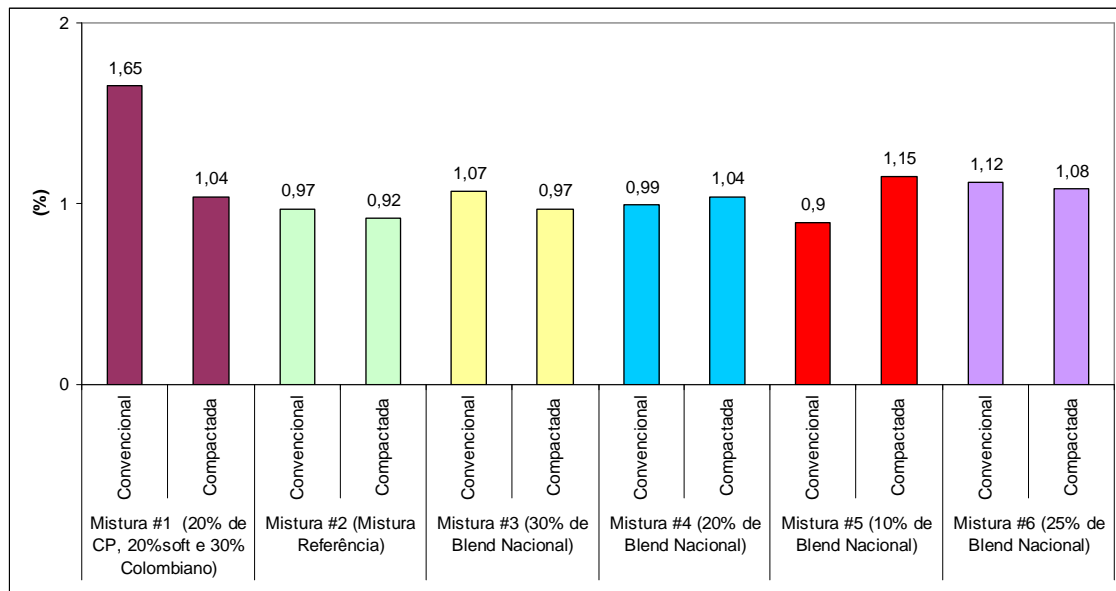


FIGURA 5.23: Comparativo de Matéria Volátil do Coque entre as Coqueificações Convencional X Compactada

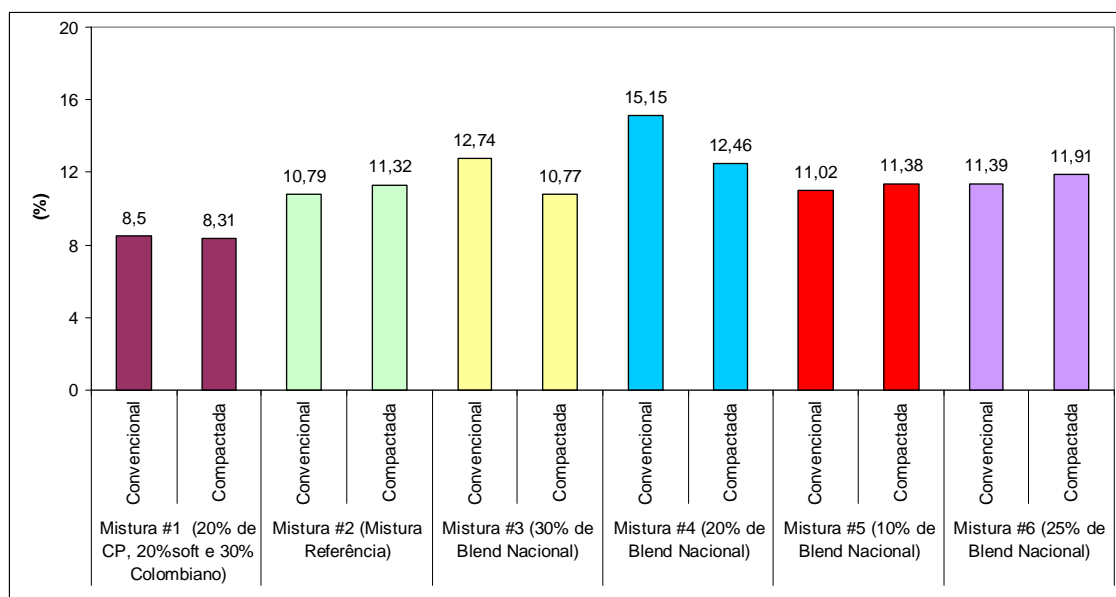


FIGURA 5.24: Comparativo de Cinzas entre as Coqueificações Convencional X Compactada

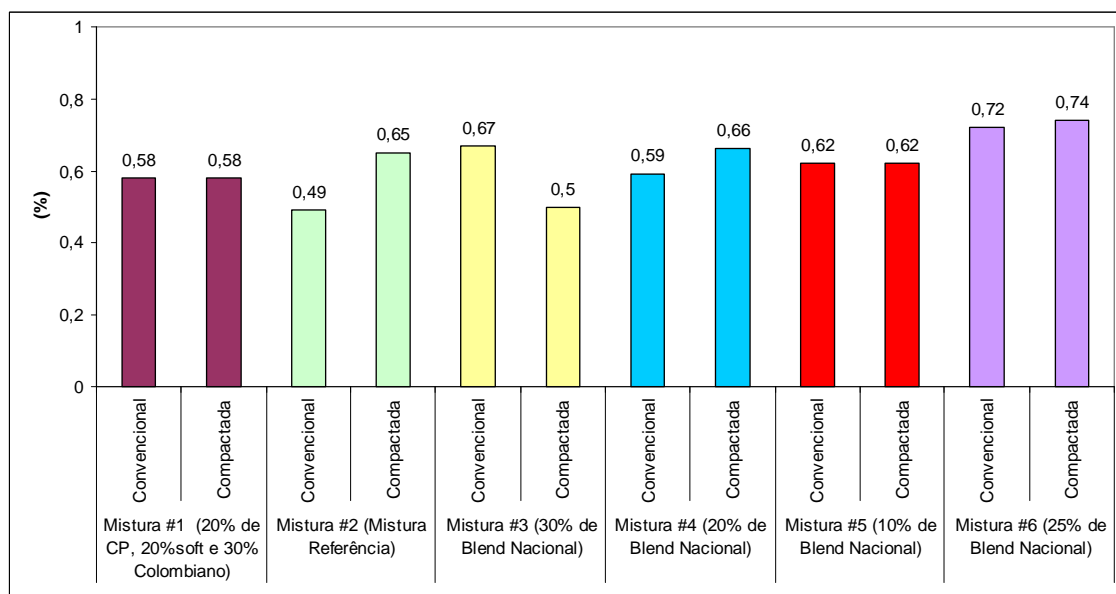


FIGURA 5.25: Comparativo de Enxofre entre as Coqueificações Convencional X Compactada

Comentários: Comparando os resultados de análise imediata (Cinzas, Enxofre e matéria volátil) das mistura testes, verifica-se que para matéria volátil os dados mostram uma linearidade comprovando que as coqueificações foram padronizadas (mesma temperatura e tempo de coqueificação), no caso das cinzas a mistura 3 e a mistura 4 obtiveram maiores desvios entre seus resultados, isso pode estar associado

a heterogeneidade do blend nacional que estava em alta proporção (30 e 20% respectivamente), para o enxofre não houve grandes alterações entre os resultados dos processos de coqueificação.

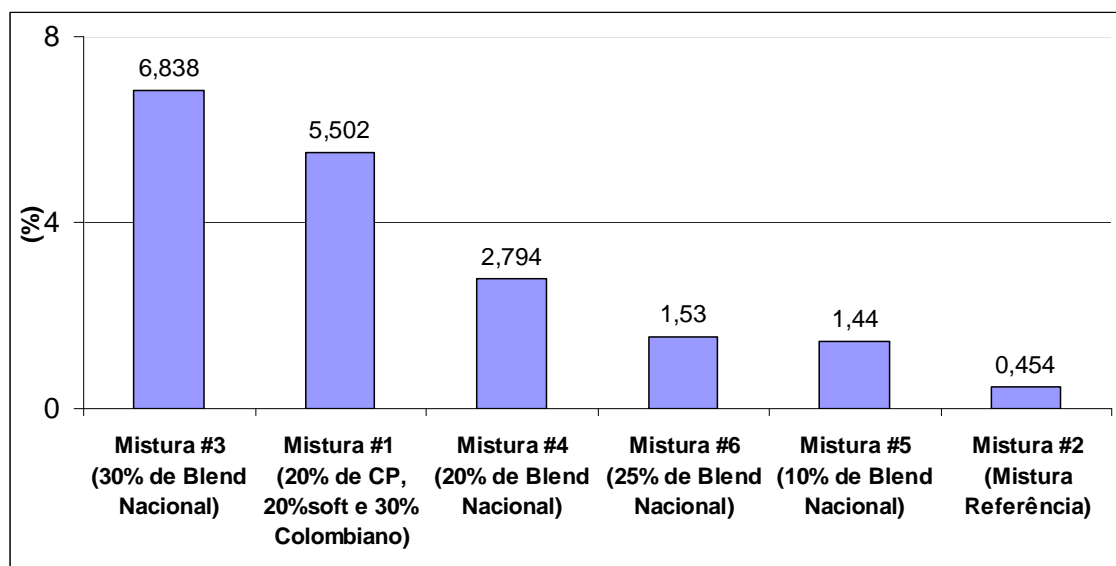


FIGURA 5.26: Comparativo de Ganhos de DI entre as Coqueificações Convencional X Compactada

Comentários: Neste gráfico o ponto mais importante a ser comentado é o ganho obtido na resistência mecânica com uma mistura de menor poder coqueificante, sendo que isso é comprovado mostrando uma coerência nessas diferenças entre à medida que a qualidade das misturas melhora e o ganho na resistência mecânica compactando-se a carga diminui; isso vai de encontro com a teoria mostrando que a compactação de carga favorece uma melhor coqueificação aproveitando todos os reativos e inertes que são aglomerados em sua totalidade devido ao menor espaço intersticial entre essas partículas.

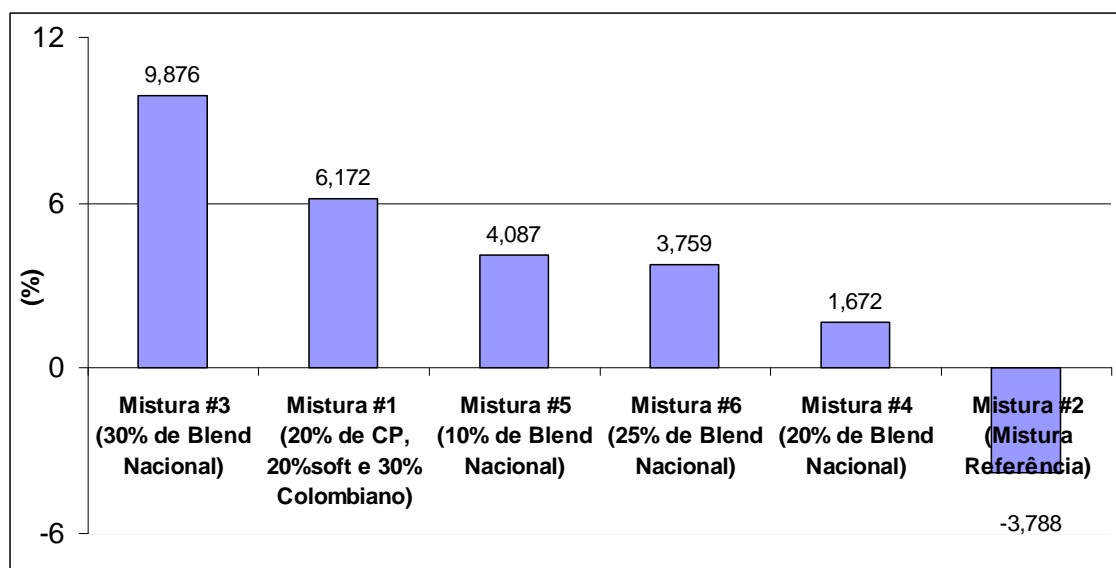


FIGURA 5.27: Comparativo de Ganhos de CSR entre as Coqueificações Convencional X Compactada

Comentários: Da mesma forma que ocorre com a resistência mecânica à frio, para o CSR os resultados foram similares, obedecendo a regra de quanto mais pobre a mistura maior o ganho entre os processos de coqueificação, favorecido de acordo com a teoria à medida que as camadas plásticas movem, as áreas já coqueificadas adjacentes à camada plástica / semi coque estão passando por uma mudança, que é chamado de “temperadas com centros reativos”, as quais resultaria numa melhoria do CSR nas áreas coqueificadas(16), o surpreendente deste gráfico foi a piora do CSR para a mistura referência (mistura #2), sendo que não há uma explicação técnica evidente para isso.

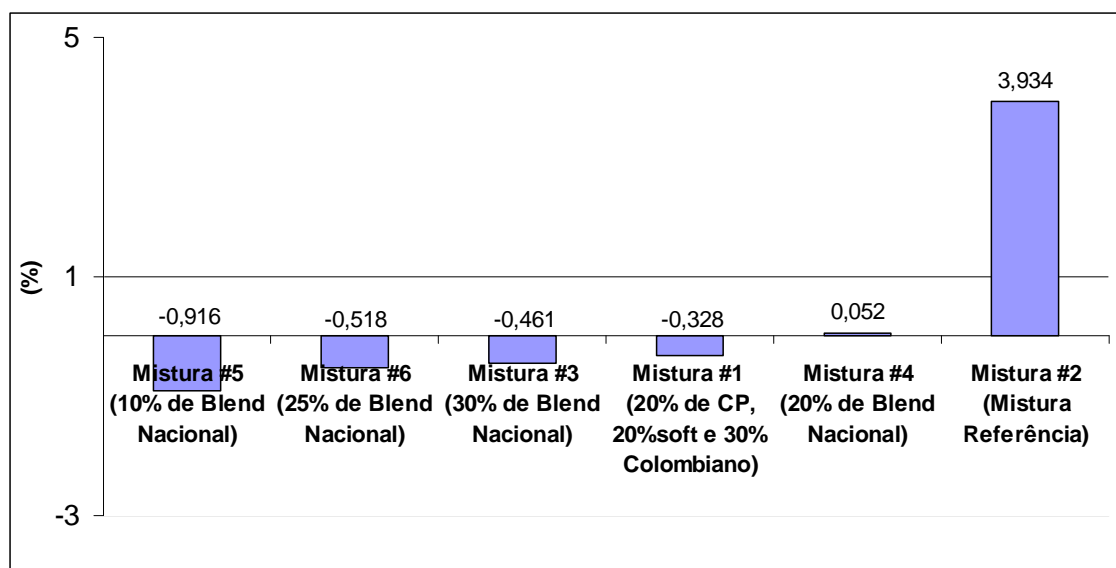


FIGURA 5.28: Comparativo de Ganhos de CRI entre as Coqueificações Convencional X Compactada

Comentários: No caso do CRI, os ganhos apresentados não foram tão significativos comparados ao CSR e DI, o fato mais notório é o resultado negativo da mistura mais forte (mistura #2) na qual o seu coque por compactação apresentou uma maior reatividade, seguindo a coerência do resultado do CSR.

## 6 – CONCLUSÕES

Os resultados dos testes realizados nesta tese comprovaram que o uso de matéria-prima não coqueificável (coque petróleo e carvão Santa Catarina) para o processo convencional de coqueificação como as coquearias 1 e 2 da Gerdau Açominas restringem o uso deste tipo de matéria-prima em até 10%, para se atingir a qualidade do coque exigida pelos altos-fornos, lembrando que o desempenho da carvão Santa Catarina foi abaixo da expectativa pela diferença de qualidade da amostra fornecida para os testes e a qualidade do carvão na época em que era usado pela Siderbrás, perdendo principalmente seu poder de coqueificação.

O acerto do modelo de otimização da mistura foi maior quando se usou carvões *hard* em maior proporção e em maior número, sendo que o modelo para previsão mecânica do coque usado é o japonês através do diagrama MOF (Myazu, Okuyama e Fukuyama), ideal para misturas com mais de sete carvões.

Na necessidade estratégica de se utilizar uma maior proporção de matéria-prima seja ela nacional ou importada, que não seja coqueificável ou de baixo poder de coqueificação, para se obter coque de alta qualidade é necessário o uso de tecnologias que aumentem a densidade de carga da mistura, facilitando com isso o aproveitamento máximo dos reativos/inertes da mistura devido a um menor distância entre partículas. Para isso testou-se as mesmas misturas do processo convencional simulando um aumento de densidade de carga no nível de uma coqueria que usa a tecnologia de "*stamp charging*", e os resultados obtidos aumentaram a faixa de utilização para até 30% de carvões pobres em poder de coqueificação, obtendo-se coque com a qualidade exigida, comprovando os resultados obtidos por países que já dominam essa tecnologia como a Índia e a China.

Para o uso da tecnologia de "*stamp charging*", pode se usar dois tipos de coquerias: - a convencional com recuperação de sub-produtos (planta de carboquímicos)"*top charging*" - ou *No Recovery*, também conhecida como *Heat Recovery*, neste caso o calor é transformado em energia elétrica e tem como grande vantagem sobre a convencional com recuperação de sub-produtos, ser ambientalmente correta, pois trabalha com pressão negativa. Para esses dois tipos a compactação de carga, "*stamp charging*", já está dominada, sendo que para a coqueria convencional "*top charging*" a restrição está na altura do forno até 4,5 m. Essa escolha depende da estratégia da empresa que for adotar a compactação de carga para a fabricação de coque.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Metal, Philadelphia -USA
- 2) GROßPIETSCH, K.-H.; et alli Coke Quality Requirements by European Blast Furnace Operators on the Milenium. Paris – França : 4<sup>th</sup> European Coke and Ironmaking Congress, Junho (19-22),2000
- 3) QUITES, E. E. C. Petrografia de Carvões – Seminário Interno do Centro de Pesquisa da USIMINAS. Ipatinga: Centro de Pesquisas da USIMINAS – Brasil: Seminário Interno do Centro de Pesquisas, Novembro, 1976
- 4) OLIVEIRA, J. L. R. de Estudo do Comportamento Técnico da Briquetagem Parcial da Mistura, com a adição de Carvão “NON-COKING COAL”, para Produção Convencional de Coque. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1996. 198p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 5) SAKAWA, M. et alli. – Carbonization, Nipon Steel Co., 1989
- 6) SHAPIRO,N. GRAY,R.J. et alli. Petrography Classification Applicable to Coals of All Ranks- ILLINOIS MININGS INSTITUTE, 1970, 68<sup>th</sup> year
- 7) SOUZA, L.O.B. – CARACTERÍSTICAS DE COQUES ORIUNDOS DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE COQUEIFICAÇÃO E SUAS INFLUÊNCIAS SOBRE A REAÇÃO C-CO<sub>2</sub>. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1988. 500p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 8) ULHÔA, M. B. – CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CARVÃO PARA COQUE DE ALTO-FORNO. “CARVÃO METALÚRGICO PARA A SIDERURGIA”. Volta Redonda – RJ, Out., 1991.

- 9) ULHÔA, M. B.; NORA, S.C.L. – APLICAÇÃO DE PETROGRAFIA DE CARVÃO NA SIDERURGIA.. CARVÃO METALÚRGICO PARA A SIDERURGIA – ABM - Volta Redonda – RJ, Out., 1991.
- 10) PRASAD, H.N.; et alli – Role of Stamping in Utilizing Non Coking Coals for Coke Making. Tata Steel , Jamshedpur , Tata Search, India pags. 15-19
- 11) SIMLAI, A. C. K. – Present Coke Scenario and Technology Selection for Future Cokemaking in India, Tata Search #28 ,Tata Steel , Jamshedpur, India Págs. 35 - 44
- 12) LEIBROCK , K; PETAK, H. – Coke Production from Low-Coking Coal Blends by Densification, Fuel Processing Technology, 7 1983, Amsterdam, Holanda Pags 91 – 107
- 13) OSÓRIO, E. – Utilização de Carvões da Jazida de Chico-Lomã para a Produção de Coque, Tese para obtenção do Título de Doutorado, 1997, Porto Alegre, Brasil
- 14) DASH, P. S; KRISHNAN, S. H. – Optimum Utilization of Low Ash Carbonaceous Constituents in Stamp Charging, Tata Search 2004 ,Tata Steel , Jamshedpur, India Págs. 49 -53
- 15) CHATTERJEE, A. – Stamp Charging – A Unique Method of Producing High Quality Coke (Apresentação feita na 3rd Indian Steel & Steel Making Raw Materials Conference, 16 February, 2007, New Delhi, India)
- 16) VALIA, H. S. - Comparação da Qualidade do Coque Produzido em uma Planta com Sub-produtos (EUA) uma Planta sem Recuperação de Calor e uma Planta Produzida com Recuperação de Calor, Ispat Inland Research Laboratories, East Chicago, Indiana USA
- 17) VIANA FILHO, O. A.; OLIVEIRA, J. L. R. de Relatório de Viagem para Índia, Ucrânia e China, Gerência de Redução -Gerdau Açominas- Ouro Branco/MG – Brasil / Outubro de 2007)
- 18) Relatórios e Informes Técnicos Gerais da Área de Coqueria da Gerdau Açominas



## 8 – ANEXO

### Equações de Correlação do Forno Piloto com as Baterias de Fornos de Coque

Foi feito uma revisão dos cálculos em MINITAB, para a utilização na rotina do forno piloto (Enfornamento de misturas) baseada nos dados que formam as equações de correlação do Forno Piloto para as Baterias de Fornos de coque em escala industrial, para tal foram verificados os seguintes gráficos:

- Carta de I, MR dos dados para DI, CSR e CRI; (Verificação de causas especiais que possam atrapalhar a correlação);
- Relatório de regressão e gráfico com análises dos resíduos do MINITAB

#### Análise das Cartas de I-MR

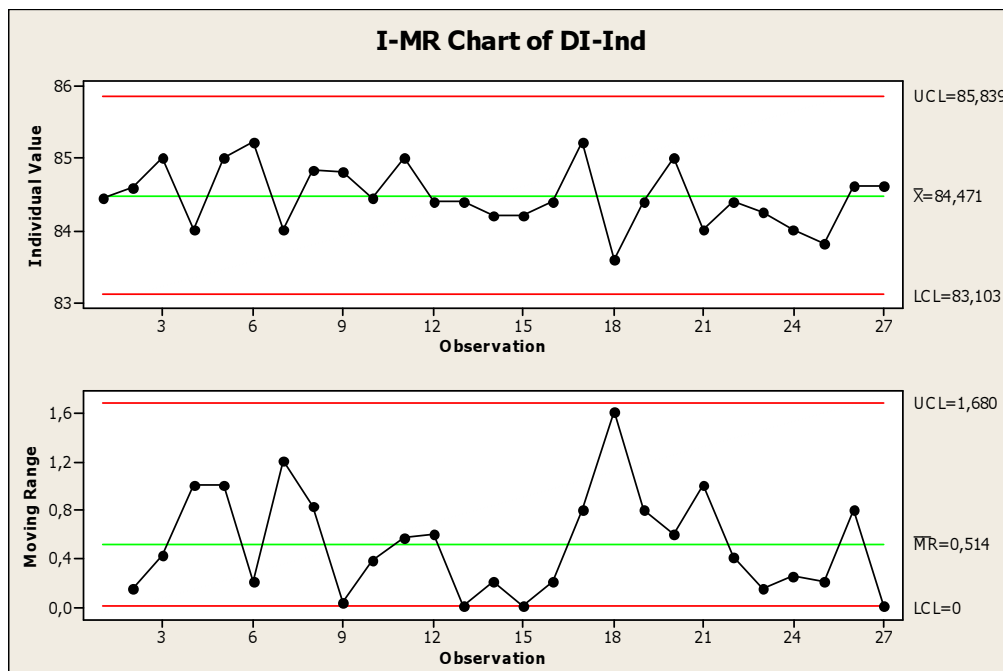


FIGURA 8.1: Carta de Valores Individuais para o DI em escala industrial

Comentários: Esta carta não apresenta nenhuma causa especial nos dados do DI industrial, que possa influenciar a equação de correlação para o DI.

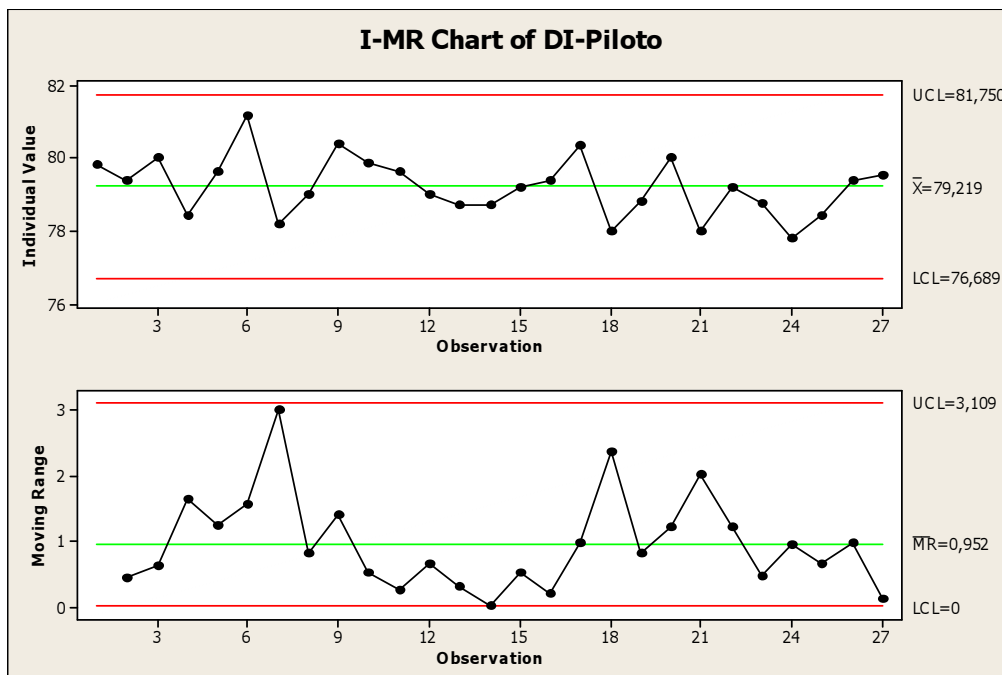


FIGURA 8.2: Carta de Valores Individuais para o DI em escala piloto

Comentários: para os dados do DI do piloto, também não foi verificado nenhuma causa especial. Com isso, os dados apresentados podem ser correlacionados sem que tenham influência de causas especiais.

CSR

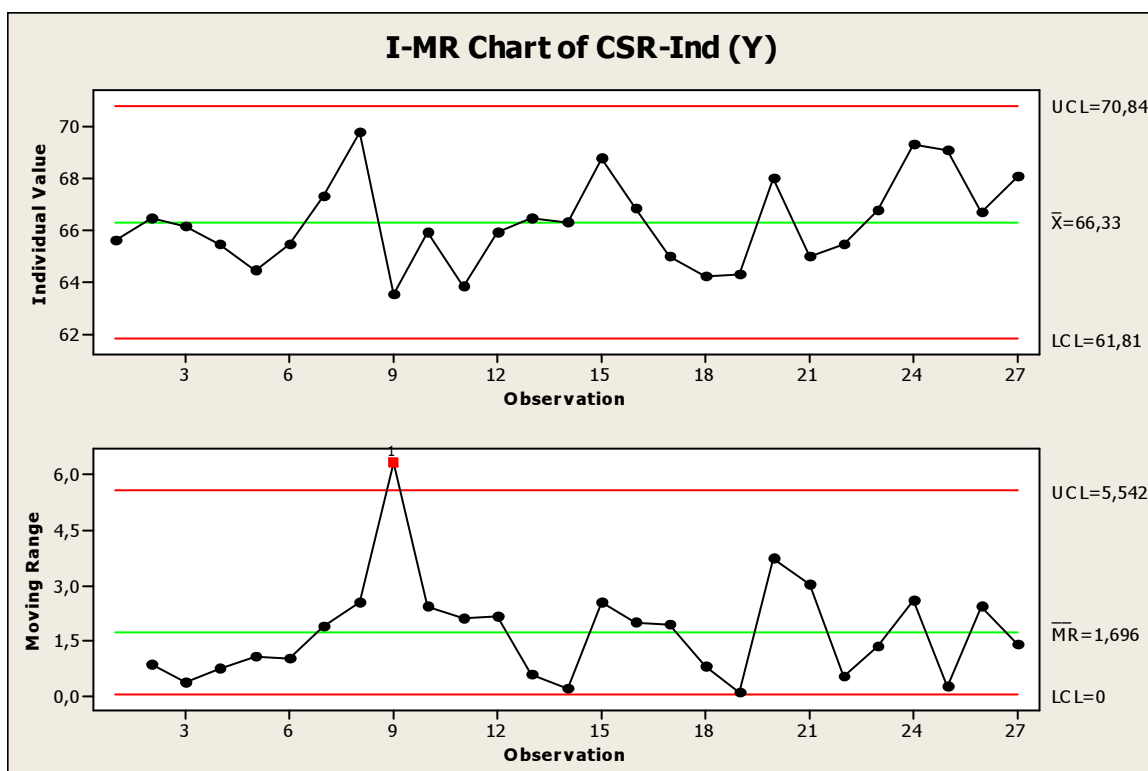


FIGURA 8.3: Carta de Valores Individuais para o CSR em escala industrial

Comentários: Apesar do ponto 9 apresentar uma grande amplitude (Vide gráfico *Moving Range*), os demais dados, mesmo com o ponto 9, não apresentam uma causa especial.

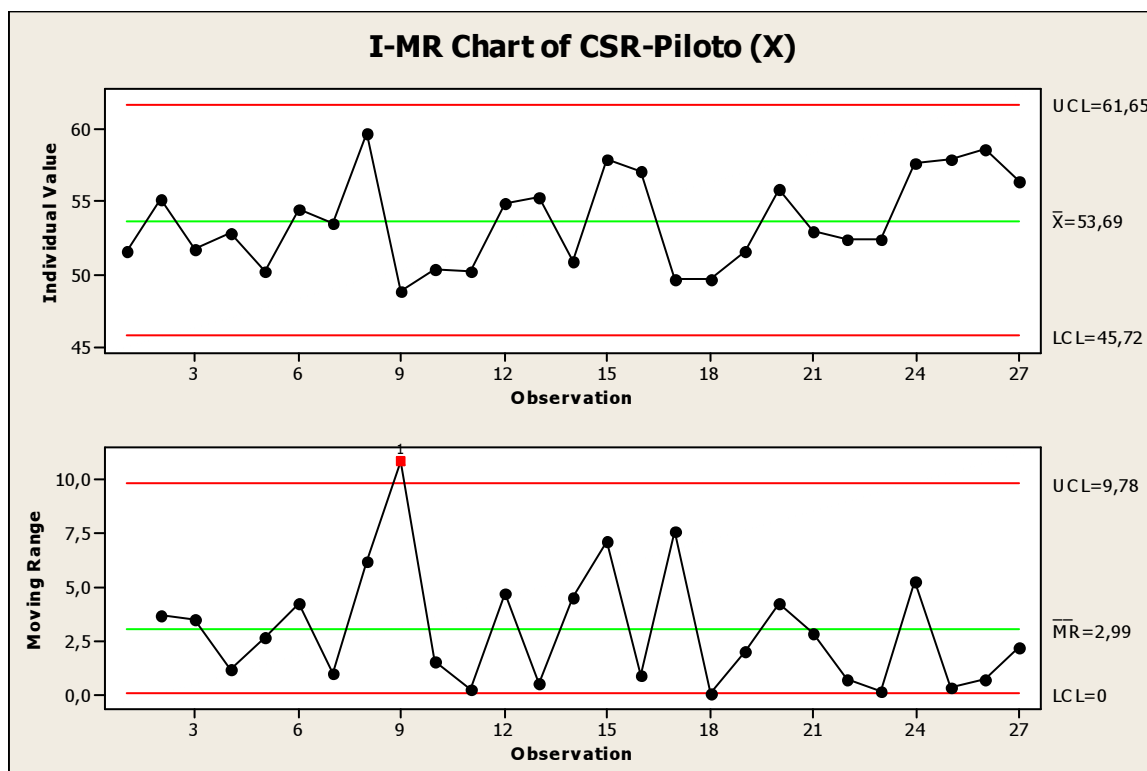


FIGURA 8.4: Carta de Valores Individuais para o CSR em escala piloto

Comentários: Interessante observar que o mesmo ponto 9 apresenta uma grande amplitude, mostrando uma correlação interessante entre piloto e industrial, e também, não apresenta causa especial que possa influenciar a equação de correlação entre as duas plantas.

CRI

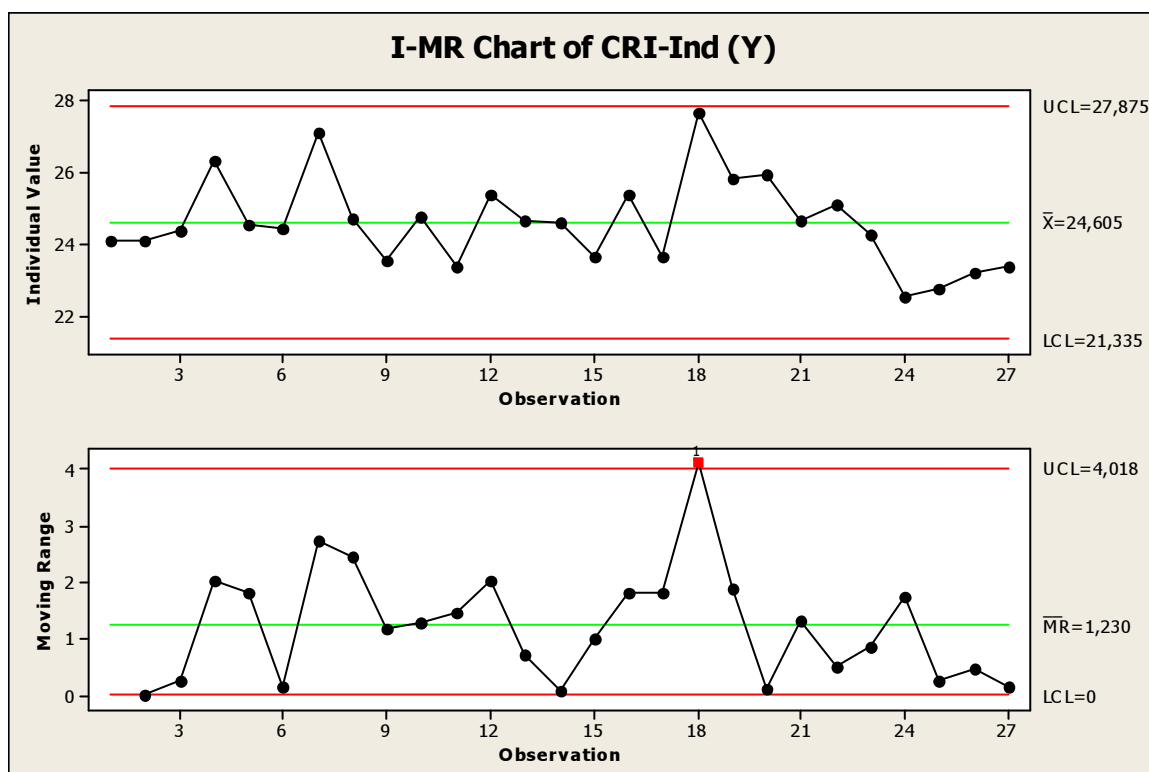


FIGURA 8.5: Carta de Valores Individuais para o CRI em escala industrial

Comentários: Para esta carta notou-se somente uma maior amplitude no ponto 18, com isso não há influência ainda de nenhum ponto para a correlação.

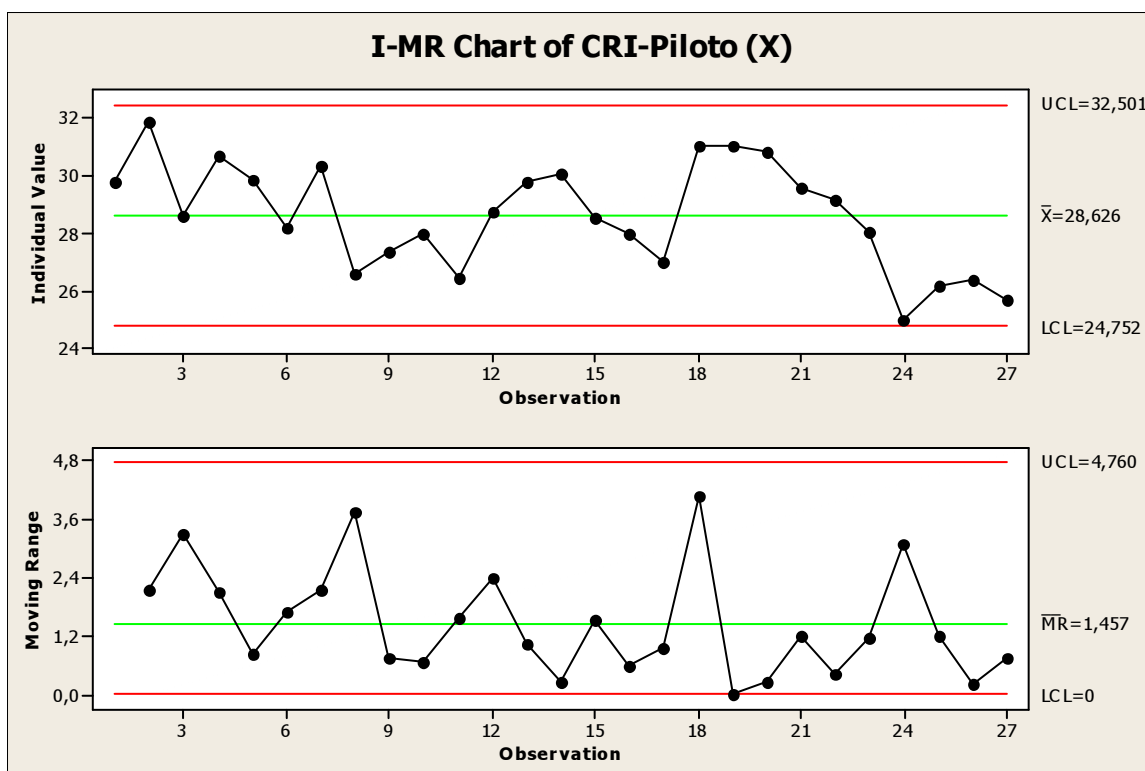


FIGURA 8.6: Carta de Valores Individuais para o CRI em escala piloto

Comentários: Para esta carta, também não existe nenhum ponto que seja causa especial.

NOTA: Um ponto fora dos limites em 25 é considerado um “bom estado de controle estatístico”. Nenhum ponto fora dos limites em 25 é considerado “excelente estado de controle”.

## Relatórios de saída do MINITAB para as equações de correlação do DI, CSR e CRI

### DI

#### Regression Analysis: DI-Ind versus DI-Piloto

The regression equation is  
 DI-Ind = 48,8 + 0,450 DI-Piloto

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	48,828	4,172	11,70	0,000
DI-Piloto	0,44993	0,05266	8,54	0,000

S = 0,220975    R-Sq = 74,5%    R-Sq(adj) = 73,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	3,5643	3,5643	72,99	0,000
Residual Error	25	1,2208	0,0488		
Total	26	4,7851			

Obs	DI-Piloto	DI-Ind	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	79,8	84,4300	84,7504	0,0536	-0,3204	-1,49
2	79,4	84,5800	84,5569	0,0437	0,0231	0,11
3	80,0	85,0000	84,8404	0,0606	0,1596	0,75
4	78,4	84,0000	84,1025	0,0606	-0,1025	-0,48
5	79,6	85,0000	84,6604	0,0480	0,3396	1,57
6	81,2	85,2000	85,3623	0,1126	-0,1623	-0,85 X
7	78,2	84,0000	84,0125	0,0685	-0,0125	-0,06
8	79,0	84,8300	84,3725	0,0441	0,4575	2,11R
9	80,4	84,8000	85,0024	0,0753	-0,2024	-0,97
10	79,9	84,4300	84,7684	0,0549	-0,3384	-1,58
11	79,6	85,0000	84,6604	0,0480	0,3396	1,57
12	79,0	84,4000	84,3725	0,0441	0,0275	0,13
13	78,7	84,4000	84,2375	0,0506	0,1625	0,76
14	78,7	84,2000	84,2375	0,0506	-0,0375	-0,17
15	79,2	84,2000	84,4624	0,0425	-0,2624	-1,21
16	79,4	84,4000	84,5524	0,0436	-0,1524	-0,70
17	80,4	85,2000	84,9844	0,0736	0,2156	1,03
18	78,0	83,6000	83,9225	0,0770	-0,3225	-1,56
19	78,8	84,4000	84,2825	0,0479	0,1175	0,54
20	80,0	85,0000	84,8224	0,0592	0,1776	0,83
21	78,0	84,0000	83,9225	0,0770	0,0775	0,37
22	79,2	84,4000	84,4624	0,0425	-0,0624	-0,29
23	78,8	84,2500	84,2600	0,0492	-0,0100	-0,05
24	77,8	84,0000	83,8325	0,0860	0,1675	0,82
25	78,4	83,8000	84,1205	0,0591	-0,3205	-1,51
26	79,4	84,6000	84,5524	0,0436	0,0476	0,22
27	79,5	84,6000	84,6064	0,0454	-0,0064	-0,03

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large influence.

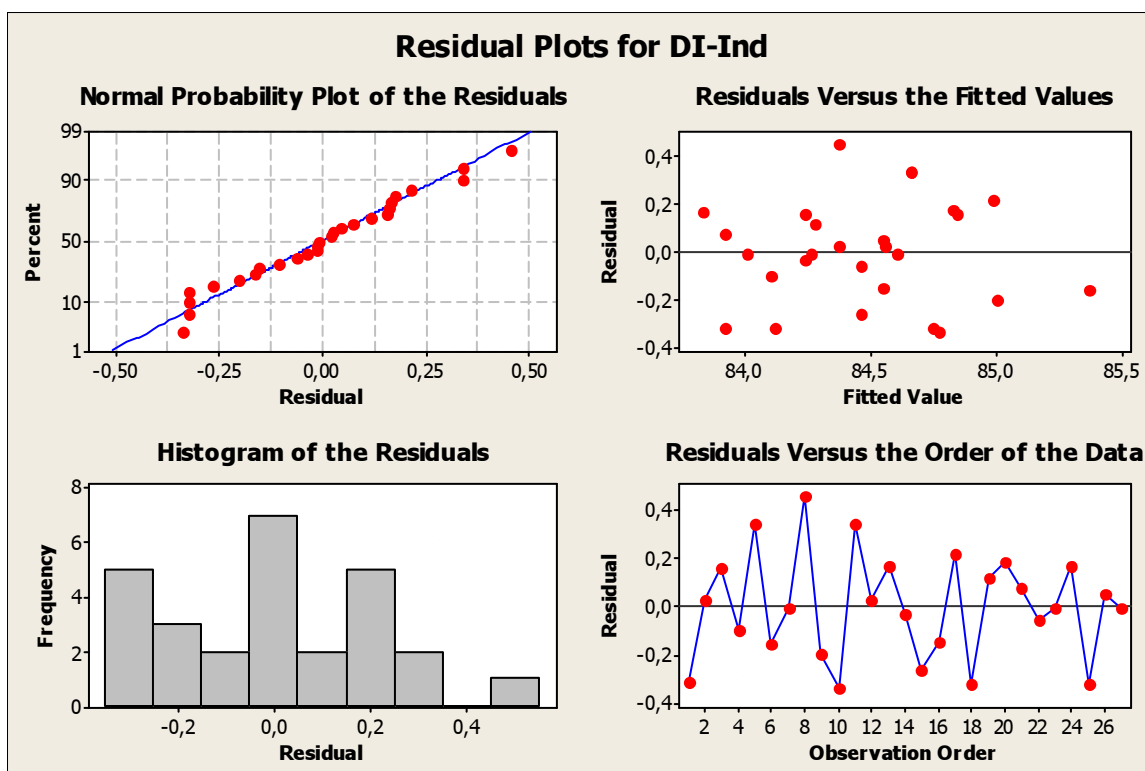


FIGURA 8.7: Carta de Avaliação dos Resíduos para a equação de correlação do DI em escala industrial

Comentários: O relatório apresenta uma correlação do DI industrial com o DI piloto que é validada pelo  $p=0$  (Teste de hipótese – Rejeição de  $h_0$ ); o  $R^2 = 74,5\%$ , mostrando que a correlação entre os dois eixos é alta.

Na análise dos resíduos apesar dos pontos 8 e 10 influenciarem a equação, a distribuição e normalidade dos resíduos são boas e normais, validando com isso a equação.

$$DI_{ind} = 48,8 + 0,45 * DI_{piloto}$$

## CSR

### Regression Analysis: CSR-Ind (Y) versus CSR-Piloto (X)

The regression equation is

$$CSR\text{-Ind (Y)} = 41,6 + 0,461 \text{ CSR-Piloto (X)}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	41,601	3,055	13,62	0,000
CSR-Piloto (X)	0,46055	0,05680	8,11	0,000



S = 0,914899    R-Sq = 72,4%    R-Sq(adj) = 71,3%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	55,024	55,024	65,74	0,000
Residual Error	25	20,926	0,837		
Total	26	75,950			

Obs	CSR-Piloto (X)	CSR-Ind (Y)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	51,6	65,660	65,342	0,214	0,318	0,36
2	55,2	66,500	67,000	0,195	-0,500	-0,56
3	51,7	66,190	65,407	0,209	0,783	0,88
4	52,8	65,500	65,936	0,183	-0,436	-0,49
5	50,2	64,460	64,730	0,264	-0,270	-0,31
6	54,4	65,450	66,669	0,181	-1,219	-1,36
7	53,5	67,300	66,231	0,176	1,069	1,19
8	59,7	69,820	69,086	0,383	0,734	0,88
9	48,9	63,500	64,103	0,326	-0,603	-0,71
10	50,4	65,910	64,794	0,258	1,116	1,27
11	50,2	63,820	64,697	0,267	-0,877	-1,00
12	54,9	65,950	66,862	0,188	-0,912	-1,02
13	55,3	66,480	67,083	0,199	-0,603	-0,68
14	50,9	66,330	65,038	0,237	1,292	1,46
15	58,0	68,850	68,304	0,301	0,546	0,63
16	57,1	66,900	67,917	0,264	-1,017	-1,16
17	49,6	65,000	64,449	0,291	0,551	0,64
18	49,6	64,230	64,449	0,291	-0,219	-0,25
19	51,6	64,300	65,356	0,213	-1,056	-1,19
20	55,8	68,020	67,309	0,214	0,711	0,80
21	53,0	65,000	66,010	0,180	-1,010	-1,13
22	52,4	65,500	65,720	0,191	-0,220	-0,25
23	52,4	66,800	65,747	0,190	1,053	1,18
24	57,6	69,340	68,133	0,284	1,207	1,39
25	57,9	69,130	68,267	0,297	0,863	1,00
26	58,6	66,750	68,575	0,329	-1,825	-2,14R
27	56,4	68,100	67,576	0,234	0,524	0,59

R denotes an observation with a large standardized residual.

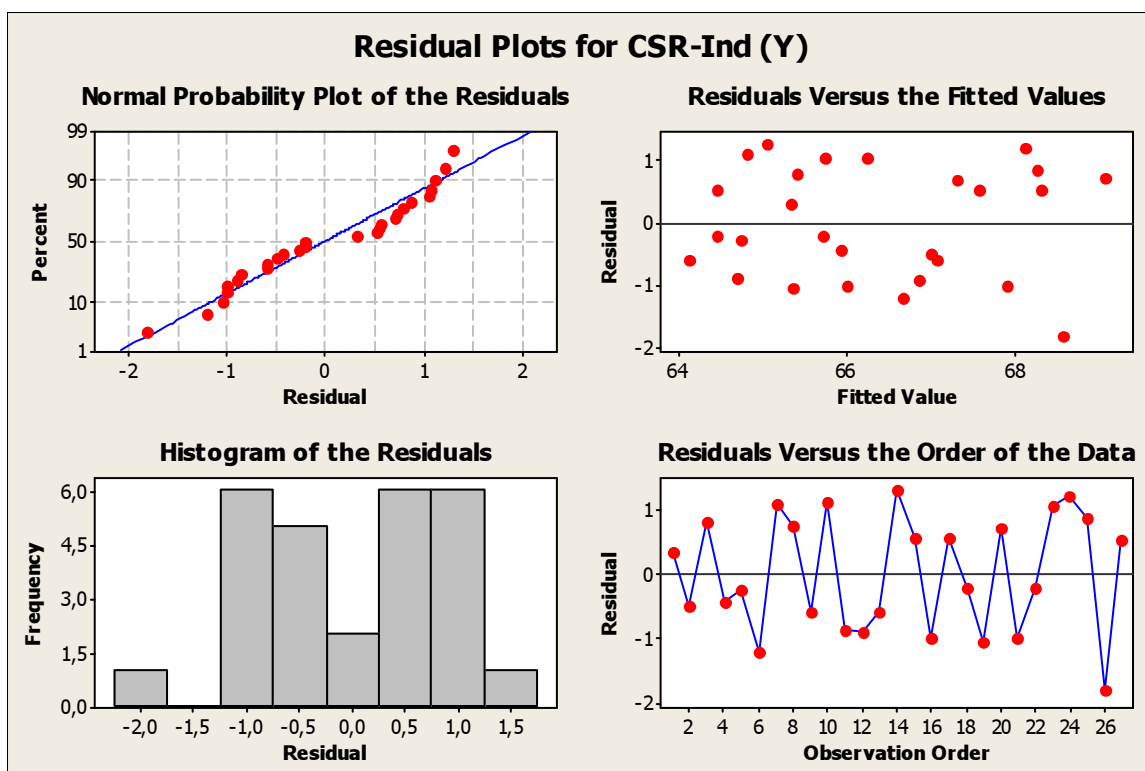


FIGURA 8.8: Carta de Avaliação dos Resíduos para a equação de correlação do CSR em escala industrial

Comentários: Da mesma forma que o relatório do DI, este relatório para o CSR apresenta uma correlação validada pelo  $p=0$  (Teste de hipótese – Rejeição de  $h_0$ ); o  $R^2 = 72,4$ , mostrando que a correlação entre os dois eixos é alta.

Na análise dos resíduos o ponto 26 tem uma alta padronização residual (conforme gráfico de normalidade e distribuição acima), porém a distribuição é normal este não é uma causa especial, validando a equação abaixo:

$$CSR_{ind} = 41,6 + 0,461 * CSR_{piloto}$$

## CRI

### Regression Analysis: CRI-Ind (Y) versus CRI-Piloto (X)

The regression equation is  
 CRI-Ind (Y) = 10,6 + 0,489 CRI-Piloto (X)

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
-----------	------	---------	---	---

Constant	10,611	2,651	4,00	0,000
CRI-Piloto (X)	0,48885	0,09241	5,29	0,000

S = 0,877976    R-Sq = 52,8%    R-Sq(adj) = 50,9%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	21,572	21,572	27,99	0,000
Residual Error	25	19,271	0,771		
Total	26	40,843			

Obs	CRI-Piloto (X)	CRI-Ind (Y)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	29,8	24,110	25,169	0,200	-1,059	-1,24
2	31,9	24,110	26,206	0,347	-2,096	-2,60R
3	28,6	24,360	24,592	0,169	-0,232	-0,27
4	30,7	26,380	25,624	0,256	0,756	0,90
5	29,9	24,570	25,223	0,205	-0,653	-0,76
6	28,2	24,420	24,397	0,173	0,023	0,03
7	30,4	27,150	25,448	0,232	1,702	2,01R
8	26,6	24,700	23,615	0,252	1,085	1,29
9	27,3	23,540	23,971	0,207	-0,431	-0,51
10	28,0	24,800	24,284	0,180	0,516	0,60
11	26,4	23,360	23,527	0,265	-0,167	-0,20
12	28,8	25,380	24,680	0,170	0,700	0,81
13	29,8	24,680	25,184	0,201	-0,504	-0,59
14	30,1	24,620	25,306	0,215	-0,686	-0,81
15	28,6	23,620	24,568	0,169	-0,948	-1,10
16	28,0	25,420	24,279	0,180	1,141	1,33
17	27,0	23,620	23,810	0,226	-0,190	-0,22
18	31,1	27,730	25,795	0,281	1,935	2,33R
19	31,1	25,850	25,795	0,281	0,055	0,07
20	30,8	25,960	25,682	0,265	0,278	0,33
21	29,6	24,660	25,091	0,192	-0,431	-0,50
22	29,2	25,140	24,881	0,177	0,259	0,30
23	28,0	24,280	24,314	0,178	-0,034	-0,04
24	25,0	22,530	22,818	0,378	-0,288	-0,36
25	26,2	22,770	23,409	0,282	-0,639	-0,77
26	26,4	23,220	23,517	0,266	-0,297	-0,35
27	25,7	23,360	23,155	0,322	0,205	0,25

R denotes an observation with a large standardized residual.

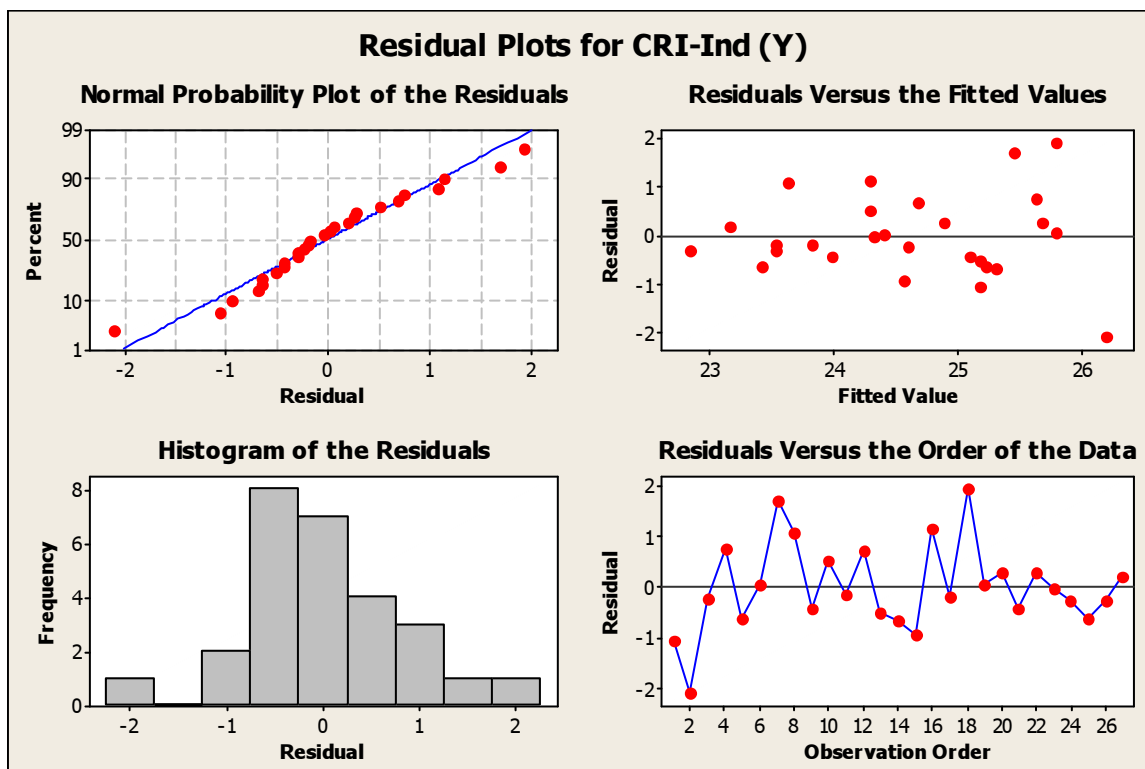


FIGURA 8.9: Carta de Avaliação dos Resíduos para a equação de correlação do CRI em escala industrial

Comentários: Para o CRI, apesar de termos também uma correlação validada devido ao teste de hipóteses  $p=0$ , o  $R^2 = 52,8\%$ , mostrando que a correlação entre os dois eixos não é tão alta, concluindo com isso que o seu uso para estimativa se torna muito temerosa pois apesar de ter correlação a estimativa não é bem ajustada e confiável.

Com isso analisamos o relatório e gráficos de resíduos e podemos descartar três pontos (2, 7 e 18) pontos estes que se destacam por ter alta padronização residual (Conforme gráficos), isto para melhorarmos o valor de  $R^2$ .

Por não se ter mais o histórico destes pontos iremos descartá-los e será feita uma nova correlação; porém, como não há uma justificativa para este descarte a nova equação será uma equação com melhor  $R^2$ , mas será para determinar valores potenciais de CRI; por este motivo chamaremos esta equação de CRI potencial.

**CRI<sub>potencial</sub>****Regression Analysis: CRI-Ind pot versus CRI-Piloto pot**

The regression equation is  
 CRI-Ind pot = 8,22 + 0,576 CRI-Piloto pot

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8,217	2,613	3,14	0,005
CRI-Piloto pot	0,57592	0,09126	6,31	0,000

S = 0,799105    R-Sq = 64,4%    R-Sq(adj) = 62,8%

## Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	25,429	25,429	39,82	0,000
Residual Error	22	14,048	0,639		
Total	23	39,478			

Obs	CRI-Piloto pot	CRI-Ind pot	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	29,8	24,110	25,368	0,197	-1,258	-1,62
2	28,6	24,360	24,689	0,163	-0,329	-0,42
3	30,7	26,380	25,904	0,254	0,476	0,63
4	29,9	24,570	25,432	0,202	-0,862	-1,11
5	30,4	27,150	25,697	0,230	1,453	1,90
6	26,6	24,700	23,537	0,243	1,163	1,53
7	27,3	23,540	23,957	0,199	-0,417	-0,54
8	28,0	24,800	24,326	0,172	0,474	0,61
9	26,4	23,360	23,433	0,256	-0,073	-0,10
10	28,8	25,380	24,792	0,164	0,588	0,75
11	29,8	24,680	25,386	0,198	-0,706	-0,91
12	30,1	24,620	25,530	0,212	-0,910	-1,18
13	28,6	23,620	24,660	0,163	-1,040	-1,33
14	28,0	25,420	24,320	0,173	1,100	1,41
15	31,1	27,730	26,106	0,279	1,624	2,17R
16	31,1	25,850	26,106	0,279	-0,256	-0,34
17	30,8	25,960	25,973	0,263	-0,013	-0,02
18	29,6	24,660	25,276	0,189	-0,616	-0,79
19	29,2	25,140	25,029	0,172	0,111	0,14
20	28,0	24,280	24,360	0,171	-0,080	-0,10
21	25,0	22,530	22,598	0,367	-0,068	-0,10
22	26,2	22,770	23,295	0,273	-0,525	-0,70
23	26,4	23,220	23,422	0,257	-0,202	-0,27
24	25,7	23,360	22,996	0,312	0,364	0,50

R denotes an observation with a large standardized residual.

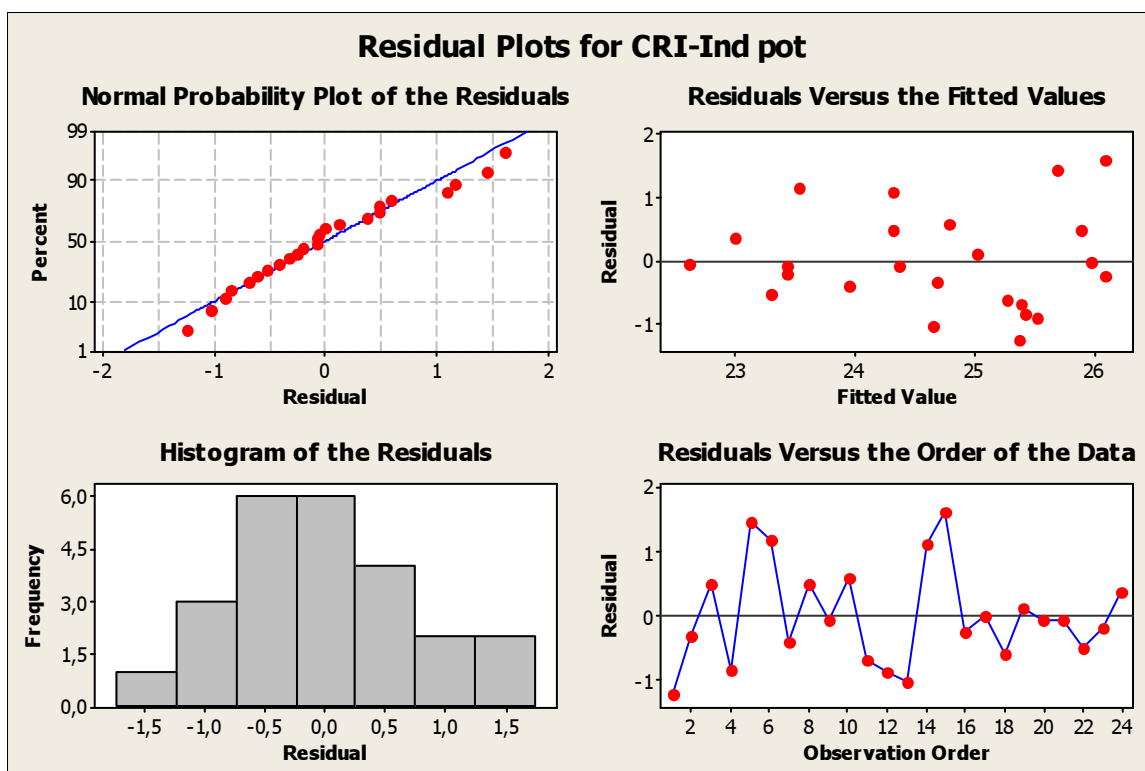


FIGURA 8.10: Carta de Avaliação dos Resíduos para a equação de correlação do CRI em escala industrial após tratamento

Comentários: Analisando o CRI potencial após tratamento, verifica-se que o  $R^2$  sobe para 64,4% sendo um valor mais aceitável na confiança dos resultados a serem estimados. Os resíduos indicam ainda que o ponto 15 tenha uma alta padronização residual, mas mesmo assim não é necessário descartá-lo, pois além de diminuir o  $n^\circ$  de dados já temos um valor mais aceitável para o  $R^2$ .

$$CRI_{\text{potencial ind}} = 8,22 + 0,576 * CRI_{\text{potencial piloto}}$$

Cálculo da Estimativa do Intervalo com confiança de 95% para um valor  $x_0$  especificado.

O cálculo do Intervalo de estimativa se dá pelas seguintes equações:

$$\text{Erro Padrão da Estimativa } (S_e) = \sqrt{\frac{\sum y^2 - a * \sum y - b * \sum xy}{(n-2)}}$$

$$\text{Cálculo do Intervalo de Estimativa (95\%)} = t_{0,05/2} * S_e \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{n(x_0 - \bar{x})^2}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}}$$

Obs.: Este cálculo serve para a estimativa quando se tem um valor de análise.

Para o caso de se ter mais de uma análise da amostra usa-se a seguinte equação:

$$\text{Cálculo do Intervalo de Estimativa (95\%)} = t_{0,05/2} * S_e \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{n(x_0 - \bar{x})^2}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}}$$