

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de
Minas

Dissertação de Mestrado

“Influência da qualidade das matérias-primas no escoamento gasoso da
zona granular do alto-forno”

Autora: Brenda Marise Oliveira Custódio Pereira
Orientador: Prof. Luiz Fernando Andrade de Castro

Agosto/2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de
Minas

Brenda Marise Oliveira Custódio Pereira

INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DAS MATÉRIAS-PRIMAS NO
ESCOAMENTO GASOSO DA ZONA GRANULAR DO ALTO-FORNO

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

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Luiz Fernando Andrade de Castro

Belo Horizonte – Minas Gerais
Escola de Engenharia da UFMG

2014

AGRADECIMENTO

A autora agradece ao CAPES-PROEX, CNPq e FAPEMIG pelo auxílio técnico proporcionado e a Vallourec Tubos do Brasil S.A. pela viabilização da execução desta pesquisa e autorização concedida para publicação deste trabalho.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivos	3
3. Revisão Bibliográfica	4
3.1. O alto-forno e o processo de produção do ferro-gusa	4
3.2. Aplicação dos balanços de massa e de momento em um leito de partículas (BIRD, <i>et al.</i> , 1960).....	10
3.3. Análise da variação da perda de carga em função das características do leito granulado: ϵ , ϕ e d	31
3.4. Análise do efeito das interfaces.....	36
3.5. Determinação das constantes geométricas de leitos granulados	44
3.6. Fluidização	46
4. Metodologia	51
4.1. Módulo experimental e plano de teste dos ensaios de permeabilidade.....	51
4.2. Descrição das amostras utilizadas	53
4.3. Procedimento para a determinação da fração de vazios (ϵ)	55
4.4. Procedimento para a determinação da esfericidade (ϕ)	56
4.5. Procedimento para a determinação do tamanho médio (d).....	57
4.6. Tratamento Estatístico dos Dados	58
5. Resultados e Discussão	61
5.1. Resultados das medições de fração de vazios (ϵ), esfericidade (ϕ) e tamanho médio (d).	61
5.2. Determinação das Constantes Geométricas de Leitos Granulados (k_1 e k_2) a Partir dos Ensaio de Permeabilidade - Variação da pressão ao longo do raio e do perímetro do tubo suporte do leito.	64
5.3. Determinação das Constantes Geométricas de Leitos Granulados (k_1 e k_2) a Partir dos Ensaio de Permeabilidade - Análise da reprodutibilidade dos resultados.	65
5.4. Determinação das Constantes Geométricas de Leitos Granulados (k_1 e k_2) a Partir dos Ensaio de Permeabilidade - Análise dos resultados dos ensaios de permeabilidade	66
5.5. Cálculo das constantes geométricas do leito granulado (k_1 e k_2).....	70

6. Conclusões	76
7. Referências Bibliográficas	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Processo de redução de óxidos de ferro no alto-forno (CASTRO, 2002).	6
Figura 3-2: Esquema da região interna do alto-forno, mostrando as várias zonas (CASTRO, 2002).	8
Figura 3-3: Sistema de coordenadas cilíndricas.	16
Figura 3-4: Vista esquemática do sistema para estudo do escoamento em dutos cilíndricos.....	17
Figura 3-5: Variação da fração de vazios de um leito de partículas esféricas para três relações entre os diâmetros das partículas menores e maiores (JESCHAR <i>et al.</i> , 1975).	31
Figura 3-6: Variação da fração de vazios para diferentes relações entre os diâmetros das partículas menores e maiores em leitos de partículas constituídos por (a) sinter e (b) coque (STANDISH e BORGER, 1987).	32
Figura 3-7: Curvas de distribuição granulométrica para três tipos de sinter (JESCHAR <i>et al.</i> , 1975).	33
Figura 3-8: Variação da queda de pressão com o diâmetro médio do carvão vegetal, minério de ferro e coque para velocidade a vazio de 0,48; 0,60; 0,72 e 0,84m/s SILVEIRA e MELO (1973).....	35
Figura 3-9: Efeitos da fração de vazios, esfericidade e tamanho médio do coque na queda de pressão (JESCHAR <i>et al.</i> , 1975).	36
Figura 3-10: Representação esquemática de uma interface minério de ferro-carvão vegetal.	37
Figura 3-11: Variação da pressão (P) ao longo da altura (Z) de um leito composto de camadas horizontais de partículas 3,00mm sobre partículas de 8,46mm (SZEKELY e PROPSTER, 1979).....	38
Figura 3-12: Queda de pressão interfacial como função da velocidade a vazio e da configuração do leito: tipo de camada e relação entre os diâmetros R (SZEKELY e PROPSTER, 1979).....	39
Figura 3-13: Linhas de escoamento em um leito formado por camadas em V (SZEKELY e PROPSTER, 1979).....	40

Figura 3-14: Linhas de escoamento de um leito formado por camadas em W (SZEKELY e PROPSTER, 1979).....	41
Figura 3-15: Porcentagem de vazios preenchidos em função da distância a partir da interface minério - coque. $R = \text{diâmetro coque} / \text{diâmetro minério}$ (STANDISH e WILLIAMS, 1975).....	42
Figura 3-16: Variação da queda de pressão com a velocidade a vazio, para leitos em camada e em mistura o minério de ferro para relação granulométrica D/d : 2,32; 3,56; 3,67; 4,17; 5,33 e 7,33 (SILVEIRA e MELO, 1973).	43
Figura 3-17: Variação da queda de pressão com a velocidade a vazio, para leitos em camada e em mistura de carvão vegetal para relação granulométrica D/d : 3,36; 3,94 e 4,89 (SILVEIRA e MELO, 1973).....	44
Figura 3-18: Leito Fixo em (a), leito fixo com máximo de vazios em (b) e leito fluidizado em (c) (FIGUEIRA e TAVARES, 1984).	46
Figura 3-19: Variação da queda de pressão com velocidade a vazio (STANDISH e BORGER, 1987).....	48
Figura 3-20: Determinação do diâmetro crítico do carvão vegetal e do coque quando se conhece o diâmetro da goela e a vazão de gás de um dado alto-forno (SILVEIRA e MELO, 1973).....	50
Figura 4-1: Módulo experimental utilizado nos ensaios de permeabilidade.	51
Figura 4-2: Fluxograma esquemático dos ensaios de permeabilidade.	52
Figura 4-3: Execução do ensaio da norma NBR 9165: Carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade.....	55
Figura 4-4: Metodologia de determinação da esfericidade pelo uso do paquímetro em uma amostra de pelota.	57
Figura 5-1: Amostra de carvão submetida aos ensaios visando determinação das grandezas características do leito.....	63
Figura 5-2: Resultados do coeficiente de variação medidos ao longo do raio e do perímetro do tubo suporte do leito granulado.....	64
Figura 5-3: Linearização dos resultados dos Experimentos 4 e 5.....	65
Figura 5-4: Resultados dos ensaios de permeabilidade.	67
Figura 5-5: Comparativo dos resultados de queda de pressão obtidos no ensaio de permeabilidade e na Equação de Ergun sem ajuste dos parâmetros A e B..	72

Figura 5-6: Resultados dos ensaios de permeabilidade do carvão vegetal.	74
Figura 5-7: Resultados dos ensaios de permeabilidade para as amostras de minério.....	74
Figura 5-7: Determinação do diâmetro crítico do carvão vegetal e do coque quando se conhecem o diâmetro da goela e a vazão de gás em um dado alto-forno. ...	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Constantes geométricas dos leitos granulados de carvão vegetal (SILVEIRA e MELO, 1973).	46
Tabela 4-1: Faixas granulométricas especificadas junto aos fornecedores de cada matéria-prima.	54
Tabela 4-2: Faixas granulométricas especificadas junto aos fornecedores de cada matéria-prima.	54
Tabela 5-1: Resultado da fração de vazios (ϵ) para cada amostra estudada.	61
Tabela 5-2: Resultado da esfericidade (ϕ) para cada amostra estudada.	61
Tabela 5-3: Resultados de tamanho médio (d) e distribuição granulométrica das amostras de NPO, HTT e pelotas.	62
Tabela 5-4: Resultados de tamanho médio (d) e distribuição granulométrica das amostras de carvão.	62
Tabela 5-5: Resultados da regressão linear para determinação dos coeficientes “A” e “B” nos ensaios de permeabilidade.	68
Tabela 5-6: Valores de viscosidade e densidade do ar utilizado nos ensaios permeabilidade.	69
Tabela 5-7: Cálculo de k_1 e k_2 a partir dos ensaios de permeabilidade.	70
Tabela 5-8: Cálculo de k_1 e k_2 a partir da Equação de Ergun sem ajuste dos parâmetros “A” e “B”	71
Tabela 5-8: Cálculo de A e B da equação de Ergun	73

LISTA DE ANOTAÇÕES

ρ_{leito} =densidade do leito granulado, kg/m^3 ;

ρ_g =massa específica do fluído (ou densidade do fluido), kg/m^3 ;

ρ_s =massa específica do sólido, kg/m^3 ;

V_0 =velocidade a vazio do fluido, m/s ;

V_f =velocidade superficial do gás que dará início a fluidização, m/s ;

V_s =volume de sólidos, m^3 ;

v =velocidade do fluido, m/s ;

d =tamanho médio ou diâmetro médio das partículas, m ;

$d_{p,i}$ =diâmetro médio das partículas dado pela média geométrica entre o maior e menor diâmetro das partículas retidas na peneira [$d_{p,i} = (d_1 \cdot d_2)^{1/2}$], m ;

K =índice de resistência, adimensional;

k_1 =coeficiente de resistência viscosa, m^{-2} ;

k_2 =coeficiente de resistência inercial, m^{-1} ;

H =distância entre dois pontos do leito granulado, m ;

x_i =fração em peso das partículas de diâmetro $d_{p,i}$, adimensional;

ΔP =queda de pressão do fluido entre dois pontos do leito granulado distante de H , Pa ;

ε =índice de vazio ou fração de vazios do leito granulado, adimensional;

$\%F$ =porcentagem de finos, %;

ϕ =esfericidade da partícula, adimensional;

Re' =número de Reynolds modificado, adimensional;

μ_g =viscosidade absoluta do fluido, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

RESUMO

Este trabalho contempla o estudo da perda de carga em leito fixo constituído por partículas de carvão vegetal, minério e pelota, empregadas na produção do ferro-gusa, considerando partículas irregulares e distribuídas em uma determinada faixa granulométrica. Foram classificadas amostras dessas matérias-primas por peneiramento, resultando em faixas de diâmetros diferentes. Com as amostras preparadas, foram realizados testes experimentais, em que as partículas foram introduzidas no medidor de queda de pressão em leitos granulados de 1,2m de diâmetro e coletados valores de perda de carga para velocidades variando de 0,5 a 1,2m/s.

A fluidodinâmica foi estabelecida pelas medidas da perda de pressão no leito e vazões de ar crescentes e decrescentes. Os valores de perda de pressão máxima e de velocidade de mínima fluidização foram obtidos a partir dos gráficos de perda de pressão x velocidade do ar. Todas as grandezas das variáveis estudadas neste trabalho foram determinadas experimentalmente e os valores encontrados foram comparados aos correspondentes valores obtidos por equações empíricas retiradas da literatura. Os resultados observados não confirmam as previsões do comportamento que se obtém teoricamente utilizando os coeficientes empíricos da Equação de Ergun (150 e 1,75). Uma vez ajustado os valores desses coeficientes com base nos valores obtidos nos ensaios de permeabilidade, é possível prever a queda de pressão em leitos granulados.

A relação entre o diâmetro de corte e o nível de produção também foram determinados, quando se considera unicamente o aspecto do escoamento gasoso. Finalmente foi avaliado o efeito das interfaces e qual disposição é mais vantajosa: camada ou mistura. Os resultados indicaram que quanto maior o tamanho médio do material, menor é o diferencial do gás ao passar no leito de partículas. Mostrou também que quanto maior a velocidade do gás, maior é essa diferença. Por fim mostrou que através deste experimento é possível determinar para cada vazão de gás fluindo em um dado alto-forno, qual o diâmetro mínimo do carvão antes que se inicie o processo de fluidização.

Palavras-chave: perda de carga, permeabilidade, carvão vegetal, alto-forno, Equação de Ergun, escoamento gasoso, leito granular.

ABSTRACT

This work includes the study of the pressure drop in fixed bed consisting of particles of charcoal, iron ore and pellets, used in the pig iron production, and considering irregular particles distributed in a certain range of particle size. Samples of these raw materials by sieving, resulting in different diameter ranges were classified. In the prepared samples, experimental tests were performed in which particles were introduced into a measuring pressure drop in granular beds 1.2m diameter and collected load loss values for speeds ranging from 0.5 to 1.2m/s.

The fluid dynamics was established by measurements of the pressure drop in the bed and flow rates of increasing and decreasing air. The values of maximum pressure loss and minimum fluidization velocity was obtained from the graphs of pressure loss vs. speed of the air. All the magnitudes of the variables studied in this work were experimentally determined and the values were compared to the corresponding values obtained by empirical equations taken from the literature. The observed results do not confirm the behavior obtained theoretically using the empirical coefficients of the Ergun equation (150 and 1.75). Once you adjust the values of these coefficients based on the values obtained from tests for permeability, it is possible to predict the pressure drop in granular beds.

The relationship between the diameter and cutting the production level was also determined, when considering only the appearance of the gas flow. Layer or mixture: Finally the effect of interfaces and layout which is more advantageous was evaluated. The results indicated that the larger the mean size of the material, the smaller the difference of gas passing the bed of particles. It also showed that the higher the gas velocity, the greater this difference. Finally through this experiment showed that it is possible to determine for each gas flow flowing in a given furnace, what is the maximum diameter of the charcoal before it begins the process of fluidization.

Key Words: pressure drop, permeability, charcoal, blast furnace, Ergun Equation, gas flow, granular bed.

1. Introdução

O conhecimento e o domínio das variáveis que envolvem a permeabilidade do alto-forno e o controle cada vez mais refinado de sua marcha são condições necessárias para uma operação estável, sem perturbação da descida regular da carga, do alcance das metas de produtividade e um eficaz desempenho relativo do consumo do elemento redutor.

A quantidade de ar que pode ser insuflada em um dado alto-forno é governada pelas características de sua carga e da distribuição desta carga em seu interior. A injeção de ar em quantidades superiores às limitadas por essas características e distribuição no alto-forno pode acarretar em escoamento preferencial do gás, marcha irregular da carga e até mesmo arraste de material pelo gás, caso se atinja a velocidade de fluidização do material que compõe esta carga.

Na zona seca do alto-forno, as características da carga que afetam a permeabilidade do gás são determinadas através de ensaios chamados de ensaio de permeabilidade de leitos granulados. Os leitos granulados são formados por sólidos granulados irregulares de diferentes formatos e diâmetros ou também por aglomerados de partículas finas. As características dos leitos que afetam a permeabilidade são a fração de vazios, a esfericidade e o tamanho médio das partículas que compõem o leito. Além das características do gás injetado, são essas as características do leito granulado previstas na Equação de Ergun, que é a equação matemática utilizada para prever a queda de pressão em um leito de partículas.

Este estudo apresenta e analisa os resultados dos ensaios de permeabilidade aplicados a algumas matérias-primas normalmente utilizadas no processo de fabricação do ferro-gusa: carvão vegetal, minério e pelota. Com estes ensaios é possível obter as constantes geométricas características do leito granulado (k_1 e k_2), sem que qualquer hipótese seja feita. Por fim os resultados foram comparados aos correspondentes valores obtidos em equações empíricas e outros resultados retirados da literatura, para que se verifique se os valores observados confirmam as previsões do comportamento que se obtém

teoricamente. As equações empíricas utilizam os dados de esfericidade, fração de vazios e tamanho médio que são determinados através de padrões normativos.

O desenvolvimento destes ensaios proporciona a adoção de um método capaz de avaliar o comportamento de diferentes matérias-primas na permeabilidade na zona seca do alto-forno. Dessa forma, se pode prever como a alteração da faixa granulométrica ou do tamanho médio do carvão vegetal pode afetar a permeabilidade do alto-forno. É possível também avaliar se um leito de partículas formado por diferentes camadas de material favorece a permeabilidade quando se compara um leito composto de mesmo material disposto em uma única camada homogênea. Por fim, com este estudo é possível determinar qual o diâmetro mínimo requerido de carvão vegetal a ser enornado para cada de vazão de gás para um alto-forno com determinado diâmetro da goela, de forma a não ocorrer a fluidização do material.

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método experimental capaz de prever o efeito das qualidades granulométricas (tamanho médio, esfericidade e fração de vazios) das matérias-primas utilizadas na fabricação do ferro-gusa na permeabilidade na zona seca do alto-forno. Com esses experimentos é possível comparar o efeito de:

- ✓ Diferentes materiais.
- ✓ Diferentes faixas granulométricas de um mesmo material.
- ✓ Diferentes formas de disposição do carvão vegetal: camada ou mistura.

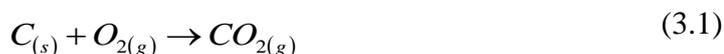
Além disso, o escopo deste trabalho envolve a determinação da granulometria mínima de carvão vegetal para cada vazão de sopro de um determinado alto-forno para que não ocorra o fenômeno da fluidização, considerando uma distribuição homogênea dos gases pela carga. O experimento é baseado na análise dos valores da perda de pressão e da velocidade a vazio do gás ao passar por um determinado leito de partículas. Por fim, os resultados são comparados aos resultados obtidos com os modelos matemáticos propostos pela literatura.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. O alto-forno e o processo de produção do ferro-gusa

O alto-forno é um reator metalúrgico empregado na produção de ferro-gusa através da fusão redutora dos óxidos de ferro (minério de ferro e/ou sinter e/ou pelota) em presença de carbono do redutor (carvão vegetal e/ou coque) e fundentes. Estes materiais, conhecidos como carga sólida, são carregados pelo topo na temperatura ambiente e, na descida, são transformados pela ação dos gases ascendentes, provenientes da reação de combustão do carbono dos redutores com o oxigênio do ar de combustão aquecido (500 a 1.200°C ou mais) soprado pelas ventaneiras, enriquecido ou não com oxigênio.

O oxigênio do ar soprado (O_2) entra em contato com o carbono (C) do redutor incandescente e reage segundo a reação (3.1) de produção de dióxido de carbono (CO_2). Esta reação altamente exotérmica produz grande quantidade de calor para o processo.

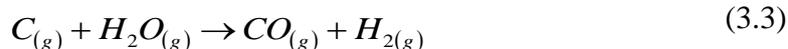


O CO_2 formado nesta região de alta temperatura reage novamente com o carbono do redutor formando o monóxido de carbono ($2CO$).



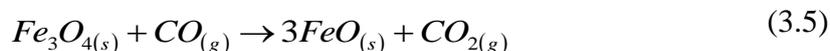
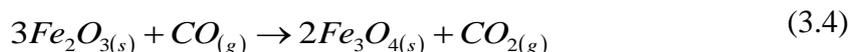
Esta reação (3.2) altamente endotérmica é conhecida como “Solution loss” ou “Boudouard”:

A umidade contida no ar soprado entrará em reação (3.3) com o carbono do redutor gerando os gases redutores CO e H_2 , cujo resultado é o aumento das percentagens de H_2 e CO no gás:



Embora as reações (3.2) e (3.3) sejam endotérmicas, ou seja, absorvem calor, o resultado efetivo associado à saída de gases redutores é o aporte de grandes quantidades de calor fornecido para a sequencia do processo, gerando uma temperatura de chama na região que excede 1.850°C. Durante o restante do seu caminho pelo alto-forno, o gás ascendente suprirá calor para as camadas de carga metálica descendentes, saindo no topo do forno ainda com temperaturas acima de 80°C.

A partir do topo do forno, os óxidos de ferro sofrem as reduções, conforme mostram as reações simultâneas (3.4) a (3.6):



Os produtos obtidos no alto-forno são o ferro-gusa e a escória (da ordem de 120 a 180kg/t gusa), depositados no cadinho, e as poeiras e os gases no topo (da ordem de 1.750 a 2.300Nm³/t gusa) (FALEIRO, 2013).

A Figura 3-1 mostra um esquema simplificado do processo de produção de ferro-gusa no alto-forno.

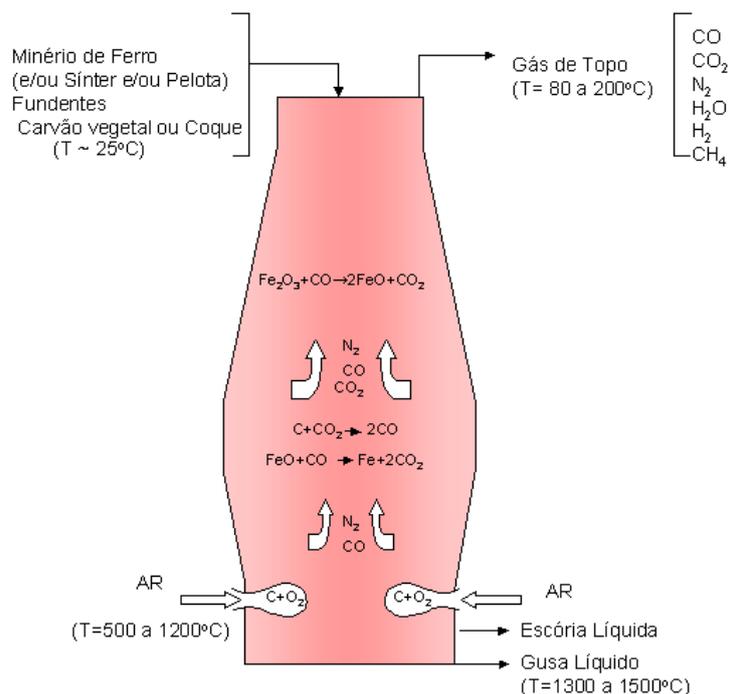


Figura 3-1: Processo de redução de óxidos de ferro no alto-forno (CASTRO, 2002).

Com base em estudos de dissecação de altos-fornos realizados na década de 1970 no Japão, onde altos-fornos em operação foram congelados, além de sondagens com fornos em operação e diversos outros estudos em vários países, três zonas internas principais nos altos-fornos foram definidas (CASTRO, 2002). As características principais de cada zona interna do alto-forno são descritas a seguir e mostradas esquematicamente na Figura 3-2.

- ✓ **Zona granular (ou Zona Seca):** É a região do alto-forno onde todos os componentes da carga se encontram no estado sólido. Nesta zona, a carga metálica (sinter, e/ou pelota e/ou minério), o termo redutor (coque e/ou carvão vegetal) e os fundentes mantêm a sua configuração em camadas, tais como foram carregados (em camadas alternadas), e descem sólidos em contracorrente com os gases. Nesta região pode ocorrer uma excessiva degradação da carga por deficiências no controle de qualidade das matérias-primas, afetando a permeabilidade e o fluxo gasoso ascendente.

- ✓ **Zona de amolecimento e fusão:** Região constituída de camadas de carvão vegetal e/ou coque e camadas coesivas alternadas e onde os componentes da carga metálica e fundentes iniciam o amolecimento e se fundem. As camadas coesivas são formadas de massas semifundidas de partículas de minério de ferro, praticamente impermeáveis ao fluxo gasoso, que passa preferencialmente através das camadas de carvão vegetal e/ou coque. Nesta zona, a carga metálica fica no estado de amolecimento até a fusão completa.

- ✓ **Zona de gotejamento:** É a zona ativa do combustível onde ocorre a movimentação do carvão vegetal e/ou coque no sentido da zona de combustão e onde os materiais já fundidos permeiam o homem morto em direção ao cadinho. O metal e a escória, já líquidos, escoam através do carvão vegetal e/ou coque na forma sólida, em contracorrente com os gases. Esta zona engloba duas subzonas: o homem morto e a zona de combustão. O homem morto é a coluna de carvão vegetal e/ou coque por onde o metal e a escória gotejam e que não alimenta a zona de combustão. Ele se estende até o cadinho, podendo ou não encostar-se ao fundo e é responsável também por auxiliar na sustentação da coluna de carga.



Figura 3-2: Esquema da região interna do alto-forno, mostrando as várias zonas (CASTRO, 2002).

Como a zona de amolecimento e fusão começa em torno de 1.050 °C e a zona de preparação termina a 950 °C (coque) ou 800 °C (carvão vegetal), a zona de preparação está toda contida na zona granular e a zona de elaboração é composta por uma parte da zona granular, toda a zona de amolecimento e fusão e toda a zona de gotejamento.

Quanto maior a eficiência de redução da carga ferrosa na zona de preparação, menor será o consumo de carbono (kg/t gusa). Dentre os fatores que influenciam nessa

eficiência estão: i) o contato gás-sólido na zona de preparação em função da granulometria dos materiais; ii) a qualidade da carga ferrosa, principalmente a redutibilidade); iii) a temperatura da zona de preparação e iv) o tempo de residência da carga ferrosa na zona de preparação (CASTRO, 2002).

Para permitir a fabricação de ferro-gusa com qualidade, a carga sólida carregada no alto-forno possui determinadas funções.

O redutor, carvão vegetal e/ou coque, além da função de remover o oxigênio da carga ferrosa a partir do carbono, atua como fonte de energia (calor + reserva térmica), estrutura de sustentação da carga e é o principal responsável pela permeabilidade do processo, pois ocupa cerca de 80% do volume da carga do alto-forno. É o material de menor densidade e o único que chega à baixa cuba no estado sólido, sendo fundamental possuir qualidade adequada e que a sua forma e tamanho sejam preservados até ser queimado na região das ventaneiras (CRUZ e BARROSO, 2007).

Como fonte do metal (Fe) a ser extraído, o alto-forno utiliza como carga ferrosa o minério de ferro em forma de granulados (6 a 32mm) e/ou aglomerados de finos de minérios, na forma de sinter ou pelotas. Esses produtos trazem consigo impurezas combinadas química ou fisicamente, como a (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3), compostos que apresentam elevados pontos de fusão (1.710°C e 2.030°C , respectivamente) e que fundidas formarão a escória, um produto composto de silicatos complexos que será separada do ferro-gusa durante a operação de vazamento do alto-forno.

Os fundentes são utilizados para controlar o teor das impurezas no ferro-gusa e para facilitar a separação da ganga do minério de ferro, conferindo às escórias uma proporção adequada de seus quatro óxidos principais ($\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) variando em quantidade e tipo, em função da composição química do restante da carga. Os principais fundentes são: quartzo (fonte de SiO_2), calcário (fonte de CaO) e dolomita (fonte de CaO e MgO). A tendência é que se exija a presença desses óxidos nos aglomerados para minimizar ou eliminar o carregamento dos fundentes diretamente no alto-forno.

Redutores, carga ferrosa e fundentes são carregados camada por camada pelo topo do alto-forno, e requerem de 6 a 8 horas para descer até a região inferior, onde chegam transformados em ferro-gusa e escória e são drenados em intervalos regulares. A descida da carga sólida procede de forma gradual devido à combustão do redutor, fusão e amolecimento dos óxidos de ferro. Tanto o carregamento quanto a descida da carga são continuamente monitorados por sonda mecânica ou radar. Os gases formados na região interior do forno, onde o ar quente é soprado, ascendem rapidamente (6 a 8 segundos) até o topo, em contracorrente com os sólidos que descem, após participar de inúmeras reações químicas.

3.2. Aplicação dos balanços de massa e de momento em um leito de partículas (BIRD, *et al.*, 1960).

O escoamento de um fluido através de leito de partículas representa um sistema de interesse para a metalurgia. Leitos empacotados, compostos de sólidos granulados ou aglomerados de finas partículas, aparecem em vários processos metalúrgicos, desde o processo de sinterização até o alto-forno. Nesses sistemas, é de interesse se poder prever a queda de pressão que o fluido sofre ao atravessar o leito com uma dada vazão. Essa informação pode ser usada, por exemplo, no dimensionamento de equipamentos para injeção de gases através destes leitos.

Ao longo do desenvolvimento das equações é será considerado que o leito de partículas é uniforme e que não são formadas chaminés, isto é, não há escoamento preferencial por certos caminhos. É assumido também que o diâmetro das partículas que compõem o leito é pequeno comparado com o diâmetro da coluna que contém o leito. É analisado o escoamento de um gás através desse leito.

Primeiramente são definidos os conceitos de Fração de Vazios (ϵ), Esfericidade (ϕ) e Tamanho Médio (d), que são grandezas usualmente utilizadas para caracterizar um leito de partículas. De posse dessas 3 grandezas é possível então desenvolver o conceito do diâmetro hidráulico equivalente (D_h). De posse do diâmetro hidráulico equivalente pode

desenvolver os balanços de massa e momento aplicados a tubos cilíndricos para os regimes laminar e turbulento.

A) Grandeza característica de um leito de partículas: Fração de vazios (ε)

Observa-se que o leito é composto pelas partículas e pelos vazios que se formam entre elas. Dessa forma, pode-se escrever que:

$$\text{Volume do leito} = \text{Volume das partículas} + \text{Volume de vazios} \quad (3.7)$$

Um parâmetro importante na caracterização de um leito é a sua fração de vazios. Dividindo os dois lados da equação acima pelo volume do leito, obtém-se:

$$1 = \frac{\text{Volume das partículas}}{\text{Volume do leito}} + \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{Volume do leito}} \quad (3.8)$$

A fração de vazios é definida através da seguinte equação:

$$\text{Fração de vazios} = \varepsilon = \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{Volume do leito}} \quad (3.9)$$

Desse modo tem-se:

$$\frac{\text{Volume das partículas}}{\text{Volume do leito}} = 1 - \varepsilon \quad (3.10)$$

Uma série de fatores interfere no valor da fração de vazios de um leito. Dentre eles, os mais importantes são certamente a distribuição granulométrica e o tamanho médio das partículas que o compõem.

B) Grandeza característica de um leito de partículas: Esfericidade (ϕ)

Outra variável de importância em leitos é a sua área superficial. Essa área é definida através da equação abaixo:

$$a = \frac{\text{área superficial das partículas}}{\text{volume do leito}} \quad (3.11)$$

Pode-se reescrever a equação acima da seguinte forma:

$$a = \left(\frac{\text{área superficial das partículas}}{\text{volume das partículas}} \right) \left(\frac{\text{volume das partículas}}{\text{volume do leito}} \right) \quad (3.12)$$

Considerando inicialmente partículas esféricas de tamanho uniforme, tem-se que:

$$\left(\frac{\text{área superficial das partículas}}{\text{volume das partículas}} \right) = \frac{\pi d^2}{\frac{\pi d^3}{6}} = \frac{6}{d} \quad (3.13)$$

Considerando as equações (3.10), (3.12) e (3.13), obtêm:

$$a = \frac{6}{d} (1 - \varepsilon) \quad (3.14)$$

A relação acima vale somente para partículas esféricas. Não é comum se ter partículas esféricas em leitos de interesse na metalurgia. Para se tratar com partículas não esféricas é comum se utilizar o conceito de esfericidade.

A esfericidade procura medir o quanto a forma de uma partícula se aproxima do formato de uma esfera. A esfericidade é definida como a relação entre as áreas superficiais da esfera e da partícula, ambas com o mesmo volume:

$$esfericidade = \varphi = \frac{\text{área da esfera}}{\text{área da partícula}} \quad (3.15)$$

Como a esfera é o sólido com o menor área superficial por unidade de volume, os valores de esfericidade são sempre menores que um, e a esfericidade da esfera é igual a 1.

A equação (3.15) pode ser colocada da seguinte forma:

$$\text{área da partícula} = \frac{\text{área da esfera}}{\varphi} \quad (3.16)$$

Combinando (3.16) e (3.14), obtêm uma expressão para avaliação da área superficial de um leito composto por partículas não esféricas. Tem-se:

$$a = \frac{6}{d\varphi} (1 - \varepsilon) \quad (3.17)$$

C) Grandeza característica de um leito de partículas: Tamanho Médio (d)

Na equação (3.17), o diâmetro d corresponde ao diâmetro da esfera de mesmo volume da partícula. Como a determinação desse diâmetro é trabalhosa, costuma-se trabalhar com o tamanho da partícula definido em termos de aberturas das peneiras onde as partículas são tratadas. Dessa forma, se pode também considerar situações onde o tamanho das partículas não seja uniforme. Neste caso, se define um tamanho médio a partir da análise granulométrica do material. Quando se tem partículas não esféricas, com uma certa distribuição, o valor do tamanho médio das partículas é determinado através da seguinte relação:

$$d = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(\%i)/100}{d_i}} \quad (3.18)$$

Onde:

n = número de peneiras usadas no peneiramento e onde o material ficou retido;

d =diâmetro das partículas, ou tamanho médio;

d_i =diâmetro médio do material retido na peneira i ;

$(\%i)$ =porcentagem de material retido na peneira i .

O diâmetro do material retido na peneira i é determinado através da média geométrica da abertura da peneira onde o material ficou retido e da peneira imediatamente superior, por onde o material passou. A média geométrica é calculada pela raiz quadrada do produto das aberturas dessas peneiras.

✓ Diâmetro hidráulico equivalente (D_h)

O tratamento para escoamento em leitos é feito a partir do conceito de diâmetro hidráulico equivalente. Para tal, basta imaginar um leito de partículas como sendo um duto de formato bastante irregular, através do qual o gás vai escoar.

O diâmetro hidráulico equivalente é avaliado empiricamente pela seguinte relação:

$$D_h = 4 \frac{A}{P_M} \quad (3.19)$$

Onde A representa a área da seção transversal por onde o fluido escoar e P_M o perímetro molhado. Como pode ser verificado, o diâmetro hidráulico equivalente para o caso de um tubo cilíndrico é igual ao diâmetro do tubo.

Resta agora traduzir as variáveis acima em função das características do leito. Para tal, multiplica-se o numerador e o denominador pela altura do leito, L . Tem-se:

$$D_h = 4 \frac{AL}{P_M L} \quad (3.20)$$

Analisando a equação acima, constata-se que o produto AL corresponde ao volume disponível para o gás passar. Em um leito, esse volume é o volume de vazios. No denominador, o produto $P_M L$ corresponde à área molhada, que é a área de contato do gás com as partículas (a área de contato com as paredes do recipiente que contem o leito é muito pequena comparada com a área superficial das partículas). A área de contato gás-partículas é a área superficial destas partículas (despreza-se as áreas de contato entre as partículas). Pode-se, então, colocar a equação (3.20) na seguinte forma:

$$D_h = 4 \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{área superficial das partículas}} \quad (3.21)$$

Dividindo agora a equação (3.21) pelo volume do leito, tem-se:

$$D_h = 4 \frac{\left(\frac{\text{volume de vazios}}{\text{volume do leito}} \right)}{\left(\frac{\text{área superficial das partículas}}{\text{volume do leito}} \right)} \quad (3.22)$$

Combinando a equação acima com as expressões (3.9) e (3.14), pode escrever a equação acima da seguinte forma:

$$D_h = 4 \frac{\varepsilon}{\frac{6}{d\varphi}(1-\varepsilon)} = \frac{2\varepsilon d\varphi}{3(1-\varepsilon)} \quad (3.23)$$

A equação (3.23) expressa o diâmetro hidráulico equivalente de um leito em função de suas características. De posse da equação acima, pode-se utilizar as expressões de queda de pressão em tubos cilíndricos para os regimes laminar e turbulento e expressá-las em função do diâmetro hidráulico equivalente do leito.

✓ Escoamento axial em duto cilíndrico

Este é o tipo de escoamento de fluido mais comum: o escoamento de um fluido dentro de um tubo. Neste tipo de sistema é adotado o sistema de coordenadas cartesianas cilíndricas (Figura 3-3). A coordenada z corresponde à direção axial. A coordenada r corresponde à distância à origem dos eixos cartesianos. A coordenada θ representa o ângulo de rotação em relação a uma linha de referência. A posição de um determinado ponto em um sistema de coordenadas cilíndricas pode, então, ser especificada em termos dos valores das coordenadas r , θ e z . Vale salientar que r nunca assume valores negativos e θ pode variar entre 0 e 2π .

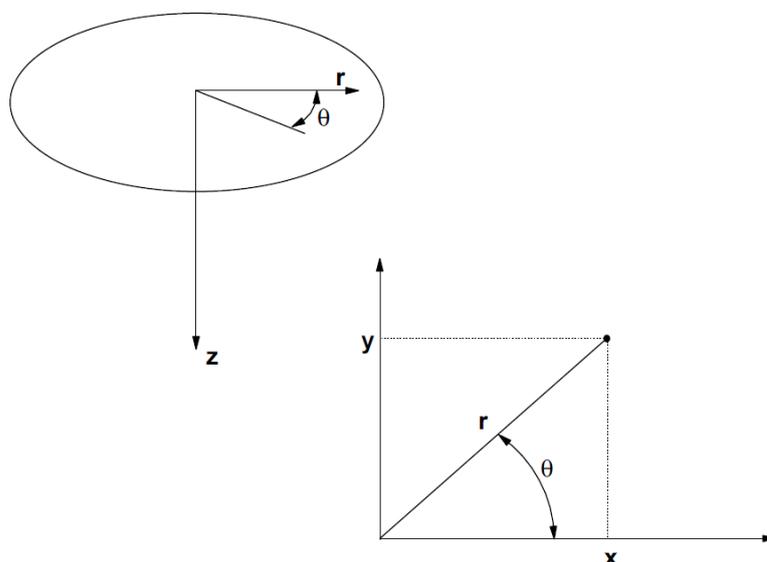


Figura 3-3: Sistema de coordenadas cilíndricas.

Será analisado portanto o escoamento axial em um duto cilíndrico vertical, considerando a existência de uma diferença de pressão ao longo do seu comprimento. Este sistema é visto esquematicamente na Figura 3-4 a seguir. Determinado o sistema de eixos coordenados, pode-se definir o elemento de volume que será tomado como referência para desenvolvimento dos balanços de massa e momento. Este elemento está destacado em azul na Figura 3-4.

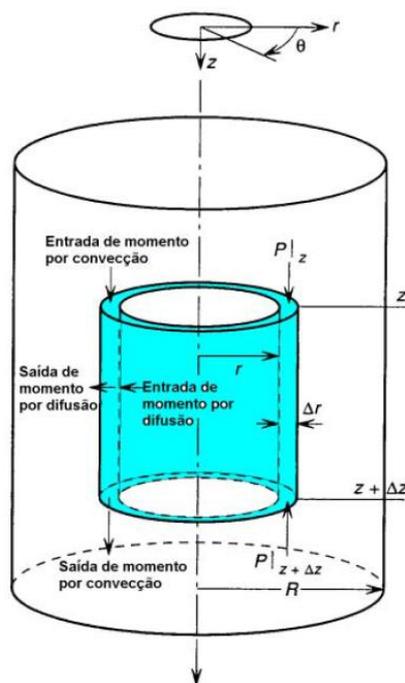


Figura 3-4: Vista esquemática do sistema para estudo do escoamento em dutos cilíndricos.

No sistema de coordenadas cilíndricas, o transporte de momento por convecção só ocorrerá na direção z , que é a direção do movimento macroscópico do fluido. Só existe força motriz (gravidade e diferença de pressão) para o deslocamento nesta direção. Dessa forma, não há movimento na direção radial nem na direção angular (movimento de rotação).

O transporte de momento por difusão ocorre na direção r , que é a direção do gradiente de velocidade. A existência desse gradiente pode ser evidenciada observando que, junto à parede do tubo ($r=R$), o fluido está parado. Em qualquer outro ponto no interior do tubo ($r \neq R$), o fluido está se movendo.

Balanço de Massa:

Considerando a direção do movimento macroscópico do fluido, pode-se enunciar o balanço de massa da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} & [\text{Taxa de entrada de massa em } z = z] \\ & - [\text{Taxa de saída de massa em } z = z + \Delta z] = 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Os pontos onde se considera entrada e saída de massa são determinados em função da orientação dos eixos, e não em função do sentido de escoamento do fluido. Nesse caso, ainda não se sabe o sentido de escoamento, pois este sentido vai depender do valor da diferença de pressão existente.

As taxas de entrada e saída de massa podem ser avaliadas pelas expressões abaixo:

$$[\text{Taxa de entrada de massa em } z = z] = (2\pi r \Delta r v_z \rho) \Big|_{z=z} \quad (3.25)$$

$$[\text{Taxa de entrada de massa em } z = z + \Delta z] = (2\pi r \Delta r v_z \rho) \Big|_{z=z+\Delta z} \quad (3.26)$$

Nas equações acima, o produto $2\pi r \Delta r$ corresponde à área do elemento de volume perpendicular à direção do escoamento do fluido (direção z), v_z é a componente de velocidade e ρ é a densidade do fluido. O produto destes fatores tem a dimensão de massa por unidade de tempo (taxa ou vazão de massa). O produto $2\pi r \Delta r v_z$ é denominado vazão volumétrica e tem dimensão de volume por unidade tempo.

O balanço de massa pode, então, ser colocado na seguinte forma, (3.26) e (3.27) em (3.25):

$$(2\pi r \Delta r v_z \rho) \Big|_{z=z} - (2\pi r \Delta r v_z \rho) \Big|_{z=z+\Delta z} = 0 \quad (3.27)$$

Dividindo a equação (3.27) pelo volume do elemento, $2\pi r \Delta r \Delta z$, tem-se:

$$\frac{(2\pi r \Delta r v_z \rho) \Big|_{z=z} - (2\pi r \Delta r v_z \rho) \Big|_{z=z+\Delta z}}{2\pi r \Delta r \Delta z} = 0 \quad (3.28)$$

$$\frac{(v_z \rho)|_{z=z} - (v_z \rho)|_{z=z+\Delta z}}{\Delta z} = 0 \quad (3.29)$$

Fazendo-se o limite quando Δz tender a zero, obtêm-se:

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left[\frac{(v_z \rho)|_{z=z} - (v_z \rho)|_{z=z+\Delta z}}{\Delta z} = 0 \right] = -\frac{\partial(v_z \rho)}{\partial z} = 0 \quad (3.30)$$

Considerando a densidade do fluido constante, pode-se reescrever a equação (3.30) da seguinte forma:

$$\rho \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.31)$$

Como a densidade do fluido não é nula, obtém-se finalmente que:

$$\frac{\partial(v_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.32)$$

A equação acima estabelece que a velocidade v_z não depende da posição z (v_z não é função de z).

Balanço de Momento

Inicialmente, deve-se lembrar que momento pode ser transportado por dois mecanismos: difusão e convecção. Ambos devem ser considerados quando se estabelece o balanço. Considerando que momento por difusão é transportado na direção do gradiente de velocidade (direção r) e que o transporte de momento por convecção ocorre na direção do movimento macroscópico do fluido (direção z), pode-se expressar o balanço de momento da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
& [\text{Taxa de entrada de momento por convecção em } z = z] - \\
& [\text{Taxa de saída de momento por convecção em } z = z + \Delta z] + \\
& [\text{Taxa de entrada de momento por difusão em } r = r] - \\
& [\text{Taxa de saída de momento por difusão em } r = r + \Delta r] + \\
& [\text{Somatório de forças atuando no elemento de volume}] = 0
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Os pontos de entrada e saída de momento por convecção e por difusão são determinados em função da escolha da orientação dos eixos coordenados, e não em função do conhecimento do sentido real do transporte de momento por estes mecanismos. Não é necessário conhecer a priori os sentidos de escoamento de momento para se estabelecer os balanços de momento. Estes sentidos são determinados durante o desenvolvimento da análise do problema.

As diversas taxas que aparecem na equação (3.33) podem ser avaliadas através das expressões a seguir:

$$\begin{aligned}
& [\text{Taxa de entrada de momento por convecção em } z = z] = \\
& (2\pi r \Delta r v_z \rho v_z) \Big|_{z=z}
\end{aligned} \tag{3.34}$$

$$\begin{aligned}
& [\text{Taxa de saída de momento por convecção em } z = z + \Delta z] = \\
& (2\pi r \Delta r v_z \rho v_z) \Big|_{z=z+\Delta z}
\end{aligned} \tag{3.35}$$

$$\begin{aligned}
& [\text{Taxa de entrada de momento por difusão em } r = r] = \\
& (2\pi r \Delta z T_{rz}) \Big|_{r=r}
\end{aligned} \tag{3.36}$$

$$\begin{aligned}
& [\text{Taxa de saída de momento por difusão em } r = r + \Delta r] = \\
& (2\pi r \Delta z T_{rz}) \Big|_{r=r+\Delta r}
\end{aligned} \tag{3.37}$$

$$\begin{aligned}
& [\text{Somatório de forças atuando no elemento de volume}] = \\
& (2\pi r \Delta r \Delta z \rho g) + (2\pi r \Delta r (P \Big|_z - P \Big|_{z+\Delta z}))
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Na equação (3.38), o somatório de forças se refere apenas às forças que possuem componentes na direção de escoamento do fluido. É importante lembrar que o momento é uma grandeza vetorial. O balanço de momento (ou balanço de forças) sendo estabelecido nesse caso refere-se à direção z .

Nas equações (3.34) e (3.35), o produto $2\pi r\Delta r v_z \rho$ representa a vazão de massa. Quando esses fatores multiplicados pela velocidade v_z , obtêm-se momento por unidade de tempo, que corresponde à taxa de momento.

Nas equações (3.36) e (3.37), T_{rz} representa o fluxo de momento por difusão. Quando este fluxo é multiplicado pela área normal à sua direção, $2\pi r\Delta z$, obtém-se a taxa de momento por difusão.

Na equação (3.38) a primeira parcela do lado direito da igualdade refere-se à força da gravidade (que é a força que atua no volume do elemento considerado). Nessa parcela, $2\pi r\Delta r\Delta z$ representa o volume do elemento. Quando este produto é multiplicado pela densidade, ρ , obtém-se a massa do elemento de volume. Finalmente, multiplicando esta massa pela aceleração da gravidade (g), obtêm a força da gravidade. A segunda parcela do lado direito é a força decorrente da diferença de pressão. Essa força atua perpendicularmente (pressão é sempre associada a uma força normal) à área $2\pi r\Delta r$ do elemento de volume. O produto da área pela diferença de pressão vai fornecer a força associada a esta diferença de pressão.

Substituindo as expressões de (3.34) a (3.38) na equação (3.33), obtêm-se a equação geral do balanço de momento para o problema em análise:

$$\begin{aligned} & \left[(2\pi r\Delta r v_z \rho v_z) \Big|_{z=z} - (2\pi r\Delta r v_z \rho v_z) \Big|_{z=z+\Delta z} \right] + \\ & \left[(2\pi r\Delta z T_{rz}) \Big|_{r=r} - (2\pi r\Delta z T_{rz}) \Big|_{r=r+\Delta r} \right] \\ & + (2\pi r\Delta r\Delta z \rho g) + 2\pi r\Delta r (P \Big|_z - P \Big|_{z+\Delta z}) = 0 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Dividindo pelo elemento de volume, obtêm:

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{(2\pi r \Delta r v_z \rho v_z)|_{z=z} - (2\pi r \Delta r v_z \rho v_z)|_{z=z+\Delta z}}{2\pi r \Delta r \Delta z} \right] + \\
& \left[\frac{(2\pi r \Delta z T_{rz})|_{r=r} - (2\pi r \Delta z T_{rz})|_{r=r+\Delta r}}{2\pi r \Delta r \Delta z} \right] + \\
& + \frac{(2\pi r \Delta r \Delta z \rho g) + 2\pi r \Delta r (P|_z - P|_{z+\Delta z})}{2\pi r \Delta r \Delta z} = 0
\end{aligned} \tag{3.40}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{(v_z \rho v_z)|_{z=z} - (v_z \rho v_z)|_{z=z+\Delta z}}{\Delta z} \right] + \\
& \left[\frac{(r T_{rz})|_{r=r} - (r T_{rz})|_{r=r+\Delta r}}{r \Delta r} \right] + \\
& + (\rho g) + \frac{(P|_z - P|_{z+\Delta z})}{\Delta z} = 0
\end{aligned} \tag{3.41}$$

Na segunda parcela da equação (3.41), o raio r que aparece no numerador é avaliado em duas posições diferentes, r e $r+\Delta r$. O termo $(rT_{rz})|_{r+\Delta r}$ é equivalente a $(r+\Delta r)(T_{rz})|_{r+\Delta r}$. Dessa forma, a maneira mais simples de fazer o desenvolvimento matemático, que será apresentado a seguir, consiste em deixar o termo r no denominador e no numerador.

Fazendo o limite da equação (3.41) quando o volume do elemento tende a zero (Δr e $\Delta z \rightarrow 0$), tem-se:

$$\lim_{\Delta r, \Delta z \rightarrow 0} \left[\left[\frac{(v_z \rho v_z)|_{z=z} - (v_z \rho v_z)|_{z=z+\Delta z}}{\Delta z} \right] + \left[\frac{(r T_{rz})|_{r=r} - (r T_{rz})|_{r=r+\Delta r}}{r \Delta r} \right] + \left[(\rho g) + \frac{(P|_z - P|_{z+\Delta z})}{\Delta z} \right] \right] = 0 \tag{3.42}$$

Usando-se o conceito de derivada primeira, como já feito anteriormente, obtém-se:

$$-\frac{\partial(v_z \rho v_z)}{\partial z} - \frac{\partial(r T_{rz})}{r \partial r} + \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \tag{3.43}$$

Pela equação (3.32) obtida no balanço de massa e considerando o fluido com densidade constante, pode-se escrever:

$$\rho \frac{\partial(v_z v_z)}{\partial z} = 2\rho v_z \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.44)$$

Logo,

$$-\frac{\partial(rT_{rz})}{r\partial r} + \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (3.45)$$

As derivadas parciais acima podem ser transformadas em ordinárias, pois T_{rz} só depende de r e a pressão só varia com z .

Considerando um comprimento L do tubo, o gradiente de pressão que aparece na equação (3.45) pode ser escrito da seguinte forma:

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{P_0 - P_L}{L} \quad (3.46)$$

Onde P_0 e P_L são as pressões em pontos $z=z_0$ e $z=z_L$, respectivamente.

Substituindo a equação (3.46) em (3.45), obtêm-se finalmente a equação diferencial que rege o escoamento do fluido em um tubo.

$$-\frac{\partial(rT_{rz})}{r\partial r} + \rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} = 0 \quad (3.47)$$

A equação diferencial acima pode ser integrada através de separação de variáveis, para se obter:

$$\int d(rT_{rz}) = \int \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] r dr \quad (3.48)$$

$$rT_{rz} = \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \frac{r^2}{2} + c_1 \quad (3.49)$$

Onde C_1 é uma constante de integração

A equação (3.49) é válida para a faixa de valores de r : $0 \leq r \leq R$. Para esta equação ser válida em $r=0$, o valor de C_1 deve ser obrigatoriamente igual a 0. Isso é verdadeiro desde que T_{rz} , ρg e $(P_0 - P_L)/L$ sejam números finitos. Essa condição é normalmente atendida e, dessa forma, pode-se assumir que C_1 seja igual a 0.

Com esse valor de C_1 , pode-se reescrever a equação (3.49) da seguinte forma:

$$T_{rz} = \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \frac{r}{2} \quad (3.50)$$

Pela lei de Newton da Viscosidade, pode-se escrever que:

$$T_{rz} = -\mu \frac{dv_z}{dr} \quad (3.51)$$

Combinando as equações (3.50) e (3.51), obtém-se:

$$T_{rz} = -\mu \frac{dv_z}{dr} = \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \frac{r}{2} \quad (3.52)$$

Separando variáveis e integrando novamente, tem-se:

$$\int dv_z = \int -\frac{1}{\mu} \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \frac{r}{2} dr \quad (3.53)$$

$$v_z = -\frac{1}{\mu} \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \frac{r^2}{4} + C_2 \quad (3.54)$$

Onde C_2 é uma nova constante de integração. A integração acima foi feita assumindo-se viscosidade e densidade do fluido constantes.

A equação (3.54) fornece uma equação genérica para o perfil de velocidade dentro de um duto cilíndrico. Para se ter o perfil específico para o caso em estudo, deve-se determinar o valor da constante C_2 . Esta constante é determinada a partir do uso de uma condição de contorno. Sabe-se que nas interfaces sólido-líquido, a velocidade do fluido se iguala à velocidade do sólido. Dessa forma, pode-se afirmar que:

Condição de contorno: $v_z=0$ em $r=R$

Aplicando esta condição de contorno na equação do perfil de velocidade, tem-se:

$$0 = -\frac{1}{\mu} \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \frac{R^2}{4} + C_2 \quad (3.55)$$

Da equação acima, pode-se determinar o valor de C_2 e finalmente obter a expressão para o perfil de velocidades:

$$v_z = \frac{1}{\mu} \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \frac{(R^2 - r^2)}{4} \quad (3.56)$$

Para se determinar as vazões volumétricas e de massa de fluido no interior do tubo, as vazões são calculadas somando-se as quantidades de fluido que escoam em cada porção infinitesimal de área ao longo do raio do tubo. Como a velocidade só depende da posição radial, esse elemento infinitesimal de área corresponderia a um pequeno anel de espessura radial dr . Pelas parcelas do balanço de massa, sabe-se que, em cada uma camada infinitesimal, a quantidade de fluido que escoia é dada por:

$$dQ = (2\pi r dr v_z) \quad (3.57)$$

Onde dQ é a vazão volumétrica infinitesimal ao longo de um anel de área equivalente a $2\pi r dr$.

Integrando-se a equação (3.57) entre o centro e parede do tubo, pode-se determinar a vazão volumétrica do fluido:

$$\int_{r=0}^{r=R} dQ = \int_{r=0}^{r=R} 2\pi r \frac{1}{\mu} \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \frac{(R^2 - r^2)}{4} dr \quad (3.58)$$

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \quad (3.59)$$

A velocidade média é determinada dividindo-se a vazão volumétrica pela área total disponível para o escoamento. Neste caso, essa área é a área da seção transversal do tubo (πR^2). Logo:

$$\bar{V} = \frac{R^2}{8\mu} \left[\rho g + \frac{P_0 - P_L}{L} \right] \quad (3.60)$$

A equação (3.60) obtida até aqui permite estimar a queda de pressão de um gás com escoamento laminar em um tubo, em função da velocidade média do gás.

O regime laminar

A partir daqui pode-se prosseguir com o desenvolvimento da equação (3.60) que permite estimar a queda de pressão de um gás com escoamento laminar em um tubo, em função da velocidade média do gás. Desprezando a força da gravidade (para gases, isso é razoável devido à sua baixa densidade), pode-se escrever a equação (3.60), já em termos do diâmetro hidráulico equivalente:

$$\frac{P_0 - P_L}{L} = \frac{8\mu\bar{V}}{R_h^2} = \frac{32\mu\bar{V}}{D_h^2} \quad (3.61)$$

Substituindo a definição do diâmetro hidráulico equivalente (3.23), obtêm-se:

$$\frac{P_0 - P_L}{L} = \frac{32\mu\bar{V}}{D_h^2} = \frac{32\mu\bar{V}}{\left(\frac{2\epsilon d\phi}{3(1-\epsilon)}\right)^2} \quad (3.62)$$

$$\frac{P_0 - P_L}{L} = \frac{72\mu\bar{V}(1-\epsilon)^2}{\epsilon^2 d^2 \phi^2} \quad (3.63)$$

Os valores de queda de pressão previstos pela equação acima foram comparados com dados experimentais. Foi constatado que os efeitos das variáveis estava correto; entretanto, a constante que melhor se ajustava aos resultados era 150 ao invés de 72. Isso certamente se deve ao fato do caminho percorrido pelo gás ser mais longo que a altura do leito, L, considerada na avaliação da queda de pressão. Dessa forma, a equação que é utilizada para estimativa de quedas de pressão em leito de partículas com escoamento laminar, conhecida como equação de Blake-Kozeny, é:

$$\frac{P_0 - P_L}{L} = \frac{150\mu\bar{V}(1-\epsilon)^2}{\epsilon^2 d^2 \phi^2} \quad (3.64)$$

É ainda comum substituir a velocidade do gás através do leito, V, pela chamada velocidade a vazio, V_0 , expressa através da seguinte equação:

$$\bar{V} = \frac{V_0}{\epsilon} \quad (3.65)$$

A velocidade a vazio seria a velocidade do gás se toda a seção transversal do leito estivesse disponível para seu escoamento. Substituindo (3.65) em (3.64), obtém finalmente:

$$\frac{P_0 - P_L}{L} = \frac{150\mu V_0(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d^2 \varphi^2} \quad (3.66)$$

O regime turbulento

Para o estudo do sistema de interesse (escoamento interno), foi proposto arbitrariamente que a força de atrito, atuando entre o fluido e o sólido em contato com ele, fosse avaliada através da seguinte equação:

$$F_k = AKf \quad (3.67)$$

Onde:

F_k =força de atrito entre sólido e o fluido;

A =área característica;

K = energia cinética do fluido por unidade de volume;

F = fator de fricção.

Deve-se observar que a equação (3.67) não é uma lei mecânica dos fluidos, mas sim uma definição para o fator de fricção. Obviamente para um dado sistema, f não está definido até que a área característica, A , seja especificada.

Para escoamento em dutos, a área característica (3.67) é a superfície molhada (área da região em contato com o fluido). A energia cinética do fluido por sua vez é avaliada em função da velocidade média do fluido. Dessa forma, para um tubo cilíndrico de diâmetro D e comprimento L , a força de fricção pode ser estimada pela seguinte equação:

$$F_k = (\pi DL) \left(\frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 \right) f \quad (3.68)$$

Onde:

πDL = área em contato com o fluido-sólido;

$\frac{1}{2} \rho V^2$ = energia cinética do fluido por unidade de volume

Considerando um sistema onde o fluido esteja escoando internamente a um duto cilíndrico de diâmetro D entre 2 pontos do comprimento do duto: $z=0$ e $z=L$ causado apenas pela diferença de pressão, e que o fluido esteja se deslocando com velocidade constante, pode-se afirmar que o somatório de forças atuando no fluido é nulo (segunda lei de Newton). Dessa forma, a seguinte expressão representando o balanço de forças é válida:

Força associada à diferença de pressão = Força de fricção entre sólido e fluido

$$\frac{\pi D^2}{4} (P_0 - P_L) = F_k = (\pi DL) \left(\frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 \right) f \quad (3.69)$$

Em termos do diâmetro hidráulico:

$$\frac{(P_0 - P_L)}{L} = 2 \rho \bar{V}^2 f \frac{1}{D_h} \quad (3.70)$$

Substituindo a definição do diâmetro hidráulico equivalente, equação (3.23), obtém-se:

$$\frac{(P_0 - P_L)}{L} = \frac{2 \rho \bar{V}^2 f}{\left(\frac{2 \varepsilon d \varphi}{3(1 - \varepsilon)} \right)} = \frac{3 \rho \bar{V}^2 (1 - \varepsilon)}{\varepsilon d \varphi} f \quad (3.71)$$

O fator de fricção para leitos foi avaliado experimentalmente e o valor obtido foi:

$$f = \frac{1,75}{3} \quad (3.72)$$

Substituindo esse valor em (3.71) e já usando a definição de velocidade a vazio, obtém-se:

$$\frac{(P_0 - P_L)}{L} = \frac{1,75 \rho V_0^2 (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 d \varphi} \quad (3.73)$$

A equação acima é conhecida como equação de Burke-Plummer e permite estimar a queda de pressão de um gás ao atravessar um leito, em condições onde o escoamento seja turbulento.

✓ A Equação de Ergun

No final da década de 1940, Ergun unificou as expressões de Blake-Kozeny e Burke-Plummer, mostrando que a queda de pressão em leitos era composta de duas contribuições: uma associada aos atritos viscosos, que predominava na região laminar, e outra, associada aos efeitos de inércia, que predominava no regime turbulento. Na realidade, a queda de pressão do gás ao longo de toda a faixa de regimes de escoamento pode ser expressa pela soma das equações de Blake-Kozeny e Burke-Plummer. Logo:

$$\frac{(P_0 - P_L)}{L} = \frac{150 \mu V_0 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d^2 \varphi^2} + \frac{1,75 \rho V_0^2 (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 d \varphi} \quad (3.74)$$

Essa equação é conhecida como a equação de Ergun e pode ser usada para determinar a queda de pressão em leitos, sendo válida para os regimes laminar e turbulento.

Pela equação acima, observa-se que os parâmetros que favorecem uma diminuição da queda de pressão do gás ao atravessar o leito (tornam o leito mais permeável) são:

- maior fração de vazio, ε ;
- maior tamanho médio das partículas, d ;
- maior esfericidade, φ ;
- menores viscosidade, μ ; densidade, ρ ; e velocidade do gás a vazio, V_0 .

3.3. Análise da variação da perda de carga em função das características do leito granulado: ε , φ e d .

Resultados experimentais obtidos em leitos com partículas esféricas (JESCHAR *et al.*, 1975) indicam que quando há mistura de partículas, qualquer que seja a mistura, a fração de vazios é reduzida. Os resultados são exibidos na Figura 3-5, no qual cada curva corresponde ao menor diâmetro dividido por maior diâmetro das esferas que compõe cada um dos três leitos e composições estudadas. Além disso, quanto maior é a diferença entre os diâmetros, menor é a fração de vazios da mistura, sendo o mínimo das curvas localizadas em torno de 30% de partículas menores. O formato das curvas pode ser explicado pelo fato que, à medida que a proporção do constituinte de menor tamanho aumenta, estes passam a ocupar os interstícios do leito, reduzindo a fração de vazios, até atingir um valor mínimo. A partir deste ponto, o leito tende a se aproximar como que constituído de partículas menores.

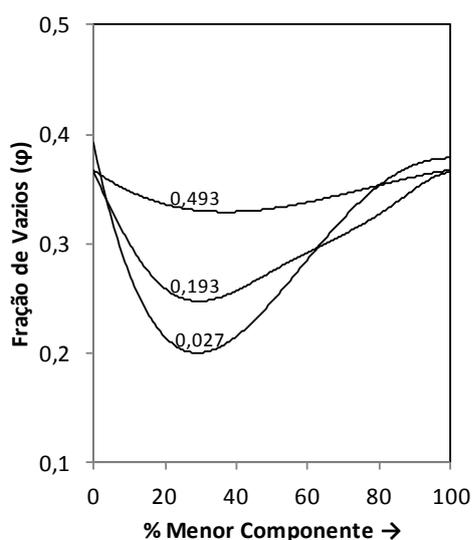


Figura 3-5: Variação da fração de vazios de um leito de partículas esféricas para três relações entre os diâmetros das partículas menores e maiores (JESCHAR *et al.*, 1975).

Comportamento semelhante também é seguido pelo sinter e coque. A Figura 3-6 mostra a variação da fração de vazios de uma mistura de sinter em (a) e coque em (b). Observe que nestes casos o valor mínimo da fração de vazios não é bem definido como no caso de esferas.

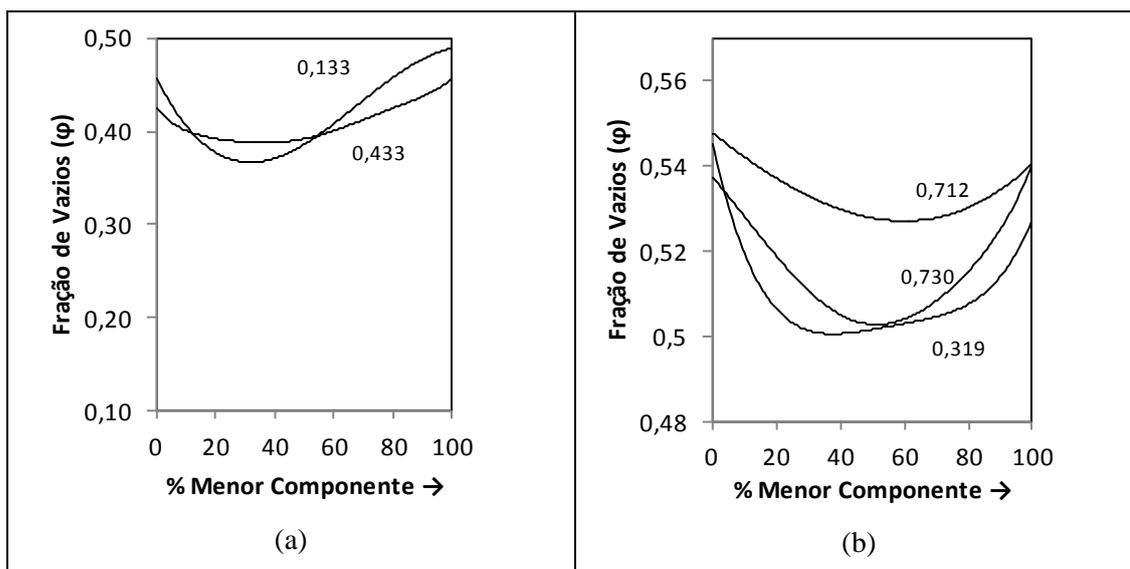


Figura 3-6: Variação da fração de vazios para diferentes relações entre os diâmetros das partículas menores e maiores em leitos de partículas constituídos por (a) sinter e (b) coque (STANDISH e BORGER, 1987).

A partir destes resultados conclui-se que para maximizar a fração de vazios, e consequentemente minimizar a queda de pressão, deve-se ter uma matéria-prima com uma distribuição granulométrica a mais estreita possível. Observe que, do ponto de vista da fração de vazios, o tamanho absoluto da matéria-prima não é importante, e sim a distribuição destes tamanhos. Por exemplo: suponha as distribuições granulométricas de sinter mostradas esquematicamente na Figura 3-7. O que caracteriza a extensão da distribuição granulométrica é a inclinação da curva. Curvas com inclinação mais acentuadas significam uma distribuição granulométrica mais estreita. Consequentemente, sinter I e II apresentam fração de vazios maior que sinter III. Convém observar que, a fração de vazios do sinter I deve ser aproximadamente a mesma do sinter II, a menos do efeito das partículas finais na parte final da curva.

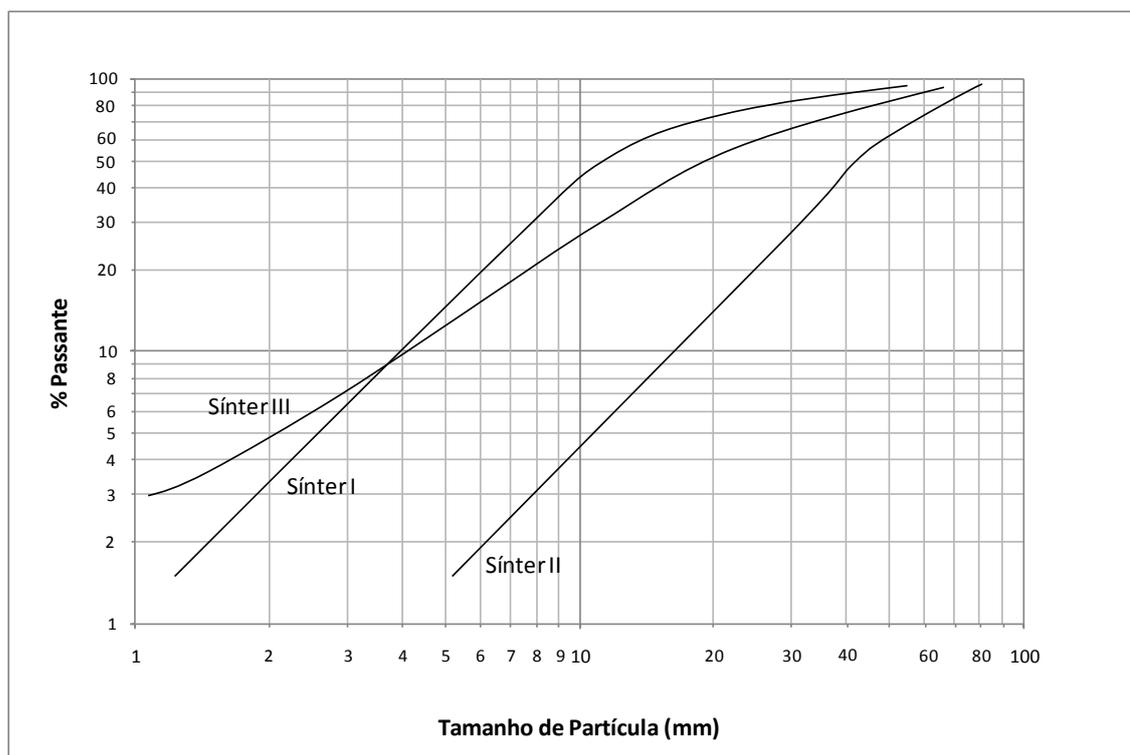


Figura 3-7: Curvas de distribuição granulométrica para três tipos de sinter (JESCHAR *et al.*, 1975).

Conjugando-se os dois efeitos: fração de vazios e tamanho da partícula, conclui-se que, para minimizar a queda de pressão, deve-se objetivar:

- ✓ maior valor de fração de vazios, através de uma distribuição granulométrica estreita possível (alto valor de ϵ).
- ✓ maior tamanho médio (alto valor de d).

Baseando-se nesta conclusão podemos dizer que, do ponto de vista do escoamento gasoso, o sinter I e sinter II na Figura 3-7 são superiores ao sinter III, e entre estes o sinter II deve apresentar um melhor resultado devido ao maior tamanho médio.

No caso em que se usa minério de ferro existem dois fatores antagônicos a serem considerados. O primeiro fator indica que a medida que o tamanho das partículas é reduzido a queda de pressão aumenta. O segundo fator a ser considerado diz respeito à cinética da redução dos óxidos de ferro: a medida que o tamanho aumenta a taxa de

redução diminui. É difícil quantificar o tamanho real que otimize a queda de pressão e a cinética de redução simultaneamente, pois o nível térmico do forno (que afeta a velocidade de redução) está ligado diretamente ao escoamento gasoso. Em geral, recomenda-se um tamanho de partícula superior em torno de 6 a 10mm, pois para tamanhos inferiores o aumento da queda de pressão começa a ser considerável.

SILVEIRA e MELO (1973) estudaram a variação da queda de pressão com a velocidade a vazão de leitos de carvão vegetal, coque e minério de ferro. Os resultados estão exibidos na Figura 3-8. A queda de pressão é maior nos leitos de carvão vegetal que nos de coque, para um mesmo tamanho médio. A diferença entre estas quedas de pressão diminui com o aumento do tamanho médio sendo que, praticamente, é a mesma quando leitos de coque e carvão vegetal forem constituídos de partículas com diâmetro médio em torno de 80mm. Para um mesmo tamanho médio entre 17-80mm, o leito de carvão vegetal apresenta uma queda de pressão média superior àquela dos leitos de coque. Finalmente para tamanhos médios em torno de 17mm, as quedas de pressão nos dois leitos novamente tendem a igualar-se. Verifica-se que tanto nos altos-fornos a coque como naqueles a carvão vegetal, quando se considera unicamente o aspecto do escoamento gasoso, não seria desejável o carregamento de frações com diâmetro inferior a 17mm caso se deseje altos níveis de produção dado os elevados valores obtidos de ΔP .

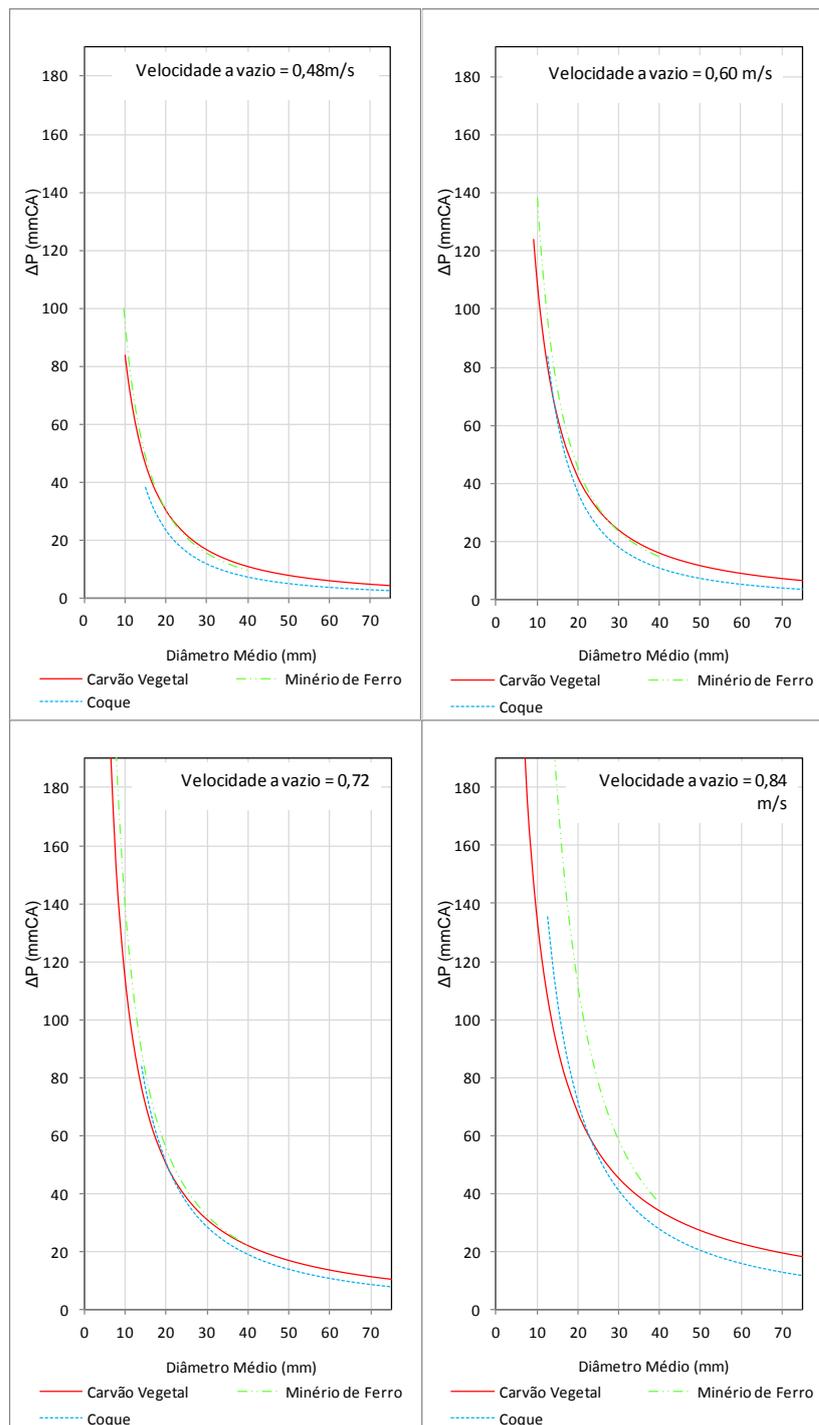


Figura 3-8: Variação da queda de pressão com o diâmetro médio do carvão vegetal, minério de ferro e coque para velocidade a vazio de 0,48; 0,60; 0,72 e 0,84m/s SILVEIRA e MELO (1973).

A Figura 3-9 mostra a variação da perda de carga em função de variações individuais das propriedades da carga: fração de vazios (ϵ), esfericidade (ϕ) e tamanho de partícula

(d), desenvolvido por JESCHAR *et al.* em 1975 em um leito de partículas constituído de coque. Veja que os efeitos de fração de vazios (ϵ) e tamanho médio (d) foram mais acentuados que os efeitos da esfericidade (ϕ).

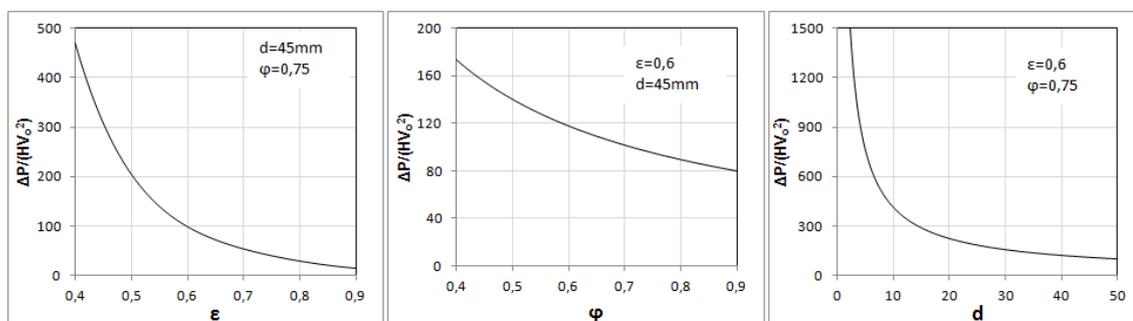


Figura 3-9: Efeitos da fração de vazios, esfericidade e tamanho médio do coque na queda de pressão (JESCHAR *et al.*, 1975).

3.4. Análise do efeito das interfaces

Nos sistemas usuais de carregamento do alto-forno são formadas camadas de carvão vegetal (ou coque) e minério de ferro (e/ou sinter, e/ou pelota) compostas das partículas de diferentes formas e tamanhos. Devido a essas diferenças, é formada uma interface na qual partículas de minério de ferro, carregadas sobre o carvão vegetal, penetram através dos vazios do leito de carvão vegetal reduzindo localmente a fração de vazios. A Figura 3-10 mostra esquematicamente este efeito. A redução de fração de vazios e a altura da interface dependem da relação entre diâmetro maior/diâmetro menor (R).

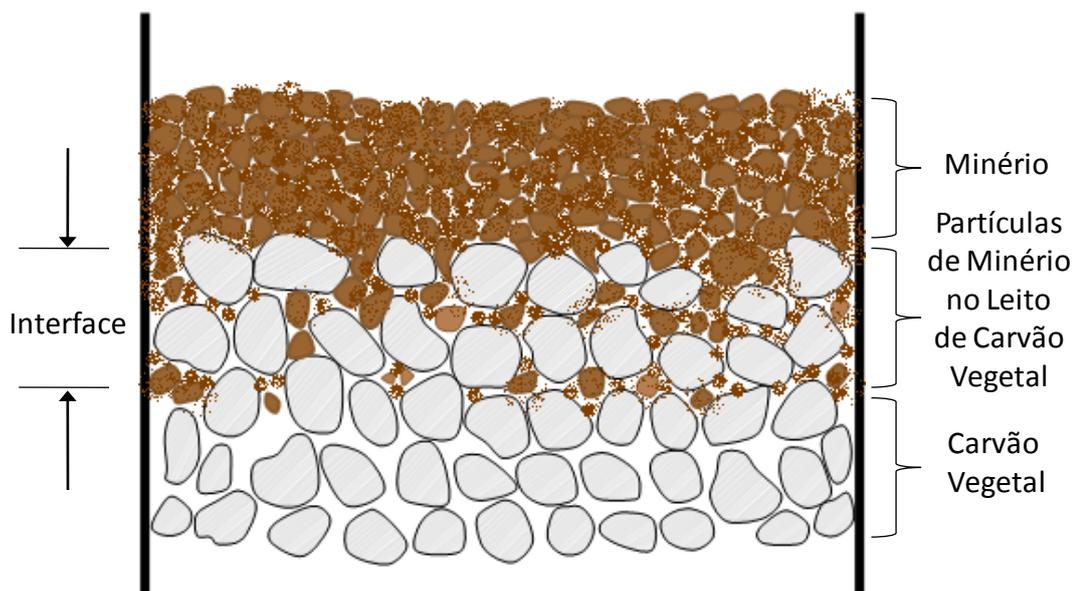


Figura 3-10: Representação esquemática de uma interface minério de ferro-carvão vegetal.

A Figura 3-11 mostra o perfil de pressão obtido para um sistema no qual partículas de 3mm são carregadas sobre partículas de 8,46mm, de acordo com os dados medidos por SZEKELY e PROPSTER (1979). Podemos ver que existe uma queda brusca de pressão na região da interface, causada pela penetração das partículas de 3mm nos interstícios das partículas de 8,46mm. Nesta Figura, a queda de pressão na interface é definida como o valor encontrado pela extrapolação dos perfis de pressão nos componentes puros para o plano interfacial. Segundo os autores, esta queda de pressão é responsável por 20-35% da queda de pressão na cuba do alto-forno.

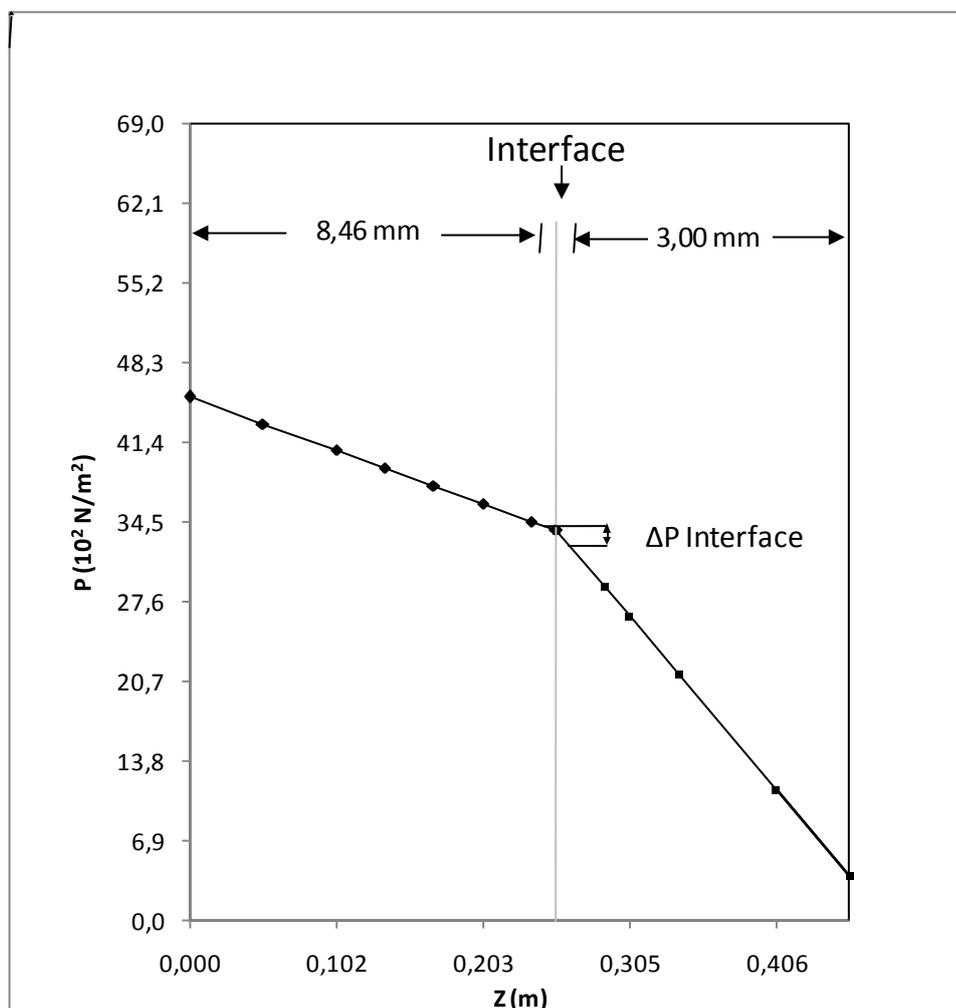


Figura 3-11: Variação da pressão (P) ao longo da altura (Z) de um leito composto de camadas horizontais de partículas 3,00mm sobre partículas de 8,46mm (SZEKELY e PROPSTER, 1979).

A queda de pressão na interface depende também do formato do perfil das camadas, por exemplo, camadas paralelas ou em V. A Figura 3-12 mostra uma comparação entre esses dois tipos de camadas. Pode-se observar que a camada V tem uma maior resistência ao fluxo gasoso. Isto acontece porque a área interfacial para camadas em V é cerca de 50% maior que aquela para camadas horizontais.

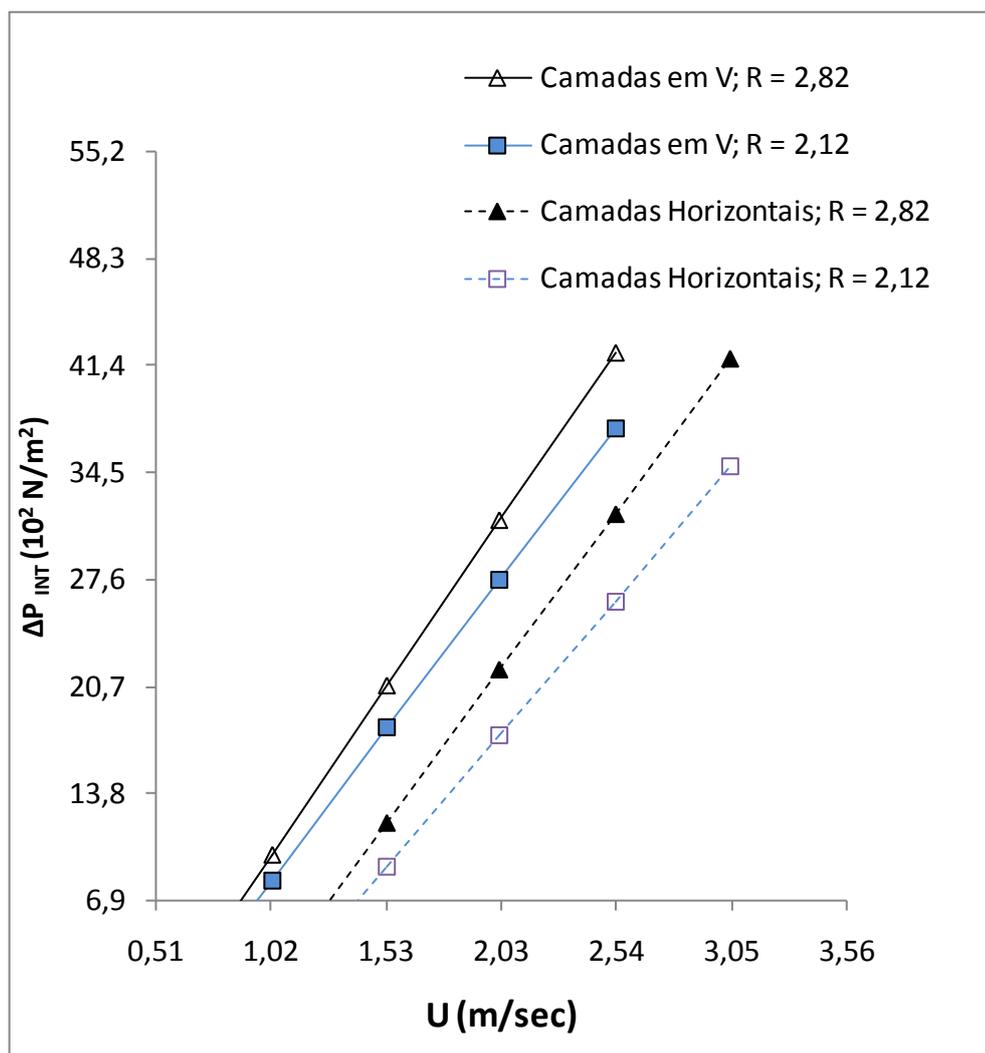


Figura 3-12: Queda de pressão interfacial como função da velocidade a vazio e da configuração do leito: tipo de camada e relação entre os diâmetros R (SZEKELY e PROPSTER, 1979).

Outro fator que ocasiona uma maior queda de pressão neste tipo de camada pode ser explicado através da Figura 3-13 (SZEKELY e PROPSTER, 1979), que mostra a trajetória do gás através de camadas na forma de V. É visível a curvatura que o gás sofre ao atravessar a interface. Esta mudança súbita de direção corresponde a uma queda de pressão adicional na interface.

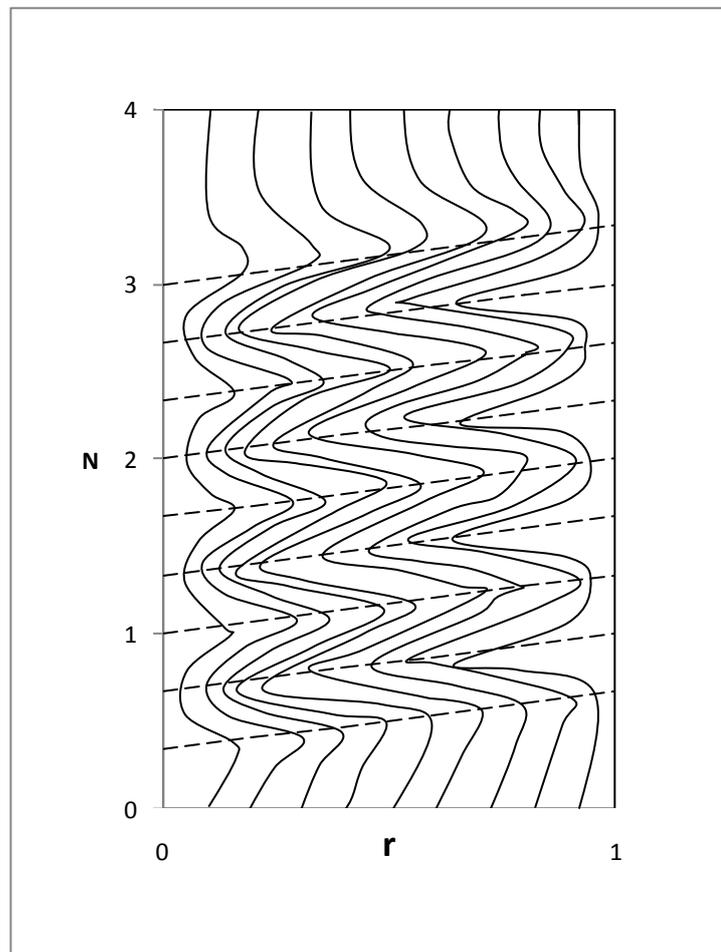


Figura 3-13: Linhas de escoamento em um leito formado por camadas em V (SZEKELY e PROPSTER, 1979).

De acordo com a Figura 3-14, que mostra a trajetória do gás ao atravessar um leito formado de camadas em M, pode-se dizer que, neste tipo de interface, a queda de pressão deve ser superior às interfaces em V ou horizontal.

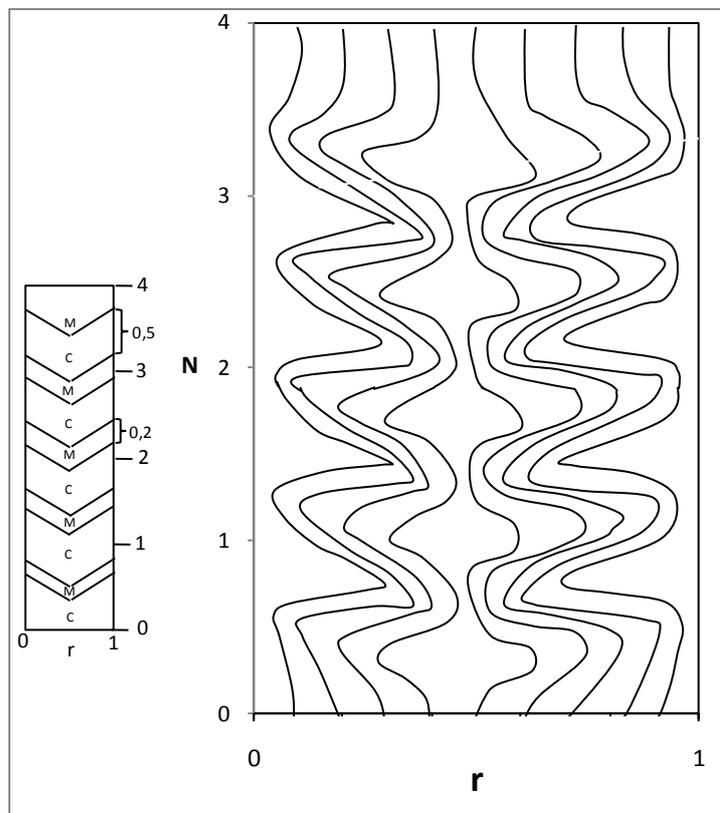


Figura 3-14: Linhas de escoamento de um leito formado por camadas em W (SZEKELY e PROPSTER, 1979).

Os resultados encontrados para coque e minério de ferro exibem a mesma tendência encontrada nos experimentos com esferas. A Figura 3-15 mostra a variação de fração de vazios da interface quando minério de ferro é carregado sobre coque medida experimentalmente por STANDISH e WILLIAMS (1975), na qual a altura da interface é considerada como aquela na qual a quantidade de vazios preenchidos é de 10%.

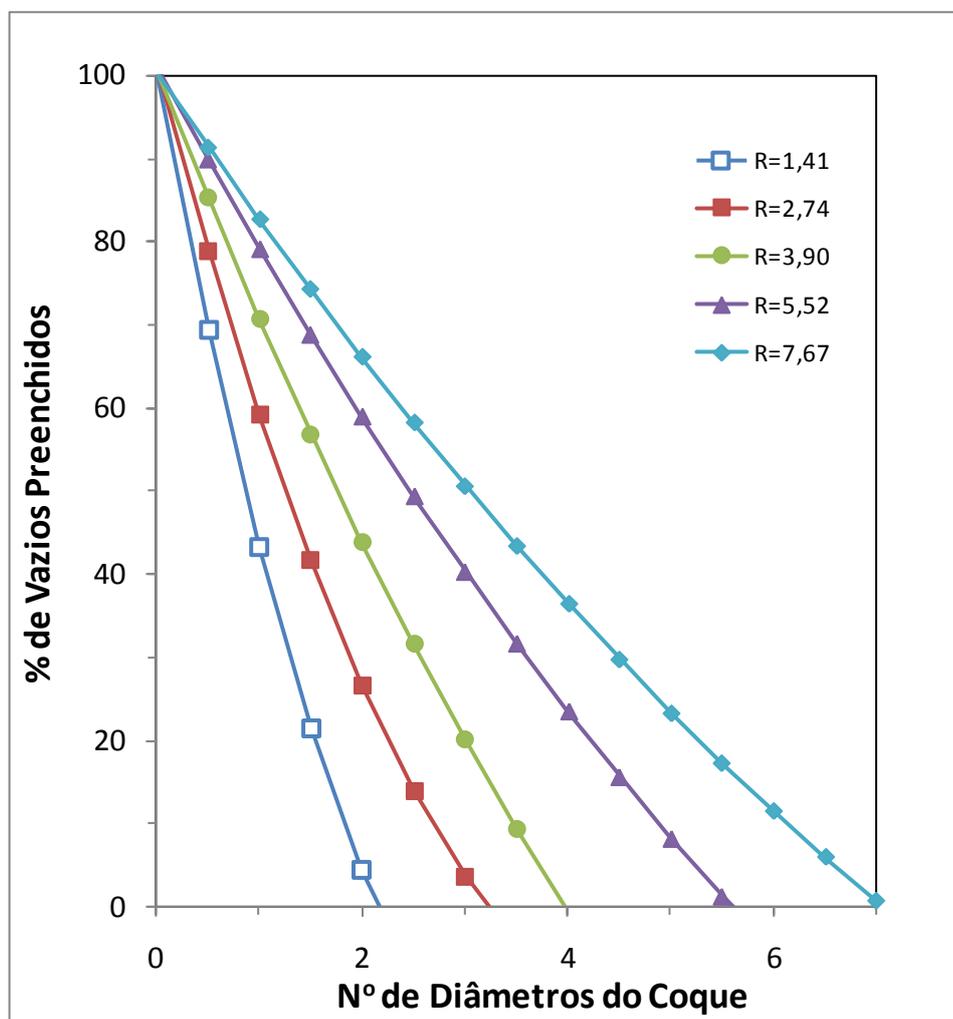


Figura 3-15: Porcentagem de vazios preenchidos em função da distância a partir da interface minério - coque. $R = \text{diâmetro coque} / \text{diâmetro minério}$ (STANDISH e WILLIAMS, 1975).

Os resultados deste exemplo mostram que, a tendência observada no comportamento das interfaces constituídas de esferas, também é seguida para coque e minério de ferro, isto é, quando R aumenta, a espessura da interface aumenta.

A partir dos resultados experimentais, STANDISH e WILLIAMS (1975) sugere que, como uma primeira aproximação, a queda de pressão em interface minério de ferro (ou sinter) – coque pode ser estimado como sendo igual a cinco vezes a queda de pressão em uma camada de coque de altura igual à espessura da interface, ou igual a metade da queda de pressão na camada de minério de ferro.

SILVEIRA e MELO (1973) analisou leitos granulados de minério de ferro (Figura 3-16) formados com diferentes faixas granulométricas em camadas e em misturas e verificou que quando a relação dos extremos da faixa é maior que 4 é aconselhável a separação em camadas diferentes. Já quando a relação em camadas é inferior a 4, é indicado o carregamento em mistura. O mesmo resultado foi encontrado quando se estudou leitos de carvão vegetal (Figura 3-17).

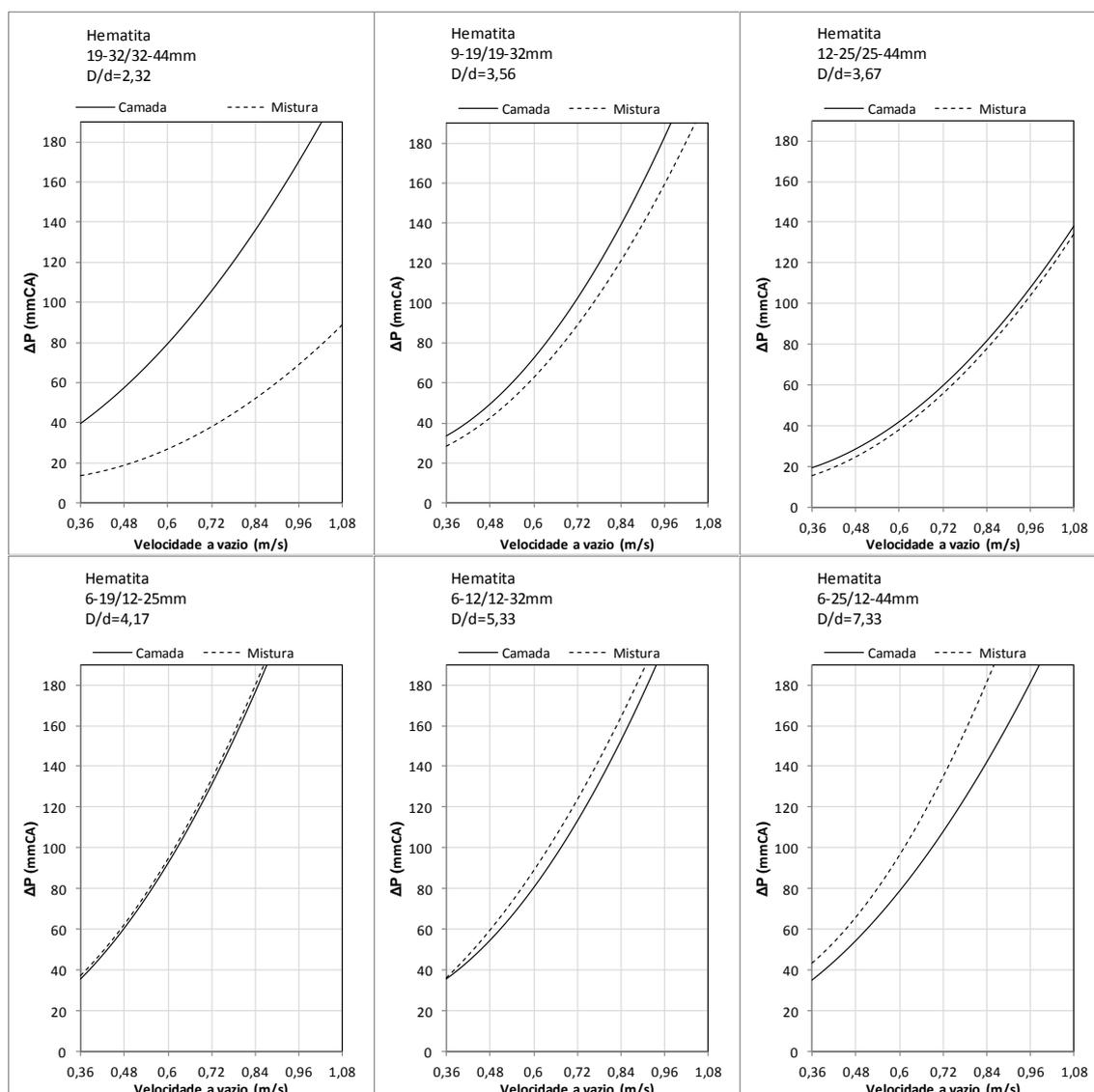


Figura 3-16:Variação da queda de pressão com a velocidade a vazio, para leitos em camada e em mistura o minério de ferro para relação granulométrica D/d : 2,32; 3,56; 3,67; 4,17; 5,33 e 7,33 (SILVEIRA e MELO, 1973).

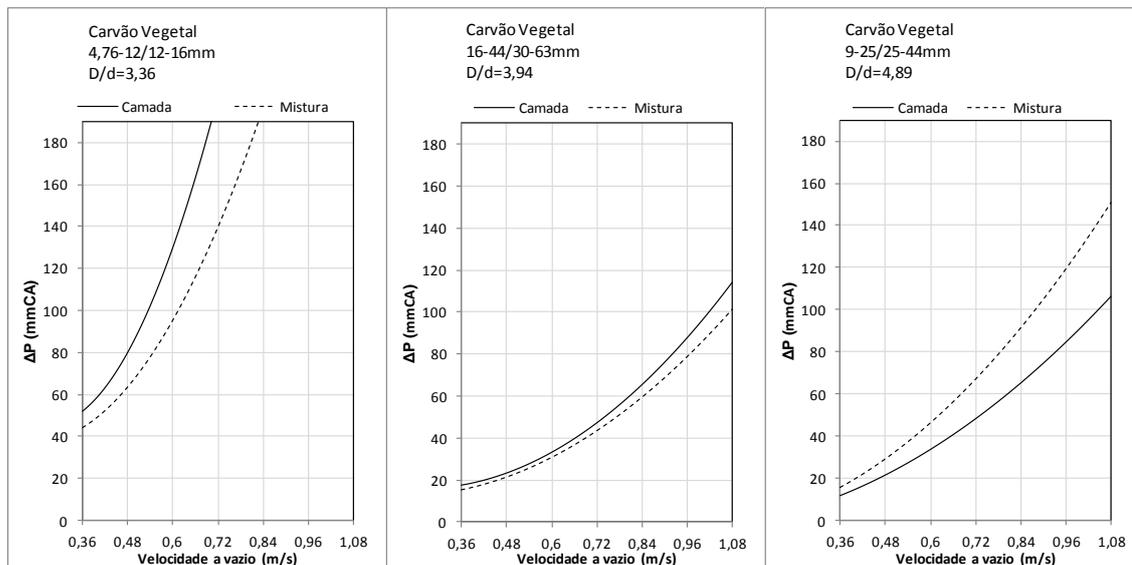


Figura 3-17: Variação da queda de pressão com a velocidade a vazio, para leitos em camada e em mistura de carvão vegetal para relação granulométrica D/d : 3,36; 3,94 e 4,89 (SILVEIRA e MELO, 1973).

3.5. Determinação das constantes geométricas de leitos granulados

A Equação de Ergun (3.74) obtida na seção 3.2, também pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot V_0} = k_1 \cdot \mu_g + k_2 \cdot \rho_g V_0 \quad (3.75)$$

Onde:

$$k_1 = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{1}{(\phi \cdot d_p)^2} \quad (3.76)$$

k_1 = coeficiente de resistência viscosa, que predomina na região de escoamento laminar (m^{-2});

$$k_2 = 1,75 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{1}{(\varphi \cdot d_p)} \quad (3.77)$$

k_2 = coeficiente de resistência inercial, que predomina na região de escoamento turbulento (m^{-1});

Para um leito de características geométricas definidas ε , φ e d , os valores de k_1 e k_2 serão constantes e denominados, portanto, de constantes geométricas do leito granulado.

A uma dada temperatura do ar, o valor de μ_g será praticamente constante e o agrupamento $\frac{\Delta P}{H \cdot V_0}$ deverá variar linearmente em função do débito mássico de ar por unidade de seção (vazão de massa). Neste caso, a ordenada na origem $k_1 \mu_g$ e a inclinação $k_2 \rho_g$ da reta experimental obtida, permitem determinar as constantes geométricas do leito granulado em relação ao escoamento gasoso, sem que seja feita hipótese alguma sobre os valores próprios de ε , φ e d e das constantes propostas por Ergun: 150 e 1,75 (SILVEIRA *et al.*, 1973).

Determinados os valores de k_1 e k_2 experimentalmente com o ar frio, pode-se facilmente também calcular os valores da queda de pressão unitária $\frac{\Delta P}{H}$ para características dos gases μ_g , V_0 e ρ_g diferentes daquelas do ar frio.

SILVEIRA e MELO (1973) encontraram as constantes geométricas de leitos de carvão vegetal, coque, minério de ferro, minério de manganês, dolomita e calcário traçando as curvas de $\Delta P/HV$ x Velocidade a Vazio. Os valores determinados em seus experimentos para os leitos de carvão vegetal estão exibidos na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Constantes geométricas dos leitos granulados de carvão vegetal (SILVEIRA e MELO, 1973).

Granulometria (mm)	Carvão Vegetal	
	$k_1 (x10^5 m^{-2})$	$k_2 (m^{-1})$
6-12	25,7	200
10-20	11,8	89,3
20-30	3,09	63
30-40	1,54	43,2
40-50	1,29	33,2
50-60	0,515	25,7
60-70	0,257	19,7

3.6. Fluidização

O fenômeno de fluidização pode ser ilustrado considerando o escoamento de um gás através de um leito poroso para valores crescentes de vazão gasosa, como mostra a Figura 3-18.

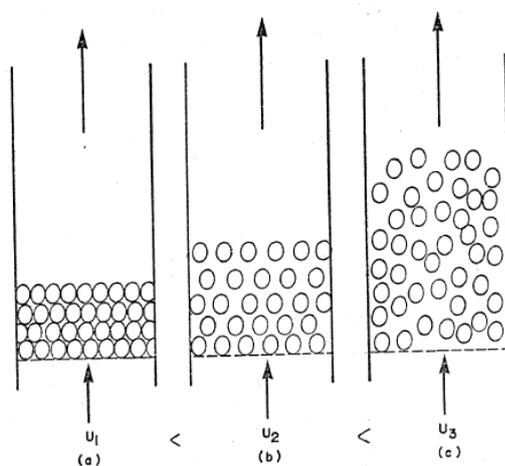


Figura 3-18: Leito Fixo em (a), leito fixo com máximo de vazios em (b) e leito fluidizado em (c) (FIGUEIRA e TAVARES, 1984).

Pode-se ver que para baixas vazões, correspondendo a baixas velocidades a vazio, o sistema comporta-se como foi visto anteriormente, isto é, como um leito poroso estável. Neste caso, a relação entre a queda de pressão através do leito e a vazão é dada pela equação de Ergun. À medida que a velocidade do gás aumenta a queda de pressão no leito aumenta até atingir um valor igual ao peso do leito. Neste ponto, ilustrado na Figura 3-18 (b), as partículas do leito se rearranjam de modo a oferecer uma menor resistência, expandindo-se até atingir a fração de vazios máxima sem perder suas características de leito fixo. À medida que a vazão aumenta o leito se expande ainda mais, as partículas passam a se movimentar mais livremente e o leito atinge o estado de fluidização: Figura 3-18 (c). Qualquer aumento de vazão provoca um arraste das partículas para fora do leito.

Esta sequência de fenômenos pode ser representada por uma curva de fluidização, como mostrada na Figura 3-19. Neste gráfico, o logaritmo da queda de pressão é plotado contra uma escala logarítmica da velocidade a vazio. Nesta figura, a linha AB corresponde à queda de pressão através do leito fixo, antes que a fluidização ocorra. O trecho BC representa o rearranjo das partículas para redução da resistência ao escoamento gasoso. No ponto C a queda de pressão no leito iguala ao peso do leito e a fração de vazios máxima da fluidização. A linha tracejada DE corresponde a variação na queda de pressão para um leito com esta fração de vazios, ϵ_m . A curva ABC representa o comportamento ideal de fluidização do leito.

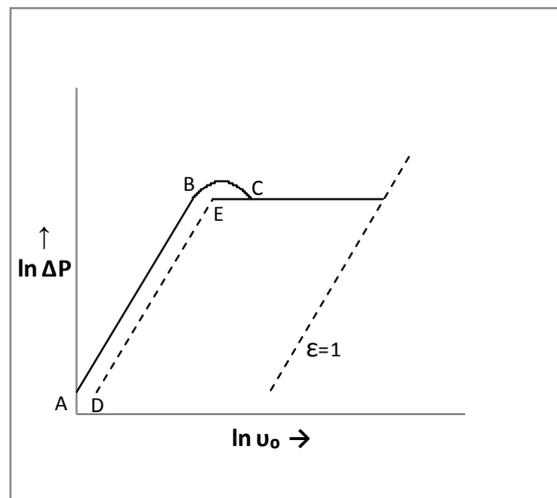


Figura 3-19: Variação da queda de pressão com velocidade a vazio (STANDISH e BORGER, 1987).

Como foi visto, o início de fluidização ocorre quando a queda de pressão no leito é igualada ao peso do leito. Baseando-se neste fato, pode-se calcular a velocidade de fluidização das partículas, isto é, a velocidade na qual ocorre o início de fluidização. Considerando uma área A transversal ao escoamento e um leito de altura H :

$$\Delta P.A = \rho_s V_s g - \rho_g V_s g \quad (3.78)$$

Ou

$$\Delta P.A = (\rho_s - \rho_g) V_s g \quad (3.79)$$

Como o volume de sólidos $V_s = (1 - \varepsilon_m).A.H$

$$\frac{\Delta P}{H} = (\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_m)g \quad (3.80)$$

Considerando que:

$$(\rho_s - \rho_g) \cdot (1 - \varepsilon) = \rho_{leito} \quad (3.81)$$

Sendo:

ρ_{leito} = densidade do leito granulado, kg/m³

Utilizando as equações (3.80) e (3.81) é possível obter a velocidade superficial do gás que dará início a fluidização, V_f :

$$V_f = \frac{-k_1 \cdot \mu_g \pm \sqrt{(k_1 \cdot \mu_g)^2 + 4 \cdot k_2 \cdot \rho_{leito} \cdot \rho_g}}{2 \cdot k_2 \cdot \rho_g} \quad (3.82)$$

Observa-se que a velocidade de fluidização V_f é função somente das características do leito (k_1 , k_2 e ρ_{leito}) e do fluido (ρ_g e μ_g).

SILVEIRA e MELO (1973) comparou a velocidade de fluidização para o coque e carvão vegetal e obteve os resultados exibidos na Figura 3-20. A Figura 3-20 (a), nos mostra a velocidade de fluidização em dependência com o diâmetro médio do carvão vegetal e do coque. Pode-se verificar que para um mesmo diâmetro médio, a velocidade de fluidização V_f para o coque é bem superior a aquela do carvão vegetal. Os valores de V_f foram obtidos da Equação (3.82), sendo que a viscosidade e a densidade do gás do alto-forno foram calculadas para temperatura de 250°C. Já a Figura 3-20 (b), nos mostra a dependência da velocidade a vazão com o diâmetro da goela, para diferentes vazões de gás. A conjugação dessas figuras possibilita determinar o diâmetro crítico das partículas de carvão vegetal e/ou do coque para uma dada produção de um alto-forno, além de determinar o seu nível máximo de produção, conhecendo-se o diâmetro das partículas de carvão vegetal ou coque. Assim, para um dado alto-forno cujo diâmetro da goela é 3,2m e cuja produção de gás é 70.000Nm³/h, as partículas de coque inferiores a 15,8mm e as de carvão vegetal inferiores a 30,5mm seriam fluidizadas.

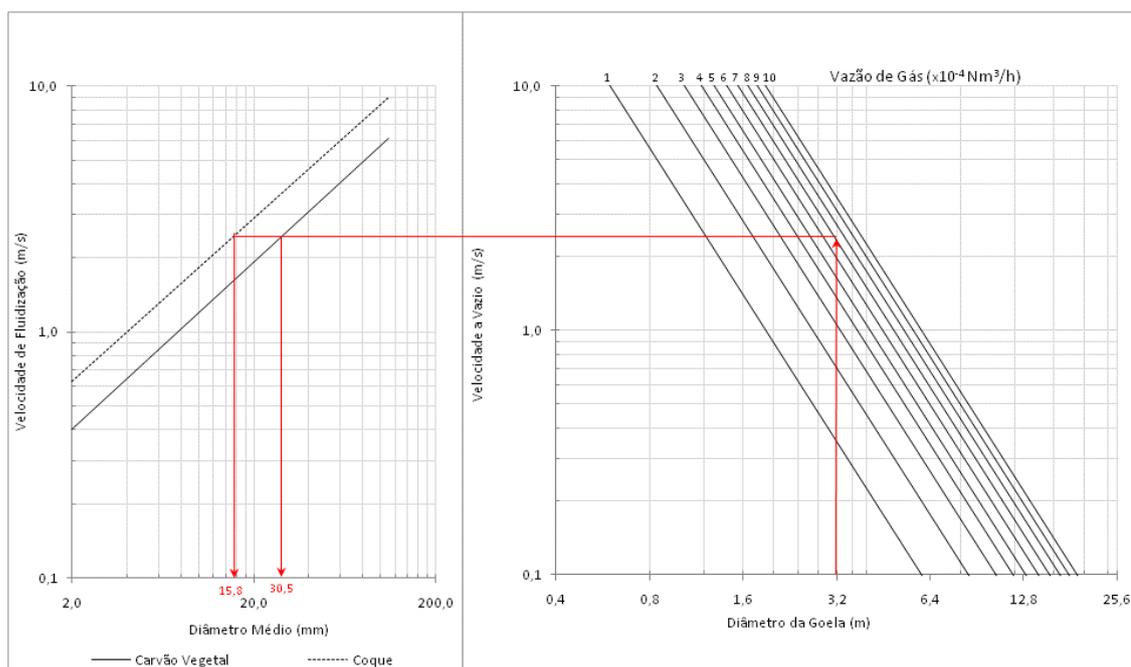


Figura 3-20: Determinação do diâmetro crítico do carvão vegetal e do coque quando se conhece o diâmetro da goela e a vazão de gás de um dado alto-forno (SILVEIRA e MELO, 1973).

Na verdade existem certos fatores que afetam este comportamento. Um desses fatores é o fenômeno chamado de “chaminés”. Este fenômeno ocorre quando o gás passa preferencialmente em certas regiões do leito. Sob estas condições parte do leito pode fluidizar quando o restante permanece fixo. Conseqüentemente pode haver fluidização de algumas partículas para velocidades nas quais em uma distribuição homogênea não haveria.

4. Metodologia

4.1. Módulo experimental e plano de teste dos ensaios de permeabilidade

O equipamento experimental apresentado na Figura 4-1 foi projetado e construído na Vallourec Tubos do Brasil, Belo Horizonte, MG. É composto por um leito de secção transversal circular de aço carbono de 1200mm de diâmetro e 1000mm de altura, ligado a um exaustor centrífugo (Brasfaiber, EC/122-186-TI, 10hp, 7.342m³/h), por uma tubulação de 12in de diâmetro. Para a realização dos ensaios foram instalados um inversor de frequência acoplado ao ventilador e um elemento primário de medição de vazão, tipo haste de inserção multifuros. Para as tomadas de pressão utilizou-se de tubos em U, graduados e preenchidos com água, ligados ao leito por meio de mangueiras de silicone.



Figura 4-1: Módulo experimental utilizado nos ensaios de permeabilidade.

O fluxograma dos ensaios pode ser assim detalhado (Figura 4-1):

- com auxílio da talha elétrica, o material pesado e peneirado na faixa granulométrica desejada é colocado no interior do tubo suporte do leito, sobre a tela de 6mm, sem que haja a compactação do material. Cada leito é cuidadosamente montado evitando a formação de caminhos preferenciais;
- a altura do leito granulado, em todas as medições é mantida igual a 1m;
- com o auxílio do ventilador, passa-se um volume de ar crescente através do leito granulado sendo que o acrescimento de vazão é feito com o uso de um inversor de frequência;
- são feitas as medições de temperatura e pressão do ar insuflado;
- são medidas, para cada leito ensaiado, as quedas de pressão ΔP em 4 manômetros Tubo “U” posicionados radialmente no tubo suporte do leito granulado;
- as vazões são determinadas pela sonda de medição posicionada entre o ventilador e o tubo suporte do leito granulado.

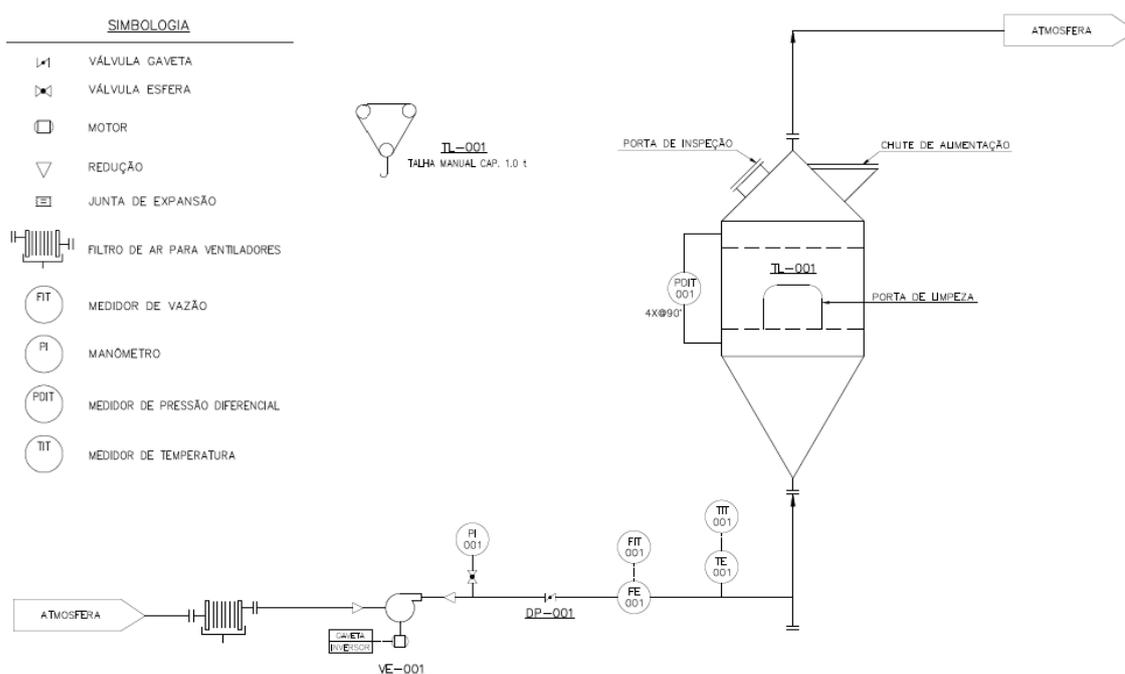


Figura 4-2: Fluxograma esquemático dos ensaios de permeabilidade.

Conhecendo-se: as vazões experimentadas, a altura da camada do leito granulado e as condições de temperatura e pressão da experiência, ficam então definidos as variáveis os valores de ΔP , H , V_0 , μ_g , e ρ_g na equação de Ergun (3.75), restando apenas as variáveis que estão relacionadas às características do leito (k_1 e k_2). Essas variáveis são então obtidas através da linearização dos dados, obtendo uma equação da forma: $Y=A+BX$.

4.2. Descrição das amostras utilizadas

Todas as amostras foram coletadas no pátio de matéria-prima da Vallourec Tubos do Brasil, da seguinte forma:

- a) NPO e HTT: retirados da correia que alimenta o AF2 após peneiramento com tela de 10mm, com o auxílio de um amostrador do tipo Cross Belt.
- b) Carvão Médio: retirado da correia que alimenta o AF2 após peneiramento em tela inferior de 10mm e superior de 32mm, com o auxílio de um amostrador do tipo Cross Belt.
- c) Carvão Grosso: retirado da correia que alimenta o AF2 após peneiramento em tela inferior de 32mm e superior de 125mm, com o auxílio de um amostrador do tipo Cross Belt.
- d) Carvão: amostra formada pela retirada de carvão médio e grosso, conforme itens anteriores, na proporção em massa 1:1.
- e) Pelota e fundentes: foram coletadas diretamente nas pilhas de estoque do pátio.

As faixas granulométricas especificadas junto aos fornecedores de cada matéria-prima encontram-se na Tabela 4-1 abaixo.

Tabela 4-1: Faixas granulométricas especificadas junto aos fornecedores de cada matéria-prima.

Material	Faixa Granulométrica Especificada (mm)
NPO	6-30
HTT	6-16
Pelota A	8-18
Pelota B	8-18
Pelota B Peneirada	8-18
Carvão	10-125
Carvão Grosso	32-125
Carvão Médio	10-32
Quartzo	12,7-25,4
Dolomita	12,7-25,4

Além dos ensaios compostos por somente 1 tipo de material da Tabela 4-1, também foi realizado o experimento utilizando diversas camadas de materiais sobrepostas, visando simular uma carga típica do Alto-Forno 2 da Vallourec. Para tanto os valores empregados no teste foram:

Tabela 4-2: Faixas granulométricas especificadas junto aos fornecedores de cada matéria-prima.

Camadas	Material	Peso/carga AF2 (Kg/carga)	(% em v/v)	Peso/carga Medidor (Kg/carga)	
1	HTT	920	2%	51,8	HTT
2	Pelota B	3699	9%	208,4	PELOTA B
3	Quartzo	66	0%	3,7	HTT
4	Dolomita	138	1%	7,8	PELOTA B
5	HTT	920	2%	51,8	CARVÃO GROSSO
6	Pelota B	3699	9%	208,4	
7	Quartzo	66	0%	3,7	CARVÃO MÉDIO
8	Dolomita	138	1%	7,8	
9	Carvão Grosso	1660	39%	93,5	
10	Carvão Médio	1660	36%	93,5	

4.3. Procedimento para a determinação da fração de vazios (ϵ)

A Fração de Vazios foi obtida através da Medição da Densidade Relativa Aparente, utilizando a norma “NBR 9165: Carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade”.

O procedimento contempla a imersão da amostra previamente quarteada, peneirada e seca em um recipiente cilíndrico preenchido com água, conforme Figura 4-3.

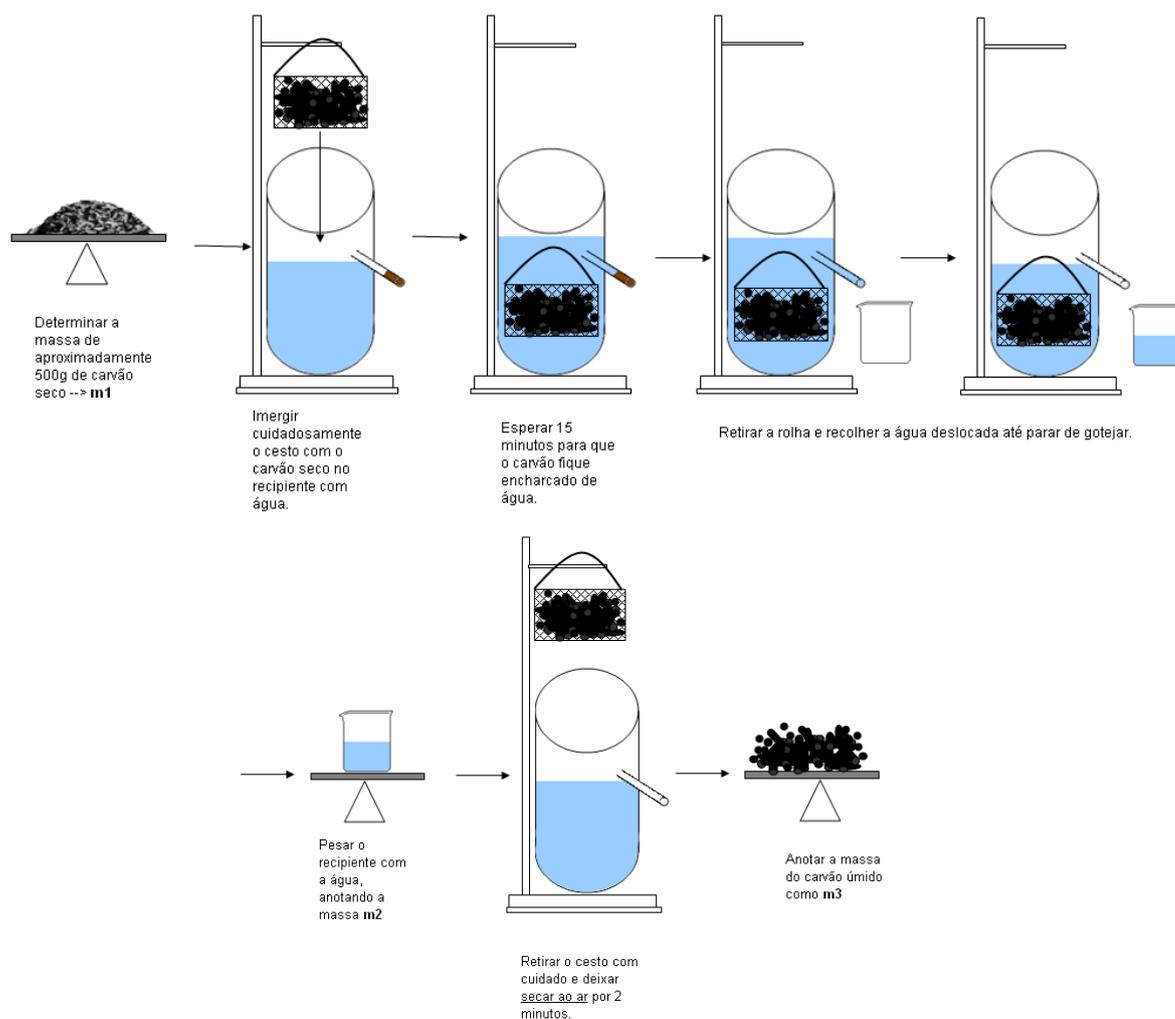


Figura 4-3: Execução do ensaio da norma NBR 9165: Carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade.

O cálculo da fração de vazios é então calculado utilizando a Equação (4.4) abaixo:

$$D_A = \frac{m1}{m2 + (m3 - m1)} \times \rho_{\acute{a}gua} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{Volume das partículas}}{\text{Volume do leito}} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{Peso de material alimentado (kg) / Densidade aparente (kg/m}^3)}{\text{Volume do leito (m}^3)} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{Densidade a granel (kg/m}^3)}{\text{Densidade aparente (kg/m}^3)} \quad (4.4)$$

4.4. Procedimento para a determinação da esfericidade (φ)

Para determinação da esfericidade das partículas, foram coletadas aleatoriamente 200 partículas de cada material seco a 105°C até massa constante, de forma proporcional a análise granulométrica e tomadas a maior dimensão (M) e a menor dimensão (m) em cada partícula analisadas, com o auxílio de um paquímetro digital, conforme NBR7809 - Determinação do Índice de forma pelo método do paquímetro.



Figura 4-4: Metodologia de determinação da esfericidade pelo uso do paquímetro em uma amostra de pelota.

A esfericidade da amostra é então determinada pela Equação (4.5):

$$\varphi = \sum x_i \cdot \frac{m_i}{M_i} \quad (4.5)$$

4.5. Procedimento para a determinação do tamanho médio (d)

O tamanho médio da partícula é definido em termos de aberturas das peneiras onde as partículas são tratadas. Dessa forma, pode-se também considerar situações onde o tamanho das partículas não seja uniforme. Nesse caso, define-se um tamanho médio a partir da análise granulométrica.

Quando se tem partículas não esféricas, com uma certa distribuição granulométrica o valor do tamanho médio das partículas é determinado através da seguinte relação:

$$d = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{(\%i)/100}{d_i}} \quad (4.6)$$

Onde:

N=número de peneiras usadas no peneiramento e onde o material ficou retido;

d= tamanho médio

d_i= diâmetro médio do material retido na peneira i;

(%i) = porcentagem de material retido na peneira i.

4.6. Tratamento Estatístico dos Dados

➤ Coeficiente de Variação (CV)

O coeficiente de variação é uma medida de dispersão empregada para estimar a precisão de experimentos e representa o desvio-padrão expresso como porcentagem da média. Como medida de dispersão, a principal qualidade do coeficiente de variação CV é a capacidade de comparar resultados que envolvem a mesma variável-resposta, permitindo quantificar a precisão das pesquisas. Em igualdade de condições, é mais preciso o experimento com menor coeficiente de variação. A distribuição do CV possibilita estabelecer faixas de valores que orientem os pesquisadores sobre a validade de seus experimentos.

$$CV = \frac{S}{X} \times 100 \quad (4.7)$$

A média aritmética (X) de um conjunto de valores é o valor obtido somando-se todos eles e dividindo-se o total pelo número de valores. Essa medida particular de tendência central é utilizada frequentemente e designada simplesmente como média.

O desvio-padrão (S) de um conjunto de valores amostrais é uma medida da variação de todos os valores em relação à média. Ele mostra o quanto de variação ou "dispersão" existe em relação à média. Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média; um desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados por uma gama de valores:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.8)$$

O coeficiente de variação será utilizado na avaliação da análise dos seguintes resultados:

- ✓ Variação da pressão diferencial ao longo do raio do tubo suporte do leito.
- ✓ Variação da pressão diferencial ao longo do perímetro do tubo suporte do leito.
- ✓ Variação da vazão do ar insuflado.

➤ Método da Identidade de Modelos

Trata-se de um teste bastante geral que verifica a igualdade de duas ou mais regressões lineares, cujo algoritmo segue os seguintes passos:

- 1) Dadas as seguintes relações lineares:

$$\begin{aligned} y_{1i} &= a_1 + b_1 x_{1i} + e_{1i} & i &= 1, \dots, n_1 \\ y_{2i} &= a_2 + b_2 x_{2i} + e_{2i} & i &= 1, \dots, n_2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

referentes a dois conjuntos de observações.

- 2) Combinam-se todas as n_1+n_2 observações e calcula-se a estimativa de quadrados mínimos de a e b na regressão combinada $y=a+bx+e$. Desta equação obtêm-se a soma de quadrados de resíduo (S_1) com grau de liberdade igual a n_1+n_2-p , em que p é o número de parâmetros a ser estimado.
- 3) Obtêm-se a soma de quadrados de resíduo para as duas equações, ou seja, S_2 e S_3 , com os graus de liberdade n_1-p e n_2-p , respectivamente. Somam-se estas duas somas de quadrados de resíduo, isto é, $S_4=S_2+S_3$ e seus graus de liberdade n_1+n_2-2p .
- 4) Obtém-se $S_5=S_1-S_4$.
- 5) Calcula-se a estatística F como:

$$F_c = \frac{S_5 / p}{S_4 / (n_1 + n_2 - 2p)} \quad (4.10)$$

Com p e n_1+n_2-2p graus de liberdade.

Se $F_c > F$ tabelado, para um determinado nível de significância α , rejeita-se a hipótese de que os parâmetros a 's e b 's são os mesmos para os dois conjuntos de observações.

5. Resultados e Discussão

5.1. Resultados das medições de fração de vazios (ϵ), esfericidade (ϕ) e tamanho médio (d).

As tabelas seguintes exibem os resultados das grandezas características dos leitos granulados objetos deste estudo: fração de vazios (Tabela 5-1), esfericidade (Tabela 5-2) e tamanho médio (Tabela 5-3 e Tabela 5-4).

Tabela 5-1: Resultado da fração de vazios (ϵ) para cada amostra estudada.

Material	Densidade a Granel (kg/m^3)	Densidade Aparente (kg/m^3)	ϵ
Pelota A (8-18mm)	1.982	2.649	0,25
Pelota B (8-18mm)	2.010	2.582	0,22
NPO (6-30mm)	1.798	2.520	0,29
HTT (6-16mm)	1.849	2.311	0,20
Carvão Médio (32-10mm)	230	321	0,28
Carvão Grosso (125-32mm)	212	316	0,33
Carvão (10-125mm)	221	297	0,26

Tabela 5-2: Resultado da esfericidade (ϕ) para cada amostra estudada.

Material	Maior Dimensão (mm)	Menor Dimensão (mm)	ϕ
Pelota A (8-18mm)	11,61	11,38	0,98
Pelota B (8-18mm)	13,31	12,81	0,96
NPO (6-30mm)	37,61	17,85	0,47
HTT (6-16mm)	16,44	7,10	0,43
Carvão Médio (32-10mm)	32,25	10,92	0,39
Carvão Grosso (125-32mm)	51,35	20,00	0,34
Carvão (10-125mm)	41,80	15,46	0,37

Tabela 5-3: Resultados de tamanho médio (d) e distribuição granulométrica das amostras de NPO, HTT e pelotas.

Material	Tamanho Médio (mm)	Distribuição Granulométrica - mm (%)							
		31,7	25,4	19,1	15,9	12,7	7,93	6,35	<6,35
Pelota A (8-18mm)	10,7	-	-	-	1,2	14,7	80,0	1,3	2,8
Pelota B (8-18mm)	12,4	-	-	-	1,6	55,1	39,0	2,3	2,0
NPO (6-30mm)	21,4	8,5	20,8	24,2	17,3	11,5	8,1	1,9	7,8
HTT (6-16mm)	9,9	-	-	-	2,5	12,6	56,2	15,0	13,7

Tabela 5-4: Resultados de tamanho médio (d) e distribuição granulométrica das amostras de carvão.

Material	Tamanho Médio (mm)	Distribuição Granulométrica - mm (%)							
		76,4	50,8	32	22,5	15	10	<10	
Carvão Médio (10-32mm)	18,3	0,1	0,3	2,2	22,9	34,9	31,8	7,8	
Carvão Grosso (32-125mm)	36,5	3,3	8,8	42,3	27,1	11,1	4,5	2,9	
Carvão (10-125mm)	27,3	1,7	4,6	22,3	25,0	23,0	18,2	5,4	

A amostra de carvão é composta pelas amostras de carvão médio e carvão grosso, na proporção 1:1 e portanto os resultados de qualidade desse material encontra-se em valores intermediários às amostras de carvão médio e carvão grosso. As amostras de carvão apresentam maiores frações de vazio (ϵ) e maior tamanho médio (d) quando comparadas aos demais materiais, porém possui menor esfericidade (ϕ). O seu formato é bastante irregular mas se assemelha ao formato geométrico de um tronco de cone.



Figura 5-1: Amostra de carvão submetida aos ensaios visando determinação das grandezas características do leito.

A HTT possui a menor fração de vazio, menor tamanho médio e, além das amostras de carvão, apresenta os menores valores de esfericidade. Ou seja, possui alto grau de acomodação entre suas partículas, indicando baixa permeabilidade a passagem de gás.

Dentre as cargas metálicas estudadas, o minério NPO possui o maior tamanho médio e maior fração de vazios, apesar de apresentar faixa de distribuição granulométrica bastante ampla (6-30mm).

Conforme esperado, a esfericidade das pelotas são próximas de 1. Os 2 tipos estudados (fornecedores A e B) apresentam diferenças em relação à distribuição de tamanho. Enquanto apenas 14,7% da Pelota A encontra-se retida na malha de 12,7mm, na Pelota B esse percentual sobe para 55,1%. Devido a isso a Pelota B possui maior tamanho médio se comparada com a Pelota A.

5.2. Determinação das Constantes Geométricas de Leitos Granulados (k_1 e k_2) a Partir dos Ensaio de Permeabilidade - Variação da pressão ao longo do raio e do perímetro do tubo suporte do leito.

Conforme já detalhado, para a análise da variação ao longo do raio, foram feitas leituras de pressão tomadas em 7 pontos equidistantes (10/10 cm) ao longo da posição 2 em direção ao centro do tubo suporte do leito. Já para a avaliação da variação dos dados ao longo do perímetro do suporte, foram feitas leituras de pressão em 4 pontos equidistantes ao longo do perímetro do tubo suporte do leito, para cada posição do inversor em todos os experimentos. Para cada conjunto de resultados foi aplicado o cálculo do CV, pela Equação (4.7). O maior valor obtido de CV foi inferior a 6% (Figura 5-2).

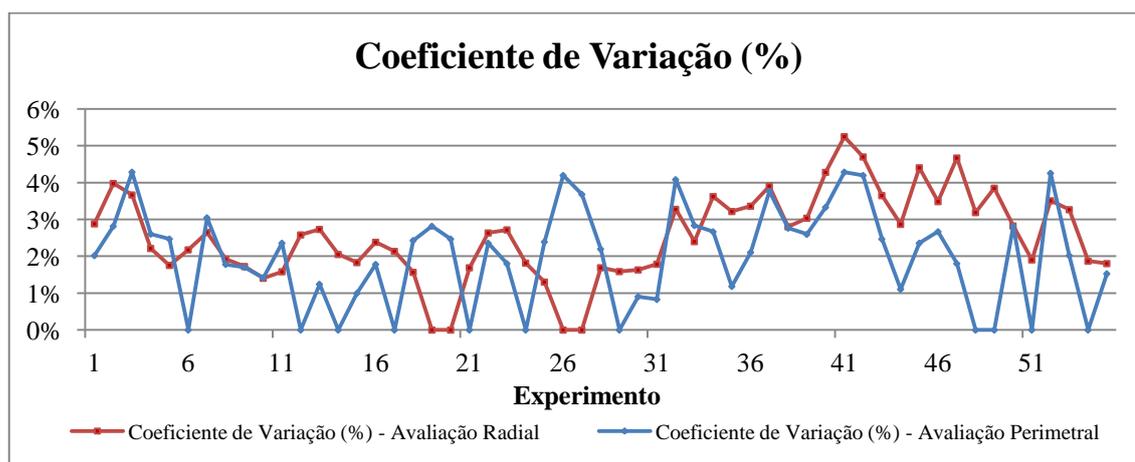


Figura 5-2: Resultados do coeficiente de variação medidos ao longo do raio e do perímetro do tubo suporte do leito granulado.

Isso nos indicam a princípio que não há variação significativa da pressão ao longo do raio e do perímetro do tubo suporte do leito, ou seja, a passagem preferencial do ar no dispositivo não acarreta em variações significativas de queda de pressão ao longo do raio ou ao longo do perímetro do equipamento. Contudo, os cálculos de balanço de momento desenvolvidos até aqui nos mostra que o mais adequado seria realizar as medições de velocidade do ar e não de diferencial de pressão. Para as demais observações e discussões feitas no decorrer deste relatório, serão considerados os resultados da posição 2.0, localizada junto a parede do tubo.

5.3. Determinação das Constantes Geométricas de Leitos Granulados (k_1 e k_2) a Partir dos Ensaio de Permeabilidade - Análise da reprodutibilidade dos resultados.

Para avaliar a reprodutibilidade dos resultados do equipamento medidor de diferencial de pressão, as amostras de pelota A foram submetidas 3 vezes consecutivas ao mesmo teste. A escolha do uso da pelota é devido a sua resistência mecânica ao ser manipulada. Os resultados destes experimentos são mostrados na Figura 5-3. A permeabilidade do medidor vazio foi avaliada e considerada desprezível.

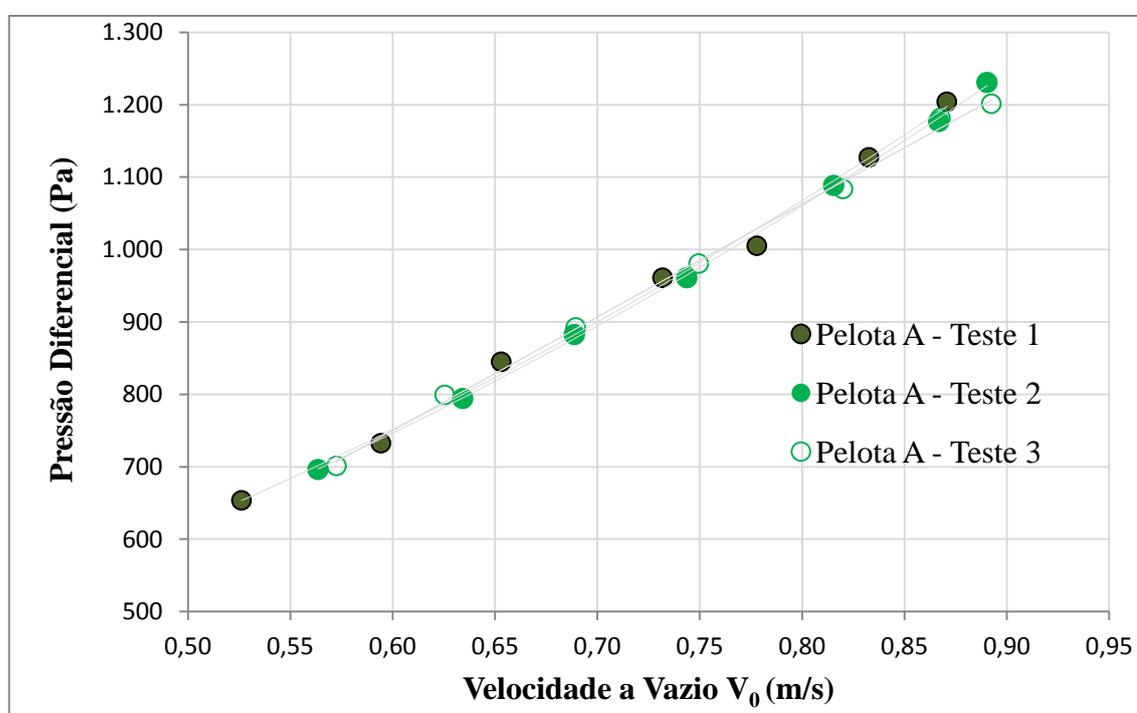


Figura 5-3: Linearização dos resultados dos Experimentos 4 e 5.

O teste Método da Identidade de Modelos foi adotado a fim de verificar a igualdade das três regressões lineares obtidas e assim comprovar a repetitividade dos resultados, cujo algoritmo já foi explicado no item 1.4.6: Tratamento Estatístico dos Dados. Dessa forma temos:

Pelota A – Teste 1: $Y=207+1740X \rightarrow S_1=13,519 \rightarrow n_1 = 7$

Pelota A – Teste 2: $Y=233+1767X \rightarrow S_2=4,363 \rightarrow n_2 = 7$

Pelota A – Teste 3: $Y=168+1818X \rightarrow S_3=11,353 \rightarrow n_3 = 7$

Pelota A – Testes 1, 2 e 3: $Y=192+1790X \rightarrow S_4=35,827$

$$S_5 = S_1 + S_2 + S_3 = 13,519 + 4,363 + 11,353 = 29,235$$

$$S_6 = S_4 - S_5 = 35,827 - 29,235 = 6,592$$

Pela Equação (4.10), $F_C = (6,592/2)/(29,235/(7+7+7-3*2)) = 1,69$

Considerando $\alpha=0,05$, $u=p=2$ e $v=n_1+n_2+n_3-3*p=15$, tem-se que F tabelado = 3,10

Como $F_C < F$, foi verificado que os parâmetros das equações lineares dos 3 experimentos são os mesmos e, portanto, o teste apresentou repetibilidade para a amostra estudada. Isso significa que a aleatoriedade da disposição da acomodação natural do material dentro do tubo suporte não afeta os resultados.

5.4. Determinação das Constantes Geométricas de Leitos Granulados (k_1 e k_2) a Partir dos Ensaio de Permeabilidade - Análise dos resultados dos ensaios de permeabilidade

Analisando a Figura 5-4, é possível perceber que, em todos os leitos estudados, quanto maior a vazão de gás aplicada no leito, e portanto maior a velocidade, maior é o diferencial de pressão sofrido pelo gás ao percorrer a camada de leito poroso.

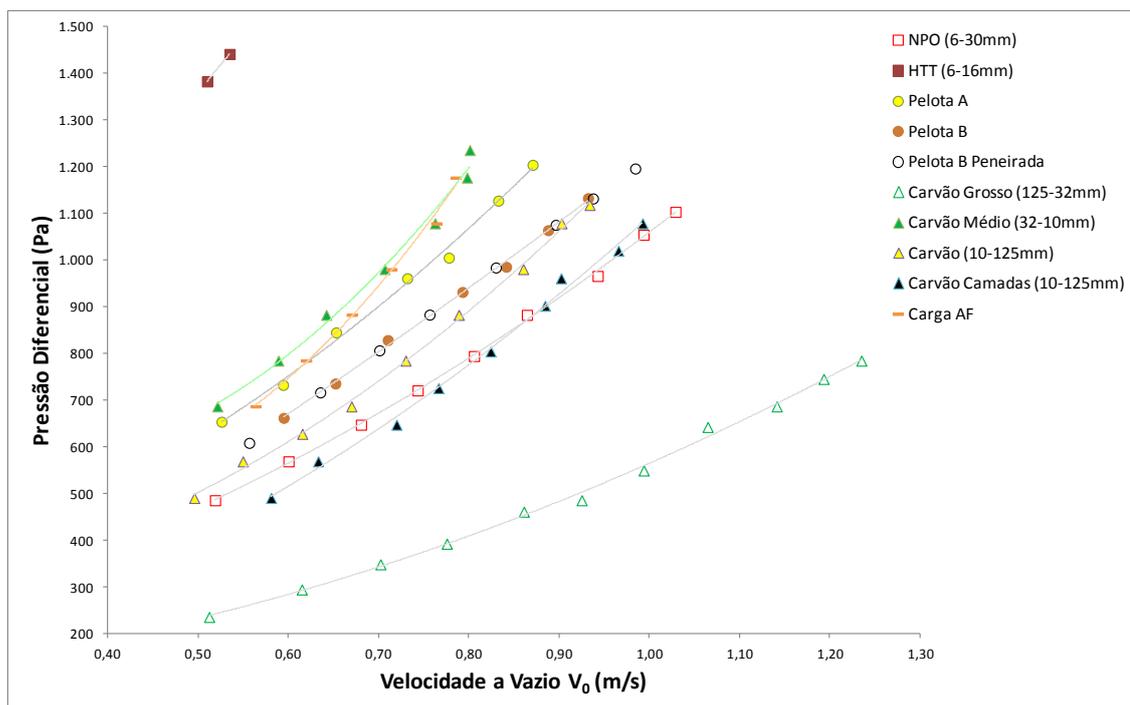


Figura 5-4: Resultados dos ensaios de permeabilidade.

Considerando os resultados do carvão vegetal, os menores valores de resistência à passagem do gás, e portanto menor ΔP , foi o carvão grosso (125-32mm), lembrando que apesar de apresentar baixa esfericidade, possui elevado tamanho médio e fração de vazios. Por outro lado, a maior perda de carga foi a do carvão médio (10-32mm) e a intermediária a do carvão (10-125) que cobre toda a faixa estudada. Ou seja, mesmo o estreitamento da faixa granulométrica do carvão médio não foi capaz de compensar a redução do tamanho médio. Em relação ao carvão vegetal, o tamanho médio demonstrou grande influência na permeabilidade dos leitos. O aumento de tamanho médio do carvão de 18 para 36mm provoca redução de diferencial de pressão para 1/3. Comparando os resultados do carvão (10-125) e do carvão camadas (10-125), vemos que quando o carvão médio e grosso é disposto em camadas no leito granulado, esta configuração oferece menor perda de carga.

No que diz respeito às cargas metálicas, a hematitina apresentou valores de perda de carga bem superiores aos demais materiais estudados. Devido à limitação da potência do ventilador, somente foi possível obter 2 pontos no gráfico, não sendo portanto

razoável a geração dos resultados de linearização da relação de perda de carga e velocidade do gás a vazio.

Os valores de perda de carga do minério NPO ficaram abaixo dos resultados da pelota de ambos os fornecedores por apresentar maior tamanho médio, apesar da amplitude da faixa granulométrica ser superior aos demais materiais. Dentre os 2 tipos de pelota, a pelota B que possui maior tamanho médio apresentou menor resistência a passagem do ar.

Os resultados do experimento simulando uma carga típica do Alto-Forno 2 da Vallourec ficaram situados num patamar próximo ao do carvão médio (10-32mm), responsável por 50% do peso de carvão, e da pelota A, que compõe 80% da carga metálica utilizada.

Correlacionando os dados de Pressão Diferencial / Velocidade a Vazio X Velocidade a Vazio, foram obtidos os valores de coeficiente da reta experimental “A” e “B”, de uma equação do tipo $Y=A+BX$, conforme pode ser verificado na Tabela 5-5. Veja que para a grande maioria dos experimentos o valor de R^2 ficou acima dos 90% sendo o menor deles 82%, o que representa uma boa correlação.

Tabela 5-5: Resultados da regressão linear para determinação dos coeficientes “A” e “B” nos ensaios de permeabilidade.

Material	Coef. da Reta "A" ($\text{kg/m}^3\text{s}$)	Coef. da Reta "B" (kg/m^4)	R^2
Pelota A (8-18mm)	1.018	399	86%
Pelota B (8-18mm)	951	279	93%
NPO (6-30mm)	776	277	94%
HTT (6-16mm)	3.052	-670	-
Carvão Médio (32-10mm)	946	668	82%
Carvão Grosso (125-32mm)	320	249	96%
Carvão (10-125mm)	740	479	93%

Abaixo na Tabela 5-6 estão listadas as condições de temperatura (T) e pressão atmosférica (Pa) durante a execução de cada experimento e os valores correspondentes de viscosidade (μ) e densidade do ar insuflado (ρ).

Tabela 5-6: Valores de viscosidade e densidade do ar utilizado nos ensaios permeabilidade.

Material	T (°C)	P (Pa)	μ (kg/(m.s))	ρ (kg/m ³)
Pelota A (8-18mm)	30,0	91.192,50	1,857E-05	1,05
Pelota B (8-18mm)	31,6	91.192,50	1,864E-05	1,04
NPO (6-30mm)	31,1	91.192,50	1,862E-05	1,04
HTT (6-16mm)	-	-	-	-
Carvão Médio (32-10mm)	31,2	91.192,50	1,862E-05	1,04
Carvão Grosso (125-32mm)	30,1	91.192,50	1,857E-05	1,05
Carvão (10-125mm)	33,1	91.192,50	1,871E-05	1,04

No que se refere a análise da Pelota B, com e sem peneiramento em 6,35mm para remoção de 2% de finos, o resultado calculado abaixo mostra que a diferença não foi significativa. Veja novamente na Figura 5-4, que os resultados de $P \times V_o$ são muito próximos, evidenciando que a remoção de 2% dos finos na pelota não gera efeitos significativos no que diz respeito ao escoamento gasoso na zona seca.

$$\text{Pelota B: } Y=96,97+28,45X \rightarrow S_1=6,0352 \rightarrow n_1 = 7$$

$$\text{Pelota B peneirada: } Y=87,08+26,00X \rightarrow S_2=17,864 \rightarrow n_2 = 8$$

$$\text{Pelota B e Pelota B peneirada: } Y=93,78+24,46X \rightarrow S_3=26,7865$$

$$S_4 = S_2 + S_3 = 6,0352 + 17,864 = 23,8992$$

$$S_5 = S_1 - S_4 = 26,7865 - 23,8992 = 2,8873$$

$$\text{Pela Equação (4.10), } F_c = (2,8873/2) / (23,8992 / (7+8-2*2)) = 0,67$$

Considerando $\alpha=0,05$, $u=p=2$ e $v=n_1+n_2-2*p=11$, tem-se que F tabelado = 3,98. Como $F_c < F$ tabelado, não há diferença significativa.

5.5. Cálculo das constantes geométricas do leito granulado (k_1 e k_2)

Ensaio de Permeabilidade

Com base nos dados na Tabela 5-5 e Tabela 5-6 e com o uso da Equação (3.75), foi realizado o cálculo para obtenção dos valores de k_1 e k_2 (Tabela 5-7).

Tabela 5-7: Cálculo de k_1 e k_2 a partir dos ensaios de permeabilidade

Material	k_1 (m^{-2})	k_2 (m^{-1})
Pelota A (8-18mm)	5,48E+07	380
Pelota B (8-18mm)	5,10E+07	268
NPO (6-30mm)	4,17E+07	265
HTT (6-16mm)	-	-
Carvão Médio (32-10mm)	5,08E+07	640
Carvão Grosso (125-32mm)	1,72E+07	238
Carvão (10-125mm)	3,95E+07	462

O coeficiente de resistência viscosa que predomina na região de escoamento laminar, k_1 , foi muito maior que o coeficiente de resistência inercial que predomina na região de escoamento turbulento, k_2 .

Equação de Ergun, sem ajuste dos parâmetros A (150) e B (1,75)

Com base nos dados da Tabela 5-1 a Tabela 5-4, Tabela 5-6 e com o uso das Equações (3.75) a (3.77), também foi realizado o cálculo para obtenção dos valores de k_1 e k_2 (Tabela 5-8).

Tabela 5-8: Cálculo de k_1 e k_2 a partir da Equação de Ergun sem ajuste dos parâmetros “A” e “B”

Material	k_1 (m^{-2})	k_2 (m^{-1})
Pelota A (8-18mm)	4,77E+07	7.800
Pelota B (8-18mm)	5,87E+07	10.495
NPO (6-30mm)	3,17E+07	5.246
HTT (6-16mm)	6,63E+08	41.132
Carvão Médio (32-10mm)	6,60E+07	7.677
Carvão Grosso (125-32mm)	1,24E+07	2.676
Carvão (10-125mm)	4,94E+07	7.798

Comparando os valores de k_1 e k_2 obtidos a partir da Equação de Ergun sem ajuste dos parâmetros “A” e “B” (Tabela 5-8) com os dados obtidos experimentalmente (Tabela 5-7), percebe-se que a Equação de Ergun sem ajuste de “A” e “B” não é capaz de reproduzir o comportamento do sistema (Figura 5-5).

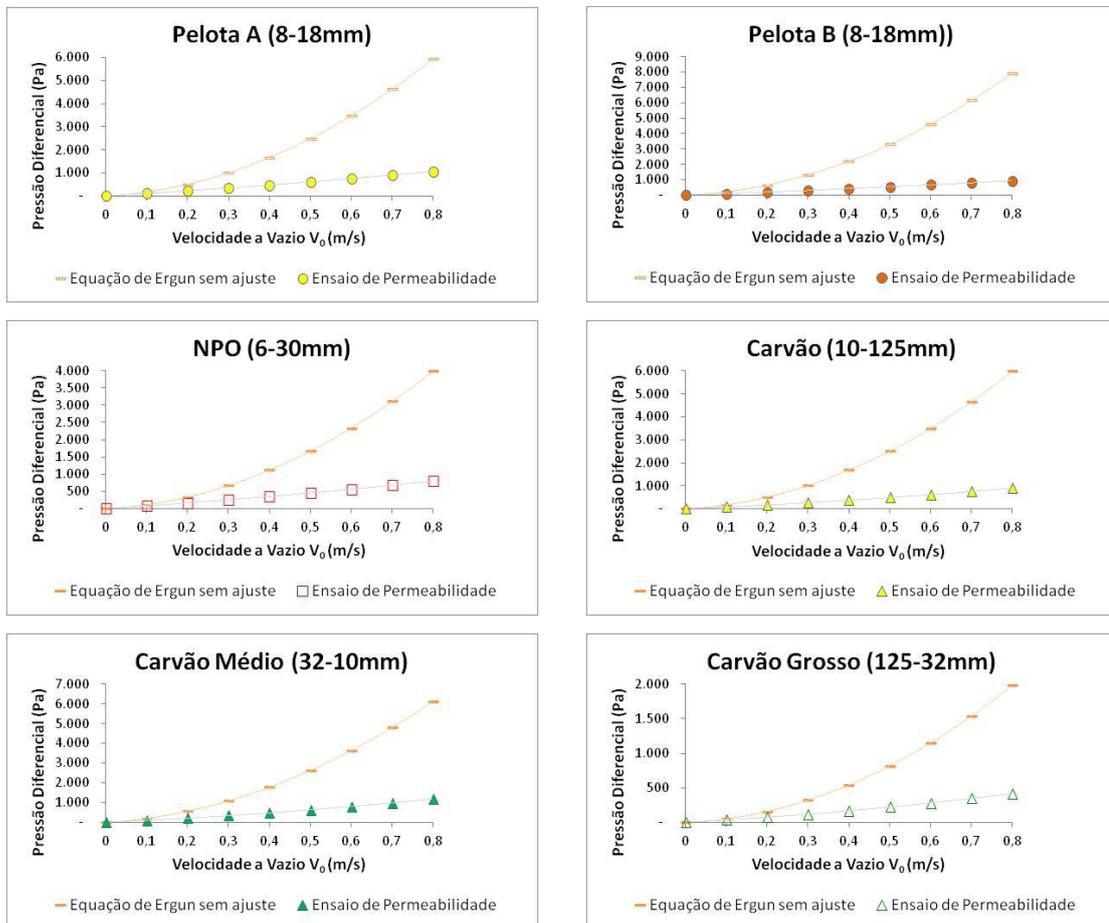


Figura 5-5: Comparativo dos resultados de queda de pressão obtidos no ensaio de permeabilidade e na Equação de Ergun sem ajuste dos parâmetros A e B.

Ou seja, é indicada a realização dos ensaios de permeabilidade para prever de forma adequada os valores de k_1 e k_2 na Equação (3.75) já que a adoção dos valores de 150 e 1,75 propostos empiricamente na Equação de Ergun apresentam desvios significativos nos resultados de queda de pressão em função da velocidade do ar, uma vez determinados os valores de ϵ , d e ϕ , para os materiais estudados.

Equação de Ergun, com ajuste dos parâmetros A (150) e B (1,75)

Admitindo os valores das constantes (ϵ , ϕ e d) e dos coeficientes obtidos nos ensaios de permeabilidade (k_1 e k_2), foi realizado o ajuste dos parâmetros A e B da Equação de Ergun. Os resultados estão exibidos na Tabela 5-9.

Tabela 5-9: Cálculo de A e B da equação de Ergun

Material	A	B
Pelota A (8-18mm)	172	0,09
Pelota B (8-18mm)	130	0,04
NPO (6-30mm)	197	0,09
HTT (6-16mm)	-	-
Carvão Médio (32-10mm)	115	0,15
Carvão Grosso (125-32mm)	208	0,16
Carvão (10-125mm)	120	0,10

Com os novos valores de “A” e “B” é possível então utilizar a Equação de Ergun a fim de prever a queda de pressão em leitos granulados quando se utiliza cada um dos materiais estudados.

Comparando os resultados dos ensaios de permeabilidade obtidos neste estudo com aqueles obtidos por SILVEIRA & MELO (1973) (Figura 5-6) para as amostras de carvão vegetal, veja que os materiais apresentavam valores de queda de pressão bem menores do que os materiais utilizados atualmente. Todo o carvão acima de 40mm apresentou menor valor de queda de pressão do que o carvão grosso utilizado atualmente, mesmo que a faixa deste último seja 32-125mm.

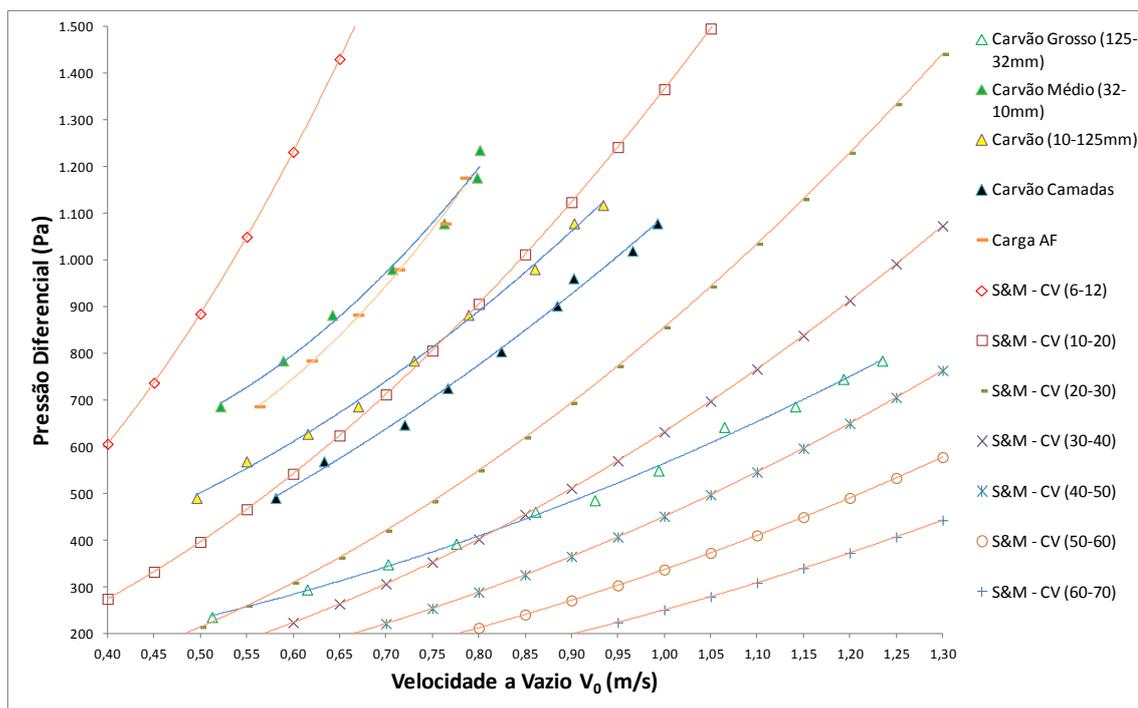


Figura 5-6: Resultados dos ensaios de permeabilidade do carvão vegetal.

Já para a amostra de NPO os resultados de queda de pressão se situam em região intermediária aos resultados mostrados por Silveira e Melo em 1973 (Figura 5-7).

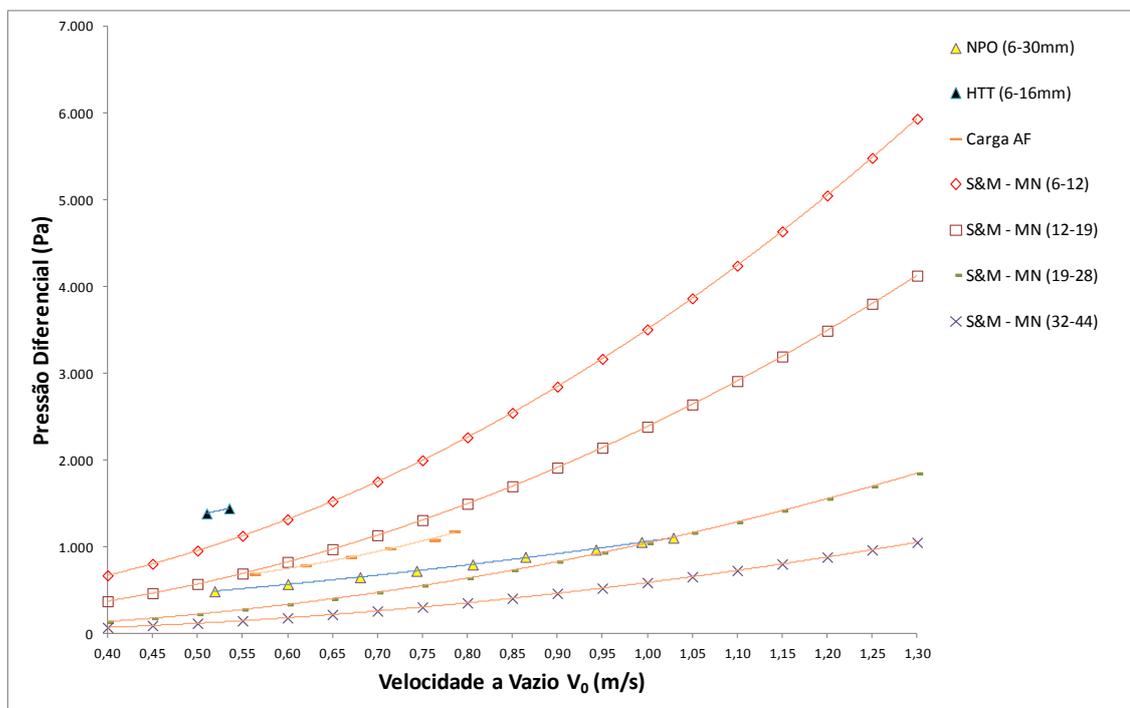


Figura 5-7: Resultados dos ensaios de permeabilidade para as amostras de minério.

Velocidade de Fluidização

Na Figura 5-8 estão plotados não só os valores encontrados nesta pesquisa mais também os valores referência de velocidade de fluidização obtidos por SILVEIRA e MELO em 1973, exibe os dados de velocidade de fluidização em dependência com o diâmetro médio do carvão vegetal e do coque. Foi verificado que, para um mesmo diâmetro médio, a velocidade de fluidização V_f para o coque é bem superior aquela do carvão vegetal. Os valores de V_f foram obtidos da equação (3.82), sendo que a viscosidade e a densidade do gás do alto-forno foram calculadas para uma temperatura de 250°C. Assim, para um alto-forno cujo diâmetro da goela é 4,2 m e cuja produção de gás é 40.000Nm³/hr (cerca de 25.000Nm³/hr de vazão de sopra), as partículas de coque inferiores a 3 mm, as de carvão vegetal inferiores a 5,8mm e as de carvão vegetal de origem plantada (objeto deste estudo) inferiores a 9,5mm seriam fluidizadas. Convém chamar a atenção para o fato de que este estudo é feito para uma distribuição regular da corrente gasosa. Entretanto, se isto não ocorrer, maiores velocidades poderiam suceder-se, provocando fluidização de partículas com diâmetros superiores aos acima citados.

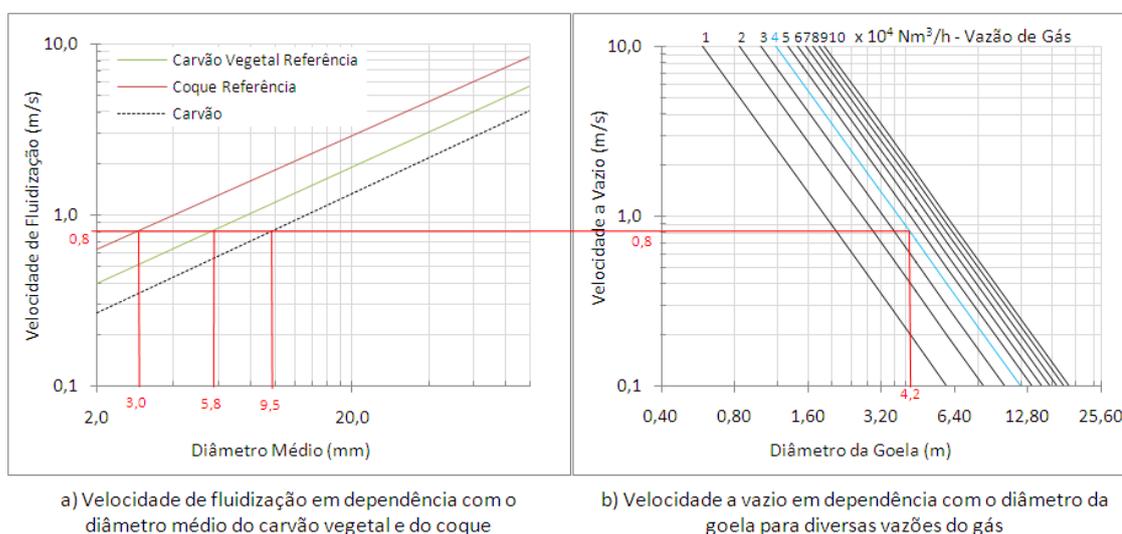


Figura 5-8: Determinação do diâmetro crítico do carvão vegetal e do coque quando se conhecem o diâmetro da goela e a vazão de gás em um dado alto-forno.

6. Conclusões

O equipamento Medidor de Pressão para Leitos Granulados, mostrou-se eficaz na medição da queda de pressão em função da velocidade do ar ao passar pelo leito, uma vez que os valores de R^2 situaram-se em torno de 90%.

Os ensaios de permeabilidade no Medidor apresentaram repetibilidade satisfatória, ou seja, a aleatoriedade da disposição da acomodação natural do material dentro do tubo suporte não afeta os resultados.

Embora, as medições de ΔP ao longo do perímetro e/ou do raio no tubo suporte do leito granulado não indiquem desvios significativos, só se pode concluir que não há variação medindo a velocidade do ar em cada ponto e não a queda de pressão.

Em todos os leitos estudados quanto maior a vazão de gás aplicada em leito, e portanto maior a velocidade, maior é o diferencial de pressão sofrido pelo gás ao percorrer a camada de leito poroso.

Com relação aos minérios, o minério de ferro HTT produz efeito de diferencial de pressão 2,5 vezes maior que o minério de ferro NPO. O NPO oferece a menor resistência a passagem do ar e portanto possui os menores valores de diferencial de pressão, no que diz respeito a carga metálica.

Em relação ao carvão vegetal, o tamanho médio demonstrou grande influência na permeabilidade dos leitos. O aumento de tamanho médio do carvão de 18 para 36mm provoca redução de diferencial de pressão para 1/3.

Utilizando as curvas da velocidade de fluidização determinadas experimentalmente foi possível determinar o diâmetro crítico das partículas de carvão para um dado alto-forno. Também é possível determinar o nível máximo de produção para um dado alto-forno e diâmetro médio das partículas de carvão vegetal.

É indicada a realização dos ensaios de permeabilidade para prever de forma adequada os valores de k_1 e k_2 , para que então se possa calcular os valores de A e B que melhor se ajustam aos resultados experimentais. Isso porque a adoção dos valores de 150 e 1,75 propostos empiricamente na Equação de Ergun apresentam desvios significativos nos resultados de queda de pressão em função da velocidade do ar, uma vez determinados os valores de ϵ , d e ϕ .

Sugestões Para Trabalhos Futuros

Com os resultados obtidos na realização deste trabalho, assim como o conhecimento adquirido no desenvolvimento do estudo, pode-se sugerir os seguintes trabalhos a serem desenvolvidos:

- ✓ Realização de novos ensaios em leito composto por hematitinha e novo motor de ventilador com pressão máxima de trabalho superior a 186 mmCA.
- ✓ Realizar as medições de velocidade do ar ao longo do perímetro e do raio do tubo suporte do leito granulado, a fim de verificar se há escoamento preferencial do ar nessas regiões do medidor.
- ✓ Realizar novos ensaios variando a granulometria do carvão com amplitude menor, por exemplo de 10/10mm, dada a importância deste material no escoamento gasoso.

7. Referências Bibliográficas

BENNETT D. A. & BRADLEY R., A strategy for an efficient simulation of countercurrent flows in the iron blast furnace, *Appl. Math. Modelling*, 1991, Vol. 15, p. 506-515.

BIRD, R.B., STEWART, W.E. & LIGHTFOOT, E. N., *Transport Phenomena*, New York, 2002, pg. 46-59.

DONG X.F., YAN C., YONGFU Z., JOHN D., KYLE J. F. & CHENN Q. Z., CFD modeling of multiphase reacting flow in blast furnace shaft with layered burden, *Applied Thermal Engineering* 66, 2014, 298-308.

DONG X.F., ZHANG S.J., PINSON D., YU A.B. & ZULLI P., Gas–powder flow and powder accumulation in a packed bed II: Numerical study, *Powder Technology* 149, 2004, 10-22.

ERGUN, S. “Fluid Flow through Packed Columns”, *Chemical Engineering Progress*, vol. 48, American Institute of Chemical Engineers: New York, 1952, pp. 89-94.

FIGUEIRA, R. M. & TAVARES, R. P., *Desenvolvimento da Tecnologia do Alto-Forno*, Belo Horizonte, UFMG, Cap. 7, Parte I, 1984, p. 433-484.

GÓMEZ-BAREA A. & LECKNER B., Modeling of biomass gasification in fluidized bed, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 2010, p. 444-509.

GUHA M., NAG S., SWAMY P. K. & RAMNA R. V., Effect of Interface Resistance on Gas Flow in Blast Furnace, *ISIJ International*, Vol. 51, 2011, No. 11, p. 1795-1799.

HIROSHI N., MANSHEG C. & JUN-ICHIRO Y., Multi-dimensional transient mathematical simulator of blast furnace process based on multi-fluid and kinetic theories, *Computers and Chemical Engineering* 29, 2005, 2438-2448.

JESCHAR, R., POTKE, W. PETERSEN, V. & POLTHIER, L. Blast Furnace aerodynamics, Wollongong, Austrália, 1975, p. 136-147.

JIMENEZ J., MOCHÓN J., FORMOSO A. & SAINZ J. A., Burden Distribution Analysis by Digital Image Processing in a Scale Model of a Blast Furnace Shaft, *ISIJ International*, Vol. 40, 2000, No. 2, p. 114-120.

JINZHOU L., QINGGUO X., XUEFENG S. & JINGSONG W., Investigation on interface resistance between alternating layers in the upper of blast furnace, *Powder Technology*, 246, 2013, p. 73–81.

MAGALHÃES, S. R. S. & MAGINI, M., Comparação Entre Modelos de Regressão Lineares Aplicados à Área Médica, X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2011, p. 2101-2104.

MORIMASA I., KAZUHIR O. N., KENJI T., ASAYASU S. & HAJIME O., Influence of Ore/Coke Distribution on Burden in Blast Furnace, *ISIJ International*, Vol 31, 1991, No. 5, p. 505-514.

NATSUI S., UEDA S., NOGAMI H., KANO J., INOUE R. & ARIYAMA T., Gas–solid flow simulation of fines clogging a packed bed using DEM–CFD, *Chemical Engineering Science* 71, 2012, p. 274-282.

FALEIRO, R. M. R., Modelamento estatístico do consumo de carvão vegetal dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil em função da produção de ferro-gusa e das cargas ferrosas, Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica), 2013, p. 5-10.

SILVEIRA, R. C. & MELO, M. A. L., Contribuição ao Escoamento Gasoso no Alto-Forno, Contribuição técnica apresentada no XXVIII Congresso Anual da ABM, Salvador, Ba, 1973.

STANDISH, N. & BORGER, D.E. In: Blast furnace aerodynamics, Hamilton, Canadá, 1987, p. 3.1-3.7.

STANDISH, J. & WILLIAMS, The structure and flow resistance of the coke-ore interface. In: Blast Furnace Aerodynamics, Wollongong, Austrália, 1975, p. 9.

SZEKELY, J. & PROPSTER, M. The structure and flow resistance of layer charged particulate systems in the modeling of gas flow through simulated blast furnace burdens. Trans. ISIJ, 19, 1979, p. 11-20.

SZEKELY, J. & PROPSTER, M. Theoretical prediction of non-uniform gas flow through simulated blast furnace burdens. Trans. ISIJ, 19, 1979, p. 21-30.

TAMBASCO, M. J. A., Redução de Minério de Ferro em Alto-Forno, São Paulo, ABM, 3ª ed., Cap. II, 1976, p. 77-198.

TAKAHASHI H., KAWAI H. & SUZUKI Y., Analysis of stress and buoyancy for solids flow in the lower part of a blast furnace, Chemical Engineering Science 57, 2002, 215-226.

TRIOLA, M. F., Introdução à Estatística, JC Editora, 7ª Edição, 2002, p. 147-183.

ZHOU Z.Y., PINSON D., ZOU R.P. & YU A.B., Discrete particle simulation of gas fluidization of ellipsoidal particles, Chemical Engineering Science 66, 2011, 6128-6145.

ZIÓLKOWSKA A. & ZIÓLKOWSKA U., Fluid Flow inside Packed Beds, Chem. Eng. Process, 23, 1988, p. 137-164.

ANEXO 1

Resultados dos Ensaios de Permeabilidade

Experimento	Vazão Ar Insuflado (m ³ /h)	Pressão Diferencial (Pa)
NPO (6-30mm)	2.112	485
NPO (6-30mm)	2.443	569
NPO (6-30mm)	2.770	647
NPO (6-30mm)	3.025	721
NPO (6-30mm)	3.279	794
NPO (6-30mm)	3.518	883
NPO (6-30mm)	3.837	966
NPO (6-30mm)	4.043	1.054
NPO (6-30mm)	4.187	1.103
HTT (6-16mm)	2.076	1.383
HTT (6-16mm)	2.178	1.442
Pelota A - Teste 1	2.141	654
Pelota A - Teste 1	2.419	733
Pelota A - Teste 1	2.658	845
Pelota A - Teste 1	2.978	961
Pelota A - Teste 1	3.166	1.005
Pelota A - Teste 1	3.388	1.127
Pelota A - Teste 1	3.543	1.204
Pelota A - Teste 2	2.293	696
Pelota A - Teste 2	2.581	794
Pelota A - Teste 2	2.803	883
Pelota A - Teste 2	3.027	961
Pelota A - Teste 2	3.319	1.089
Pelota A - Teste 2	3.527	1.177
Pelota A - Teste 2	3.623	1.231
Pelota A - Teste 3	2.330	701
Pelota A - Teste 3	2.545	799
Pelota A - Teste 3	2.806	892
Pelota A - Teste 3	3.050	981
Pelota A - Teste 3	3.337	1.084
Pelota A - Teste 3	3.531	1.182

Pelota A - Teste 3	3.632	1.201
Pelota B	2.421	662
Pelota B	2.654	735
Pelota B	2.891	829
Pelota B	3.227	932
Pelota B	3.424	986
Pelota B	3.613	1.064
Pelota B	3.793	1.133
Pelota B Peneirada	2.266	608
Pelota B Peneirada	2.586	717
Pelota B Peneirada	2.853	807
Pelota B Peneirada	3.079	883
Pelota B Peneirada	3.378	984
Pelota B Peneirada	3.648	1.075
Pelota B Peneirada	3.815	1.132
Pelota B Peneirada	4.006	1.196
Carvão Grosso (125-32mm)	2.086	235
Carvão Grosso (125-32mm)	2.503	294
Carvão Grosso (125-32mm)	2.858	348
Carvão Grosso (125-32mm)	3.157	392
Carvão Grosso (125-32mm)	3.504	461
Carvão Grosso (125-32mm)	3.765	485
Carvão Grosso (125-32mm)	4.044	549
Carvão Grosso (125-32mm)	4.332	642
Carvão Grosso (125-32mm)	4.644	686
Carvão Grosso (125-32mm)	4.855	745
Carvão Grosso (125-32mm)	5.025	785
Carvão Médio (32-10mm)	2.123	686
Carvão Médio (32-10mm)	2.397	785
Carvão Médio (32-10mm)	2.613	883
Carvão Médio (32-10mm)	2.876	981
Carvão Médio (32-10mm)	3.103	1.079
Carvão Médio (32-10mm)	3.248	1.177
Carvão Médio (32-10mm)	3.260	1.236
Carvão (10-125mm)	2.018	490
Carvão (10-125mm)	2.237	569
Carvão (10-125mm)	2.505	628
Carvão (10-125mm)	2.727	686
Carvão (10-125mm)	2.971	785
Carvão (10-125mm)	3.210	883
Carvão (10-125mm)	3.501	981

Carvão (10-125mm)	3.674	1.079
Carvão (10-125mm)	3.801	1.118
Carvão Camadas (10-125mm)	2.365	490
Carvão Camadas (10-125mm)	2.577	569
Carvão Camadas (10-125mm)	2.930	647
Carvão Camadas (10-125mm)	3.119	726
Carvão Camadas (10-125mm)	3.354	804
Carvão Camadas (10-125mm)	3.599	902
Carvão Camadas (10-125mm)	3.672	961
Carvão Camadas (10-125mm)	3.930	1.020
Carvão Camadas (10-125mm)	4.039	1.079
Carga AF	2.295	686
Carga AF	2.523	785
Carga AF	2.728	883
Carga AF	2.907	981
Carga AF	3.109	1.079
Carga AF	3.196	1.177