

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

Redução do teor de cinzas dos finos de carvão
vegetal por concentração gravítica a seco

Autor: Rodrigo Camargos Barroso

Orientador: Professor Antônio Eduardo Clark Peres

Co-orientador: Professor Luiz Cláudio Monteiro Montenegro

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

Fevereiro/2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Rodrigo Camargos Barroso

**REDUÇÃO DO TEOR DE CINZAS DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL
POR CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA A SECO**

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

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Professor Antônio Eduardo Clark Peres

Co-orientador: Professor Luiz Cláudio Monteiro Montenegro

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

À minha esposa Áurea e a meus filhos Pedro Henrique e Ana Clara pelo amor, carinho, compreensão e paciência que compartilharam comigo não só durante a elaboração desse trabalho, mas como filosofia de vida.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Antônio Eduardo Clark Peres e Luiz Cláudio Monteiro Montenegro pela clareza e dedicação ilimitada na orientação dos trabalhos contribuindo de maneira decisiva nos resultados.

À *V&M do Brasil* e a Escola de Engenharia da UFMG pela parceria que levou ao êxito desse trabalho.

Ao meu amigo Cláudio Musso Velloso pela amizade e companheirismo cultivados ao longo de toda a jornada acadêmica.

Aos meus amigos Paulo Miranda e Hélio Manetta que me incentivaram e me apoiaram durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos José Luiz de Souza, José Jaime, Mário Rosa, Renato Wanderley e Antônio Carmanini pelo suporte e presteza com que me auxiliaram na realização dos testes.

Aos professores Luiz Fernando Andrade e Castro e Roberto Galery pela transmissão do conhecimento e solidariedade.

Aos alunos e funcionários dos Departamentos de Engenharia Metalúrgica e de Minas, em especial o Alberto pela colaboração e empenho na execução dos ensaios laboratoriais.

A equipe de Matérias-Primas e Laboratórios pela ajuda na execução dos diversos experimentos.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram de alguma forma para a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

1 –	Introdução	1
2 –	Objetivo	2
3 –	Revisão Bibliográfica	3
3.1 –	Carvão vegetal	3
3.1.1 –	Aspectos técnicos	3
3.1.2 –	Produção e consumo	7
3.1.3 –	Qualidade	9
3.1.4 –	Utilização nos altos-fornos	12
3.2 –	Sistemas de Separação	18
3.2.1 –	Introdução	18
3.2.2 –	Princípios de peneiramento	20
3.2.3 –	Princípios de classificação e concentração	25
3.2.4 –	Princípios de concentração gravítica	41
3.2.5 –	Balanço de massa e determinação da eficiência da separação	47
4 –	Materiais e Métodos	52
4.1 –	Coleta e preparação da amostras	52
4.2 –	Análise laboratorial das amostras	53
4.3 –	Ensaio de separação a seco	54
4.3.1 –	Aeroclassificador	54
4.3.2 –	Peneiramento	55
4.4 –	Análise dos resultados	56
5 –	Resultados e Discussões	57
5.1 –	Caracterização do carvão vegetal de referência	57
5.2 –	Caracterização dos finos de carvão vegetal	59
5.3 –	Determinação da densidade aparente e da forma dos finos de carvão vegetal	62
5.4 –	Ensaio de separação a seco	63
5.4.1 –	Peneiramento	65
5.4.2 –	Aeroclassificador simples	67
5.4.3 –	Aeroclassificador modificado	74
6 –	Conclusões	78
7 –	Recomendações	80
8 –	Referências Bibliográficas	81
9 –	Anexos	
9.1 –	Metodologia para determinação densidade aparente do carvão vegetal e das impurezas.	86
9.2 –	Metodologia para determinação da forma do carvão vegetal e das impurezas.	96
9.3 –	Partição em massa e distribuição granuloquímica dos testes do aeroclassificador.	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 -	Esquema de conversão da madeira para carvão vegetal.	3
Figura 3.2 -	Modelo esquemático da produção de carvão vegetal a partir da carbonização da madeira em fornos de alvenaria.	4
Figura 3.3 -	Tipos de fornos de carbonização de alvenaria.	5
Figura 3.4 -	Fluxograma de produção de carvão vegetal em fornos de carbonização contínua ou retorta.	6
Figura 3.5 -	Origem da matéria-prima para a produção de carvão vegetal no Brasil.	7
Figura 3.6 -	Distribuição do consumo de carvão vegetal no Brasil por setor, de 1990 a 2004.	7
Figura 3.7 -	Distribuição do consumo de carvão vegetal no Brasil por Estado, de 1990 a 2004.	8
Figura 3.8 -	Relação entre a densidade do carvão vegetal em função da densidade da madeira e da temperatura de carbonização.	9
Figura 3.9 -	Análise química imediata em função da temperatura de carbonização.	10
Figura 3.10 -	Teor de carbono fixo em função da temperatura de carbonização.	10
Figura 3.11 -	Distribuição granulométrica típica e tamanho médio do carvão vegetal.	12
Figura 3.12 -	Composição química (análise imediata) média do carvão vegetal.	14
Figura 3.13 -	Análise química do carvão vegetal bruto de 27 fornadas e do carvão vegetal do Alto-Forno #2 da Acesita.	15
Figura 3.14 -	Influência do teor de cinzas dos finos de carvão vegetal sobre a taxa de substituição (kg carvão economizado/kg finos injetado).	16
Figura 3.15 -	Distribuição percentual do peso de escória por corrida, para um alto-forno a carvão vegetal: A – com injeção e B – sem injeção de carvão pulverizado.	16
Figura 3.16 -	Peneira vibratória.	20
Figura 3.17 -	Separação de partículas em uma peneira vibratória inclinada.	21
Figura 3.18 -	Comportamento individual das partículas.	22

Figura 3.19 - Abertura da peneira e sua projeção.	22
Figura 3.20 - Abertura equivalente em função do tamanho do produto: A para telas de borracha e plástico com abertura quadrada; B para telas de borracha e plástico com abertura retangular, e para telas de arame com abertura quadrada; C telas de arame para abertura retangular.	23
Figura 3.21 - Balanço de forças em uma partícula em meio fluido e detalhamento da força de resistência.	25
Figura 3.22 - Tipo de regime de escoamento em função do número de Reynolds.	27
Figura 3.23 - Exemplo de queda livre e queda retardada de esferas grossas e finas de quartzo e galena.	33
Figura 3.24 - Representação esquemática de uma separação em um classificador.	34
Figura 3.25 - Representação esquemática de um classificador espiral.	35
Figura 3.26 - Ciclone.	36
Figura 3.27 - Representação esquemática da separação de partículas em aeroclassificador: separação gravitacional com contra-fluxo (a); separação gravitacional com fluxo transversal (b); separação centrífuga com contra-fluxo (c) e separação centrífuga com fluxo transversal.	37
Figura 3.28 - Classificador a ar em cascata: zig-zag.	38
Figura 3.29 - Classificador inerte a ar (a) e Classificadores a ar com leito fluidizado (b).	39
Figura 3.30 - Classificadores centrífugos a ar com lâminas rotativas (a) e com lâminas perfiladas.	40
Figura 3.31 - Efeitos dos mecanismos de concentração gravítica.	41
Figura 3.32 - Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria.	43
Figura 3.33 - Ação dos mecanismos de estratificação em um jigue.	44
Figura 3.34 - Jigue.	44
Figura 3.35 - Jigue pneumático (a) e detalhe do mecanismo de separação (b).	44
Figura 3.36 - Calha estrangulada.	45
Figura 3.37 - Mesa pneumática.	46

Figura 3.38 - Fluxograma esquemático de uma separação entre duas espécies.	47
Figura 3.39 - Curvas de partição real e ideal.	50
Figura 4.1 - Modelo esquemático do aeroclassificador desenvolvido pela V&M do Brasil e a EEUFMG.	54
Figura 4.2 - Ilustração da variação da distância entre a entrada da alimentação e a seção de entrada do fluido (“altura 1”).	55
Figura 5.1 - Análise imediata e teor de cinzas por faixa granulométrica do carvão vegetal de referência.	57
Figura 5.2 - Aspecto das cinzas após calcinação e composição química das cinzas do carvão vegetal de referência.	58
Figura 5.3 - Distribuição granulométrica dos finos de carvão vegetal utilizados na etapa de caracterização.	59
Figura 5.4 - Análise imediata (a) e teor de cinzas por faixa granulométrica (b) dos finos de carvão vegetal.	60
Figura 5.5 - Aspecto das cinzas após calcinação e composição química das cinzas dos finos de carvão vegetal.	61
Figura 5.6 - Formato típico de uma partícula de carvão fino (moinha) utilizada no teste.	62
Figura 5.7 - Distribuição granulométrica e análise imediata dos finos de carvão vegetal utilizados nos testes de separação (alimentação).	63
Figura 5.8 - Distribuição da amostra e de seus constituintes: carvão vegetal e impurezas.	65
Figura 5.9 - Gráfico teor de impurezas x recuperação de carvão vegetal para o peneiramento.	66
Figura 5.10 - Determinação do número de Reynolds e da velocidade terminal das partículas em função do tamanho.	67
Figura 5.11 - Resultados da separação carvão X impureza no <i>underflow</i> do aeroclassificador - “altura”: 400mm.	68
Figura 5.12 - Resultados da separação carvão X impureza no <i>underflow</i> do aeroclassificador - “altura”: 800mm.	68
Figura 5.13 - Resultados da separação carvão X impureza no <i>underflow</i> do aeroclassificador - “altura”: 1200mm.	69

Figura 5.14 - Resultados da separação carvão X impureza no <i>underflow</i> do aeroclassificador - "altura": 1600mm.	69
Figura 5.15 - Resultados da separação carvão X impureza no <i>underflow</i> do aeroclassificador - "altura": 2400mm.	70
Figura 5.16 - Curvas teor de impurezas x recuperação de carvão em função da distância no aeroclassificador.	71
Figura 5.17 - Recuperação do carvão e impurezas no <i>underflow</i> em função da velocidade do fluido.	73
Figura 5.18 - Aeroclassificador modificado.	74
Figura 5.19 - Aeroclassificador modificado + peneiramento.	75
Figura 5.20 - Aeroclassificador modificado (2 etapas).	75
Figura 5.21 - Aeroclassificador modificado (2 etapas) + peneiramento (corte 0,84mm).	76
Figura 5.22 - Aeroclassificador modificado (2 etapas) + peneiramento (corte 2,38mm).	76
Figura 5.23 - Curva teor de impurezas x recuperação de carvão para os diversos sistemas de separação avaliados.	77
Figura 9.1 - Dispositivo para determinação da densidade aparente do carvão vegetal e das impurezas.	86
Figura 9.2 - Formato e relação entre as dimensões da partícula de carvão vegetal.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 -	Etapas do processo de carbonização da madeira	5
Tabela III.2 -	Análise química imediata do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização	10
Tabela III.3 -	Rendimento dos fornos de carbonização em função da temperatura de carbonização	11
Tabela III.4 -	Análise química imediata para carvão vegetal entre 0,15mm e 0,84mm	14
Tabela III.5 -	Propriedades diferenciadoras e seus correspondentes métodos de tratamento	19
Tabela III.6 -	Escalas granulométricas	24
Tabela III.7 -	Valores de densidade e viscosidade da água e do ar em função da temperatura a 1 atm de pressão	34
Tabela III.8 -	Classificação dos processos de concentração gravítica	42
Tabela IV.1 -	Modelos matemáticos de distribuição de tamanho	56
Tabela V.1 -	Valores de densidade aparente do carvão vegetal e das impurezas	62
Tabela V.2 -	Teor de finos de carvão e impurezas por faixa granulométrica do material utilizado nos testes de separação (alimentação)	63
Tabela V.3 -	Parâmetro dos modelos de distribuição de tamanho para a amostras, carvão e impurezas	64
Tabela IX.1 -	Resultados da medição da altura, largura e comprimento das partículas de carvão vegetal por faixa granulométrica	88
Tabela IX.2 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 400mm e velocidade do ar de 13m/s	89
Tabela IX.3 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 400mm e velocidade do ar de 16m/s	89
Tabela IX.4 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 400mm e velocidade do ar de 18m/s	90
Tabela IX.5 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 400mm e velocidade do ar de 21m/s	90
Tabela IX.6 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 800mm e velocidade do ar de 13m/s	91

Tabela IX.7 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 800mm e velocidade do ar de 16m/s	91
Tabela IX.8 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 800mm e velocidade do ar de 18m/s	92
Tabela IX.9 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 800mm e velocidade do ar de 21m/s	92
Tabela IX.10 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 1200mm e velocidade do ar de 13m/s	93
Tabela IX.11 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 1200mm e velocidade do ar de 16m/s	93
Tabela IX.12 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 1200mm e velocidade do ar de 18m/s	94
Tabela IX.13 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 1600mm e velocidade do ar de 13m/s	94
Tabela IX.14 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 1600mm e velocidade do ar de 16m/s	95
Tabela IX.15 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 1600mm e velocidade do ar de 18m/s	95
Tabela IX.16 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 1600mm e velocidade do ar de 21m/s	96
Tabela IX.17 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 2400mm e velocidade do ar de 13m/s	96
Tabela IX.18 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 2400mm e velocidade do ar de 16m/s	97
Tabela IX.19 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 2400mm e velocidade do ar de 18m/s	97
Tabela IX.20 -	Partição em massa e distribuição granuloquímica do teste de “altura” 2400mm e velocidade do ar de 21m/s	98

RESUMO

As cinzas de carvão vegetal, ou mais especificamente as impurezas presentes, são bastante danosas ao processo de produção de ferro-gusa implicando num aumento do consumo de carvão vegetal, maior volume de escória e custo mais elevado, sendo imperativa sua eliminação ou minimização. Para efetuar essa redução das impurezas baseada nas propriedades diferenciadoras identificadas a partir da caracterização tecnológica dos finos de carvão vegetal, foram utilizados o peneiramento e o aeroclassificador desenvolvido pela V&M do Brasil e a EEUFMG. Os resultados mostraram que o desempenho do peneiramento nesse caso (34% de redução das impurezas com uma perda de 27% de carvão vegetal) foi inferior ao do seu concorrente, pois se baseia apenas no tamanho da partícula como critério de separação, além de ser um processo de baixa flexibilidade, apesar de simples e amplamente adotado pelas empresas. Já o aeroclassificador, que explora a diferença de densidade e do formato dos materiais ao submetê-los a um fluxo ascendente de ar (separação gravítica a seco), levou a melhores resultados tanto na redução do teor de cinzas, por causa da maior capacidade em remover as impurezas (38%), quanto na menor perda de carvão vegetal (10%). Devido às suas características, pode ser considerado um processo mais dinâmico e versátil. Finalmente, o estudo mostrou que combinando as duas técnicas o ganho pode ser ainda maior, chegando uma redução de 41% das impurezas com uma perda de 5% do carvão.

ABSTRACT

The ashes, or more specifically the impurities, of charcoal are harmful to the production of pig iron, causing higher charcoal consumption, larger slag volume and increased costs. The elimination or minimization of the ashes content is imperative. The reduction of impurities was performed based on the differential properties identified from the technological characterization of the charcoal fines. The selected options were screening and the use of the pneumatic classifier developed by *V&M Brasil* and *EEUFMG*. The results indicated that the performance of screening (34% of impurities reduction with 27% charcoal loss) was inferior to that of the pneumatic classifier. Screening is a low flexibility process based only on the particle size as separation criterion, despite being simple and widely adopted in plant practice. The pneumatic classifier operation is based on the differences of density, size and shape of the particles submitted to an upward flow of air (dry gravity separation). This apparatus yielded enhanced results regarding impurities removal (38%) and, especially, concerning charcoal loss (10%). Due to its characteristics, it may be considered a more dynamic and versatile process. Enhanced performance was achieved by a process combining both techniques, leading to the removal of 41% of the impurities with charcoal loss as low as 5%.

1 – INTRODUÇÃO

Ocupando cerca de setenta e cinco por cento (em volume) da carga, o carvão vegetal é amplamente utilizado nos altos-fornos como redutor do minério de ferro para produção de ferro-gusa, além de ser o responsável pela reserva térmica e a permeabilidade no reator, que somado ao seu custo elevado, o torna uma das mais importantes matérias-primas deste processo produtivo.

Contudo, sua qualidade físico-química depende diretamente de vários fatores como origem da madeira, processo de carbonização, transporte, manuseio e estocagem dentre outras coisas. Até a umidade relativa do ar pode afetar suas características uma vez que o carvão vegetal é bastante higroscópico. Por isso, é considerado um material bastante heterogêneo.

Um desses parâmetros de qualidade que merece destaque é o teor de cinzas ou mais precisamente à quantidade de impurezas agregadas a superfície do carvão vegetal, que, em grandes quantidades, prejudicam os altos-fornos, pois interferem na taxa de substituição do carvão, no volume de escória, no consumo de energia e no consumo específico (kg de carvão consumido por tonelada de ferro-gusa produzido).

Por isso, é de grande relevância a redução do teor de cinzas presentes no pó de injeção dos altos-fornos, a partir da determinação das características físico-químicas destes finos de carvão vegetal para desenvolvimento de um processo de separação das impurezas presentes nesse material.

2 – OBJETIVO

Reduzir o teor de cinzas dos finos de carvão vegetal através da segregação e eliminação parcial ou total das impurezas presentes neste material a partir da concentração gravítica a seco e do peneiramento.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Carvão vegetal

3.1.1 – Aspectos técnicos

O carvão vegetal é produzido a partir da pirólise ou queima da madeira, material predominantemente orgânico, em um ambiente onde a temperatura e a atmosfera (entrada de ar) são devidamente controladas, para que haja a remoção da maior parte dos componentes voláteis. Segundo Brito (1990), durante esse processo ocorre o fenômeno da concentração do carbono graças à eliminação do hidrogênio e do oxigênio, conforme mostrado na figura 3.1, dando origem ao termo “carbonização da madeira”.

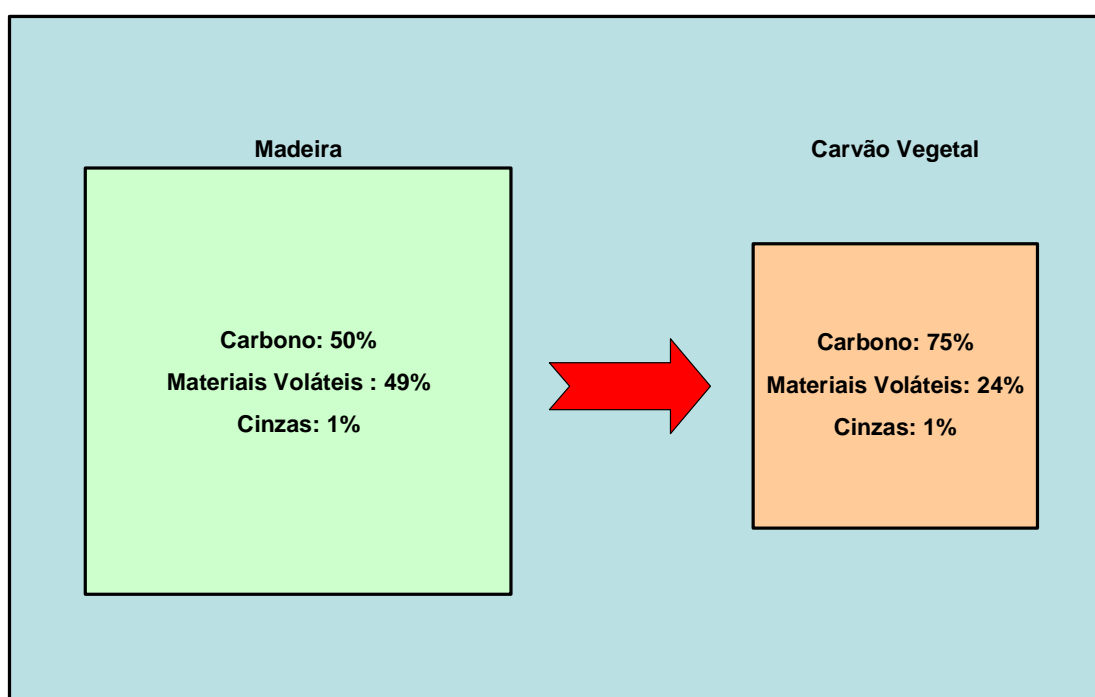


Figura 3.1 – Esquema de conversão da madeira para carvão vegetal. Fonte: Adaptado de Brito (1990).

Oliveira et al (1982) afirmam que essa carbonização da madeira resulta em uma fase sólida, que é o carvão vegetal propriamente dito, e numa fase gasosa que é a fumaça eliminada no processo. Parte dessa fumaça pode ser condensada para obtenção do licor pirolenhoso e do alcatrão e o restante, formado basicamente pelos gases CO_2 , CO , H_2 e hidrocarbonetos (CH_4) pode ser usado como combustível no próprio processo de carbonização. A figura 3.2 ilustra esquematicamente a carbonização da madeira em fornos de alvenaria indicando seus respectivos rendimentos médios.

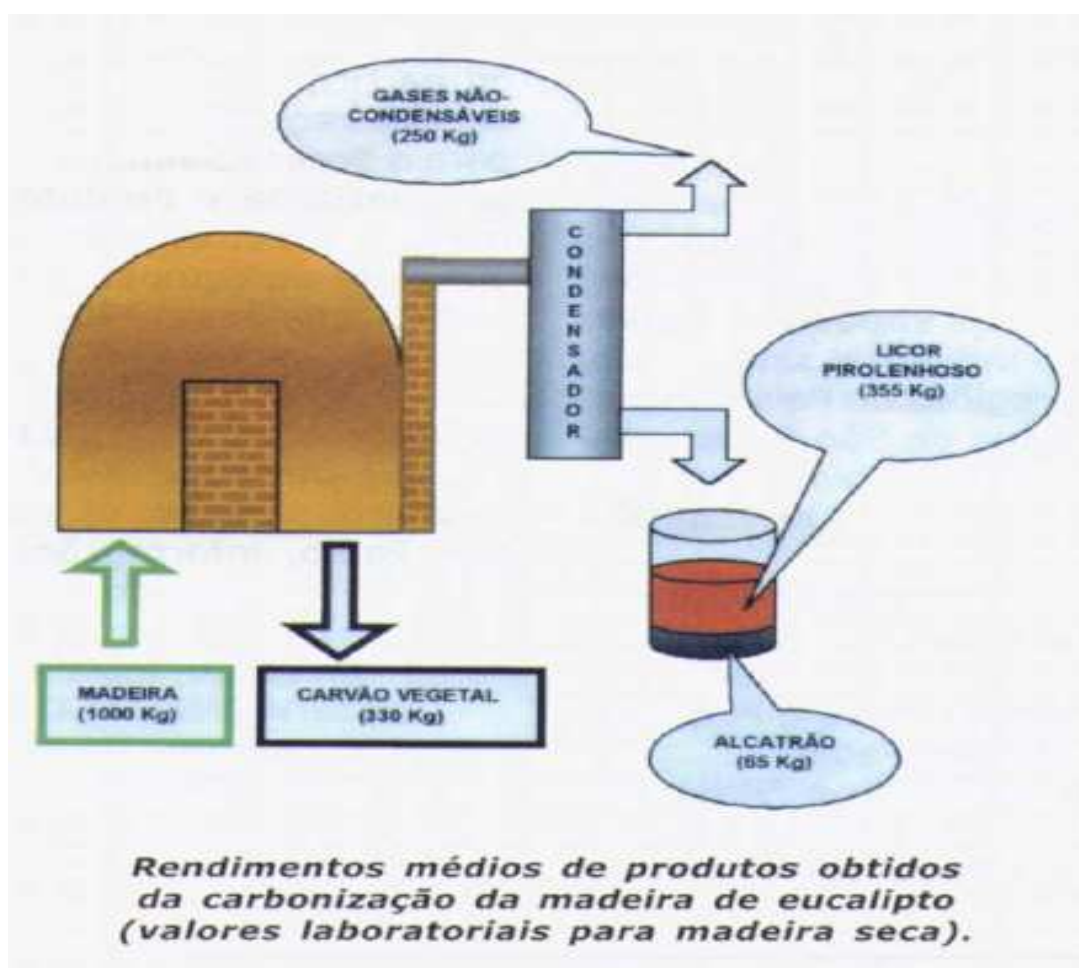


Figura 3.2 - Modelo esquemático da produção de carvão vegetal a partir da carbonização da madeira em fornos de alvenaria. Fonte: SBRT (2005).

A fonte de calor do processo de carbonização pode ser interna ou externa, segundo Brito (1990). Sistemas com fonte interna de calor são aqueles onde o calor é oriundo da combustão de parte da carga destinada à carbonização. Cerca de 10% a 20% do peso da madeira enfiada como matéria-prima é queimada para gerar o calor necessário, dentro do próprio forno. O rendimento gravimétrico nesse caso (relação volume carvão / volume madeira) não ultrapassa os 40%. Nos sistemas com fonte externa de calor, esse é fornecido a partir da queima de resíduos florestais e restos de madeira não aproveitáveis no processo em uma câmara de combustão externa ao forno. Dessa forma, toda a madeira é, teoricamente, convertida em carvão vegetal elevando a produtividade em 30%.

O ciclo completo da conversão da madeira em carvão vegetal dura de oito a dez dias e pode ser dividido em cinco fases, conforme apresentado na tabela III.1.

Tabela III.1 – Etapas do processo de carbonização da madeira. Fonte: Doat e Petrof (1975).

Fase	Temperatura (°C)	Fenômenos e Produtos
I	até 200	<ul style="list-style-type: none"> ○ poucas reações importantes; ○ perda de umidade ○ fase endotérmica
II	200 até 280	<ul style="list-style-type: none"> ○ aumento da reação e na eliminação de gases; ○ a madeira passa para a cor marrom arroxeada; ○ fase endotérmica;
III	280 até 380	<ul style="list-style-type: none"> ○ importante fase de reações e grande eliminação de gases; ○ composição de gases: centena de componentes químicos orgânicos (alguns recuperáveis). Ex.: ácido acético, metanol, acetona, fenóis, aldeídos, hidrocarbonetos, alcatrões, etc.; ○ o resíduo final dessa fase já é o carvão vegetal, mas que ainda apresenta compostos voláteis em sua estrutura; ○ fase exotérmica.
IV	380 até 500	<ul style="list-style-type: none"> ○ redução da saída de gases; ○ o carvão vegetal passa a sofrer uma purificação na sua composição química com a eliminação do restante dos gases voláteis contendo H e O. O carvão torna-se mais rico em carbono em sua estrutura (carbono não volatizável ou carbono fixo); ○ fase exotérmica.
V	acima de 500	<ul style="list-style-type: none"> ○ degradação do carvão; ○ término da carbonização e início da gaseificação do carvão; ○ fase exotérmica.

Normalmente o carvão vegetal é produzido em fornos de carbonização de alvenaria fabricados geralmente com tijolos comuns assentados com barro (mistura de terra argilosa e arenosa). Os tipos mais usuais são apresentados na figura 3.3 a seguir:

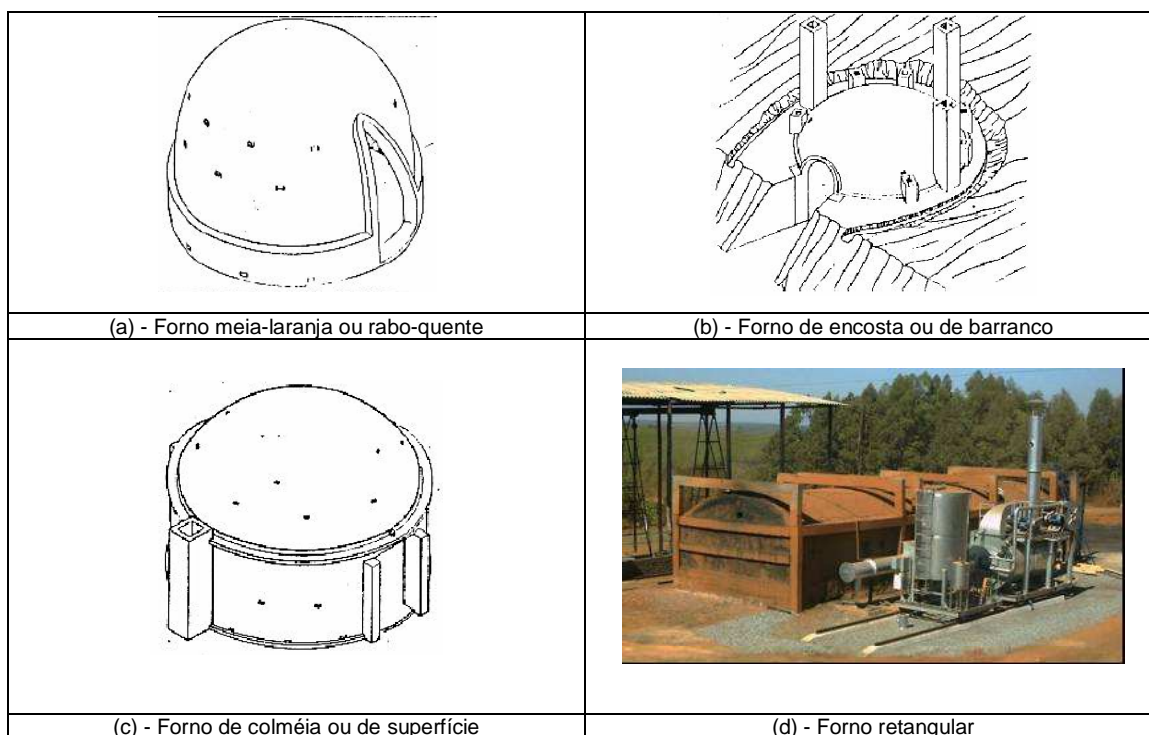
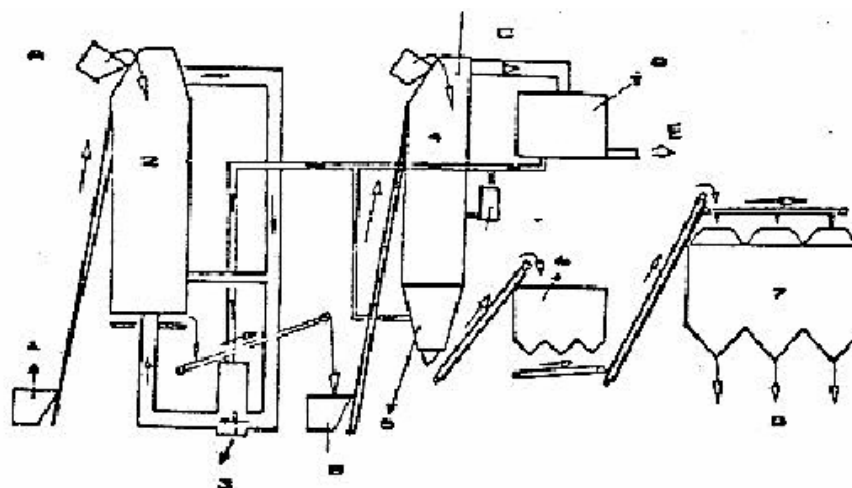


Figura 3.3 – Tipos de fornos de carbonização de alvenaria. Fonte: CETEC/MG (1982).

Além dos fornos de alvenaria mencionados anteriormente, há também a opção da carbonização contínua ou retorta mostrada pela figura 3.4 que em geral utiliza a combustão externa de gases recuperados do próprio processo para a geração de calor, melhorando assim a eficiência de conversão. Pode ser construída vertical ou horizontalmente, em material metálico, e com dimensões que permitem grandes produções num único equipamento. A qualidade do carvão vegetal é melhor e mais homogênea.



- | | |
|----------------------------|--------------------|
| 1 – skip | A – madeira verde |
| 2 – Secador | B – madeira seca |
| 3 – fôrnilha | C – gases voláteis |
| 4 – retorta | D – carvão vegetal |
| 5 – resfriamento do carvão | |
| 6 – peneiramento do carvão | |
| 7 – estocagem do carvão | |
| 8 - condensadores | |

Figura 3.4 – Fluxograma de produção de carvão vegetal em fornos de carbonização contínua ou retorta. Fonte: Briane e Doat (1985).

3.1.2 – Produção e consumo

De 1990 a 2004, conforme levantamento efetuado pela Associação Mineira de Silvicultura – AMS (2005), mostrado na figura 3.5 abaixo, o Brasil produziu quase 440 milhões de metros cúbicos de carvão vegetal, sendo considerado o maior produtor desse material no mundo. A maior parte desse do carvão é oriundo de florestas plantadas (silvicultura) com uma participação média de aproximadamente 65%, a partir de 1996.

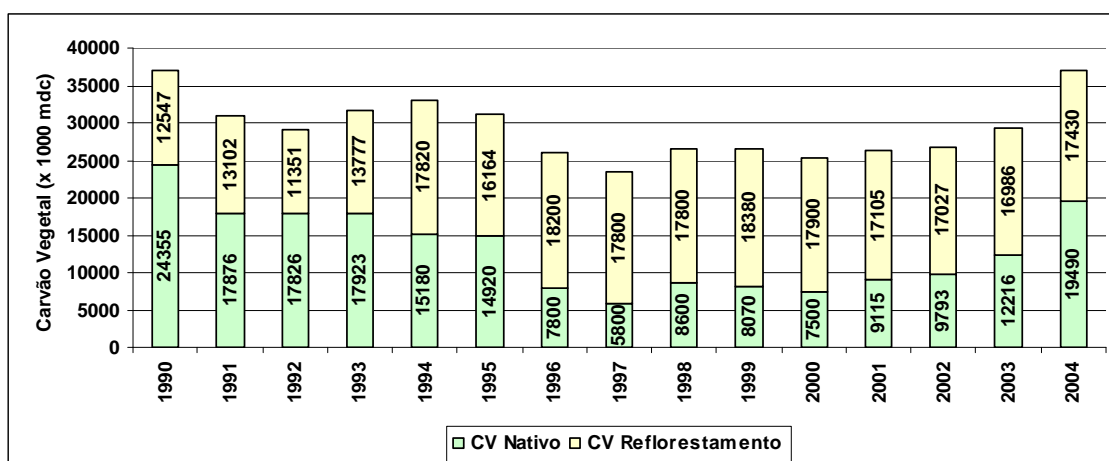


Figura 3.5 – Origem da matéria-prima para a produção de carvão vegetal no Brasil. Fonte: AMS (2005).

Além disso, o Brasil é o único país no mundo a utilizar o carvão vegetal em larga escala como insumo industrial principalmente em altos-fornos, de acordo com Meira (2002), onde a maior parcela dessa produção (87%) é destinada à indústria siderúrgica e metalúrgica para a produção de ferro-gusa, aço e ferro-ligas, conforme ilustrado pela figura 3.6, tendo Minas Gerais como o maior consumidor, (figura 3.7).

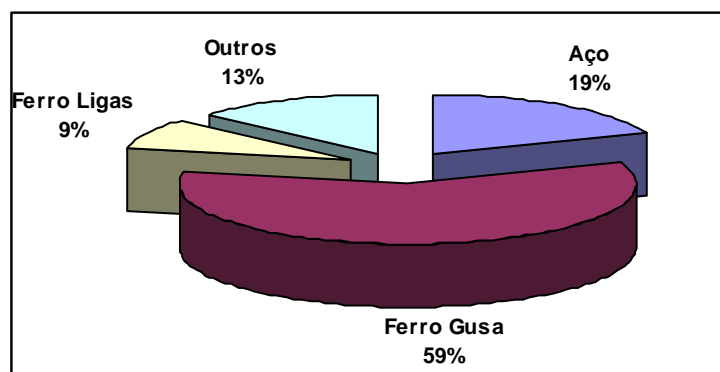


Figura 3.6 – Distribuição do consumo de carvão vegetal no Brasil por setor, de 1990 a 2004. Fonte: AMS (2005).

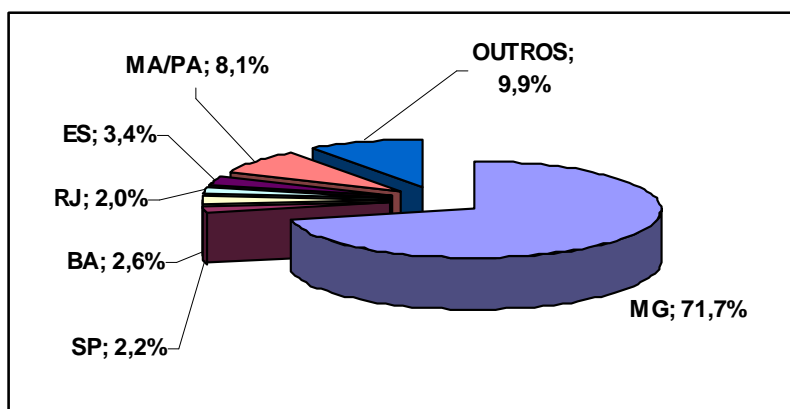


Figura 3.7 – Distribuição do consumo de carvão vegetal no Brasil por Estado, de 1990 a 2004. Fonte: AMS (2005).

3.1.3 – Qualidade

A qualidade do carvão vegetal, medida pelas suas propriedades físico-químicas (análise química, granulométrica e de densidade), depende em linhas gerais da madeira utilizada como matéria-prima e do método de carbonização.

A espécie e a qualidade da madeira oriunda de florestas nativas ou de eucalipto respondem, dentre outras coisas, pela densidade do carvão vegetal. Segundo Oliveira e Almeida (1980) (I) a temperatura de carbonização e a densidade da madeira podem influenciar na determinação da densidade do carvão vegetal, conforme mostrado na figura 3.8. Espécies de maior densidade tendem a produzir carvões com densidades mais elevadas.

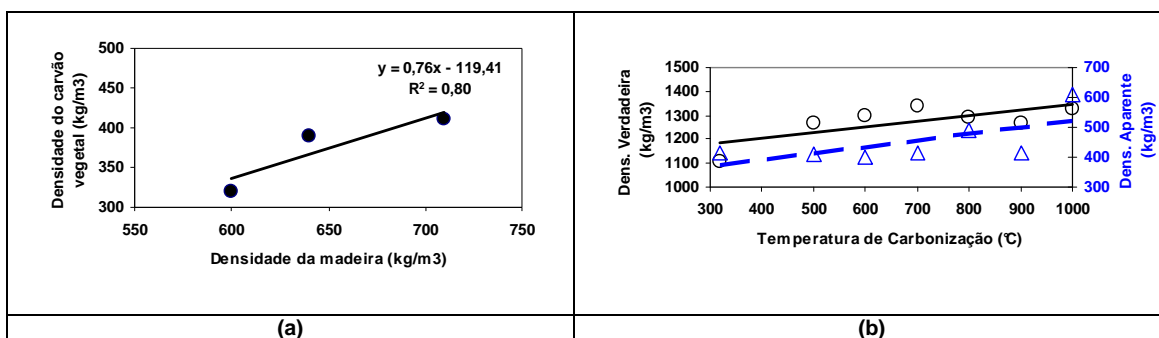


Figura 3.8 – Relação entre a densidade do carvão vegetal em função da densidade da madeira (a) e da temperatura de carbonização (b). Fonte: Oliveira e Almeida (1980) (I).

Em termos da composição química, a mais praticada é a análise imediata onde são analisados os teores de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis, além da umidade. Diversos autores - Penedo (1980), Gomes (1994) e Raad (2004) mostraram através das figuras 3.9 e 3.10 e das tabelas III.2 e III.3 que a temperatura de carbonização também tem grande influência na determinação desses parâmetros inclusive no rendimento do processo. Como pode ser observado o teor de carbono fixo tende a aumentar com a elevação da temperatura o que é interessante do ponto de vista energético para os altos-fornos. Contudo, o rendimento do processo de carbonização caminha em sentido contrário sendo reduzido à medida que a temperatura sobe.

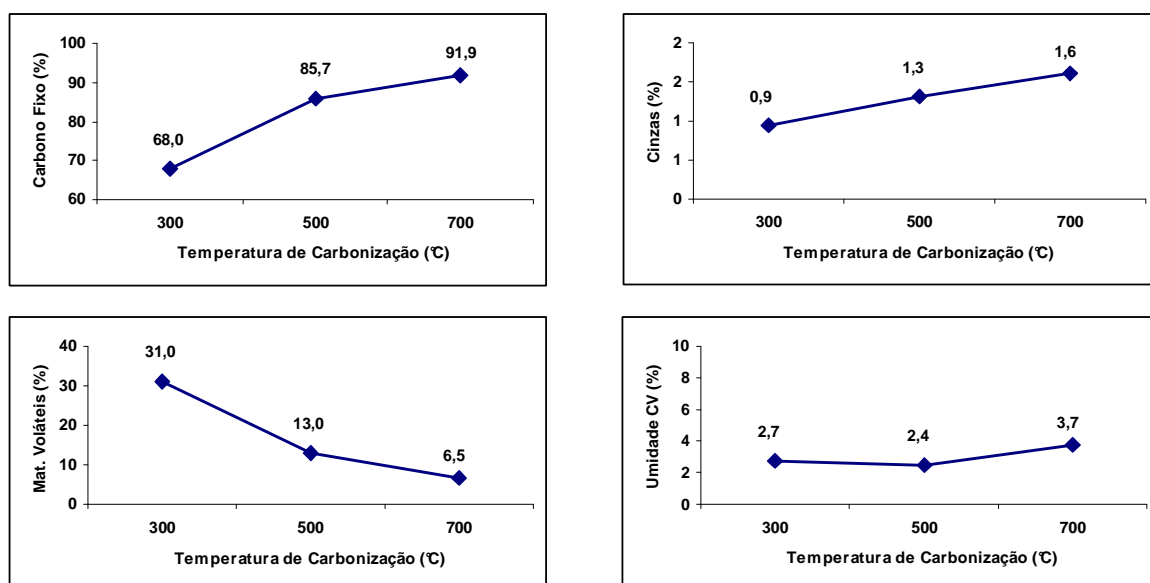


Figura 3.9 - Análise química imediata em função da temperatura de carbonização. Fonte: Penedo (1980).

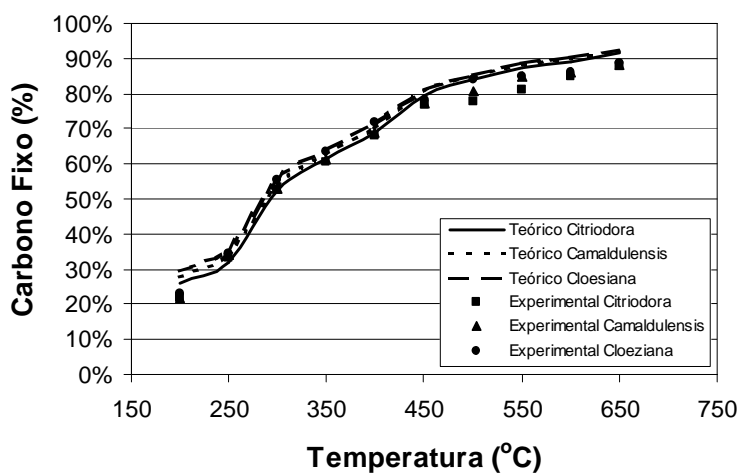


Figura 3.10 – Teor de carbono fixo em função da temperatura de carbonização. Fonte: Raad (2004).

Tabela III.2 – Análise química imediata em função da temperatura de carbonização. Fonte: Gomes (1994).

Temperatura de Carbonização (°C)	Análise química imediata (%)		
	Carbono Fixo	Cinzas	Materiais Voláteis
300	68,9	1,3	29,8
500	87,8	1,7	10,5

Tabela III.3 – Rendimento dos fornos de carbonização em função da temperatura de carbonização. Fonte: Oliveira e Almeida (1980) (I).

Temperatura de Carbonização (°C)	Rendimento (%) (*)
200	91,8
300	51,4
400	37,8
500	31,0
600	29,1
700	27,8
800	26,7
900	26,6
1000	26,8
1100	26,1

(*) – Rendimento = (peso do carvão / peso da madeira seca) * 100

A distribuição granulométrica (ou tamanho médio) do carvão vegetal depende diretamente da sua resistência mecânica, principalmente abrasão e queda e pode variar de acordo com a espécie e a metodologia de carbonização adotada. Segundo Oliveira e Almeida (1980) (II), o carvão vegetal é considerado um material bastante friável gerando uma elevada quantidade de finos em torno de 30%, sendo que para Mendes et al (1982), esse índice gira em 25% distribuídos nas seguintes etapas:

- Carvoaria: 3,7%;
- Carregamento e transporte: 5,3%;
- Peneiramento: 9,7%;
- Armazenagem: 6,3%.

3.1.4 – Utilização nos altos-fornos

O redutor tem um papel fundamental nos altos-fornos, pois além de reduzir o minério de ferro a partir do carbono, atua ainda como fonte de energia (calor + reserva térmica) e como estrutura de sustentação da carga sem mencionar que é o principal responsável pela permeabilidade do processo, pois ocupa cerca de 80% do volume da carga do reator. Para cumprir a todas essas funções somadas ao seu custo elevado (responde por cerca de 60% do custo do ferro-gusa) é fundamental que o carvão vegetal possua uma qualidade adequada.

→ Distribuição granulométrica

Para que ocorra a produção do ferro-gusa é necessário que os gases ascendentes sejam distribuídos de maneira satisfatória dentro do alto-forno. Por sua vez, essa distribuição está intimamente relacionada com a granulometria (ou tamanho médio) do redutor atuando como “janelas”. Por isso, o carvão vegetal bruto recebido pelas usinas é geralmente peneirado para a remoção dos finos cuja “faixa de corte” é função do porte do alto-forno e, de acordo com Braga et al (2003), pode chegar até 25% do volume total fornecido. É esperado que reatores maiores operem com carga melhor preparada e tamanho médio do redutor mais elevado. Assis et al (1982), mostram na figura 3.11, uma distribuição granulométrica típica do carvão vegetal utilizado no Alto-Forno #2 da Acesita com seu tamanho médio correspondente.

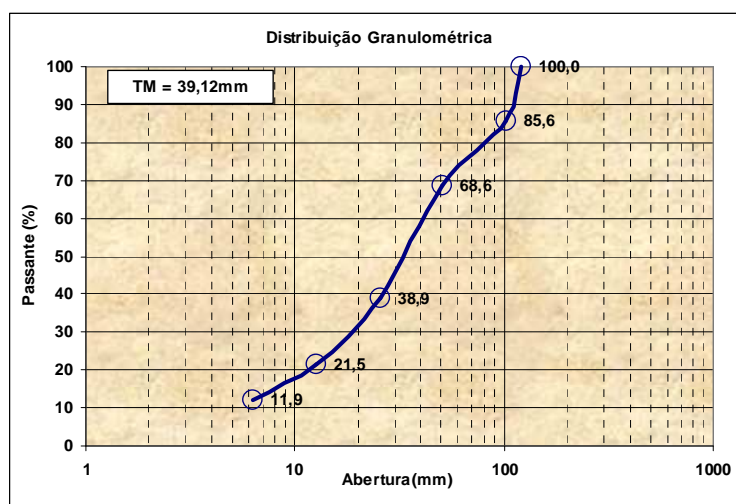


Figura 3.11 – Distribuição granulométrica típica e tamanho médio do carvão vegetal.
Fonte: Assis et al (1982).

→ Densidade a granel

Também como o teor de carbono, a densidade do carvão determina, entre outras coisas, o volume que o reator irá ocupar nos altos-fornos. Assim, quanto maior for a densidade do carvão, melhor para os reatores, desde que esse aumento não acarrete em prejuízos em outras propriedades.

Existem três maneiras distintas para se medir a densidade do carvão vegetal, segundo Mendes et al (1982), porém, a mais utilizada devido a sua praticidade e divulgação é a densidade a granel (ou "*bulk density*"), expressa normalmente em kg/m^3 , que é a relação entre o peso obtido da carga (em kg) para um determinado volume (em m^3). Dessa forma, é costume as usinas pesarem os caminhões de carvão no recebimento e depois dividir esse peso pelo volume da gaiola medido periodicamente para obter a densidade a granel daquela carga específica. Outra maneira é encher uma caixa de madeira de 1m^3 de volume com carvão vegetal e pesá-la, tomando o cuidado de descontar o peso da caixa vazia.

O valor de referência para a densidade a granel do carvão vegetal é **250 kg/m^3** , contudo pode variar em função da granulometria do material. Carvões com grande quantidade de finos e/ou elevados teores de cinzas podem apresentar falsos valores altos de densidade a granel.

Vale notar que, na determinação da densidade a granel, o volume de vazios entre os diversos pedaços de carvão está também incluído. Se esse volume for diminuído do volume total, obter-se-á a densidade aparente, lembrando que os poros internos do material foram considerados preenchidos nesse caso. Quando se desconta essa porosidade, tem-se a densidade verdadeira do carvão.

Mendes et al (1982) relatam ainda que a densidade aparente pode variar em função da qualidade das peças escolhidas, como por exemplo, a quantidade de trincas internas (vazios) ou a madeira de origem e dos parâmetros de produção como a temperatura e/ou velocidade de carbonização.

→ Composição química

A composição química do carvão vegetal pode ser determinada através da análise química elementar (menos usada) ou da análise química imediata (mais praticada). Na análise química imediata, são analisados os teores de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis, além da umidade, cujos teores típicos estão descritos na figura 3.12.

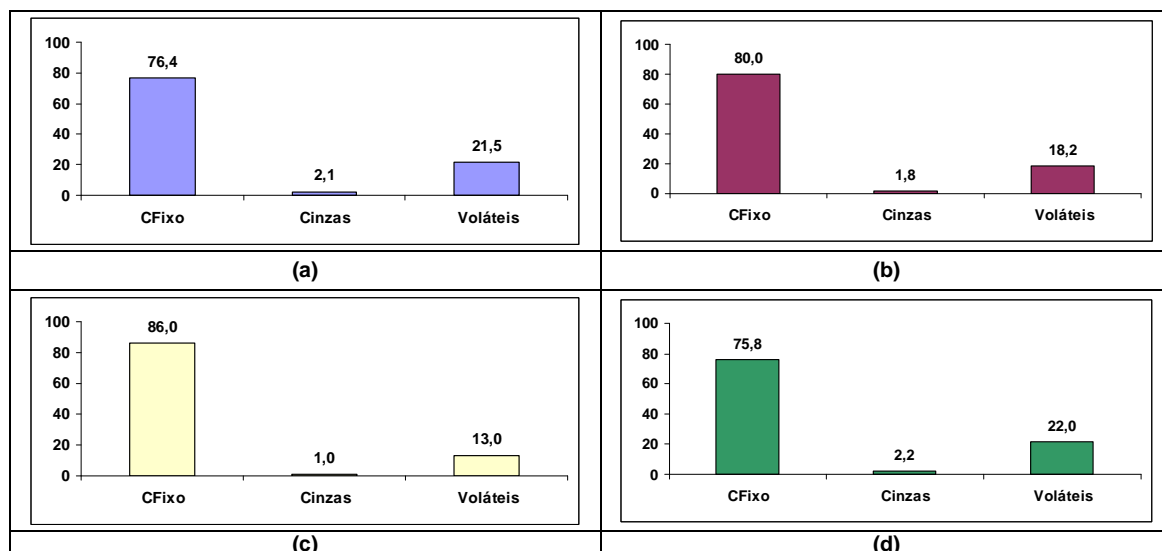


Figura 3.12 – Composição química (análise imediata) média do carvão vegetal. Fonte: (a) - Assis et al (1982), (b) - Oliveira e Almeida (1980) (I), (c) - Mendes et al (1982) e (d) - dados do autor.

Enquanto o carbono fixo (em maior proporção) e os materiais voláteis (em menor peso) são responsáveis pela energia, as cinzas indicam o nível e a qualidade dos resíduos da combustão do carvão. Porém, vale lembrar que o mais importante da composição química é sua estabilidade com baixa umidade, entretanto distorções podem ocorrer como os resultados apresentados por Oliveira e Almeida (1980) (II) na tabela III.4 na qual encontraram altos valores de cinzas ao avaliarem amostras de carvão vegetal bruto compreendidas entre 0,15mm e 0,84mm.

Tabela III.4 – Análise química imediata para carvão vegetal entre 0,15mm e 0,84mm. Fonte: Oliveira e Almeida (1980) (II).

Amostra	Umidade	Carbono Fixo	Cinzas	Materiais Voláteis
1	10,14	48,60	24,87	26,53
2	9,33	54,12	21,44	24,44
3	7,10	53,15	20,93	25,92

Os autores relataram ainda que, através da observação das cinzas do carvão vegetal com uma lupa, foi possível constatar a presença de impurezas no material. A constituição dessa impureza não foi apresentada. Entretanto, Mendes et al (1982) e Assis et al (1982) analisaram respectivamente a composição química das cinzas do carvão vegetal bruto produzido em 27 fornadas e do carvão vegetal bruto consumido pelo Alto-Forno #2 da Acesita, e os resultados, apresentados na figura 3.13, mostram elevados teores de SiO_2 , Al_2O_3 e CaO , praticamente confirmando a presença das impurezas.

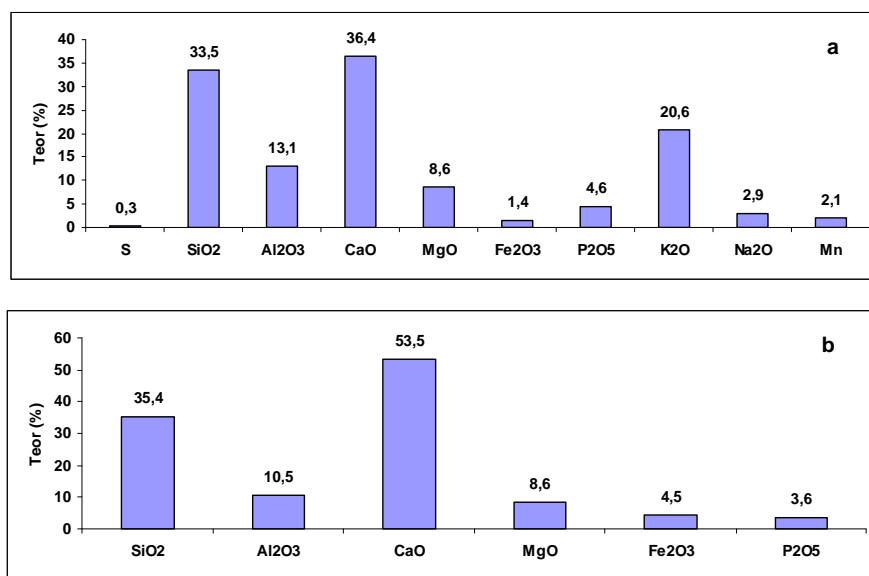


Figura 3.13 – Análise química do carvão vegetal bruto de 27 fornadas (a) e do carvão vegetal do Alto-Forno #2 da Acesita (b). Fonte: Mendes et al (1982) e Assis et al (1982).

Esses elevados teores de cinzas podem causar diversos distúrbios nos altos-fornos. De acordo com Silveira e Campos (1976), a taxa de substituição do carvão granulado (topo), conforme mostrado na figura 3.14, cai em função da elevação do teor de cinzas dos finos, pois quanto maior for a quantidade de cinzas do carvão, mais baixo é o teor de carbono fixo. Como se não bastasse, parte desse carbono é ainda consumido no aquecimento, fusão e refino destas cinzas, principalmente da sílica (SiO_2) que sofre uma redução a SiO (g) onerando o balanço térmico do forno.

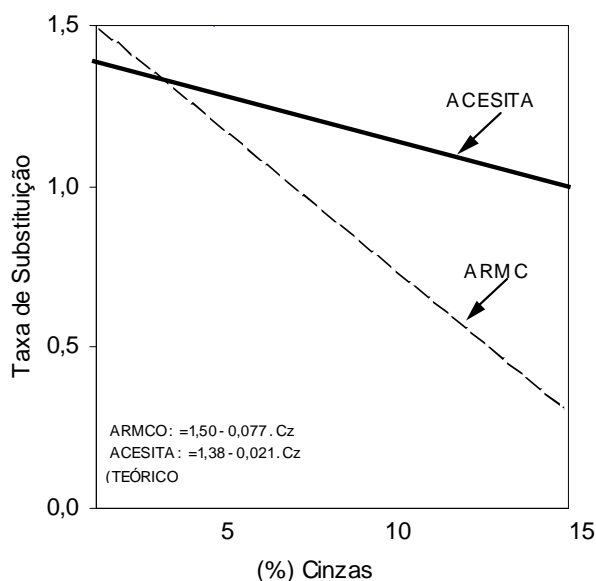


Figura 3.14 – Influência do teor de cinzas dos finos de carvão vegetal sobre a taxa de substituição (kg carvão economizado/kg finos injetado). Fonte: Silveira e Campos (1976).

Além da queda na taxa de substituição, Castro et al (2003) afirmam que as cinzas de carvão vegetal influenciam na formação da escória final do alto-forno prejudicando seu escoamento e variando seu volume por corrida, conforme apresentado pela figura 3.15. É observado que essa variação é mais sensível quanto maior for a taxa de injeção e, por conseguinte, a quantidade de impurezas injetadas. Desse modo, alterações na carga do forno devem ser consideradas objetivando minimizar estes efeitos, mesmo que signifiquem aumento no volume da escória.

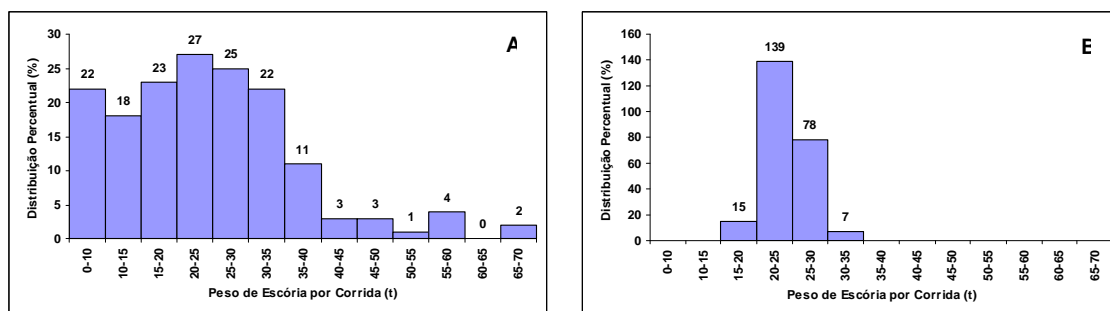


Figura 3.15 – Distribuição percentual do peso de escória por corrida, para um alto-forno a carvão vegetal: A – com injeção e B – sem injeção de carvão pulverizado. Fonte: Castro et al (2003).

→ Outros parâmetros

Embora existam ainda outras propriedades importantes na determinação da qualidade do carvão vegetal para uso em altos-fornos, como a reatividade e o poder calorífico, eles não serão abordadas neste trabalho.

3.2 – Sistemas de separação

3.2.1 – Introdução

Antes de se submeter um material a um processo de separação qualquer, é imperativo efetuar sua caracterização tecnológica, etapa fundamental para seu aproveitamento de maneira otimizada.

Neumann et al (2004) afirmam que essa caracterização pode ser realizada em quatro etapas interdependentes: fracionamento, identificação, quantificação e liberação.

O **fracionamento**, através da relativa individualização dos principais constituintes, facilita sua identificação melhorando a quantificação das fases e estabelecendo certas propriedades físicas. É geralmente realizado por ensaios de densidade, suscetibilidade magnética, ou classificação por tamanho de partícula. A **identificação** (2ª estágio) é realizada utilizando técnicas analíticas adequadas a cada situação como, por exemplo, difração de raios-X, microscopias óptica e eletrônica de varredura, dentre outras. A composição química também pode auxiliar na identificação. A etapa de **quantificação** pode ser mais simples ou complexa, dependendo das reais necessidades requeridas, e tem a função de determinar a quantidade de cada fase ou constituinte presente no material. Pode ser obtida através de cálculo estequiométrico, análise química e composição mineralógica, análise de imagem, análise termogravimétrica, etc.. No quarto estágio está a verificação do grau de **liberação** do constituinte de interesse em relação às impurezas presentes, ou seja, quantas partículas livres desse constituinte se encontram no material, fato que irá contribuir para uma separação satisfatória.

Após a realização da caracterização tecnológica, é possível identificar as propriedades diferenciadoras permitindo estabelecer o tipo de tratamento mais adequado (ou uma combinação deles) para a separação desejada em função de seu objetivo, das características do material e dos recursos técnicos e financeiros disponíveis. A tabela III.5 apresentada por Valadão et al (2000) relaciona diversas dessas propriedades com seu método de tratamento correspondente.

Tabela III.5 – Propriedades diferenciadoras e seus correspondentes métodos de tratamento. Fonte: Valadão et al (2000).

Propriedade Diferenciadora	Método de Tratamento
cor, brilho, fluorescência, radioatividade	cata manual, seleção automática
peso específico, forma	separação gravítica
susceptibilidade magnética	separação magnética
condutividade elétrica	separação eletrostática
tamanho, forma, densidade	peneiramento, classificação
reatividade de superfície	flotação, agregação, aglomeração
reatividade química	hidrometalurgia
comportamento térmico	pirometalurgia
fragmentabilidade	fragmentação

Considerando o carvão vegetal como um material irregular, bastante higroscópico, inflamável e isento de propriedades magnéticas ou elétricas, os sistemas de separação baseados nesses parâmetros não poderão ser utilizados. Além disso, conforme relatado no capítulo anterior, esse redutor geralmente vem acompanhado de impurezas (terra, areia, etc.) sinalizando a diferença entre a forma, a densidade e o tamanho dos materiais como as propriedades diferenciadoras mais adequadas a serem exploradas. De acordo com a tabela III.5, os métodos de separação mais indicados são a separação gravítica e o peneiramento ou classificação.

3.2.2 – Princípios de peneiramento

Uma das propriedades diferenciadoras que pode ser utilizada como critério de separação de material, é o tamanho da partícula. Entretanto, a definição de tamanho para objetos regulares está associada a um critério de medição, como volume, massa, dimensão, área de projeção, etc.. No caso de objetos irregulares, que representam a maioria deles, é necessária a adoção de critérios mais adequados como, por exemplo, a passagem ou retenção de partículas em uma abertura geométrica definida, que para Valadão et al (2000), é o fundamento do processo de **peneiramento**. Já Carrisso e Correia (2004) descrevem o peneiramento como a separação de um material em duas ou mais classes, segundo o tamanho geométrico das partículas. Pode ser executado a seco ou a úmido, com o propósito de facilitar a passagem dos finos através da tela. De acordo com Oblad et al (1980), os peneiramentos industriais a seco são realizados normalmente em frações até 6,0 mm e, com uma eficiência menor, porém razoável, em frações de até 1,7mm. Já o peneiramento a úmido é aplicado geralmente para partículas de até 0,4mm e em alguns casos específicos até 50 μ m. O material retido na tela da peneira é denominado “oversize” e o passante “undersize”.

A peneira vibratória, ilustrada pela figura 3.16, é o equipamento vibratório para separação por tamanho mais utilizado, com amplitudes e freqüências determinadas, cuja superfície de peneiramento pode ser horizontal ou inclinada, determinando o tipo de movimento da partícula.

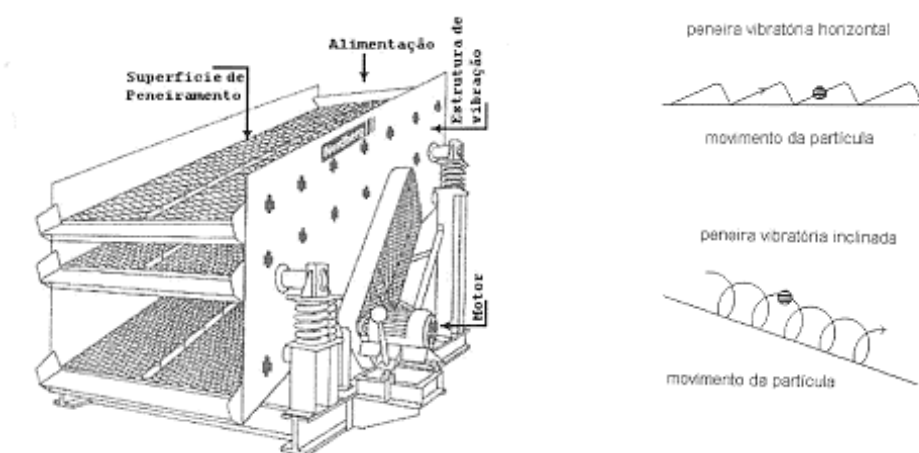


Figura 3.16 – Peneira vibratória. Fonte: Carrisso e Correia (2004).

Para que a separação por tamanho ocorra de maneira satisfatória no peneiramento, é importante conhecer o comportamento das partículas que, segundo Chaves e Peres (2003), deve ser observado sob dois pontos de vista: o coletivo e o individual.

O comportamento **coletivo** das partículas, mostrado na figura 3.17, mostra que no início do processo de peneiramento ocorre à estratificação do leito de maneira que as partículas menores são levadas para baixo e as maiores ficam por cima. À medida que a estratificação se desenvolve (região entre a e b), a quantidade de material passante aumenta alcançando seu ponto máximo em b. A partir daí acontece o chamado peneiramento de saturação onde o leito já se encontra totalmente estratificado e a quantidade de partículas finas vai diminuindo (ponto c). É nessa região que a maior quantidade de partículas removidas através das aberturas da peneira é obtida. No trecho correspondente entre c e d a remoção das partículas finas remanescentes é reduzida e o peneiramento será efetuado por tentativas repetidas que explica a queda na taxa de partículas passantes.

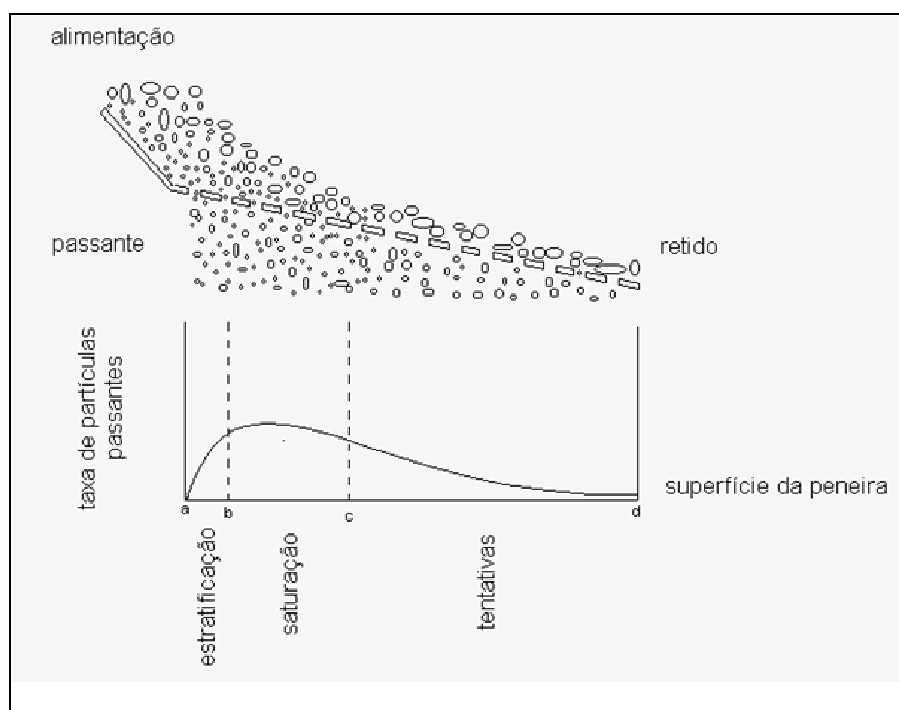


Figura 3.17 – Separação de partículas em uma peneira vibratória inclinada. Fonte: Chaves (2004).

Com relação ao comportamento **individual** apresentado de maneira esquemática na figura 3.18, Valadão et al (2000) e Chaves e Peres (2003) afirmam que para partículas com diâmetro médio **d** cerca de uma vez e meia maior do que a abertura da tela **a** ($d >$

1,5 a) têm pouca influência no desempenho do peneiramento e são encaminhadas para o “oversize”. Da mesma forma, as partículas menores que a metade da malha ($d < 0,5 a$) passam facilmente pela abertura da tela da peneira e não interferem no peneiramento. Entretanto, as partículas compreendidas entre $0,5 a < d < 1,5 a$ influenciam negativamente a eficiência do processo. Carrisso e Correia (2004) a subdividem ainda em duas categorias: $0,5 a < d < a$ que possuem uma baixa probabilidade de passar pela abertura e $a < d < 1,5 a$ que além de não passantes, essas partículas são responsáveis pelo “cegamento” da tela.

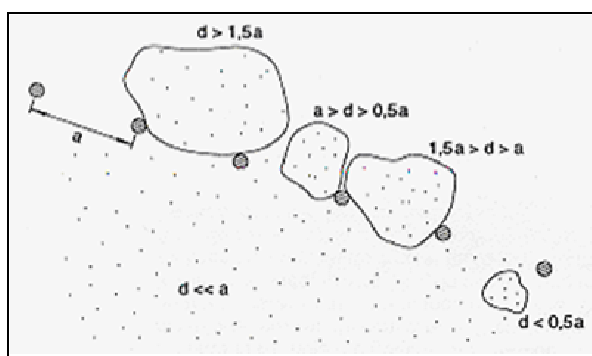


Figura 3.18 – Comportamento individual das partículas. Fonte: Chaves e Peres (2003).

Além do comportamento individual e coletivo das partículas, também merece destaque o fato da projeção da abertura da tela em peneiras inclinadas ser menor do que o diâmetro médio dos sólidos dificultando ainda mais sua passagem, conforme mostrado na figura 3.19. Para compensar esse efeito, recomenda-se que o peneiramento, em superfícies inclinadas, seja efetuado normalmente em telas com valores de aberturas ligeiramente superiores ao tamanho de produto que se deseja gerar. A figura 3.20 apresenta um gráfico que determina o tamanho de abertura para uma tela industrial (abertura equivalente) em função da abertura da malha da peneira de laboratório (tamanho do produto).

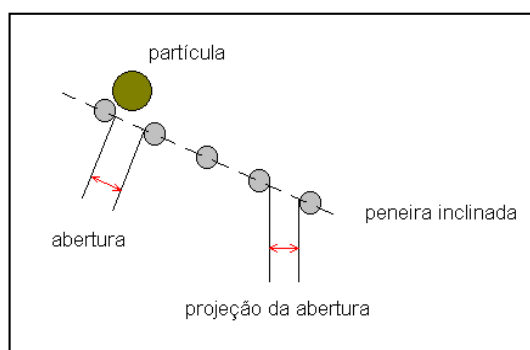


Figura 3.19 – Abertura da peneira e sua projeção. Fonte: Valadão et al (2000).

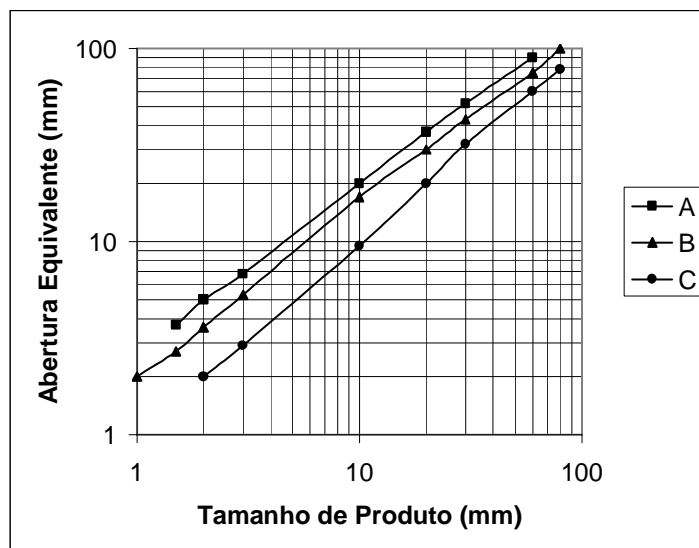


Figura 3.20 – Abertura equivalente em função do tamanho do produto: **A** para telas de borracha e plástico com abertura quadrada; **B** para telas de borracha e plástico com abertura retangular, e para telas de arame com abertura quadrada; **C** telas de arame para abertura retangular. Fonte: Valadão et al (2000).

Cabe ressaltar que a abertura das telas das peneiras, que determina a faixa de tamanhos (distribuição granulométrica), geralmente obedece a uma escala com relação constante. Dessa forma, diversas escalas foram elaboradas e algumas delas são apresentadas na tabela III.6.

Tabela III.6 – Escalas granulométricas. Fonte: Carrisso e Correia (2004).

Escala Tyler $r = \sqrt{2} = 1,414$ $a_0 = 74 \mu\text{m}$		Escala Richards $r = \sqrt[4]{2} = 1,19$ $a_0 =$ 1,0 mm = 18 malhas			Escala ISO
Malhas	mm	Malhas	mm	polegadas	Malhas
3	6,680	3	6,35	0,250	3 ½
4	4,699	3 ½	5,66	0,223	
6	3,327	4	4,77	0,187	5
		5	4,00	0,157	
8	2,362	6	3,36	0,132	7
		7	2,83	0,111	
10	1,651	8	2,38	0,0937	10
		10	2,00	0,0787	
14	1,168	12	1,68	0,0661	14
		14	1,41	0,0555	
20	0,833	16	1,19	0,0469	18 (Base)
		18	1,00	0,0394	
28	0,589	20	0,841	0,0331	25
		25	0,707	0,0278	
35	0,417	30	0,595	0,0234	35
		35	0,500	0,0197	
48	0,295	40	0,420	0,0165	45
		45	0,354	0,0139	
65	0,208	50	0,297	0,0117	60
		60	0,250	0,0098	
100	0,147	70	0,210	0,0083	80
		80	0,177	0,0070	
150	0,104	100	0,149	0,0059	120
		120	0,125	0,0049	
200	(Base) 0,074	140	0,105	0,0041	170
		170	0,088	0,0035	
270	0,053	200	0,074	0,0029	230
		230	0,063	0,0025	
400	0,038	270	0,053	0,0021	325
		325	0,044	0,0017	
		400	0,037	0,0015	

3.2.3 – Princípios de classificação e concentração

Analogamente ao peneiramento, a classificação também tem como objetivo a separação de um material em duas ou mais frações com partículas de tamanhos distintos. Enquanto no peneiramento essa separação é efetuada segundo o tamanho geométrico das partículas, na classificação ela é realizada com base na velocidade em que as partículas atravessam um meio fluido que pode ser o ar ou a água e é habitualmente aplicada em situações onde o peneiramento não funciona de maneira eficiente (materiais mais finos), conforme relataram Carrisso e Correia (2004).

Quando a partícula sólida se movimenta no vácuo, ela está sujeita a uma aceleração considerada constante e sua velocidade cresce indefinidamente. Porém, quando esse movimento ocorre em meio fluido aparece uma resistência ao mesmo conforme mostrado esquematicamente pela figura 3.21(a) abaixo.

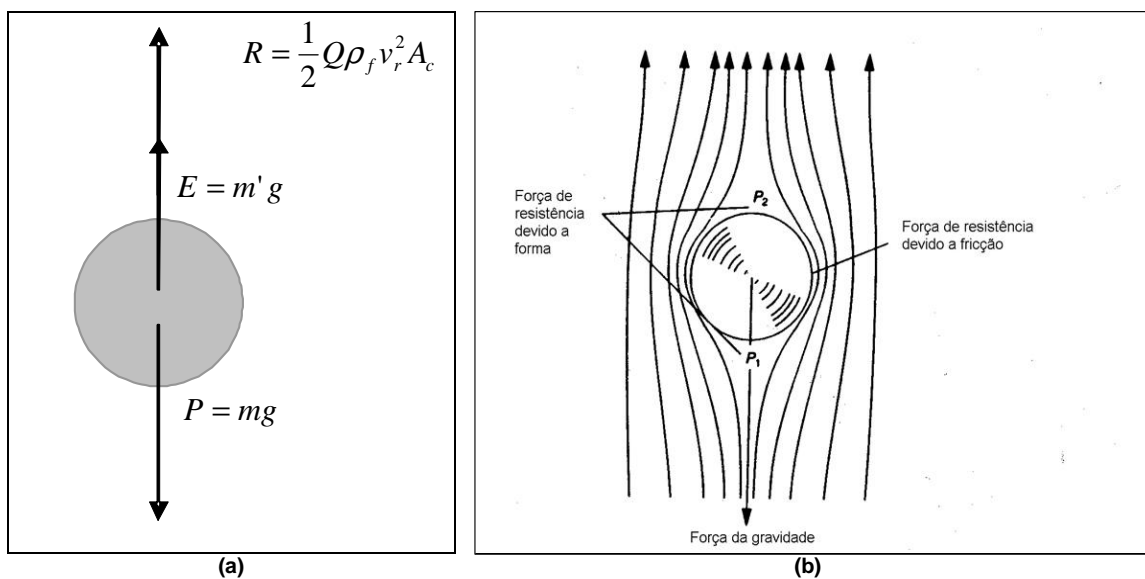


Figura 3.21 – Balanço de forças em uma partícula em meio fluido (a) e detalhamento da força de resistência (b). Fonte Tavares (2002).

Nesse caso, a velocidade da partícula vai decrescendo até atingir um valor constante no momento em que essas forças se anulam. É a chamada **velocidade terminal** (v_T). Então, pode-se dizer que uma partícula esférica de massa m , volume v_p e densidade ρ_s sedimentando em um meio de densidade ρ_f , está sob a ação de seu peso (P), do empuxo (E) e da resistência que o meio oferece ao movimento (R). Essa resistência, de acordo com a figura 3.21 (b), é devida à fricção (função da viscosidade do fluido) e à forma (assimetria da distribuição da pressão do fluido sobre as duas faces opostas

da partícula) que varia em função da velocidade relativa entre a partícula e o fluido e com a densidade deste, conforme Sampaio e Tavares (2005) e descrito pela equação 3.1.

$$R = \frac{1}{2} Q \rho_f v_r^2 A_c \quad (3.1)$$

onde:

R = força de resistência do fluido (N)

Q = coeficiente de resistência (adimensional) ρ_f = densidade do fluido (kg/m³)

v_r = velocidade relativa partícula-fluido (m/s) A_c = área projetada da partícula (m²)

A velocidade de queda da partícula influencia na natureza da resistência do fluido indicando qual é o regime atuante. Todavia, independentemente do regime predominante, a aceleração da partícula tende a decrescer e a velocidade terminal (v_T) é sempre alcançada. O critério para se determinar qual o regime dominante durante o movimento do fluido, segundo Geiger e Poirier (1973), é dado pela equação 3.2 conhecida como **número de Reynolds**, que é uma grandeza adimensional desenvolvida por Reynolds em 1883.

$$Re_p = \frac{\rho_f v_T d_p}{\mu_f} \quad (3.2)$$

onde:

Re_p = número de Reynolds da partícula

ρ_f = densidade do fluido (kg/m³)

d_p = diâmetro da partícula (m)

v_T = velocidade terminal (m/s)

μ_f = viscosidade do fluido (kg/ms)

Para velocidades mais baixas, o movimento é suave uma vez que a camada do fluido que está em contato com a partícula se move juntamente com ela, enquanto o restante do fluido permanece imóvel. Este tipo de escoamento é denominado **regime laminar** ($Re_p < 0,5$). A velocidade terminal da partícula (v_T) dada pela equação 3.3 é conhecida como **Lei de Stokes**, que, de acordo com Lins (2004), é particularmente útil para a análise de movimento de partículas de diâmetros inferiores a 0,1mm.

$$v_T = \frac{(\rho_s - \rho_f)}{18\mu_f} g d_p^2 \quad (3.3)$$

onde:

v_T = velocidade terminal (m/s)

ρ_s = densidade do sólido (kg/m^3)

ρ_f = densidade do fluido (kg/m^3)

μ_f = viscosidade do fluido (kg/ms)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

d_p = diâmetro da partícula (m)

Já para as velocidades mais elevadas, é observada uma grande perturbação no fluido dando origem ao chamado **regime turbulento** ($10^3 < Re_p < 2 \times 10^5$). Nesse caso há predominância de partículas mais grosseiras ($> 5\text{mm}$) e a velocidade terminal (v_T) é obtida através da equação 3.4, denominada **Lei de Newton**.

$$v_T = \sqrt{3gd_p \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right)} \quad (3.4)$$

Correlacionando o coeficiente de resistência (Q) e o número de Reynolds (Re_p), a partir das medições de velocidades terminais de sedimentação de partículas esféricas de tamanhos conhecidos, Reynolds elaborou a figura 3.22 onde podem ser identificados os tipos de regimes de escoamento.

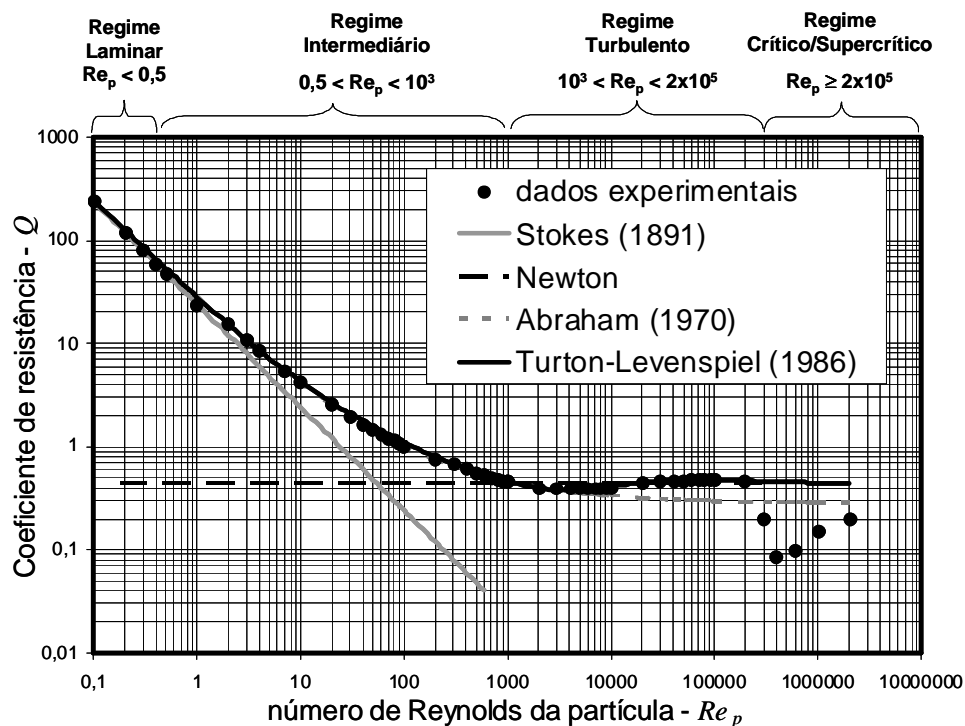


Figura 3.22 – Tipo do regime de escoamento em função do número de Reynolds. Fonte: Adaptada de Sampaio e Tavares (2005).

Além dos dois regimes de escoamento abordados, a figura 3.22 descreve ainda mais outros dois outros: o **intermediário** ($0,5 < Re_p < 10^3$) e o **crítico/super crítico** ($Re_p \geq 2 \times 10^5$).

Para o regime intermediário não há uma solução analítica como nos modelos de Stokes e Newton. Os resultados são obtidos a partir de cálculos de interações numéricas. Contudo, Almendra (1979) e Abraham (1970) demonstraram que a equação 3.5 descrita abaixo apresenta resultados bastante precisos para um número de Reynolds da partícula (Re_p) $< 3 \times 10^3$, não só cobrindo a região que faltava (regime intermediário), como correlacionando os regimes laminar e turbulento.

$$Q = 0,28 \left(1 + \frac{9,06}{\sqrt{Re_p}} \right)^2 \quad (3.5)$$

Porém, como essa equação, juntamente com a equação 3.2 não possui uma solução direta, pois depende tanto da velocidade terminal da partícula quanto do seu tamanho (diâmetro), dois grupos adimensionais foram criados: diâmetro adimensional (d_p^*), equação 3.6, e velocidade terminal adimensional (V_T^*), equação 3.7, onde o primeiro é independente da velocidade terminal (v_T) e o segundo é independente do parâmetro diâmetro da partícula (d_p).

$$d_p^{*3} = Q Re_p^2 = \left(\frac{4}{3} (\rho_s - \rho_f) \rho_f \frac{g}{\mu_f^2} \right) d_p^3 \quad (3.6)$$

$$V_T^{*3} = \frac{Re_p}{Q} = \left(\frac{3}{4} \frac{\rho_f^2}{(\rho_s - \rho_f) \mu_f g} \right) v_T^3 \quad (3.7)$$

E caso seja conveniente, ao igualar as equações anteriores, obtém-se a equação 3.8 que relaciona velocidade terminal adimensional (V_T^*) com diâmetro adimensional (d_p^*).

$$V_T^* = \frac{20,52}{d_p^*} \left(\left(1 + 0,0921 d_p^{*3/2} \right)^{1/2} - 1 \right)^2 \quad (3.8)$$

Dessa forma, os métodos numéricos ou soluções empíricas puderam ser substituídos, conforme afirmaram Sampaio e Tavares (2005).

Na maioria das situações reais, entretanto, as partículas não são esféricas influenciando no seu comportamento. Nessas partículas a área de superfície por unidade de volume é maior aumentando sua resistência devido à fricção e sua forma irregular promove o aumento dos movimentos de vibração e oscilação durante seu movimento através do fluido. O efeito do aumento da área por unidade volume é importante para qualquer regime de fluxo, enquanto que o último efeito é mais significativo em regime turbulento.

Por isso é importante desenvolver algumas correlações para incorporar o efeito da forma das partículas nos modelos de sedimentação em meio fluido, como por exemplo, o conceito de esfericidade (ψ) que é relação entre as áreas superficiais da esfera correspondente e da partícula irregular ambas de mesmo volume conforme mostrado pela equação 3.9.

$$\psi = \frac{\text{área de superfície da esfera com o mesmo volume da partícula}}{\text{área da superfície da partícula}} = \frac{\pi d_e^2}{a_p} \quad (3.9)$$

onde d_e é o diâmetro da esfera tendo o mesmo volume da partícula definido pela equação 3.10:

$$d_e = \left(\frac{6v_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad (3.10)$$

Assim, com base na esfericidade da partícula (equação 3.9), juntamente com a razão de densidade (λ) mostrada pela equação 3.11, Concha e Barrientos (1986) definiram os fatores de correção f_A , f_B , f_C , f_D , α , β , γ e η (equações 3.12 a 3.19) permitindo determinar o tamanho – equação 3.20 – e velocidade de sedimentação – equação 3.21 – adimensionais.

$$\lambda = \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (3.11)$$

$$f_A(\psi) = \frac{5,42 - 4,75\psi}{0,67} \quad (3.12)$$

$$f_B(\psi) = \left(0,843 f_A(\psi) \log \frac{\psi}{0,065} \right)^{-1/2} \quad (3.13)$$

$$f_C(\lambda) = \lambda^{-0,0145} \quad (3.14)$$

$$f_D(\lambda) = \lambda^{0,00725} \quad (3.15)$$

$$\alpha(\psi) = f_B(\psi)^2 \quad (3.16)$$

$$\beta(\psi) = (f_A(\psi)^{1/2} f_B(\psi)^2)^{-1} \quad (3.17)$$

$$\gamma(\lambda) = f_D(\lambda)^2 \quad (3.18)$$

$$\eta(\lambda) = (f_C(\lambda)^{1/2} f_D(\lambda)^2)^{-1} \quad (3.19)$$

Observe que $f_A(1) = f_B(1) = f_C(1) = f_D(1) = 1,0$ e os valores de d_e^* e V_T^* são calculados por meio das equações (3.6) e (3.7) usando o diâmetro equivalente d_e no lugar de d_p na equação (3.6).

$$d_{eM}^* = d_e^* (\beta(\psi))^{2/3} (\eta(\lambda))^{2/3} \quad (3.20)$$

$$V_M^* = \frac{20,52}{d_{eM}^*} \left((1 + 0,0921 d_{eM}^{3/2})^{1/2} - 1 \right)^2 \quad (3.21)$$

Finalmente, com base nas equações anteriores é possível avaliar o efeito da forma da partícula na velocidade terminal da partícula não esférica dada pela equação 3.8.

Analisando as equações 3.3 e 3.4, observa-se que a velocidade terminal da partícula, em um determinado fluido, depende somente do tamanho e da densidade da partícula e, quanto mais elevados forem esses parâmetros, maior será a velocidade terminal. Além disso, a relação entre eles, de acordo com Sampaio e Tavares (2005), é de estratégica importância no processo de separação de materiais representada pela equação 3.22 abaixo, denominada **razão de sedimentação**.

$$\frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{\rho_{s2} - \rho_f}{\rho_{s1} - \rho_f} \right)^n \quad (3.22)$$

onde d_1 e d_2 são os diâmetros das partículas dos materiais de densidades ρ_{s1} e ρ_{s2} , respectivamente e n varia de 0,5 para partículas pequenas ($< 0,1\text{mm}$) seguindo a Lei de Stokes a 1,0 para partículas grosseiras ($> 5\text{mm}$) para a Lei de Newton.

Dessa forma, através da equação 3.22, é possível prever se a separação em meio fluido ocorrerá. Lins (2004) verificou que essa relação é mais elevada entre as

partículas mais grosseiras (condições de Newton $n = 1$). Significa que a diferença de densidade entre as partículas tem efeito mais pronunciado nas faixas mais grosseiras, favorecendo a separação por densidade (concentração). Nas faixas granulométricas mais finas (condições de Stokes $n = 0,5$) a influência da densidade é reduzida privilegiando a separação por tamanho (classificação).

Quando o movimento de uma partícula em um fluido tende, sob a ação da gravidade, a percorrer uma distância muito longa (teoricamente infinita), ocorre a chamada **sedimentação em queda livre**. Em termos práticos, ela é verificada quando a percentagem de sólidos for inferior a 15% em peso. Assim, a equação 3.22 também representa a razão de sedimentação em queda livre.

Um caso particular de separação de um sistema binário de minerais utilizando a diferença de densidades foi estudado por Taggart (1945) que propôs um índice que combina os efeitos das densidades dos materiais com a do meio, chamado de **Critério de Concentração (CC)** que nada mais é do que a equação de razão de sedimentação em regime turbulento ($n=1$). De maneira similar, quanto maior for a diferença entre as densidades, mais elevado será o critério de concentração e, conseqüentemente, mais fácil a separação. Assim, o autor sugere que para CC acima de 2,5 a separação será simples. Se o valor estiver entre 2,5 e 1,75 a separação é possível até $150\mu\text{m}$. Para índices inferiores a 1,2 a separação por métodos hidráulicos será difícil para qualquer tamanho de partículas. Contudo, esse critério de concentração não é válido para separação em meio denso, onde a densidade do fluido excede à do material mais leve, uma vez que as partículas se movimentam em sentidos opostos. Na prática, considera-se que a separação em meio denso pode ser aplicada sempre que houver uma diferença de densidade de 100kg/m^3 a 200kg/m^3 e, é claro, um meio denso com a densidade de separação desejada.

Como o critério de concentração desenvolvido por Taggart (1945) não levou em consideração o efeito da forma da partícula, Burt (1984) incluiu na fórmula um fator de razão de forma (f_{rp}) que é o quociente entre os fatores de sedimentação das partículas pesadas e leves, descrito a seguir:

$$CC = \left(\frac{\rho_{s2} - \rho_f}{\rho_{s1} - \rho_f} \right)^n \times frp \quad (3.23)$$

$$frp = \zeta_1 \div \zeta_2 \quad (3.24)$$

$$\zeta_1 = V_{Tirreg1} \div V_{T1} \quad (3.25)$$

$$\zeta_2 = V_{Tirreg2} \div V_{T2} \quad (3.26)$$

onde:

frp = fator de razão de forma;

ζ_1 = fator de forma da partícula 1;

ζ_2 = fator de forma da partícula 2;

$V_{T1\ irreg}$ = velocidade terminal de sedimentação da partícula de formato irregular 1;

V_{T1} = velocidade terminal de sedimentação da partícula esférica 1;

$V_{T2\ irreg}$ = velocidade terminal de sedimentação da partícula de formato irregular 2;

V_{T2} = velocidade terminal de sedimentação da partícula esférica 2.

Até agora, os modelos de movimentação da partícula em meio fluido só levaram em consideração a relação entre a partícula e o fluido. Porém, quando há um aumento da densidade da polpa, o movimento de cada partícula também sofre influência do movimento das demais partículas e do deslocamento do fluido entre elas. É a **sedimentação em queda impedida** (ou **queda retardada**), cuja velocidade terminal é inferior à velocidade terminal em queda livre e pode ser calculada substituindo a densidade (ρ_f) do fluido pela densidade (ρ_{sl}) da polpa na equação de Newton:

$$v_T = k_i \sqrt{d_p (\rho_s - \rho_{sl})} \quad (3.27)$$

onde:

k_i = constante

ρ_s = densidade da partícula

d_p = diâmetro da partícula

ρ_{sl} = densidade da polpa

De modo análogo à sedimentação em queda livre, é possível determinar a razão de tamanho requerida para que duas partículas de tamanhos diferentes apresentem a mesma velocidade terminal em sedimentação em queda impedida. A razão de sedimentação em queda impedida é expressa pela seguinte relação:

$$\frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{\rho_{s2} - \rho_{sl}}{\rho_{s1} - \rho_{sl}} \right) \quad (3.28)$$

onde d_1 e d_2 são os diâmetros das partículas de densidades ρ_{s1} e ρ_{s2} , respectivamente.

Para ilustrar o efeito da sedimentação em queda livre e em queda impedida na classificação de materiais, Carrisso e Correia (2004) compararam dez pares de partículas esféricas de quartzo e galena, sendo cinco grossas e cinco finas em sistemas de queda livre (somente água) e em queda impedida (suspensão com 40% de sólidos e 60% de água). Os resultados são apresentados de maneira esquemática na figura 3.23.

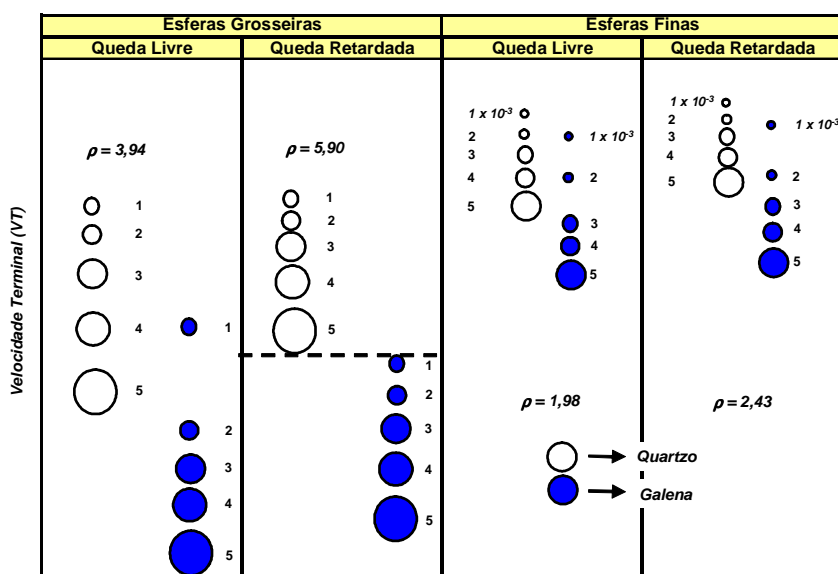


Figura 3.23 – Exemplo de queda livre e queda retardada de esferas grossas e finas de quartzo e galena. Fonte Carrisso e Correia (2004).

Através da figura 3.23 pode-se observar que as melhores condições para a classificação por tamanho em um fluido são alcançadas pelas partículas finas em queda livre (3ª coluna). Por outro lado, caso o critério de separação / classificação seja a densidade, a melhor opção é a queda retardada de partículas grosseiras (2ª coluna).

Em síntese, a **sedimentação em queda livre** é adotada quando se deseja uma classificação por tamanho das partículas, enquanto a **sedimentação em queda impedida** é utilizada para separar os materiais por densidade dando ênfase à concentração.

Dependendo do mecanismo (mecânico, gravidade, centrífugo, etc.) e do fluido utilizado, geralmente o ar ou água cujos valores de densidade são mostrados na tabela III.7 (Perry e Green – 1984), os equipamentos de classificação ou classificadores podem ser divididos em vários grupos. Todavia todos consistem basicamente em uma coluna de separação na qual o fluido sobe a uma velocidade uniforme (v_f). As partículas em contato com essa corrente ascendente irão subir ou descer dependendo de suas velocidades terminais (v_T). Como resultado, são gerados dois produtos: o *overflow* composto das partículas com velocidade terminal (v_T) menor do que a velocidade do fluido ($v_T < v_f$) e o *underflow* formado pelas partículas cuja velocidade terminal é maior do que a velocidade do fluido ($v_T > v_f$). A figura 3.24 representa esquematicamente a separação em um classificador.

Tabela III.7 – Valores de densidade e viscosidade da água e do ar em função da temperatura a 1 atm de pressão. Fonte (Perry e Green – 1984).

Temperatura (°C)	Água		Ar	
	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade (x10 ⁻³ kg/ms)	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade (x10 ⁻³ kg/ms)
0	1000	1,79	1,29	0,0172
20	998	1	1,2	0,0181
40	992	0,653	1,12	0,0191
60	983	0,467	1,06	0,0200
80	972	0,355	0,99	0,0209

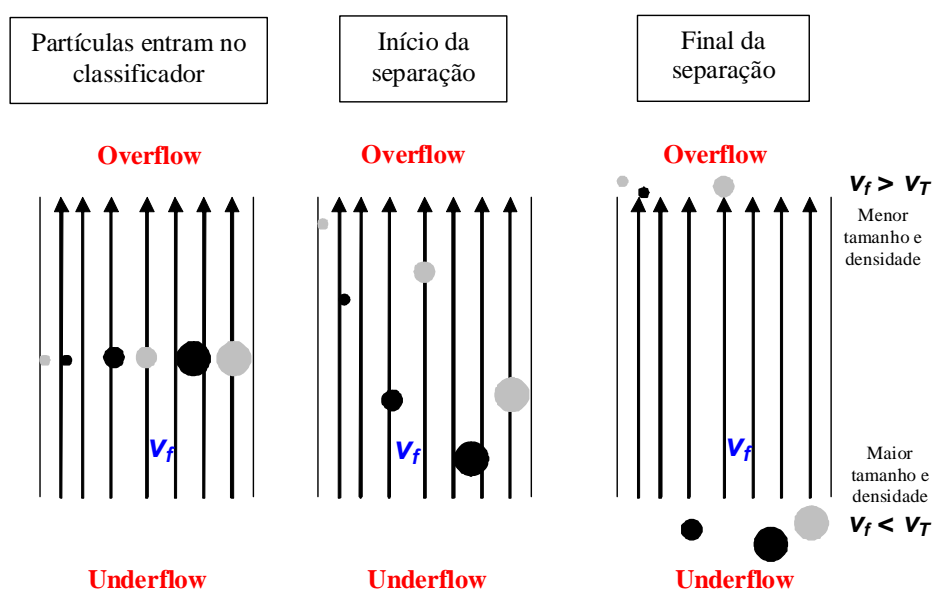


Figura 3.24 – Representação esquemática de uma separação em um classificador.

Para Sampaio e Tavares (2005), essa separação será mais significativa para partículas de maior tamanho uma vez que o efeito da densidade se torna mais pronunciado nesse caso. Concomitantemente, para um processamento satisfatório, é necessário que a alimentação apresente uma distribuição granulométrica estreita, além de uma diferença significativa de densidade ou forma entre os constituintes de interesse.

Os dois representantes clássicos dessa metodologia são: o classificador espiral, mostrado na figura 3.25, utilizado geralmente em usinas de processamento mineral com instalações de baixa capacidade e materiais na faixa granulométrica de 0,833mm a 0,074mm, cujo mecanismo de sedimentação predominante é o de queda livre e o hidrociclone, ilustrado pela figura 3.26, largamente utilizado na classificação fina, principalmente em circuitos fechados de moagem.

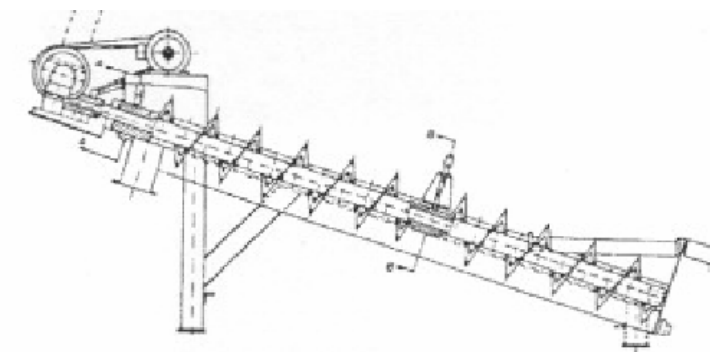


Figura 3.25 – Representação esquemática de um classificador espiral. Fonte Carrisso e Correia (2004).

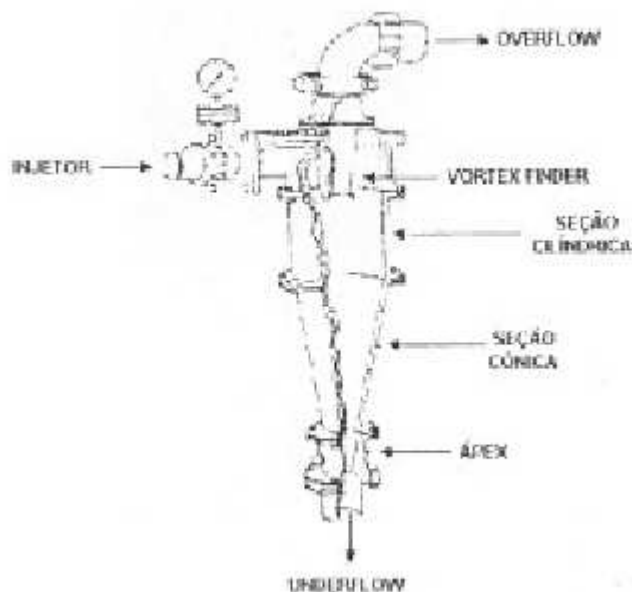


Figura 3.26 – Ciclone. Fonte Carrisso e Correia (2004).

Menos comum, porém de igual importância, principalmente quando a utilização da água como fluido não é conveniente (caso do carvão vegetal), o classificador a ar, pneumático ou aeroclassificador pode ser uma opção viável.

Diversos modelos já foram desenvolvidos levando-se em conta a direção/sentido do fluxo de ar (contra fluxo ou fluxo transversal) e a força predominante na partícula (gravitacional ou centrífuga), de acordo com Shapiro e Gauperin (2004) que designaram a região interna desses equipamentos, onde as partículas sólidas interagem com o fluxo de ar, como Zona de Separação. A figura 3.27 ilustra esses aeroclassificadores.

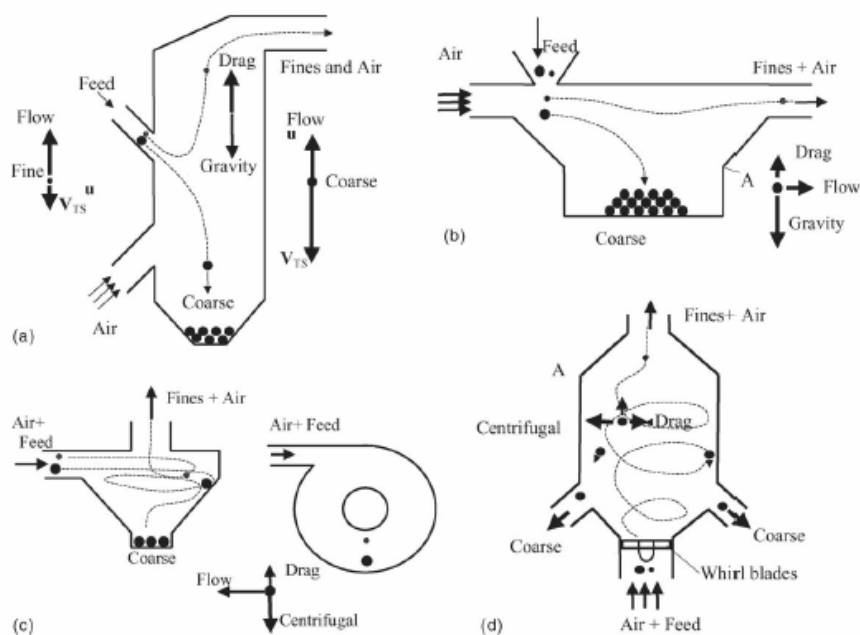


Figura 3.27 – Representação esquemática da separação de partículas em aeroclassificador: separação gravitacional com contra-fluxo (a); separação gravitacional com fluxo transversal (b); separação centrífuga com contra-fluxo (c) e separação centrífuga com fluxo transversal. Fonte Shapiro e Gauperin (2004).

Os **aeroclassificadores gravitacionais com contra-fluxo** consistem basicamente em uma câmara vertical de paredes paralelas onde o ar é injetado de baixo para cima criando um fluxo ascendente de velocidade (u), conforme mostrado na figura 3.27(a) e a alimentação das partículas é efetuada pela parte posterior com velocidade terminal (V_{TS}). As partículas grosseiras, com velocidades terminais (V_{TS}) superiores à velocidade do fluxo (u), caem para o fundo da câmara em um processo de contra-fluxo pela força da gravidade que é maior do que a força de arraste. Devido à simplicidade da construção, são considerados equipamentos baratos e de fácil manutenção. Porém, Shapiro e Galperin (2004) afirmam que a uniformidade do fluxo de ar é quebrada pelos sólidos da alimentação tornando o regime turbulento fazendo com que as partículas mais grosseiras atrapalhem o arraste das mais finas reduzindo a eficiência do processo. Para compensar, sugerem que a separação seja efetuada em mais de um estágio. As aplicações mais usuais são para separar materiais contendo dois tipos de partículas de tamanhos bem distintos, como, por exemplo, areia ou seixo arredondado de 1mm a 10mm misturados com poeira de 0,1mm a 0,2mm.

Normalmente conhecidos como máquinas de joeirar (separar), os **aeroclassificadores gravitacionais com fluxo transversal** separam as partículas fazendo com que percorram trajetórias diferentes ao serem lançadas em um fluxo de ar, conforme mostrado na figura 3.27(b). Por causa da enorme vulnerabilidade a fatores aleatórios dessa concepção, estes aparelhos possuem baixa eficiência. São geralmente utilizados na separação das cascas dos grãos onde a diferença de densidade é bem mais significativa do que o tamanho das partículas.

Além dos modelos apresentados anteriormente, outras variações dos aeroclassificadores gravitacionais são também encontradas. São os chamados classificadores a ar em cascata (conhecidos como classificadores zig-zag) apresentados na figura 3.28, além dos classificadores inertes a ar e dos classificadores com leito fluidizado, mostrados na figura 3.29.

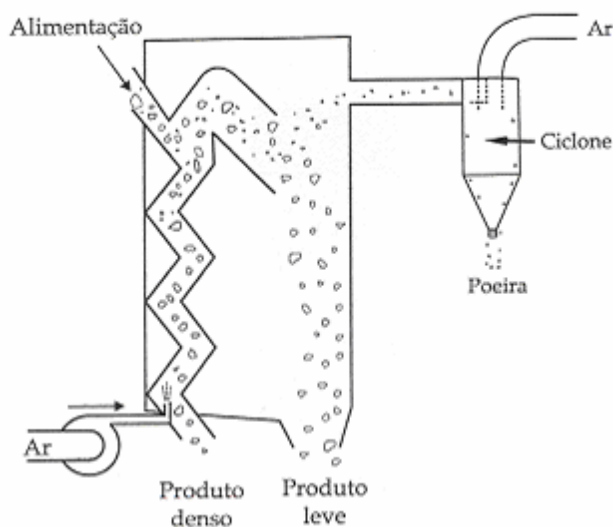


Figura 3.28 – Classificador a ar em cascata: zig-zag. Fonte Jordan et al (1980).

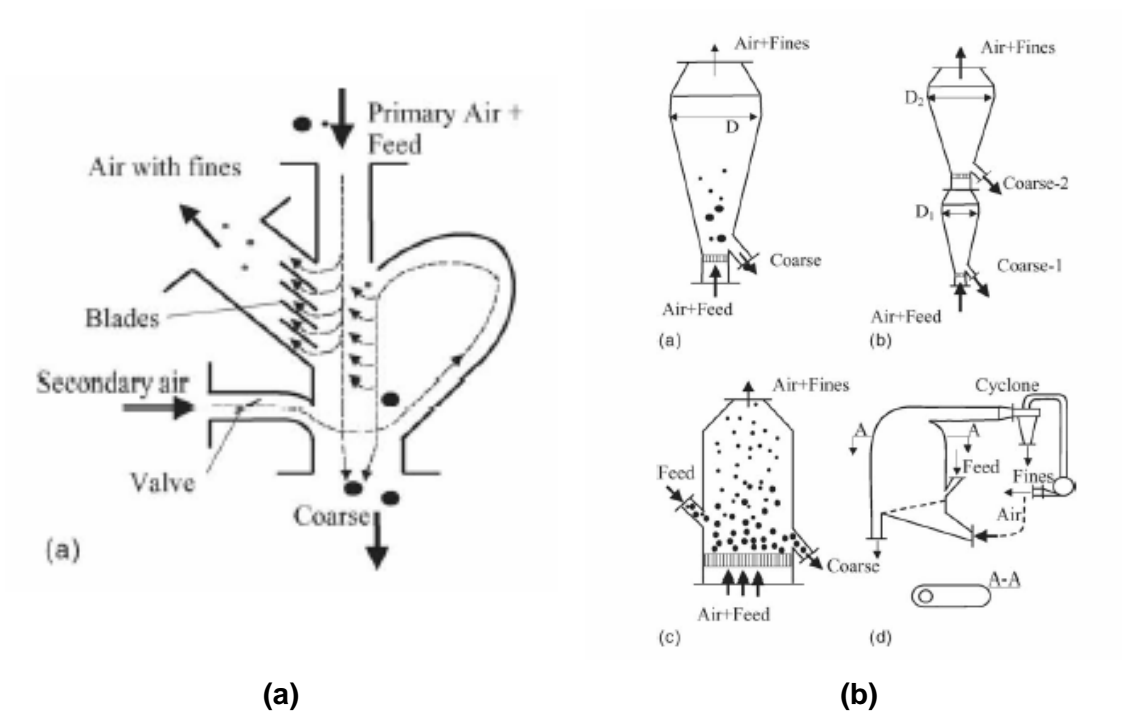


Figura 3.29 – Classificador inerte a ar (a) e Classificadores a ar com leito fluidizado (b). Fonte Shapiro e Galperin (2004).

Existe também uma outra categoria de aeroclassificadores que utiliza a força centrífuga no lugar da gravidade para efetuar a separação de materiais, denominados **aeroclassificadores centrífugos**. Esses dispositivos têm como princípio básico de funcionamento a criação de redemoinhos de ar, geralmente por intermédio de um rotor no interior de um vaso cônico ou cilíndrico, para potencializar o efeito da densidade e tamanho das partículas fazendo com que as partículas mais finas sejam carregadas para o topo ao longo de uma trajetória espiral. As partículas mais grosseiras são arrastadas em direção às paredes e direcionadas para a saída na parte inferior do equipamento, conforme ilustrado na figura 3.30.

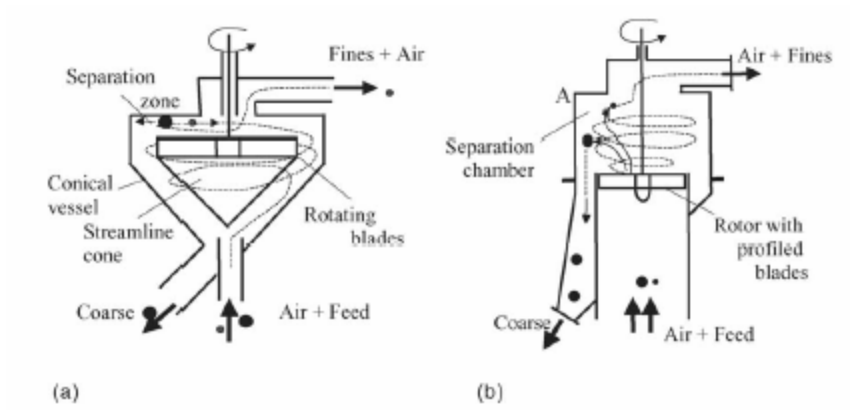


Figura 3.30 – Classificadores centrífugos a ar com lâminas rotativas (a) e com lâminas perfiladas. Fonte Shapiro e Galperin (2004).

3.2.4 – Princípios de concentração gravítica

Além da sedimentação em queda livre e da sedimentação retardada, estão presentes também na separação ou concentração gravítica mecanismos de movimento como a aceleração diferencial e a consolidação intersticial, dentre outros.

De acordo com Lins (2004), a **aceleração diferencial** consiste na queda da partícula por um período e distância relativamente curtos até sua parada ou desvio provocada pela interferência das paredes do equipamento e ou das partículas vizinhas. Note que a aceleração diferencial, dada pela equação 3.29, depende somente das densidades do sólido e do fluido ou polpa. Assim, em teoria, se a duração da queda for muito curta e freqüente, pode-se dizer que o movimento da partícula será mais afetado pela densidade do material do que pelo seu tamanho (velocidade terminal). A figura 3.31 ilustra esse mecanismo.

$$\frac{dv}{dt} = \left(1 - \frac{\rho}{\Delta}\right)g \quad (3.29)$$

onde:

Δ = densidade da partícula;

ρ = densidade do fluido ou polpa;

g = aceleração da gravidade;

A **consolidação intersticial** ocorre devido à formação de interstícios entre as partículas grossas permitindo o movimento das partículas mais finas nesses vazios durante a movimentação do leito. Assim o material ficará disposto em camadas ou estratos facilitando a separação conforme mostrado na figura 3.31.

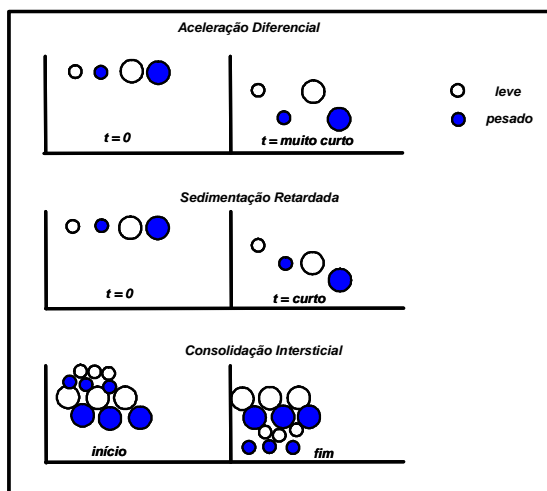


Figura 3.31 – Efeitos dos mecanismos de concentração gravítica. Fonte Lins (2004).

Com relação aos equipamentos de concentração gravítica disponíveis, uma grande variedade é mostrada na tabela III.8, dividida em três grupos principais em função do mecanismo dominante.

Tabela III.8 – Classificação dos processos de concentração gravítica. Fonte: Lins (2004).

Mecanismo dominante	Característica secundária	Força de campo dominante	Meio	Aparelho
Densidade	Meio denso	Gravitacional	Úmido	Cone Tambor
		Centrífuga	Úmido	Ciclone Vorsyl Dynawhirpool Tri-Fio Larcodems
		Magnética	Úmido	Separador magneto-gravimétrico
	Meio autógeno	Gravitacional	Úmido	Separador stripa Hidrosseparador
		Centrífuga	Úmido	Ciclone autógeno Separador Knelson
Estratificação (pulsção)	Pulsção mecânica	Gravitacional	Úmido	Jigue Harz Jigue trapezoidal Jigue Bendelari Jigue circular
		Centrífuga	Úmido	Jigue centrífugo
	Pulsção pneumática	Gravitacional	Úmido	Jigue Baum Jigue Batac
			Seco	Jigue pneumático
Película de água	Sem oscilação	Gravitacional	Úmido	Calha simples Mesa plana Calha estrangulada Cone Reichert
		Centrífuga	Úmido	Espiral Concentradora Concentrador Falcon
	Com oscilação	Gravitacional	Úmido	Mesa concentradora Mesa Mozley Bartles-Mozley Concentrador duplex
			Seco	Mesa pneumática
		Centrífuga	Úmido	MGS

Porém, uma outra forma de avaliar a distribuição dos diferentes dispositivos de separação gravítica, agora em função da granulometria do material, pode ser observada na figura 3.32. Combinando essa figura com a tabela III.8 para meio seco (premissa do processamento do carvão vegetal) conclui-se que apenas o jigue pneumático poderia ser utilizado na presente investigação.

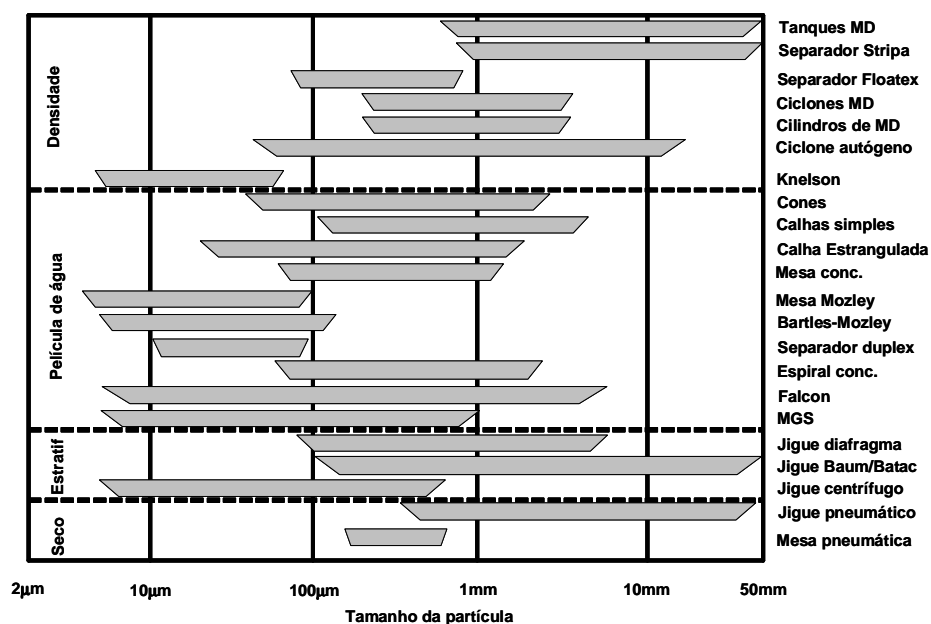


Figura 3.32 – Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria. Fonte: Sampaio e Tavares (2005).

Segundo Sampaio e Tavares (2005), a jigagem é um processo de separação a partir da repetida dilatação e compactação de um leito de partículas pelo movimento pulsante do fluido. Como resultado, tem-se a estratificação do leito em camadas ou estratos de densidades crescentes desde o topo até a base. Lins (2004) sugere que grande parte dessa estratificação ocorra durante o período em que o leito está dilatado como resultado da sedimentação retardada e da aceleração diferencial. Com isso, as partículas finas e leves sobem e as grossas e pesadas descem para o fundo do leito. Em seguida, durante a etapa de sucção, as partículas finas e pesadas são levadas para o fundo e as grossas e leves para o topo do leito, devido à consolidação intersticial. A combinação desses mecanismos promove uma separação bastante eficaz em um maior intervalo de tamanhos, conforme mostrado na figura 3.33.

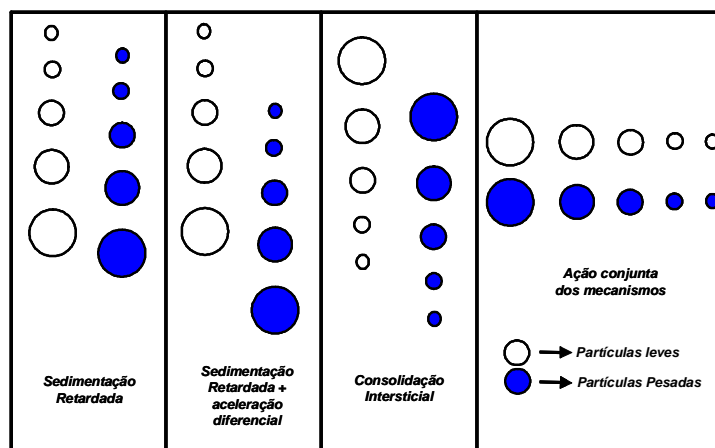


Figura 3.33 – Ação dos mecanismos de estratificação em um jigge. Fonte Sampaio e Tavares (2005).

Um diagrama esquemático de um jigge hidráulico é mostrado na figura 3.34, enquanto a figura 3.35 ilustra um jigge pneumático.

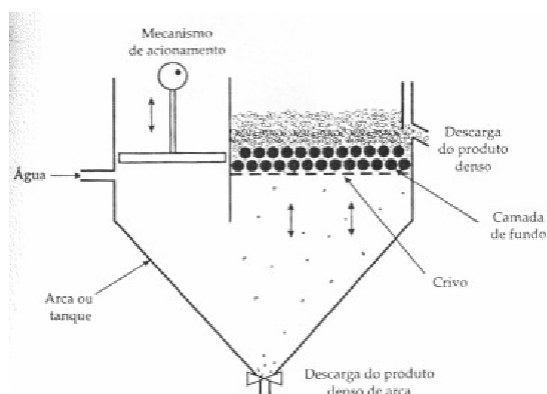


Figura 3.34 – Jigge. Fonte: Sampaio e Tavares (2005).

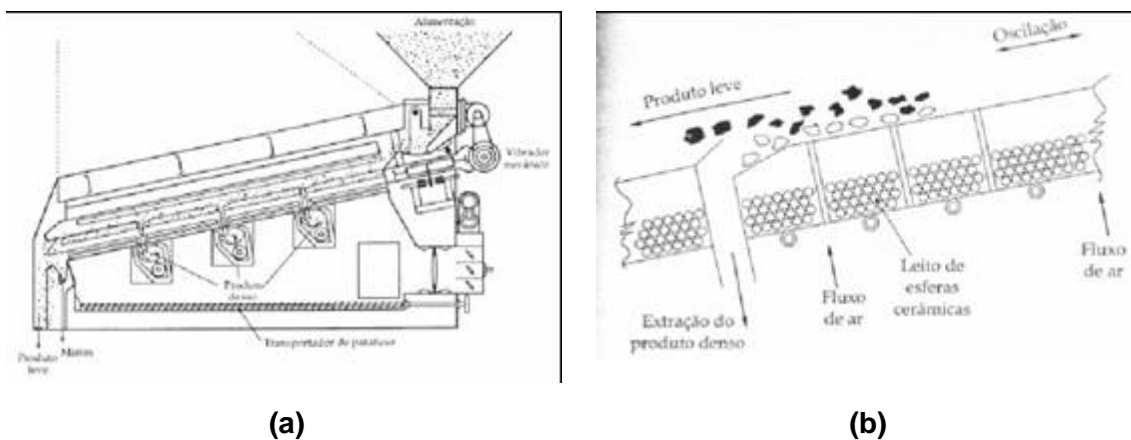


Figura 3.35 – Jigge pneumático (a) e detalhe do mecanismo de separação (b). Fonte Sampaio e Tavares (2005).

Apesar da proposta de combinar a tabela III.8 com a figura 3.32 para selecionar o equipamento mais adequado na separação das impurezas do carvão vegetal, alguns outros dispositivos, devidamente adaptados, têm grande potencial de utilização como complementos em sistemas de separação gravítica a seco, como, por exemplo, a calha estrangulada ou a mesa pneumática.

A **calha estrangulada** não possui rifles (fundo regular) e a remoção do concentrado é contínua. Tipicamente é fornada por um canal inclinado que vai se estreitando no sentido do fluxo. Lins (2004) explica que essa diminuição da largura provoca um aumento da espessura do leito da polpa facilitando a separação dos materiais leves e pesados, através de cortadores estrategicamente instalados na saída da calha, ilustrados na figura 3.36. O regime é considerado laminar e os mecanismos de movimentação predominantes são a sedimentação retardada e a consolidação intersticial.

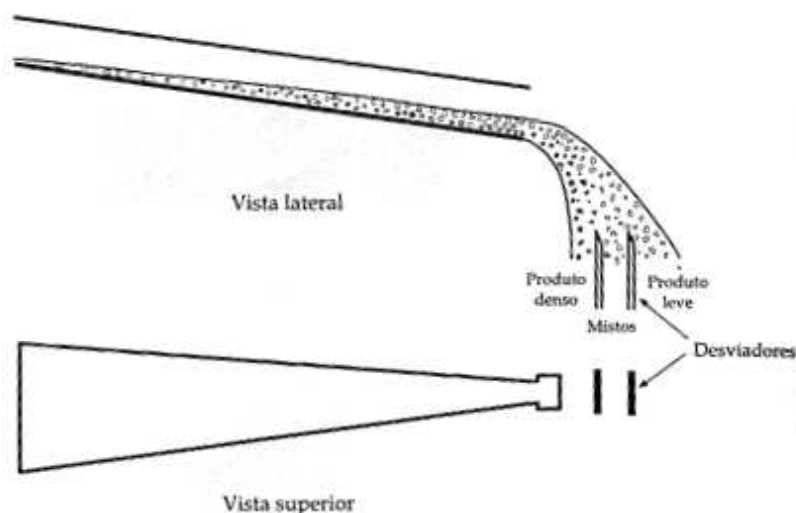


Figura 3.36 – Calha estrangulada. Fonte: Lins (2004).

A mesa pneumática, de acordo com Sampaio e Tavares (2005), opera a seco com fluxo constante de ar ascendente que atravessa a malha de abertura fina que cobre a superfície (horizontal ou inclinada). Essa superfície é normalmente segmentada para permitir que diferentes velocidades possam ser aplicadas ao longo da mesa. Os princípios de funcionamento e de separação são semelhantes aos da calha vibratória, onde as oscilações da mesa e o fluxo de ar permitem a estratificação do leito direcionando as partículas mais densas para a base, enquanto as partículas mais

leves são conduzidas ao topo. A figura 3.37 mostra um diagrama esquemático de uma mesa pneumática, que tem aplicações em beneficiamento de minérios de areia pesada e asbestos, embora, originalmente, tenha sido desenvolvida para separação de sementes.

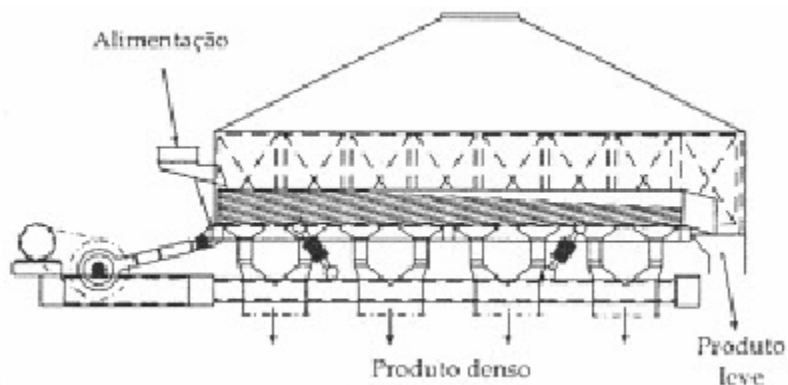


Figura 3.37 – Mesa pneumática. Fonte: Sampaio e Tavares (2005).

3.2.5 – Balanço de massa e determinação da eficiência da separação

A determinação da eficiência de um processo de separação é de suma importância, pois além da qualidade dos produtos, influencia também os aspectos econômicos viabilizando ou não a adoção desse sistema. Para determiná-la faz-se necessário o conhecimento prévio do balanço de massa do processo. Então, considerando que toda operação de separação é baseada no princípio básico:

$$\text{ENTRADA} = \text{SAÍDA}$$

ou, no caso mais real,

$$\text{ENTRADA} = \text{SAÍDA} + \text{PERDAS}$$

o resultado é a formação de pelo menos dois produtos: **Concentrado(C)** que contém a maior parte da espécie de interesse (útil) e **Rejeito(E)** que corresponde à fração não útil. A figura 3.38 apresenta um fluxograma esquemático de uma separação de duas espécies.

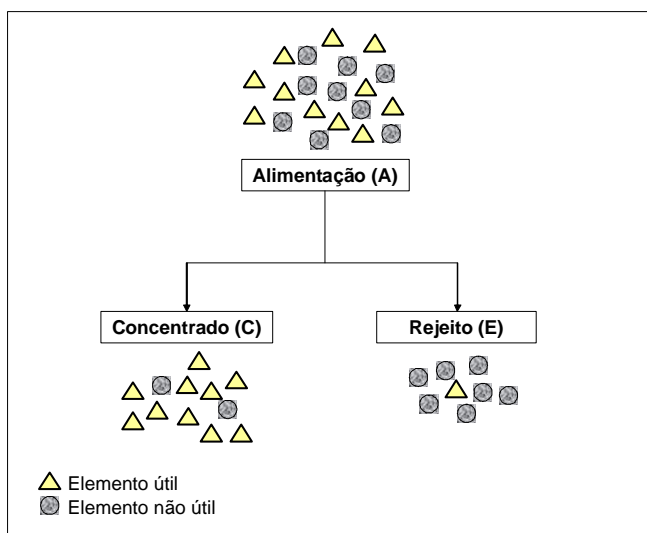


Figura 3.38 – Fluxograma esquemático de uma separação entre duas espécies.
Fonte: Valadão et al (2000).

A partir da figura anterior, algumas relações podem ser obtidas:

$$A = C + E \quad (3.30)$$

$$Aa = Cc + Ee \quad (3.31)$$

$$R = Cc / Aa \quad (3.32)$$

$$R = [c(a - e)] / [a(c - e)] \quad (3.33)$$

$$R_c = A / C \quad (3.34)$$

$$Y = C / A = (a - e) / (c - e) \quad (3.35)$$

$$R_e = c / a \quad (3.36)$$

onde:

A =	massa da alimentação	a =	teor da espécie i na alimentação
C =	massa do concentrado	c =	teor da espécie i no concentrado
E =	massa do rejeito	e =	teor da espécie i no rejeito
R =	recuperação da espécie i	R _c =	razão de concentração
Y =	recuperação mássica	R _e =	razão de enriquecimento

A figura 3.38 revela também que a separação não foi completamente eficiente, pois existem partículas do elemento não útil no concentrado, contaminação gerando queda na qualidade, e partículas de material útil no rejeito indicando perda de material.

Para medir a qualidade, Gaudin (1939) propôs o índice de seletividade (IS), que pode variar de um (quando não há separação) até infinito (para separação ideal em que R₁ = T₂ = 100). Na prática, os valores obtidos se encontram entre 4 e 40.

$$IS = [(R_1 T_2) / (R_2 T_1)]^{0,5} \quad \text{ou} \quad (3.37)$$

$$IS = \{(R_1 T_2) / [(100 - R_1)(100 - T_2)]\}^{0,5} \quad (3.38)$$

onde:

R ₁ =	recuperação da espécie 1 no concentrado
R ₂ =	recuperação da espécie 2 no concentrado
T ₁ =	rejeição (“recuperação”) da espécie 1 no rejeito
T ₂ =	rejeição (“recuperação”) da espécie 2 no rejeito

Em relação à determinação da eficiência de um processo de separação (ES), Schulz (1970) sugeriu que dentre as diversas fórmulas disponíveis para medi-la, a que melhor representa o sistema é a equação 3.39, pois é aplicável a qualquer separação física de um ou mais elementos, assumindo um valor máximo para a separação perfeita e zero para operações de amostragem e tem significância física.

$$ES = [100(a - e) / (c - e)]\{(c / a) - [(c_m - c) / (c_m - a)]\} \quad \text{ou} \quad (3.39)$$

$$ES = [100 (C / A)]\{(c / a) - [(c_m - c) / (c_m - a)]\} \quad (3.40)$$

onde:

C_m = teor máximo do elemento útil (químico ou mineralógico)

Ou, como no caso do peneiramento industrial, onde a eficiência (E) é definida como a relação entre a quantidade real de material passante em uma abertura específica e a quantidade teórica que deveria passar mais comumente determinada pela equação 3.41:

$$E = \frac{\text{material real passante (t/h)}}{\text{material teórico que deveria passar (t/h)}} \times 100 \quad (3.41)$$

Valadão et al (2000) relatam que diversos fatores podem influenciar a eficiência do peneiramento industrial, que é da ordem de 80% a 90%:

- Superfície de peneiramento: cuja capacidade de peneiramento é reduzida em função da diminuição da superfície;
- Formato da abertura: aberturas retangulares têm maior percentual de área livre, maior probabilidade de passagem e maior capacidade por unidade de superfície;
- Relação partícula/abertura: quanto mais próximo for o tamanho da partícula em relação à abertura, mais difícil será a sua passagem (separação). Forma das partículas: as partículas de formato cúbico (ou equivalente) têm maior facilidade de passar pela abertura do que as partículas lamelares;
- Umidade: dependendo do seu valor e da qualidade do material pode gerar aglomerados dificultando sua separação.

Uma outra maneira de se determinar a eficiência de um equipamento de separação, descrito esquematicamente pela figura 3.39(a) é através da curva de partição, apresentada na figura 3.39(b) por Chaves (2002). O processo de separação ideal, representado pela curva vertical pontilhada, mostra que todas as partículas com tamanhos inferiores ao “tamanho de corte” (d_c) estão no *underflow* enquanto as partículas com tamanho acima daquele estão no *overflow*. No caso da figura 3.39(a), esse tamanho de partícula limítrofe da separação equivale ao d_{50} , ou seja, o diâmetro médio de partícula que divide o material em 50% para cada fração. Na prática,

partículas que possuem a mesma forma, tamanho e densidade podem sofrer, de maneira diferente, a ação das forças que atuam na separação. Dessa forma, tomam trajetórias diferentes dentro do concentrador/classificador. Essa ineficiência representada pelas curvas cheias nas figuras 3.39(b) e 3.39(c) é definida como sendo a curva de partição real. Essa ineficiência pode estar relacionada com as variáveis de processo e ou projeto do dispositivo de separação. É intuitivo notar que quanto maior for a inclinação da curva real em relação à curva ideal, mais próxima da idealidade ela estará e mais eficiente será o processo. Outro fenômeno comum nesses equipamentos que também podem afetar a eficiência do processo é o curto-circuito, ou seja, algumas partículas passam pelo equipamento sem sofrer nenhuma separação, conforme mostrado pelas figuras 3.39(a) e 3.39(c). Por isso, dependendo do processo, é interessante corrigir a curva real “eliminando” o curto-circuito.

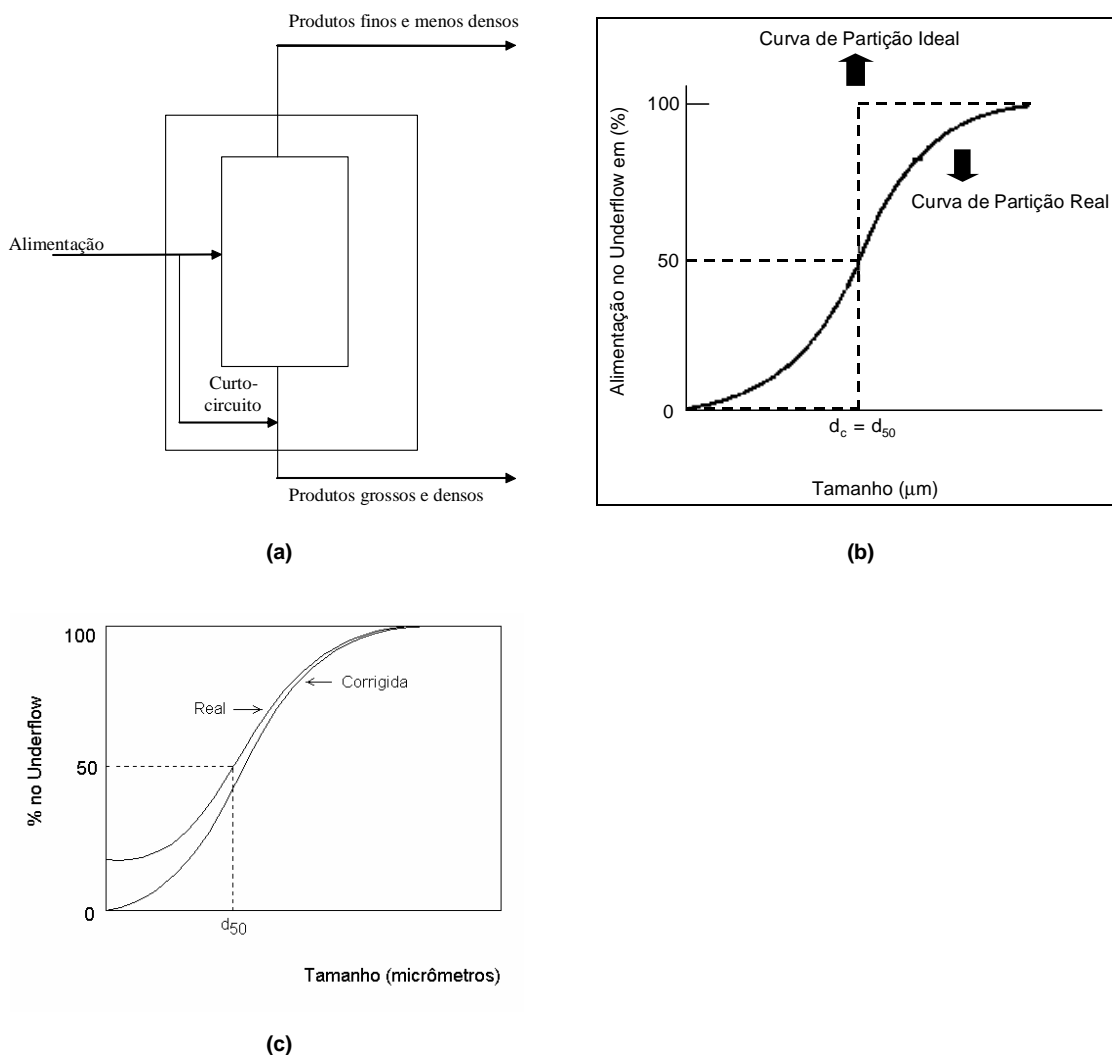


Figura 3.39 – Curvas de partição real e ideal. Fonte: Chaves (2002).

Assim, segundo Souza et al (2004), “*A análise das curvas de partição é uma maneira simples e confiável de compreender os mecanismos de separação, dando suporte tanto aos modelos empíricos quanto aos modelos físicos*”. Aliadas com a caracterização da alimentação, as curvas de partição fornecem resultados essenciais para controle do processo podendo ser utilizados a distribuição granulométrica das espécies presentes, o teor global e teor por faixa de tamanho, além da distribuição mássica dos produtos, como dados de entrada.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para atender o objetivo proposto de reduzir o teor das cinzas dos finos de carvão vegetal, foi efetuada, primeiramente, a caracterização físico-química desse material para identificação das propriedades diferenciadoras de seus constituintes. Com base nas informações obtidas foram selecionados o peneiramento e a classificação a ar como sendo as metodologias de separação mais adequadas.

4.1 – Coleta e preparação das amostras

O material utilizado na caracterização dos finos de carvão vegetal e para a realização dos ensaios de separação foi coletado na correia transportadora (CT 3.09) que abastece as moagens I e II da Usina Barreiro da *V&M do Brasil*, durante a transferência do material para o silo de recebimento.

Já o carvão vegetal de referência, utilizado na determinação do grau de impureza presente em cada fração desses finos, foi obtido aleatoriamente em pilhas de estoque e em caminhões do tipo gaiola e sacaria. Depois de limpos e completamente isentos de contaminação, foram quebrados, misturados e classificados. Esta seleção foi aleatória e independente do tipo de madeira, origem, forno de carbonização utilizado, etc.

4.2 – Análise laboratorial das amostras

Todas as amostras foram submetidas aos ensaios abaixo:

- Análise granulométrica em peneiras vibratórias quadradas com aberturas de 9,50mm, 6,35mm, 4,76mm, 3,38mm, 2,38mm e 1,70mm durante cinco minutos e peneiras vibratórias circulares com aberturas de 1,20mm, 0,84mm, 0,60mm, 0,50mm, 0,30mm e 0,21mm, também durante cinco minutos;
- Análise imediata para determinação dos teores de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis no TGA 501 da LECO (TGA ≡ Thermogravimetric analyzer) conforme norma ABNT NBR 8112 de out/86;
- Calcinação das cinzas a 900°C em fornos do tipo mufla conforme norma ABNT NBR 8112 de out/86 para determinação da composição química das cinzas por fração;
- Determinação da densidade aparente do carvão e das cinzas (aqui incluindo as impurezas) através do método semelhante ao adotado na norma NBR9165 da ABNT de dez/85.
- Determinação da forma do carvão e das impurezas através de análise estatística dos resultados da observação do formato e medição de seus parâmetros dimensionais a partir da seleção aleatória de 30 partículas nas faixas granulométricas de 9,50mm, 6,35mm e 4,38mm, utilizando um paquímetro como instrumento medidor, sendo o restante do material considerado na mesma proporção.

Nota: a análise granulométrica da etapa de caracterização e as análises imediatas e químicas foram feitas no *Laboratório Químico da V&M do Brasil*. A análise granulométrica dos ensaios de separação foi realizada no *Laboratório de Tratamento de Minérios da Escola de Engenharia da UFMG*.

4.3 – Ensaio de separação a seco

4.3.1 – Aeroclassificador

Para a realização dos testes de separação e concentração gravítica a seco a *V&M do Brasil*, em parceria com a *Escola de Engenharia da UFMG*, desenvolveu o protótipo apresentado na figura 4.1 abaixo.

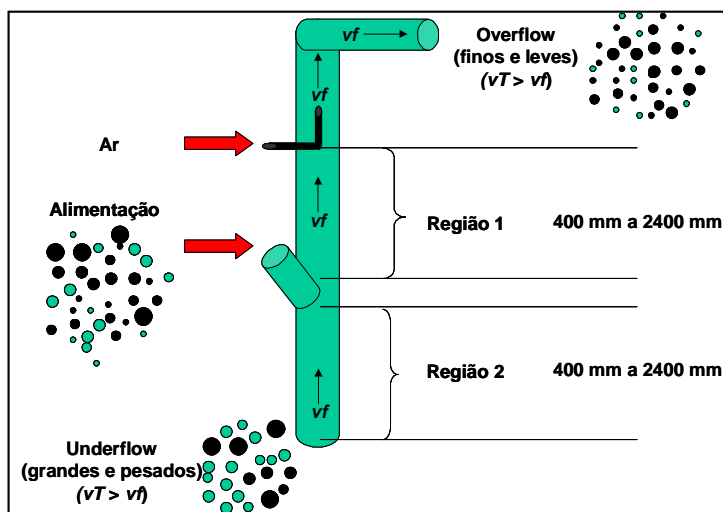


Figura 4.1 – Modelo esquemático do aeroclassificador desenvolvido pela *V&M do Brasil* e a *EEUFMG*.

Semelhante aos aeroclassificadores apresentados por Shapiro e Gauperin (2004), esse dispositivo era constituído de um tubo vertical de paredes paralelas com uma entrada para alimentação na parte inferior e uma injeção de ar na porção superior criando um fluxo ascendente de velocidade de baixo para cima promovendo a separação desejada.

Sua construção singular, formada de vários segmentos intercambiáveis de tubos sem costura de 400mm de altura e 60 mm de diâmetro interno, permitiu variar a distância entre a entrada da alimentação localizada na parte inferior do tubo vertical e a seção de entrada do fluido disposta na parte posterior desse mesmo tubo, para avaliar o comportamento da partícula nessa região. O ar foi fornecido por um compressor e a vazão controlada por um rotâmetro com precisão de $\pm 5\%$. A figura 4.2 ilustra esquematicamente essas variações.

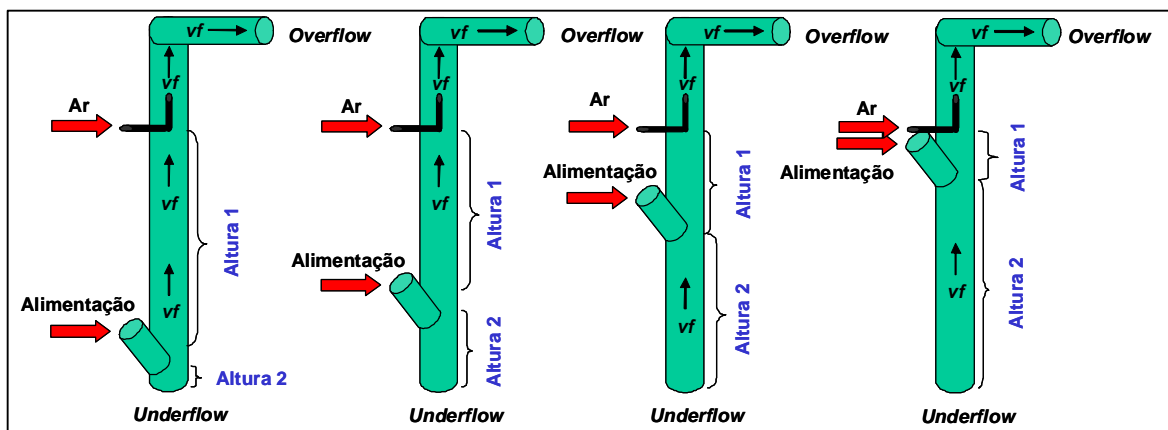


Figura 4.2 – Ilustração da variação da distância entre a entrada da alimentação e a seção de entrada do fluido (“altura 1”).

Além da distância entre a alimentação e a entrada do fluido (400mm a 2400mm), foi avaliada também a influência da vazão do fluido (ar) no processo de separação. A velocidade superficial do sólido variou de 13m/s a 21m/s.

Cada teste utilizou uma ou mais amostras de carvão vegetal com cerca de um quilograma cada e os produtos gerados foram submetidos aos ensaios laboratoriais descritos no item 4.2 para determinação do teor das impurezas e recuperação de carvão vegetal por faixa granulométrica.

4.3.2 – Peneiramento

O ensaio de peneiramento global foi obtido a partir da compilação dos resultados da distribuição granulométrica de todos os produtos gerados em cada teste de separação com o aeroclassificador (concentrado e rejeito).

4.4 – Análise dos resultados

Os valores encontrados experimentalmente foram aplicados em modelos de distribuição granulométrica apresentados na tabela IV.1 para auxiliar na tomada de decisão, principalmente na interpolação e extrapolação dos dados obtidos experimentalmente.

Também foram utilizadas técnicas estatísticas para a determinação da densidade aparente e forma equivalente das partículas de carvão vegetal e impurezas, além do balanço de massa no cálculo da curva de partição e curva teor x recuperação.

Tabela IV.1 – Modelos matemáticos de distribuição de tamanho.

Modelo	Equação – fração passante acumulada Y	Significado de K
Rosin-Rammler	$Y = 1 - \exp\left[-\left(x/K\right)^m\right]$	Tamanho no qual $Y=0,632$
Gates-Gaudin-Schuhmann	$Y = \left(x/K\right)^m$	Tamanho máximo da partícula
Gaudin-Meloy	$Y = 1 - \left[1 - \left(x/K\right)^m\right]^m$	Tamanho máximo da partícula
Harris de três parâmetros	$Y = 1 - \left[1 - \left(x/K\right)^m\right]^s$	Tamanho máximo da partícula

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – Caracterização do carvão vegetal de referência

A caracterização de um carvão vegetal de referência é de extrema importância para o estudo, pois procura balizar os resultados encontrados na caracterização dos demais materiais, permitindo assim a determinação do grau de impurezas presentes em uma amostra de carvão vegetal. Apesar dos resultados da análise imediata, mostrados pela figura 5.1, serem semelhantes àqueles apresentados por Assis et al (1982) dentre outros (ver figura 3.12), eles podem variar, porque segundo Raad (2004), esses parâmetros sofrem variações em função da temperatura de carbonização. Mesmo assim, foram utilizados para “normalizar” os dados neste trabalho.

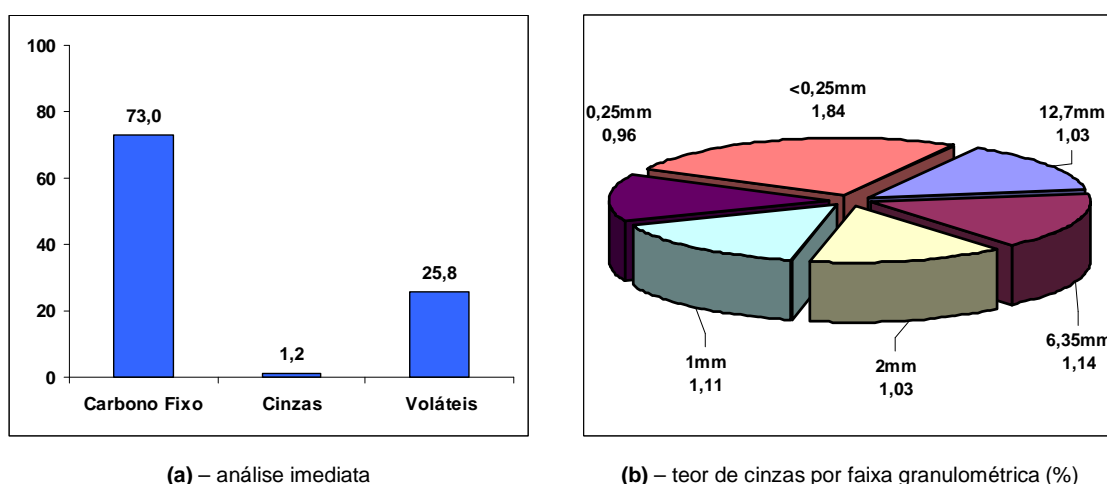


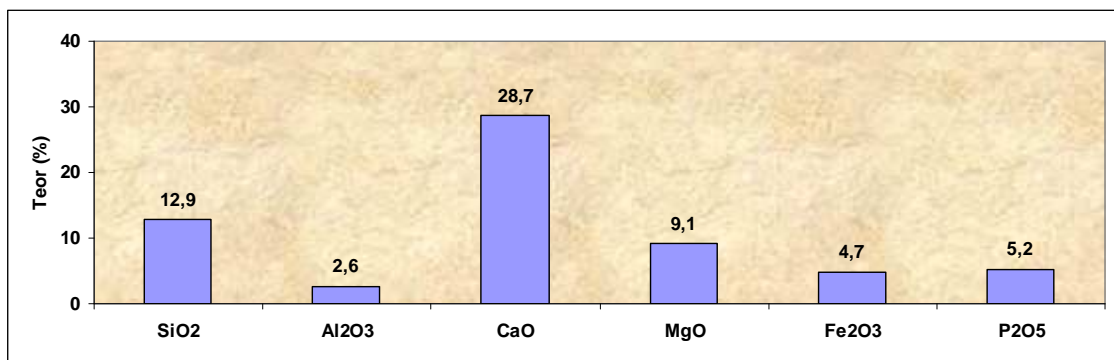
Figura 5.1 – Análise imediata (a) e teor de cinzas por faixa granulométrica (b) do carvão vegetal de referência.

Outra informação importante mostrada pela figura 5.1 está na uniformidade dos teores das cinzas em cada faixa granulométrica (o mesmo ocorreu com o carbono fixo e os materiais voláteis). A explicação para esse fenômeno foi a limpeza realizada nesse material antes de submetê-lo aos ensaios eliminando toda impureza superficial. Só assim, isento de contaminações, poder-se-ia considerar esse carvão como “referência”.

Para ratificar o argumento anterior, essas cinzas foram calcinadas e analisadas quimicamente. Os resultados, apresentados na figura 5.2, mostram uma cinza com baixos teores de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), de aspecto límpido, sem a presença de “corpos estranhos”, sendo apenas o resíduo de óxidos minerais obtidos pela combustão completa do carvão, de acordo com Meira (2002).



(a) – aspecto das cinzas após calcinação



(b) – Composição química das cinzas

Figura 5.2 – Aspecto das cinzas após calcinação (a) e composição química das cinzas (b) do carvão vegetal de referência.

5.2 – Caracterização dos finos de carvão vegetal.

Através da figura 5.3 é possível identificar a quantidade de material presente em uma determinada faixa granulométrica, como, por exemplo, dizer que cerca de 18% do material está abaixo de 2,00mm, ou 30% é inferior a 3,00mm. Informações dessa natureza serão bastante úteis nos sistemas de separação abordados mais adiante.

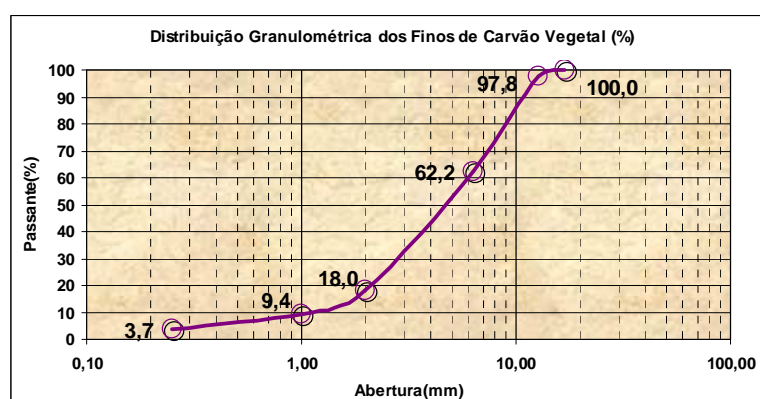


Figura 5.3 – Distribuição granulométrica dos finos de carvão vegetal utilizados na etapa de caracterização.

Já a figura 5.4 mostra a análise imediata típica dos finos de carvão vegetal, cujos teores de carbono fixo e cinzas diferiram do carvão vegetal de referência. O primeiro caiu de 73% para 67,9%, enquanto o teor médio de cinzas aumentou aproximadamente cinco vezes. No caso dos materiais voláteis, não foi observada uma variação significativa permitindo inferir que, considerando as mesmas condições de carbonização, a melhoria (aumento) no teor de carbono, passa pela redução do teor de cinzas. Esse aumento médio fica ainda mais evidente quando se analisa o teor de cinzas por faixa granulométrica. Diferentemente do carvão de referência, que mantém estável esse parâmetro, o teor de cinzas dos finos cresce à medida que a granulometria diminui.

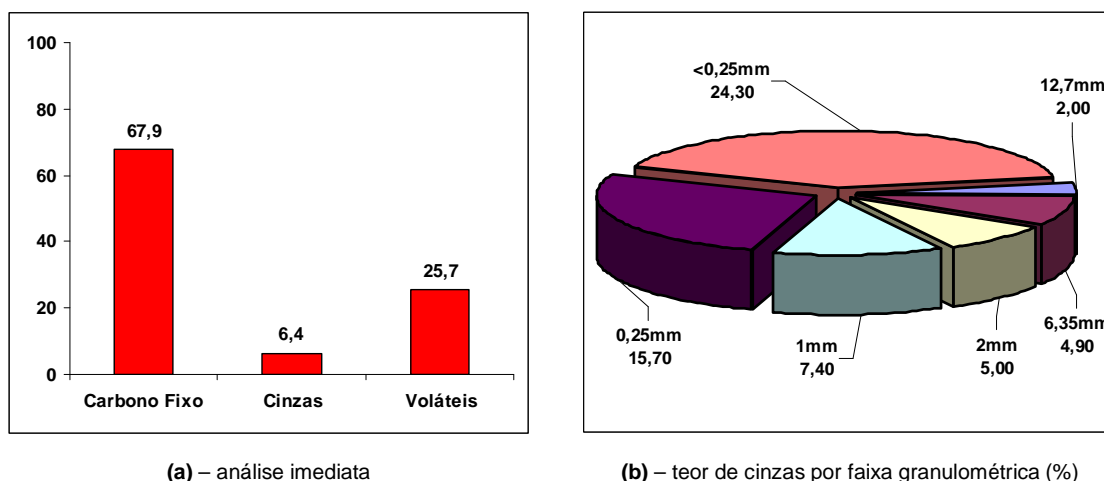


Figura 5.4 – Análise imediata (a) e teor de cinzas por faixa granulométrica (b) dos finos de carvão vegetal.

Analogamente ao carvão de referência, as cinzas dos finos também foram calcinadas e analisadas quimicamente, e seus resultados são mostrados na figura 5.5. Observa-se que o aspecto das cinzas mudou para uma coloração mais escura e com presença de impurezas, também verificado por Oliveira e Almeida (1980) (II).

Mendes et al (1982) e Assis et al (1982) encontraram valores similares aos da figura 5.5(b) apresentados na figura 3.13 que, comparados com o carvão de referência, indica que ambos apresentaram uma elevação nos teores de sílica e alumina da ordem de três a quatro vezes.

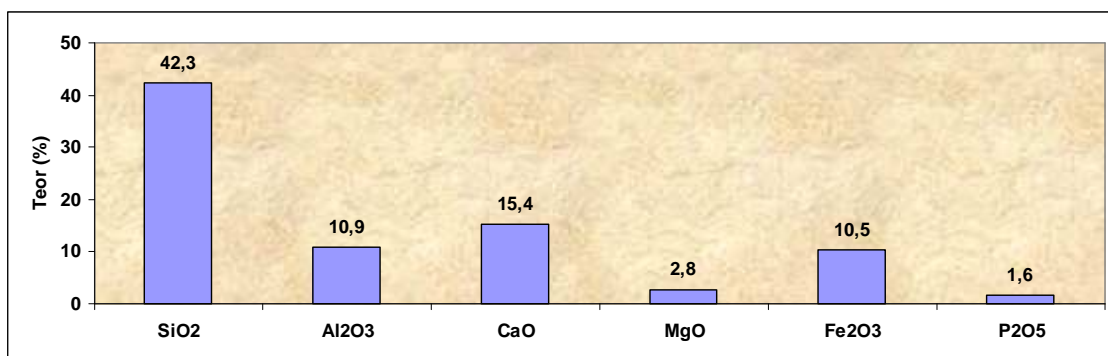
De fato, considerando as evidências, é justo afirmar que a elevação do teor de cinzas em função da diminuição da granulometria do material nada mais é do que uma maior quantidade de impurezas presentes nessas faixas. Essa concentração ocorre, principalmente, por causa do peneiramento do carvão vegetal nas usinas siderúrgicas para adequá-lo às suas diversas aplicações. Oliveira e Almeida (1980) (II) encontraram elevados teores de cinzas (20,9% a 24,9%) em amostras de carvão vegetal na faixa entre 0,15mm e 0,84mm, enquanto o carvão aqui avaliado apresentou teores da ordem de 15,7% a 24,3% nas frações abaixo de 1,0mm.

Por isso, no caso apresentado, para o teor médio de cinzas dos finos de 6,4%, tem-se 1,2% de cinzas propriamente dita (19%) e 5,2% de impurezas (81%) que podem ter diversas origens, tais como:

- Contaminação do carvão vegetal com poeira durante o transporte em estradas não pavimentadas;
- Contaminação da madeira durante o corte, secagem e transporte até os fornos;
- Terra do piso dos fornos de calcinação;
- Contaminação do carvão vegetal nas pilhas de estocagem e/ou silos de abastecimento dos altos-fornos, etc.



(a) – aspecto das cinzas após calcinação



(b) – Composição química das cinzas

Figura 5.5 – Aspecto das cinzas após calcinação (a) e composição química das cinzas (b) dos finos de carvão vegetal.

É importante lembrar que estes resultados de análise imediata dos finos e composição química das cinzas podem variar em função da qualidade do carvão amostrado. Porém não inviabilizam as considerações apresentadas.

5.3 – Determinação da densidade aparente e da forma dos finos de carvão vegetal.

Os ensaios para determinação da densidade aparente do carvão e das impurezas realizados no laboratório químico da *V&M do Brasil*, apresentados na tabela V.1 abaixo, mostraram um carvão com densidade aparente média de 261 kg/m^3 próxima aos valores encontrados por Mendes et al (1982), Penedo (1980) e Gomes e Oliveira (1980). As impurezas apresentaram uma densidade média de 532 kg/m^3 e não foi encontrado na literatura nenhum valor de referência. Nota-se que a densidade média das impurezas variou de 208 kg/m^3 a 827 kg/m^3 . Essa grande variação pode ser atribuída a sua composição heterogênea que vai de material argiloso (terra) até partículas mais resistentes como quartzo e minério, somadas a grande dificuldade em se determinar a densidade de produtos dessa natureza. O fato importante que deve ser ressaltado é a diferença média entre as densidades. A metodologia aplicada está descrito no anexo 1.

Tabela V.1 – Valores de densidade aparente do carvão vegetal e das impurezas.

Teste	Carvão Vegetal (kg/m^3)	Impurezas (kg/m^3)
1	264	208
2	261	378
3	257	424
4	263	825
5	261	827
Média	261	532

Apesar do formato irregular do carvão, o mesmo foi considerado lamelar (retangular) com as dimensões médias indicadas na figura 5.6 abaixo. Com isso, sua esfericidade, calculada através da equação 3.9, foi de 0,7185.

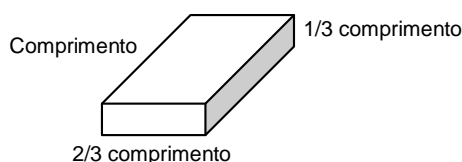


Figura 5.6 – Formato típico de uma partícula de carvão fina (moinha) utilizada no teste.

As impurezas apresentaram uma esfericidade de 0,95 e podem ser consideradas quase esféricas. A metodologia para determinação da forma do carvão e das impurezas está descrita no anexo 2.

5.4 – Ensaios de separação a seco

Foram realizados em cada produto dos testes (*overflow* e *underflow*) separações granulométricas para determinação de teores das frações que, compilados através das técnicas de balanço de massa mencionadas no item 3.2.5, resultaram na distribuição granulométrica, na análise imediata da alimentação global e nos teores de carvão e impurezas mostrados pela figura 5.7 e pela tabela V.2. A relação completas das tabelas com os resultados de cada teste é apresentada no anexo 3.

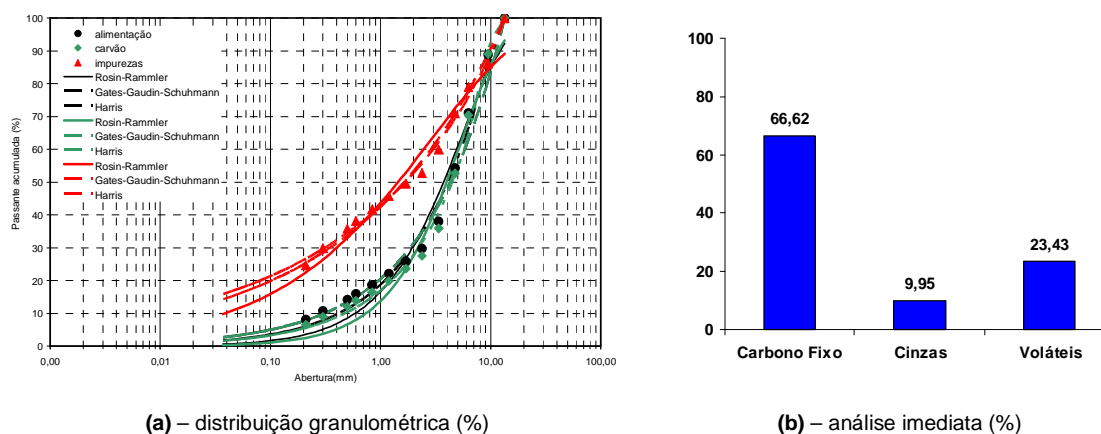


Figura 5.7 – Distribuição granulométrica (a) e análise imediata (b) dos finos de carvão utilizados nos testes de separação.

Tabela V.2 – Teor de finos de carvão e das impurezas por faixa granulométrica do material utilizado nos testes de separação (alimentação).

Abertura (mm)	Percentual Retido (%)	Teor Carvão (%)	Teor Impurezas (%)
13,4	0,00	0,00	0,00
9,50	11,15	89,13	10,87
6,35	17,70	96,47	3,53
4,76	16,86	95,84	4,16
3,38	16,26	94,10	5,90
2,38	8,28	92,45	7,55
1,70	3,86	92,55	7,45
1,20	3,72	91,10	8,90
0,84	3,49	89,99	10,01
0,60	2,70	88,33	11,67
0,50	1,77	88,73	11,27
0,30	3,41	84,60	15,40
0,21	2,66	83,09	16,91
0,00	8,15	73,47	26,53
Média da amostra		91,26	8,74

Apesar dos teores de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis mostrados pela figura 5.7(b) descreverem a alimentação, eles não são úteis para serem utilizados como

critérios de separação. Para isso, foi necessário normalizar os dados transformando-os em carvão e impurezas, constituintes passíveis de separação, utilizando as equações 5.1 e 5.2, cujos resultados estão descritos na figura 5.7(a) e na tabela V.2.

$$\text{Carvão}(\%) = \left(\frac{\text{teor de carbono fixo da amostra}}{\text{teor de carbono fixo de referência}} \right) * 100 \quad (5.1)$$

$$\text{Impureza}(\%) = 100 - \text{teor de cinzas de referência} \quad (5.2)$$

Em seguida, foram interpolados utilizando os modelos matemáticos de Rosin-Rammler, Gates-Gaudin-Schuhmann e Harris. Os parâmetros encontrados para cada modelo são apresentados na tabela V.3 abaixo. Observe que todos eles obtiveram uma ótima correlação com os resultados experimentais tanto para o carvão vegetal quanto para as impurezas (figura 5.7(a) e tabela V.3).

Tabela V.3 – Parâmetro dos modelos de distribuição de tamanho para as amostras, carvão e impurezas.

Amostra (carvão + impurezas)		Carvão		Impurezas	
Rosin-Rammler					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
m=	1,02	m=	1,12	m=	0,52
k=	5,34	k=	5,52	k=	2,91
R ² =	0,97	R ² =	0,98	R ² =	0,97
Gates-Gaudin-Schuhmann					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
m=	0,61	m=	0,65	m=	0,33
k=	13,44	k=	13,44	k=	13,44
R ² =	0,99	R ² =	0,99	R ² =	1,00
Harris					
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
s=	0,73	s=	0,70	s=	0,29
m=	1,28	m=	0,86	m=	0,89
k=	13,44	k=	10,48	k=	13,44
R ² =	0,99	R ² =	0,99	R ² =	1,00

5.4.1 – Peneiramento

Como descrito no item 4.3.2, o ensaio de peneiramento global foi obtido a partir da compilação dos resultados da distribuição granulométrica de todos os produtos gerados em cada teste de separação com o aeroclassificador (concentrado e rejeito). A figura 5.8 mostra a distribuição da amostra e de seus constituintes. Note que, enquanto o carvão vegetal se concentra mais nas faixas grossas, as impurezas estão distribuídas principalmente nas frações mais finas, sendo 25% abaixo de 0,21mm. Nesta mesma faixa granulométrica tem-se somente 8% do carvão.

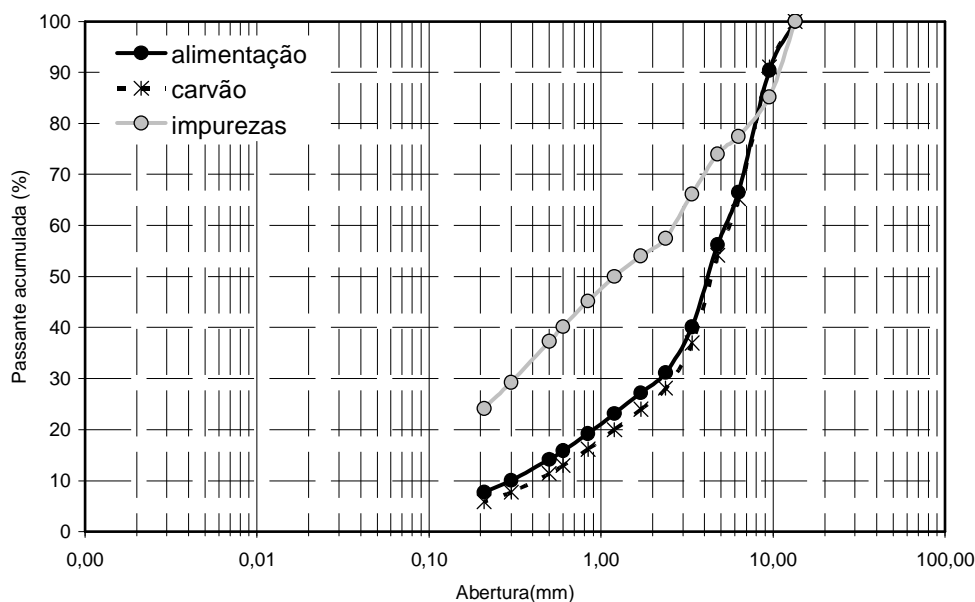


Figura 5.8 – Distribuição da amostra e de seus constituintes: carvão vegetal e impurezas.

Essa diferença na distribuição do carvão vegetal e das impurezas permitiu que o peneiramento pudesse ser utilizado como um processo de separação para a redução das impurezas presentes no carvão vegetal. A figura 5.9 mostra a relação teor de impureza x recuperação de carvão para a separação por peneiramento de uma amostra com 8,74% de contaminação, com destaque para a abertura da malha em que foi realizado o corte. Assim, caso se utilize uma peneira de malha 2,38mm, a redução das impurezas seria da ordem de 34% com uma perda de 27% de carvão vegetal.

O ponto de inflexão da curva da figura 5.9 nada mais é que o limite viável para a retirada das impurezas pelo processo de peneiramento (51,0%) para uma perda de 37% do carvão vegetal. A partir desse ponto, a quantidade de carvão vegetal que é

“perdida” é bem superior ao volume de impurezas removidas fazendo com que o produto gerado tenha teores mais elevados destas em comparação ao do material original (alimentação), ou seja, estaria contaminando o carvão vegetal a ser utilizado.

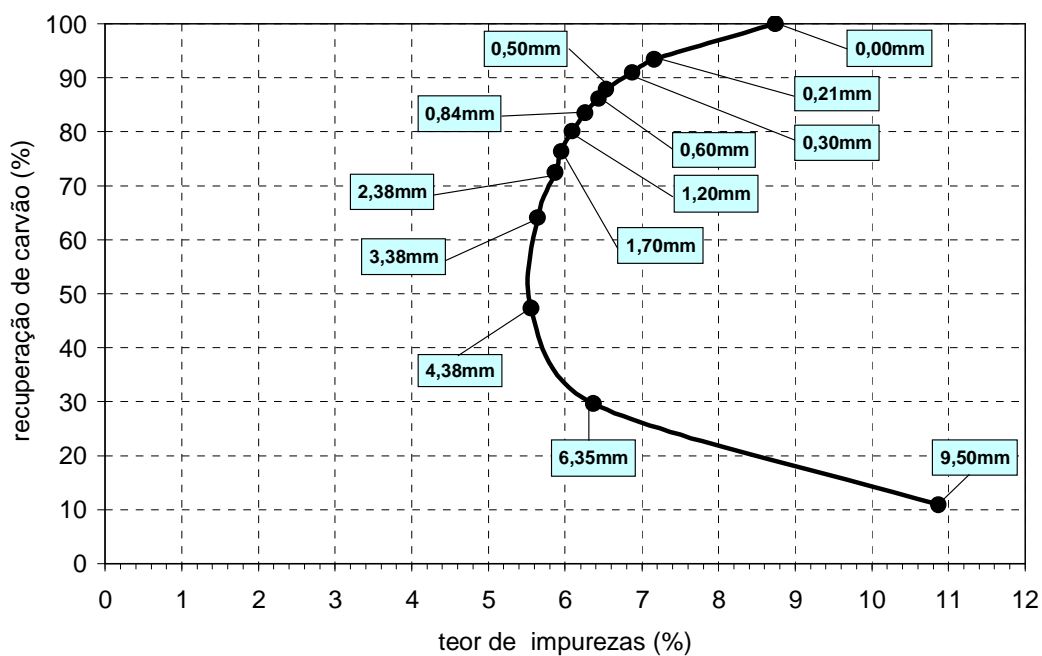
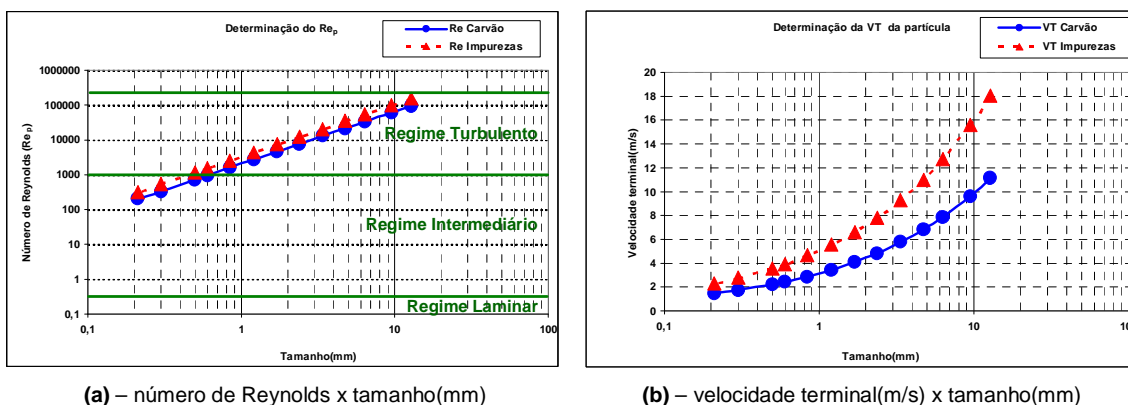


Figura 5.9 – Gráfico teor de impurezas x recuperação de carvão vegetal para o peneiramento.

5.4.2 – Aeroclassificador simples

Quando se aplicam os valores de densidade e viscosidade do ar a 20°C da tabela III.7 e as densidades relativas do carvão e das impurezas da tabela V.1 na equação 3.23, obtém-se um resultado de 2,62 para o critério de concentração (CC), indicando ser viável a utilização de processos de concentração gravítica na separação desses materiais, conforme proposto por Taggart (1945).

Sampaio e Tavares (2005), no entanto, afirmam que a elevada densidade das partículas em relação ao meio faz com que essa separação ocorra normalmente no regime turbulento. Para verificar essa afirmação, foram calculados os números de Reynolds (Re) e as velocidades terminais, mostrados na figura 5.10, em função do tamanho das partículas de carvão e das impurezas, a partir das equações 3.2 e 3.4. Nota-se que todos os resultados do número de Reynolds estão praticamente dentro dos limites do regime turbulento ($10^3 < Re_p < 2 \times 10^5$) e a velocidade terminal se eleva à medida que o tamanho das partículas aumenta. Por causa da maior densidade, as impurezas possuem velocidades maiores.

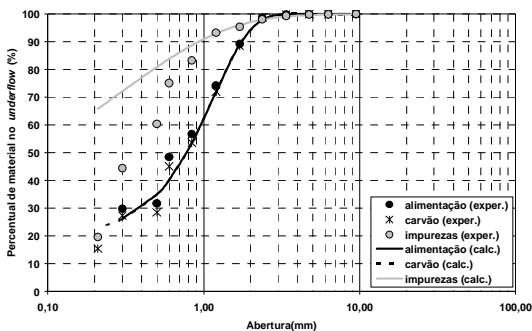


(a) – número de Reynolds x tamanho(mm)

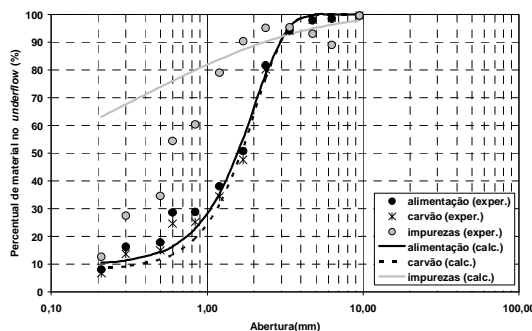
(b) – velocidade terminal(m/s) x tamanho(mm)

Figura 5.10 – Determinação do número de Reynolds e da velocidade terminal das partículas em função do tamanho.

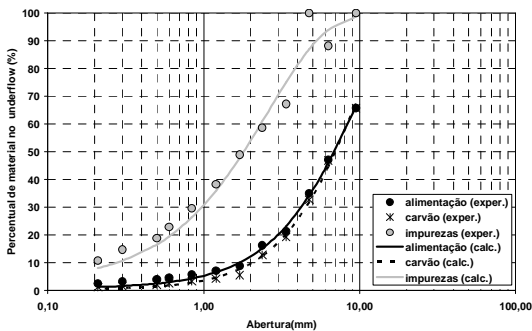
Para avaliar se a distância percorrida pela partícula poderia afetar sua velocidade terminal foram realizados testes no aeroclassificador, variando cinco vezes a distância (ou altura) com quatro vazões distintas para cada uma, totalizando 20 ensaios (na verdade foram 19 ensaios, pois o teste com “altura” de 1200mm e velocidade 21m/s não foi executado). As curvas resultantes são mostradas pelas figuras 5.11 a 5.15 a seguir:



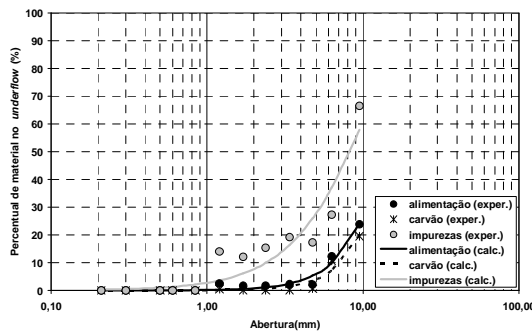
Teste "altura" 400mm – Velocidade do ar 13m/s



Teste "altura" 400mm – Velocidade do ar 16m/s

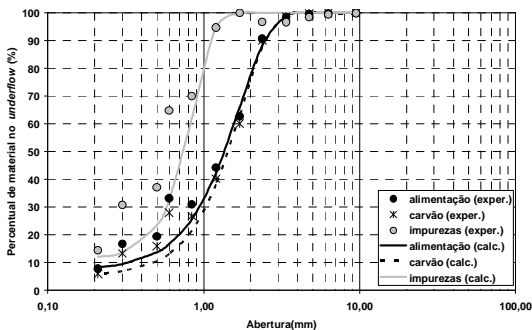


Teste "altura" 400mm – Velocidade do ar 18m/s

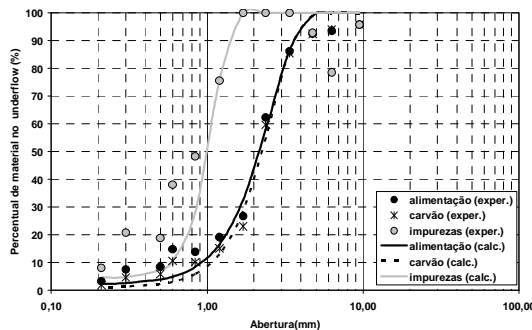


Teste "altura" 400mm – Velocidade do ar 21m/s

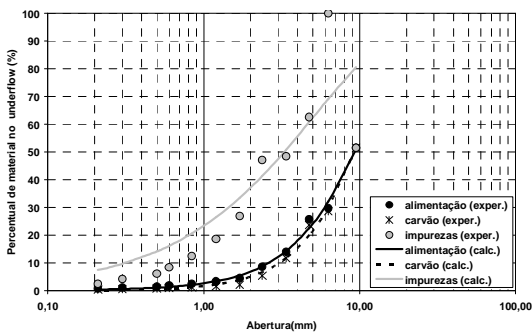
Figura 5.11 – Resultados da separação carvão X impureza no *underflow* do aeroclassificador - "altura": 400mm.



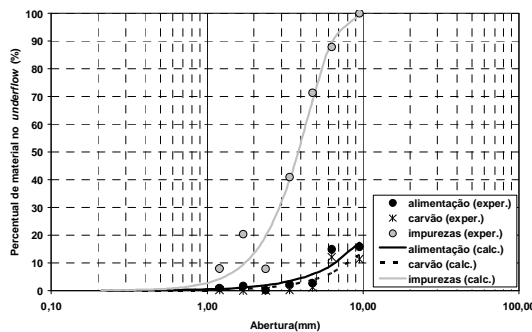
Teste Altura 800mm – Velocidade do ar 13m/s



Teste Altura 800mm – Velocidade do ar 16m/s

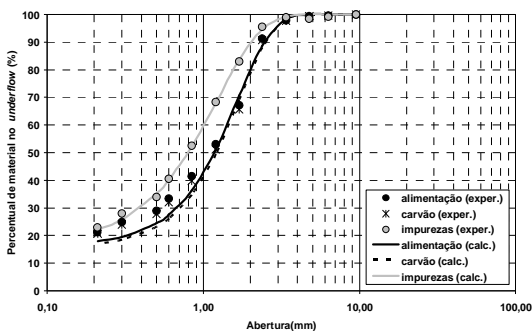


Teste "altura" 800mm – Velocidade do ar 18m/s

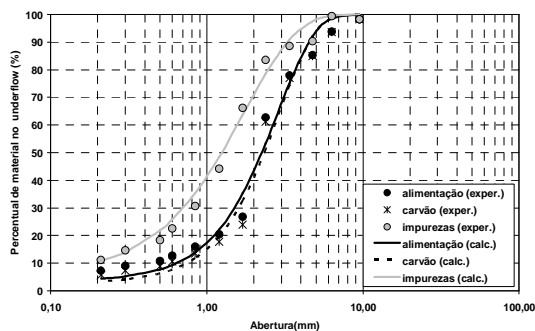


Teste "altura" 800mm – Velocidade do ar 21m/s

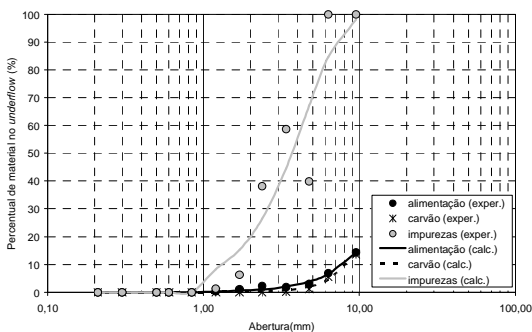
Figura 5.12 – Resultados da separação carvão x impureza no *underflow* do aeroclassificador - "altura": 800mm.



Teste "altura" 1200mm – Velocidade do ar 13m/s

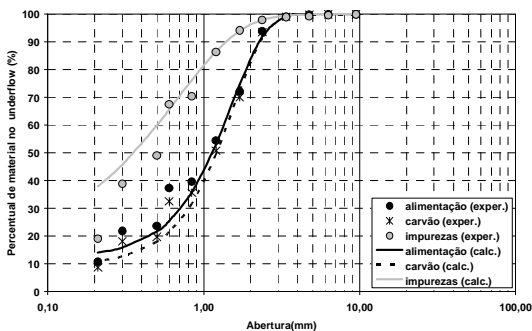


Teste "altura" 1200mm – Velocidade do ar 16m/s

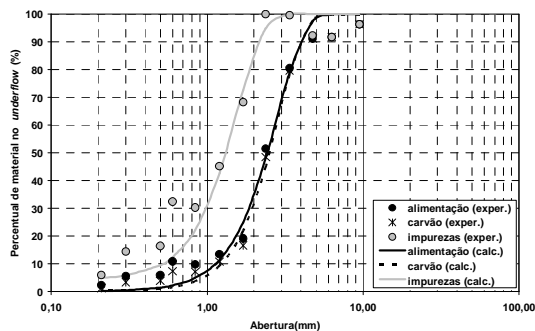


Teste "altura" 1200mm – Velocidade do ar 18m/s

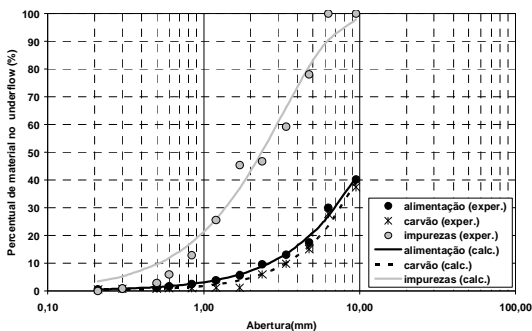
Figura 5.13 – Resultados da separação carvão X impureza no *underflow* do aeroclassificador - "altura": 1200mm.



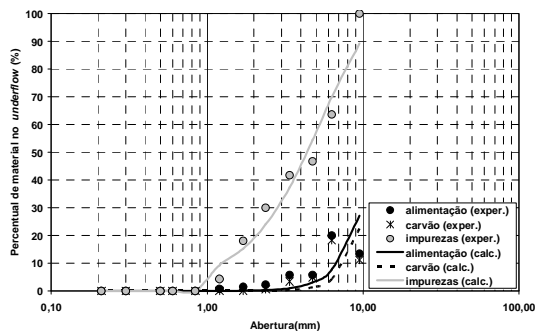
Teste "altura" 1600mm – Velocidade do ar 13m/s



Teste "altura" 1600mm – Velocidade do ar 16m/s

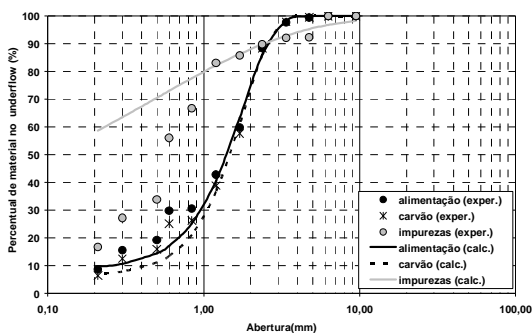


Teste "altura" 1600mm – Velocidade do ar 18m/s

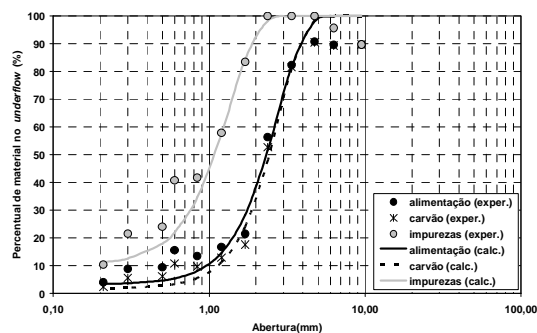


Teste "altura" 1600mm – Velocidade do ar 21m/s

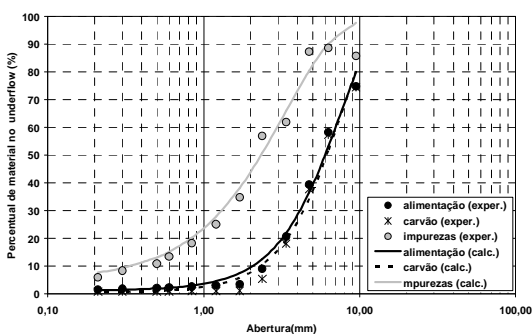
Figura 5.14 – Resultados da separação carvão X impureza no *underflow* do aeroclassificador - "altura": 1600mm.



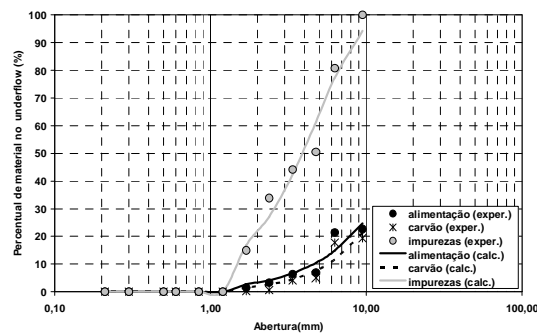
Teste “altura” 2400mm – Velocidade do ar 13m/s



Teste “altura” 2400mm – Velocidade do ar 16m/s



Teste “altura” 2400mm – Velocidade do ar 18m/s



Teste “altura” 2400mm – Velocidade do ar 21m/s

Figura 5.15 – Resultados da separação carvão X impureza no *underflow* do aeroclassificador - “altura”: 2400mm.

Quando se comparam os gráficos de mesma velocidade do fluido, variando apenas a “altura”, pode-se dizer que os comportamentos apresentados são semelhantes. Contudo, quando se varia a velocidade mantendo constante a “altura”, observam-se algumas diferenças significativas nos resultados. Para velocidades do fluido menores (aqui representada pela velocidade de 13m/s) a separação entre o carvão e as impurezas é mais crítica, devido à proximidade entre elas e também à ocorrência do chamado “curto circuito”, representado pela distância entre o início da curva e o eixo das abscissas. À medida que a velocidade do ar e a granulometria vão aumentando, as curvas vão se distanciando indicando ser mais fácil a separação nessas condições, porém para qualquer velocidade do fluido, a separação em granulometrias inferiores a 1mm é bastante complicada ou inviável. Finalmente, as curvas da alimentação sempre “acompanham” a curva do carvão como era esperado uma vez que a maior parte do material é composto de carvão (ver caracterização).

Ou seja, a distância entre a entrada da alimentação e a seção de entrada do fluido tem pouca influência nesse equipamento em termos de “linha de corte”. A variável de maior significância é a velocidade do fluido.

Esse fato foi também verificado e comprovado analisando os testes sob outro ângulo, o da recuperação de carvão em função do teor de impurezas. Independentemente da distância, a figura 5.16 mostra resultados semelhantes com recuperações de carvão próximas para uma determinada redução no teor das impurezas.

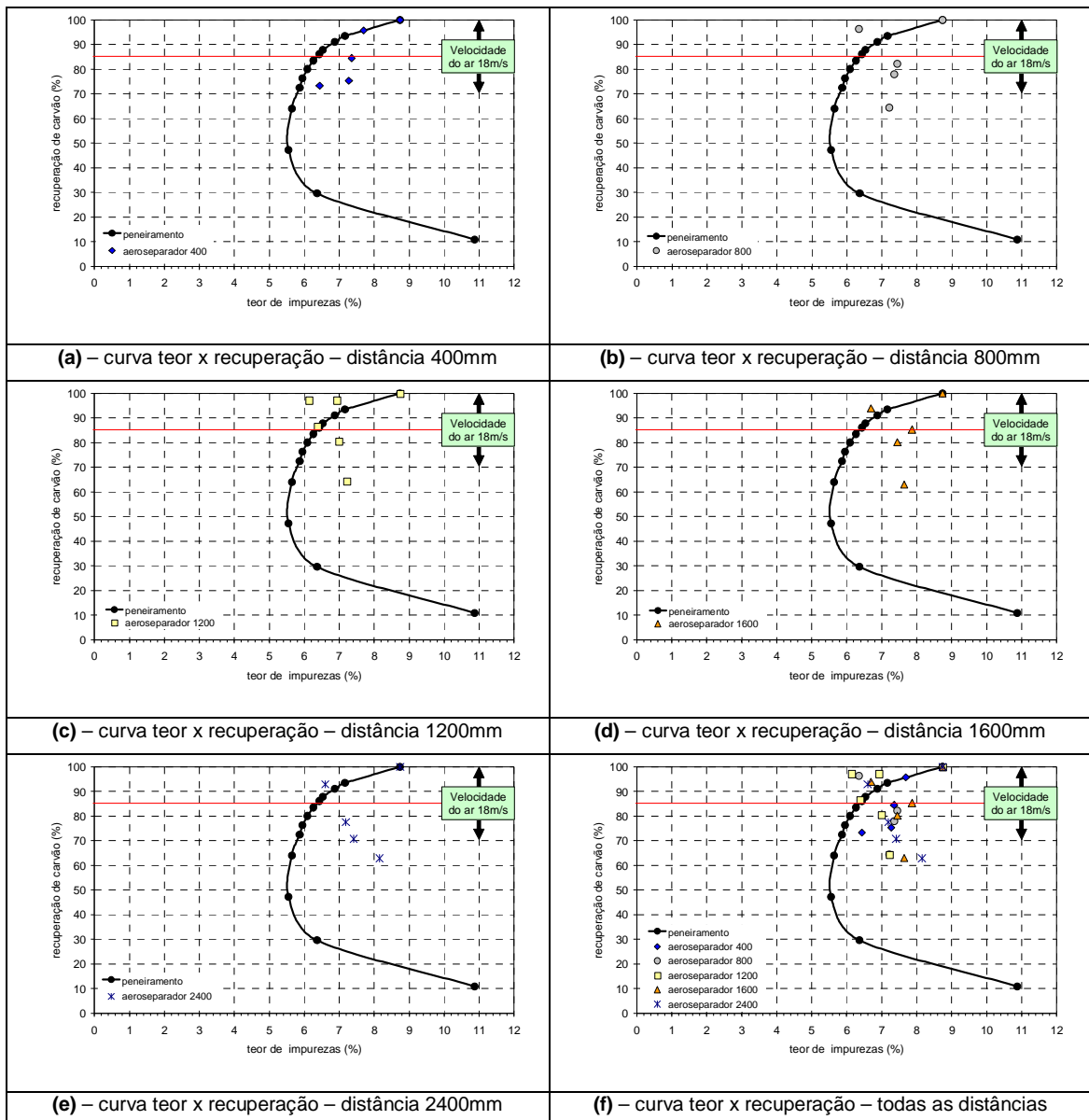


Figura 5.16 – Curvas teor de impurezas x recuperação de carvão em função da distância no aeroclassificador.

Pode ser também observado na figura 5.16 que os testes com pior desempenho, inferior inclusive ao do peneiramento, foram aqueles cuja velocidade do fluido foi menor (abaixo de 18m/s). Nesse caso, o comportamento das partículas pode ter se

assemelhado ao de uma partícula em queda livre onde ocorre a classificação por tamanho, conforme relatado por Carrisso e Correia (2004). Para esse objetivo a peneira é o equipamento mais adequado. Outra explicação está na forma das partículas. Segundo Sampaio e Tavares (2005), partículas leves com formato isométrico (impurezas finas) misturadas com partículas de formato irregular (carvão vegetal) tendem a se reportar ao produto denso quando a quantidade de ar (fluido) é insuficiente (baixa) para efetuar a fluidização das partículas mais grosseiras. Desse modo, partículas grossas e finas, densas e leves, coexistirão no *underflow* reduzindo a eficiência do equipamento.

Quando a velocidade do fluido se elevou (por exemplo, nesse experimento acima de 18m/s), os pontos ficaram próximos à curva do peneiramento ou até mesmo a ultrapassaram. Nessa situação, como houve um maior fluxo de partículas sendo carregadas para o *overflow*, o mecanismo de movimento dominante foi a sedimentação em queda impedida onde a densidade é a propriedade mais relevante ocorrendo a concentração do carvão.

A maior eficiência do aeroclassificador em separar as impurezas do carvão vegetal quando se utilizam velocidades do fluido mais elevadas também pode ser comprovada através da figura 5.17 que mostra a quantidade de material presente no *underflow* em função da velocidade do fluido para cada uma das distâncias (ou alturas) avaliadas. Vale lembrar que quanto mais afastadas estiverem essas curvas melhor será a separação e concentração desses materiais. Outro fato relevante está no ponto de interseção das curvas de carvão e impurezas que informam que abaixo desse ponto não é conveniente utilizar o *underflow* como rejeito, mas sim o *overflow*.

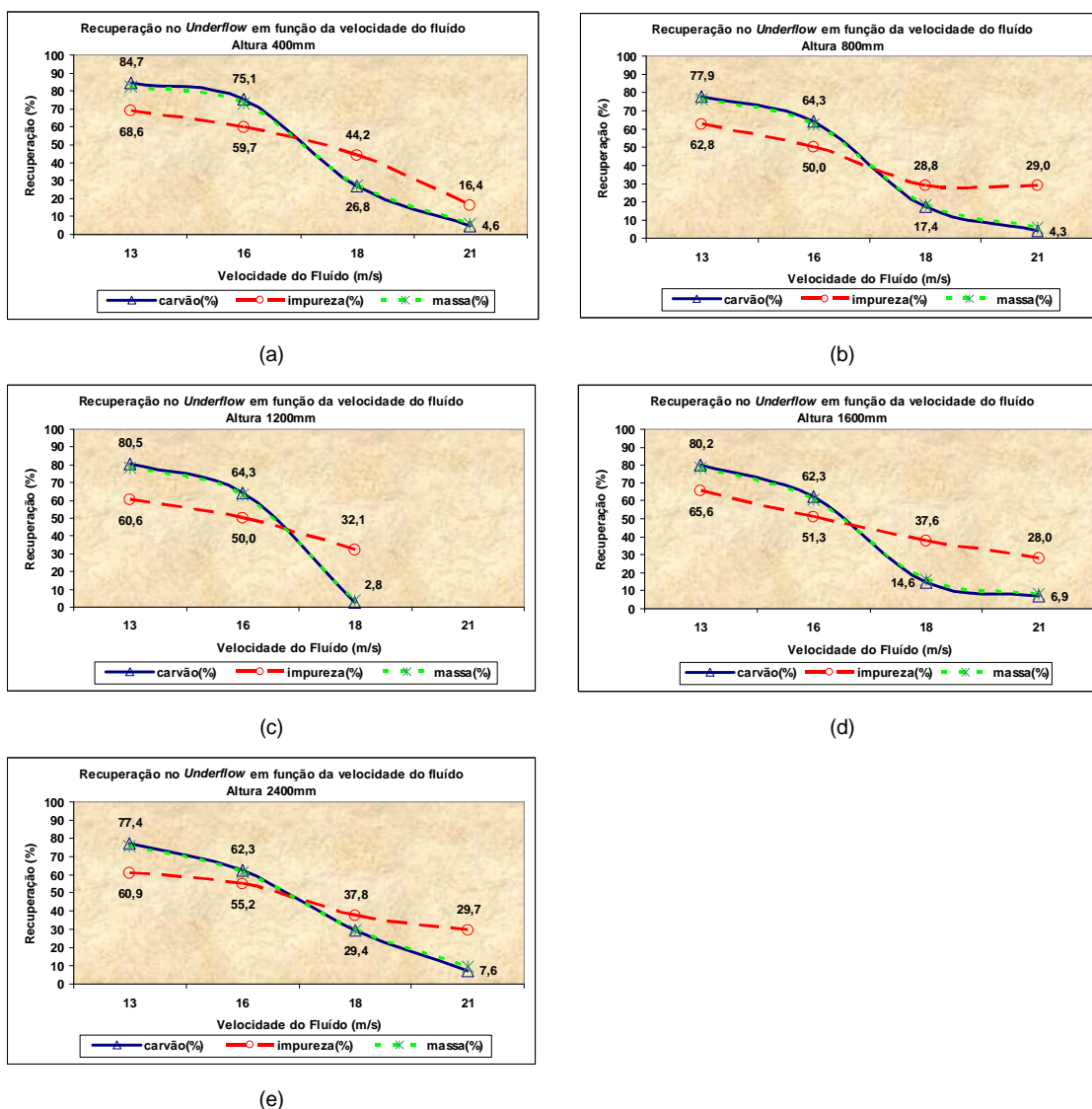


Figura 5.17 – Recuperação do carvão e impurezas no *underflow* em função da velocidade do fluido.

Em síntese, quando se utilizou o aeroclassificador em sua melhor condição operacional os resultados foram mais vantajosos do que os obtidos com o peneiramento: redução de 31% das impurezas com perda de 23% de carvão. De qualquer maneira, é importante ressaltar que todos os ensaios realizados até aqui pelo aeroclassificador foram feitos com amostras com faixa granulométrica de 0mm a aproximadamente 13mm. E, para aumentar a eficiência da separação gravítica a seco é recomendável que se trabalhe com faixas granulométricas mais estreitas a fim de potencializar o efeito da densidade e aumentar a “precisão do corte”. Baseado nessa premissa, algumas adaptações foram implementadas no aeroclassificador dando origem ao aeroclassificador modificado.

5.4.3 – Aeroclassificador modificado

Até agora, os resultados mostrados, tanto no aeroclassificador como no peneiramento, foram obtidos apenas com uma etapa de concentração (*rougher*). Contudo há possibilidade de se aumentar o teor e a recuperação trabalhando com material bitolado. Como primeira alternativa, a figura 5.18 mostra o aeroclassificador modificado com uma calha vibratória adaptada, com o objetivo de explorar o mecanismo de consolidação intersticial fazendo com que as partículas mais finas e densas, geralmente impurezas, se movimentassem entre os vazios (interstícios) das partículas maiores (normalmente o carvão vegetal) formando estratos ou camadas, conforme já ilustrado pela figura 3.31. Assim as camadas inferiores compostas basicamente de impurezas e partículas muito finas de carvão vegetal seriam conduzidas para o *underflow* e não seriam sugadas pelo ar uma vez que também estariam protegidas por camadas de carvão de maior granulometria. Ou seja, foi feita uma segregação do material separando-o em faixas granulométricas mais estreitas. Com isso, os resultados experimentais do aeroclassificador modificado – redução de 37% da impurezas com uma perda de 10% de carvão – foram superiores aos obtidos com os métodos apresentados até agora (peneiramento e aeroclassificador simples).

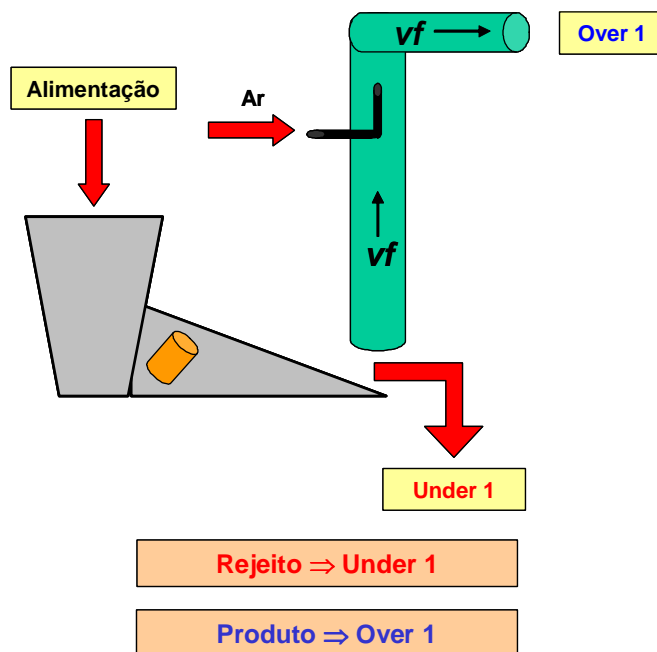


Figura 5.18 – Aeroclassificador modificado.

Analisando o produto **over 1** do aeroclassificador modificado verificou-se que ele continha ainda muitas partículas de impurezas, porém de tamanho menor do que o do carvão, sugerindo uma “limpeza” via peneiramento, conforme ilustrado na figura 5.19. Outra opção avaliada foi a de submeter esse material a uma segunda etapa de concentração denominada etapa *cleaner*, segundo Valadão et al (2000) em tratamento de minérios, mostrada esquematicamente pela figura 5.20.

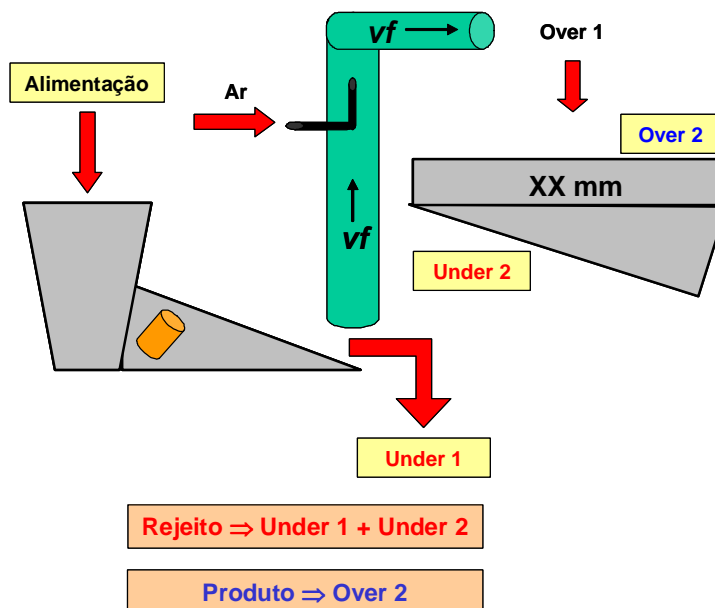


Figura 5.19 – Aeroclassificador modificado + peneiramento.

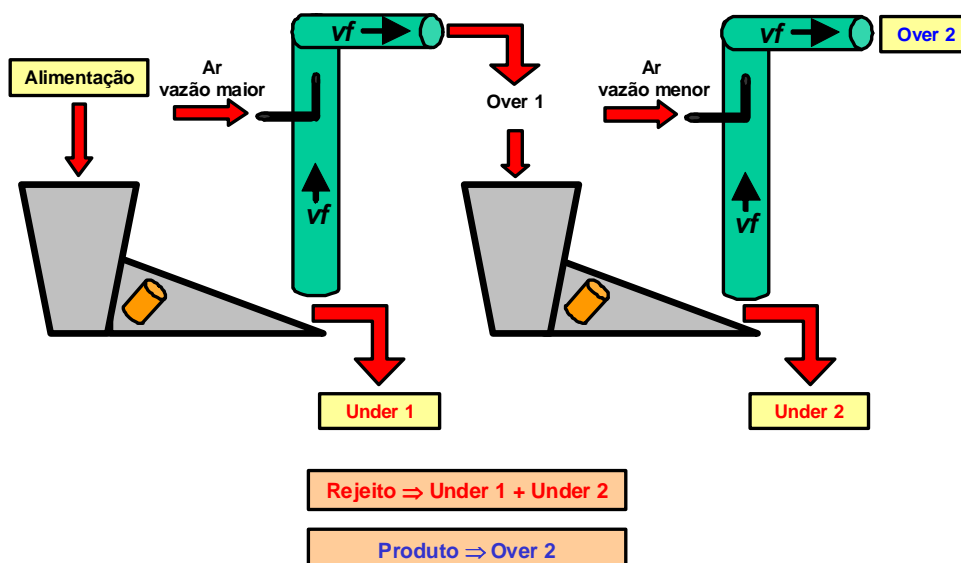


Figura 5.20 – Aeroclassificador modificado + peneiramento.

Os produtos oriundos dessas configurações apresentaram os teores de impurezas mais baixos (entre 2% e 3% respectivamente) sinalizando uma maior remoção destas, porém às custas de uma menor recuperação do carvão da ordem de 77%.

Na tentativa de se aumentar essa recuperação do carvão, foi realizado um último experimento interagindo todas as técnicas de separação avaliadas até agora, conforme apresentado pelas figuras 5.21 e 5.22.

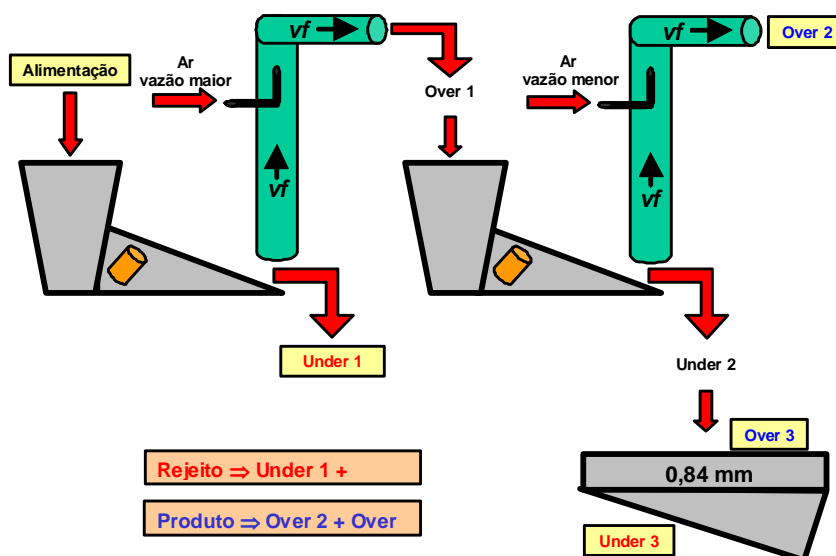


Figura 5.21 – Aeroclassificador modificado (2 etapas) + peneiramento (corte 0,84mm).

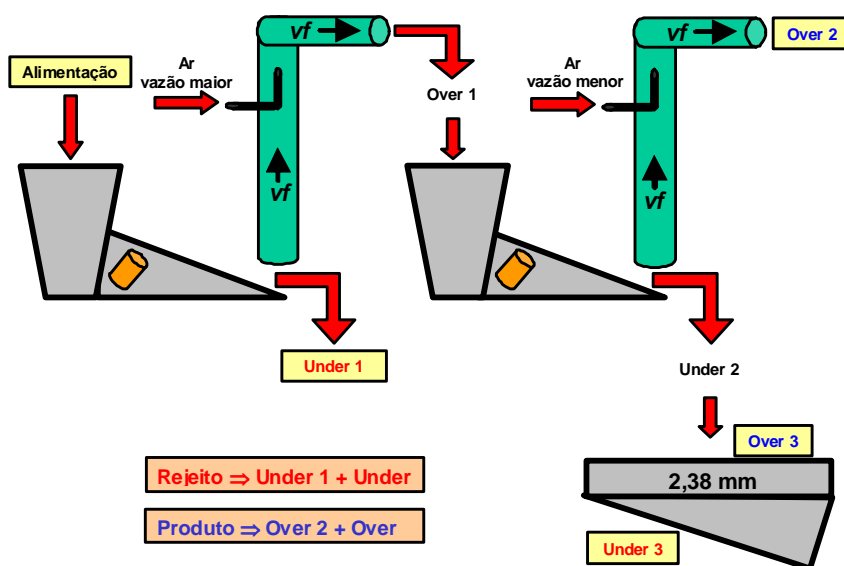


Figura 5.22 – Aeroclassificador modificado (2 etapas) + peneiramento (corte 2,38mm).

Os resultados foram os melhores entre todas as soluções apresentadas, conseguindo eliminar uma elevada quantidade de impurezas (de 41% a 60%) sem perder muito carvão (máximo 14%). De uma forma simplificada, essa nova combinação explorou os diversos mecanismos de movimento de uma maneira adequada potencializando o ganho final. O circuito da figura 5.21 conseguiu reduzir em 60% o teor de impurezas, contra 41% de seu par, ilustrado pela figura 5.22. Apesar da aparente inferioridade, esse último foi o que obteve o melhor desempenho, pois além da significativa remoção das impurezas (41% é considerado um ótimo resultado), a perda de carvão vegetal foi a menor (apenas 5%). Além disso, em termos industriais, o peneiramento de frações granulométricas inferiores a 1,0mm é bem mais complexo e ineficiente, podendo comprometer os resultados práticos.

Todos os resultados experimentais desde o peneiramento até a configuração final do aeroclassificador são mostrados pela figura 5.23 abaixo, obtendo assim uma visão global da evolução dos testes. Dessa forma, pode-se concluir que, a separação das impurezas do carvão vegetal se tornou muito mais efetiva utilizando o aeroclassificador modificado associado ao peneiramento com uma malha de abertura maior, devido à sua melhor performance, principalmente associada a maior recuperação do carvão.

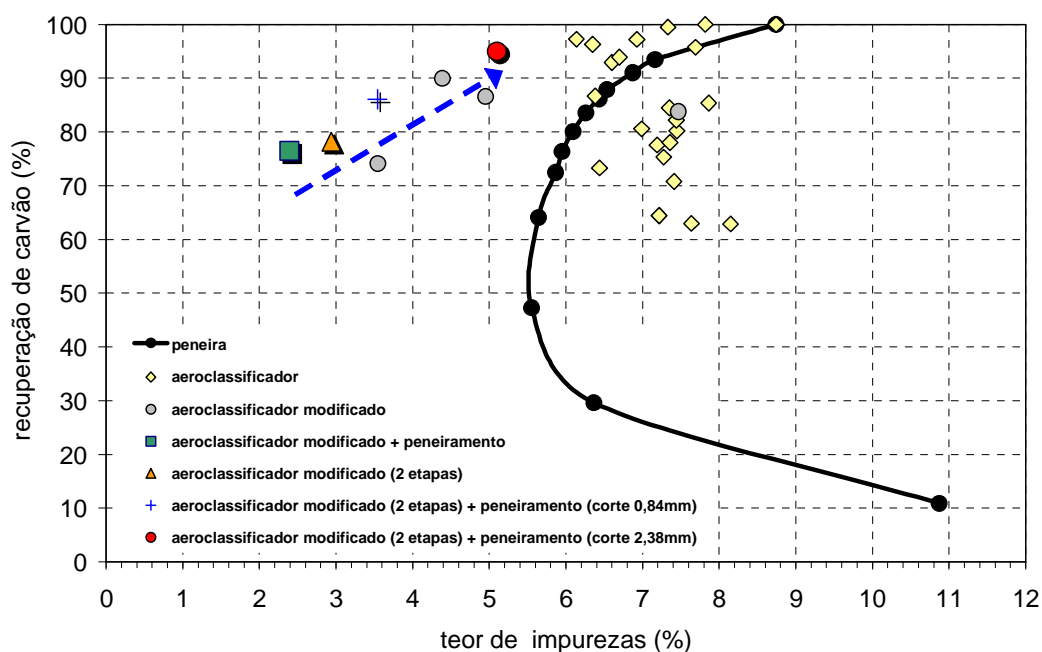


Figura 5.23 – Curva teor de impurezas x recuperação de carvão para os diversos sistemas de separação avaliados.

6 - CONCLUSÕES

O circuito composto pelo aeroclassificador modificado associado à peneira vibratória foi o que melhor atendeu ao objetivo proposto que era o de “*reduzir o teor de cinzas dos finos de carvão vegetal através da segregação e eliminação parcial ou total das impurezas presentes neste material a partir da concentração gravítica a seco e do peneiramento*”, apresentando resultados da ordem de 41% de redução das impurezas recuperando 95% do carvão vegetal.

Essa separação mais efetiva só foi possível porque nesse circuito foram exploradas, de maneira progressiva e criteriosa, todas as propriedades diferenciadoras identificadas na etapa de caracterização: tamanho, forma e densidade aliadas a uma correta combinação dos mecanismos de movimento.

Todavia, é importante elucidar que, para se atingir esse estágio, foram efetuados ensaios para se determinar qual a melhor configuração do aeroclassificador simples cujos resultados mostraram que este equipamento deve operar com velocidades de fluido mais elevadas, acima de 18m/s no modelo avaliado, para ter um desempenho satisfatório, superior ao do peneiramento que, para eliminar 34% das impurezas presentes perdeu aproximadamente um quarto do carvão (27%). Caso contrário, atuará na região onde predomina a classificação por tamanho, que é a especialidade do peneiramento. Nas velocidades do fluido maiores, a densidade do material passa a ser mais relevante do que o tamanho da partícula, que é uma característica vantajosa para a separação do binômio carvão vegetal – impurezas. Além disso, verificou-se que a capacidade de “limpeza” do peneiramento ficou limitada em 51% para uma perda de 37% de carvão. Acima desse valor, qualquer tentativa de retirar mais contaminantes seria superada pela maior perda de carvão elevando o teor do produto para valores superiores ao da alimentação.

Em seguida, utilizando o aeroclassificador modificado que, por causa do fenômeno da consolidação intersticial, fez com que as partículas se dispusessem em estratos ou camadas de acordo com sua densidade e tamanho, promovendo uma pré-separação e facilitando o arraste preferencial das partículas de carvão, aumentando ainda mais a redução das impurezas (37%) com uma perda de 10% de carvão vegetal. Ao incluir

uma etapa de limpeza (*cleaner*) aos produtos intermediários do aeroclassificador modificado e associando ao peneiramento, obteve-se o circuito final já mencionado.

Em suma, a melhor alternativa para separar as impurezas do carvão vegetal é aproveitar a simbiose existente entre o peneiramento e o aeroclassificador modificado.

7 - RECOMENDAÇÕES

1. Considerando que esse trabalho foi baseado em um equipamento em escala de bancada, seria interessante repetir os estudos em um sistema contendo um aeroclassificador modificado (2 etapas) + peneiramento de maior porte (escala piloto) com mais recursos tecnológicos a fim de permitir simulações mais próximas da realidade industrial (com amostras maiores).
2. Como todo o material utilizado estava praticamente seco, seria importante efetuar testes com finos de carvão vegetal de diferentes teores de umidade com o objetivo de avaliar a interferência desse parâmetro de qualidade no desempenho do equipamento e na eficiência de separação.
3. Devido a existência na VMB de um fino de carvão abaixo de 2mm, contaminado (rejeito da Unidade de Peneiramento de Carvão – UPC) que atualmente é disponibilizado para comercialização, seria interessante a realização de testes com esse material bitolado com o objetivo de aumentar a recuperação do carvão. Vale lembrar, entretanto, que o estudo mostrou que quanto menor for a faixa granulométrica, mais complicada é a separação.
4. Efetuar um estudo mais aprofundado de caracterização das impurezas presentes no carvão vegetal incluindo não só sua análise química como também a análise morfológica e a determinação da densidade aparente para um número maior de impurezas e em quantidade mais elevada.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. 1986. *NBR8112: Carvão Vegetal – Análise Imediata*. Rio de Janeiro. Outubro/06. 5 pp.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. 1985. *NBR9165: Carvão Vegetal – Determinação da Densidade Relativa Aparente, Relativa Verdadeira e Porosidade*. Rio de Janeiro. Dezembro/85. 8 pp.

ABRAHAM, F. F. 1970. *Function Dependence of Drag Coefficient of a Sphere on Reynolds Number*, The Physics of Fluids, volume 13, p. 2194-2194.

ALMENDRA, E.R. 1979. Velocidade de Sedimentação de Sistemas Particulados. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro.

AMS – Associação Mineira de Silvicultura. 2005. *Estudos Setoriais / Carvão Vegetal*, Site.

ASSIS, P. S.; MARINHO, L. Z. A.; PORTO, F. M. 1982. *Utilização do Carvão Vegetal na Siderurgia*. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Série Publicações Técnicas. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, volume 2, p. 281-318.

BRAGA, R. N. B.; GONÇALVES, H. T.; QUINTÃO, M. A.; ASSIS, P. A. 2003. *Aspectos Tecnológicos Referentes à Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos*. Curso ABM de Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos, 26 pp.

BRIANE, D.; DOAT, J. 1985. *Guide Technique de la Carbonization*. Aix-en-Provence, Edisud, 180 pp.

BRITO, J. O. 1990. *Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira*, Documentos Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, 14 pp.

BURT, R. 1984. *Gravity Concentration Technology*, Elsevier, Amsterdam.

CARRISSO, R. C. C.; CORREIA, J. C. G. 2004. *Classificação e Peneiramento*. Rio de Janeiro: Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral CETEM, 4ª edição revisada, capítulo 5, p. 195-238.

CASTRO, L. F. A.; TAVARES, R. P.; ASSIS, P. A. 2003. *Aspectos Termodinâmicos e Cinéticos da Injeção de Carvão e Outros Materiais Pulverizados no Alto-Forno*. Curso ABM de Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos, 44 pp.

CETEC/MG – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. 1982. *Manual de Construção e Operação de Fornos de Carbonização*, Série de Publicações Técnicas 007, 55 pp.

CHAVES, A. P. 2002. *Classificação*. São Paulo: Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, 2ª edição, capítulo 3, volume 1, p. 163-248.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. 2003. *Peneiramento*. São Paulo: Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, 2ª edição, capítulo 10, volume 3, p. 511-562.

CONCHA, F.; BARRIENTOS. 1986. *Settling Velocities of Particulate Systems. 4. Settling of Nonspherical Isometric Particles*, International Journal of Mineral Processing, volume 18, p. 297-308.

DOAT, J.; PETROF, G. 1975. *La Carbonization des Bois Tropicaux*. Bois et Forêts des Tropiques, Nogent sur Marne (159), p. 55-64.

GAUDIN, A. M. 1939. *Principles of Mineral Dressing*, Mc-Graw Hill, New York.

GEIGER, G. H.; POIRIER, D. R. 1973. *Transport Phenomena in Metallurgy*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 616 pp.

GOMES, P. A. 1994. *Influência de Variáveis de Processo no Rendimento do Carvão Vegetal*. Relatório Final do Projeto, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC, 55 pp.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. 1980. *Teoria da Carbonização da Madeira*. Série Publicações Técnicas. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, volume 1, p. 29-41.

JORDAN, C. E.; SULLIVAN, G. V.; DAVIS, B. E. 1980. *Pneumatic Concentration of Mica*. Relatório de Investigação RI8457, U.S. Bureau of Mines, 24 pp.

LINS, F. A. F. 2004. *Concentração Gravítica*. Rio de Janeiro: Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral CETEM, 4ª edição revisada, capítulo 6, p. 239-268.

MEIRA, A. M. 2002. *Diagnóstico Sócio-Ambiental e Tecnológico da Produção de Carvão Vegetal no Município de Pedra Bela, Estado de São Paulo*, Dissertação apresentada para o exame de Qualificação em Recursos Florestais, opção em Tecnologia de Produtos Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, 105 pp.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. 1982. *Propriedades e Controle de Qualidade do Carvão Vegetal*. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Série Publicações Técnicas. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, volume 2, p. 77-89.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C. L.; ALCOVER NETO, A. 2004. *Caracterização Tecnológica de Minérios*. Rio de Janeiro: Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral CETEM, 4ª edição revisada, capítulo 2, p. 53-109.

OBLAD, A. E.; OLIVEIRA, A. C. J.; IMENES, C. L.; CARVALHO SOBRINHO, J. A.; BERALDO, J. L.; ZIESEMER, L.; SHIMABUKURO, N. T.; EITLER, V. E.; LENS, V. H.; TORRES, W. F. 1980. *Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*. Recife, Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco – IFEP, Capítulo 1, p. 17-111.

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M. G. GOMES, P. A. 1982. *A Produção de Carvão Vegetal – Aspectos Técnicos*. Produção e Utilização de Carvão Vegetal, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC, p. 54-74.

OLIVEIRA, L. T.; ALMEIDA, M. R. 1980 (I). *Aplicação de Carvão Vegetal*. Uso da Madeira para Fins Energéticos, Série Publicações Técnicas. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, volume 1, p. 45-53.

OLIVEIRA, L. T.; ALMEIDA, M. R. 1980 (II). *Controle de Qualidade de Carvão Vegetal*. Curso de Carvão e Coque Aplicados à Metalurgia da ABM, volume 1, p. 167-208.

PENEDO, W. R. 1980. *Madeira, Carvão e Gusa*. Uso da Madeira para Fins Energéticos. Série Publicações Técnicas. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, volume 1, p. 115-142.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; 1984. *Perry's Chemical Engineering Handbook*. 6ª edição, McGraw-Hill, New York.

RAAD, T. J. 2004. *Simulação do Processo de Secagem e Carbonização do Eucalyptus Spp*, Tese de Doutorado apresentada no Curso de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 114 pp.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. 2005. *Beneficiamento Gravimétrico*. Porto Alegre, 1ª edição, 603 pp.

SBRT - Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas do Ministério da Ciência e Tecnologia. 2005.

SCHULZ, N. F. 1970. *Bougainville Copper*, Engineering and Mining Journal, 247 (March) 56.

SHAPIRO, M.; GALPERIN, V. 2004. *Air Classification of Solid Particles: a Review*. Israel: Chemical Engineering and Processing, v 44, p. 279-285.

SILVEIRA, R. C.; CAMPOS, V. F. 1976. *Utilização de Finos de Carvão Vegetal*. Fundação João Pinheiro, v 6, p. 2-9.

SOUZA V. C; SAMPAIO, C. H; TAVARES, L. M. M. 2004. *Influência da Abertura do Exaustor, Umidade e Rotação no Desempenho de Separador Dinâmico a Ar*. Florianópolis. XX ENTMME.

TAGGART, A. F. 1945. Handbook of Mineral Dressing, John Wiley and Sons.

TAVARES, R. P. 2002. Fenômenos de Transporte. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 336 pp.

VALADÃO, G. E. S.; GALÉRY, R.; PERES, A. E. C.. 2000. *Tratamento de Minérios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 226 pp.

9 – ANEXOS

9.1 – Metodologia para determinação densidade aparente do carvão vegetal e das impurezas

Para se determinar a densidade aparente das partículas de carvão vegetal e das impurezas, foi utilizado como referência a norma NBR9165 de dez/05 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Como referência porque, segundo a norma, o carvão a ser avaliado deveria estar na faixa granulométrica compreendida entre 19mm e 25mm, o que não é o caso, pois esse estudo se baseia na separação das impurezas dos finos de carvão vegetal, geralmente abaixo de 10mm. E por falar em impurezas, a NBR 9165 não faz nenhuma menção sobre elas. Apesar disso, o princípio da norma foi mantido, conforme mostrado pela figura 9.1 e a equação 9.1 a seguir.

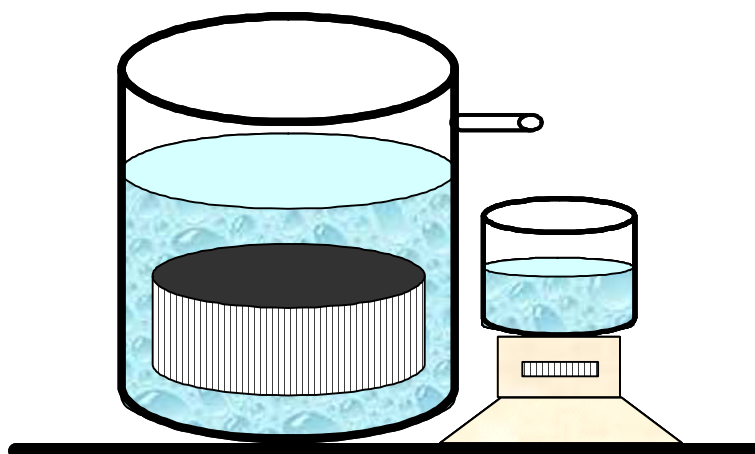


Figura 9.1 – Dispositivo para determinação da densidade aparente do carvão vegetal e das impurezas.

$$DA = \frac{m_1}{m_2 + (m_3 - m_1)} \quad (9.1)$$

onde:

DA = densidade aparente da partícula (kg/m^3) m_2 = massa da água deslocada (kg)
 m_1 = massa do carvão seco (kg) m_3 = massa do carvão úmido (kg)

Os resultados, apresentados na tabela V.1, mostraram o carvão com densidade aparente média de $261 \text{ kg}/\text{m}^3$ e a impureza com $532 \text{ kg}/\text{m}^3$.

9.2 – Metodologia para determinação da forma do carvão vegetal e das impurezas

A forma do carvão e das impurezas foi determinada através de análise estatística dos resultados da observação do formato e medição de seus parâmetros dimensionais a partir da seleção aleatória de 50 partículas nas faixas granulométricas de 9,50mm, 6,35mm e 4,38mm, utilizando um paquímetro como instrumento medidor. As demais faixas granulométricas assumiram a mesma distribuição encontradas nas faixas anteriores. A forma das partículas é de extrema importância na determinação da velocidade terminal (através do conceito de esfericidade) e, por consequência, do regime de escoamento.

Apesar do carvão ser considerado irregular (e realmente o é), nesse estudo, os resultados apresentados pela tabela IX.1 a seguir, mostraram um carvão de formato aproximadamente lamelar (ou chapinha), cuja relação entre as dimensões é ilustrada pela figura 9.2. Vale ressaltar que os resultados aqui encontrados foram baseados em uma amostragem e pode variar de lote para lote.

Já no caso das impurezas, a maioria das partículas avaliadas apresentaram forma isométrica aproximadamente esférica, que determinou sua esfericidade por volta de 0,95. Não foram realizadas medições sistemáticas da mesma maneira que o carvão.

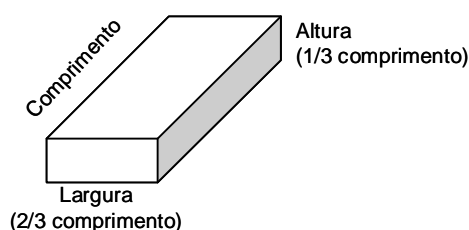


Figura 9.2 – Formato e relação entre as dimensões da partícula de carvão vegetal.

Tabela IX.1 – Resultados da medição da altura, largura e comprimento das partículas de carvão vegetal por faixa granulométrica.

Partícula	Carvão (Formato lamelar)								
	9,50mm			6,35mm			4,76mm		
	Altura	Largura	Comprimento	Altura	Largura	Comprimento	Altura	Largura	Comprimento
1	6	12	22	5	8	35	4	7	12
2	7	9	31	5	10	38	3	8	17
3	10	12	20	5	12	24	4	7	20
4	13	22	27	7	10	20	2	6	26
5	4	11	22	3	9	21	4	7	17
6	10	16	27	4	7	21	5	7	18
7	13	20	35	6	11	14	6	7	14
8	10	13	25	4	10	15	4	6	25
9	14	22	33	5	8	21	5	7	28
10	8	12	48	7	12	18	4	5	20
11	7	10	31	9	11	16	3	7	16
12	9	15	18	6	10	32	3	7	20
13	12	21	25	8	9	19	2	8	22
14	9	10	23	6	8	12	3	6	17
15	8	10	26	3	8	20	4	6	17
16	6	11	21	8	9	23	3	6	20
17	6	10	19	3	8	20	4	6	10
18	9	12	17	3	10	18	4	6	22
19	9	10	40	8	9	25	4	6	15
20	5	12	22	3	8	18	3	7	17
21	4	11	19	7	7	14	3	9	17
22	11	17	18	5	9	13	6	6	11
23	6	8	43	6	8	20	2	8	16
24	14	20	29	6	8	19	4	8	14
25	6	10	26	6	7	14	2	7	21
26	12	12	26	4	9	27	3	6	16
27	3	9	37	4	11	28	2	10	21
28	7	9	21	6	9	13	2	6	25
29	7	10	23	6	9	16	3	10	18
30	8	11	20	7	9	21	5	7	12
31	7	12	26	4	8	23	8	10	11
32	7	11	26	7	9	15	3	6	25
33	8	12	22	2	13	21	5	7	25
34	12	11	24	8	8	12	3	5	17
35	5	8	25	5	10	20	3	5	16
36	9	10	22	6	9	17	3	7	21
37	7	10	23	3	11	19	4	8	11
38	4	9	23	7	8	17	3	6	24
39	6	10	21	7	11	12	8	8	15
40	16	14	35	7	7	19	4	9	24
41	5	9	27	7	10	21	3	8	14
42	7	10	26	2	10	23	5	7	19
43	4	8	23	8	8	30	5	6	15
44	14	16	17	7	9	21	3	5	16
45	8	9	19	7	8	14	7	9	21
46	8	8	21	5	9	16	3	6	14
47	8	10	22	7	7	17	3	6	12
48	8	9	19	8	11	14	7	7	14
49	7	9	25	8	10	22	4	9	19
50	5	9	24	3	9	21	5	7	15
média	8,2	11,8	25,3	5,7	9,2	19,8	3,9	7,0	17,8
desvio-padrão	3,0	3,7	6,6	1,8	1,4	5,7	1,5	1,3	4,5

	alt. / compr.	larg / compr.
<i>média</i>	<i>0,30</i>	<i>0,50</i>

9.3 – Partição em massa e distribuição granulométrica dos testes do aeroclassificador

Tabela IX.2 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 400mm e velocidade do ar de 13m/s.

Underflow:		82,33		Overflow:		17,67	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	12,20	19,89	80,11	9,50	0,00	19,89	80,11
6,30	17,63	97,81	2,19	6,30	0,00	44,19	55,81
4,76	23,67	96,14	3,86	4,76	0,01	62,05	37,95
3,38	21,00	95,86	4,14	3,38	0,11	78,81	21,19
2,38	10,32	92,79	7,21	2,38	0,65	90,29	9,71
1,70	3,61	89,60	10,40	1,70	2,04	95,91	4,09
1,20	2,88	87,12	12,88	1,20	4,66	97,32	2,68
0,84	2,24	84,65	15,35	0,84	7,95	95,99	4,01
0,60	1,59	82,30	17,70	0,60	7,88	94,48	5,52
0,50	0,70	80,57	19,43	0,50	7,00	94,11	5,89
0,30	1,47	78,50	21,50	0,30	16,15	88,58	11,42
0,21	0,71	75,82	24,18	0,21	17,08	80,77	19,23
0,00	1,98	68,71	31,29	0,00	36,46	70,82	29,18
total	100,00	84,70	15,30	total	100,00	82,76	17,24

Tabela IX.3 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 400mm e velocidade do ar de 16m/s.

Underflow:		67,34		Overflow:		32,66	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	12,43	48,22	51,78	9,50	0,08	48,22	51,78
6,30	17,44	96,74	3,26	6,30	0,50	71,40	28,60
4,76	23,60	95,51	4,49	4,76	1,05	84,61	15,39
3,38	22,30	91,14	8,86	3,38	2,75	93,06	6,94
2,38	10,91	89,25	10,75	2,38	5,04	97,64	2,36
1,70	3,52	86,99	13,01	1,70	7,03	98,59	1,41
1,20	2,70	82,73	17,27	1,20	9,07	97,19	2,81
0,84	2,02	78,56	21,44	0,84	10,30	94,33	5,67
0,60	1,39	74,67	25,33	0,60	7,13	91,53	8,47
0,50	0,59	71,84	28,16	0,50	5,60	88,52	11,48
0,30	1,20	68,53	31,47	0,30	12,75	83,93	16,07
0,21	0,55	64,31	35,69	0,21	12,89	78,40	21,60
0,00	1,35	54,70	45,30	0,00	25,80	68,03	31,97
total	100,00	85,72	14,28	total	100,00	84,08	15,92

Tabela IX.4 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 400mm e velocidade do ar de 18m/s.

Underflow:		28,58		Overflow:		71,42	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	25,97	100,00	0,00	9,50	5,41	100,00	0,00
6,30	29,25	98,85	1,15	6,30	13,13	99,86	0,14
4,76	24,00	90,41	9,59	4,76	17,89	100,00	0,00
3,38	12,95	85,95	14,05	3,38	19,02	98,14	1,86
2,38	4,61	72,68	27,32	2,38	9,52	96,27	3,73
1,70	0,86	57,49	42,51	1,70	3,57	95,71	4,29
1,20	0,65	53,84	46,16	1,20	3,40	94,27	5,73
0,84	0,48	50,36	49,64	0,84	3,17	92,79	7,21
0,60	0,33	47,17	52,83	0,60	2,71	91,32	8,68
0,50	0,14	44,88	55,12	0,50	1,36	90,23	9,77
0,30	0,29	42,23	57,77	0,30	3,44	88,82	11,18
0,21	0,13	38,89	61,11	0,21	2,09	87,05	12,95
0,00	0,33	31,40	68,60	0,00	15,30	77,33	22,67
total	100,00	92,65	7,35	total	100,00	84,21	5,79

Tabela IX.5 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 400mm e velocidade do ar de 21m/s.

Underflow:		5,88		Overflow:		94,12	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	44,06	74,35	25,65	9,50	8,79	95,97	4,03
6,30	37,77	77,92	22,08	6,30	16,78	91,71	8,29
4,76	7,42	22,96	77,04	4,76	21,47	92,05	7,95
3,38	6,31	4,71	95,29	3,38	17,90	91,12	8,88
2,38	2,39	2,12	97,88	2,38	8,93	90,95	9,05
1,70	0,84	0,66	99,34	1,70	3,24	88,34	11,66
1,20	1,22	14,27	85,73	1,20	2,99	86,69	13,31
0,84	0,00	0,00	100,00	0,84	2,70	84,99	15,01
0,60	0,00	0,00	100,00	0,60	2,25	83,33	16,67
0,50	0,00	0,00	100,00	0,50	1,10	82,10	17,90
0,30	0,00	0,00	100,00	0,30	2,70	80,54	19,46
0,21	0,00	0,00	100,00	0,21	1,58	78,57	21,43
0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	9,56	69,29	30,71
total	100,00	64,42	35,58	total	100,00	88,60	11,40

Tabela IX.6 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 800mm e velocidade do ar de 13m/s.

Underflow:		80,60		Overflow:		19,40	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	14,90	96,19	3,81	9,50	0,00	21,45	78,55
6,30	20,11	92,08	7,92	6,30	0,05	49,08	50,92
4,76	24,61	94,16	5,84	4,76	0,28	69,74	30,26
3,38	22,38	94,12	5,88	3,38	1,39	86,65	13,35
2,38	9,24	90,22	9,78	2,38	3,93	96,87	3,13
1,70	2,85	89,86	10,14	1,70	7,07	100,00	0,00
1,20	2,00	83,77	16,23	1,20	10,44	99,29	0,71
0,84	1,36	77,88	22,12	0,84	12,57	95,77	4,23
0,60	0,85	72,47	27,53	0,60	7,11	92,59	7,41
0,50	0,34	68,58	31,42	0,50	5,81	87,23	12,77
0,30	0,63	64,20	35,80	0,30	13,10	83,89	16,11
0,21	0,26	58,59	41,41	0,21	12,76	79,37	20,63
0,00	0,48	48,31	51,69	0,00	25,48	68,66	31,34
total	100,00	92,35	7,65	total	100,00	84,97	15,03

Tabela IX.7 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 800mm e velocidade do ar de 16m/s.

Underflow:		67,63		Overflow:		32,37	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	16,01	66,49	33,51	9,50	1,45	66,49	33,51
6,30	24,36	97,22	2,78	6,30	3,46	88,85	11,15
4,76	25,08	97,63	2,37	4,76	4,25	97,75	2,25
3,38	22,01	94,22	5,78	3,38	7,36	100,00	0,00
2,38	7,51	89,36	10,64	2,38	9,49	100,00	0,00
1,70	1,77	81,58	18,42	1,70	10,08	100,00	0,00
1,20	1,19	73,70	26,30	1,20	10,50	98,00	2,00
0,84	0,77	66,39	33,61	0,84	10,05	94,23	5,77
0,60	0,47	59,91	40,09	0,60	5,57	88,59	11,41
0,50	0,18	55,35	44,65	0,50	4,07	82,38	17,62
0,30	0,32	50,42	49,58	0,30	8,38	84,73	15,27
0,21	0,13	44,22	55,78	0,21	8,08	78,99	21,01
0,00	0,21	34,22	65,78	0,00	17,27	71,10	28,90
total	100,00	89,76	10,24	total	100,00	88,92	11,08

Tabela IX.8 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 800mm e velocidade do ar de 18m/s.

Underflow:		22,01		Overflow:		77,99	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	32,52	99,00	1,00	9,50	8,65	99,00	1,00
6,30	31,95	94,73	5,27	6,30	21,34	100,00	0,00
4,76	19,67	87,10	12,90	4,76	16,01	97,33	2,67
3,38	11,64	78,64	21,36	3,38	20,28	96,32	3,68
2,38	2,88	58,12	41,88	2,38	8,68	95,60	4,40
1,70	0,45	41,27	58,73	1,70	2,70	92,58	7,42
1,20	0,31	42,22	57,78	1,20	2,53	91,35	8,65
0,84	0,21	43,25	56,75	0,84	2,33	90,09	9,91
0,60	0,13	44,32	55,68	0,60	1,97	88,87	11,13
0,50	0,05	45,16	54,84	0,50	0,98	87,96	12,04
0,30	0,09	46,22	53,78	0,30	2,46	86,80	13,20
0,21	0,04	47,72	52,28	0,21	1,48	85,33	14,67
0,00	0,07	51,45	48,55	0,00	10,61	77,19	22,81
total	100,00	91,00	9,00	total	100,00	94,41	5,59

Tabela IX.9 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 800mm e velocidade do ar de 21m/s.

Underflow:		5,72		Overflow:		94,28	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	32,62	68,46	31,54	9,50	10,52	100,00	0,00
6,30	49,99	78,45	21,55	6,30	17,32	99,48	0,52
4,76	8,82	41,40	58,60	4,76	19,98	99,37	0,63
3,38	7,11	6,18	93,82	3,38	19,06	96,95	3,05
2,38	0,27	1,75	98,25	2,38	8,19	97,68	2,32
1,70	0,80	0,85	99,15	1,70	2,90	93,48	6,52
0,00	0,39	19,74	80,26	0,00	2,69	91,81	8,19
total	100,00	65,73	34,27	total	100,00	94,81	5,19

Tabela IX.10 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 1200mm e velocidade do ar de 13m/s.

Underflow:		78,37		Overflow:		21,63	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	12,18	83,63	16,37	9,50	0,02	98,99	1,01
6,30	30,41	96,62	3,38	6,30	0,44	92,27	7,73
4,76	12,96	96,48	3,52	4,76	0,33	92,48	7,52
3,38	20,25	94,84	5,16	3,38	1,62	97,32	2,68
2,38	10,34	89,27	10,73	2,38	3,63	94,70	5,30
1,70	3,45	88,88	11,12	1,70	6,10	95,30	4,70
1,20	2,71	86,21	13,79	1,20	8,70	92,77	7,23
0,84	2,07	83,54	16,46	0,84	10,57	89,47	10,53
0,60	1,45	80,99	19,01	0,60	10,48	86,04	13,96
0,50	0,63	79,10	20,90	0,50	5,57	83,48	16,52
0,30	1,30	76,85	23,15	0,30	14,24	80,31	19,69
0,21	0,62	73,93	26,07	0,21	8,30	76,55	23,45
0,00	1,63	66,49	33,51	0,00	29,98	67,44	32,56
total	100,00	91,85	8,15	total	100,00	80,78	19,22

Tabela IX.11 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 1200mm e velocidade do ar de 16m/s.

Underflow:		72,27		Overflow:		27,73	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	17,84	97,86	2,14	9,50	0,80	97,86	2,14
6,30	38,57	95,10	4,90	6,30	6,62	99,49	0,51
4,76	14,30	95,37	4,63	4,76	6,49	97,14	2,86
3,38	17,07	95,11	4,89	3,38	12,64	96,53	3,47
2,38	7,81	90,08	9,92	2,38	12,06	96,68	3,32
1,70	1,59	83,11	16,89	1,70	11,31	96,84	3,16
1,20	1,05	77,88	22,12	1,20	10,64	92,80	7,20
0,84	0,67	72,86	27,14	0,84	9,26	88,38	11,62
0,60	0,40	68,23	31,77	0,60	7,11	84,09	15,91
0,50	0,15	64,88	35,12	0,50	3,23	80,96	19,04
0,30	0,27	61,12	38,88	0,30	7,02	77,27	22,73
0,21	0,10	56,22	43,78	0,21	3,46	72,71	27,29
0,00	0,17	47,72	52,28	0,00	9,36	62,38	37,62
total	100,00	94,35	5,65	total	100,00	88,92	11,08

Tabela IX.12 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 1200mm e velocidade do ar de 18m/s.

Underflow:		4,52		Overflow:		95,48	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	39,90	94,82	5,18	9,50	11,31	100,00	0,00
6,30	40,99	81,36	18,64	6,30	26,67	100,00	0,00
4,76	6,79	34,04	65,96	4,76	10,65	97,00	3,00
3,38	6,06	8,15	91,85	3,38	15,39	98,79	1,21
2,38	4,04	0,16	99,84	2,38	8,54	96,37	3,63
1,70	0,86	0,00	100,00	1,70	3,50	82,64	17,36
1,20	1,37	17,45	82,55	1,20	3,22	82,29	17,71
0,84	0,00	0,00	100,00	0,84	2,90	82,02	17,98
0,60	0,00	0,00	100,00	0,60	2,40	81,84	18,16
0,50	0,00	0,00	100,00	0,50	1,18	81,75	18,25
0,30	0,00	0,00	100,00	0,30	2,87	81,69	18,31
0,21	0,00	0,00	100,00	0,21	1,67	81,67	18,33
0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	9,70	82,59	17,41
total	100,00	74,23	25,77	total	100,00	94,31	5,69

Tabela IX.13 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 1600mm e velocidade do ar de 13m/s.

Underflow:		77,98		Overflow:		22,02	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	10,94	96,04	3,96	9,50	0,00	42,31	57,69
6,30	18,44	95,88	4,12	6,30	0,02	66,72	33,28
4,76	23,53	95,74	4,26	4,76	0,14	81,03	18,97
3,38	23,30	91,89	8,11	3,38	0,76	91,28	8,72
2,38	10,75	89,73	10,27	2,38	2,43	96,79	3,21
1,70	3,61	88,56	11,44	1,70	4,91	98,17	1,83
1,20	2,73	83,92	16,08	1,20	8,08	96,99	3,01
0,84	2,00	79,36	20,64	0,84	10,75	94,32	5,68
0,60	1,34	75,12	24,88	0,60	7,99	92,88	7,12
0,50	0,56	72,03	27,97	0,50	6,42	91,01	8,99
0,30	1,13	68,46	31,54	0,30	14,30	86,21	13,79
0,21	0,51	63,89	36,11	0,21	14,78	81,38	18,62
0,00	1,16	54,00	46,00	0,00	29,40	71,10	28,90
total	100,00	91,98	8,02	total	100,00	84,51	15,49

Tabela IX.14 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 1600mm e velocidade do ar de 16m/s.

Underflow:		64,61		Overflow:		35,39	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	20,40	97,19	2,81	9,50	1,37	97,19	2,81
6,30	23,07	99,86	0,14	6,30	3,78	99,86	0,14
4,76	27,40	96,45	3,55	4,76	4,81	96,93	3,07
3,38	18,97	94,79	5,21	3,38	8,37	99,92	0,08
2,38	6,19	88,60	11,40	2,38	10,65	100,00	0,00
1,70	1,43	82,73	17,27	1,70	11,03	98,10	1,90
1,20	0,94	73,72	26,28	1,20	11,15	95,07	4,93
0,84	0,61	65,48	34,52	0,84	10,30	91,45	8,55
0,60	0,36	58,25	41,75	0,60	5,41	89,41	10,59
0,50	0,14	53,22	46,78	0,50	3,93	84,78	15,22
0,30	0,25	47,86	52,14	0,30	7,63	81,77	18,23
0,21	0,09	41,19	58,81	0,21	7,34	78,03	21,97
0,00	0,15	30,97	69,03	0,00	14,24	70,05	29,95
total	100,00	95,52	4,48	total	100,00	89,72	10,28

Tabela IX.15 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 1600mm e velocidade do ar de 18m/s.

Underflow:		18,16		Overflow:		81,84	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	27,79	88,99	11,01	9,50	9,17	100,00	0,00
6,30	31,57	90,01	9,99	6,30	16,38	100,00	0,00
4,76	20,26	82,49	17,51	4,76	21,13	98,96	1,04
3,38	14,02	70,75	29,25	3,38	20,81	97,00	3,00
2,38	4,30	56,36	43,64	2,38	9,04	94,75	5,25
1,70	0,87	18,85	81,15	1,70	3,24	94,21	5,79
1,20	0,51	25,53	74,47	1,20	2,94	91,58	8,42
0,84	0,30	35,00	65,00	0,84	2,61	88,90	11,10
0,60	0,16	47,87	52,13	0,60	2,13	86,32	13,68
0,50	0,06	60,93	39,07	0,50	1,03	84,41	15,59
0,30	0,09	81,65	18,35	0,30	2,48	82,02	17,98
0,21	0,03	100,00	0,00	0,21	1,42	79,02	20,98
0,00	0,04	100,00	0,00	0,00	7,65	66,65	33,35
total	100,00	82,86	17,14	total	100,00	94,21	5,79

Tabela IX.16 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 1600mm e velocidade do ar de 21m/s.

Underflow:		6,41		Overflow:		93,59	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	17,00	80,60	19,40	9,50	7,46	100,00	0,00
6,30	46,20	87,95	12,05	6,30	12,66	98,27	1,73
4,76	15,48	81,73	18,27	4,76	17,50	98,74	1,26
3,38	13,95	55,49	44,51	3,38	15,82	96,25	3,75
2,38	3,11	21,32	78,68	2,38	9,31	95,79	4,21
1,70	0,75	6,04	93,96	1,70	3,61	93,95	6,05
1,20	3,51	4,41	95,59	1,20	3,46	92,79	7,21
0,84	0,00	0,00	100,00	0,84	3,26	91,61	8,39
0,60	0,00	0,00	100,00	0,60	2,81	90,45	9,55
0,50	0,00	0,00	100,00	0,50	1,42	89,58	10,42
0,30	0,00	0,00	100,00	0,30	3,60	88,47	11,53
0,21	0,00	0,00	100,00	0,21	2,21	87,07	12,93
0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	16,89	79,12	20,88
total	100,00	75,59	24,41	total	100,00	93,19	6,81

Tabela IX.17 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 2400mm e velocidade do ar de 13m/s.

Underflow:		73,84		Overflow:		26,16	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	13,73	98,86	1,14	9,50	0,00	0,00	0,00
6,30	20,19	98,56	1,44	6,30	0,00	0,00	0,00
4,76	24,44	97,52	2,48	4,76	0,39	63,14	36,86
3,38	20,33	95,26	4,74	3,38	1,34	82,77	17,23
2,38	9,72	91,99	8,01	2,38	3,55	93,03	6,97
1,70	3,29	88,95	11,05	1,70	6,24	97,29	2,71
1,20	2,46	82,73	17,27	1,20	9,27	97,37	2,63
0,84	1,78	76,75	23,25	0,84	11,42	94,89	5,11
0,60	1,19	71,29	28,71	0,60	7,88	90,44	9,56
0,50	0,49	67,38	32,62	0,50	5,86	84,81	15,19
0,30	0,98	62,94	37,06	0,30	14,96	81,66	18,34
0,21	0,43	57,35	42,65	0,21	12,91	79,66	20,34
0,00	0,97	46,08	53,92	0,00	26,18	69,64	30,36
total	100,00	94,43	5,57	total	100,00	83,42	16,58

Tabela IX.18 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 2400mm e velocidade do ar de 16m/s.

Underflow:		68,31		Overflow:		31,69	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	19,21	94,21	5,79	9,50	4,72	94,21	5,79
6,30	24,69	96,25	3,75	6,30	6,16	98,56	1,44
4,76	27,21	97,08	2,92	4,76	5,93	100,00	0,00
3,38	18,93	94,21	5,79	3,38	8,70	100,00	0,00
2,38	5,91	86,30	13,70	2,38	9,84	100,00	0,00
1,70	1,21	77,37	22,63	1,70	9,57	98,78	1,22
1,20	0,88	70,31	29,69	1,20	9,40	95,66	4,34
0,84	0,62	63,72	36,28	0,84	8,66	92,18	7,82
0,60	0,41	57,84	42,16	0,60	4,75	88,73	11,27
0,50	0,17	53,71	46,29	0,50	3,48	84,99	15,01
0,30	0,33	49,11	50,89	0,30	7,21	81,95	18,05
0,21	0,14	43,41	56,59	0,21	7,24	79,07	20,93
0,00	0,31	32,80	67,20	0,00	14,34	70,62	29,38
total	100,00	93,80	6,20	total	100,00	90,35	9,65

Tabela IX.19 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 2400mm e velocidade do ar de 18m/s.

Underflow:		32,44		Overflow:		67,56	
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	32,02	97,01	2,99	9,50	5,18	98,53	1,47
6,30	28,99	95,58	4,42	6,30	10,00	99,22	0,78
4,76	24,64	92,45	7,55	4,76	18,15	99,29	0,71
3,38	10,75	82,12	17,88	3,38	19,84	97,14	2,86
2,38	2,22	56,07	43,93	2,38	10,87	96,74	3,26
1,70	0,30	28,60	71,40	1,70	4,01	95,25	4,75
1,20	0,24	30,16	69,84	1,20	3,78	93,63	6,37
0,84	0,19	31,87	68,13	0,84	3,50	91,96	8,04
0,60	0,14	33,67	66,33	0,60	2,96	90,31	9,69
0,50	0,06	35,10	64,90	0,50	1,47	89,08	10,92
0,30	0,14	37,02	62,98	0,30	3,68	87,50	12,50
0,21	0,07	39,71	60,29	0,21	2,20	85,52	14,48
0,00	0,24	52,49	47,51	0,00	14,36	75,69	24,31
total	100,00	92,12	7,88	total	100,00	93,36	6,64

Tabela IX.20 – Partição em massa e distribuição granulométrica do teste de “altura” 2400mm e velocidade do ar de 21m/s.

Underflow:	8,32			Overflow:	91,68		
abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)	abertura (mm)	% retida	teor carvão(%)	teor impurezas(%)
13,44	0,00	0,00	0,00	13,44	0,00	0,00	0,00
9,50	27,33	82,22	17,78	9,50	8,46	100,00	0,00
6,30	40,25	78,34	21,66	6,30	13,46	98,60	1,40
4,76	14,94	67,92	32,08	4,76	18,06	97,64	2,36
3,38	13,19	59,40	40,60	3,38	17,55	96,49	3,51
2,38	3,68	19,73	80,27	2,38	9,88	94,70	5,30
1,70	0,60	13,62	86,38	1,70	3,63	92,60	7,40
1,20	0,00	0,00	100,00	1,20	3,42	91,41	8,59
0,84	0,00	0,00	100,00	0,84	3,15	90,20	9,80
0,60	0,00	0,00	100,00	0,60	2,66	89,02	10,98
0,50	0,00	0,00	100,00	0,50	1,32	88,15	11,85
0,30	0,00	0,00	100,00	0,30	3,30	87,04	12,96
0,21	0,00	0,00	100,00	0,21	1,98	85,64	14,36
0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	13,13	78,53	21,47
total	100,00	72,80	27,20	total	100,00	93,40	6,60