

CAPÍTULO 2 – DETERMINAÇÃO DAS DENSIDADES DE SÓLIDOS E DE POLPA

João Alves Sampaio

Engenheiro de Minas/UFPE, Mestre e Doutor em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE-UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCT

Fernanda Arruda Nogueira Gomes da Silva

Licenciada em Química - Instituto de Química/UFRJ, Mestre em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE-UFRJ
Doutoranda em Química Inorgânica - Instituto de Química/UFRJ

1. INTRODUÇÃO

As propriedades das substâncias podem ser classificadas como intensivas e extensivas. As propriedades intensivas não dependem do tamanho da amostra, enquanto as propriedades extensivas dependem do tamanho da amostra. As propriedades intensivas são mais úteis, já que uma substância exibirá sempre a mesma propriedade intensiva, independentemente da quantidade que estiver examinada (Brady e Humiston, 1986). A densidade de uma substância é uma propriedade intensiva, obtida pela razão entre duas propriedades extensivas (Atkins e Jones, 2001). Esta grandeza é definida como a razão entre a massa de uma determinada substância, que, no processamento mineral, pode ser uma amostra de rocha, minério ou mineral, e o seu volume (Atkins e Jones, 2001).

Ademais, a densidade é função dos raios dos átomos e íons que constituem os minerais, quer dizer, depende da forma como esses constituintes arranjam-se na estrutura cristalina dos minerais. Assim, o peso atômico do potássio é 1,7 vezes maior que o do sódio, e a densidade do KCl (1,98) é menor que a do NaCl (2,17). A diferença dos raios atômicos entre o K^+ (1,33) e Na^+ (0,98) justifica essa diferença e explica o pronunciado efeito sobre o volume dessas substâncias cristalinas. Entretanto, as variações periódicas da densidade com o número atômico não se repetem igualmente com a periodicidade dos números atômicos. Essa discrepância pode esclarecer porque a faixa de valores da densidade dos minerais varia desde pouco mais de 1,0 até 23,0, valores que são encontrados em alguns minerais, como aqueles do grupo do ósmio.

Matematicamente, a densidade (d) é a razão entre a massa de uma substância (m) e o seu volume (V) (Atkins e Jones, 2001).

$$d = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad \text{ou} \quad d = \frac{m}{V} \quad [1]$$

Em tratamento de minérios, o manuseio do minério se dá na forma de grãos e em grandes volumes. Há, portanto, a necessidade de se conhecer a densidade real e a densidade aparente:

- (i) densidade **real** ou **relativa** considera apenas o volume do conjunto de grãos que compõe a amostra, sem considerar o espaço vazio existente entre os grãos;
- (ii) densidade **aparente** considera o volume total da amostra, inclusive o espaço vazio entre os grãos que a compõem.

Portanto, a densidade real ou relativa de uma determinada amostra de um minério sempre será maior que sua densidade aparente.

A densidade relativa de uma substância pode ser obtida pela razão entre a sua densidade e a densidade de uma substância estabelecida como padrão (Andrade *et al.*, 2006.). O padrão usualmente escolhido é a água, cujo valor da densidade é $1,00000 \text{ g/cm}^3$ a 4°C . Assim, quando se afirma que um mineral tem densidade igual a 3,18, significa dizer que esse mineral é 3,18 vezes mais denso que a água.

A densidade aparente de uma substância é aquela determinada no ar, sem referenciar as flutuações do mesmo. Já a densidade real de uma substância é medida no vácuo. A densidade aparente da água a 20°C é $0,99715 \text{ g/cm}^3$ e a densidade real na mesma temperatura é $0,99823 \text{ g/cm}^3$ (Salvagnini, 2006).

Doravante, o termo densidade refere-se à densidade relativa ou real, um número adimensional.

Cabe lembrar que as denominações em inglês *specific gravity* ou *relative density* correspondem em português, à **densidade relativa** ou simplesmente **densidade**, isto é, um número adimensional (Dana, 1969). Entretanto, o termo em inglês *density* corresponde, em português, ao peso específico, ou seja, o peso por unidade de volume (Dana, 1969).

A densidade dos minerais é uma propriedade empregada como ferramenta auxiliar na identificação dos mesmos, além de ser usada também na concentração de minerais por meio dos processos gravíticos. Neste caso, a

diferença de densidade dos minerais é o fator predominante, e está associada a outros, como forma e tamanho das partículas. A densidade relativa de um minério é usada também na determinação da densidade de polpas desses mesmos minérios. A densidade aparente é usada para determinar o volume do minério ou do produto de um processo (alimentação, rejeito, concentrado e outros), a ser acondicionado em silos, vagões de trens, caçambas de caminhões, etc.

O método mais prático de se determinar, com precisão razoável, a densidade de uma rocha, de um minério ou de um mineral, é por meio da picnometria, que será discutido ao longo deste Capítulo, e as medidas de umidade, densidade, percentagem de sólidos referem-se à base seca em peso, salvo menção contrária.

A densidade de um sólido pode ser determinada pesando-o cuidadosamente e, em seguida, determinando-se seu volume. Se o sólido possui uma forma irregular, o que torna impossível medir suas dimensões, o seu volume pode ser determinado pelo método de deslocamento. Esse método consiste em determinar a massa da substância e transferi-la para um instrumento volumétrico graduado, parcialmente cheio com água (ou algum líquido no qual o sólido não flutue). O sólido deslocará um volume de líquido igual ao seu volume.

A densidade dos líquidos pode ser determinada analogamente à densidade dos sólidos, medindo-se a sua massa e determinando-se o seu volume. Entretanto, no caso dos líquidos, uma alteração relativamente pequena na temperatura pode afetar consideravelmente o valor da densidade. A determinação da densidade dos líquidos não é objeto deste capítulo.

2. MEDIDAS DE DENSIDADE DE SÓLIDOS

Determinação da Densidade Relativa de Sólidos (d_s)

Uma das técnicas utilizadas para medir a densidade de sólidos é o método do picnômetro. Um picnômetro consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar, conforme ilustrado na Figura 1.

O volume dos picnômetros varia de 25 a 250 mL ou mais, dependendo da sua aplicação. Os mais usados possuem capacidades entre 25 e 100 mL. A Figura 1 ilustra exemplos de três picnômetros de mesmo volume utilizados para medir densidade de sólidos, em particular, de rocha, minérios ou minerais.



Figura 1 – Picnômetros utilizados para determinação de densidade de sólidos nos laboratórios do CETEM.

A determinação da densidade de um mineral por meio da técnica do picnômetro exige também uma balança de precisão, com, no mínimo, duas casas decimais. Para assegurar que o procedimento foi utilizado corretamente, recomenda-se a determinação da densidade em duplicata e, para obter boa reprodutibilidade, deve-se:

- (i) molhar, com água ou outro líquido utilizado no experimento, as partículas dos sólidos que constituem a amostra; recomenda-se ferver a água que será adicionada ao picnômetro;
- (ii) verificar se não há bolhas de ar aderidas às partículas ou à superfície interna do picnômetro;
- (iii) agitar o picnômetro com água e amostra antes do aquecimento e após o resfriamento.

Neste trabalho foi utilizada uma amostra de caulim dos pegmatitos do Rio Grande do Norte, cuja densidade foi determinada pelo método picnométrico. Para calcular a densidade da amostra de caulim, foi utilizada uma amostra representativa da original, com base na Equação [2].

$$d_s = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad [2]$$

onde:

d_s densidade dos sólidos;

A_1 massa do picnômetro (obtida no procedimento (i), abaixo);

A_2 massa do picnômetro + amostra;

A_3 massa do picnômetro + amostra + água;

A_4 massa do picnômetro + água.

O procedimento a seguir, usado na quantificação da densidade de uma rocha, minério ou mineral, descreve, passo a passo, a determinação da densidade relativa (d_s) (Silva, 2007).

- (i) Pesar o picnômetro vazio, previamente limpo e seco, em estufa, a 100°C e resfriado em dessecador.
- (ii) Encher o picnômetro com água até transbordar, secar a água que molha a superfície externa do mesmo e, em seguida, pesar o picnômetro com água.
- (iii) A diferença entre os pesos do picnômetro com água e sem água é a massa de água utilizada. Sabendo o volume de água colocada no picnômetro pode-se determinar a densidade da água ou de outro líquido utilizado.
- (iv) Adiciona-se a amostra de caulim no picnômetro e, em seguida, pesa-se todo o conjunto, obtendo-se o valor de A_2 . A massa da amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com caulim e sem caulim (vazio), informação obtida no item (i).

- (v) A massa de água adicionada ao picnômetro com amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com caulim e água (A_3) e a massa do picnômetro com caulim (A_2).
- (vi) O volume de água adicionado é obtido pela relação entre a densidade da água (obtida em iii) e a massa de água adicionada no picnômetro (obtida em v).
- (vii) O volume do caulim é determinado pela diferença entre o volume total do picnômetro e o volume de água adicionada (obtida em vi).
- (viii) A densidade do caulim é obtida pela relação entre a massa de caulim (obtida em iv) e o volume de caulim (obtido em vii).

A seguir um exemplo prático da determinação da densidade relativa (d_r) de uma amostra de caulim, utilizando um picnômetro com volume de 100 mL.

$$d_s = \frac{66,4756 - 51,6191}{(153,0480 + 66,4756) - (51,6191 + 161,5161)} = 2,33 \text{ g/cm}^3$$

Determinação da Densidade Aparente (d_a)

A determinação da densidade aparente, em base seca, consiste na medida do volume de uma determinada amostra do minério e pesagem da mesma.

Nas operações de laboratório e/ou unidades piloto, a medida do volume da amostra pode ser feita com auxílio de uma proveta ou de um balde graduado, ou ainda de outros recipientes, também graduados. Já no campo, ou nas unidades industriais, é comum realizar esta medida com auxílio de um tambor graduado ou outro equipamento de volume conhecido; pode ser inclusive a concha de uma carregadeira frontal, ou ainda a medida do volume de uma pilha de minério, com auxílio de técnicas topográficas etc.

Nas medidas da densidade aparente, é indispensável o uso de uma balança confiável para pesagem da amostra, que nem sempre está disponível no campo, bem como os equipamentos usados nas medidas dos volumes das

amostras. Esses procedimentos poupam o pesquisador de surpresas desagradáveis durante a realização do trabalho de pesquisa.

Como exemplo (Figura 2) foram feitas três determinações da densidade aparente (d_a) de três amostras, dos seguintes materiais:

- (a) RCD – Resíduo da Construção e Demolição;
- (b) caulim;
- (c) minério de fosfato.

Inicialmente foram medidos os pesos e os volumes de cada amostra. Foi tomado o volume de 1.000 cm³ para todas as amostras, cujos valores encontram-se a seguir:

Amostra de RCD

Granulometria entre 12 e 5 mm.

Volume 1.000 cm³.

Massa 1.366,17 gr

$$d_a = m/V = 1366,17/1000 = 1,37 \text{ g/ cm}^3.$$

Amostra de minério de fosfato

Granulometria abaixo de 3,5 mm.

Volume 1.000 cm³.

Massa 1.526,85 gr

$$d_a = m/V = 1.526,85/1000 = 1,53 \text{ g/ cm}^3.$$

Amostra de caulim

Granulometria abaixo de 9 mm.

Volume 1.000 cm³.

Massa 1.169,06 gr

$$d_a = m/V = 1169,06/1000 = 1,17 \text{ g/ cm}^3.$$

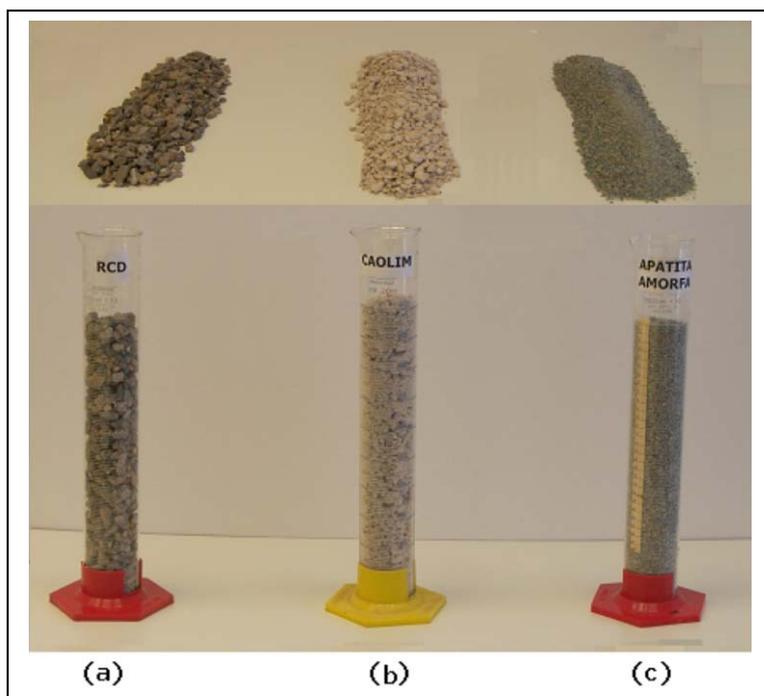


Figura 2 – Em (a), amostra de RCD; em (b), amostra de caulim e, em (c), amostra de minério de fosfato.

3. DETERMINAÇÃO DA UMIDADE, DENSIDADE DE POLPA (d_p) E PERCENTAGEM DE SÓLIDOS NA POLPA (%S).

No beneficiamento a úmido de minérios, há formação da polpa, que consiste na suspensão dos sólidos em água. Segundo Chaves (2002), há diversas vantagens de se tratar o minério por processos a úmido, dentre outras, destacam-se que a água:

- (i) funciona como meio de transporte e de separação;
- (ii) minimiza o calor gerado no processo, caso da moagem;
- (iii) impede a geração de poeiras nas diversas etapas do processo.

Quando o minério é manuseado, a água a ele associada pode ser quantificada de várias maneiras, pela: umidade, densidade de polpa ou ainda, percentagem de sólidos (%S).

Determinação da Umidade

A **umidade** é definida como o peso de água existente no minério, isto é, a água de superfície dividida pelo peso do minério seco. Quando o peso de água no minério atinge valores para os quais, a mistura água minério, torna-se uma suspensão, utiliza-se a percentagem de sólidos para o cálculo da água contida no minério, como será discutido posteriormente. Em tratamento de minérios, a **umidade** é sempre definida em base seca (bc) e em peso, salvo menção ao contrário (Chaves, 2002). O cálculo da umidade, expresso em (%), é feito com auxílio da Equação [3].

$$\text{umidade (\%)} = 100 \frac{(\text{massa úmida}) - (\text{massa seca})}{\text{massa úmida}} \quad [3]$$

Exemplo 1

Nas operações de unidade piloto, o operador pesou uma amostra molhada e, em seguida, após secagem, efetuou a segunda pesagem para tomada do peso seco. Verificou que o peso da amostra molhada foi 54 kg e o peso da amostra seca foi 51 kg. Pergunta-se qual o valor da umidade da amostra antes e depois da secagem?

No caso da amostra molhada, calcula-se a umidade em (%), segundo a Equação [3], isto é, a percentagem de água contida no minério:

$$\text{umidade (\%)} = 100 \frac{54 - 51}{54} = 5,56$$

Logo, o valor da umidade é de 5,56%, ou seja, para cada 100 kg da mistura minério água, 5,56 kg são de água.

No caso da amostra seca, considerando que o operador secou completamente a amostra, conclui-se que o valor da umidade é zero, pois não existe mais água de superfície na amostra.

Determinação da Densidade de Polpa (d_p)

Durante as operações de tratamento de minérios nas escalas de laboratório, piloto e industrial, há necessidade de se conhecer a **densidade da polpa (d_p)**, desde que essas operações sejam conduzidas a úmido. Trata-se de um parâmetro importante que o pesquisador, engenheiro e operador de unidades de tratamento de minérios deverão sempre controlar. Para a sua determinação, deve-se antes determinar, por picnometria, a densidade (d_r) dos sólidos (minério, concentrado, rejeito e outros) que compõem a polpa.

A Equação [4] expressa o valor da densidade de polpa (d_p) em função da massa total da polpa (m_p) e do volume total da polpa (v_p), ou seja:

$$d_p = \frac{m_p}{v_p} \quad [4]$$

Há disponível na literatura (Steffenson, 1985) uma tabela com os valores da densidade de polpa correspondentes a diferentes valores da densidade dos sólidos. Isto permite determinar a densidade de polpa, desde que se conheça a densidade dos sólidos, determinada por picnometria.

Determinação da Percentagem de Sólidos (%S)

A percentagem de sólidos é muito usada na prática de tratamento de minérios, para avaliar a quantidade de sólidos na polpa, a razão sólido/líquido, entre outros. Assim, a estabilidade da polpa, fator importante nos processos de beneficiamento de minérios, depende da: percentagem de sólidos; viscosidade da polpa; agitação, densidade dos sólidos, entre outras.

Nas operações de laboratório, utilizam-se percentagens de sólidos próximas àquelas praticadas nos circuitos pilotos e industriais. Como exemplo, ensaios de flotação em laboratório, na maioria dos casos, são realizados com percentagem de sólidos entre 15 e 35%, e este valor deve ser utilizado na etapa piloto ou industrial.

A expressão da Equação [5] permite calcular a percentagem de sólidos (%S) na polpa em função da densidade (d_s) dos sólidos e da densidade de polpa (d_p) na qual estão contidos esses sólidos (Wills, 1988). Assim, para a densidade da água igual a 1.000 kg/m³, tem-se:

$$(\%S) = 100 \frac{d_s (d_p - 1.000)}{d_p (d_s - 1.000)} \quad [5]$$

Nas operações contínuas em escala piloto e industrial é comum medir o fluxo de polpa (f_p) em m^3/h , a densidade de polpa (d_p) em kg/m^3 e a densidade dos sólidos (d_s) em kg/m^3 . Segundo Wills (1988), o fluxo de sólidos secos (f_s) ou massa de sólidos, em kg/h , pode ser calculado por meio da expressão da Equação [6].

$$(f_s) = \frac{(f_p)(d_s)(d_p - 1.000)}{(d_s - 1.000)} \text{ (kg/h)} \quad [6]$$

Determinação da Densidade de Polpa e da Percentagem de Sólidos (%S), por meio da Balança Marcy

A balança Marcy (Figura 3) é um equipamento prático e muito utilizado nas operações de usinas de beneficiamento de minérios, sendo utilizada para medição da densidade de polpa, de sólidos e de líquidos, com leituras rápidas, sem a necessidade de utilização de gráficos, ábacos ou a realização de cálculos matemáticos. Com este equipamento é possível obter leituras diretas das densidades de polpas e de líquidos com densidades de sólidos na faixa de 1,2 a 7,8.

O conjunto consiste de uma balança e um recipiente em aço inoxidável com 1.000 cm^3 de capacidade e 12 discos indicadores intercambiáveis (Tabela 1) com diferentes intervalos de leituras de densidade.

Exemplo 2

Numa operação, em usina piloto, tomou-se uma amostra (1 L em 7 s) do fluxo de polpa de quartzo. A densidade de polpa ($d_p = 1.400 \text{ kg/m}^3$) foi determinada por meio de uma balança calibrada. Calcular a percentagem de sólidos (%S) em peso e o fluxo de sólidos da polpa.

A densidade (d_s) do quartzo é 2.650 kg/m^3 e, de acordo com a Equação [5]:

$$(\%S) = 100 \frac{2.650(1.400 - 1.000)}{1.400(2.650 - 1.000)} = 45,9\%$$

Fluxo volumétrico da polpa (f_p) = $1/7 \text{ L/s} = 3.600/7000 = 0,51 \text{ m}^3/\text{h}$
 O fluxo de sólidos (f_s) pode ser calculado com auxílio da Equação [6].

$$(f_s) = \frac{(0,51)(2.650)(1.400 - 1.000)}{(2.650 - 1.000)} = 327,70 \text{ kg/h}$$

Os exemplos 1 e 2 ilustram, de forma clara, que as grandezas aqui discutidas são muito úteis nas operações de usinas pilotos e industriais.

Exemplo 3

O operador de uma unidade piloto precisa preparar uma polpa ($V = 100 \text{ L}$ e $d_p = 2,8$) de ferro/silício ($d_s = 6,8$). Quais as quantidades de ferro/silício e água que devem ser adicionadas ao recipiente para formar essa polpa?

$$v_p = 100 \text{ L} = 0,10 \text{ m}^3 \quad d_p = 2800 \text{ kg/m}^3$$

$$d_s = 6800 \text{ kg/m}^3$$

A massa da polpa (m_p) é dada pela Equação [4].

$$m_p = d_p \times v_p = 2800 \times 0,100 = 280 \text{ kg}$$

A percentagem de sólidos (%S) na polpa é dada pela Equação [5].

$$(\%S) = 100 \frac{6800(2800 - 1.000)}{2800(6800 - 1.000)} = 75,34\%$$

A massa de ferro/silício é calculada por:

$$M_{\text{Fe/Si}} = 280,00 \times 0,75 = 210 \text{ kg}$$

A massa (kg) de água é calculada por:

$$\text{Massa de água} = (\text{massa da polpa}) - (\text{massa de Fe/Si})$$

$$\text{Massa de água} = (280) - (210) = 70 \text{ kg} = 70 \text{ L.}$$

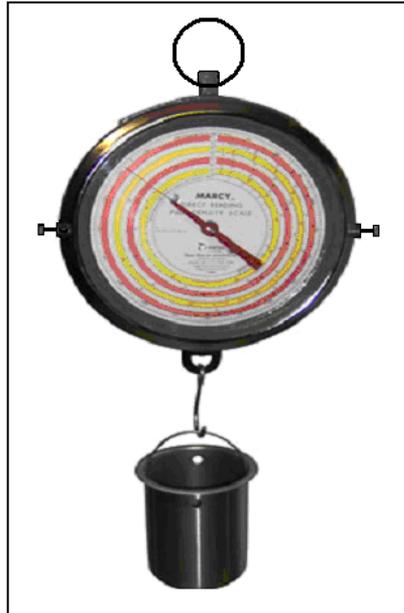


Figura 3 – Ilustração da balança Marcy com recipiente de aço inoxidável usados na determinação de densidade de polpas e da percentagem de sólidos.

Tabela 1 – Relação dos discos indicadores da densidade dos sólidos secos usados na balança Marcy.

ND	Densidades dos Sólidos Secos						
1	2,2	2,6	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4
2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
3	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
4	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,1
6	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6
7	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
8	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4
9	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
10	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8
11	5,6	5,8	6,0	6,2	6,7	6,6	6,8
12	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8

ND – Número do disco.

Calibração da Balança Marcy

A calibração da balança consiste em encher o recipiente de aço inoxidável com água limpa até o limite de 1.000 cm³. Esse limite de 1.000 cm³ é indicado pelo vazamento da água através dos furos laterais do recipiente. A seguir, o operador pendura o recipiente cheio de água na alça da balança, gira o parafuso de ajuste, localizado sobre a alça da balança, até que o ponteiro indicador esteja na posição vertical, isto é, indicando 1.000 no disco de leitura. Após este procedimento a balança estará calibrada.

Determinação da Densidade de Polpa

A princípio, operador enche o recipiente de aço inoxidável com a polpa de minério até o limite de 1.000 cm³, em seguida pendura o recipiente cheio de polpa na alça da balança e, então, ler a densidade de polpa na faixa externa do disco da balança.

Determinação da Percentagem de Sólidos na Polpa (%S)

Primeiro, o operador deve verificar a densidade relativa dos sólidos secos, para ler a %S, diretamente, na balança Marcy. Em seguida, seleciona o disco apropriado em função da densidade dos sólidos secos. Na manobra seguinte pendura o recipiente cheio de polpa na alça da balança. A percentagem de sólidos estará indicada à direita do número da densidade real nos anéis vermelhos, brancos e amarelos do disco.

Exemplo 4

Uma leitura de 44% sólidos e 2,2 de densidade real também indicará 39% sólidos com 2,6 de densidade real e 35% sólidos com 3,2 de densidade real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, J. C.; Custódio R. e Collins, C. H. www.chemkeys.com/bra/md/eddns-2/adddds-3/adddd-3.htm> acesso em: julho, 2006.
- Atkins, P. e Jones, L. Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente, Porto Alegre: Bookman, 2001, p.39-40.
- Brady, J. E. e Humiston, G. E. Química Geral, vol. 1, 2ª ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1986, p.14-17.
- Chaves, A. P. Noções básicas. In: Chaves, A. P. (Ed.). Teoria e Práticas do Tratamento de Minérios.v. 1, São Paulo: Signus Editora, 2002, p.1-78.
- Dana, J. D. Manual de Mineralogia, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1969.
- Salvagnini, W. www.hottopos.com.br/regeq3/densidad.htm> acesso em: julho, 2006.
- Silva, F. A. N. G. Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema – Seridó. 2007. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- Stephenson, W. B. Tables conversions and equivalents. In: Weiss, N. L. (Ed.). SME mineral processing handbook. vol. 2.. New York, 1985, p.37-9/37-26.
- Wills, B. A Mineral processing technology. Pergamon Press. Oxford, 1988, p.71-165.