

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

Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA POROSIDADE
NAS ETAPAS DE BENEFICIAMENTO DE
MINÉRIO DE FERRO DA SAMARCO

Autora: Alessandra Prata de Almeida Mangabeira

Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Março 2009

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

Alessandra Prata de Almeida Mangabeira

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA POROSIDADE NAS ETAPAS DE
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO DA SAMARCO

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

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2009

DEDICATÓRIA

À minha mãe Aleuda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução desse trabalho e, em especial:

À Diretoria da Samarco Mineração S.A., por incentivar o estudo e o desenvolvimento pessoal e profissional de seus empregados.

Ao professor Paulo Roberto Gomes Brandão, pela brilhante orientação, dedicação e paciência.

A Maury de Souza Júnior, João Pedro da Silva e Carlos Magno de Lima Leonel, por todo o incentivo durante as diferentes fases do trabalho e por terem propiciado as condições para a realização deste.

A Joaquim Donizetti Donda e Paulo Sérgio Mapa pelo apoio e constantes discussões.

Ao professor Antônio Eduardo Clark Peres pelo incentivo e apoio constantes.

Ao bolsista Roberto Couceiro Lois (MEV-UFMG), à funcionária Ilda de Sousa Batista, à Dra. Cláudia Lima Caldeira (ambas PACG-UFMG) e à professora Ivana Consentino (PIM - CCTM/IPEN), pela grande ajuda na caracterização das amostras.

A toda equipe dos laboratórios Químico, Físico e Controle de Processo da Samarco, sobretudo ao João Miranda, Eduardo Gamarano e Marcelo de Paula Lopes pela execução dos ensaios e análises e ao Alan pela digitação dos dados.

À minha mãe Aleuda Prata de Almeida pela inestimável ajuda e amor, em todos os momentos.

À Zélia Savala Rezende Brandão pelo apoio e cuidado constantes.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	1
2- OBJETIVOS.....	3
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1- Modelamento Geológico-Tipológico da Samarco (Costa, 1998).....	4
3.2- Geração de Porosidade nos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero.....	6
3.3- Processo de Beneficiamento no Concentrador I da Samarco.....	7
3.4- Porosidade.....	13
3.4.1- Conceito.....	13
3.4.2- Metodologia de Determinação.....	14
3.4.2.1- Porosimetria de Intrusão de Mercúrio.....	14
3.4.2.2- Porosimetria de Adsorção-Condensação Gasosa.....	20
3.4.2.3- Microscopia Eletrônica de Varredura.....	31
3.5- Área Superficial Específica.....	34
3.5.1- Conceito.....	34
3.5.2- Metodologia de Determinação.....	35
3.5.2.1- Método de Blaine.....	35
3.5.2.2- Porosimetria de Adsorção-Condensação Gasosa (Lowell, 1984).....	38
3.6- Comparação entre Porosimetria de Intrusão de Mercúrio e Porosimetria de Adsorção-Condensação Gasosa.....	39
4- METODOLOGIA.....	42
4.1- Coleta e Preparação de Amostras.....	43
4.2- Testes Tecnológicos.....	45
4.3- Caracterização das Amostras.....	45
4.3.1- Análise Química Quantitativa.....	45
4.3.2- Análise Granulométrica.....	46
4.3.3- Microscopia Ótica de Luz Refletida.....	48
4.3.4- Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise.....	48
4.3.5- Determinação de Densidade de Sólidos.....	49
4.3.6- Determinação de Área Superficial Específica, por Blaine e BET.....	49
4.3.7- Porosimetria de Intrusão de Mercúrio.....	50

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
5.1- Amostragem e Preparação das Amostras.....	51
5.2- Análises de Porosidade	52
5.2.1- Porosimetria de Intrusão de Mercúrio.....	52
5.2.2- Porosimetria de Adsorção-Condensação Gasosa.....	58
5.2.3- Comparação dos Resultados Obtidos Através das Duas Metodologias de Determinação de Porosidade	61
5.2.4- Microscopia Eletrônica de Varredura	66
5.3- Testes Tecnológicos.....	75
5.3.1- Processo de Deslamagem.....	75
5.3.1.1- Caracterização das Amostras de Underflow e Overflow	75
5.3.1.2- Performance no Teste de Deslamagem	76
5.3.2- Processo de Flotação	78
5.3.2.1- Caracterização das Amostras de Concentrado e Rejeito da Flotação .	78
5.3.2.2- Performance no Teste de Flotação	81
6- CONCLUSÕES.....	83
ANEXO	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 – Fluxograma do processo produtivo da Samarco, Germano (concentrador I) e Ubu (usinas I e II).	8
Figura 3-2 – Fluxograma do Concentrador I da Samarco.	9
Figura 3-3 – Mercúrio em contato com um sólido poroso.	16
Figura 3-4 – Curvas típicas de intrusão e extrusão a partir de uma análise de PIM.	16
Figura 3-5 – Porosímetro de mercúrio de varredura contínua.	19
Figura 3-6 – Sonda de capacitância: cavidade de alta pressão e selos para medidas contínuas de intrusão-extrusão.	20
Figura 3-7 – Cinco isotermas de adsorção classificadas de acordo com BDDT.	22
Figura 3-8 – Processo de adsorção física em materiais que exibem a isoterma do tipo IV, Micromeritics (1991).	23
Figura 3-9 – Quatro tipos de histerese, segundo IUPAC.	24
Figura 3-10 – Diagrama esquemático do equipamento com injeção incremental de gás.	30
Figura 3-11 – Diagrama esquemático do equipamento Gemini, com injeção contínua de gás.	30
Figura 3-12 – Diagrama esquemático do equipamento com injeção contínua de mistura de gases.	31
Figura 3-13 – Desenho esquemático dos componentes de um MEV típico.	33
Figura 3-14 – Permeabilímetro de Blaine.	37
Figura 4-1 – Rota de caracterização e testes tecnológicos.	42
Figura 4-2 – Rota de preparação das amostras.	44
Figura 4-3 – Rota para análise granulométrica.	47
Figura 5-1 – Curva de intrusão da amostra 5/35 concentrado da flotação.	53
Figura 5-2 – Distribuição de diâmetro de poro da amostra 5/35 concentrado da flotação.	53
Figura 5-3 – Curva de intrusão da amostra 5/14 <i>overflow</i> da deslamagem.	54
Figura 5-4 – Distribuição de diâmetro de poro da amostra 5/14 <i>overflow</i> da deslamagem.	54
Figura 5-5 – Gráfico de dispersão para a densidade de sólido por picnômetro a hélio e porosímetro de intrusão de mercúrio.	57

Figura 5-6 – Isotermas de adsorção e de dessorção da amostra 5/4 <i>underflow</i> da deslamagem.	59
Figura 5-7 – Amostra 5/14 concentrado. Seção polida. MEV, IER. Partícula com feições diversas, com hematita martítica porosa, goethita botrioidal porosa, goethita terrosa e pouca hematita lamelar. Poros variando de 15,0 μ m a 1,0 μ m.....	67
Figura 5-8 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IER. Partícula com goethita botrioidal e goethita maciça minoritária, ambas com porosidade moderada. Poros variando de 8,0 μ m, 4,0 μ m, 1,0 μ m, 0,4 μ m até 0,1 μ m.....	67
Figura 5-9 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, com poros variando de 0,4 μ m até 0,1 μ m.	68
Figura 5-10 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IER. Partícula com goethita botrioidal, contendo células contendo agregados porosos, inclusive com grãos muito pequenos. ...	68
Figura 5-11 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, com poros variando de 0,4 μ m até 0,1 μ m.	69
Figura 5-12 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto 5.10, com poros variando de 0,40 μ m até 0,03 μ m.	69
Figura 5-13 – Amostra 5/14 concentrado. Seção polida. MEV, IER. Partícula mista com hematita martítica, goethita maciça porosa e pouca goethita terrosa. Poros variando de 40 μ m, 20 μ m a 10 μ m, 5 μ m a 3 μ m, 1,0 μ m.	70
Figura 5-14 – Amostra 5/14 concentrado. Seção polida. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, com poros variando de 0,8 μ m até 0,1 μ m.....	70
Figura 5-15 – Amostra 5/14 produto da moagem. MEV, IER. Partícula com hematita lamelar, com poucos poros, variando de 30 μ m a 2 μ m.	71
Figura 5-16 – Amostra 5/4 produto da moagem. Seção polida. MEV, IER. Partícula com hematitas martítica e lamelar; notar a diferença marcante de porosidade entre estas feições. Poros variando de 1,20 μ m a 0,15 μ m.....	71
Figura 5-17 – Amostra 5/4 produto da moagem. Seção polida. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, com poros variando de 1,20 μ m até 0,15 μ m.....	72
Figura 5-18 – Amostra 5/4 produto da moagem. MEV, IES. Partícula de hematita martítica típica. Poros variando de 0,6 μ m a 0,1 μ m.....	72

Figura 5-19 – Amostra 9/4 produto da moagem. MEV, IER. Partícula bastante porosa, composta principalmente de hematita martítica, com alguma presença de goethita porosa; próximo, há partículas de hematita lamelar. Poros abaixo de $2,0\mu\text{m}$	73
Figura 5-20 – Amostra 9/4 produto da moagem. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, em hematita martítica, com poros variando de $0,70\mu\text{m}$ até $0,05\mu\text{m}$	73
Figura 5-21 – % <i>overflow</i> gerada nas 3 etapas do teste de deslamagem.	77
Figura 5-22 – Volume de solução de soda (3%) utilizado nas 3 etapas do teste de deslamagem.	77
Figura 5-23 – Efeito da recuperação metálica no %Fe do rejeito para faixas de %Fe na alimentação.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Especificações dos produtos dos concentradores da Samarco.....	12
Tabela 5.1 – Análises químicas das quatro amostras de ROM.....	52
Tabela 5.2 – Análise mineralógica total das quatro amostras de ROM....	52
Tabela 5.3 – Análise mineralógica parcial das quatro amostras de ROM.....	52
Tabela 5.4 – Relatório do equipamento de análise de porosimetria de intrusão de mercúrio da amostra 5/35 concentrado da flotação.....	56
Tabela 5.5 – Relatório do equipamento de análise de porosimetria de adsorção-condensação gasosa da amostra 5/4 <i>underflow</i> da deslamagem.....	61
Tabela 5.6 – Volume de microporos e mesoporos das amostras 5/4 e 9/4 – <i>underflow</i> da deslamagem.....	61
Tabela 5.7 – Área Superficial Específica total e de microporos das amostras 5/4 e 9/4 – <i>underflow</i> da deslamagem.....	62
Tabela 5.8 – Comparação entre os dados de PIM e PACG para o produto da moagem.....	63
Tabela 5.9 – Comparação entre os dados de PIM e PACG para o <i>underflow</i> da deslamagem.....	64
Tabela 5.10 – Comparação entre os dados de PIM e PACG para o concentrado da flotação.	65
Tabela 5.11 – Comparação entre os dados de PIM e PACG para o rejeito da flotação.	66
Tabela 5.12 – Análises químicas e de densidade (picnômetro a hélio) da alimentação, <i>underflow</i> e <i>overflow</i> da deslamagem das quatro amostras.....	76
Tabela 5.13 – Análise mineralógica da alimentação e <i>underflow</i> da deslamagem das quatro amostras	77
Tabela 5.14 – Recuperação em peso e metálica alcançadas no teste de deslamagem e %-10µm na alimentação.....	79
Tabela 5.15 – Análises químicas e de densidade (picnômetro a hélio) da alimentação, concentrado e rejeito das quatro amostras.....	80

Tabela 5.16 – Análise mineralógica da alimentação, concentrado e rejeito das quatro amostras.....	81
Tabela 5.17 – Índices de performance no teste de flotação.....	83

LISTA DE NOTAÇÕES

AQQ = análise química quantitativa

AG = análise granulométrica

MOLR = microscopia ótica de luz refletida

PIM = porosimetria de intrusão de mercúrio

PACG = porosimetria de adsorção-condensação gasosa

MEV = microscopia eletrônica de varredura

EDS = espectrômetro de raios-X dispersivo em energia

BSE = elétrons retroespalhados

SE = elétrons secundários

CRT = tubo de raios catódicos

BET = teoria de adsorção cujo nome é originado dos nomes de seus autores Brunauer, Emmett e Teller

BDDT = Brunauer, Deming, Deming e Teller

BJH = Barret, Joyner e Halenda

ROM = run of mine

%p/v = unidade de concentração, percentagem em peso (g) por volume (ml)

DEMIN = Departamento de Engenharia de Minas

DEMET = Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

EEUFMG = Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

ASE = área superficial específica

IUPAC = International Union of Pure and Applied Chemistry

HE = hematita especular

HP = hematita porosa

G = goethita

MA = magnetita

QT = quartzo total

RP = recuperação em peso

RM = recuperação metálica

IS = índice de seletividade

RESUMO

Investigou-se a possibilidade de haver diferença significativa nos parâmetros de porosidade nos minérios que alimentam a usina de concentração da Samarco e se esta diferença provoca comportamentos diferentes nas etapas de deslamagem e flotação.

Foram utilizadas duas amostras de minério de frentes de lavra da Mina de Alegria 3/4/5 e uma da Mina de Alegria 9 – amostras 5/14, 5/4 e 9/4 – que apresentam um percentual de fases porosas (hematita porosa e goethita) semelhante (em torno de 50% - análise mineralógica total) e uma amostra de uma frente de lavra da Mina de Alegria 3/4/5 – amostra 5/35 – com percentual de fases porosas bem inferior (5,6%), para checagem da sensibilidade dos métodos de determinação de porosidade.

As amostras de ROM foram submetidas a um teste de moagem para produção de amostra para os testes de deslamagem e flotação, segundo padrão Samarco. As amostras produto de moagem, *underflow* e *overflow* da deslamagem, concentrado e rejeito da flotação da 5/35, 5/14, 5/4 e 9,4 foram caracterizadas química, física e mineralogicamente em laboratórios da Samarco.

Para caracterizar os parâmetros de porosidade foram usados os métodos de porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM) e porosimetria de adsorção-condensação gasosa (PACG), com apoio da microscopia eletrônica de varredura.

Há diferenças significativas de porosidade entre as amostras estudadas. A amostra 5/35 apresenta menor porosidade (por PACG e PIM para volumes totais de poros menores que 1,0 μ m e 100nm) e menor ASE (BET), o que é consistente com a menor quantidade de feições mineralógicas potencialmente porosas. A amostra 5/4, ao contrário do que se esperava a partir de sua composição mineralógica, apresentou uma área superficial específica muito maior, maior volume de poros, menor diâmetro médio de mesoporos e foi a única que apresentou volume de microporos. Os dados de porosidade pelos dois métodos (PIM e PACG) e de ASE para as outras amostras – 9/4 e 5/14 – indicam propriedades próximas, apesar de não idênticas.

O método de porosimetria de adsorção-condensação gasosa, apesar de só detectar poros com diâmetro menor que 100nm, mostrou-se mais eficaz em diferenciar as amostras, do que a porosimetria de intrusão de mercúrio. Este último método apresentou problemas na realização das análises (baixa disponibilidade do equipamento, dificuldade na manutenção e importação de peças e penetrômetros e baixa repetibilidade). Entretanto, na faixa de valores onde ambos são aplicáveis simultaneamente (3,0nm a 100,0nm) encontraram-se valores consistentes de volume de mesoporos (BJH - PACG e PIM), apesar de não idênticos, para a maioria das amostras.

Os resultados obtidos nas etapas de deslamagem e flotação para as quatro amostras foram coerentes com as análises químicas, granulométricas e mineralógicas, não havendo evidências de que a porosidade teve algum efeito nas performances atingidas.

ABSTRACT

It was investigated if there is a significant difference in the porosity parameters of the ores that feed the Samarco Concentrator and if this possible disagreement causes different performances in the desliming and flotation processes.

Two ore samples from the Alegria 3/4/5 pit and one from the Alegria 9 pit (samples 5/14, 5/4 and 9/4) with a porous phases percentage (porous hematite and goethite) of around 50% and one ore sample from the Alegria 3/4/5 pit (sample 5/35) with a much lower porous phases percentage (5.6%) were used in order to check the sensibility of the porosity determination methods.

The run of mine samples were submitted to grinding tests to produce samples to the desliming and flotation tests, following the Samarco procedures. The grinding product, desliming underflow and overflow, flotation concentrate and tailing of the 5/35, 5/14, 5/4 and 9/4 samples were analysed to obtain a chemical, size and mineralogical characterization in the Samarco labs.

The mercury intrusion porosimetry (MIP) and gas adsorption- condensation porosimetry (GACP) were used to characterize the porosity parameters, supported by scanning electron microscopy.

There is a significant difference of porosity between the investigated samples. The 5/35 sample shows smaller porosity (by GACP and MIP – total volume of pore minor than 1,0 μ m and 100nm) and smaller specific surface area (by BET), which is consistent with the minor quantity of porous phases. The 5/4 sample, despite its mineralogical composition, shows larger specific surface area, larger pore volume, smaller mean diameter of mesopores and it was the only sample that shows micropore volume. The porosity data, from the two methods (MIP and GACP), and the specific surface area data to the other samples – 9/4 and 5/14 – indicate similar properties.

Besides the detection boundary of gas adsorption (100nm maximum), the GACP was more effective in distinguishing the samples than mercury intrusion porosimetry. This latter method showed problems during the analysis execution (low equipment availability, difficulty in maintenance and acquisition of spares and penetrometers and poor repeatability). However in the value range where both methods are simultaneously applicable (3.0nm to 100.0nm), consistent values of pores volume were found (BJH – GACP and MIP) in the samples.

The desliming and flotation processes results for the four samples were consistent with the chemical, particle size and mineralogical data. There is no evidence that the porosity had caused any influence in those performance results.

1. INTRODUÇÃO

A exigência atual de produtividade no processo e de qualidade do concentrado de minério de ferro aliada à complexidade e variedade dos corpos de minério presentes nas diversas jazidas do Complexo Alegria tem levado à busca de conhecimento sobre as variáveis que influenciam no comportamento desses materiais nas várias etapas dos processos de beneficiamento.

Visando fomentar a estimativa de reservas, o planejamento de lavra e o controle de qualidade, foi concebido na Samarco um modelo geológico-tipológico para as minas lavradas atualmente (Alegria 3/4/5, Alegria 1/2/6 e Alegria 9). Até o presente, este modelo tem se baseado em mapeamentos geológicos sistemáticos das jazidas, informações oriundas das descrições geológicas dos testemunhos de sondagem rotativa e resultados de análises químicas, físicas e mineralógicas das amostras geradas pela pesquisa, além dos resultados dos testes tecnológicos (Costa, 1998).

Entretanto, em virtude dos vários ambientes geológicos, mesmo as amostras mineralogicamente semelhantes podem apresentar uma variação nos parâmetros de porosidade (Pena, 2002). Variações nas características de volume total, dimensão, forma e grau de conectividade dos poros podem ocasionar diferenças sensíveis de comportamento nas etapas dos processos de concentração.

O processo de concentração da Samarco é complexo, com muitas etapas e muitas variáveis a serem controladas. O controle de qualidade da matéria-prima é, então, de fundamental importância para minimizar a fonte de variabilidade e tornar mais efetivo o controle do concentrado final. Dessa forma é necessário ter conhecimento sobre todas as características do ROM e sobre o efeito destas nas diversas etapas do processo.

Uma variável que pode influenciar o processo de concentração é a porosidade. Essa variável está relacionada com a densidade e com a área superficial específica, portanto, pode influenciar diretamente os processos de deslamagem e flotação.

Dessa forma, é importante verificar se há diferença significativa nos parâmetros de porosidade dos minérios que alimentam a usina de concentração da Samarco e se esta diferença provoca comportamentos diferentes nas etapas dos processos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral verificar se há diferença significativa nos parâmetros de porosidade de quatro amostras de minério da Samarco, e se esta diferença provoca comportamentos diferentes nas etapas do processo de deslamagem e flotação.

Como objetivos específicos buscou-se:

- caracterizar os parâmetros intrínsecos de porosidade do produto de moagem, do *overflow* e *underflow* da deslamagem e do concentrado e rejeito da flotação de quatro amostras de minério das minas de Alegria 3/4/5 e Alegria 9 através de análises de porosimetria de intrusão de mercúrio e porosimetria de adsorção-condensação gasosa, com apoio da microscopia eletrônica de varredura;
- comparar os resultados dos métodos de determinação de porosidade (porosimetria de intrusão de mercúrio - PIM e porosimetria de adsorção-condensação - PACG) para estas amostras;
- verificar se existe relação de causa e efeito entre porosidade e os resultados dos testes tecnológicos; e
- dependendo dos resultados anteriores, verificar a viabilidade de a porosidade ser incorporada nos modelos geológico-tipológicos, direta ou indiretamente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Modelamento Geológico-Tipológico da Samarco (Costa, 1998)

Desde 1977, a Samarco lavra, processa e pelotiza minérios de ferro itabiríticos. Até 1992, a lavra era feita exclusivamente na Mina do Germano, implantada sobre um corpo de minério bastante homogêneo quanto à friabilidade e à composição mineralógica, quase que essencialmente especularítica.

O modelo geológico-tipológico concebido para essa jazida, em função da sua grande homogeneidade, era relativamente simples. A diferenciação entre os diversos corpos se baseava, fundamentalmente, nas características físicas e químicas e nos testes de concentração. Em geral, esses minérios apresentavam grande facilidade de flotação, pequena geração de lama e boa recuperação global.

Com o início da lavra da primeira mina do Complexo de Alegria, a Mina de Alegria 3/4/5, vários problemas surgiram em função da diversidade dos tipos de itabiritos, tanto do ponto de vista da compacidade quanto, e principalmente, da composição mineralógica. Dificuldade na cominuição, geração excessiva de lama e, conseqüentemente, dificuldades na flotação são exemplos destes problemas.

Através de mapeamento sistemático da jazida, redescições de testemunhos de sondagem, análises químicas, físicas e mineralógicas, Hasui (1993) propôs um modelo geológico-tipológico tridimensional para as jazidas de Alegria3/4/5 e Alegria1/2/6. Para tanto, ele utilizou critérios para diferenciação dos diversos tipos baseados na identificação do mineral predominante e nas características físicas dos minérios, tomando por base o tamanho da abertura de peneira de 9,52mm.

Dessa forma, os itabiritos passaram a ser identificados como itabiritos martíticos, especularíticos, goethíticos ou magnetíticos conforme o mineral predominante. Os itabiritos portadores de pseudomorfos de anfibólio foram identificados como anfibolíticos. Quanto à compacidade, os itabiritos foram adjetivados como friáveis,

intermediários ou compactos, conforme a porcentagem retida na abertura de peneira de 9,52mm, respectivamente: menor que 40%, entre 40 e 60% e maior que 60%. Esses critérios refletem localizadamente a natureza e intensidade dos processos geológicos geradores dos minérios e, portanto, essa classificação tem um caráter geológico estrutural.

A partir de mais informações de análises químicas, físicas e mineralógicas, obtidas através de novos furos de sondagem, foi possível notar algumas singularidades das jazidas de Alegria 1/2/6 e de Alegria 9. Foi observado que, embora exista a predominância de um mineral sobre os outros, é comum a presença de um segundo e, às vezes, um terceiro mineral com percentuais elevados. Essa associação confere ao minério características químicas e comportamento nos processos bastante diferentes daqueles relativos aos minérios com franco predomínio de um mineral. Assim, passou-se a adotar uma nova classificação para estas duas jazidas, considerando as diversas assembléias mineralógicas presentes nos diversos corpos de minério.

Dessa forma, foram identificados em Alegria 1/2/6 tipos como: itabirito martítico-goethítico (predominância de martita em relação à goethita), itabirito goethítico-martítico (o contrário do primeiro tipo) e itabirito martítico-especularítico-goethítico (composição básica de martita, specularita e goethita, decrescendo nesta ordem). Além destes tipos, independentemente dos outros minerais presentes, foram identificados os tipos itabirito anfibolítico e Itabirito magnetítico, em que o primeiro provoca dificuldade na flotação devido à grande geração de finos e o segundo tem influência no forno de pelotização.

A partir do conhecimento dos diversos tipos de itabiritos é possível realizar estudos sistemáticos em escala de laboratório ou piloto para análise do comportamento dos diferentes tipos de minérios nos processos de britagem, moagem, classificação, flotação, espessamento, etc.

O conhecimento da distribuição dos diversos tipos nas jazidas, conforme os bancos de lavra planejados, e da performance esperada de cada tipo auxilia na avaliação prévia das

principais características dos concentrados a serem produzidos a partir do *blend* executado nas minas. Além disso, torna-se possível adequar a lavra em função de eventuais dificuldades nas etapas dos processos. Ou seja, este é o alicerce de um sistema de geometurgia, onde se adota um controle integrado de qualidade, desde a mina até o produto final, buscando maior previsibilidade e produtividade.

3.2- Geração de Porosidade nos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero

Em função dos tipos e da quantidade de óxidos e hidróxidos de ferro predominantes nos minérios de ferro, estes podem apresentar diferentes características e níveis de porosidade que são dependentes da atuação dos processos de martitização, recristalização, metamorfismo, deformação, dentre outros, ocorridos durante sua complexa evolução geológica.

O processo de martitização caracteriza-se pela oxidação progressiva do mineral magnetita para hematita sem perder sua forma cristalina original resultando em uma quase total transformação do mineral, produzindo agregados porosos de hematita, em virtude da variação de volume associada ao processo (Rosière, 1983; Rosière et al, 1993).

O aumento dos valores de pressão e temperatura ocorrido durante os processos geológicos possibilita a ocorrência do fenômeno de recristalização, ou seja, um rearranjo da estrutura cristalina dos produtos da martitização resultando em uma diminuição da porosidade dos novos cristais formados. O desenvolvimento fora das regiões intensamente deformadas ocasiona um crescimento dos cristais de forma irregular e com tamanhos variando entre 10 a 200 μ m em função de sua interação com os cristais vizinhos. Esta geração é denominada hematita I ou hematita granular. O crescimento dos minerais em regiões deformadas está condicionado às estruturas desenvolvidas pela rocha, formando-se cristais bem orientados, com tamanhos de até vários milímetros, classificados como hematita II ou hematita especular (Rosière, 1983; Rosière et al, 1993).

Segundo Muller (1982), as jazidas de minério de ferro situadas na borda leste do Quadrilátero foram submetidas a maiores valores de temperaturas metamórficas que as jazidas da borda oeste. As rochas da borda leste, que sofreram uma recristalização intensa apresentam cristais com maiores tamanhos que os cristais da borda oeste, onde a magnitude de deformação/metamorfismo foi menos intensa (Rosière, 1983).

De acordo com Lagoeiro (2001), durante a deformação e metamorfismo, as microestruturas formadas podem sofrer alteração ou podem ser destruídas quando as rochas são expostas às condições atmosféricas (ambientes de baixa temperatura e pressão, com intensa participação de fase fluida aquosa e alta pressão parcial de O₂). A mineralogia inicial é transformada para fases de baixas temperaturas, geralmente hidratadas como é o caso de minerais como goethita. Ocorre alteração do agregado policristalino original, gerando uma grande quantidade de poros secundários, pela lixiviação de componentes primários. Grandes poros originados têm aspecto de cavernas e em seu interior são frequentemente encontrados minerais precipitados (fases hidratadas, como goethitas ou outras fases secundárias) a partir de fluidos de lixiviação. As microestruturas originais podem ser ainda preservadas em casos mais brandos de intemperismo ou em condições mais severas totalmente obliteradas.

3.3- Processo de Beneficiamento no Concentrador I da Samarco

A Samarco possui unidades industriais em dois estados brasileiros, com operações realizadas de forma integrada e simultânea.

Em Minas Gerais, localiza-se a unidade industrial de Germano, situada no município de Mariana, onde são feitas as operações de extração do minério, beneficiamento e o início do transporte do concentrado de minério de ferro. O transporte é feito por um mineroduto de 398km que liga as duas unidades.

No Espírito Santo, está instalada a unidade industrial de Ponta Ubu, no município de Anchieta, que possui operações de preparação da polpa, pelotização, estocagem e

embarque de pelotas de minério de ferro e *pellet feed*. O embarque é efetuado em porto próprio e escoa a produção para clientes na Europa, Ásia, África, Oriente Médio e Américas. Um fluxograma simplificado com as duas unidades industriais está apresentado na figura 3-1.

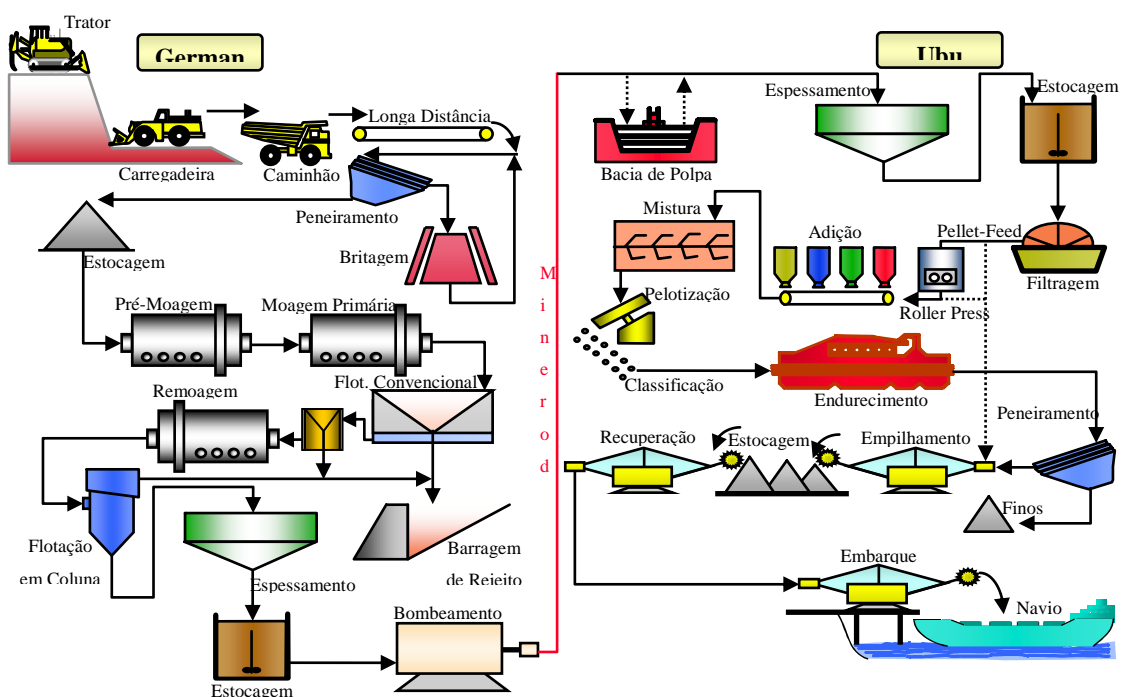


Figura 3-1 – Fluxograma do processo produtivo da Samarco, Germano (concentrador I) e Ubu (usinas I e II).

Anualmente são lavradas cerca de 27 milhões de toneladas de minério itabirítico, proveniente das minas de Alegria 1/2/6, Alegria 3/4/5 e Alegria 9. O minério lavrado é transportado por dois sistemas de correias transportadoras até uma instalação de peneiramento e britagem, a seco, onde a granulometria é reduzida de -150mm para -12,5mm. Após a etapa de britagem, o minério é estocado numa pilha com capacidade de 20.000t, de onde é retomado por quatro alimentadores rotativos para o concentrador de Germano.

No concentrador I (figura 3-2), o minério é alimentado inicialmente em dois moinhos de bolas de 5,18m x 8,53m e potência instalada de 6000HP. Essa etapa é denominada pré-

moagem e nela ocorre a primeira adição de água de processo, de forma que esses moinhos trabalhem com uma polpa com 78% de sólidos em peso.

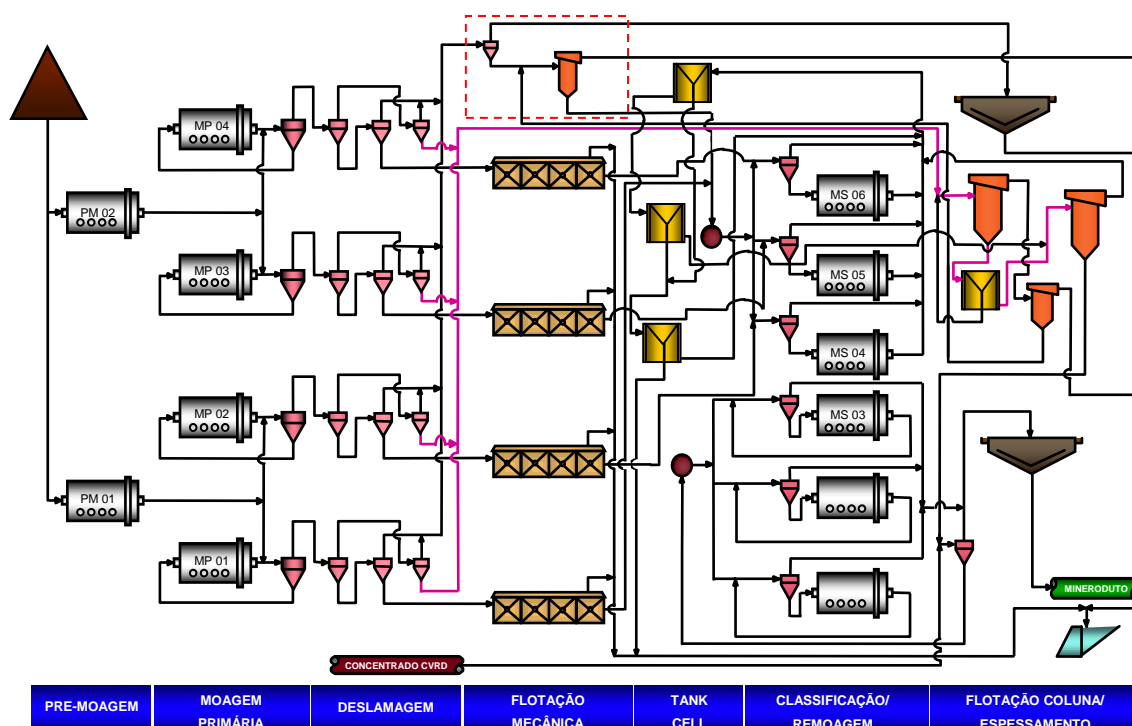


Figura 3-2 – Fluxograma do Concentrador I da Samarco.

Após as etapas de pré-moagem e moagem primária, o minério é deslamado em três estágios de ciclonagem, constituído por baterias de ciclones com diâmetros de 0,38m (15”), 0,25m (10”) e 0,10m (4”). Para se obter uma deslamagem eficaz, adiciona-se hidróxido de sódio a polpa para elevação do pH. O grau ótimo de dispersão da polpa ocorre em uma faixa de pH entre 8,5 e 9,0.

A lama (*overflow* do segundo e do terceiro estágio de ciclonagem) é direcionada para a planta de recuperação de finos. O *underflow* do segundo estágio segue para a etapa de flotação mecânica e o *underflow* do terceiro estágio segue para a etapa de flotação em coluna.

A etapa de flotação mecânica é composta por quatro linhas independentes, sendo cada linha constituída por: um condicionador primário; um condicionador secundário; um

banco *rougher*, com quatro células; um banco *cleaner* primário, com três células; um banco *scavenger* primário, com quatro células e um banco *cleaner* secundário, com três células. Cada célula possui um volume de $14,16\text{m}^3$ (500ft^3).

Essa etapa do processo inicia-se com o condicionamento, nos condicionadores primário e secundário, do minério proveniente do *underflow* do segundo estágio da deslamagem, com o amido de milho gelatinizado. O condicionador secundário alimenta, por transbordo, o banco *rougher*. Nesse ponto é adicionada a amina, que atua como espumante e coletor das partículas de quartzo.

O *underflow* das células *rougher* alimenta a etapa *cleaner* primário. O *underflow* das células *cleaner* primário alimenta o banco *cleaner* secundário. O *underflow* do banco *cleaner* secundário é o concentrado final da etapa de flotação mecânica.

O overflow das etapas *rougher* e *cleaner* primário alimenta a etapa *scavenger*. O *underflow* da etapa *scavenger* e o overflow da etapa *cleaner* secundário retornam na alimentação da etapa *rougher*. O overflow da etapa *scavenger* constitui o rejeito final da flotação mecânica, sendo direcionado à Cava de Germano.

O concentrado do circuito de células mecânicas alimenta três baterias de ciclones de $0,25\text{m}$ ($10''$) de diâmetro. O *underflow* desses ciclones alimenta três moinhos de bolas que operam em circuito aberto. Esses moinhos têm $5,18\text{m} \times 10,36\text{m}$ e potência instalada de 6000HP . A descarga dos moinhos, juntamente com o overflow dos ciclones, alimentam o circuito de células mecânicas de grande volume (*tank cells*).

O circuito de células de grande volume é composto por três células de 160m^3 cada, sendo uma *rougher*, uma *cleaner* e uma *scavenger*. O *underflow* da célula *cleaner* constitui o concentrado final dessa etapa. A célula *scavenger* é alimentada pelo overflow das células *rougher* e *cleaner*. O *underflow* da célula *scavenger* alimenta uma coluna de flotação com dimensões de $2,44\text{m}$ de diâmetro por 11m de altura e volume de $51,35\text{m}^3$. O *underflow* dessa coluna é encaminhado para a etapa *rougher* do circuito de células de

grande volume. O *overflow* dessa coluna, juntamente com o *overflow* da célula *scavenger*, constituem o rejeito final dessa etapa.

O *underflow* do terceiro estágio de deslamagem alimenta três colunas com dimensões de 6m x 3m x 13,6m e volume de 244m³. O *underflow* dessas colunas alimenta uma quarta célula de grande volume de 160m³. O *underflow* dessa célula, juntamente com o concentrado final do circuito de células de grande volume, alimenta quatro colunas de 3,7m de diâmetro por 13,6m de altura e volume de 140m³. O *underflow* dessas quatro colunas constitui o concentrado final do circuito de colunas de flotação e o *overflow* dessas quatro colunas é encaminhado para a etapa *rougher* do circuito de células de grande volume.

O *overflow* das três colunas de dimensões 6m x 3m x 13,6m e volume de 244m³ é encaminhado para duas colunas com 3m x 4m x 13,6m e volume de 166m³. O *overflow* dessas duas colunas constitui o rejeito final do circuito de colunas de flotação, e o *underflow* dessas duas colunas é encaminhado para as colunas da planta de recuperação de finos.

Na planta de recuperação de finos, o *overflow* do segundo e do terceiro estágio de deslamagem passa por seis baterias de ciclones. Cada bateria possui sessenta ciclones de 0,10m (4") de diâmetro. O *overflow* desses ciclones constitui a lama final e é encaminhado para os dois espessadores de lama. O *underflow* dos ciclones, juntamente com o *underflow* das colunas de 3m x 4m x 13,6m e volume de 166m³ vai para um tanque condicionador, onde é adicionado amido, e então alimenta dois estágios de flotação em coluna (*rougher* e *cleaner*). O rejeito do primeiro estágio é rejeito final e o concentrado do segundo estágio é encaminhado para a etapa *rougher* do circuito das células de grande volume.

O concentrado final do circuito de colunas, juntamente com um concentrado que a Samarco compra da VALE, alimenta três baterias de ciclones, cada bateria com dezesseis ciclones de 0,25m (10") de diâmetro. O *overflow* dessa ciclonagem é concentrado final e vai alimentar os espessadores de concentrado. O *underflow* é

dividido para três caixas que alimentam outras três baterias de ciclones, cada bateria com dez ciclones de 0,25m (10”) de diâmetro. Essas baterias fecham o circuito com três moinhos de bolas de 5,18m x 10,36m e potência instalada de 6000HP. O *overflow* é concentrado final e também vai alimentar os espessadores de concentrado e o *underflow* de cada bateria retorna para o respectivo moinho.

O concentrado final é espessado em dois espessadores de 41m de diâmetro. O *underflow* dos espessadores, com aproximadamente 71% de sólidos, é transferido para os tanques de estocagem do mineroduto. A água recuperada no *overflow* desses espessadores, assim como a água recuperada nos espessadores de lama, é bombeada para o tanque de água de processo.

A capacidade anual do concentrador de Germano é de 16,5 milhões de toneladas de concentrado, sendo 2 milhões de toneladas de concentrado provenientes da VALE. As especificações físicas e químicas dos produtos dos concentradores da Samarco são mostradas na tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Especificações dos produtos dos concentradores da Samarco.

Produto	%SiO ₂ (max.)	%P (max.)	%>0,074mm (max.)	%<0,044mm (min.)	Área superficial específica,cm ² /g (min.) *
Alto-Forno (CNS)	1,70	0,050	3,5	84,0	1450
Redução Direta (CLS)	1,06	0,040	3,5	84,0	1400

* Determinada pelo método de Blaine

3.4- Porosidade

3.4.1- Conceito

Um sólido é dito poroso quando apresenta cavidades e canais mais profundos do que largos. É importante diferenciar poros e vazios. Os vazios são espaços entre partículas e dependem da condição de compactação e do número de coordenação da partícula. Outra diferenciação necessária é aquela entre rugosidade e porosidade. A área de uma superfície rugosa é considerada como área superficial externa, enquanto que a área relativa às paredes dos poros abertos é considerada como área superficial interna. Porosidade refere-se ao volume de poros em um sólido. Estas são definições e terminologias da IUPAC.

Os poros são de dois tipos: abertos e fechados. Os primeiros são cavidades ou canais que se conectam com a superfície do sólido. Dessa maneira, os poros abertos são importantes vias de acesso de líquido ou gás para o interior da partícula e os métodos de porosimetria podem ser utilizados para a determinação do volume dos poros. Os fechados são aqueles não se comunicam com o exterior e, portanto, seu volume não é determinado por nenhuma técnica de porosimetria. A determinação do volume destes poros será possível através da medição da massa específica da amostra e da comparação desta com a massa específica conhecida daquele sólido (Brandão, 2003).

O tamanho dos poros é expresso em termos do diâmetro (ou raio) da abertura ou da largura da fenda (Webb, 1997). Pela IUPAC, poros com diâmetro ou fendas com larguras menores que 2nm são classificados como microporos. Mesoporos são definidos como poros com diâmetros entre 2 e 50nm e macroporos são aqueles com larguras ou diâmetros maiores que 50nm. Para uma precisão maior no conceito do tamanho de poros é necessário um conhecimento da forma geométrica destes. É comum considerar a forma cilíndrica reta para simplificações de cálculo.

A caracterização da estrutura dos poros envolve o acesso a parâmetros tais como: tamanho médio e volume de poros, distribuição do tamanho de poros, morfologia e área superficial específica.

3.4.2- Metodologia de Determinação

Os métodos mais utilizados para a obtenção da distribuição do tamanho de poros em materiais com poros na faixa de 0,45nm a 130 μ m são os de PIM e PACG. O primeiro cobre a faixa de tamanho de poros de 0,003 μ m a 130 μ m e o segundo, a faixa de 0,45nm a 100nm, com nitrogênio. Uma forma de avaliar a existência e a morfologia de poros, de uma maneira qualitativa, é a utilização de microscopia, tanto a ótica quanto a eletrônica de varredura (Brandão, 2003).

3.4.2.1- Porosimetria de Intrusão de Mercúrio

- Teoria

A determinação de informações sobre tamanho de poros através de PIM envolve a intrusão forçada de mercúrio líquido nos poros e a medição da quantidade deste líquido gasta no procedimento. A amostra de material poroso a ter sua porosidade medida é evacuada, imersa em mercúrio e a pressão do mercúrio na amostra é aumentada, causando a intrusão do mercúrio nos poros. O tamanho do poro que sofreu intrusão é inversamente proporcional à pressão aplicada. Isto permite uma medição direta do tamanho e do volume do poro e provê a base para uma série de cálculos de outras informações. Um processo reverso, a extrusão, permite a obtenção de outros dados a fim de se caracterizar a complexidade do poro.

A tensão superficial e o ângulo de contato do mercúrio contra a maioria das substâncias são muito elevados – 485dina/cm e 130° respectivamente – (Webb, 1997). Dessa maneira, o mercúrio não molha a maioria das substâncias e não penetra nos poros por

ação capilar, tendo de ser forçado a fazê-lo, através de pressão aplicada na proporção inversa ao tamanho da abertura.

Segundo Webb (1997), o comportamento de um líquido de baixa molhabilidade sobre um objeto poroso foi primeiramente descrito por E. W. Washburn, e a equação básica que governa este fenômeno é chamada equação de Washburn (equação 3.2). A equação é diretamente aplicável com mercúrio, que é o único líquido realmente adequado às medidas de porosimetria.

Quando o mercúrio está em contato com a abertura de um poro de seção transversal circular, a tensão superficial dele atua ao longo do círculo de contato por um comprimento igual ao perímetro do círculo, conforme figura 3-3, que mostra também a definição de ângulo de contato. Então, a força com a qual o mercúrio resiste a entrar no poro é igual a $-\pi D\gamma \cos\theta$, onde D é o diâmetro do poro, γ a tensão superficial e θ o ângulo de contato. O sinal negativo é devido ao fato de θ ser maior que 90° . A força, devida à pressão externa aplicada, atua sobre a área do círculo de contato e é expressa matematicamente por $\pi D^2 P/4$, onde P é a pressão aplicada. No equilíbrio, estas forças opostas se igualam e então tem-se:

$$-\pi D\gamma \cos\theta = \frac{\pi D^2 P}{4} \quad (3.1)$$

ou simplificadamente:

$$D = \frac{-4\gamma \cos\theta}{P} \quad (3.2)$$

A equação 3.2 é a equação de Washburn. Nesta equação é considerado que os poros são cilíndricos ou cônicos.

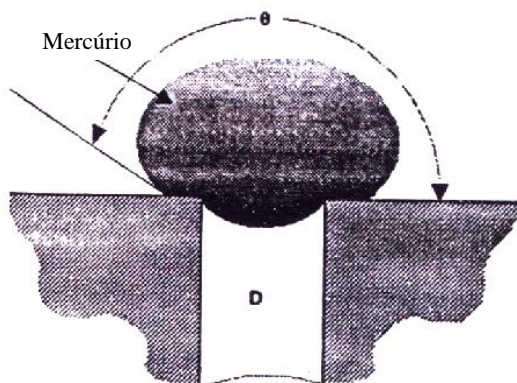


Figura 3-3 – Mercúrio em contato com um sólido poroso.

A despeito da geometria do poro e do modelo empregado para descrevê-lo, o volume de mercúrio forçado para os poros (e para os vazios) aumenta quando a pressão aplicada é aumentada. Então, aumentar a pressão sobre o mercúrio ao redor de um material poroso resultará numa curva única de pressão X volume, conforme exemplificado na figura 3-4.

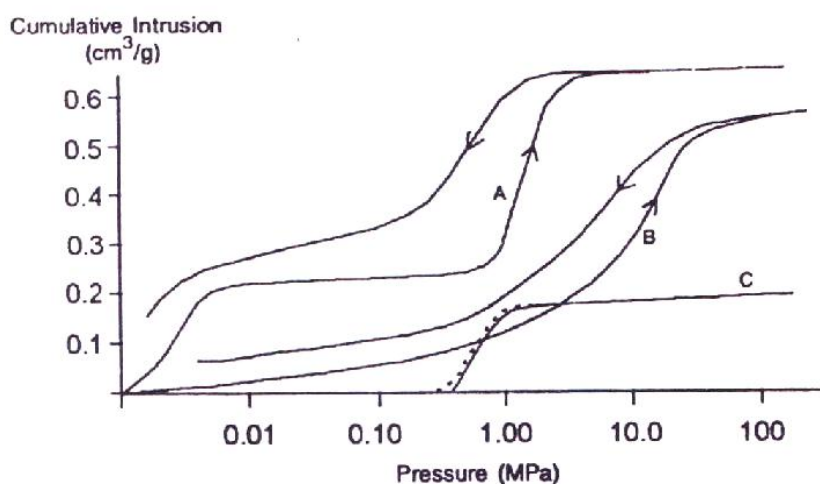


Figura 3-4 – Curvas típicas de intrusão e extrusão a partir de uma análise de PIM.

Na figura 3-4, a curva A representa uma amostra de grãos relativamente grossos. Esta curva exibe duas partes distintas: a parte inclinada a baixa pressão é devida aos espaços vazios entre os grãos, enquanto que a segunda parte inclinada é devida aos poros existentes nos grãos. A curva B representa uma amostra com uma faixa ampla de tamanho de poros e nenhum volume relativo a vazios está indicado. A curva C representa uma amostra de pó fino sem poros e o volume indicado é devido unicamente

aos vazios entre os grãos. Isto é comprovado pelo fato de que o diâmetro mediano deste pó é de 0,01mm e, se existissem poros, estes seriam obviamente menores que as partículas. Dessa maneira, os poros apareceriam a pressões maiores que 1,25MPa (usando-se a equação 3.2 para este diâmetro), e isto não aparece na curva.

A extrusão do mercúrio é indicada pelas setas na direção de baixa pressão. A diferença entre as duas curvas pode ser devida ao aprisionamento do mercúrio dentro de poros com forma de garrafa e à diferença entre os ângulos de contato da intrusão e da extrusão. Entretanto, dados de extrusão de mercúrio são bastante controversos e se aplicam apenas a alguns sistemas e portanto, para a obtenção da distribuição de tamanho de poros só são utilizados os dados de intrusão.

Uma informação obtida a partir da equação 3.2 é o volume cumulativo de poros X diâmetro dos poros. Da mesma forma, volume incremental de poros é facilmente obtido. Volume incremental deve estar relacionado a algum diâmetro médio de poros. Este diâmetro médio é usualmente uma média simples entre o diâmetro no início e no final de cada aumento de pressão.

Outras informações oriundas da análise a partir de PIM são: área da parede dos poros, área cumulativa e incremental da parede dos poros, gráfico de intrusão diferencial X diâmetro, gráfico de log da intrusão diferencial X diâmetro, volume específico de poro, área total de poro, comprimento do poro, densidade total, densidade absoluta e porosidade percentual. Segundo Brandão (2003), este método dá indicativos ambíguos sobre a forma do poro, ao contrário de PACG, mas é muito bom para a distribuição de poros.

- Descrição do Instrumento (Webb, 1997; Lowell, 1984)

Existem muitos porosímetros de mercúrio de alta pressão, mas alguns componentes essenciais são comuns a todos os modelos. Estes componentes incluem:

- célula porta-amostra;
- dilatômetro ou penetrômetro (ligado à célula porta-amostra) no qual o nível de mercúrio varia com a intrusão e a extrusão;
- aparato de vácuo para remover o ar contido nos poros e para transferir o mercúrio para a célula porta-amostra;
- gerador de pressão;
- vaso de alta pressão, que contém a célula porta-amostra;
- sonda para medir o nível do mercúrio; e
- fluido hidráulico para transmitir a pressão para o dilatômetro.

Os porosímetros de mercúrio comerciais disponíveis atingem uma pressão máxima de 413,7MPa. As pressões requeridas são obtidas com um intensificador de pressão que transmite uma força sobre uma ampla área para uma área menor, aumentando a pressão aplicada. Válvulas são utilizadas para dirigir o fluxo de fluido para dentro ou fora do intensificador em cada ciclo. Por causa da operação recíproca do intensificador de pressão, a maioria dos porosímetros opera de forma incremental, isto é, os volumes que sofreram intrusão são medidos como pontos discretos após cada incremento de pressão.

Recentemente novos tipos de porosímetros (porosímetro de varredura contínua) foram desenvolvidos, empregando um gerador de pressão que produz uma rampa de pressão contínua e monotônica, conforme figura 3-5. Um gerador de pressão, movido por um motor de 1hp, com engrenagens de redução de 50:1, usa uma haste para mover uma barra de aço inoxidável dentro de uma cavidade estreita preenchida com óleo hidráulico. Quando a barra penetra nesta cavidade, o óleo é comprimido em todo o aparato. O volume total deslocado pela barra é 20cm^3 , o qual é suficiente para elevar a pressão a 413,7MPa na coluna de mercúrio. A taxa de pressurização ou despressurização é controlada pela velocidade do motor na proporção inversa à taxa de intrusão ou

extrusão. Um transdutor medidor de tensão localizado próximo ao topo do gerador de pressão provê um sinal elétrico proporcional à pressão.

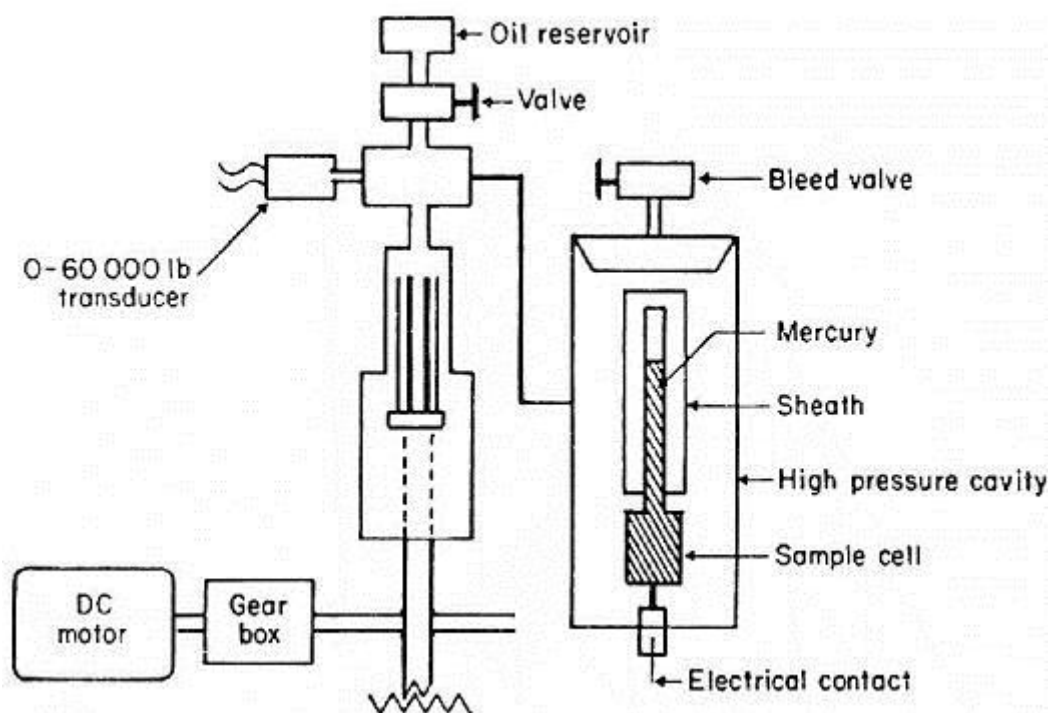


Figura 3-5 – Porosímetro de mercúrio de varredura contínua.

O vaso de pressão que contém a célula porta-amostra é conectado ao gerador de pressão com um tubo de alta pressão. Um reservatório de óleo próximo ao topo deste aparato alimenta óleo a este vaso, quando requerido. Este vaso possui tampas removíveis no topo e na base para carregamento da célula porta-amostra e para drenagem, caso a célula da amostra (feita de vidro) se quebre durante o teste. A evacuação da amostra e o preenchimento com mercúrio ocorrem em um vaso de baixa pressão.

O nível de mercúrio é monitorado com uma sonda de capacitância, conforme figura 3-6. O mercúrio contido no dilatômetro constitui uma placa do capacitor, e um cilindro de metal ao redor do dilatômetro atua como a segunda placa. A capacitância é alterada com o nível do mercúrio devido à variação da área da placa efetiva. Uma variedade de penetrômetros com diferentes tamanhos de vasos e capilares existe para acomodar a maioria dos tamanhos de amostra e configurações. Além disto, existem dois tipos de penetrômetros: aquele para amostras granuladas ou em pó e aquele para amostras sólidas, em pedaços.

Os sinais a partir da sonda de capacitância e do transdutor de pressão são registrados em um gráfico X-Y como volume que sofreu intrusão e raio do poro, respectivamente.

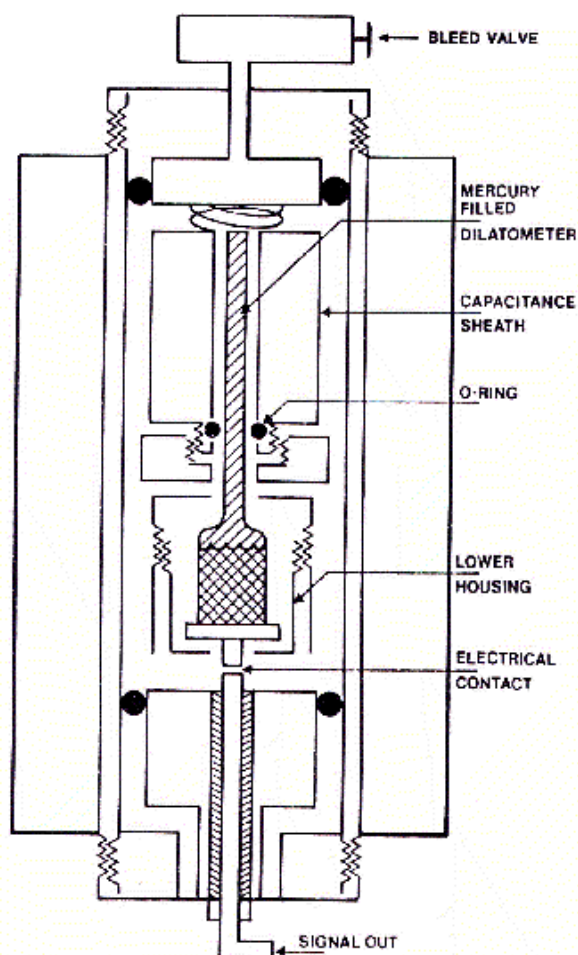


Figura 3-6 – Sonda de capacitância: cavidade de alta pressão e selos para medidas contínuas de intrusão-extrusão.

3.4.2.2- Porosimetria de Adsorção-Condensação Gasosa

- Teoria (Lowell, 1984)

O método de porosimetria de adsorção-condensação gasosa baseia-se na condensação de um gás em poros e permite informações sobre o volume destes poros a partir da quantidade de gás (convertido a volume de líquido condensado) requerida. Superfícies

limpas e resfriadas são expostas a um gás inerte que primeiramente é adsorvido em uma camada monomolecular, de acordo com a teoria clássica. Esta teoria também diz que, admitindo-se mais gás, a espessura da camada aumentará para uma profundidade de muitas moléculas até uma camada de espessura infinita, e ocorrerá condensação quando a pressão de vapor de saturação for atingida. Se, contudo, o sólido para o qual o gás está sendo direcionado é poroso, a condensação começará nos menores poros antes do preenchimento dos poros maiores.

Este método pode sondar as irregularidades da superfície e o interior dos poros de sólidos através do envolvimento das partículas da amostra por um filme adsorvido. Adsorção pode ocorrer sempre que uma superfície sólida limpa é exposta a um vapor. O nitrogênio é o gás comumente utilizado por ter a reatividade necessária à adsorção com a maioria dos sólidos. Além disso, sua reatividade também permite a dessorção que é muito importante na obtenção de informações sobre porosidade (Brandão, 2003).

A quantidade adsorvida W na superfície do sólido depende da temperatura absoluta T , da pressão P e do potencial de interação E entre o vapor (adsorvato) e a superfície (adsorvente). Mas como a quantidade de gás adsorvida é usualmente medida à temperatura constante, então diz-se que a quantidade adsorvida é dependente de P e E .

O gráfico de $W \times P$, à temperatura constante, é denominado isoterma de adsorção de uma interface vapor-sólido particular. Como o potencial de interação depende das propriedades do vapor e do sólido e também da extensão da adsorção, as isotermas de adsorção são diferentes.

Segundo Brunauer, Deming, Deming e Teller (Santilli, 1993) todas as isotermas encontradas se ajustam aos cinco tipos mostrados na figura 3-7.

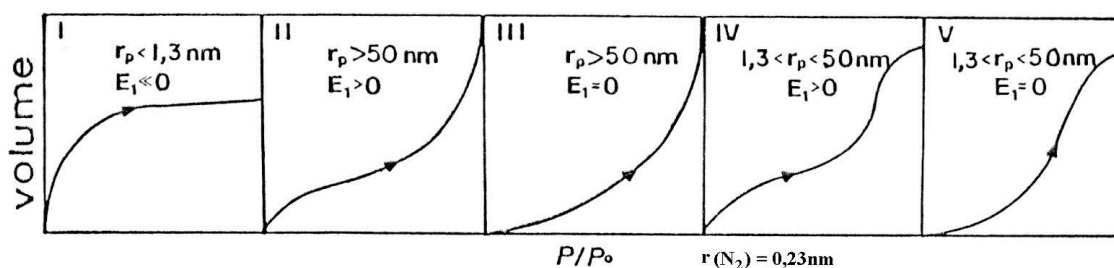


Figura 3-7 – Cinco isotermas de adsorção classificadas de acordo com BDDT.

Isoterma do tipo I – característica de adsorventes microporosos, ou seja, poros com tamanho próximo ao diâmetro da molécula do adsorvato. É caracterizada por se apresentar côncava em relação ao eixo da pressão relativa com um aumento rápido da quantidade específica adsorvida a baixa pressão relativa, atingindo um platô. A partir de determinada pressão, observa-se a tendência a um valor limite, que se admite corresponder à monocamada completa. Isotermas deste tipo são conhecidas como isotermas de Langmuir.

Isoterma do tipo II – caracteriza-se por uma parte côncava até o ponto B, que corresponde à formação de monocamada completa em sólido não poroso. É a isoterma clássica de BET, utilizada para determinação de área superficial específica.

Isoterma do tipo III – apresenta-se convexa em toda a faixa de pressão relativa. A adsorção inicial é lenta em virtude de fracas interações adsorvente-adsorvato. Em seguida, a taxa de adsorção aumenta com a formação de multicamadas. Isotermas deste tipo são raras.

Isoterma do tipo IV – apresenta comportamento semelhante ao tipo II, exceto quanto à inclinação mais acentuada na região intermediária. Este comportamento é típico de mesoporos e macroporos. O comportamento não assintótico a pressões relativas elevadas está relacionado com o enchimento dos mesoporos. A figura 3-8 ilustra o processo de adsorção física observado em materiais que apresentam este tipo de isoterma.

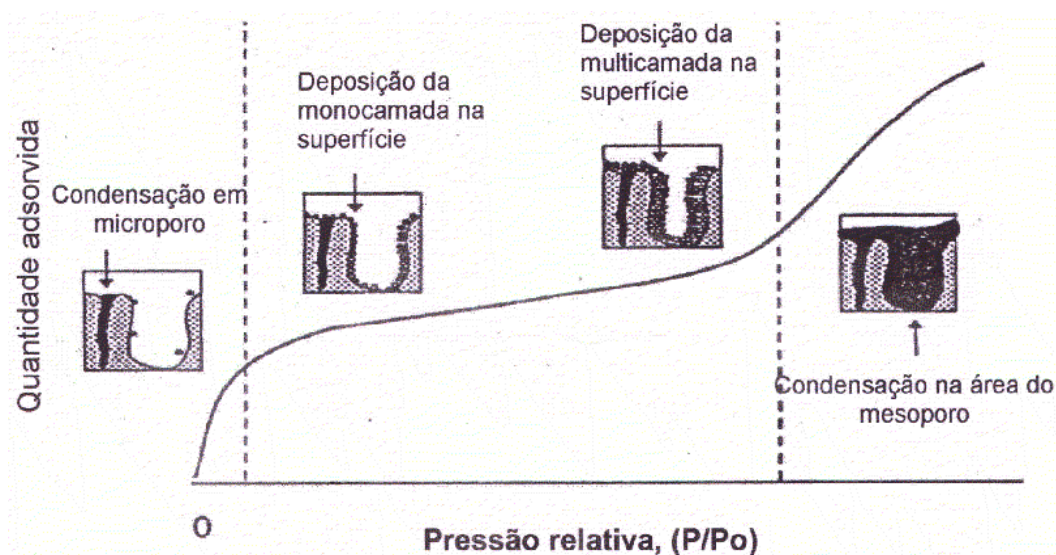


Figura 3-8 – Processo de adsorção física em materiais que exibem a isoterma do tipo IV, Micromeritics (1991).

Isoterma do tipo V – apresenta-se inicialmente convexa devido à pequena interação adsorvato-adsorvente, como na isoterma do tipo III. Entretanto, está também associada a poros da mesma faixa de tamanho daqueles da isoterma do tipo IV.

As isotermas mostradas nas figuras 3-7 e 3-8 mostram apenas a curva de adsorção. Quando a curva de dessorção também é mostrada, esta geralmente não coincide com a curva de adsorção devido a um fenômeno chamado histerese.

Várias teorias tentam explicar a existência da histerese: diferença do ângulo de contato do líquido na adsorção (condensação) e na dessorção (evaporação); poros que apresentam diâmetro pequeno perto da superfície e aumentam para o interior, como uma garrafa, seriam completamente preenchidos durante a condensação, mas reteriam parte do líquido durante a evaporação; os poros são preenchidos pela adsorção nas paredes enquanto que a evaporação ocorre a partir do menisco esférico; há ainda causas mais raras.

A figura 3-9 (Santilli, 1993) apresenta quatro tipos de histerese propostas pela IUPAC. As do tipo H1, H2 e H3 são típicas de mesoporos. O tipo H1 ocorre em poros cilíndricos com abertura em ambas as extremidades ou formados pela superposição de

placas paralelas. O tipo H2 ocorre em poros em forma de garrafa. O tipo H3 ocorre em poros na forma de fenda, pirâmides ou cones. O tipo H4 é uma histerese típica de microporos, a partir da isoterma de Langmuir.

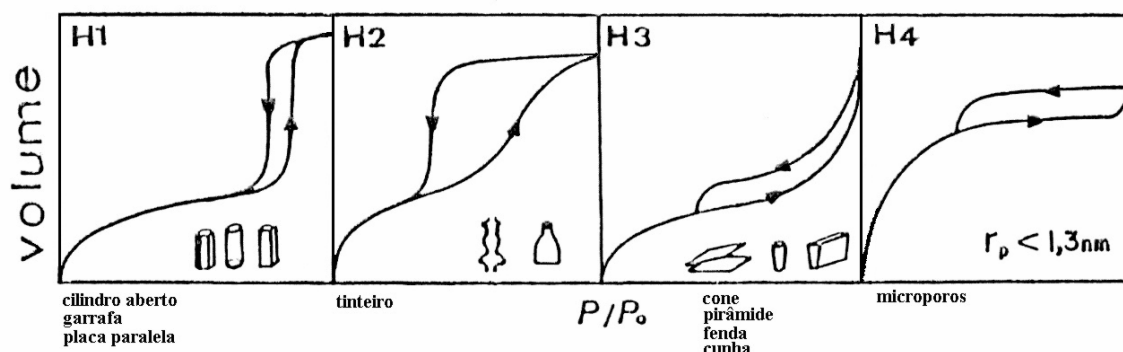


Figura 3-9 – Quatro tipos de histerese, segundo IUPAC.

Os estudos de adsorção relativos à medida de tamanho de poro e distribuição de tamanho de poro geralmente fazem uso da equação de Kelvin (3.3), que relaciona pressão de vapor de equilíbrio em uma superfície curva, tal como a de um líquido em um capilar ou poro, à pressão de equilíbrio do mesmo líquido em uma superfície plana.

$$\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{2\gamma\bar{V}}{rRT} \cos \theta \quad (3.3)$$

onde P é a pressão de vapor de equilíbrio do líquido contido em um poro estreito de raio r e P_0 é a pressão de equilíbrio do mesmo líquido exibindo uma superfície plana. Os termos γ e \bar{V} são a tensão superficial e o volume molar do líquido, respectivamente, e θ é o ângulo de contato com o qual o líquido encontra a parede do poro.

Em um poro, o potencial de sobreposição das paredes supera a energia translacional de uma molécula de adsorvato, de modo que a condensação ocorrerá a uma pressão mais baixa em um poro do que normalmente ocorreria em uma superfície plana ou aberta. Então, quando a pressão relativa é aumentada, a condensação ocorre primeiramente em poros de menor raio, avançando progressivamente para os poros de maior raio até que, a uma pressão relativa igual a um, a condensação ocorrerá naquelas superfícies onde o

raio da curvatura é infinito. Quando a pressão relativa é diminuída, a evaporação ocorre a partir dos poros maiores.

A equação 3.3 pode ser reduzida à equação 3.4, uma vez que θ é tido como zero já que o líquido (vapor condensado) molha completamente a parede do poro, principalmente se estiver sendo usado o nitrogênio.

$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{-2\gamma\bar{V}}{rRT} \quad (3.4)$$

A equação 3.4 é a equação de trabalho para análise de tamanho de poro por adsorção, a não ser que informação mais específica sobre a geometria do poro e ângulo de contato esteja disponível.

A teoria BET, uma extensão da teoria cinética de Langmuir para a adsorção de multicamadas, assume que as moléculas mais externas nas camadas estão em equilíbrio dinâmico com o vapor. Desde que o equilíbrio é dinâmico, a localização real dos sítios da superfície cobertos por uma, duas ou mais camadas pode variar, mas o número de moléculas em cada camada permanecerá constante. Desenvolvendo a equação de Langmuir, levando-se em conta as considerações de BET, chega-se à equação de BET (3.5).

$$\frac{p}{V} = \frac{1}{V_m C} + \left[\frac{(C-1)}{V_m C} \right] \frac{p}{p_s} \quad (3.5)$$

onde p é a pressão de equilíbrio, p_s é a pressão de saturação do gás, V é o volume de gás adsorvido, V_m é o volume de gás adsorvido na formação da monocamada, C é a constante de adsorção, definida por $C = \exp\left[\frac{(E_1 - E_L)}{RT}\right]$, E_1 é o calor de adsorção da primeira camada adsorvida e E_L é o calor de liquefação do gás adsorvato.

Esta equação é muito utilizada devido à facilidade de seu uso e à sua habilidade em ajustar-se às várias isotermas de adsorção.

A equação 3.5 pode ser também escrita conforme a equação 3.6, obtida através de linearização. Esta equação permite uma determinação experimental do número de moléculas requeridas para formar uma monocamada, a despeito do fato de uma monocamada completa ser ou não realmente formada.

$$\frac{1}{W \left[\left(\frac{p_s}{p} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1}{W_m C} \left(\frac{p}{p_s} \right) \quad (3.6)$$

onde W é a massa de gás adsorvido na pressão relativa p/p_s e W_m é a massa de gás adsorvida como monocamada completa.

O volume total de poro, segundo Quantachrome Corporation (manual do equipamento), é obtido a partir da quantidade de vapor adsorvido à pressão relativa próximo à unidade, assumindo que os poros estão preenchidos por um líquido adsorvato. Se o sólido não contém macroporo a isoterma permanecerá próximo da horizontal numa faixa de P/P_0 aproximando da unidade o volume de poro é bem definido. Contudo, na presença de macroporos, a isoterma aumenta rapidamente próximo de $P/P_0 = 1$ e no limite de grandes macroporos pode exibir uma curvatura essencialmente vertical. O volume de nitrogênio adsorvido (V_{ads}) pode ser convertido em volume de nitrogênio líquido (V_{liq}) contido nos poros usando a equação 3.7.

$$V_{liq} = \frac{P_a}{R} \frac{V_{ads}}{T} \frac{V_m}{T} \quad (3.7)$$

Onde P_a e T são pressão e temperatura ambiente, respectivamente, e V_m é o volume molar do adsorvato líquido (34,7 cm³/mol para o nitrogênio).

Uma vez que poros que não foram preenchidos abaixo da pressão relativa de 1 têm uma contribuição muito pequena para o volume total de poro e para a área superficial da amostra, o tamanho médio do poro pode ser estimado a partir do volume. Por exemplo, assumindo um poro com geometria cilíndrica (histerese de tipo A), o raio médio de poro pode ser expresso como descrito na equação 3.8.

$$r_p = \frac{2 V_{liq}}{S} \quad (3.8)$$

Onde V_{liq} é obtido a partir da equação 3.7 e S é a área superficial BET. Para outras geometrias de poro o conhecimento da forma de histerese na isoterma de adsorção/dessorção é requerido.

Para analisar a distribuição de tamanho de poro, é geralmente aceito que a curva de dessorção é mais apropriada que a de adsorção. A curva de dessorção da isoterma, para o mesmo volume de gás, mostra uma pressão relativa mais baixa, resultando numa energia livre mais baixa. A partir da equação 3.4, considerando poros cilíndricos e usando constantes apropriadas para o nitrogênio, tem-se a equação 3.9.

$$r_k (\text{Å}) = \frac{4.15}{\log(P_0/P)} \quad (3.9)$$

O raio Kelvin, r_K , é o raio do poro no qual a condensação ocorre à pressão relativa P/P_0 . Uma vez que, antes da condensação, alguma adsorção ocorre nas paredes do poro, r_K não representa o raio real. Da mesma maneira, durante a dessorção uma camada adsorvida permanece nas paredes quando a evaporação ocorre. O raio real do poro é então dado pela equação 3.10.

$$r_p = r_K + t \quad (3.10)$$

Onde t é a espessura camada adsorvida. Este t estatístico pode ser considerado como $3,54 (V_{ads}/V_m)$ onde $3,54\text{Å}$ é a espessura de uma camada molecular de nitrogênio e

V_{ads}/V_m é a razão entre o volume de nitrogênio adsorvido numa dada pressão relativa e o volume adsorvido numa monocamada para um sólido não poroso de mesma composição que a amostra porosa. Um método mais conveniente para estimar t foi proposto por de Boer na forma da equação 3.11.

$$t(\overset{\circ}{A}) = \left[\frac{13.99}{\log(P/P_0) + 0,034} \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

Segundo Brandão (2008) o volume de mesoporos e a distribuição de tamanho são calculados mais comumente pelo método BJH (Barrett, Joyner e Halenda), que consiste em dividir a isoterma em k intervalos enumerados a partir das pressões mais elevadas, no caso da dessorção. A partir de cada intervalo, calcula-se o raio r_p para cada classe de pressão (equação 3,10).

O volume total de microporos e a distribuição dos diâmetros destes poros baseiam-se em duas equações: equação de Dubinin - 1967 (3.12) e equação de de Boer – 1965 (3.13).

$$\log(V) = \log(V_0) + D \left[\log\left(\frac{P_0}{P}\right) \right]^m \quad (3.12)$$

Onde V_0 é o volume total de microporos; V é o volume de gás adsorvido e condensado nos microporos, sob pressão P ; D é o parâmetro que depende do diâmetro médio dos poros e do potencial de adsorção C ; e m é o parâmetro que depende da distribuição dos diâmetros dos microporos, podendo assumir os valores 3 (Weibull) ou 2 (Gauss).

V_0 pode ser obtido da equação 3.12, como o coeficiente linear da reta. Este volume serve também para calcular a ASE para os sistemas com isoterma tipo I, onde V_0 substitui a variável W_m , na equação de BET.

$$\log\left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{D}{t^n} + E^{-Ft} \quad (3.13)$$

Onde D é o parâmetro que depende do diâmetro médio dos poros e do potencial de adsorção C de BET; E , F e n são parâmetros empíricos que dependem também da constante C ; e t é a espessura da camada adsorvida.

A distribuição dos diâmetros de microporos depende do modelo considerado e os mais usados são:

- modelo t de de Boer: relação entre t e d ; função de V_k e t_k ;
- modelo de Dubinin-Radushkevich, ou método DR;
- modelo de Dubinin-Astakhov, ou método DA;
- modelo de Horvath-Kawazoe, ou método HK;
- métodos baseados em dimensões fractais (mais modernos): o mais popular é o modelo de Neimark-Kiselev (NK).

- Descrição do Instrumento (Webb, 1997)

Todos os instrumentos cujo princípio para medição de tamanho de poros é a adsorção de gás primeiramente eliminam a umidade e os vapores atmosféricos adsorvidos na amostra através da aplicação de calor e vácuo ou purga com gases que não reagem com a superfície, como hélio ou nitrogênio.

Então, a temperatura da amostra é reduzida para a temperatura do nitrogênio líquido, argônio líquido ou qualquer outro refrigerante adequado ao gás ou vapor que será adsorvido. Isto é feito porque a adsorção gasosa é favorecida em temperaturas mais baixas (-196°C com o uso do nitrogênio líquido) devido à ausência de agitação térmica (Brandão, 2003).

O gás a ser adsorvido pode ser injetado em incrementos (figura 3-10), continuamente (figura 3-11) ou como um componente de uma mistura com hélio em fluxo contínuo (figura 3-12). A quantidade de gás adsorvida é medida pelas mudanças de pressão quando o gás é trocado entre os tubos de conexão e a célula porta-amostra. Os dados são

tratados de acordo com as teorias de adsorção de gás (citadas na seção anterior) para chegar aos valores de tamanho de poros.

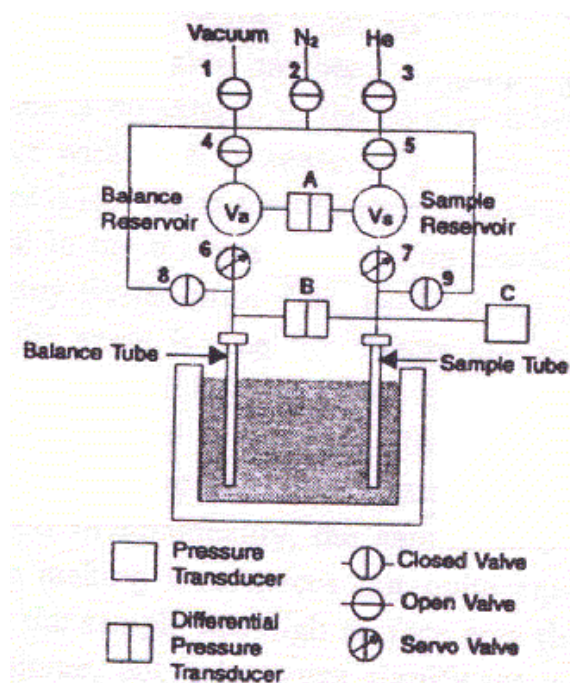


Figura 3-10 – Diagrama esquemático do equipamento com injeção incremental de gás.

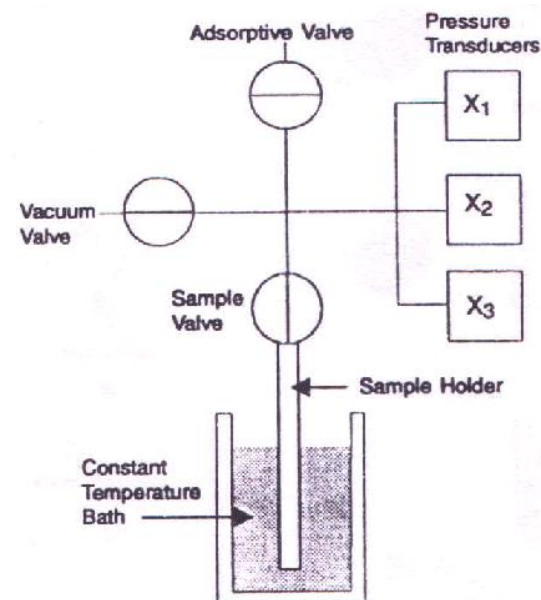


Figura 3-11 – Diagrama esquemático do equipamento Gemini, com injeção contínua de gás.

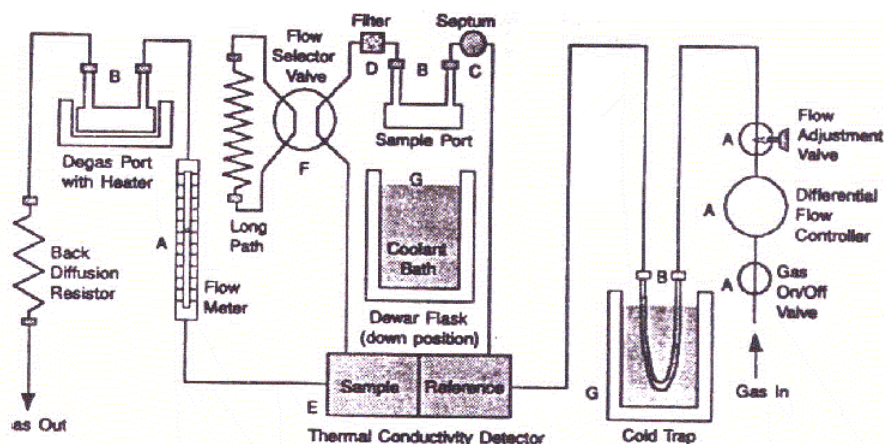


Figura 3-12 – Diagrama esquemático do equipamento com injeção contínua de mistura de gases.

3.4.2.3- Microscopia Eletrônica de Varredura

- Teoria (England, 1991; Petruk, 2002)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado a um analisador de raios-X dispersivo em energia (EDX) é usado nos estudos mineralógicos para analisar seções polidas ou delgadas e pedaços de material. O MEV/EDS é usado para identificar minerais, para obter fotomicrografias que mostram o tamanho e os relacionamentos dos grãos minerais e para obter espectros de raios-X que mostram as distribuições dos elementos nos minerais.

O MEV produz um feixe de elétrons sob vácuo que interage com a amostra. A amostra, que geralmente é não condutora, precisa ser revestida (usualmente com uma fina camada de carbono ou ouro) para prevenir a formação de carga negativa em sua superfície. O material irradiado na amostra produz elétrons retroespalhados (BSE), elétrons secundários (SE), raios-X e outros sinais. O MEV é geralmente equipado com detectores para perceber os sinais de BSE, SE e EDS.

Os elétrons retroespalhados são os elétrons do feixe primário retroespalhados pela amostra com uma energia média de aproximadamente 80% da energia do feixe primário. O detector de elétrons retroespalhados exibe o sinal dos BSE na tela de tubo

de raios catódicos (CRT) como uma imagem em escala de cinza, que mostra a distribuição dos minerais na seção polida ou delgada. O tom de cinza depende do número atômico médio. Número atômico médio baixo aparece em tom escuro e à medida que o número atômico aumenta, o cinza vai clareando até o branco. O nível de cinza pode ser mudado, alterando o contraste e o brilho no detector de elétrons retroespalhados.

A imagem de elétrons retroespalhados é a mais informativa para aplicações mineralógicas porque mostra a distribuição dos minerais e pode prover informação qualitativa de elementos químicos. Por causa da maior profundidade dos elétrons retroespalhados e da grande extensão do feixe incidente de elétrons por espalhamento múltiplo nas profundidades da amostra, a resolução espacial é inferior do que aquela atingida com elétrons secundários. Contudo, para baixas ampliações (quando alta resolução não é necessária), elétrons retroespalhados podem fornecer um contraste de imagem superior.

Os elétrons secundários são elétrons de baixa energia expelidos da superfície da amostra. Eles são gerados pela ionização dos átomos na superfície da amostra e, devido à sua energia relativamente baixa, podem somente ser emitidos a partir de uma profundidade de, no máximo, 10nm a partir da superfície. Essa profundidade decresce para materiais com número atômico médio maior. Devido à sua baixa profundidade, a emissão de SE gera as imagens mais nítidas.

O detector de elétrons secundários mostra o sinal de elétrons secundários na CRT como uma imagem em tons de cinza. A imagem mostra a distribuição dos minerais e alguns efeitos topográficos. Esta imagem não é tão útil para a distribuição dos minerais, mas mostra detalhes das irregularidades da superfície e das partículas menores aderidas às partículas maiores.

- Descrição do Instrumento

Um desenho esquemático dos componentes de um MEV típico é mostrado na figura 3-13.

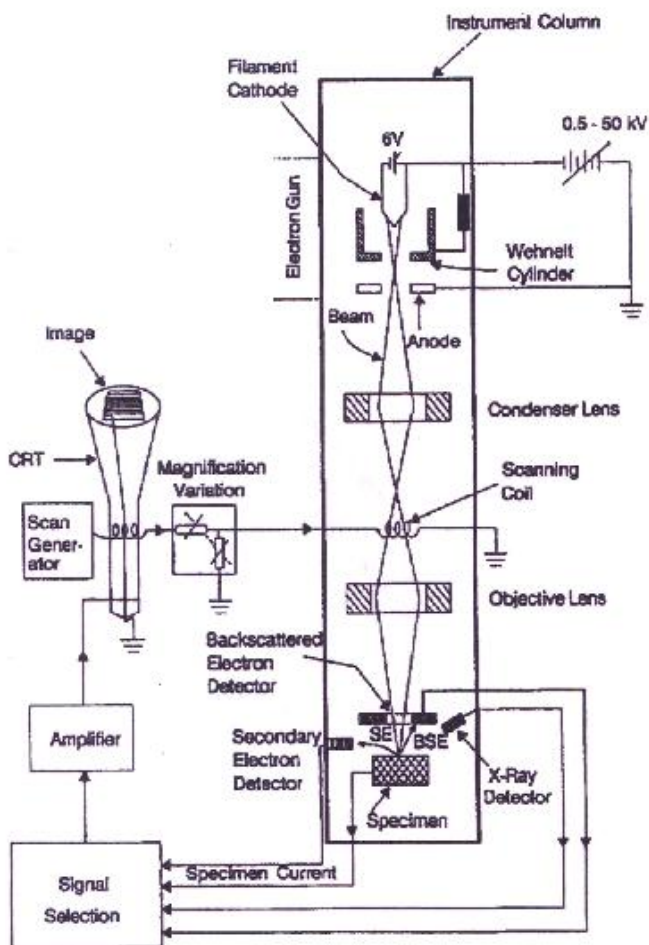


Figura 3-13 – Desenho esquemático dos componentes de um MEV típico.

A fonte tradicional de elétrons é um catodo na forma de um filamento fechado de tungstênio, localizado no topo da coluna do instrumento. A voltagem aplicada ao cilindro de metal ao redor do filamento restringe os elétrons em um feixe, o qual é direcionado ao anodo mantido em uma alta diferença de voltagem, se comparado com o catodo. Após passar pelo anodo, o feixe de elétrons desce pela coluna em direção à amostra.

Lentes eletromagnéticas localizadas na coluna são usadas para focalizar o feixe de elétrons. Um sistema de lentes condensadoras é usado para focalizar o feixe de elétrons em um ponto exato, o qual é escaneado eletromagneticamente através da superfície da amostra por uma bobina montada na coluna do microscópio. Lentes objetivas são usadas para manter o perfil ideal do feixe de elétrons na superfície da amostra. Sinais produzidos pela interação do feixe de elétrons com a amostra são coletados por vários detectores existentes ao longo da câmara da amostra na base da coluna do instrumento.

A imagem não é formada na coluna do microscópio propriamente dita. Detalhes das intensidades dos sinais recebidos pelos detectores são usados para ajustar eletronicamente o brilho dos pontos no CRT, usado para exibir a imagem da amostra. O ponto criado no CRT está sincronizado com os pontos do feixe de elétrons que escaneiam a amostra. O aumento é atingido variando-se o tamanho da área escaneada.

Em um MEV, a coluna, incluindo o canhão de elétrons no topo e a câmara de amostra na base, é mantida sob alto vácuo durante a operação. As amostras devem estar secas e livres de gases voláteis, que podem evaporar sob o aquecimento derivado do bombardeamento de elétrons, contaminando a coluna. Outra fonte de contaminação que deve ser evitada é amostra com baixo ponto de fusão. Contaminações podem levar à perda de resolução, problemas de vácuo e produção de picos falsos no espectro de raios-X.

3.5- Área Superficial Específica

3.5.1- Conceito

Área superficial específica é a soma total da área superficial de um material particulado ou de um corpo de prova poroso, por unidade de massa. Ela tem como fatores determinantes a distribuição dos diâmetros das partículas, a forma das partículas, a porosidade e a rugosidade. Para sua determinação existem duas técnicas principais

(serão discutidas na sessão 3.5.2): a indireta (comparativa), que é empírica – pelo método de Blaine, e a direta e científica - pelo método BET, por adsorção gasosa.

3.5.2- Metodologia de Determinação

3.5.2.1- Método de Blaine

- Teoria

Através deste método, a área superficial específica é obtida a partir da medida da permeabilidade da amostra, isto é, do tempo gasto para um certo volume de ar, sob dada pressão, atravessar a amostra. A amostra é introduzida na célula do equipamento, acoplada no topo de um tubo em U preenchido parcialmente com óleo. Desloca-se a coluna de óleo até o topo de um dos lados do tubo e, operando-se uma válvula, permite-se que essa coluna desloque-se gravitacionalmente, o que faz passar um fluxo de ar pela célula. O tempo de deslocamento é cronometrado, e esse tempo é diretamente proporcional à área superficial específica, conforme equação 3.14.

$$ASE = \frac{K\varepsilon^{1,5}t^{0,5}}{\rho(1-\varepsilon)\eta^{0,5}} \quad (3.14)$$

onde

ASE – área superficial específica, em massa (m^2/kg)

t – tempo, em s

ρ – massa específica do material

η – viscosidade do ar, em (Pa.s)

- Descrição do Instrumento (Souza, 1964)

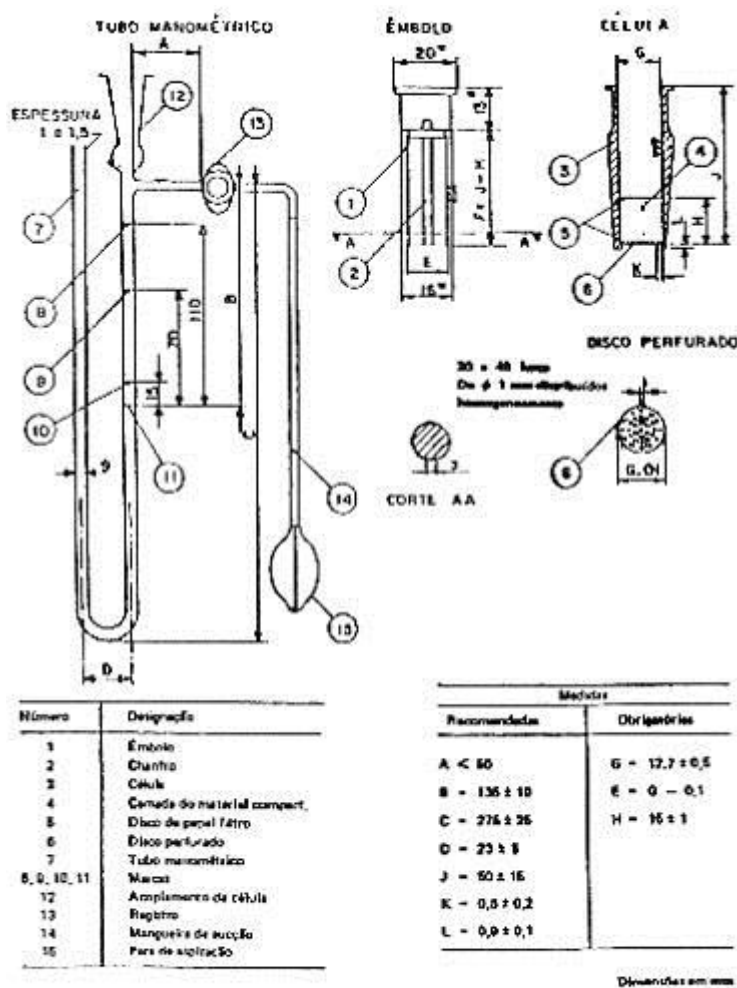
O permeabilímetro de Blaine compõe-se dos seguintes elementos: célula de permeabilidade, disco metálico, êmbolo, filtro de papel, manômetro, líquido manométrico e cronômetro, conforme figura 3-14.

A célula de permeabilidade consiste de um cilindro rígido de vidro ou metal não corrosível de $1,27 \pm 0,10$ cm de diâmetro interno. A parte superior do mesmo deve formar um ângulo reto com o seu eixo principal. A parte inferior ajusta-se, hermeticamente, ao topo do manômetro. Um ressalto de 0,5 a 1,0mm de largura integra-se à célula, distante $5,0 \pm 1,5$ cm da parte superior, a fim de suportar o disco metálico perfurado.

O disco metálico deve ser de metal não corrosível e espessura $0,9 \pm 0,1$ mm, perfurado com 30 a 40 furos de 1mm de diâmetro, uniformemente distribuídos por toda a área. O disco assenta-se perfeitamente no ressalto interno da célula.

O êmbolo ajusta-se à célula, com tolerância máxima de 0,1mm. O extremo inferior deve ter bordas bem nítidas e formar ângulo reto com o seu eixo principal. Deve prover-se de um corte, segundo a geratriz. O outro extremo é constituído de um rebordo de tal maneira que, quando o êmbolo é colocado na célula, este rebordo repouse na parte superior da mesma. Nesta situação, a distância entre a parte inferior do êmbolo e a superior do disco perfurado deve ser de $1,5 \pm 0,1$ cm.

O filtro de papel deve ter retenção média correspondente ao tipo 1, graduação B, da *Federal Specification for Paper* e deve apresentar o mesmo diâmetro interno da célula, com a periferia bem lisa.



Notas: a) O desenho está em escala.

b) As cotas assinaladas com * indicam medidas não obrigatórias.

Figura 3-14 – Permeabilímetro de Blaine.

O manômetro é um tubo de vidro em forma de U, conforme figura 3-14, com diâmetro nominal externo de 9mm e parede padrão. O topo de um dos ramos do manômetro ajusta-se perfeitamente à célula de permeabilidade. Este mesmo ramo, conectado à célula, apresenta uma bifurcação ortogonal, distante 25 a 30,5cm acima da parte inferior do manômetro. Esta bifurcação é munida de um registro, estanque ao ar, por onde se faz o vácuo. Abaixo 12,5 a 14,5cm do topo desta ramificação lateral grava-se um traço. Outros três traços são gravados às distâncias, respectivamente, de 1,5; 7,0 e 11,0cm acima do primeiro. Monta-se o manômetro firmemente a um suporte de madeira, de modo que os ramos fiquem bem verticais.

O manômetro é preenchido até a primeira referência com um líquido não volátil, não higroscópico, de baixa densidade e viscosidade, como o dibutilftalato ou um óleo mineral leve.

O cronômetro deve ter dispositivo de partida e parada e permitir leituras de no mínimo 0,5s no intervalo de 60s e de 1% para intervalos de 60 a 300s.

3.5.2.2- Porosimetria de Adsorção-Condensação Gasosa (Lowell, 1984)

A área efetiva de uma superfície sólida limpa pode ser determinada a partir de isotermas de adsorção. A área determinada por este método difere da área geométrica devido à existência de irregularidades na superfície, como rugosidade, e de poros abertos.

A teoria de BET é utilizada nesta determinação através da equação 3.6. Esta equação representa uma reta na faixa de valores de p/p_s entre 0,05 e 0,35 quando se plota

$\frac{1}{W \left[\frac{p_s}{p} - 1 \right]}$ versus p/p_s . O valor de W_m é obtido a partir da inclinação e do intercepto

desta reta, e este método é chamado método multipontos.

No entanto, é possível utilizar apenas uma medida da pressão relativa, em valor próximo ao limite superior da faixa (0,30). Com isso, a reta deverá passar por esse

ponto e pela origem. Então, o intercepto da equação 3.6 se torna nulo, ou seja, $\frac{1}{W_m C} = 0$

, ou $C \gg 1$ (valor correspondente a 100 para pressão relativa de 0,3) e ainda $C - 1 \approx$

C . Assim, a nova equação para o método de um ponto, será:

$$\frac{1}{W \left[\left(\frac{p_s}{p} \right) - 1 \right]} = \frac{(C-1)}{W_m C} \times \left(\frac{p}{p_s} \right) \quad (3.15)$$

O erro associado ao método de um único ponto é de apenas 2% para a maioria dos substratos, usando o gás nitrogênio.

Uma vez determinado o valor de W_m , a superfície específica, em m^2/g , pode ser calculada pela equação 3.16.

$$S_{BET} = \frac{W_m \cdot N \cdot A}{M \cdot m} \quad (3.16)$$

onde N é o número de Avogadro, M é a massa molecular do nitrogênio, m é a massa da amostra e A é a área da superfície ocupada por uma molécula de nitrogênio ($16,2 \times 10^{-20} m^2$ – valor calculado por BET).

O valor mais comum de C situa-se entre 50 e 300. Quando a superfície específica BET é superior a $500 m^2/g$ e o valor de C é maior que 300, os resultados podem ser questionáveis. Valores altos ou negativos de C indicam a presença de microporos, cuja determinação exige cuidados na análise por este método.

3.6- Comparação entre Porosimetria de Intrusão de Mercúrio e Porosimetria de Adsorção-Condensação Gasosa

Uma vez que PIM e PACG medem as mesmas propriedades, é esperado que, dentro da faixa de valores onde ambos são aplicáveis, estes métodos forneçam os mesmos resultados de tamanho de poros. Ambas as técnicas baseiam-se em balanço entre forças de tensão superficial, forças capilares e pressão.

Lowell (1981) mostra que os processos de adsorção-dessorção de vapor e intrusão-extrusão de mercúrio são processos termodinamicamente equivalentes e que ocorrem em direções opostas. À medida que a pressão hidráulica é aumentada na PIM, poros cada vez menores são preenchidos. Já na PACG, à medida que a pressão do adsorvato é aumentada, poros cada vez maiores são preenchidos. Isto porque o nitrogênio líquido

molha a maioria das superfícies, e o mercúrio não. Entretanto, resultados divergentes são encontrados como em Sills (1973) para goethita e em Vilela (2001) para minério compacto da Mina de Tamanduá. Uma primeira razão para esta diferença, segundo Webb (1997), é a diferença na faixa de tamanho de poros que cada técnica detecta, já citada na seção 3.3.2. PACG é capaz de medir poros menores que PIM e, portanto, um material que contenha poros menores que o limite de PIM poderá até mesmo ser dito não poroso, segundo este último método. Por outro lado, para materiais com poros maiores que o limite de PACG, PIM apresentará maiores volumes de poros. Como poros grandes contribuem pouco para área superficial medida, é possível que os dados de área superficial obtidos pelos dois métodos sejam semelhantes.

Outro ponto também já citado é a diferente ordem de preenchimento dos poros, segundo seu tamanho, em cada um destes métodos. Em situações onde os poros têm forma de garrafa, ou seja, há um “pescoço” fino entre a cavidade larga do poro e a fonte de mercúrio, esta última registrará o diâmetro do poro como sendo o diâmetro da abertura do “pescoço”. Então, este poro será preenchido por último e sob alta pressão devido à ordem decrescente de preenchimento do mercúrio. No caso da PACG, este pescoço não causará um efeito bloqueador, uma vez que os poros pequenos são preenchidos primeiramente neste método.

Amostras com poros fechados, materiais orgânicos e outros materiais compressíveis podem ter resultados falsos de porosidade e de área superficial, a partir do PIM, devido à compressão da amostra e ao colapso dos poros internos sob a pressão aplicada.

O ângulo de contato do mercúrio com a superfície do sólido, em alta pressão, não é muito conhecido, e este parâmetro é essencial nos cálculos de PIM, podendo ser outra fonte de divergência entre os dois métodos.

Como estes métodos possuem várias fontes de erro e divergências entre si, é necessário, antes de utilizá-los, caracterizar muito bem as amostras que serão analisadas e realizar testes exploratórios de modo a estabelecer os limites dos parâmetros de entrada. Além

disso, se houver diferença entre os dois métodos, a utilização do MEV pode ajudar a identificar as causas e definir o método mais apropriado.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho iniciou-se com a amostragem dos materiais, que, após terem sido devidamente preparados, foram submetidos a testes tecnológicos e análises, visando à sua caracterização. A rota de testes tecnológicos e caracterização a ser utilizada está apresentada na figura 4-1.

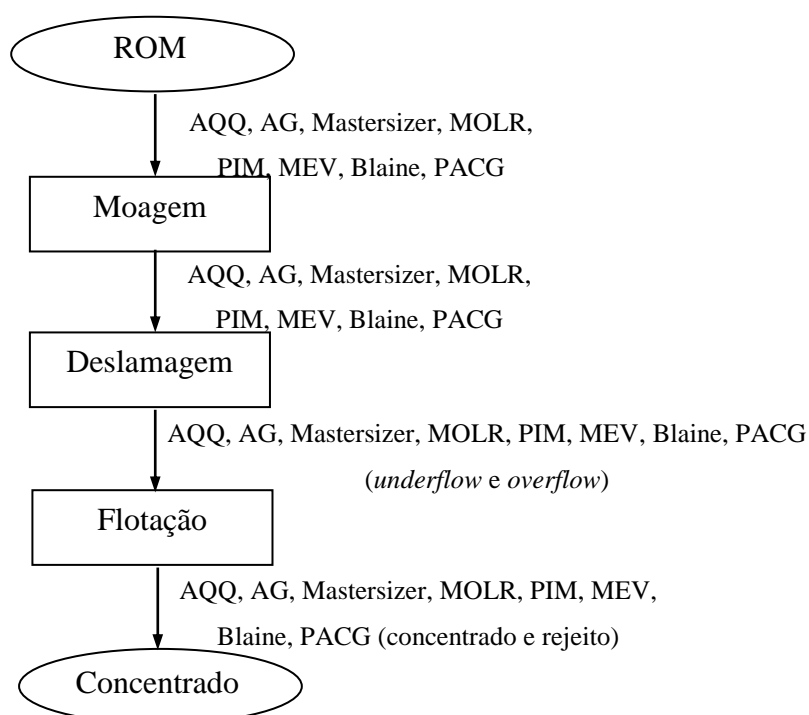


Figura 4-1 – Rota de caracterização e testes tecnológicos.

4.1- Coleta e Preparação de Amostras

Foram utilizadas três amostras - duas amostras de minério de frentes de lavra da Mina de Alegria 3/4/5 e uma da Mina de Alegria 9 - que apresentam um percentual de fases porosas (hematita porosa e goethita) semelhante (em torno de 50% - análise mineralógica total) para verificar se há diferença nos parâmetros de porosidade, apesar da composição mineralógica semelhante e se isto se traduz em diferentes performances nos processos de deslamagem e flotação. Uma amostra de uma frente de lavra da Mina de Alegria 3/4/5 com percentual de fases porosas bem inferior (5,6%) foi utilizada para checagem da sensibilidade dos métodos de determinação de porosidade. Os nomes das amostras são 5/4, 9/4, 5/14 e 5/35, onde o primeiro número indica a mina de origem e o segundo a frente de lavra.

Estas amostras foram obtidas nas frentes de lavra, utilizando-se carregadeira. As homogeneizações foram feitas em pilhas cônicas e as amostras foram estocadas em tambores (500kg). Estas foram transportadas para o Laboratório de Pesquisa da Mina da Samarco, quarteadas e secadas em estufa a 110°C. Um britador de mandíbulas, da marca Plangg, modelo J-58, foi utilizado para a britagem.

Após a obtenção das amostras, estas foram transportadas para o Laboratório de Controle de Processo da Samarco, e preparadas conforme figura 4-2. A homogeneização foi feita em lona e o quarteamento no quarteador do tipo Jones. Um britador de mandíbulas, da marca Faço, modelo BMA 85.120, foi utilizado para a britagem. A pulverização foi realizada em um pulverizador de anéis da marca Simplex.

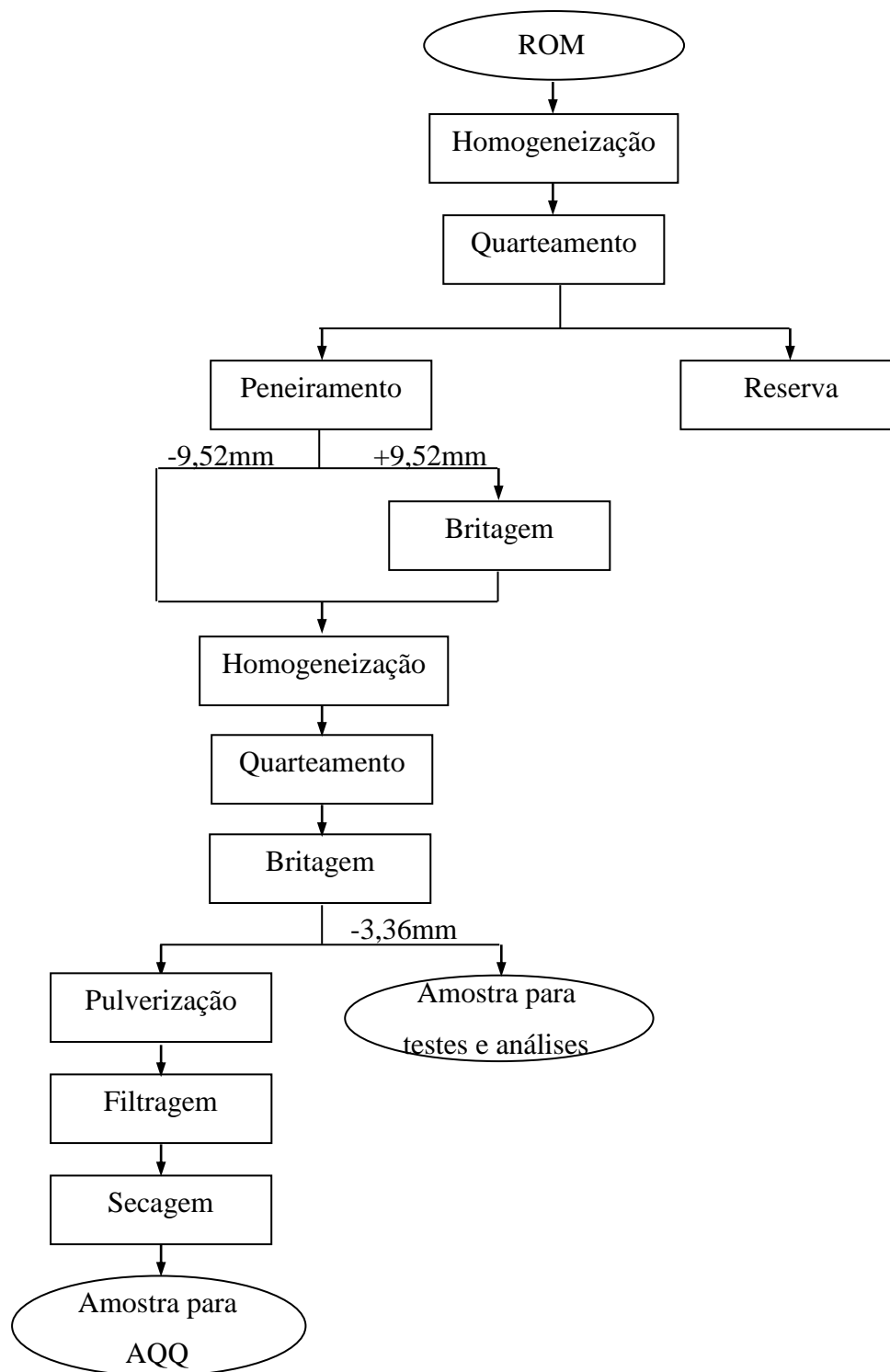


Figura 4-2 – Rota de preparação das amostras.

4.2- Testes Tecnológicos

Os testes tecnológicos (deslamagem e flotação) foram conduzidos conforme procedimento padrão da Samarco, descrito no Anexo.

A etapa de moagem foi realizada em moinho de bolas para a geração de amostras para os testes de deslamagem e flotação. A moagem foi feita em um moinho 25,4cm x 20,3cm com 10kg de bolas de diâmetro entre 20 e 30mm. A massa de amostra utilizada foi de 1700g.

A deslamagem foi efetuada em três etapas, em pH 10,5 acertado com soda cáustica (solução 3%p/v). Uma amostra de 1700g foi utilizada.

A flotação foi do tipo catiônica reversa, realizada em uma célula Wemco. O depressor de ferro foi o amido de milho (fornecido pela GEM), gelatinizado com soda cáustica (proporção 5:1), numa solução a 1%p/v. O coletor de sílica foi a amina – mistura de eteramina (Flotigam EDA-3 da Clariant) com eterdiamina (Flotigam LDD-O da Clariant) na proporção 3:1 – numa solução a 1%p/v. A massa processada foi 1500g, em pH 10,0, até que fosse atingida uma porcentagem de sílica inferior a 3,5% (especificação para a etapa de flotação convencional em campanha de baixa sílica).

4.3- Caracterização das Amostras

4.3.1- Análise Química Quantitativa

As análises químicas foram realizadas no Laboratório Químico da Samarco. Os teores de sílica, alumina e fósforo foram determinados por um espectrômetro de absorção atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP CIROS), da marca Spectro. O teor de ferro foi determinado por via úmida, através de titulação com dicromato de potássio. O teor de PPC foi determinado por calcinação em forno mufla, a 1000°C.

4.3.2- Análise Granulométrica

As análises granulométricas foram realizadas no Laboratório de Controle de Processo da Samarco, através de dois métodos:

- Peneiramento: análise granulométrica feita, conforme procedimento padrão da Samarco representado na figura 4-3, usando-se peneiras da marca Granutest, com 20cm de diâmetro e 7cm de altura, com aberturas de 63,5 a 0,037mm, segundo a série Tyler.
- Mastersizer: análise granulométrica do material com granulometria inferior a 0,037mm feita, conforme procedimento padrão da Samarco, usando-se um granulômetro a laser Mastersizer Micro, da Malvern Instruments. Este aparelho utiliza propriedades óticas (espalhamento de feixe de laser) para determinar o tamanho das partículas. Nesse método, a amostra passante em 0,037mm é filtrada, secada e analisada no equipamento, utilizando-se uma solução de hexametáfosfato de sódio (0,05%p/v) para assegurar sua dispersão. Os diâmetros reportados são 0,035; 0,030; 0,025; 0,015; 0,010; 0,005 e 0,001mm.

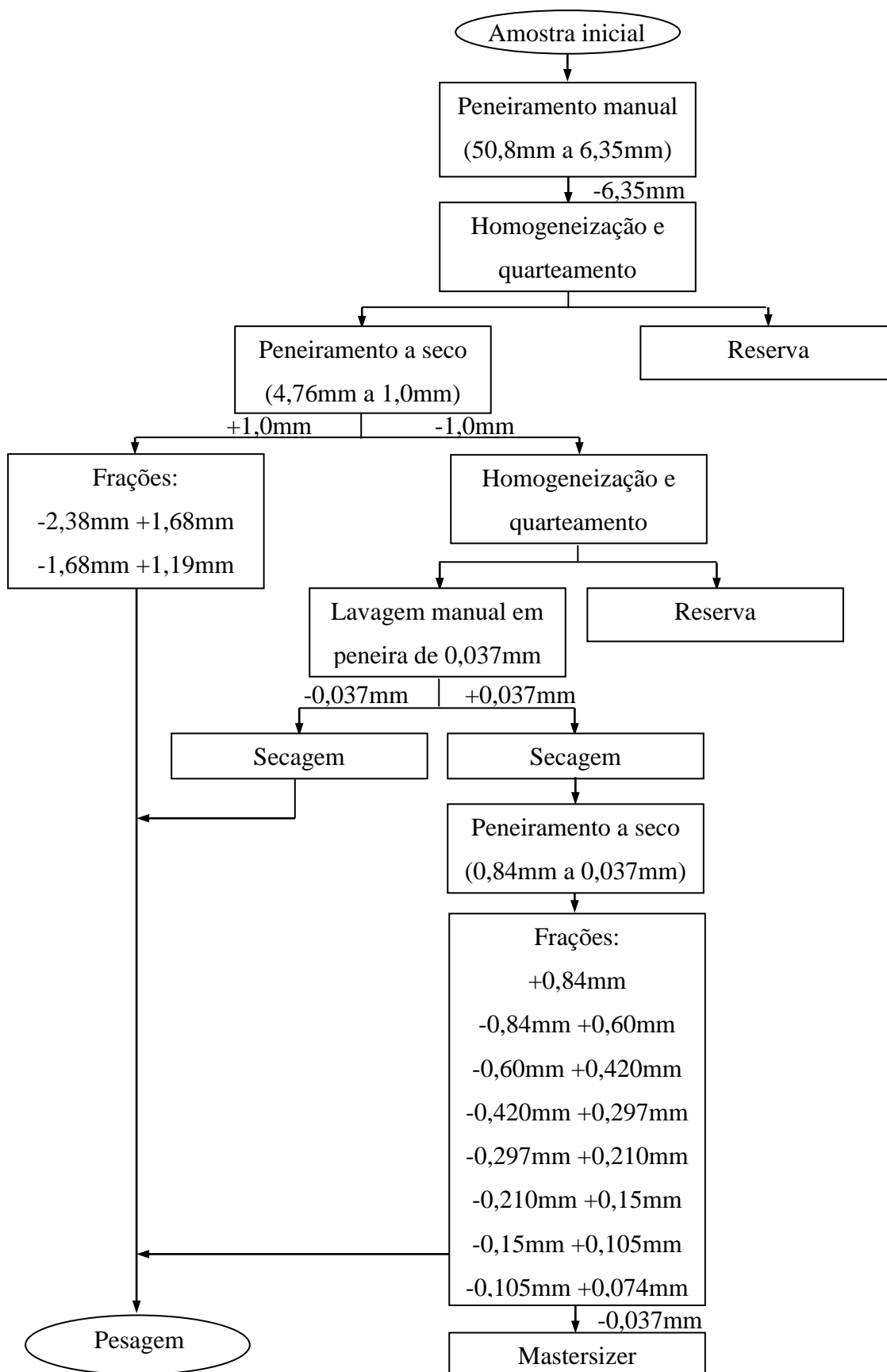


Figura 4-3 – Rota para análise granulométrica.

4.3.3- Microscopia Ótica de Luz Refletida

A microscopia ótica foi realizada em microscópio da marca Leica, modelo DMLP, com máquina fotográfica acoplada e aumento de até 500 vezes. As seções polidas foram confeccionadas, utilizando-se o embutimento dos minerais em resina de cura rápida, a frio. Após a cura as seções foram lixadas com lixa d'água e polidas com pasta de alumina. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Geometurgia da Samarco.

O método utilizado foi o da contagem de grãos (mínimo de 500 grãos), conforme procedimento padrão da Samarco, possibilitando identificar as quantidades volumétricas relativas de quartzo e minerais de ferro presentes e determinar o grau de liberação. Através do peso específico de cada mineral, foi determinada a proporção em peso dos minerais presentes.

A pastilha utilizada é denominada 4x1 por permitir a análise mineralógica das frações +0,149mm, -0,149+0,074mm, -0,074+0,044mm e -0,044mm.

4.3.4- Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em um microscópio da marca Jeol, modelo JSM-5410, com microanalisador de raios-X dispersivo em energia da marca Noran, modelo TN-M3055 (MEV-EDS).

As amostras foram analisadas em duas formas: partículas inteiras e seções polidas. As partículas inteiras foram colocadas em fita de carbono. Posteriormente, estas partículas na fita de carbono e as seções polidas, analisadas no microscópio ótico, foram recobertas com uma fina película de carbono, obtida na metalizadora-evaporadora, modelo Desk II da marca Denton. Esta análise foi feita no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise do DEMIN da EEUFMG. As imagens obtidas foram do tipo: IES (imagens de elétrons secundários) e IER (imagens de elétrons retroespalhados).

Esta técnica foi utilizada visando um maior detalhamento na investigação das fases mineralógicas presentes, uma avaliação da morfologia destas fases e uma avaliação qualitativa da porosidade das amostras. A microanálise foi realizada apenas como suporte durante a pesquisa, não sendo neste trabalho apresentado nenhum resultado a partir dela. Foram utilizadas cerca de 50 horas de trabalho. Muitas fotomicrografias foram tiradas, mas somente serão apresentadas aquelas que foram consideradas características dos tipos de porosidade observados.

4.3.5- Determinação de Densidade de Sólidos

A densidade de sólidos foi determinada usando-se um picnômetro a hélio da marca Quantachrome, modelo MVP-5DC. A massa da amostra foi pesada em uma balança de precisão de um centésimo (marca Micronal, modelo B6000) e o volume determinado pelo picnômetro. Este equipamento mede o volume de gás (até uma pressão de 117,2kPa) que preenche a célula porta-amostra e, através da diferença entre este volume medido e o volume conhecido da célula, tem-se o volume da amostra. Esta determinação foi realizada no Laboratório de Controle de Processo da Samarco.

4.3.6- Determinação de Área Superficial Específica, por Blaine e BET

A área superficial específica foi determinada pelos métodos de Blaine e BET. As análises segundo o método de Blaine foram realizadas no Laboratório Químico da Samarco, conforme procedimento padrão da empresa, utilizando-se um permeabilímetro de Blaine. O peso da amostra foi definido de acordo com o peso específico determinado em um picnômetro a hélio.

As análises segundo o método BET (e também a caracterização dos parâmetros de porosidade pela PACG) foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Sólidos Particulados do DEMET da EEUFMG, usando-se o equipamento, da marca Quantachrome, modelo NOVA-1200. A desgaseificação da amostra submetida a vácuo

foi realizada a uma temperatura constante de 180°C, por duas horas, para eliminação de possíveis contaminantes presentes. A amostra foi submetida a um fluxo de nitrogênio gasoso. Durante a determinação da ASE, a célula que contém a amostra foi imersa em nitrogênio líquido (-196°C).

4.3.7- Porosimetria de Intrusão de Mercúrio

A análise dos parâmetros de porosidade segundo PIM foi realizada no Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais – CCTM, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, em São Paulo, usando o equipamento AutoPore III 9410, da Micromeritics. Para tanto, a amostra foi secada por 24 horas a 70°C e submetida a vácuo por cerca de uma hora. O mercúrio foi introduzido quando a pressão de 6,7Pa foi atingida. Neste equipamento, a análise sob baixa pressão não é automatizada, e o nitrogênio é utilizado para exercer a pressão. A análise sob alta pressão é automatizada e a pressão é exercida utilizando-se óleo. O penetrômetro utilizado foi o de 5cm³ para pó (constante 21,63μL/pF).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1- Amostragem e Preparação das Amostras

As quatro amostras (5/4, 9/4, 5/14 e 5/35) foram obtidas, preparadas e analisadas conforme citado na metodologia. O resultado das análises químicas e da análise mineralógica (por microscopia ótica) das amostras está apresentado, respectivamente nas tabelas 5-1, 5-2 e 5-3.

Tabela 5-1 – Análises químicas das quatro amostras de ROM.

Amostra	%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%P	PPC
5/35	38,06	44,58	0,36	0,029	0,56
5/14	52,73	23,38	0,72	0,039	0,47
9/4	46,45	33,21	0,26	0,034	1,00
5/4	55,95	19,37	0,56	0,027	1,12

Tabela 5-2 – Análise mineralógica total das quatro amostras de ROM.

Amostra	%HE	%HP	%G	%HP+ %G	%MA	%QT
5/35	52,81	0,93	1,58	2,51	0,00	44,69
5/14	30,21	34,76	13,22	47,98	1,49	20,33
9/4	23,44	45,63	4,42	50,05	0,35	26,16
5/4	30,40	47,25	4,61	51,86	0,05	17,69

Tabela 5-3 – Análise mineralógica parcial das quatro amostras de ROM.

Amostra	%HE	%HP	%G	%HP+ %G	%MA
5/35	94,46	2,28	3,26	5,54	0,00
5/14	37,58	44,03	16,52	60,55	1,87
9/4	31,40	62,14	5,99	68,13	0,47
5/4	36,65	57,70	5,59	63,29	0,06

Como pode ser visto nas tabelas 5-2 e 5-3, as amostras 5/14, 9/4 e 5/4 apresentam a composição de fases mineralógicas porosas (HP e G) bastante semelhantes e a amostra 5/35, bastante diferente.

As amostras de ROM foram submetidas a testes de moagem para geração de amostras para os testes de deslamagem e flotação. Dessa maneira, nas próximas sessões serão mostradas as caracterizações químicas, físicas, mineralógicas e de porosidade das quatro amostras para as seguintes etapas do processo: produto de moagem, *underflow* e *overflow* de deslamagem, concentrado e rejeito de flotação.

5.2- Análises de Porosidade

5.2.1- Porosimetria de Intrusão de Mercúrio

Através da metodologia de PIM foram caracterizados os poros das quatro amostras para as etapas de processo já citadas. A figura 5-1 mostra uma curva de intrusão obtida. Ela é do tipo A (no eixo das abscissas, a pressão foi convertida para diâmetro através da equação 3.2), com baixa ocorrência de vazios entre os grãos. A figura 5-2 mostra a distribuição de diâmetro de poro. A partir dela é possível dizer que o diâmetro médio dos poros é de cerca de 10 μ m, ou seja, que apenas estão presentes macroporos.

Para todas as amostras, exceto para o *overflow* da deslamagem, o diâmetro médio é aproximadamente o mesmo e as curvas são bastantes similares, mesmo para a amostra 5/35. Portanto, as figuras 5-1 e 5-2 são consideradas representativas de todas as amostras (exceto *overflow* da deslamagem). As figuras das outras amostras são apresentadas no Anexo.

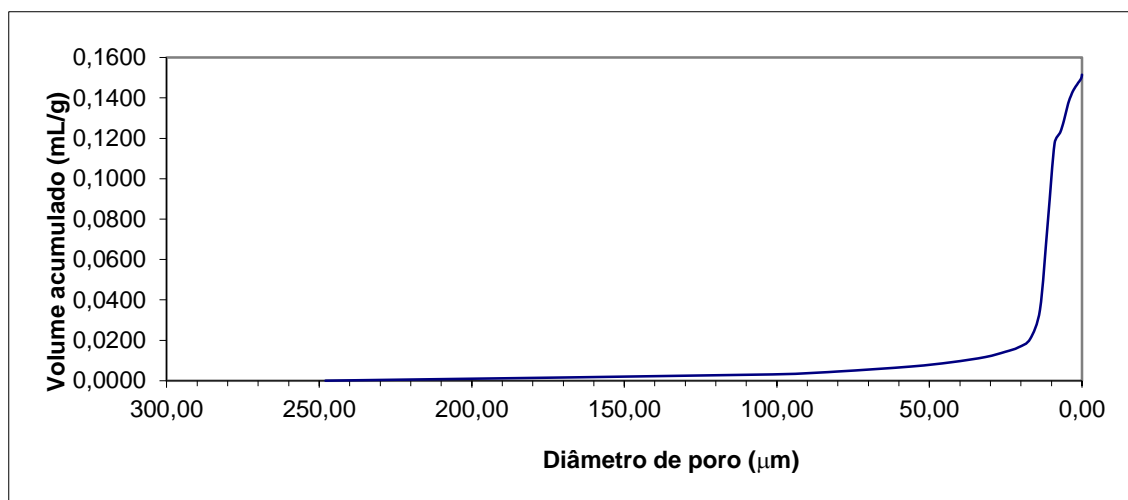


Figura 5-1 – Curva de intrusão da amostra 5/35 concentrado da flotação.

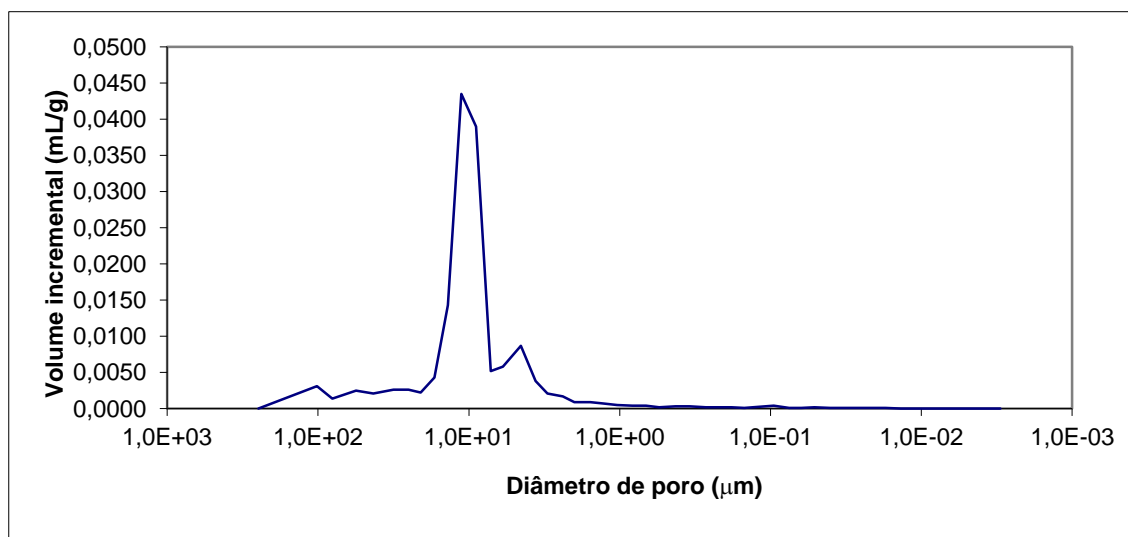


Figura 5-2 – Distribuição de diâmetro de poro da amostra 5/35 concentrado da flotação.

No caso do *overflow*, as curvas típicas de intrusão, e de distribuição do diâmetro de poros apresentadas, respectivamente, nas figuras 5-3 e 5-4 mostram uma faixa mais ampla de tamanho do poros, com diâmetro médio em torno de $1\mu\text{m}$ e praticamente nenhum volume relativo a vazios.

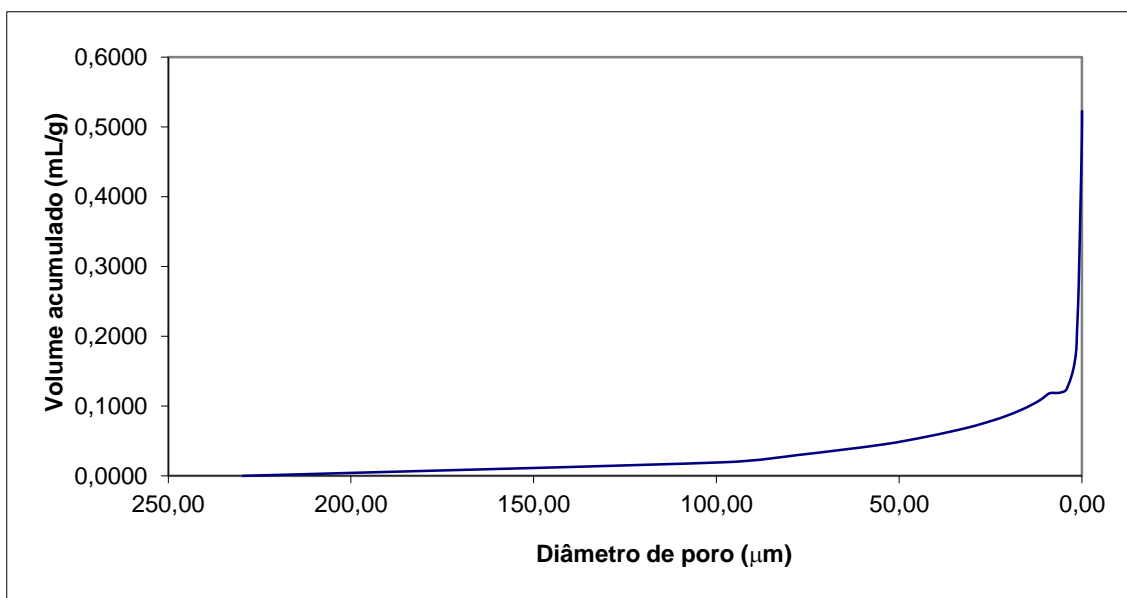


Figura 5-3 – Curva de intrusão da amostra 5/14 *overflow* da deslamagem.

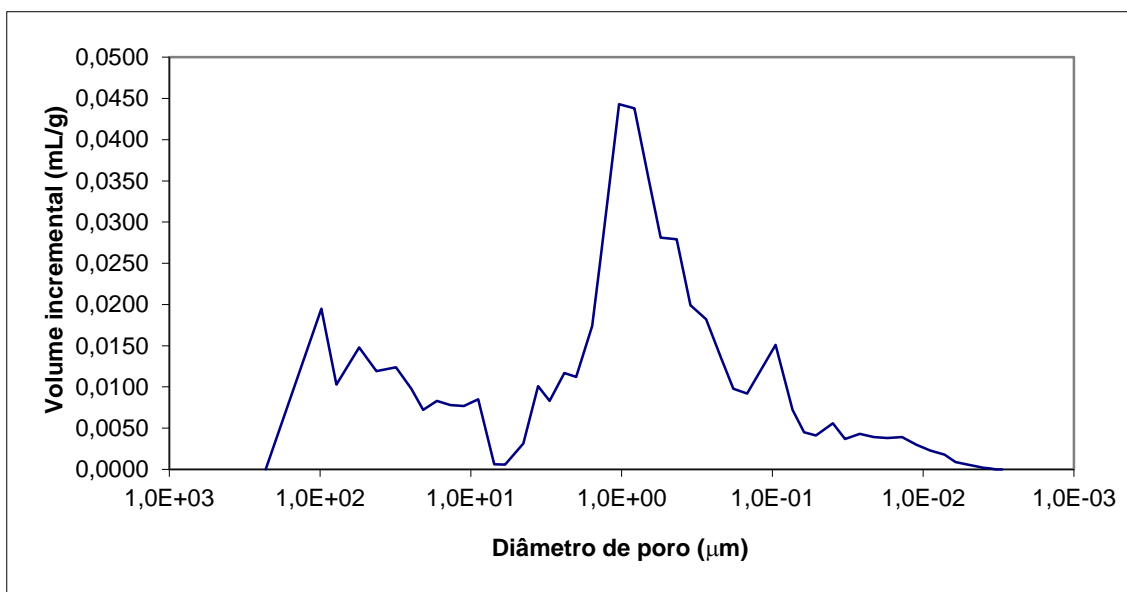


Figura 5-4 – Distribuição de diâmetro de poro da amostra 5/14 *overflow* da deslamagem.

A tabela 5-4 é a tabela de saída do equipamento, que aponta resultados de diâmetro de poro (mm), diâmetro médio (mm), volume acumulado (mL/g) e volume incremental (mL/g) para cada pressão aplicada (psia). A unidade de pressão não foi convertida para o sistema internacional, uma vez que a intenção é mostrar a saída do equipamento como ela é.

Tabela 5-4 – Relatório do equipamento de análise de porosimetria de intrusão de mercúrio da amostra 5/35 concentrado da flotação.

5/35 Concentrado da Flotação				
Pressure (psia)	Pore Diameter (μm)	Mean Diameter (μm)	Cumulative Volume (mL/g)	Incremental Volume (mL/g)
0,73	247,9419	247,9419	0,0000	0,0000
1,78	101,4119	174,6769	0,0031	0,0031
2,25	80,5036	90,9578	0,0045	0,0014
3,23	56,0449	68,2743	0,0070	0,0025
4,21	42,9653	49,5051	0,0091	0,0021
5,72	31,6462	37,3058	0,0117	0,0026
7,20	25,1205	28,3834	0,0143	0,0026
8,68	20,8320	22,9763	0,0165	0,0022
10,69	16,9247	18,8784	0,0208	0,0043
13,14	13,7601	15,3424	0,0351	0,0143
16,16	11,1930	12,4765	0,0786	0,0435
20,17	8,9689	10,0809	0,1176	0,0390
25,24	7,1653	8,0671	0,1228	0,0052
30,42	5,9459	6,5556	0,1286	0,0058
40,05	4,5164	5,2312	0,1373	0,0087
50,20	3,6030	4,0597	0,1411	0,0038
59,89	3,0201	3,3115	0,1432	0,0021
75,98	2,3806	2,7003	0,1449	0,0017
90,33	2,0023	2,1914	0,1458	0,0009
115,25	1,5693	1,7858	0,1467	0,0009
139,63	1,2953	1,4323	0,1474	0,0007
174,19	1,0383	1,1668	0,1479	0,0005
219,44	0,8242	0,9313	0,1483	0,0004
270,28	0,6692	0,7467	0,1487	0,0004
330,99	0,5464	0,6078	0,1489	0,0002
423,25	0,4273	0,4869	0,1492	0,0003
526,41	0,3436	0,3855	0,1495	0,0003
672,72	0,2689	0,3062	0,1497	0,0002
818,17	0,2211	0,2450	0,1499	0,0002
994,06	0,1819	0,2015	0,1501	0,0002
1213,67	0,1490	0,1655	0,1502	0,0001

1895,92	0,0954	0,1222	0,1506	0,0004
2394,21	0,0755	0,0855	0,1507	0,0001
2888,83	0,0626	0,0691	0,1508	0,0001
3531,97	0,0512	0,0569	0,1510	0,0002
4479,67	0,0404	0,0458	0,1511	0,0001
5474,27	0,0330	0,0367	0,1512	0,0001
6869,18	0,0263	0,0297	0,1513	0,0001
8486,07	0,0213	0,0238	0,1514	0,0001
10471,88	0,0173	0,0193	0,1515	0,0001
13162,22	0,0137	0,0155	0,1515	0,0000
16228,91	0,0111	0,0124	0,1515	0,0000
19976,77	0,0091	0,0101	0,1515	0,0000
24881,27	0,0073	0,0082	0,1515	0,0000
29872,17	0,0061	0,0067	0,1515	0,0000
34957,59	0,0052	0,0056	0,1515	0,0000
40050,45	0,0045	0,0048	0,1515	0,0000
44905,03	0,0040	0,0043	0,1515	0,0000
50033,29	0,0036	0,0038	0,1515	0,0000
55177,13	0,0033	0,0034	0,1515	0,0000
60111,73	0,0030	0,0031	0,1515	0,0000
44267,75	0,0041	0,0035	0,1510	-0,0005
34659,12	0,0052	0,0047	0,1510	0,0000
26706,69	0,0068	0,0060	0,1510	0,0000
20620,39	0,0088	0,0078	0,1510	0,0000
15906,00	0,0114	0,0101	0,1510	0,0000
12395,34	0,0146	0,0130	0,1510	0,0000
9499,29	0,0190	0,0168	0,1510	0,0000
7463,91	0,0242	0,0216	0,1510	0,0000
5498,28	0,0329	0,0286	0,1510	0,0000
4400,73	0,0411	0,0370	0,1510	0,0000
3167,77	0,0571	0,0491	0,1510	0,0000
2568,58	0,0704	0,0638	0,1510	0,0000
1965,83	0,0920	0,0812	0,1510	0,0000
1489,98	0,1214	0,1067	0,1510	0,0000
1184,78	0,1527	0,1370	0,1510	0,0000
903,11	0,2003	0,1765	0,1510	0,0000
701,07	0,2580	0,2291	0,1510	0,0000
485,76	0,3723	0,3152	0,1510	0,0000
398,55	0,4538	0,4131	0,1510	0,0000
291,74	0,6199	0,5369	0,1510	0,0000
239,30	0,7558	0,6879	0,1510	0,0000
190,47	0,9496	0,8527	0,1510	0,0000

150,37	1,2028	1,0762	0,1510	0,0000
100,48	1,8001	1,5014	0,1510	0,0000
84,97	2,1286	1,9643	0,1508	-0,0002
65,05	2,7805	2,4545	0,1503	-0,0005
49,93	3,6225	3,2015	0,1497	-0,0006
29,63	6,1035	4,8630	0,1479	-0,0018
13,75	13,1529	9,6282	0,1419	-0,0060

As amostras produto da moagem, *overflow* e *underflow* da deslamagem, concentrado e rejeito da flotação 5/35, 5/14, 9/4 e 5/4 foram analisadas no picnômetro a hélio para determinação de densidade de sólido. Esta também foi determinada através do porosímetro de intrusão de mercúrio. Com os dados foi construído um gráfico de dispersão, onde nota-se uma boa correlação ($R^2=0,85$), conforme pode ser visto na figura 5-5.

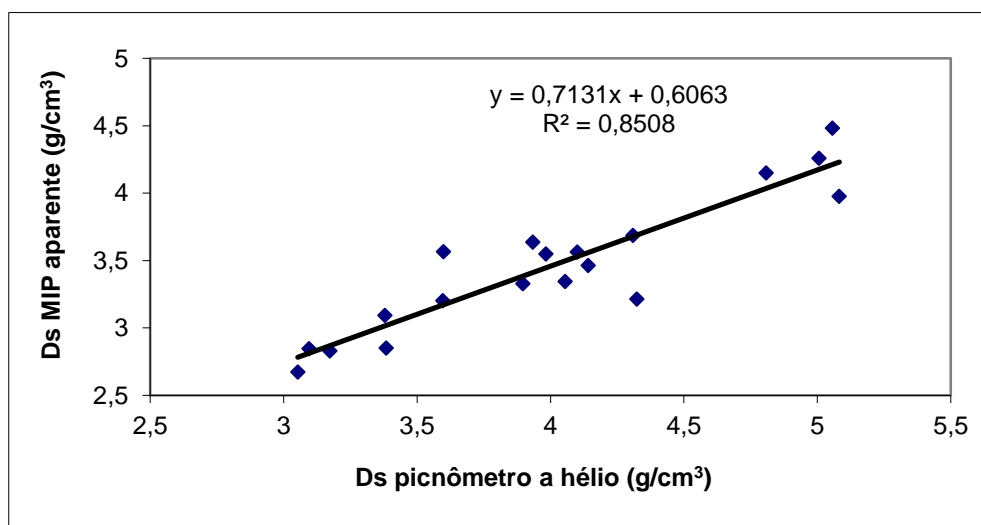


Figura 5-5 – Gráfico de dispersão para a densidade de sólido por picnômetro a hélio e porosímetro de intrusão de mercúrio.

Outros dados resultantes da análise de porosimetria de intrusão de mercúrio, como volume de poros, área e % de porosidade estão apresentados e discutidos na seção 5.2.3.

Um dado importante, segundo Micromeritics (manual do equipamento), que é apresentado na primeira folha de resultados do relatório do equipamento, no resumo dos dados de intrusão, é o percentual de máxima intrusão praticado (*Stem volume used*).

Este número relaciona o volume de poros estimado da amostra e o volume máximo mensurável de intrusão do penetrômetro. Ele serve como um guia para a escolha do penetrômetro e deve ficar entre 25 e 90% para obtenção de resultados de boa resolução.

Em função desta regra não ter sido obedecida em algumas análises, estas foram refeitas. Além disso, alguns resultados se apresentaram anômalos e também por este motivo foram refeitas as análises e até mesmo substituído o laboratório. Em algumas situações chegaram a ser necessárias quatro repetições. Estas repetições foram feitas durante a pesquisa buscando-se determinar quais dados poderiam ser utilizados e não para obtenção de um determinado tamanho de amostra que permitisse apresentar os dados com avaliação de sua significância estatística.

Este método se mostrou pouco repetitivo e o equipamento com baixo índice de disponibilidade, além da dificuldade de importação de peças ou penetrômetros. Foram tentados quatro laboratórios, mas os dois primeiros estavam com o equipamento parado sem previsão de reinício e o terceiro teve problemas em atingir a pressão máxima e teve o penetrômetro quebrado durante as análises, sem previsão de chegada. As análises foram feitas então no quarto laboratório, no CCTM, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

5.2.2- Porosimetria de Adsorção-Condensação Gasosa

As isotermas de adsorção obtidas para todas as amostras em estudo são basicamente do tipo II, como pode ser visto na figura 5.6. Comparando esta curva obtida com a figura 3.7, pode-se dizer então que estas amostras não apresentam porosidade.

Entretanto, foi feita também a dessorção e houve a ocorrência de histerese (também mostrada na figura 5-6). Isto significa existência de poros que, de acordo com a figura 3.9, são mesoporos em forma de fendas, cones ou pirâmides uma vez que a histerese é do tipo H3. Contudo, a utilização desta metodologia para determinação da forma do poro é válida quando se tem poros de um único formato, o que não é o caso das

amostras em questão, conforme fotomicrografias que serão apresentadas na sessão 5.2.3. Então, optou-se por tratar da forma dos poros apenas com a análise do MEV.

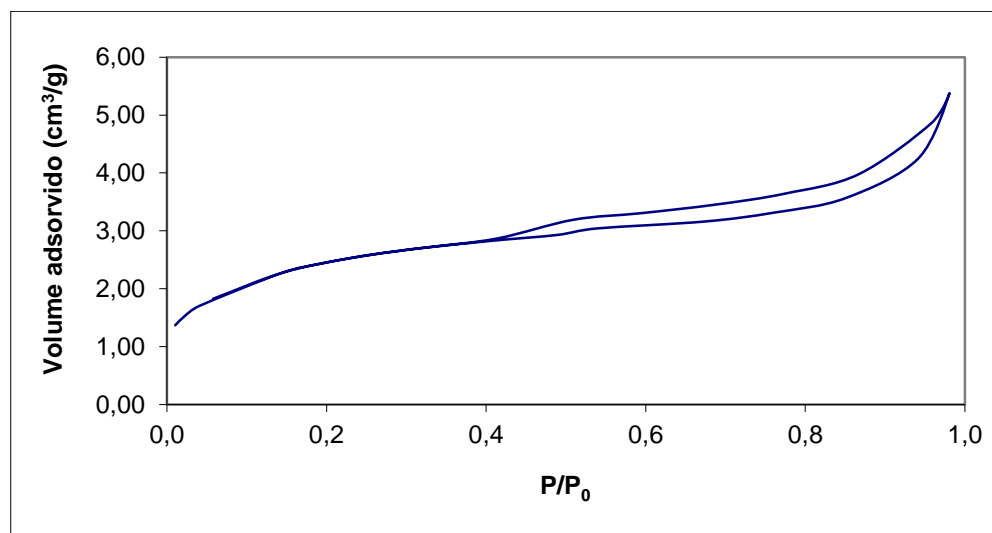


Figura 5-6 – Isotermas de adsorção e de dessorção da amostra 5/4 *underflow* da deslamagem.

A tabela 5-5, uma das tabelas de saída do equipamento, aponta os resultados de pressão relativa (P/P_0) e volume adsorvido (cm^3/g) usados para construir a curva da figura 5-6. As tabelas das demais amostras estão apresentadas no Anexo.

Outros dados de saída do equipamento são o volume de microporo (método de de Boer) e o volume de mesoporo (método de BJH). Somente as amostras 5/4 e a do *underflow* da deslamagem da 9/4 apresentaram microporos. Comparando estes dois volumes, como apresentado na tabela 5-6, percebe-se que o volume de microporos é significativo no caso das amostras 5/4, representando cerca de 30%.

Além disso, analisando os dados de ASE total e ASE de microporos, citados na tabela 5-7, percebe-se que nas amostras 5/4 a ASE de microporos responde por praticamente 65% da ASE total.

Tabela 5-5 – Relatório do equipamento de análise de porosimetria de adsorção-condensação gasosa da amostra 5/4 *underflow* da deslamagem.

P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)	P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,010386	1,368021	0,941484	4,246693
0,022177	1,525505	0,980289	5,361110
0,040544	1,701266	0,958028	4,860033
0,144051	2,272738	0,866926	3,977419
0,190061	2,425511	0,774936	3,643990
0,242236	2,556144	0,689051	3,455583
0,295072	2,662400	0,594647	3,305735
0,313309	2,694177	0,509536	3,191603
0,405276	2,825553	0,413506	2,866402
0,489977	2,930477	0,325692	2,712697
0,538577	3,041011	0,238205	2,549231
0,673722	3,160619	0,146420	2,281802
0,760397	3,313406	0,057945	1,826428
0,850633	3,565827		

Tabela 5-6 – Volume de microporos e mesoporos das amostras 5/4 e 9/4 – *underflow* da deslamagem.

	Amostra	Volume microporo - de Boer (cm ³ /g)	Volume mesoporo - BJH (cm ³ /g)	V _{Microporo} /V _{Mesoporo}
5/4	Produto moagem	0,002741	0,010010	0,27
	OF Deslamagem	0,010453	0,038470	0,27
	UF Deslamagem	0,002596	0,008280	0,31
	Concentrado	0,003397	0,009280	0,37
	Rejeito	0,000475	0,001400	0,34
9/4	UF Deslamagem	0,000263	0,002030	0,13

Tabela 5-7 – Área superficial específica total e de microporos das amostras 5/4 e 9/4 – *underflow* da deslamagem.

	Amostra	ASE microporo - de Boer (m ² /g)	ASE total - BET (m ² /g)	ASE _{Microporo} /ASE _{Total}
5/4	Produto moagem	5,9733	9,6055	0,62
	OF Deslamagem	22,3602	36,8799	0,61
	UF Deslamagem	5,6190	8,4626	0,66
	Concentrado	7,2024	10,2514	0,70
	Rejeito	1,0526	1,4977	0,70
9/4	UF Deslamagem	0,6775	1,6457	0,41

Os demais dados de porosimetria de adsorção-condensação gasosa estão apresentados na próxima sessão.

5.2.3- Comparação dos Resultados Obtidos Através das Duas Metodologias de Determinação de Porosidade

Dados de ASE, volume e diâmetro de poros foram organizados nas tabelas 5-8 a 5-11 junto com outros dados físicos e mineralógicos para permitir uma comparação entre os métodos de determinação de porosidade.

Tabela 5-8 – Comparação entre os dados de PIM e PACG para o produto da moagem.

Parâmetros	Produto da moagem			
	5/14	9/4	5/4	5/35
Ds picnômetro He g/cm ³	4,13	3,88	4,10	3,57
Fases porosas %	48,0	50,0	51,9	2,5
ASE-BET m ² /g	3,0	2,0	9,6	0,6
ASE-Blaine m ² /g	0,1012	0,0698	0,0894	0,0780
ASE-PIM m ² /g	1,734	0,684	1,538	0,494
Volume poros - BJH cm ³ /g	0,0093	0,0045	0,0100	0,0021
Vol.poros (-100nm) -PIM cm ³ /g	0,0085	0,0032	0,0057	0,0022
% da porosidade total PIM	4,3	1,5	3,2	1,2
Vol.poros (-1,0µm) - PIM cm ³ /g	0,0274	0,0108	0,0154	0,0063
% da porosidade total PIM	13,7	4,9	8,5	3,3
Vol.poros (-10,0µm) -PIM cm ³ /g	0,1131	0,0672	0,0659	0,0726
% da porosidade total PIM	56,7	30,3	36,4	38,2
Vol.poros total - PIM cm ³ /g	0,1996	0,2214	0,1810	0,1903
dmax µm (PIM)	102,1	102,5	100,9	101,8
dmid µm(PIM)	9,3	12,7	11,4	11,2
dmin µm (PIM)	0,006	0,009	0,004	0,006
dmid nm (PACG)	12,46	8,82	4,17	14,24
Granulometria acum. (% massa)				
< 150µm	90,4	90,0	90,2	90,0
< 38µm	39,5	24,7	37,6	31,1

Tabela 5-9 – Comparação entre os dados de PIM e PACG para o *underflow* da deslamagem.

Parâmetros	<i>Underflow</i> da deslamagem			
	5/14	9/4	5/4	5/35
Ds picnômetro He g/cm ³	4,13	3,91	4,28	3,57
Fases porosas %	50,2	50,1	47,1	2,6
ASE-BET m ² /g	1,7	1,7	8,5	0,3
ASE-Blaine m ² /g	0,0651	0,0543	0,0663	0,0626
ASE-PIM m ² /g	1,556	0,325	0,565	0,082
Volume poros - BJH cm ³ /g	0,0047	0,0031	0,0083	0,0010
Vol.poros (-100nm) -PIM cm ³ /g	0,0040	0,0010	0,0037	0,0000
% da porosidade total PIM	2,3	0,4	1,8	0,0
Vol.poros (-1,0µm) - PIM cm ³ /g	0,0105	0,0038	0,0084	0,0014
% da porosidade total PIM	6,1	1,7	4,2	0,8
Vol.poros (-10,0µm) -PIM cm ³ /g	0,0536	0,0297	0,0530	0,0470
% da porosidade total PIM	31,2	13,3	26,4	27,0
Vol.poros total - PIM cm ³ /g	0,1717	0,2225	0,2008	0,1743
dmax µm (PIM)	100,9	105,7	102,0	102,5
dmid µm(PIM)	12,1	16,0	12,8	11,9
dmin µm (PIM)	0,004	0,040	0,004	0,100
dmid nm (PACG)	10,96	4,94	3,91	11,68
Granulometria acum. (%massa)				
< 150µm	89,1	90,2	90,4	92,1
< 38µm	36,8	22,5	35,6	30,7

Tabela 5-10 – Comparação entre os dados de PIM e PACG para o concentrado da flotação.

Parâmetros	Concentrado da flotação			
	5/14	9/4	5/4	5/35
Ds picnômetro He g/cm ³	4,73	4,98	5,05	5,06
Fases porosas %	72,8	69,4	56,1	5,0
ASE-BET m ² /g	2,3	2,4	10,3	0,8
ASE-Blaine m ² /g	0,0599	0,0475	0,059	0,0562
ASE-PIM m ² /g	1,684	0,554	1,095	0,204
Volume poros - BJH cm ³ /g	0,0063	0,0046	0,0093	0,0020
Vol.poros (-100nm) -PIM cm ³ /g	0,0082	0,0034	0,0052	0,0009
% da porosidade total PIM	4,2	1,8	2,9	0,6
Vol.poros (-1,0µm) - PIM cm ³ /g	0,0164	0,0079	0,0105	0,0035
% da porosidade total PIM	8,5	4,1	5,8	2,3
Vol.poros (-10,0µm) -PIM cm ³ /g	0,0688	0,0420	0,0509	0,0520
% da porosidade total PIM	35,3	21,8	28,4	34,3
Vol.poros total - PIM cm ³ /g	0,1951	0,1931	0,1795	0,1515
dmax µm (PIM)	103,5	100,4	102,5	101,4
dmid µm(PIM)	11,6	13,2	11,9	11,3
dmin µm (PIM)	0,004	0,011	0,003	0,017
dmid nm (PACG)	11,05	7,47	3,62	10,51
Granulometria acum. (%massa)				
< 150µm	84,2	87,6	89,8	88,7
< 38µm	28,9	22,4	40,3	40,2

Tabela 5-11 – Comparação entre os dados de PIM e PACG para o rejeito da flotação.

Parâmetros	Rejeito da flotação			
	5/14	9/4	5/4	5/35
Ds picnômetro He g/cm ³	3,41	3,15	3,26	3,13
Fases porosas %	12,2	27,2	10,0	1,2
ASE-BET m ² /g	0,8	0,5	1,6	0,1
ASE-Blaine m ² /g	0,0795	0,0676	0,0734	0,0666
ASE-PIM m ² /g	0,333	0,139	0,152	0,085
Volume poros - BJH cm ³ /g	0,0028	0,0015	0,0014	0,0005
Vol.poros (-100nm) -PIM cm ³ /g	0,0018	0,0004	0,0003	0,0000
% da porosidade total PIM	0,8	0,2	0,1	0,0
Vol.poros (-1,0µm) - PIM cm ³ /g	0,0027	0,0026	0,0024	0,0012
% da porosidade total PIM	1,2	1,0	0,9	0,5
Vol.poros (-10,0µm) -PIM cm ³ /g	0,0770	0,0321	0,0283	0,0264
% da porosidade total PIM	33,4	12,6	10,5	11,6
Vol.poros total - PIM cm ³ /g	0,2307	0,2552	0,2695	0,2280
dmax µm (PIM)	101,8	100,6	102,3	100,5
dmid µm(PIM)	11,3	15,0	14,9	15,0
dmin µm (PIM)	0,017	0,026	0,040	0,150
dmid nm (PACG)	12,80	11,10	3,73	18,30
Granulometria acum. (% massa)				
< 150µm	96,6	93,3	94,4	92,8
< 38µm	42,8	23,8	29,0	24,8

Como pode ser visto nestas tabelas, a amostra 5/35, que apresenta uma composição de fases porosas bem inferior às demais amostras, teve seus parâmetros de porosidade percebidos como diferentes através da PACG (menores ASE e volume de poros e diâmetro médio maior – exceto para o concentrado da flotação onde ficou semelhante ao da amostra 5/14).

Por PIM, a ASE também foi diferente e menor (exceto para o concentrado da flotação), entretanto para o volume de poros total e diâmetro médio não houve diferenciação. Quando se obteve o volume de poros por faixa granulométrica (por interpolação linear) e apenas para as faixas abaixo de 1µm e 100nm, foi percebida uma diferenciação concordante com os dados de PACG, que é o esperado em função da composição de

fases porosas. Esta concordância entre volume de poros por PACG e volume de poros (abaixo de 1mm e 100nm) por PIM ocorreu para todas as amostras e não somente para a 5/35.

Outro ponto que deve ser ressaltado nesta tabela é a diferenciação da amostra 5/4 em relação às demais. Ela apresenta maior ASE por BET e menor diâmetro de poro por BJH, o que está coerente com a existência de microporos já citada na sessão anterior.

As áreas superficiais específicas obtidas através do método de Blaine foram todas semelhantes.

5.2.4- Microscopia Eletrônica de Varredura

Foi dada uma ênfase para os poros relativamente pequenos, com diâmetros menores que 10 μ m e mais especificamente aqueles com dimensões nanométricas, isto é, abaixo de 1,0 μ m ou 1000nm.

Como se pode verificar nas fotomicrografias apresentadas nas figuras 5-7 a 5-20, foram observados poros nesta faixa, inclusive com dimensões na região dos mesoporos, sendo o menor poro observado com 30nm. Ressalta-se que este valor já está próximo do limite de resolução do MEV utilizado, para amostras de observação difícil como as de minério de ferro, tanto para partículas espalhadas, como seções polidas.



Figura 5-7 – Amostra 5/14 concentrado. Seção polida. MEV, IER. Partícula com feições diversas, com hematita martítica porosa, goethita botrioidal porosa, goethita terrosa e pouca hematita lamelar. Poros variando de 15,0μm a 1,0μm.

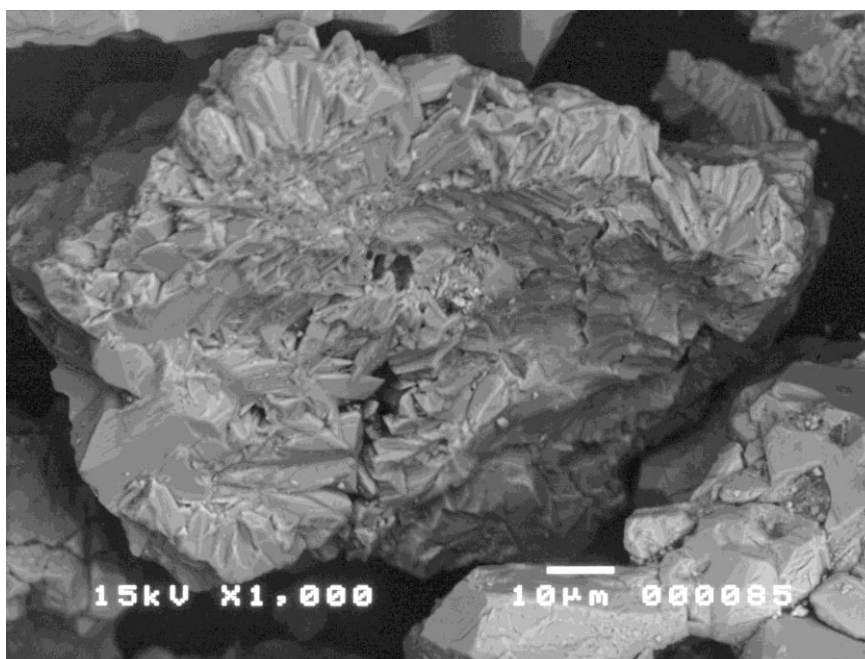


Figura 5-8 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IER. Partícula com goethita botrioidal e goethita maciça minoritária, ambas com porosidade moderada. Poros variando de 8,0μm, 4,0μm, 1,0μm, 0,4μm até 0,1μm.

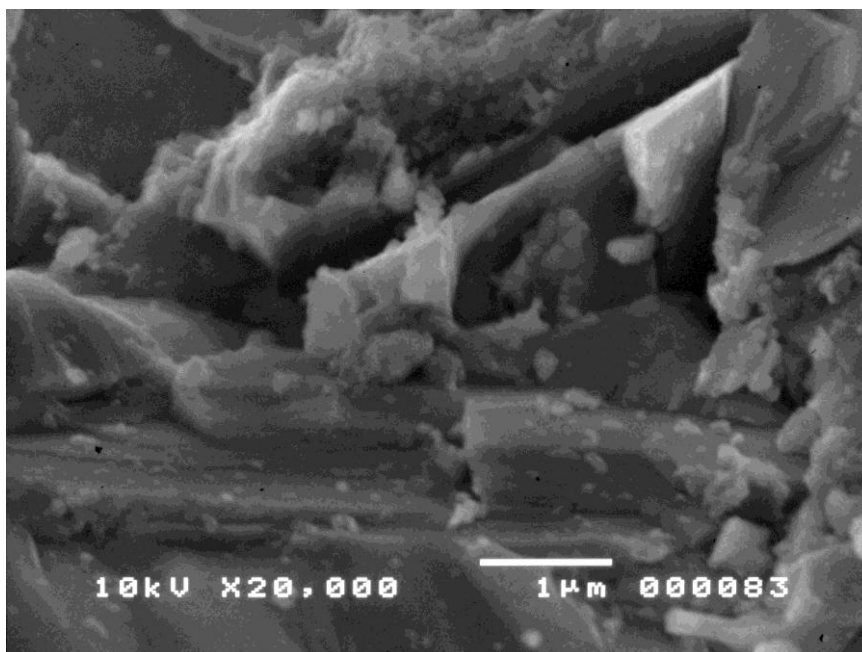


Figura 5-9 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, com poros variando de 0,4µm até 0,1µm.

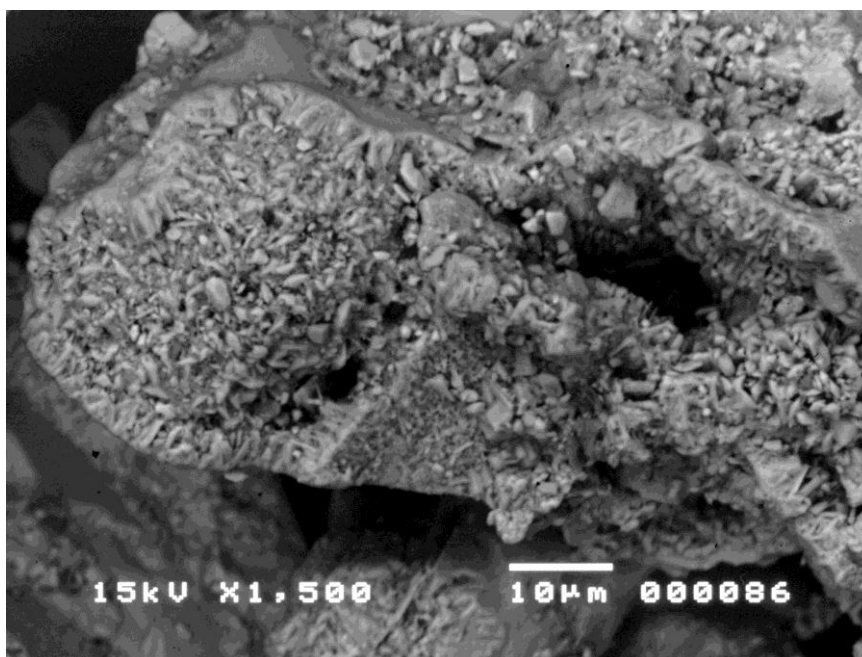


Figura 5-10 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IER. Partícula com goethita botrioidal, contendo células contendo agregados porosos, inclusive com grãos muito pequenos.

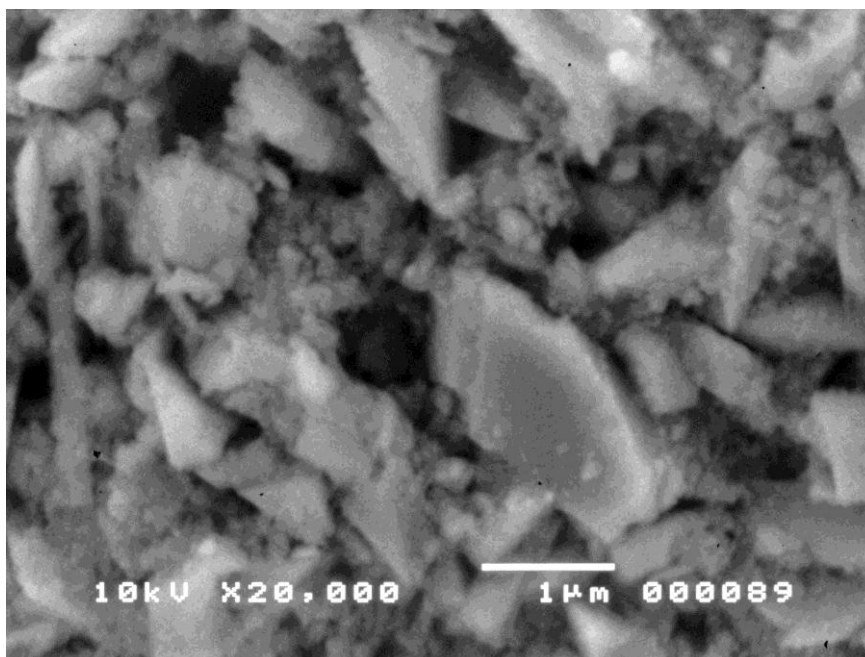


Figura 5-11 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, com poros variando de $0,4\mu\text{m}$ até $0,1\mu\text{m}$.

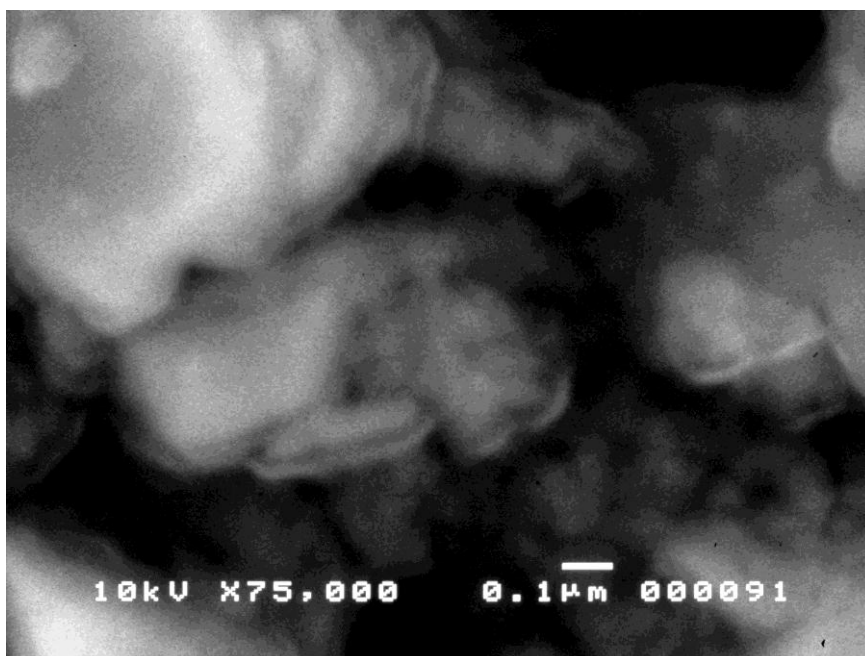


Figura 5-12 – Amostra 5/14 concentrado. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto 5.10, com poros variando de $0,40\mu\text{m}$ até $0,03\mu\text{m}$.

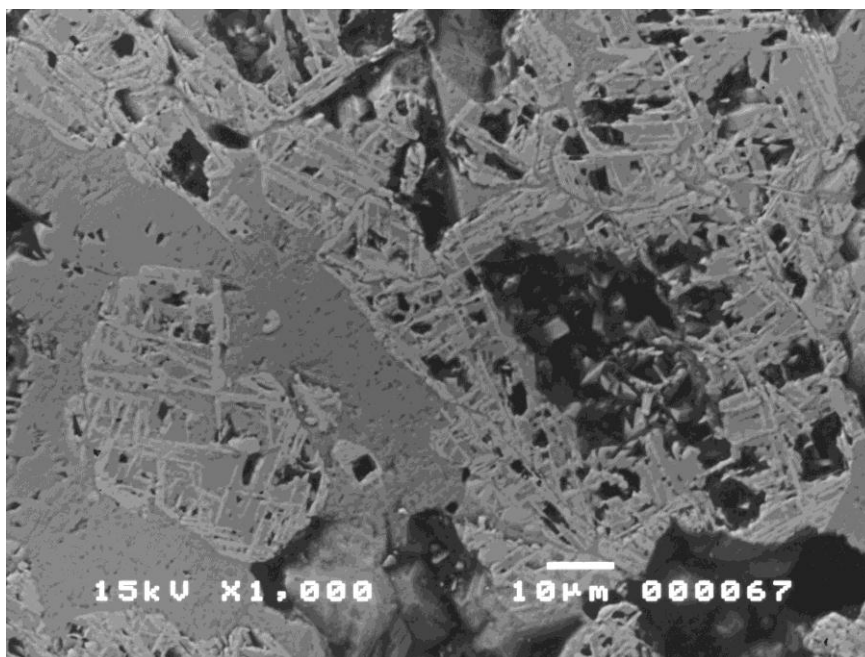


Figura 5-13 – Amostra 5/14 concentrado. Seção polida. MEV, IER. Partícula mista com hematita martítica, goethita maciça porosa e pouca goethita terrosa. Poros variando de 40µm, 20µm a 10µm, 5µm a 3µm, 1,0µm.

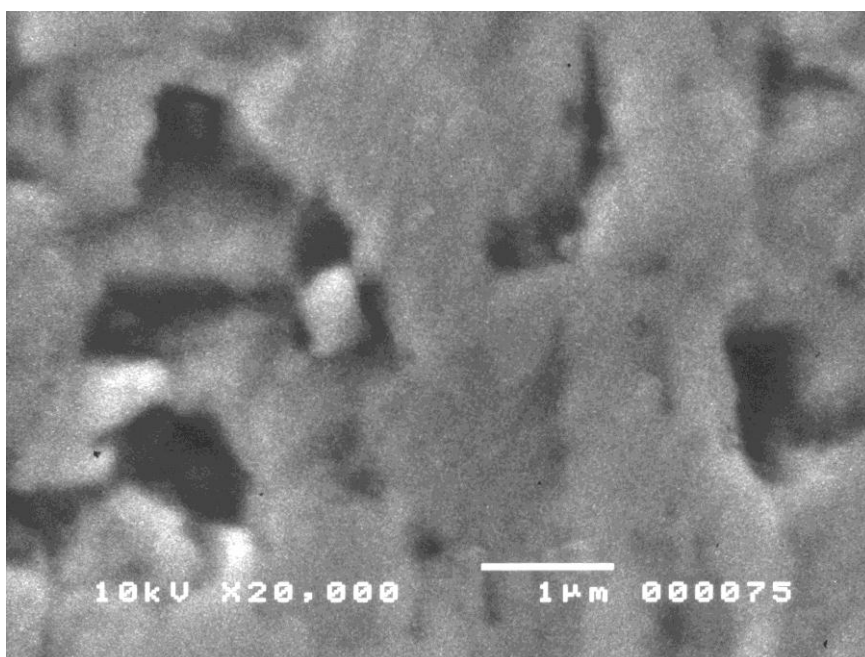


Figura 5-14 – Amostra 5/14 concentrado. Seção polida. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, com poros variando de 0,8µm até 0,1µm.

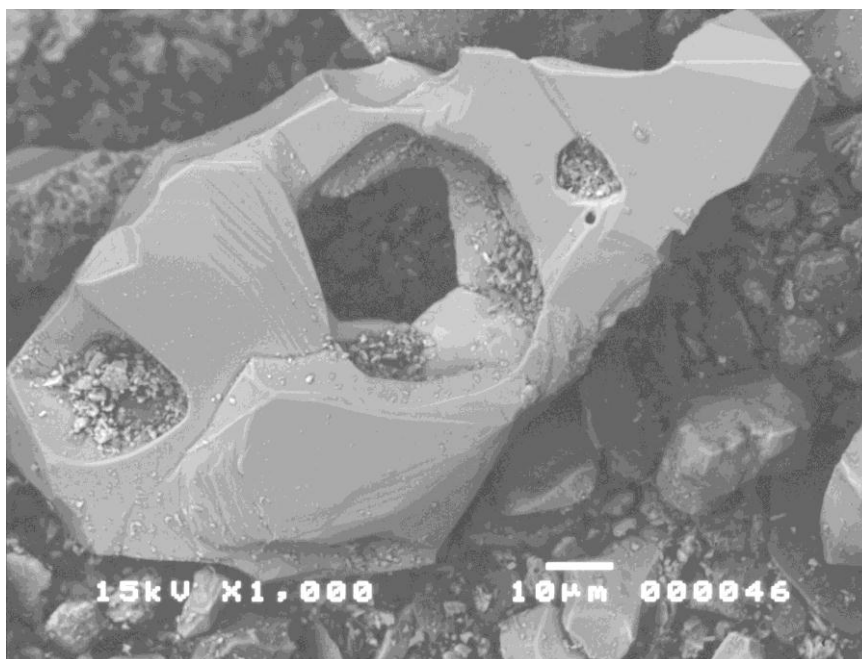


Figura 5-15 – Amostra 5/14 produto da moagem. MEV, IER. Partícula com hematita lamelar, com poucos poros, variando de 30µm a 2µm.

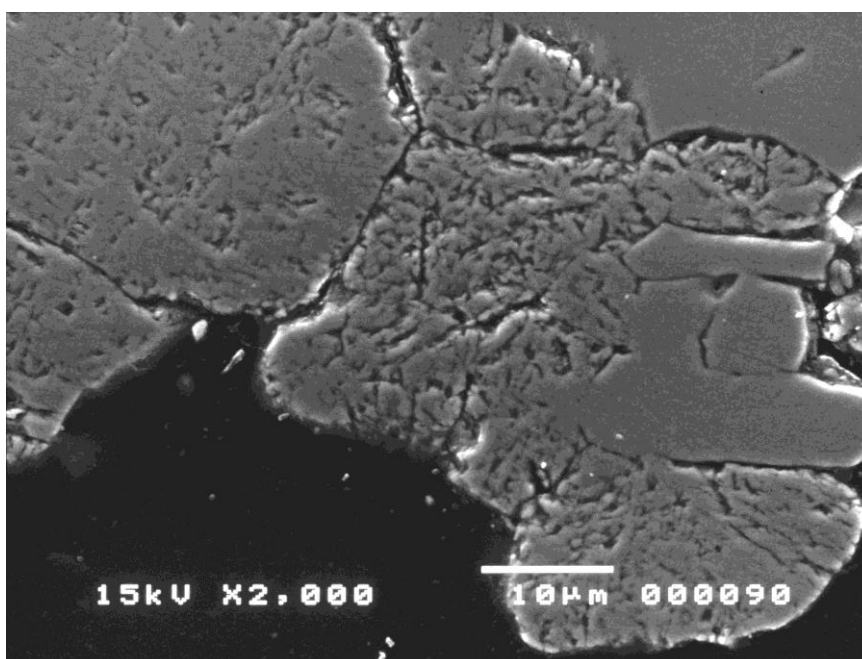


Figura 5-16 – Amostra 5/4 produto da moagem. Seção polida. MEV, IER. Partícula com hematitas martítica e lamelar; notar a diferença marcante de porosidade entre estas feições. Poros variando de 1,20µm a 0,15µm.

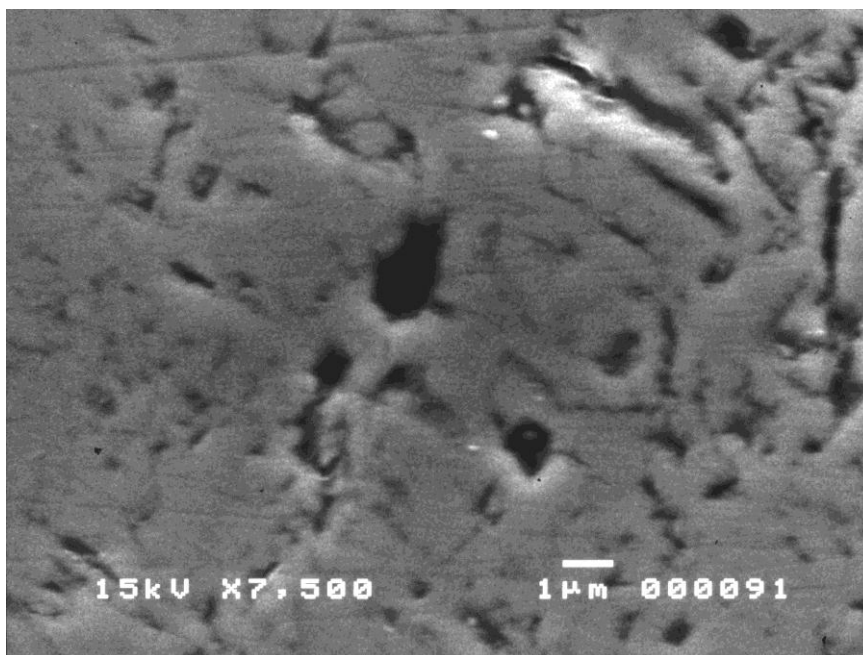


Figura 5-17 – Amostra 5/4 produto da moagem. Seção polida. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, com poros variando de 1,20µm até 0,15µm.

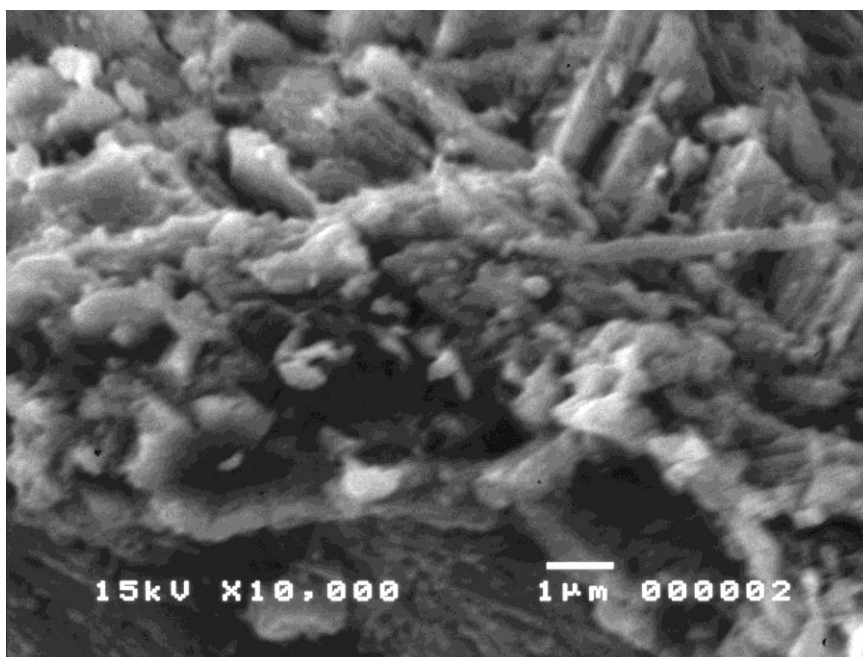


Figura 5-18 – Amostra 5/4 produto da moagem. MEV, IES. Partícula de hematita martítica típica. Poros variando de 0,6µm a 0,1µm.

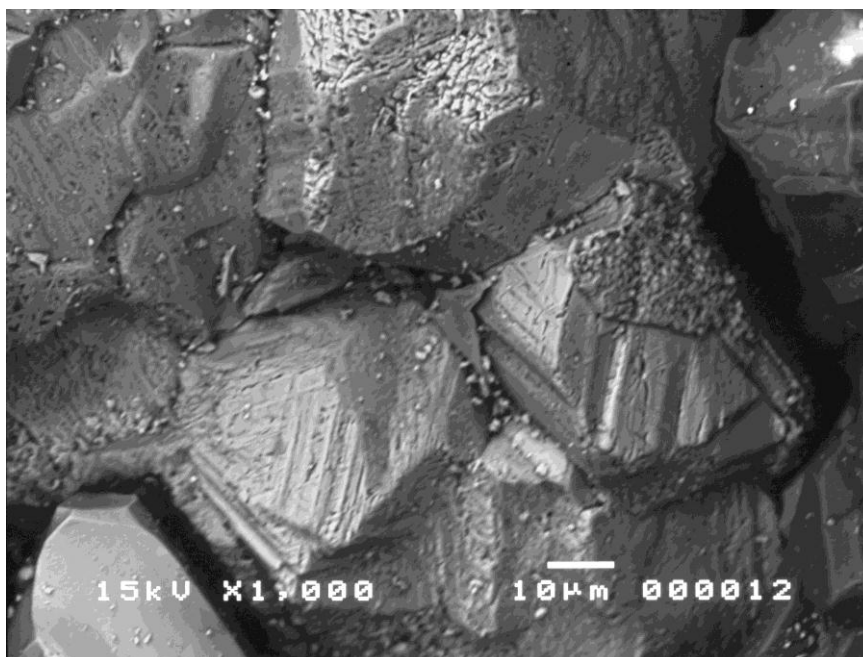


Figura 5-19 – Amostra 9/4 produto da moagem. MEV, IER. Partícula bastante porosa, composta principalmente de hematita martítica, com alguma presença de goethita porosa; próximo, há partículas de hematita lamelar. Poros abaixo de $2,0\mu\text{m}$.

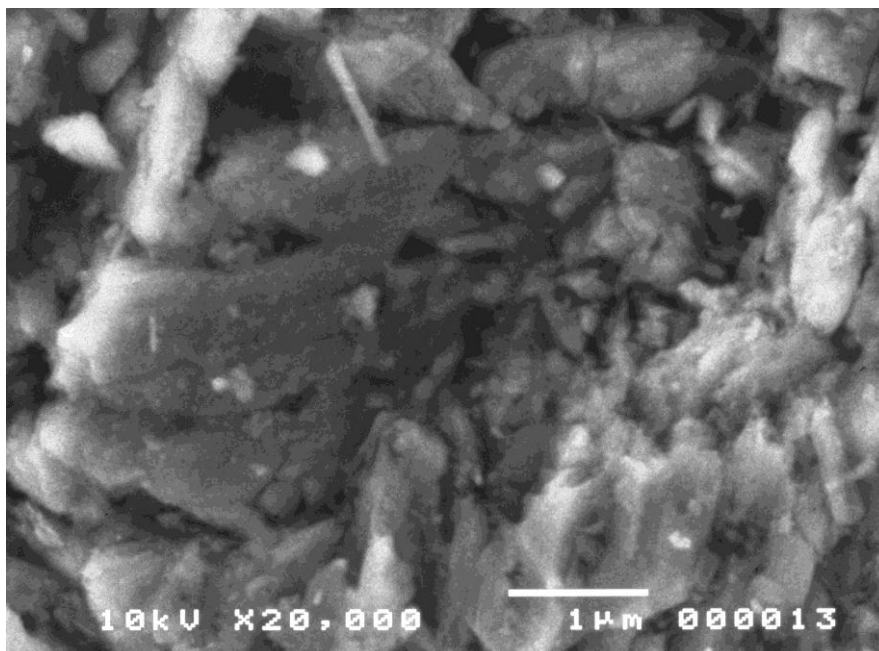


Figura 5-20 – Amostra 9/4 produto da moagem. MEV, IES. Detalhe da partícula da foto anterior, em hematita martítica, com poros variando de $0,70\mu\text{m}$ até $0,05\mu\text{m}$.

Dentre as amostras observadas, não se conseguiu notar diferença de porosidade entre elas. Vale lembrar que esta é uma abordagem predominantemente qualitativa. Já entre as feições microestruturais típicas dos minerais de ferro (hematita lamelar - especular, hematita martítica, goethita maciça, goethita botrioidal, goethita terrosa e quartzo) foram percebidas nítidas diferenças.

Assim, a hematita lamelar sempre se mostrou com porosidade muito baixa, enquanto a hematita martítica e as goethitas mostraram ampla distribuição de porosidade, desde pouco porosas até extremamente porosas. Também nestas fases porosas, a amplitude da distribuição de diâmetros e formas de poros observadas foi muito grande, com poros variando desde dimensões com muitos micrometros até abaixo de 50 nanometros.

Assim, as diferenças globais de porosidade média entre as amostras estudadas pelos métodos de porosimetria seriam devidas principalmente às diferenças de quantidades relativas das distintas feições microestruturais características dessas amostras, na faixa de resolução do equipamento. Isto está de acordo com a análise feita para as amostras 5/35, para as quais foi percebida pela PACG e por PIM (abaixo de 10 μ m) menor incidência de porosidade, em função da composição com menor proporção de fases porosas.

A diferenciação percebida para as amostras 5/4, que apresentam composição de fases porosas semelhantes às amostras 5/14 e 9/4, é devida à microporosidade e também à presença de mesoporos menores (diâmetro médio em torno de 3,75nm, conforme tabelas 5.8 a 5.11). Nesta faixa de tamanho de poros, as técnicas de PIM e MEV (equipamento utilizado) não tiveram capacidade de detecção.

5.3- Testes Tecnológicos

5.3.1- Processo de Deslamagem

5.3.1.1- Caracterização das Amostras de Underflow e Overflow

As amostras de ROM foram submetidas a uma etapa de moagem para preparação das amostras para o processo de flotação. Desta maneira, buscou-se atingir a especificação de 10% retido em 0,149mm. Após a moagem foi realizado o processo de deslamagem. As amostras geradas de *underflow* e *overflow* foram caracterizadas química, mineralógica e fisicamente, conforme as tabelas 5-12 e 5-13.

Tabela 5-12 – Análises químicas e de densidade (picnômetro a hélio) da alimentação, *underflow* e *overflow* da deslamagem das quatro amostras.

	Amostra	%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%P	PPC	Ds
Alimentação (produto da moagem)	5/35	38,06	44,58	0,36	0,029	0,56	3,597
	5/14	52,73	23,38	0,72	0,039	0,47	4,101
	9/4	46,45	33,21	0,26	0,034	1,00	3,983
	5/4	55,95	19,37	0,56	0,027	1,12	4,309
<i>Underflow</i>	5/35	37,07	46,48	0,16	0,007	0,33	3,599
	5/14	52,30	22,42	0,41	0,039	2,31	4,142
	9/4	45,83	33,31	0,16	0,023	0,94	3,897
	5/4	55,40	19,49	0,29	0,019	0,96	4,055
<i>Overflow</i>	5/35	38,56	29,28	7,23	0,309	7,23	3,385
	5/14	53,69	10,42	4,64	0,012	8,10	3,934
	9/4	49,48	23,86	1,77	0,027	3,54	3,888
	5/4	53,35	13,70	4,82	0,099	4,95	4,324

Tabela 5-13 – Análise mineralógica da alimentação e *underflow* da deslamagem das quatro amostras.

	Amostra	%HE	%HP	%G	%HP+ %G	%MA	%QT
Alimentação (produto da moagem)	5/35	52,81	0,93	1,58	2,51	0,00	44,69
	5/14	30,21	34,76	13,22	47,98	1,49	20,33
	9/4	23,44	45,63	4,42	50,05	0,35	26,16
	5/4	30,40	47,25	4,61	51,86	0,05	17,69
<i>Underflow</i>	5/35	55,10	0,71	1,90	2,61	4,57	37,67
	5/14	29,66	33,61	16,61	50,22	1,57	18,55
	9/4	23,83	44,96	5,10	50,06	0,79	25,22
	5/4	37,60	40,93	6,20	47,13	0,00	15,27

No caso do *overflow*, não foi possível realizar análise mineralógica em função da fina granulometria e coloração, dificultando a diferenciação e contagem das fases mineralógicas.

5.3.1.2- Performance no Teste de Deslamagem

Para avaliar se há influência da porosidade na deslamagem o teste de deslamagem foi realizado pesando-se a massa de *overflow* gerada em cada uma das três etapas, assim como o volume de soda utilizado. Estes valores estão apresentados nas figuras 5-21 e 5-22.

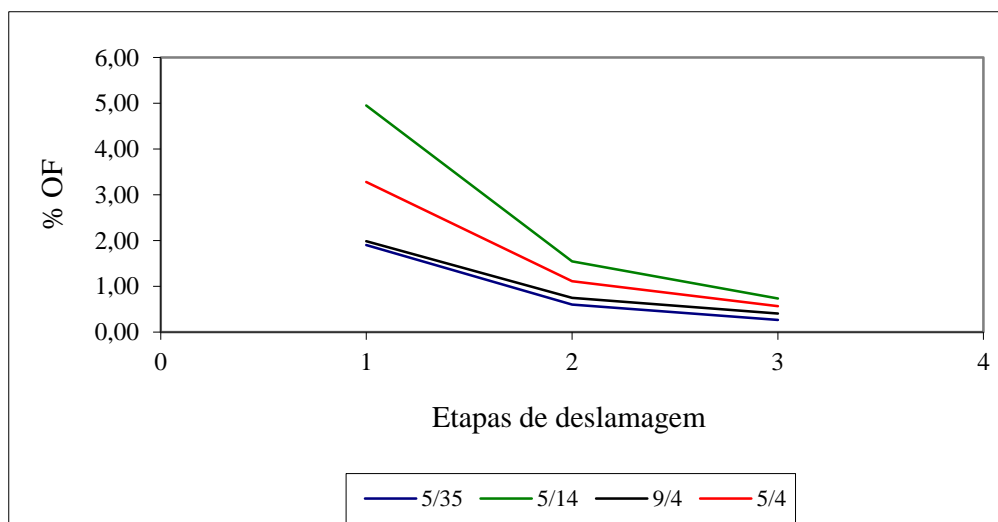


Figura 5-21 – % *overflow* gerada nas 3 etapas do teste de deslamagem.

As curvas apresentadas na figura 5-21 estão coerentes com o material passante em 10 μ m (diâmetro de corte desta etapa) apresentado na tabela 5.14, exceto para a inversão entre as amostras 5/35 e 9/4 (entretanto estes dois valores são muito próximos, tanto o %-10mm quanto o %OF, e portanto esta inversão não é significativa).

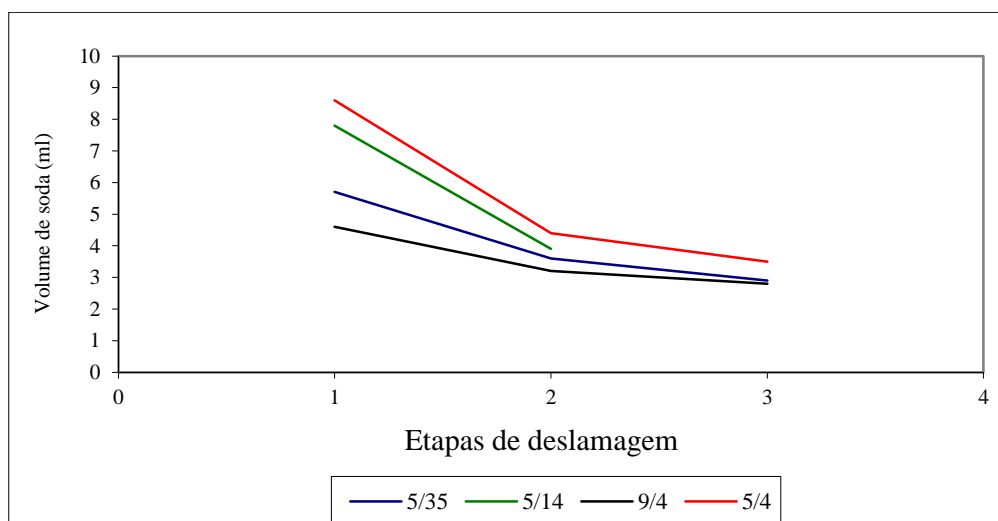


Figura 5-22 – Volume de solução de soda (3%) utilizado nas 3 etapas do teste de deslamagem.

O volume de soda necessário para atingir o pH de 10,5 (conforme padrão do teste de deslamagem Samarco apresentado no anexo) para cada amostra está coerente com o teor de alumina no produto da moagem de cada amostra (tabela 5-12), exceto para a inversão ocorrida entre as amostras 5/14 e 5/4, onde seria esperado que seria necessário maior volume de soda para a primeira.

Uma explicação para este fato pode ser a diferença de ASE entre as duas amostras (conforme tabela 5-7, a ASE da 5/4 é 3,2 vezes maior que a da 5/14), ou seja, a amostra 5/4 possui maior área com cargas a serem neutralizadas, exigindo maior volume de soda para a dispersão.

Na tabela 5-14, está mostrado o desempenho no teste de deslamagem. Este foi coerente com a composição química, granulométrica e mineralógica das amostras.

Tabela 5-14 – Recuperação em peso e metálica alcançadas no teste de deslamagem e %-10 μ m na alimentação.

Amostra	%-10 μ m	RP	RM
5/35	5,22	97,23	97,12
5/14	10,87	92,76	92,58
9/4	4,13	96,86	95,57
5/4	6,92	95,04	95,22

5.3.2- Processo de Flotação

5.3.2.1- Caracterização das Amostras de Concentrado e Rejeito da Flotação

As amostras de *underflow* da deslamagem foram submetidas a um teste de flotação. As amostras geradas de concentrado e rejeito foram caracterizadas química, mineralógica e fisicamente, conforme as tabelas 5-15 e 5-16.

Tabela 5-15 – Análises químicas e de densidade (picnômetro a hélio) da alimentação, concentrado e rejeito das quatro amostras.

	Amostra	%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%P	PPC	Ds
Alimentação (underflow da deslamagem)	5/35	37,07	46,48	0,16	0,007	0,33	3,599
	5/14	52,30	22,42	0,41	0,039	2,31	4,142
	9/4	45,83	33,31	0,16	0,023	0,94	3,897
	5/4	55,40	19,49	0,29	0,019	0,96	4,055
Concentrado	5/35	67,61	1,97	0,23	0,045	0,71	5,057
	5/14	65,75	2,42	0,41	0,046	3,23	4,809
	9/4	67,77	1,34	0,21	0,016	1,50	5,006
	5/4	68,15	1,24	0,17	0,007	1,12	5,082
Rejeito	5/35	20,44	70,48	0,14	0,006	0,13	3,095
	5/14	31,43	53,70	0,46	0,010	0,87	3,380
	9/4	22,73	67,00	0,11	0,013	0,35	3,174
	5/4	15,53	76,67	0,65	0,039	0,38	3,053

Tabela 5-16 – Análise mineralógica da alimentação, concentrado e rejeito das quatro amostras.

	Amostra	%HE	%HP	%G	%HP+ %G	%MA	%QT
Alimentação (underflow da deslamagem)	5/35	55,10	0,71	1,90	2,61	4,57	37,67
	5/14	29,66	33,61	16,61	50,22	1,57	18,55
	9/4	23,83	44,96	5,10	50,06	0,79	25,22
	5/4	37,60	40,93	6,20	47,13	0,00	15,27
Concentrado	5/35	93,76	1,34	3,73	5,07	0,04	1,14
	5/14	23,70	51,10	21,70	72,80	2,71	0,79
	9/4	27,49	61,12	8,47	69,59	0,97	1,94
	5/4	43,44	52,04	4,10	56,14	0,06	0,37
Rejeito	5/35	32,53	0,37	0,84	1,21	0,00	66,27
	5/14	36,99	8,36	3,81	12,17	0,32	50,53
	9/4	16,31	25,05	2,06	27,11	0,23	56,34
	5/4	14,88	9,07	0,89	9,96	0,00	75,09

Nota-se através destas duas tabelas que as amostras *underflow* da deslamagem 5/14 e 5/4, apesar do teor de ferro bastante semelhante (52,30% e 55,40%, respectivamente), apresentam um rejeito com teor de ferro bem diferentes (31,43% e 15,53%, respectivamente), bem como o teor de sílica no concentrado (2,42% e 1,24%).

Conforme pode ser visto na figura 5-23 (utilizada como uma referência na Samarco), amostras de alimentação de flotação com teor de ferro em torno de 50 a 55% têm uma recuperação metálica com baixa sensibilidade ao teor de ferro no rejeito. Ou seja, são necessários valores elevados de teor de ferro no rejeito, como na amostra 5/14, para abaixar significativamente a recuperação metálica.

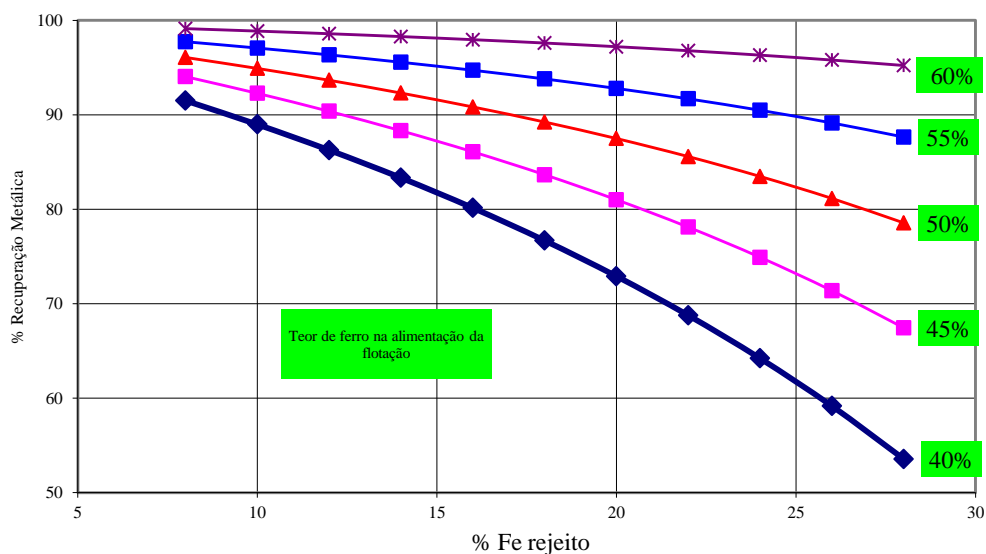


Figura 5-23 – Efeito da recuperação metálica no %Fe do rejeito para faixas de %Fe na alimentação.

5.3.2.2- Performance no Teste de Flotação

Na tabela 5-17 são apresentados os índices de performance atingidos no teste de flotação para as quatro amostras. Pode-se notar um índice de seletividade bem inferior aos demais para a amostra 5/14. Como citado, na caracterização das amostras de concentrado e rejeito da flotação, a amostra 5/14 apresentou o maior resultado de %SiO₂ no concentrado e %Fe no rejeito mais elevado. Isto está coerente com os resultados de %Al₂O₃, PPC e %G mais elevados que podem ter causado um efeito de *slime coating* no processo de flotação.

Os resultados obtidos para as amostras 5/35, 9/4 e 5/4 foram coerentes com as composições química e mineralógica encontradas.

Tabela 5-17 – Índices de performance no teste de flotação.

Amostra	RP	RM	IS
5/35	34,43	63,46	10,88
5/14	61,40	76,90	6,81
9/4	51,28	75,84	12,21
5/4	74,29	92,94	16,47

6. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, foram utilizadas quatro amostras de ROM das minas de Alegria visando verificar se há diferença de porosidade entre elas e se esta poderia ter algum efeito nas etapas de deslamagem e flotação.

Os resultados deste trabalho mostraram que há diferenças significativas de porosidade entre essas amostras. Contudo, os dois métodos de porosimetria usados – porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM) e porosimetria de adsorção-condensação gasosa (PACG) – e também o método de BET para determinação da área superficial específica (ASE) mostraram aptidões diferentes para caracterizar e distinguir os diferentes tipos e graus de porosidade ocorrentes nas amostras.

Para as quatro amostras estudadas, as análises de ASE e de porosidade BJH (mesoporos por PACG), mostraram que a amostra 5/35 tem de fato a menor porosidade e a menor ASE, o que é consistente com a menor quantidade de fases mineralógicas potencialmente porosas. Os dados de PIM para volumes totais de poros menores que 1,0 μ m e 100nm também foram consistentes para esta amostra.

Ao contrário, a amostra 5/4 mostrou uma ASE muito maior que todas as outras, consistentemente com uma porosidade BJH (mesoporos) também maior; além disto, esta amostra também apresentou o menor diâmetro médio de mesoporos (3,6nm para o concentrado). Neste caso, os mesoporos estão presentes na faixa menor de diâmetros, provavelmente menor que cerca de 20nm. Outro dado muito significativo é que ela foi a única que mostrou volumes de microporos (de Boer) significativo. Os dados de PIM não indicaram uma porosidade excepcional para esta amostra, muito provavelmente devido à faixa de tamanho que o porosímetro cobre.

As diferenças da amostra 5/4 em porosidade e ASE são ainda aparentemente mais inesperadas para as amostras dos concentrados, onde a quantidade de fases potencialmente porosas desta amostra é menor (56,1%) do que aquelas das amostras 5/14 (72,8%) e 9/4 (69,6%).

Os dados de porosidade pelos dois métodos (PIM e PACG) e de ASE para as outras duas amostras – 5/14 e 9/4 – indicam propriedades próximas, apesar de não idênticas.

Um aspecto relevante desta pesquisa é que ela permitiu comparar os dois métodos principais de porosimetria – PIM e PACG – na faixa de valores onde ambos são aplicáveis, entre 100,0nm e 3,0nm. Em geral, encontraram-se valores consistentes, apesar de não idênticos, para a grande maioria das amostras estudadas.

O método de PIM se mostrou eficaz na medição de densidade de sólido, sendo estes dados coerentes com os obtidos pelo picnômetro a hélio.

A PIM mostrou-se de difícil utilização devido aos baixos índices de disponibilidade do equipamento, dificuldade na manutenção, inclusive na importação de peças e penetrômetros e baixa repetibilidade, além da demora na obtenção de resultados em função do grande tempo necessário para a preparação e realização da análise.

Recomenda-se a utilização dos métodos BET e PACG quando na presença de porosidade fina para a determinação da ASE e da distribuição de poros e consequente correlação do desempenho dos processos de beneficiamento de minério de ferro, ao invés do método de Blaine, que não diferenciou nenhuma amostra. Entretanto, vale ressaltar que o prazo para obtenção de resultados através de PACG é grande devido ao tempo necessário à preparação e realização da análise, o que dificulta sua utilização no controle de qualidade da mina até o produto final.

Os resultados obtidos nas etapas de deslamagem e flotação para as quatro amostras foram coerentes com as análises químicas, granulométricas e mineralógicas, não havendo evidências de que a porosidade teve algum efeito nas performances atingidas.

7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementação desse estudo, recomenda-se para trabalhos futuros:

- aprofundamento na investigação da influência da porosidade nas etapas de deslamagem e flotação, com aumento do número de amostras;
- investigação da influência da porosidade nas etapas de moagem, remoagem e espessamento de lammas;
- estudo da distribuição de tamanhos, forma e grau de conectividade dos poros menores que 100nm, utilizando um microscópio eletrônico de varredura de altíssima resolução, tipo MEV-FEG (field-effect gun), que tem resolução de até 0,8nm.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brandão, P. R. G. *Caracterização de Minérios – Notas de Aula*. 2003. 64p.

Brandão, P. R. G. Notas de Aula, Disciplina “Métodos de Instrumentação e Análise”, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

Costa, A. G. D., Rocha, J. M., Bonfioli, L., Vieira, C. B. A Importância do Modelamento Geológico-Tipológico no Controle de Qualidade dos Concentrados e Pelotas de Minério de Ferro da Samarco Mineração S.A. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS PRIMAS DA ABM, 24, 1998, Belo Horizonte.

England, B. M. The State of the Science: Scanning Electron Microscopy. *The Mineralogical Record*, v.22, p123-132, mar-abr. 1991.

Hasui, Y. et al. *Quadro Lito-estrutural, Tipologia Geológica de Minérios de Ferro e Modelo de Formação da Jazida*. Relatório interno da Samarco. 1993. v.1, 70p.

Lagoeiro, L. E. *Microestruturas em Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero*. Apostila UFOP/DEGEO. 2001. 20 p.

Lowell, S., Shields, J. E. *Powder Surface Area and Porosity*. 2.ed. London: Chapman and Hall Ltd, 1984. 21v.

Lowell, S., Shields, J. E. Equivalence of Mercury Porosimetry and Gas Adsorption. *Powder Technology*, v.29, p225-231, 1981.

Micromeritics. *PoreSizer 9320.Quick Reference Guide*.

Micromeritics – The Physical Adsorption Process. The MicroReport. 3rd Quarter, p 10-12, 1991.

Muller, G., Schuster, A., Hoefs, J. Oxigen Isotopic Variations in Polymetamorphic Iron Ores from the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, v.12, n. 1-3, p348-355. 1982.

Pena, E. Q. *Caracterização dos Parâmetros Intrínsecos de Porosidade e de Superfície Específica de Pellet Feed de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero Empregando o Método de Adsorção de Nitrogênio*. Ouro Preto: REDEMAT, 2002. 78p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).

Petruk, W. Imaging of Minerals, Ores and Related Products to Determine Mineral Characteristics. *Minerals & Metallurgical Processing*, v.19, n.1, p50-56, fev. 2002.

Quantachrome Corporation. *Nova 1200 Gas Sorption Analyzer*. Version 5.25 (manual do equipamento).

Rosière, C. A. A Recristalização do Minério de Ferro da Jazida do Pico de Itabirito no Quadrilátero Ferrífero, MG, e suas Implicações Genéticas. In: SIMPOSIUM DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 1983, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: SBB – Núcleo de Minas Gerais, p173-186.

Rosière, C. A., Chemale Jr., F., Guimarães, M. L. V. Um Modelo para Evolução Microestrutural dos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I – Estruturas e Recristalização. *Geonomos*, IGC/UFMG, v.1, n.1, 1993, p65-84.

Santilli, C. V., Pulcinelli, S. H. Análise da Textura de Materiais Cerâmicos a partir de Isotermas de Adsorção de Gases. *Cerâmica*, 39 (259), 1993, p 11-16.

Sills, I. D., Aylmore, A. G., Quirk, J. P. A Comparison Between Mercury Injection and Nitrogen Sorption as Methods of Determining Pore Size Distributions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* v.37, 1973, p 535-537.

Souza, R. P., Brosch, C. D. Avaliação da Superfície dos Finos de Minério de Ferro. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 19, 1964, São Paulo. p307-316.

Vilela, R. A. *Estudo da Microporosidade do Minério Compacto da Mina do Tamanduá (Q.F., MG) e suas Implicações Metalúrgicas*. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2001. 94p. (Dissertação, Mestrado em Geologia).

Webb, P. A., Orr, C. *Analytical Methods in Fine Particle Technology*. 1.ed. Norcross: Micromeritics Instrument Corporation, 1997. 301p.

ANEXO

A.1 - Teste de Moagem

- 1) Secar a amostra e britá-la a menos de 3,36mm. Homogeneizá-la e quarteá-la em, no mínimo, três alíquotas de 1700g. Acertar a rotação do moinho para 67rpm.
- 2) Moer, inicialmente, uma alíquota por um tempo de 10min, com 730ml de água (correspondendo a 70% de sólidos).
- 3) Descarregar a polpa moída juntamente com a carga moedora em balde, sendo que o moinho e a carga moedora devem ser lavados com água de torneira. O material lavado também deve ser descarregado no balde.
- 4) Passar toda a polpa moída em uma peneira de 0,60mm. Secar o retido, triturá-lo em um pilão metálico a menos 0,60mm e juntá-lo à amostra passante.
- 5) Filtrar e secar a amostra. Desagregar, homogeneizar e fazer a análise granulométrica, determinando a porcentagem passante em 0,149mm.
- 6) Plotar a % retida acumulada em 0,149mm (ordenada) versus tempo de moagem (abscissa) no papel milimetrado.
- 7) Moer a segunda alíquota, aumentando ou diminuindo o tempo de moagem, a partir do resultado da % retida acumulada.
- 8) Repetir os itens 3 a 6.
- 9) De posse dos dois resultados da % retida acumulada em 0,15mm plotados no papel monolog, determinar o tempo ideal de moagem traçando uma reta que ligue os dois pontos do gráfico. O tempo ideal é encontrado na interseção da reta com a linha de 90% passante.

10) Fazer a moagem da terceira alíquota com o tempo determinado no gráfico, repetindo os itens 3 a 5.

11) Transferir a amostra moída para a cuba de deslamagem.

A.2 - Teste de Deslamagem

1) Colocar na cuba o material a ser deslamado.

2) Completar o nível com água nova até 4000ml. Agitar o material e corrigir o pH para 10,5 com soda cáustica a 3%.

3) Agitar novamente com *plunger* em movimentos de cima para baixo e vice versa até que todo o material esteja suspenso. Ligar o cronômetro. Esperar 5 minutos.

4) Após os 5 minutos, sifonar o material até o volume de aproximadamente 1cm acima do material sedimentado.

5) Repetir procedimento dos itens 2 a 4 em mais duas etapas.

6) A lama sifonada nas três etapas é filtrada, secada, pesada, e dela é retirada uma alíquota para análise química. O underflow é filtrado para realização de teste de flotação.

A.3 - Teste de Flotação

1) Depois da amostra moída e deslamada, filtrar o underflow, passá-lo na peneira 4,75mm, homogeneizá-lo e retirar uma alíquota de aproximadamente 50g para % de umidade.

2) Esta alíquota é preparada para análise química.

3) Através do resultado de % de umidade, calcular a massa da amostra úmida para 1500g de minério seco.

4) Colocar a amostra na cuba e acertar o volume para 1800ml com água nova. Colocar a cuba na célula de flotação e ligar a célula, colocando a polpa em suspensão.

5) Calcular o volume de amido e amina usando a seguinte fórmula:

$$\text{ml} = \frac{\text{pm} \times 0,0001 \times \text{g/t}}{\text{c}}$$

onde: ml = volume da solução de coletor ou depressor em ml.

pm = peso do minério em g.

g/t = dosagem de depressor ou coletor em g/t.

c = concentração da solução de coletor ou depressor em g/l.

6) Adicionar amido a 1%p/v e ligar a célula. Condicionar a polpa com o amido durante 5 minutos.

7) Acertar o volume da polpa com água nova para 2400ml. Medir o pH e ajustá-lo, se necessário, para 10,0 com soda cáustica a 3%p/v.

8) Adicionar a amina a 1%p/v e ligar a célula. Condicionar a polpa com a amina durante um minuto.

9) Abrir a válvula de entrada de ar. Executar a flotação durante três minutos, coletando em segunda cuba, com palhetas apropriadas, o flotado. Filtrar os produtos, secá-los e prepará-los para análise química. De posse dos pesos e análises químicas, calcular a recuperação em peso e metálica.

A.4 – Tabelas de PIM

5/35 Produto de Moagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,71	255,7812	255,7812	0,0000	0,0000
1,78	101,7527	178,7670	0,0024	0,0024
2,29	79,1138	90,4333	0,0035	0,0011
3,24	55,7798	67,4468	0,0052	0,0017
4,28	42,3011	49,0405	0,0066	0,0014
5,74	31,4839	36,8925	0,0085	0,0019
7,25	24,9507	28,2173	0,0123	0,0038
8,74	20,6990	22,8249	0,0150	0,0027
10,69	16,9186	18,8088	0,0187	0,0037
13,21	13,6939	15,3062	0,0326	0,0139
16,18	11,1781	12,4360	0,0965	0,0639
20,14	8,9818	10,0799	0,1360	0,0395
25,56	7,0757	8,0287	0,1428	0,0068
30,15	5,9990	6,5373	0,1491	0,0063
41,36	4,3726	5,1858	0,1620	0,0129
50,04	3,6147	3,9936	0,1675	0,0055
60,37	2,9958	3,3053	0,1720	0,0045
76,30	2,3705	2,6832	0,1758	0,0038
90,04	2,0087	2,1896	0,1781	0,0023
115,38	1,5675	1,7881	0,1808	0,0027
140,63	1,2861	1,4268	0,1824	0,0016
175,16	1,0326	1,1593	0,1838	0,0014
219,64	0,8235	0,9280	0,1853	0,0015
270,06	0,6697	0,7466	0,1863	0,0010
329,79	0,5484	0,6091	0,1871	0,0008
419,23	0,4314	0,4899	0,1881	0,0010
525,34	0,3443	0,3878	0,1881	0,0000
657,93	0,2749	0,3096	0,1881	0,0000
830,72	0,2177	0,2463	0,1881	0,0000
995,91	0,1816	0,1997	0,1881	0,0000
1223,83	0,1478	0,1647	0,1881	0,0000
1899,23	0,0952	0,1215	0,1881	0,0000
2395,23	0,0755	0,0854	0,1881	0,0000
2936,46	0,0616	0,0686	0,1884	0,0003
3488,69	0,0518	0,0567	0,1886	0,0002
4483,64	0,0403	0,0461	0,1889	0,0003
5477,17	0,0330	0,0367	0,1892	0,0003
6870,67	0,0263	0,0297	0,1895	0,0003
8486,50	0,0213	0,0238	0,1896	0,0001
10481,86	0,0173	0,0193	0,1898	0,0002
13175,04	0,0137	0,0155	0,1899	0,0001
16221,90	0,0111	0,0124	0,1900	0,0001
19992,06	0,0090	0,0101	0,1901	0,0001
24878,51	0,0073	0,0082	0,1902	0,0001
29880,37	0,0061	0,0067	0,1903	0,0001
35079,44	0,0052	0,0056	0,1903	0,0000
39977,21	0,0045	0,0048	0,1903	0,0000
45075,38	0,0040	0,0043	0,1903	0,0000
50060,61	0,0036	0,0038	0,1903	0,0000
54856,42	0,0033	0,0035	0,1903	0,0000
59861,82	0,0030	0,0032	0,1903	0,0000

5/35 Overflow deslamagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,73	248,0792	248,0792	0,0000	0,0000
1,79	101,2058	174,6425	0,0316	0,0316
2,27	79,8439	90,5249	0,0463	0,0147
3,28	55,1565	67,5002	0,0675	0,0212
4,23	42,7791	48,9678	0,0816	0,0141
5,72	31,6118	37,1955	0,0969	0,0153
7,22	25,0551	28,3334	0,1081	0,0112
8,69	20,8094	22,9322	0,1172	0,0091
10,74	16,8456	18,8275	0,1274	0,0102
13,16	13,7444	15,2950	0,1383	0,0109
16,20	11,1676	12,4560	0,1492	0,0109
20,16	8,9735	10,0706	0,1778	0,0286
25,16	7,1879	8,0807	0,1784	0,0006
32,09	5,6358	6,4119	0,1793	0,0009
40,78	4,4346	5,0352	0,1810	0,0017
50,70	3,5671	4,0008	0,1886	0,0076
60,25	3,0016	3,2844	0,1969	0,0083
75,19	2,4053	2,7035	0,2094	0,0125
90,48	1,9990	2,2021	0,2182	0,0088
115,48	1,5662	1,7826	0,2366	0,0184
139,68	1,2949	1,4305	0,2770	0,0404
174,62	1,0358	1,1653	0,3379	0,0609
219,31	0,8247	0,9302	0,3915	0,0536
269,26	0,6717	0,7482	0,4330	0,0415
329,30	0,5492	0,6105	0,4644	0,0314
418,61	0,4321	0,4906	0,4957	0,0313
517,42	0,3495	0,3908	0,5195	0,0238
640,60	0,2823	0,3159	0,5350	0,0155
797,89	0,2267	0,2545	0,5513	0,0163
976,27	0,1853	0,2060	0,5624	0,0111
1204,71	0,1501	0,1677	0,5721	0,0097
1890,54	0,0957	0,1229	0,5942	0,0221
2421,35	0,0747	0,0852	0,6024	0,0082
2890,04	0,0626	0,0686	0,6134	0,0110
3484,00	0,0519	0,0572	0,6194	0,0060
4543,35	0,0398	0,0459	0,6275	0,0081
5477,63	0,0330	0,0364	0,6328	0,0053
6867,92	0,0263	0,0297	0,6371	0,0043
8496,48	0,0213	0,0238	0,6418	0,0047
10498,21	0,0172	0,0193	0,6451	0,0033
13171,19	0,0137	0,0155	0,6479	0,0028
16221,58	0,0111	0,0124	0,6498	0,0019
19993,51	0,0090	0,0101	0,6509	0,0011
24911,46	0,0073	0,0082	0,6521	0,0012
29877,21	0,0061	0,0067	0,6525	0,0004
35024,59	0,0052	0,0056	0,6530	0,0005
40047,70	0,0045	0,0048	0,6534	0,0004
45082,48	0,0040	0,0043	0,6536	0,0002
49968,22	0,0036	0,0038	0,6538	0,0002
54869,89	0,0033	0,0035	0,6540	0,0002
59713,86	0,0030	0,0032	0,6541	0,0001

5/35 Underflow deslamagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,61	296,4545	296,4545	0,0000	0,0000
1,63	110,7437	203,5991	0,0123	0,0123
2,14	84,3553	97,5995	0,0167	0,0044
3,12	58,0424	71,1988	0,0230	0,0063
4,12	43,8549	50,9486	0,0284	0,0054
5,61	32,2450	38,0500	0,0359	0,0075
7,09	25,5013	28,8731	0,0493	0,0134
8,61	21,0178	23,2596	0,0622	0,0129
10,60	17,0687	19,0433	0,0856	0,0234
13,09	13,8199	15,4443	0,1148	0,0292
16,06	11,2585	12,5392	0,1554	0,0406
20,05	9,0219	10,1402	0,1921	0,0367
26,63	6,7906	7,9062	0,1936	0,0015
31,01	5,8326	6,3116	0,1957	0,0021
41,34	4,3746	5,1036	0,2006	0,0049
49,89	3,6255	4,0001	0,2037	0,0031
60,26	3,0012	3,3134	0,2057	0,0020
75,37	2,3995	2,7004	0,2071	0,0014
90,52	1,9981	2,1988	0,2078	0,0007
114,94	1,5735	1,7858	0,2086	0,0008
139,45	1,2970	1,4353	0,2090	0,0004
175,66	1,0296	1,1633	0,2096	0,0006
219,89	0,8225	0,9261	0,2098	0,0002
273,09	0,6623	0,7424	0,2101	0,0003
330,26	0,5476	0,6050	0,2102	0,0001
427,67	0,4229	0,4853	0,2104	0,0002
521,94	0,3465	0,3847	0,2105	0,0001
641,55	0,2819	0,3142	0,2105	0,0000
827,60	0,2185	0,2502	0,2107	0,0002
1008,11	0,1794	0,1990	0,2107	0,0000
1253,48	0,1443	0,1618	0,2108	0,0001
1937,35	0,0934	0,1188	0,2109	0,0001
2441,70	0,0741	0,0837	0,2109	0,0000
2898,63	0,0624	0,0682	0,2109	0,0000
3493,51	0,0518	0,0571	0,2109	0,0000
4553,03	0,0397	0,0457	0,2109	0,0000
5501,64	0,0329	0,0363	0,2109	0,0000
6873,19	0,0263	0,0296	0,2109	0,0000
8579,30	0,0211	0,0237	0,2109	0,0000
10519,08	0,0172	0,0191	0,2109	0,0000
13204,83	0,0137	0,0154	0,2109	0,0000
16271,16	0,0111	0,0124	0,2109	0,0000
20045,93	0,0090	0,0101	0,2109	0,0000

5/35 Concentrado da Flotação				
Pressure (psia)	Pore Diameter (mm)	Mean Diameter (mm)	Cumulative Volume (mL/g)	Incremental Volume (mL/g)
0,73	247,9419	247,9419	0,0000	0,0000
1,78	101,4119	174,6769	0,0031	0,0031
2,25	80,5036	90,9578	0,0045	0,0014
3,23	56,0449	68,2743	0,0070	0,0025
4,21	42,9653	49,5051	0,0091	0,0021
5,72	31,6462	37,3058	0,0117	0,0026
7,20	25,1205	28,3834	0,0143	0,0026
8,68	20,8320	22,9763	0,0165	0,0022
10,69	16,9247	18,8784	0,0208	0,0043
13,14	13,7601	15,3424	0,0351	0,0143
16,16	11,1930	12,4765	0,0786	0,0435
20,17	8,9689	10,0809	0,1176	0,0390
25,24	7,1653	8,0671	0,1228	0,0052
30,42	5,9459	6,5556	0,1286	0,0058
40,05	4,5164	5,2312	0,1373	0,0087
50,20	3,6030	4,0597	0,1411	0,0038
59,89	3,0201	3,3115	0,1432	0,0021
75,98	2,3806	2,7003	0,1449	0,0017
90,33	2,0023	2,1914	0,1458	0,0009
115,25	1,5693	1,7858	0,1467	0,0009
139,63	1,2953	1,4323	0,1474	0,0007
174,19	1,0383	1,1668	0,1479	0,0005
219,44	0,8242	0,9313	0,1483	0,0004
270,28	0,6692	0,7467	0,1487	0,0004
330,99	0,5464	0,6078	0,1489	0,0002
423,25	0,4273	0,4869	0,1492	0,0003
526,41	0,3436	0,3855	0,1495	0,0003
672,72	0,2689	0,3062	0,1497	0,0002
818,17	0,2211	0,2450	0,1499	0,0002
994,06	0,1819	0,2015	0,1501	0,0002
1213,67	0,1490	0,1655	0,1502	0,0001
1895,92	0,0954	0,1222	0,1506	0,0004
2394,21	0,0755	0,0855	0,1507	0,0001
2888,83	0,0626	0,0691	0,1508	0,0001
3531,97	0,0512	0,0569	0,1510	0,0002
4479,67	0,0404	0,0458	0,1511	0,0001
5474,27	0,0330	0,0367	0,1512	0,0001
6869,18	0,0263	0,0297	0,1513	0,0001
8486,07	0,0213	0,0238	0,1514	0,0001
10471,88	0,0173	0,0193	0,1515	0,0001
13162,22	0,0137	0,0155	0,1515	0,0000
16228,91	0,0111	0,0124	0,1515	0,0000
19976,77	0,0091	0,0101	0,1515	0,0000
24881,27	0,0073	0,0082	0,1515	0,0000
29872,17	0,0061	0,0067	0,1515	0,0000
34957,59	0,0052	0,0056	0,1515	0,0000
40050,45	0,0045	0,0048	0,1515	0,0000
44905,03	0,0040	0,0043	0,1515	0,0000
50033,29	0,0036	0,0038	0,1515	0,0000
55177,13	0,0033	0,0034	0,1515	0,0000
60111,73	0,0030	0,0031	0,1515	0,0000

5/35 Rejeito				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,75	241,3982	241,3982	0,0000	0,0000
1,80	100,5384	170,9683	0,0029	0,0029
2,29	78,8633	89,7008	0,0050	0,0021
3,29	54,8998	66,8815	0,0085	0,0035
4,28	42,2963	48,5980	0,0123	0,0038
5,78	31,3176	36,8069	0,0189	0,0066
7,25	24,9396	28,1286	0,0251	0,0062
8,73	20,7151	22,8274	0,0327	0,0076
10,70	16,8982	18,8066	0,0532	0,0205
13,19	13,7071	15,3027	0,1020	0,0488
16,15	11,1989	12,4530	0,1607	0,0587
20,15	8,9765	10,0877	0,1981	0,0374
25,01	7,2329	8,1047	0,1997	0,0016
30,48	5,9343	6,5836	0,2020	0,0023
39,97	4,5245	5,2294	0,2053	0,0033
49,87	3,6269	4,0757	0,2076	0,0023
60,32	2,9986	3,3127	0,2090	0,0014
76,59	2,3614	2,6800	0,2102	0,0012
90,82	1,9915	2,1765	0,2108	0,0006
115,89	1,5606	1,7760	0,2115	0,0007
140,18	1,2902	1,4254	0,2118	0,0003
174,26	1,0379	1,1640	0,2122	0,0004
219,59	0,8236	0,9308	0,2124	0,0002
269,41	0,6713	0,7475	0,2126	0,0002
328,69	0,5503	0,6108	0,2127	0,0001
418,79	0,4319	0,4911	0,2129	0,0002
521,97	0,3465	0,3892	0,2129	0,0000
658,85	0,2745	0,3105	0,2130	0,0001
822,72	0,2198	0,2472	0,2131	0,0001
997,83	0,1813	0,2005	0,2132	0,0001
1217,63	0,1485	0,1649	0,2133	0,0001
1906,56	0,0949	0,1217	0,2134	0,0001
2420,21	0,0747	0,0848	0,2134	0,0000
2891,59	0,0625	0,0686	0,2134	0,0000
3487,48	0,0519	0,0572	0,2134	0,0000
4503,47	0,0402	0,0460	0,2134	0,0000
5476,95	0,0330	0,0366	0,2134	0,0000
6866,20	0,0263	0,0297	0,2134	0,0000
8486,99	0,0213	0,0238	0,2134	0,0000
10460,41	0,0173	0,0193	0,2134	0,0000
13184,38	0,0137	0,0155	0,2134	0,0000
16236,56	0,0111	0,0124	0,2134	0,0000
19969,55	0,0091	0,0101	0,2134	0,0000
24898,13	0,0073	0,0082	0,2134	0,0000
29851,85	0,0061	0,0067	0,2134	0,0000
35015,86	0,0052	0,0056	0,2134	0,0000
39980,20	0,0045	0,0048	0,2134	0,0000
44994,81	0,0040	0,0043	0,2134	0,0000
49965,88	0,0036	0,0038	0,2134	0,0000
54857,29	0,0033	0,0035	0,2134	0,0000
59878,62	0,0030	0,0032	0,2134	0,0000

5/14 Produto Moagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,78	230,9967	230,9967	0,0000	0,0000
1,77	102,1376	166,5672	0,0026	0,0026
2,31	78,1455	90,1415	0,0043	0,0017
3,29	54,8904	66,5179	0,0066	0,0023
4,28	42,2779	48,5841	0,0084	0,0018
5,75	31,4358	36,8569	0,0108	0,0024
7,26	24,9288	28,1823	0,0125	0,0017
8,76	20,6578	22,7933	0,0143	0,0018
10,72	16,8702	18,7640	0,0175	0,0032
13,18	13,7249	15,2976	0,0268	0,0093
16,17	11,1850	12,4550	0,0658	0,0390
20,15	8,9762	10,0806	0,1044	0,0386
25,36	7,1325	8,0544	0,1117	0,0073
30,35	5,9602	6,5464	0,1218	0,0101
40,18	4,5017	5,2309	0,1366	0,0148
50,70	3,5670	4,0343	0,1452	0,0086
60,16	3,0063	3,2867	0,1506	0,0054
74,94	2,4134	2,7098	0,1562	0,0056
89,67	2,0169	2,2151	0,1602	0,0040
116,73	1,5495	1,7832	0,1653	0,0051
139,59	1,2957	1,4226	0,1684	0,0031
174,31	1,0376	1,1667	0,1716	0,0032
219,42	0,8243	0,9309	0,1749	0,0033
272,62	0,6634	0,7439	0,1774	0,0025
329,07	0,5496	0,6065	0,1793	0,0019
426,55	0,4240	0,4868	0,1819	0,0026
549,16	0,3293	0,3767	0,1839	0,0020
637,80	0,2836	0,3065	0,1851	0,0012
852,40	0,2122	0,2479	0,1870	0,0019
1007,07	0,1796	0,1959	0,1879	0,0009
1249,37	0,1448	0,1622	0,1892	0,0013
1940,25	0,0932	0,1190	0,1914	0,0022
2428,37	0,0745	0,0838	0,1923	0,0009
2980,41	0,0607	0,0676	0,1932	0,0009
3517,98	0,0514	0,0560	0,1938	0,0006
4478,40	0,0404	0,0459	0,1948	0,0010
5483,78	0,0330	0,0367	0,1960	0,0012
6870,19	0,0263	0,0297	0,1968	0,0008
8534,88	0,0212	0,0238	0,1972	0,0004
10474,31	0,0173	0,0192	0,1978	0,0006
13177,39	0,0137	0,0155	0,1984	0,0006
16235,58	0,0111	0,0124	0,1989	0,0005
19962,55	0,0091	0,0101	0,1992	0,0003
24897,50	0,0073	0,0082	0,1994	0,0002
29876,00	0,0061	0,0067	0,1996	0,0002
35087,10	0,0052	0,0056	0,1996	0,0000
39955,49	0,0045	0,0048	0,1996	0,0000
44851,14	0,0040	0,0043	0,1996	0,0000
49997,81	0,0036	0,0038	0,1996	0,0000
54852,75	0,0033	0,0035	0,1996	0,0000
59798,32	0,0030	0,0032	0,1996	0,0000

5/14 Overflow Deslamagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,79	229,5768	229,5768	0,0000	0,0000
1,84	98,0314	163,8041	0,0195	0,0195
2,32	77,9254	87,9784	0,0298	0,0103
3,29	54,9968	66,4611	0,0446	0,0148
4,28	42,2158	48,6063	0,0565	0,0119
5,75	31,4340	36,8249	0,0689	0,0124
7,28	24,8594	28,1467	0,0787	0,0098
8,72	20,7473	22,8034	0,0859	0,0072
10,76	16,8045	18,7759	0,0942	0,0083
13,20	13,7029	15,2537	0,1020	0,0078
16,21	11,1604	12,4316	0,1097	0,0077
20,19	8,9587	10,0595	0,1182	0,0085
25,82	7,0041	7,9814	0,1188	0,0006
30,55	5,9199	6,4620	0,1194	0,0006
40,40	4,4769	5,1498	0,1225	0,0031
50,58	3,5755	4,0262	0,1326	0,0101
60,07	3,0109	3,2932	0,1409	0,0083
75,39	2,3992	2,7051	0,1526	0,0117
90,40	2,0008	2,2000	0,1638	0,0112
115,09	1,5715	1,7862	0,1812	0,0174
141,16	1,3813	1,4264	0,2067	0,0255
174,20	1,0383	1,1598	0,2510	0,0443
219,43	0,8243	0,9313	0,2948	0,0438
270,17	0,6694	0,7469	0,3305	0,0357
328,82	0,5500	0,6097	0,3586	0,0281
419,52	0,4311	0,4906	0,3865	0,0279
517,52	0,3495	0,3903	0,4064	0,0199
658,44	0,2747	0,3121	0,4246	0,0182
821,29	0,2202	0,2475	0,4382	0,0136
996,48	0,1815	0,2009	0,4480	0,0098
1228,92	0,1472	0,1643	0,4572	0,0092
1895,89	0,0954	0,1213	0,4723	0,0151
2455,86	0,0736	0,0845	0,4795	0,0072
2937,13	0,0616	0,0676	0,4840	0,0045
3505,68	0,0516	0,0566	0,4881	0,0041
4547,56	0,0398	0,0457	0,4937	0,0056
5472,96	0,0330	0,0364	0,4974	0,0037
6866,44	0,0263	0,0297	0,5017	0,0043
8499,60	0,0213	0,0238	0,5056	0,0039
10470,87	0,0173	0,0193	0,5094	0,0038
13137,48	0,0138	0,0155	0,5133	0,0039
16232,12	0,0111	0,0125	0,5163	0,0030
20013,25	0,0090	0,0101	0,5186	0,0023
24952,08	0,0072	0,0081	0,5204	0,0018
29854,46	0,0061	0,0067	0,5213	0,0009
35014,22	0,0052	0,0056	0,5219	0,0006
40069,54	0,0045	0,0048	0,5223	0,0004
45014,77	0,0040	0,0043	0,5225	0,0002
49923,52	0,0036	0,0038	0,5226	0,0001
54817,40	0,0033	0,0035	0,5226	0,0000
59851,13	0,0030	0,0032	0,5226	0,0000

5/14 Underflow Deslamagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,73	249,0995	249,0995	0,0000	0,0000
1,76	102,6802	175,8900	0,0029	0,0029
2,29	78,8549	90,7677	0,0044	0,0015
3,28	55,2068	67,0309	0,0065	0,0021
4,26	42,4308	48,8188	0,0084	0,0019
5,75	31,4530	36,9419	0,0109	0,0025
7,24	24,9852	28,2191	0,0134	0,0025
8,75	20,6752	22,8302	0,0170	0,0036
10,69	16,9168	18,7960	0,0229	0,0059
13,15	13,7490	15,3328	0,0379	0,0150
16,17	11,1817	12,4653	0,0895	0,0516
20,12	8,9879	10,0848	0,1382	0,0487
24,92	7,2583	8,1231	0,1478	0,0096
30,23	5,9824	6,6204	0,1608	0,0130
40,16	4,5039	5,2432	0,1736	0,0128
50,17	3,6053	4,0546	0,1796	0,0060
60,27	3,0008	3,3030	0,1829	0,0033
75,63	2,3914	2,6961	0,1857	0,0028
90,07	2,0080	2,1997	0,1874	0,0017
114,75	1,5762	1,7921	0,1891	0,0017
140,31	1,2890	1,4326	0,1902	0,0011
174,50	1,0365	1,1627	0,1912	0,0010
219,84	0,8227	0,9296	0,1921	0,0009
272,43	0,6639	0,7433	0,1929	0,0008
331,89	0,5450	0,6044	0,1936	0,0007
417,99	0,4327	0,4888	0,1944	0,0008
539,40	0,3353	0,3840	0,1952	0,0008
640,27	0,2825	0,3089	0,1956	0,0004
859,70	0,2104	0,2464	0,1965	0,0009
1021,54	0,1770	0,1937	0,1970	0,0005
1248,59	0,1449	0,1610	0,1976	0,0006
1911,97	0,0946	0,1197	0,1989	0,0013
2404,21	0,0752	0,0849	0,1995	0,0006
2901,40	0,0623	0,0688	0,2000	0,0005
3484,46	0,0519	0,0571	0,2006	0,0006
4488,82	0,0403	0,0461	0,2014	0,0008
5478,95	0,0330	0,0367	0,2019	0,0005
6869,96	0,0263	0,0297	0,2026	0,0007
8540,31	0,0212	0,0238	0,2033	0,0007
10475,12	0,0173	0,0192	0,2039	0,0006
13149,17	0,0138	0,0155	0,2045	0,0006
16224,35	0,0111	0,0125	0,2049	0,0004
19996,99	0,0090	0,0101	0,2053	0,0004
24936,54	0,0073	0,0081	0,2056	0,0003
29866,53	0,0061	0,0067	0,2057	0,0001
34972,84	0,0052	0,0056	0,2058	0,0001
40056,48	0,0045	0,0048	0,2059	0,0001
44800,61	0,0040	0,0043	0,2059	0,0000
49978,08	0,0036	0,0038	0,2059	0,0000
54933,21	0,0033	0,0035	0,2059	0,0000
59786,38	0,0030	0,0032	0,2059	0,0000

5/14 Concentrado Flotação				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,73	249,3490	249,3490	0,0000	0,0000
1,75	103,5153	176,4321	0,0040	0,0040
2,26	80,1036	91,8095	0,0060	0,0020
3,23	55,9819	68,0428	0,0093	0,0033
4,25	42,5460	49,2640	0,0124	0,0031
5,75	31,4645	37,0052	0,0180	0,0056
7,22	25,0413	28,2529	0,0231	0,0051
8,70	20,7991	22,9202	0,0291	0,0060
10,69	16,9193	18,8592	0,0393	0,0102
13,20	13,7030	15,3112	0,0656	0,0263
16,20	11,1674	12,4352	0,1066	0,0410
20,16	8,9736	10,0751	0,1437	0,0371
25,37	7,1297	8,0517	0,1497	0,0060
30,16	5,9978	6,5637	0,1577	0,0080
40,17	4,5020	5,2499	0,1662	0,0085
50,28	3,5970	4,0495	0,1702	0,0040
61,00	2,9650	3,2810	0,1725	0,0023
75,29	2,4021	2,6835	0,1743	0,0018
90,10	2,0073	2,2047	0,1755	0,0012
115,32	1,5684	1,7879	0,1768	0,0013
139,97	1,2922	1,4303	0,1777	0,0009
176,11	1,0270	1,1596	0,1786	0,0009
219,26	0,8249	0,9259	0,1794	0,0008
269,70	0,6706	0,7477	0,1801	0,0007
332,71	0,5436	0,6071	0,1808	0,0007
428,78	0,4218	0,4827	0,1817	0,0009
563,57	0,3209	0,3714	0,1826	0,0009
644,04	0,2808	0,3009	0,1831	0,0005
841,68	0,2149	0,2479	0,1841	0,0010
1011,07	0,1789	0,1969	0,1847	0,0006
1238,78	0,1460	0,1624	0,1854	0,0007
1890,74	0,0957	0,1208	0,1870	0,0016
2414,46	0,0749	0,0853	0,1879	0,0009
2888,87	0,0626	0,0688	0,1885	0,0006
3542,71	0,0511	0,0568	0,1893	0,0008
4589,36	0,0394	0,0452	0,1902	0,0009
5475,60	0,0330	0,0362	0,1908	0,0006
6865,90	0,0263	0,0297	0,1916	0,0008
8558,20	0,0211	0,0237	0,1923	0,0007
10467,87	0,0173	0,0192	0,1930	0,0007
13195,03	0,0137	0,0155	0,1937	0,0007
16224,18	0,0111	0,0124	0,1942	0,0005
20017,35	0,0090	0,0101	0,1946	0,0004
24924,68	0,0073	0,0071	0,1949	0,0003
29886,89	0,0061	0,0067	0,1949	0,0000
35021,87	0,0052	0,0056	0,1950	0,0001
40213,50	0,0045	0,0048	0,1950	0,0000
45067,74	0,0040	0,0043	0,1951	0,0001
50096,86	0,0036	0,0038	0,1951	0,0000
54843,46	0,0033	0,0035	0,1951	0,0000
60001,11	0,0030	0,0032	0,1951	0,0000

5/14 Rejeito Flotação				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,75	240,8533	240,8533	0,0000	0,0000
1,78	101,8267	171,3400	0,0045	0,0045
2,32	77,9525	89,8896	0,0069	0,0024
3,27	55,2395	66,5960	0,0102	0,0033
4,25	42,5105	48,8750	0,0128	0,0026
5,75	31,4336	36,9720	0,0162	0,0034
7,25	24,9332	28,1834	0,0197	0,0035
8,73	20,7281	22,8307	0,0230	0,0033
10,77	16,8000	18,7641	0,0286	0,0056
13,22	13,6784	15,2392	0,0461	0,0175
16,19	11,1743	12,4264	0,1190	0,0729
20,19	8,9581	10,0662	0,1845	0,0655
25,01	7,2308	8,0945	0,1891	0,0046
30,22	5,9839	6,6074	0,1967	0,0076
40,35	4,4826	5,2332	0,2071	0,0104
50,45	3,5851	4,0338	0,2121	0,0050
59,93	3,0179	3,3015	0,2153	0,0032
74,97	2,4124	2,7152	0,2179	0,0026
90,14	2,0064	2,2094	0,2198	0,0019
115,69	1,5633	1,7849	0,2217	0,0019
140,03	1,2916	1,4275	0,2228	0,0011
174,88	1,0342	1,1629	0,2239	0,0011
219,84	0,8227	0,9285	0,2247	0,0008
272,64	0,6634	0,7430	0,2253	0,0006
329,59	0,5488	0,6061	0,2258	0,0005
419,34	0,4313	0,4900	0,2264	0,0006
526,82	0,3433	0,3873	0,2269	0,0005
682,62	0,2650	0,3041	0,2273	0,0004
811,60	0,2228	0,2439	0,2277	0,0004
1017,31	0,1778	0,2003	0,2280	0,0003
1212,71	0,1491	0,1635	0,2283	0,0003
1914,14	0,0945	0,1218	0,2290	0,0007
2397,25	0,0754	0,0850	0,2293	0,0003
2933,93	0,0616	0,0685	0,2295	0,0002
3487,98	0,0519	0,0567	0,2297	0,0002
4586,59	0,0394	0,0456	0,2300	0,0003
5474,14	0,0330	0,0362	0,2301	0,0001
6865,51	0,0263	0,0297	0,2304	0,0003
8507,55	0,0213	0,0238	0,2305	0,0001
10482,73	0,0173	0,0193	0,2307	0,0002
13174,49	0,0137	0,0155	0,2307	0,0000
16228,79	0,0111	0,0124	0,2307	0,0000
19979,83	0,0091	0,0101	0,2307	0,0000
24891,06	0,0073	0,0082	0,2307	0,0000
29877,00	0,0061	0,0067	0,2307	0,0000
34928,79	0,0052	0,0056	0,2307	0,0000
39902,68	0,0045	0,0049	0,2307	0,0000
44899,23	0,0040	0,0043	0,2307	0,0000
50068,57	0,0036	0,0038	0,2307	0,0000
54958,91	0,0033	0,0035	0,2307	0,0000
59859,16	0,0030	0,0032	0,2307	0,0000

9/4 Produto de Moagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,73	247,7775	247,7775	0,0000	0,0000
1,76	102,4973	175,1374	0,0041	0,0041
2,25	80,2557	91,3765	0,0059	0,0018
3,24	55,8772	68,0664	0,0087	0,0028
4,27	42,3658	49,1215	0,0112	0,0025
5,71	31,6592	37,0125	0,0147	0,0035
7,20	25,1061	28,3827	0,0198	0,0051
8,72	20,7500	22,9281	0,0262	0,0064
10,73	16,8534	18,8017	0,0423	0,0161
13,20	13,7027	15,2781	0,0939	0,0516
16,16	11,1934	12,4481	0,1391	0,0452
20,11	8,9919	10,0926	0,1670	0,0279
25,51	7,0887	8,0403	0,1747	0,0077
30,54	5,9214	6,5051	0,1834	0,0087
40,02	4,5195	5,2204	0,1922	0,0088
50,66	3,5705	4,0450	0,1973	0,0051
60,04	3,0124	3,2914	0,2004	0,0031
75,33	2,4009	2,7066	0,2034	0,0030
91,01	1,9873	2,1941	0,2054	0,0020
114,80	1,5755	1,7814	0,2075	0,0021
139,49	1,2966	1,4360	0,2090	0,0015
174,60	1,0359	1,1662	0,2104	0,0014
219,71	0,8232	0,9295	0,2117	0,0013
272,46	0,6638	0,7435	0,2128	0,0011
331,40	0,5458	0,6048	0,2136	0,0008
425,26	0,4253	0,4855	0,2145	0,0009
552,35	0,3274	0,3764	0,2153	0,0008
638,38	0,2833	0,3054	0,2157	0,0004
861,30	0,2100	0,2467	0,2165	0,0008
1020,16	0,1773	0,1936	0,2169	0,0004
1236,91	0,1462	0,1618	0,2174	0,0005
1933,88	0,0935	0,1199	0,2183	0,0009
2404,87	0,0752	0,0844	0,2187	0,0004
2963,17	0,0610	0,0681	0,2191	0,0004
3568,87	0,0507	0,0559	0,2194	0,0003
4587,06	0,0394	0,0451	0,2199	0,0005
5473,13	0,0330	0,0362	0,2201	0,0002
6868,75	0,0263	0,0297	0,2203	0,0002
8538,75	0,0212	0,0238	0,2206	0,0003
10493,40	0,0172	0,0192	0,2208	0,0002
13145,50	0,0138	0,0155	0,2211	0,0003
16227,76	0,0111	0,0125	0,2211	0,0000
19990,14	0,0090	0,0101	0,2214	0,0003
24911,28	0,0073	0,0082	0,2214	0,0000
29856,50	0,0061	0,0067	0,2214	0,0000
35001,75	0,0052	0,0056	0,2214	0,0000
39928,20	0,0045	0,0048	0,2214	0,0000
44949,54	0,0040	0,0043	0,2214	0,0000
49918,84	0,0036	0,0038	0,2214	0,0000
54770,23	0,0033	0,0035	0,2214	0,0000
59722,53	0,0030	0,0032	0,2214	0,0000

9/4 Overflow Deslamagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,73	249,2103	249,2103	0,0000	0,0000
1,82	99,2163	174,2133	0,0000	0,0000
2,28	79,4195	89,3179	0,0000	0,0000
3,27	55,2599	67,3397	0,0000	0,0000
4,30	42,1008	48,6804	0,0000	0,0000
5,75	31,4711	36,7859	0,0000	0,0000
7,25	24,9521	28,2116	0,0000	0,0000
8,78	20,6109	22,7815	0,0000	0,0000
10,70	16,8998	18,7554	0,0000	0,0000
13,23	13,6710	15,2854	0,0000	0,0000
16,18	11,1816	12,4263	0,0000	0,0000
20,16	8,9734	10,0775	0,0000	0,0000
25,12	7,2012	8,0873	0,0000	0,0000
30,57	5,9155	6,5583	0,0000	0,0000
40,57	4,4576	5,1866	0,0013	0,0013
50,30	3,5956	4,0266	0,0080	0,0067
59,96	3,0164	3,3060	0,0144	0,0064
75,10	2,4083	2,7124	0,0236	0,0092
91,53	1,9759	2,1921	0,0334	0,0098
114,54	1,5791	1,7775	0,0454	0,0120
140,09	1,2910	1,4350	0,0643	0,0189
174,47	1,0366	1,1638	0,1209	0,0566
219,48	0,8241	0,9303	0,1737	0,0528
268,98	0,6724	0,7482	0,2104	0,0367
329,36	0,5491	0,6108	0,2384	0,0280
426,83	0,4237	0,4864	0,2675	0,0291
540,74	0,3345	0,3791	0,2863	0,0188
641,51	0,2819	0,3082	0,2970	0,0107
835,04	0,2166	0,2493	0,3099	0,0129
988,01	0,1831	0,1998	0,3162	0,0063
1228,63	0,1472	0,1651	0,3226	0,0064
1936,55	0,0934	0,1203	0,3320	0,0094
2435,59	0,0743	0,0838	0,3351	0,0031
2885,83	0,0627	0,0685	0,3375	0,0024
3540,49	0,0511	0,0569	0,3392	0,0017
4588,76	0,0394	0,0452	0,3413	0,0021
5472,90	0,0330	0,0362	0,3428	0,0015
6872,41	0,0263	0,0297	0,3441	0,0013
8505,95	0,0213	0,0238	0,3449	0,0008
10502,72	0,0172	0,0192	0,3456	0,0007
13182,09	0,0137	0,0155	0,3463	0,0007
16230,36	0,0111	0,0124	0,3468	0,0005
19975,39	0,0091	0,0101	0,3471	0,0003
24933,00	0,0073	0,0082	0,3473	0,0002
29859,81	0,0061	0,0067	0,3474	0,0001
35017,09	0,0052	0,0056	0,3474	0,0000
40062,51	0,0045	0,0048	0,3474	0,0000
45044,90	0,0040	0,0043	0,3474	0,0000
50011,71	0,0036	0,0038	0,3474	0,0000
54851,08	0,0033	0,0035	0,3474	0,0000
59971,90	0,0030	0,0032	0,3474	0,0000

9/4 Underflow Deslamagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,75	242,6529	242,6529	0,0000	0,0000
1,78	101,8822	172,2675	0,0033	0,0033
2,31	78,4491	90,1657	0,0053	0,0020
3,26	55,5489	66,9990	0,0081	0,0028
4,26	42,4662	49,0076	0,0113	0,0032
5,71	31,6516	37,0589	0,0164	0,0051
7,22	25,0481	28,3498	0,0241	0,0077
8,75	20,6670	22,8575	0,0327	0,0086
10,68	16,9310	18,7990	0,0471	0,0144
13,22	13,6841	15,3076	0,0807	0,0336
16,17	11,1846	12,4344	0,1361	0,0554
20,15	8,9742	10,0794	0,1808	0,0447
25,24	7,1660	8,0701	0,1814	0,0006
30,79	5,8742	6,5201	0,1825	0,0011
40,90	4,4217	5,1479	0,1849	0,0024
50,67	3,5697	3,9957	0,1867	0,0018
60,76	2,9767	3,2732	0,1882	0,0015
75,89	2,3833	2,6800	0,1896	0,0014
90,79	1,9922	2,1877	0,1905	0,0009
115,20	1,5699	1,7810	0,1915	0,0010
139,35	1,2979	1,4339	0,1921	0,0006
174,26	1,0379	1,1679	0,1926	0,0005
220,37	0,8207	0,9293	0,1931	0,0005
270,96	0,6675	0,7441	0,1935	0,0004
328,83	0,5500	0,6088	0,1938	0,0003
418,30	0,4324	0,4912	0,1941	0,0003
534,21	0,3386	0,3855	0,1945	0,0004
664,81	0,2721	0,3053	0,1948	0,0003
851,93	0,2123	0,2422	0,1951	0,0003
1001,79	0,1805	0,1964	0,1953	0,0002
1231,17	0,1469	0,1637	0,1956	0,0003
1900,18	0,0952	0,1210	0,1962	0,0006
2404,57	0,0752	0,0852	0,1965	0,0003
2894,40	0,0625	0,0689	0,1969	0,0004
3487,80	0,0519	0,0572	0,1972	0,0003
4528,21	0,0399	0,0459	0,1974	0,0002
5478,44	0,0330	0,0365	0,1978	0,0004
6866,27	0,0263	0,0297	0,1980	0,0002
8557,16	0,0211	0,0237	0,1981	0,0001
10530,57	0,0172	0,0192	0,1982	0,0001
13134,88	0,0138	0,0155	0,1982	0,0000
16233,79	0,0111	0,0125	0,1983	0,0001
19952,26	0,0091	0,0101	0,1983	0,0000
24920,49	0,0073	0,0082	0,1983	0,0000
29891,20	0,0061	0,0067	0,1983	0,0000
35018,05	0,0052	0,0056	0,1983	0,0000
39997,61	0,0045	0,0048	0,1983	0,0000
44998,05	0,0040	0,0043	0,1983	0,0000
49778,56	0,0036	0,0038	0,1983	0,0000
54912,57	0,0033	0,0035	0,1983	0,0000
59884,34	0,0030	0,0032	0,1983	0,0000

9/4 Concentrado Flotação				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,76	238,8255	238,8255	0,0000	0,0000
1,80	100,4392	169,6323	0,0034	0,0034
2,32	77,8658	89,1525	0,0053	0,0019
3,31	54,6854	66,2756	0,0090	0,0037
4,29	42,1348	48,4101	0,0130	0,0040
5,75	31,4645	36,7997	0,0191	0,0061
7,26	24,9285	28,1965	0,0255	0,0064
8,76	20,6445	22,7865	0,0328	0,0073
10,71	16,8895	18,7670	0,0527	0,0199
13,20	13,7006	15,2951	0,0885	0,0358
16,18	11,1797	12,4401	0,1347	0,0462
20,20	8,9544	10,0671	0,1657	0,0310
25,09	7,2090	8,0817	0,1679	0,0022
30,57	5,9159	6,5625	0,1713	0,0034
40,45	4,4712	5,1935	0,1762	0,0049
49,82	3,6304	4,0508	0,1788	0,0026
61,20	2,9554	3,2929	0,1807	0,0019
75,69	2,3896	2,6725	0,1820	0,0013
90,38	2,0012	2,1954	0,1829	0,0009
114,91	1,5740	1,7876	0,1839	0,0010
141,14	1,2815	1,4277	0,1846	0,0007
174,75	1,0350	1,1582	0,1851	0,0005
221,82	0,8154	0,9252	0,1856	0,0005
270,89	0,6677	0,7415	0,1860	0,0004
330,75	0,5468	0,6072	0,1863	0,0003
425,33	0,4252	0,4860	0,1868	0,0005
538,32	0,3360	0,3806	0,1873	0,0005
662,79	0,2729	0,3044	0,1877	0,0004
838,59	0,2157	0,2443	0,1881	0,0004
1029,03	0,1758	0,1957	0,1885	0,0004
1224,35	0,1477	0,1617	0,1888	0,0003
1927,51	0,0938	0,1208	0,1898	0,0010
2402,78	0,0753	0,0846	0,1902	0,0004
2886,23	0,0627	0,0690	0,1906	0,0004
3490,08	0,0518	0,0572	0,1910	0,0004
4584,20	0,0395	0,0456	0,1915	0,0005
5477,15	0,0330	0,0362	0,1919	0,0004
6868,17	0,0263	0,0297	0,1922	0,0003
8517,63	0,0212	0,0238	0,1926	0,0004
10493,17	0,0172	0,0192	0,1928	0,0002
13183,16	0,0137	0,0155	0,1930	0,0002
16220,82	0,0112	0,0124	0,1931	0,0001
19958,05	0,0091	0,0101	0,1931	0,0000
24899,38	0,0073	0,0082	0,1931	0,0000
29877,17	0,0061	0,0067	0,1931	0,0000
35074,82	0,0052	0,0056	0,1931	0,0000
40028,89	0,0045	0,0048	0,1931	0,0000
45018,72	0,0040	0,0043	0,1931	0,0000
49965,71	0,0036	0,0038	0,1931	0,0000
54840,83	0,0033	0,0035	0,1931	0,0000
60080,25	0,0030	0,0032	0,1931	0,0000

9/4 Rejeito Flotação				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,76	238,3428	238,3428	0,0000	0,0000
1,80	100,6377	169,4903	0,0047	0,0047
2,32	78,0801	89,3589	0,0071	0,0024
3,30	54,8783	66,4792	0,0106	0,0035
4,28	42,2819	48,5801	0,0138	0,0032
5,78	31,2918	36,7869	0,0212	0,0074
7,28	24,8371	28,0644	0,0320	0,0108
8,76	20,6542	22,7456	0,0474	0,0154
10,73	16,8628	18,7585	0,0889	0,0415
13,23	13,6659	15,2644	0,1628	0,0739
16,23	11,1433	12,4046	0,2080	0,0452
20,14	8,9804	10,0618	0,2365	0,0285
25,42	7,1137	8,0470	0,2381	0,0016
30,55	5,9203	6,5170	0,2402	0,0021
39,84	4,5395	5,2299	0,2442	0,0040
49,84	3,6292	4,0844	0,2469	0,0027
60,25	3,0021	3,3157	0,2486	0,0017
75,14	2,4070	2,7046	0,2500	0,0014
89,93	2,0113	2,2091	0,2508	0,0008
115,12	1,5710	1,7911	0,2516	0,0008
141,27	1,2803	1,4257	0,2521	0,0005
176,13	1,0269	1,1536	0,2526	0,0005
220,34	0,8208	0,9238	0,2529	0,0003
271,53	0,6661	0,7435	0,2532	0,0003
329,31	0,5492	0,6077	0,2534	0,0002
423,69	0,4269	0,4881	0,2536	0,0002
538,95	0,3356	0,3812	0,2539	0,0003
660,10	0,2740	0,3048	0,2540	0,0001
827,43	0,2186	0,2463	0,2542	0,0002
1012,15	0,1787	0,1986	0,2543	0,0001
1214,78	0,1489	0,1638	0,2545	0,0002
1911,62	0,0946	0,1217	0,2548	0,0003
2478,47	0,0730	0,8380	0,2549	0,0001
2952,16	0,0613	0,0671	0,2550	0,0001
3490,44	0,0518	0,0565	0,2551	0,0001
4496,22	0,0402	0,0460	0,2551	0,0000
5477,10	0,0330	0,0366	0,2551	0,0000
6867,77	0,0263	0,0297	0,2552	0,0001
8538,83	0,0212	0,0238	0,2552	0,0000
10512,25	0,0172	0,0192	0,2552	0,0000
13175,33	0,0137	0,0155	0,2552	0,0000
16253,70	0,0111	0,0124	0,2552	0,0000
20015,02	0,0090	0,0101	0,2552	0,0000
24967,67	0,0072	0,0081	0,2552	0,0000
29861,20	0,0061	0,0067	0,2552	0,0000
35068,41	0,0052	0,0056	0,2552	0,0000
40100,37	0,0045	0,0048	0,2552	0,0000
44936,19	0,0040	0,0043	0,2552	0,0000
49902,66	0,0036	0,0038	0,2552	0,0000
54877,97	0,0033	0,0035	0,2552	0,0000
59769,73	0,0030	0,0032	0,2552	0,0000

5/4 Produto de moagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,77	233,7679	233,7679	0,0000	0,0000
1,79	100,9187	167,3433	0,0020	0,0020
2,33	77,7550	89,3368	0,0032	0,0012
3,28	55,1538	66,4544	0,0051	0,0019
4,29	42,1912	48,6725	0,0067	0,0016
5,75	31,4689	36,8300	0,0089	0,0022
7,29	24,8219	28,1454	0,0109	0,0020
8,74	20,6838	22,7528	0,0127	0,0018
10,73	16,8523	18,7680	0,0184	0,0057
13,20	13,7044	15,2783	0,0516	0,0332
16,18	11,1768	12,4406	0,0954	0,0438
20,21	8,9488	10,0628	0,1327	0,0373
25,71	7,0340	7,9914	0,1364	0,0037
30,42	5,9457	6,4898	0,1411	0,0047
40,11	4,5095	5,2276	0,1473	0,0062
50,09	3,6107	4,0601	0,1513	0,0040
60,39	2,9949	3,3028	0,1544	0,0031
76,01	2,3795	2,6872	0,1573	0,0029
90,28	2,0033	2,1914	0,1593	0,0020
115,50	1,5659	1,7846	0,1618	0,0025
139,99	1,2920	1,4289	0,1636	0,0018
174,82	1,0346	1,1633	0,1653	0,0017
219,79	0,8229	0,9287	0,1669	0,0016
269,56	0,6710	0,7469	0,1682	0,0013
329,34	0,5492	0,6101	0,1692	0,0010
421,00	0,4296	0,4894	0,1705	0,0013
526,23	0,3437	0,3867	0,1713	0,0008
672,07	0,2691	0,3064	0,1723	0,0010
800,07	0,2261	0,2476	0,1729	0,0006
989,59	0,1828	0,2044	0,1736	0,0007
1230,58	0,1470	0,1649	0,1742	0,0006
1893,31	0,0955	0,1213	0,1754	0,0012
2407,82	0,0751	0,0853	0,1761	0,0007
2887,19	0,0626	0,0689	0,1765	0,0004
3491,89	0,0518	0,0572	0,1769	0,0004
4571,48	0,0396	0,0457	0,1775	0,0006
5472,73	0,0330	0,0363	0,1779	0,0004
6866,22	0,0263	0,0297	0,1785	0,0006
8523,48	0,0212	0,0238	0,1788	0,0003
10473,17	0,0173	0,0192	0,1792	0,0004
13147,58	0,0138	0,0155	0,1796	0,0004
16223,11	0,0111	0,0125	0,1799	0,0003
20012,04	0,0090	0,0101	0,1802	0,0003
24913,36	0,0073	0,0081	0,1805	0,0003
29904,25	0,0060	0,0067	0,1805	0,0000
35087,03	0,0052	0,0056	0,1807	0,0002
40138,81	0,0045	0,0048	0,1809	0,0002
45108,45	0,0040	0,0043	0,1810	0,0001
50024,29	0,0036	0,0038	0,1810	0,0000
54937,29	0,0033	0,0035	0,1810	0,0000
59737,71	0,0030	0,0032	0,1810	0,0000

5/4 Overflow Deslamagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,79	229,8123	229,8123	0,0000	0,0000
1,83	98,7659	164,2891	0,0245	0,0245
2,30	78,5536	88,6598	0,0371	0,0126
3,29	55,0049	66,7793	0,0577	0,0206
4,28	42,2963	48,6506	0,0716	0,0139
5,78	31,2656	36,7809	0,0844	0,0128
7,29	24,7983	28,0320	0,0939	0,0095
8,72	20,7360	22,7672	0,1016	0,0077
10,72	16,8646	18,8003	0,1102	0,0086
13,19	13,7081	15,2863	0,1196	0,0094
16,17	11,1821	12,4451	0,1290	0,0094
20,20	8,9532	10,0677	0,1390	0,0100
25,65	7,0511	8,0022	0,1392	0,0002
30,27	5,9760	6,5135	0,1396	0,0004
40,61	4,4535	5,2147	0,1405	0,0009
50,37	3,5906	4,0220	0,1435	0,0030
60,32	2,9983	3,2944	0,1505	0,0070
74,78	2,4184	2,7084	0,1591	0,0086
89,64	2,0177	2,2181	0,1674	0,0083
115,49	1,5660	1,7919	0,1828	0,0154
139,65	1,2951	1,4306	0,2168	0,0340
174,33	1,0375	1,1663	0,2888	0,0720
220,28	0,8211	0,9293	0,3433	0,0545
270,39	0,6689	0,7450	0,3789	0,0356
331,28	0,5460	0,6074	0,4057	0,0268
420,55	0,4301	0,4880	0,4307	0,0250
533,34	0,3391	0,3846	0,4487	0,0180
641,00	0,2822	0,3106	0,4594	0,0107
838,46	0,2157	0,2489	0,4718	0,0124
1020,17	0,1773	0,1965	0,4787	0,0069
1219,14	0,1484	0,1628	0,4838	0,0051
1899,86	0,0952	0,1218	0,4933	0,0095
2496,49	0,0724	0,0838	0,4976	0,0043
2897,80	0,0624	0,0674	0,4995	0,0019
3513,34	0,0515	0,0569	0,5016	0,0021
4552,12	0,0397	0,0456	0,5041	0,0025
5476,76	0,0330	0,0364	0,5060	0,0019
6865,64	0,0263	0,0297	0,5075	0,0015
8534,23	0,0212	0,0238	0,5085	0,0010
10487,81	0,0172	0,0192	0,5096	0,0011
13157,97	0,0137	0,0155	0,5106	0,0010
16251,20	0,0111	0,0124	0,5114	0,0008
19997,64	0,0090	0,0101	0,5119	0,0005
24897,54	0,0073	0,0082	0,5124	0,0005
29902,24	0,0060	0,0067	0,5126	0,0002
35026,25	0,0052	0,0056	0,5128	0,0002
40136,09	0,0045	0,0048	0,5129	0,0001
45025,73	0,0040	0,0043	0,5130	0,0001
49982,63	0,0036	0,0038	0,5131	0,0001
54860,93	0,0033	0,0035	0,5131	0,0000
59729,68	0,0030	0,0032	0,5132	0,0001

5/4 Underflow de deslamagem				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,80	227,3178	227,3178	0,0000	0,0000
1,84	98,1559	162,7369	0,0036	0,0036
2,32	78,1073	88,1316	0,0052	0,0016
3,30	54,7415	66,4244	0,0079	0,0027
4,29	42,1245	48,4330	0,0101	0,0022
5,81	31,1474	36,6360	0,0131	0,0030
7,24	24,9777	28,0625	0,0275	0,0144
8,75	20,6639	22,8208	0,0573	0,0298
10,71	16,8951	18,7795	0,0872	0,0299
13,20	13,6973	15,2962	0,1304	0,0432
16,19	11,1698	12,4336	0,1713	0,0409
20,15	8,9768	10,0733	0,2079	0,0366
25,39	7,1230	8,0499	0,2082	0,0003
30,11	6,0063	6,5646	0,2087	0,0005
40,17	4,5021	5,2542	0,2100	0,0013
50,44	3,5859	4,0440	0,2116	0,0016
60,60	2,9847	3,2853	0,2127	0,0011
75,83	2,3850	2,6849	0,2141	0,0014
90,26	2,0039	2,1944	0,2148	0,0007
114,63	1,5778	1,7908	0,2154	0,0006
140,73	1,2852	1,4315	0,2160	0,0006
174,47	1,0366	1,1609	0,2166	0,0006
219,80	0,8229	0,9297	0,2171	0,0005
268,95	0,6725	0,7477	0,2176	0,0005
332,75	0,5435	0,6080	0,2180	0,0004
421,81	0,4288	0,4862	0,2185	0,0005
522,15	0,3464	0,3876	0,2188	0,0003
681,41	0,2654	0,3059	0,2194	0,0006
811,34	0,2229	0,2442	0,2197	0,0003
992,40	0,1822	0,2026	0,2200	0,0003
1243,23	0,1455	0,1639	0,2205	0,0005
1896,20	0,0954	0,1204	0,2213	0,0008
2495,74	0,0725	0,0839	0,2218	0,0005
2885,58	0,0627	0,0676	0,2221	0,0003
3525,66	0,0513	0,0570	0,2224	0,0003
4608,79	0,0392	0,0453	0,2230	0,0006
5481,46	0,0330	0,0361	0,2234	0,0004
6383,45	0,0263	0,0296	0,2240	0,0006
8520,17	0,0212	0,0238	0,2243	0,0003
10484,74	0,0173	0,0192	0,2245	0,0002
13176,14	0,0137	0,0155	0,2247	0,0002
16222,29	0,0111	0,0124	0,2248	0,0001
19973,69	0,0091	0,0101	0,2248	0,0000
24889,53	0,0073	0,0082	0,2248	0,0000
29891,04	0,0061	0,0067	0,2248	0,0000
35038,77	0,0052	0,0056	0,2248	0,0000
40016,20	0,0045	0,0048	0,2248	0,0000
45084,63	0,0040	0,0043	0,2248	0,0000
49964,00	0,0036	0,0038	0,2248	0,0000
54767,60	0,0033	0,0035	0,2248	0,0000
59843,82	0,0030	0,0032	0,2248	0,0000

5/4 Concentrado de Flotação				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,73	249,0995	249,0995	0,0000	0,0000
1,75	103,0867	176,0931	0,0040	0,0040
2,27	79,5972	91,3420	0,0061	0,0021
3,25	55,6400	67,6186	0,0098	0,0037
4,26	42,4888	49,0644	0,0129	0,0031
5,78	31,2940	36,8914	0,0176	0,0047
7,28	24,8467	28,0703	0,0213	0,0037
8,75	20,6586	22,7526	0,0250	0,0037
10,75	16,8261	18,7423	0,0307	0,0057
13,21	13,6921	15,2591	0,0462	0,0155
16,15	11,1965	12,4443	0,0851	0,0389
20,14	8,9820	10,0892	0,1380	0,0529
24,93	7,2541	8,1181	0,1401	0,0021
30,56	5,9186	6,5864	0,1433	0,0032
40,59	4,4561	5,1873	0,1494	0,0061
50,18	3,6041	4,0301	0,1527	0,0033
60,01	3,0137	3,3089	0,1549	0,0022
74,94	2,4133	2,7135	0,1567	0,0018
90,59	1,9965	2,2049	0,1576	0,0009
116,48	1,5527	1,7746	0,1586	0,0010
139,97	1,2922	1,4225	0,1593	0,0007
174,63	1,0357	1,1639	0,1600	0,0007
219,27	0,8248	0,9303	0,1606	0,0006
268,75	0,6730	0,7489	0,1611	0,0005
334,39	0,5409	0,6069	0,1616	0,0005
426,49	0,4241	0,4825	0,1622	0,0006
532,18	0,3399	0,3820	0,1628	0,0006
686,87	0,2633	0,3016	0,1633	0,0005
827,20	0,2186	0,2410	0,1638	0,0005
982,18	0,1841	0,2014	0,1642	0,0004
1219,04	0,1484	0,1663	0,1647	0,0005
1891,58	0,0956	0,1220	0,1657	0,0010
2398,05	0,0754	0,0855	0,1663	0,0006
2895,64	0,0625	0,0689	0,1669	0,0006
3525,91	0,0513	0,0569	0,1673	0,0004
4529,38	0,0399	0,0456	0,1680	0,0007
5480,07	0,0330	0,0365	0,1686	0,0006
6874,62	0,0263	0,0297	0,1692	0,0006
8508,51	0,0213	0,0238	0,1696	0,0004
10520,87	0,0172	0,0192	0,1700	0,0004
13178,64	0,0137	0,0155	0,1703	0,0003
16241,78	0,0111	0,0124	0,1706	0,0003
20016,90	0,0090	0,0101	0,1708	0,0002
24953,27	0,0072	0,0081	0,1709	0,0001
29875,12	0,0061	0,0067	0,1710	0,0001
35049,40	0,0052	0,0056	0,1711	0,0001
39978,69	0,0045	0,0048	0,1711	0,0000
45103,40	0,0040	0,0043	0,1711	0,0000
50030,92	0,0036	0,0038	0,1711	0,0000
54725,48	0,0033	0,0035	0,1711	0,0000
59888,43	0,0030	0,0032	0,1711	0,0000

5/4 Rejeito de Flotação				
Pressão (psia)	Diâmetro de Poro (µm)	Diâmetro Médio (µm)	Volume Acumulado (mL/g)	Volume Incremental (mL/g)
0,73	248,9058	248,9058	0,0000	0,0000
1,81	99,9777	174,4417	0,0063	0,0063
2,28	79,4927	89,7352	0,0091	0,0028
3,25	55,6565	67,5746	0,0136	0,0045
4,30	42,0313	48,8439	0,0172	0,0036
5,72	31,6216	36,8265	0,0212	0,0040
7,27	24,8909	28,2563	0,0289	0,0077
8,76	20,6493	22,7701	0,0499	0,0210
10,72	16,8773	18,7633	0,1085	0,0586
13,16	13,7418	15,3095	0,1863	0,0778
16,19	11,1685	12,4552	0,2370	0,0507
20,16	8,9715	10,0700	0,2688	0,0318
25,58	7,0714	8,0215	0,2718	0,0030
30,22	5,9846	6,5280	0,2752	0,0034
40,09	4,5120	5,2483	0,2813	0,0061
50,09	3,6107	4,0613	0,2849	0,0036
59,72	3,0286	3,3197	0,2869	0,0020
74,85	2,4163	2,7224	0,2885	0,0016
90,01	2,0094	2,2128	0,2894	0,0009
114,48	1,5799	1,7946	0,2903	0,0009
140,43	1,2880	1,4339	0,2908	0,0005
174,64	1,0357	1,1618	0,2912	0,0004
220,17	0,8215	0,9286	0,2916	0,0004
269,56	0,6709	0,7462	0,2919	0,0003
329,44	0,5490	0,6100	0,2921	0,0002
419,79	0,4308	0,4899	0,2924	0,0003
523,93	0,3452	0,3880	0,2926	0,0002
680,82	0,2657	0,3054	0,2929	0,0003
815,10	0,2219	0,2438	0,2930	0,0001
995,20	0,1817	0,2018	0,2932	0,0002
1241,70	0,1457	0,1637	0,2933	0,0001
1892,98	0,0955	0,1206	0,2936	0,0003
2461,34	0,0735	0,0845	0,2938	0,0002
2932,30	0,0617	0,0676	0,2938	0,0000
3484,45	0,0519	0,0568	0,2939	0,0001
4592,16	0,0394	0,0456	0,2940	0,0001
5472,99	0,0330	0,0362	0,2940	0,0000
6866,13	0,0263	0,0297	0,2940	0,0000
8542,15	0,0212	0,0238	0,2940	0,0000
10485,83	0,0172	0,0192	0,2940	0,0000
13171,57	0,0137	0,0155	0,2940	0,0000
16227,99	0,0111	0,0124	0,2940	0,0000
19971,60	0,0091	0,0101	0,2940	0,0000
24902,66	0,0073	0,0082	0,2940	0,0000
29874,79	0,0061	0,0067	0,2940	0,0000
34926,23	0,0052	0,0056	0,2940	0,0000
39922,43	0,0045	0,0049	0,2940	0,0000
44973,86	0,0040	0,0043	0,2940	0,0000
50063,17	0,0036	0,0038	0,2940	0,0000
54840,93	0,0033	0,0035	0,2940	0,0000
59885,99	0,0030	0,0032	0,2940	0,0000

A.5 – Tabelas de PACG (BJH)

5/35 Produto de Moagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,021250	0,008405
0,023680	0,149826
0,046195	0,163284
0,147738	0,180700
0,199598	0,188947
0,251749	0,193947
0,303012	0,198482
0,324484	0,199719
0,415916	0,205929
0,506887	0,211412
0,595214	0,230029
0,679823	0,257545
0,760944	0,309200
0,850390	0,437651
0,942635	0,829155
0,980267	1,385030
0,959607	1,146238
0,869762	0,593590
0,779404	0,404616
0,687995	0,322454
0,591696	0,279190
0,503131	0,255382
0,411186	0,203943
0,318443	0,196532
0,226682	0,190383
0,142211	0,185032
0,044148	0,162420

5/35 Overflow Deslamagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,011856	2,546849
0,021736	2,792393
0,043503	3,100227
0,143696	3,969108
0,193157	4,324440
0,243629	4,671411
0,293765	5,012862
0,313907	5,149923
0,404543	5,761172
0,492076	6,388224
0,585783	7,187061
0,670513	8,088304
0,761172	9,536875
0,849570	12,086032
0,940168	19,699326
0,979917	32,013947
0,959529	27,819653
0,869591	14,730048
0,777776	10,767968
0,685456	8,837220
0,599684	7,721216
0,508083	6,831264
0,415372	5,815129
0,324155	5,179847
0,233045	4,578792
0,147924	3,994609
0,059387	3,260337

5/35 Underflow Deslamagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,021673	0,006746
0,023053	0,047584
0,042189	0,073608
0,144751	0,093675
0,198516	0,100060
0,250832	0,105649
0,301929	0,110800
0,324261	0,111019
0,416174	0,118949
0,507037	0,127026
0,595347	0,138506
0,684033	0,153728
0,768870	0,182089
0,855762	0,245320
0,945090	0,419841
0,981492	0,648956
0,959696	0,546915
0,862846	0,313376
0,777112	0,235015
0,679494	0,191358
0,590295	0,171295
0,499785	0,155331
0,415860	0,118918
0,321754	0,108918
0,229013	0,101227
0,144153	0,093264
0,043944	0,071902

5/35 Concentrado de Flotação	
P/P₀	Volume adsorvido (cm³/g)
0,017125	0,018223
0,020227	0,131800
0,040981	0,151201
0,144802	0,195858
0,194951	0,210290
0,244694	0,225507
0,295103	0,239321
0,317957	0,245642
0,405189	0,268722
0,493088	0,294250
0,586048	0,326585
0,678320	0,369126
0,763492	0,433340
0,854814	0,562106
0,942015	0,880093
0,979887	1,279204
0,958634	1,119748
0,863108	0,724599
0,776634	0,572549
0,683528	0,479795
0,594787	0,424297
0,502638	0,379400
0,416570	0,274877
0,329185	0,247943
0,230993	0,220990
0,140521	0,194224
0,051780	0,155883

5/35 Rejeito Flotação	
P/P_0	Volume adsorvido (cm^3/g)
0,031633	0,021314
0,053168	0,029166
0,154466	0,033159
0,206264	0,031282
0,257181	0,030935
0,307746	0,029212
0,327772	0,028725
0,419080	0,029151
0,511161	0,026561
0,601719	0,026895
0,690753	0,031344
0,780675	0,037270
0,865453	0,067340
0,942268	0,156204
0,981465	0,335369
0,959157	0,238600
0,865177	0,085251
0,774596	0,049282
0,679867	0,038692
0,585749	0,034478
0,492642	0,035660
0,402070	0,031228
0,310915	0,030732
0,219776	0,033380
0,138359	0,034271
0,041440	0,027769

5/14 Produto de Moagem	
P/P_0	Volume adsorvido (cm^3/g)
0,013357	0,503601
0,020427	0,536605
0,041689	0,594673
0,143646	0,757514
0,191423	0,820828
0,240626	0,884006
0,290075	0,949542
0,310271	0,974621
0,401278	1,091507
0,498834	1,230690
0,588039	1,384088
0,675550	1,576908
0,765476	1,887015
0,853332	2,442008
0,941042	3,950647
0,980891	6,059693
0,959751	5,279977
0,867862	3,118911
0,777906	2,307045
0,689536	1,912653
0,594288	1,642576
0,502928	1,458229
0,413807	1,112100
0,326028	0,989770
0,235358	0,876425
0,149542	0,764875
0,056242	0,620434

5/14 Overflow Deslamagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,010287	2,660871
0,021228	2,991078
0,041987	3,335074
0,140633	4,286581
0,191338	4,690422
0,242334	5,067770
0,291508	5,441730
0,311397	5,587355
0,400934	6,270825
0,493032	7,040000
0,584131	7,925329
0,671667	9,023561
0,760704	10,678366
0,852187	13,746391
0,940038	20,913944
0,980179	30,077516
0,959681	27,429153
0,869560	16,803116
0,779239	12,281283
0,689079	9,989103
0,596195	8,515465
0,503912	7,498218
0,416337	6,415052
0,328032	5,705934
0,236710	5,025572
0,143457	4,307904
0,059291	3,543731

5/14 Underflow Deslamagem	
P/P_0	Volume adsorvido (cm^3/g)
0,011648	0,035137
0,020544	0,295912
0,044409	0,335926
0,142800	0,430318
0,195213	0,471442
0,246457	0,510972
0,296956	0,550544
0,316377	0,565160
0,402543	0,629478
0,495505	0,706166
0,584631	0,792440
0,673135	0,905557
0,760446	1,071823
0,850018	1,369328
0,940051	2,129838
0,979924	3,070658
0,959342	2,765220
0,866848	1,780080
0,779298	1,349785
0,685775	1,110665
0,590013	0,958141
0,504493	0,857151
0,410708	0,638418
0,326587	0,571192
0,239684	0,504180
0,146221	0,432472
0,050445	0,340165

5/14 Concentrado de Flotação	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,009778	0,040258
0,023829	0,407051
0,044861	0,450988
0,145889	0,577707
0,194685	0,625923
0,243143	0,674946
0,292954	0,723355
0,312486	0,742545
0,403406	0,833036
0,492958	0,927345
0,580496	1,035464
0,676766	1,193504
0,764520	1,408325
0,853710	1,808683
0,940733	2,797049
0,980812	4,091073
0,959166	3,621736
0,869107	2,350351
0,774443	1,786445
0,682631	1,503039
0,595232	1,325158
0,500338	1,179003
0,415682	0,850417
0,324893	0,751883
0,232989	0,665111
0,147595	0,579229
0,055514	0,466255

5/14 Rejeito Flotação	
P/P₀	Volume adsorvido (cm³/g)
0,019256	0,023583
0,026378	0,160516
0,047759	0,179894
0,142971	0,227553
0,195948	0,243469
0,247085	0,263254
0,298183	0,281627
0,320465	0,289356
0,410534	0,319005
0,498769	0,352482
0,586936	0,393800
0,673337	0,444404
0,763872	0,542461
0,851320	0,730581
0,939915	1,207324
0,980972	1,823555
0,959064	1,576879
0,863065	0,903798
0,768396	0,626704
0,684012	0,508770
0,590156	0,434591
0,504156	0,387893
0,411741	0,316580
0,322345	0,286873
0,232856	0,257171
0,138027	0,225055
0,048905	0,177479

9/4 Produto de Moagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,013507	0,373397
0,022728	0,398847
0,040865	0,429145
0,142424	0,535454
0,196331	0,577102
0,241673	0,610314
0,296579	0,648447
0,316699	0,663721
0,405643	0,725306
0,494504	0,789578
0,580955	0,862711
0,675124	0,958829
0,761971	1,090575
0,853075	1,335088
0,942210	1,959511
0,980222	2,890514
0,959691	2,487693
0,865041	1,646462
0,776676	1,364591
0,681088	1,183879
0,593257	1,070037
0,508644	0,982603
0,409098	0,734189
0,323479	0,667810
0,235373	0,604799
0,142394	0,535131
0,058414	0,450386

9/4 Overflow Deslamagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,010082	1,363960
0,022127	1,574613
0,041311	1,738999
0,148157	2,245923
0,194204	2,415756
0,243004	2,584018
0,292922	2,752390
0,315041	2,836514
0,402194	3,134376
0,491932	3,461046
0,585837	3,866746
0,671720	4,319219
0,763709	5,035156
0,850299	6,176530
0,940759	9,098929
0,980374	13,276540
0,959342	11,977026
0,869042	7,397257
0,777159	5,744688
0,686266	4,844184
0,599326	4,278252
0,508326	3,829333
0,418732	3,243719
0,329526	2,891736
0,238176	2,572875
0,145366	2,233500
0,057727	1,822369

9/4 Underflow Deslamagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,018715	0,017094
0,024322	0,046776
0,040183	0,214144
0,141033	0,393083
0,194846	0,434983
0,242544	0,461131
0,291412	0,487427
0,315241	0,496572
0,401492	0,537682
0,495380	0,582129
0,581046	0,624022
0,673058	0,673387
0,764331	0,737385
0,854289	0,921052
0,940563	1,127381
0,981938	1,316649
0,955816	1,238909
0,868650	1,049434
0,776477	0,919000
0,688927	0,835071
0,596876	0,768217
0,503811	0,711095
0,415145	0,588448
0,323049	0,535845
0,232091	0,484807
0,145417	0,433467
0,058159	0,363074

9/4 Concentrado Flotação	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,011967	0,429528
0,024551	0,469239
0,044986	0,512679
0,145163	0,641130
0,194303	0,688659
0,243603	0,732801
0,293947	0,776692
0,313787	0,792593
0,404978	0,867979
0,495186	0,945283
0,582597	1,032037
0,680236	1,149262
0,763942	1,296474
0,854790	1,561562
0,940973	2,150641
0,979793	2,946191
0,960029	2,657056
0,868533	1,893036
0,777723	1,591629
0,687789	1,407575
0,591217	1,264664
0,504767	1,165126
0,412966	0,881495
0,323224	0,797339
0,232581	0,721309
0,146543	0,642371
0,055466	0,526160

9/4 Rejeito Flotação	
P/P_0	Volume adsorvido (cm^3/g)
0,020116	0,015439
0,047446	0,116806
0,144852	0,147144
0,198010	0,156977
0,249981	0,165926
0,300580	0,175588
0,322829	0,178234
0,413783	0,193081
0,502818	0,209936
0,591030	0,231537
0,679241	0,257294
0,764468	0,301897
0,853380	0,391307
0,943550	0,620860
0,982206	0,978357
0,958250	0,794829
0,865407	0,505069
0,776434	0,396887
0,682623	0,334834
0,595668	0,297000
0,505377	0,267123
0,414073	0,193921
0,321991	0,177839
0,230596	0,162261
0,147837	0,147587
0,048642	0,115310

5/4 Produto de Moagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,011316	1,574301
0,021558	1,718392
0,040560	1,915877
0,144517	2,560737
0,192382	2,744436
0,244486	2,903091
0,293737	3,020940
0,315767	3,070688
0,400509	3,221926
0,499391	3,379510
0,585335	3,512307
0,671714	3,662183
0,765093	3,876732
0,855170	4,220392
0,940209	5,034926
0,980290	6,478195
0,958313	5,814096
0,865694	4,650344
0,773783	4,220466
0,688219	3,987525
0,590518	3,788601
0,505189	3,644919
0,419313	3,298120
0,325721	3,090295
0,236610	2,879415
0,147858	2,578078
0,056723	2,047750

5/4 Overflow Deslamagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,010644	6,143209
0,021076	6,760530
0,041245	7,629026
0,142162	9,886548
0,193937	10,612803
0,244381	11,159556
0,293552	11,626578
0,311323	11,784876
0,401268	12,443663
0,494472	13,092905
0,584835	13,737358
0,671460	14,426697
0,763750	15,420713
0,850863	16,820986
0,940419	20,240711
0,980339	24,908035
0,959492	23,417795
0,868725	18,388924
0,779199	16,456326
0,687686	15,302479
0,593881	14,452335
0,503784	13,790772
0,416306	12,750942
0,323582	11,934531
0,233926	11,120275
0,149487	10,085748
0,057951	8,191230

5/4 Underflow Deslamagem	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,010386	1,368021
0,022177	1,525505
0,040544	1,701266
0,144051	2,272738
0,190061	2,425511
0,242236	2,556144
0,295072	2,662400
0,313309	2,694177
0,405276	2,825553
0,489977	2,930477
0,538577	3,041011
0,673722	3,160619
0,760397	3,313406
0,850633	3,565827
0,941484	4,246693
0,980289	5,361110
0,958028	4,860033
0,866926	3,977419
0,774936	3,643990
0,689051	3,455583
0,594647	3,305735
0,509536	3,191603
0,413506	2,866402
0,325692	2,712697
0,238205	2,549231
0,146420	2,281802
0,057945	1,826428

5/4 Concentrado de Flotação	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,010318	1,645075
0,020437	1,816738
0,042825	2,078822
0,144912	2,753751
0,193330	2,944743
0,241330	3,090810
0,293497	3,217862
0,311290	3,256821
0,400713	3,416993
0,492871	3,555306
0,583825	3,687989
0,671319	3,828104
0,761229	4,013373
0,857136	4,338559
0,941484	5,033804
0,980689	6,007278
0,957120	5,586329
0,866265	4,712491
0,772119	4,342155
0,688831	4,143907
0,597168	3,976221
0,504766	3,833154
0,415481	3,475852
0,329190	3,295296
0,235546	3,076467
0,149271	2,773357
0,055749	2,190454

5/4 Rejeito de Flotação	
P/P ₀	Volume adsorvido (cm ³ /g)
0,011577	0,071872
0,020708	0,291069
0,041417	0,329966
0,144745	0,423400
0,196220	0,447403
0,248089	0,463791
0,299943	0,474347
0,322505	0,479278
0,414827	0,490492
0,506502	0,497625
0,597152	0,503685
0,685933	0,517906
0,774282	0,542314
0,858247	0,592917
0,941361	0,722050
0,979944	0,905126
0,955855	0,812478
0,864719	0,645152
0,777214	0,588075
0,684657	0,557096
0,589981	0,543223
0,496345	0,534554
0,410094	0,492966
0,318137	0,478088
0,228171	0,456840
0,145740	0,424011
0,051839	0,338567