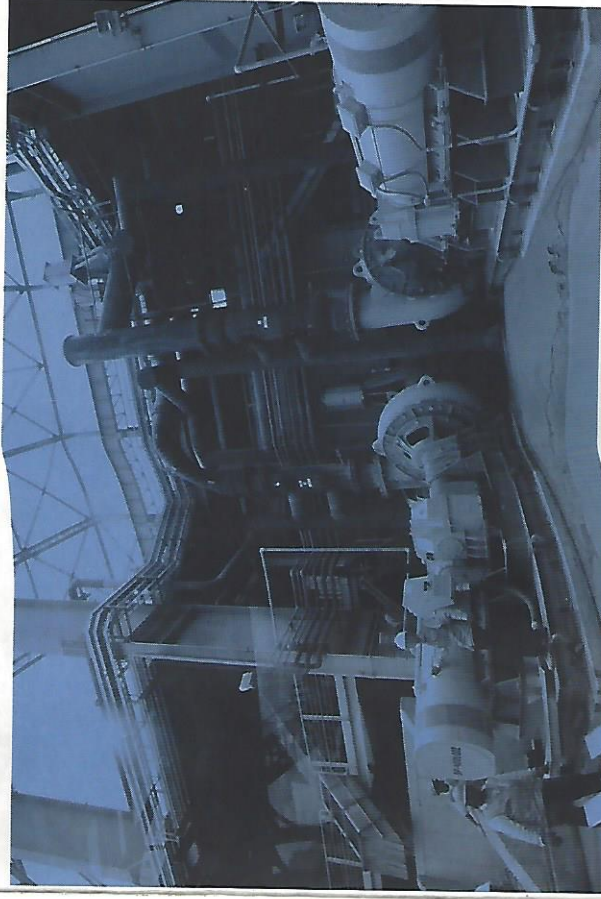


Teoria e Prática do
Tratamento de Minérios

Arthur Pinto Chaves
e colaboradores

Bombeamento de polpa e classificação



4ª edição | revista e ampliada

oficina de texto

3.4	Modelagem da partição de classificadores espirais	241
3.5	Projeto de instalações	244
3.6	Método empírico de Tarr	246
	Exercícios resolvidos	253
	Referências bibliográficas	280

4 BENEFICIAMENTO DE AREIA PARA USO EM CONSTRUÇÃO CIVIL 285

William Whitaker

Arthur Pinto Chaves

4.1	Conceito de "areia"	286
4.2	Operações de beneficiamento de areia	290
4.3	Equipamentos tradicionais	295
4.4	Equipamentos e técnicas recentes	296
	Referências bibliográficas	302

Noções básicas

Arthur Pinto Chaves

O objetivo da atividade mineira é a descoberta, a lavra e a concentração de minérios, ou seja, as atividades executadas dentro da mineração consistem em: descobrir os recursos minerais escondidos no subsolo, trazer o bem mineral do subsolo até a superfície para, finalmente, colocar esse bem mineral em condições de ser utilizado pelas indústrias metalúrgica, cerâmica ou química.

O universo do tratamento dos minerais é a terceira atividade, ou seja, o conjunto de operações unitárias de redução e separação de tamanhos, separação de espécies minerais e de sólidos e líquidos, bem como a arte de combiná-los em fluxogramas, de modo a obter concentrados e produtos aceitáveis pelo mercado.

O escopo das atividades do engenheiro tratamentista compreende, portanto:

- ◆ redução de tamanho das partículas;
- ◆ separação das partículas em classes de tamanhos;
- ◆ elevação dos teores de elementos úteis (concentração);
- ◆ eliminação de elementos indesejáveis;
- ◆ eliminação de propriedades indesejáveis;
- ◆ separações sólido-líquido.

A Engenharia de Minas envolve o manuseio (transporte, estocagem e disposição) de volumes enormes de minérios, concentrados, rejeitos e estéréis de mineração. Essas operações também fazem parte do escopo de nossa profissão.

Essas atividades e a sua ligação direta com as atividades profissionais são esquematizadas na Fig. 1.1. Os profissionais realmente capacitados e legalmente habilitados a cuidar de tratamento de minérios no Brasil são os engenheiros de minas e os metalurgistas. É importante chamar a atenção para o fato de que o perfil profissional dos engenheiros de minas e dos metalurgistas, tal como definido pela legislação brasileira, é diferente do perfil dos profissionais formados em outros países.

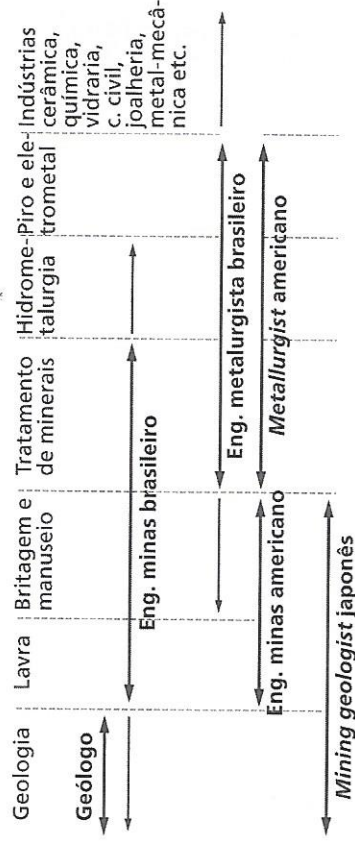


Fig. 1.1 Competência profissional em diferentes países

1.1 Objetivos do Tratamento de Minérios

1.1.1 Operações de concentração

Raramente as espécies minerais se encontram puras na natureza. As exceções são conhecidas: calcários e dolomitos, hematita e adubos naturais (guano). Outras se encontram num estado de pureza relativo, que permite a sua utilização ou transferência ao processo seguinte – químico ou cerâmico – sem maiores tratamentos. Este é o caso do petróleo, do sal (cloreto de sódio) e de argilas.

Em todos os outros casos, as espécies minerais encontram-se misturadas. Para aproveitar industrialmente alguma delas, portanto, é necessário separá-las das demais, o que consiste na concentração da espécie útil. Por exemplo:

- ◆ diamantes encontrados em cascalheiras, em teores da ordem de 5 K/m^3 (quilate/ m^3), exigem que se separem as gemas e os diamantes industriais dos seixos de cascalho e da areia. Ou seja, de cada metro cúbico (cerca de 1.600 kg), separa-se 1 g;
- ◆ ouro encontrado em leitos de rios – por exemplo, com teores de 2 g/t – requer sua separação da areia e de demais minerais pesados;
- ◆ minérios de cobre são lavrados até teores da ordem de 0,4% Cu. Entretanto, a metalurgia só é econômica a partir de teores de 32% Cu, de modo que se torna necessário concentrar esses minérios antes de enviá-los para a usina metalúrgica.

Dos exemplos acima, verifica-se que partimos sempre de uma concentração menor do elemento ou substância útil no minério até chegarmos a uma concentração mais elevada dele no concentrado. Essa concentração pode ser a máxima possível – caso dos diamantes ou do ouro –, porém, mais frequentemente, é a máxima concentração econômica.

Simplificadamente, essas operações podem ser representadas conforme mostra a Fig. 1.2. Por exemplo:

- ◆ a partir de uma alimentação composta de duas espécies minerais, A e B, totalmente liberadas, sendo A o mineral útil e B o mineral de ganga (o conjunto dos minerais sem interesse);
- ◆ separam-se numa fração (concentrado) as partículas de A;
- ◆ pretende-se, também, separar numa outra fração (rejeito) as partículas de B, de tal maneira que:
- ◆ o concentrado tenha o mínimo de contaminação de partículas do mineral de ganga;
- ◆ o rejeito arraste o mínimo de partículas do mineral útil.

Isso é feito por meio de operações unitárias, que tiram partido das diferenças entre propriedades físicas características e individualizadas de cada espécie mineral, tais como cor, forma, densidade, propriedades magnéticas, propriedades elétricas, propriedades da superfície das partículas etc.

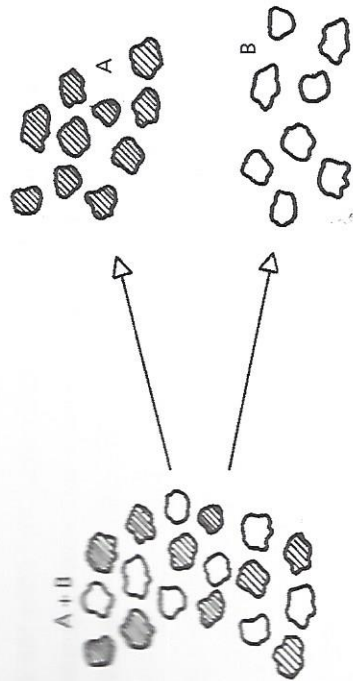


Fig. 1.2 Concentração de minérios

Uma visão extremamente simplificada de como funciona uma operação unitária qualquer é dada pela Fig. 1.3:

- ◆ as partículas das espécies A e B da alimentação são dispersas num meio fluido conveniente, que é a água ou o ar (quase sempre a água);
- ◆ o meio é colocado em movimento e arrasta as partículas de A e de B;
- ◆ o processo de separação escolhido faz com que as partículas da espécie que se quer separar adquiram velocidades diferentes das demais partículas ou do meio fluido.

A escolha da espécie a ser separada depende da sua abundância relativa. Na América do Norte, flota-se a hematita dos minérios de ferro; no Brasil, porém, é mais interessante flotar a sílica (flotação reversa).

O uso das diferentes propriedades físicas para efetuar a separação é que define os diferentes processos de concentração de minérios, como:

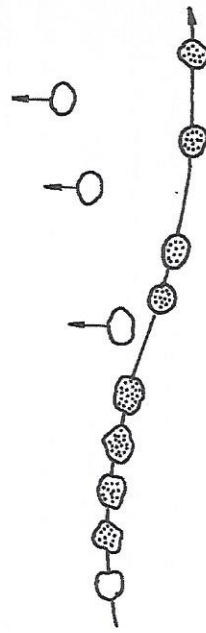


Fig. 1.3 Mecanismo de concentração de espécies minerais

- ◆ **catação:** consiste na separação das diferentes espécies mediante a escolha pelas diferenças de cor, forma ou textura. Por exemplo, o minério de manganês de Itaberaí (GO) era lavado e colocado num transportador de correia largo e lento ao lado do qual mulheres apanhavam as partículas brancas de quartzo e deixavam passar as partículas pretas de pirolusita;
- ◆ **separação magnética:** espécies de alta suscetibilidade magnética, como a magnetita, podem ser separadas por meio de um campo magnético que retém essas partículas e deixa as demais passarem. Em Jacupiranga (SP), esse processo é utilizado para retirar a magnetita presente no fosfato, e em Itabira (MG), para separar a hematita da ganga (separação magnética de alta intensidade);
- ◆ **separação em meio denso:** o carvão (densidade 1,5) é separado de arenitos e xistos (densidade 2,7) mediante a colocação das partículas a serem separadas em um líquido de densidade intermediária (por exemplo, 1,8). Nesse processo, as partículas de carvão flutuam e as de arenito ou xisto afundam. O mesmo é ou foi utilizado no beneficiamento de carvão no Lavador de Capivari, em Tubarão (SC), e em Charqueadas, São Jerônimo (RS); na separação de diamantes em Nortelândia (MS); e na separação de finos de minério de manganês em Serra do Navio (AP).

A título de comentário curioso, cita-se o fato – que parece ser bastante ilustrativo dessas ideias – que foi contado pelo saudoso e sempre lembrado engenheiro Gildo Sá. Num garimpo de tantalita no nordeste do Brasil, ele encontrou um garimpeiro que separava partículas de tantalita de partículas de columbita (absolutamente não distinguíveis por diferenças de cor, brilho, densidade ou forma) pela sensação de temperatura que ele tinha quando as segurava na mão. É que uma das espécies minerais, por ter maior capacidade térmica, retirava mais calor da mão, transmitindo uma sensação de frieza, suficiente para que aquele garimpeiro pudesse fazer a separação.

Note que foram usadas propriedades físicas. De acordo com a definição clássica, em nenhuma operação unitária de Tratamento de

Minérios pode ser introduzida qualquer alteração da estrutura interna da matéria. Reações químicas, metalúrgicas ou cerâmicas fogem do escopo do Tratamento de Minérios. Essa definição é atualmente contestada por um número crescente de estudiosos. Veja-se, a respeito, a discussão feita por Horta (1996).

Conforme já foi visto, na generalização máxima que se pode fazer, qualquer processo de concentração de minérios pode ser descrito como a capacidade de se dar, a um ou mais componentes de uma mistura heterogênea, uma velocidade diferente da velocidade mantida pelas demais espécies minerais presentes. Para que tais velocidades diferenciais possam ser dadas, é necessário que exista alguma diferença de propriedades físicas.

Menciona-se o exemplo da cata manual descrito anteriormente: baseado em características de cor, forma e aparência, o operador escolhe as partículas desejadas, apanha-as com a mão (impõe-lhes uma velocidade vertical), enquanto as demais partículas permanecem sobre a correia (velocidade vertical zero).

Da mesma forma, no meio denso, a espécie mais leve boia (move-se para cima) e a pesada, afunda (move-se para baixo).

O processo de flotação (em inglês, *froth flotation*) é, talvez, o processo mais importante do ponto de vista da tonelagem de minérios processada em todo o mundo. Ele e alguns processos correlatos baseiam-se em propriedades muito menos evidentes que as anteriores. É uma separação feita numa suspensão em água (polpa). Como nos demais, as partículas são obrigadas a percorrer um trajeto e, num dado instante, as partículas que se deseja flotar são levadas a abandoná-lo, tomando o rumo ascendente. A diferenciação entre as partículas é dada pela sua capacidade de se prenderem a (ou prenderem a si) bolhas de gás (geralmente ar). Se uma partícula consegue capturar um número suficiente de bolhas, a densidade do conjunto partícula-bolhas torna-se menor que a do fluido e o conjunto se desloca verticalmente para a superfície, enquanto as demais partículas mantêm inalterada a sua rota.

A capacidade de atrair ou repelir as bolhas de ar é obtida mediante a adição criteriosa de compostos químicos ao sistema.

As situações mostradas nas Figs. 1.2 e 1.3 são simplificações pois, na realidade, raramente aparecem populações minerais com as partículas totalmente liberadas. Na maioria das vezes, as partículas são mistas (ou intercrescidas), compostas de ambas as espécies minerais (ver Fig. 1.4). O conceito de concentração deve então ser corrigido, conforme será mostrado no item 1.3.5.

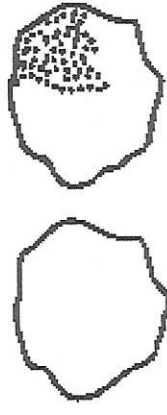


Fig. 1.4 Partículas liberada e intercrescida

1.1.2 Adequação granulométrica

Certas utilizações exigem que as partículas da espécie mineral tenham tamanhos adequados. Por exemplo:

- ♦ minério de ferro usado *in natura* em alto-forno não pode ser fino, para não impedir a passagem do ar soprado para dentro do alto-forno. Não pode também ser excessivamente grosso, pois isso faria a reação de redução demorar muito até chegar ao centro da partícula. O minério de ferro natural utilizado em alto-forno é chamado *lump* e deve, por isso, ter tamanho entre 2 e 8", admitindo um máximo de 20% de partículas com tamanho inferior a 2";
- ♦ o vidro é fabricado num processo contínuo, a partir de uma matéria-prima básica: a areia. Não é possível admitir finos, pois estes poderiam gerar poeiras no início do processo produtivo, e estas se depositariam sobre o vidro já acabado, mas ainda quente, prejudicando a qualidade da sua superfície. Não se pode, por outro lado, utilizar partículas muito grosseiras, pois elas poderiam não fundir totalmente no processo de fabricação, levando o produto a apresentar defeitos discerníveis visualmente. A especificação fica -20+140# (o símbolo # é *mesh*, uma unidade de tamanho usada em Tratamento de Minérios e que será apresentada no item 1.3.7.

1.1.3 Outras adequações

Em geral, as matérias-primas industriais devem atender a exigências tanto químicas como granulométricas. Eventualmente, podem ser exigidas outras propriedades e, ainda, uma mesma substância mineral pode ter que atender a exigências diferentes para diferentes aplicações. Os exemplos que se seguem, de especificações comerciais, são autoexplicativos.

a] areia para vidraria:

- ◆ granulometria: $-30\#$, $< 2\%$ – $140\#$;
- ◆ teor mínimo de ferro ($0,02\%$ máximo), para não afetar a cor do vidro;
- ◆ isenção de minerais refratários como a turmalina, por exemplo, para evitar a ocorrência de defeitos pontuais;
- ◆ admite “impurezas” que venham a ser adicionadas no processo de fabricação do vidro, como alumina, cal (ou carbonato de cálcio), feldspato e outros.

b] areia para concreto:

- ◆ granulometria: $+3/8''$ – $-3/8''+4\#$ – $-4+16\#$
- % retida: 0 0 a 5 20 a 55
- granulometria: $-16+50\#$ – $-50+100\#$
- % retida: 70 a 90 90 a 98
- ◆ forma das partículas: grãos cúbicos ou esféricos são melhores que grãos achatados, compridos ou em forma de discos;
- ◆ composição química: $SO_3 < 1\%$ para concreto armado, $< 5\%$ para concreto ciclópico, matéria orgânica $< 0,25\%$, álcalis $< 1\%$, total das impurezas $< 3\%$ do peso do agregado.

c] talco:

- ◆ Os usos do talco são tantos e tão variados que vale a pena relacioná-los. O Quadro 1.1 mostra as diferentes exigências de cada um deles.

d] cal para construção civil:

- ◆ pureza baixa – admite silicatos;
- ◆ não admite a presença de MgO ;

Quadro 1.1 Usos e especificações do talco

Uso	Granulometria	Composição química	Alvura	Mineralogia	Outras especificações
Tinta (espalhador)	100% - 200#	$SiO_2 + MgO$ 75% Al_2O_3 2% $H_2O + MV$ 1% PF 7%	65-90 GEG	partículas lamelares	baixa absorção de água
Tinta (pigmento)		MgO 24 a 32% SiO_2 50 a 65% $CaO + SiO_2$ 88% $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 6% PF 7% H_2O 1%	65-90 GEG	partículas fibrosas (tremolítico)	
Cosméticos	99,6% - 325#	PF 3 a 8% Pb < 20 ppm Fe_2O_3 $< 0,75\%$ sol. Ac $< 2\%$ sol. H_2O $< 0,2\%$ pH 6,5 a 9,5 As < 3 ppm sol. CaO $< 1,5\%$	85-92 GEG	sem tremolita; sem carbonatos	substâncias solúveis em ácido $< 2\%$
Papel	98,8 a 99,9% - 325#	$CaCO_3$ $< 4\%$ Fe_2O_3 $< 2\%$ MgO 30,7 a 31,7% SiO_2 47,4 a 58,2% CaO 0,3 a 1% PF 6,9 a 20,3% Al_2O_3 0,4 a 1%	77-87 GEG	partículas lamelares	baixa abrasão; boa dispersão

Quadro 1.1 Usos e especificações do talco

Uso	Granulometria	Composição química	Alvura	Mineralogia	Outras especificações
Ração animal	específica e controlada			85% talco	
Tratamento de esgotos	90% - 325#				
Inseticida	ao redor de 80#				
Telhados	97% - 325# 100% - 200#	Fe ₂ O ₃ 1,5% CaO 1,55% Al ₂ O ₃ 4%		resistência ao fogo e ao tempo minerais não talcosos < 5 a 10%; talco com clorita para refratários	composição química uniforme; Mg suficiente para fluxante
Cerâmica	não deve conter resíduos arenosos				
Têxteis					
Plásticos		baixo Fe quimicamente inerte	branco	partículas lamelares	baixa resistividade elétrica e abrasividade; peso específico controlado.
Borracha	99% - 325#	SiO ₂ 60 a 63% MgO 26 a 33% Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ 2% Mn < 0,01% Cu < 0,002%			

Fonte: Loyola (2005).

- ♦ finura máxima para dar reação rápida e massa homogênea;
 - ♦ calcinação total.
- e) cal para conversores LD:
- ♦ mínimo teor de silicatos;
 - ♦ admite MgO;
 - ♦ granulometria entre 4 e 40 µm - partículas mais finas são sopradas para fora do conveyor; partículas mais grosseiras podem não fundir;
 - ♦ calcinação total.

1.2 Operações unitárias de beneficiamento

Todo circuito de beneficiamento é constituído por uma sequência de operações denominadas operações unitárias, por serem sempre as mesmas. O que varia é a combinação e a sequência delas, para atender a um determinado objetivo ou às características específicas de um determinado minério. As operações unitárias podem ser esquematicamente agrupadas em:

- ♦ operações de cominuição: visam colocar as partículas minerais no tamanho adequado às diferentes operações a que devem ser submetidas. São elas, basicamente, os sucessivos estágios de britagem, necessários para permitir o transporte contínuo do minério (e também sua estocagem e homogeneização), e a moagem para liberar as partículas de apatita das partículas dos minerais de ganga. Essas operações são sempre auxiliadas por operações de separação de tamanhos, em peneiras e classificadores;
- ♦ operações de concentração: visam separar as partículas das diferentes espécies minerais;
- ♦ operações auxiliares: que transportam os diferentes produtos intermediários entre uma operação unitária e outra e separam a água contida nesses produtos. Muito resumidamente, são elas: transporte de sólidos particulados, transporte de sólidos em suspensão em água (em polpa), estocagem e homogeneização em pilhas, estocagem em silos, espessamento, filtragem e secagem.

A combinação das diferentes operações na melhor sequência para obter a máxima recuperação do mineral útil e o documento adequado denomina-se fluxograma.

Luz e Almeida (1989) descrevem o processo produtivo e apresentam fluxogramas e características dos principais equipamentos de processo do circuito de beneficiamento de fosfato da Serrana S.A de Mineração, entre muitas outras usinas.

Sucintamente, esse texto mostra que o minério era, na época:

- ◆ britado em três estágios sucessivos;
- ◆ homogeneizado em pilhas alongadas;
- ◆ moído em moinho de barras, circuito fechado e com uma operação de separação magnética intercalada;
- ◆ deslamado em quatro estágios sucessivos de ciclonagem;
- ◆ condicionado com os reagentes que participam do processo de flotação;
- ◆ flotado em um circuito de células de flotação convencionais, complementado por células pneumáticas;
- ◆ espessado e filtrado;
- ◆ secado em forno rotativo.

1.2.1 Fluxogramas

Nunca uma operação unitária sozinha é suficiente para fornecer um produto final. Geralmente são necessárias várias operações unitárias que, combinadas, levam do minério inicial ao produto final.

Os tratamentistas gostam de dizer que o Tratamento de Minérios é uma arte, pois estabelecer a sequência correta dessas operações e combiná-las de modo a obter o melhor teor no concentrado e a máxima recuperação do elemento ou substância útil é muito difícil, exigindo conhecimento teórico e prático, sensibilidade, experiência anterior e envolvendo sempre trabalho experimental em laboratório ou usina-piloto. Isto porque não existem dois minérios iguais – cada caso é único –, de modo que é sempre desastroso tentar transferir resultados

bem-sucedidos, obtidos em outros lugares, para as condições específicas da jazida e do minério em questão. É claro que a experiência acumulada é valiosa e não deve ser desprezada, mas ela terá sempre que ser adaptada e reavaliada diante do caso específico que se está enfrentando.

A figura que representa o processo produtivo é chamada fluxograma. Ela representa as operações unitárias, não os equipamentos. A escolha da sequência correta dessas operações é que vai determinar o sucesso de um dado circuito.

As Figs. 1.5 e 1.6 apresentam dois fluxogramas de tratamento de mesma substância mineral (carvão), com diferentes graus de complexidade. As figuras representam operações, e não equipamentos. O fluxograma mais abrangente e completo possível apresentaria operações unitárias dos seguintes tipos:

- ◆ redução de tamanhos: britagem ou moagem;
- ◆ separação de partículas de tamanhos diferentes: peneiramento, classificação, deslamagem ou desempoeiramento;
- ◆ concentração: magnética, eletrostática, flotação, meio denso, lâmina d'água, jigagem, catação etc.;
- ◆ auxiliares: desaguamento (espessamento, filtragem e outros), secagem e embalagem;
- ◆ manuseio: transporte de sólidos, transporte de polpas, estocagem e homogeneização.

Como já foi dito, as operações de tratamento de minérios são feitas, sempre que possível, em meio aquoso, que se diz “a úmido”. Isso é uma regra tão geral que esse fato nem sequer é mencionado; a situação contrária, isto é, o fato de o minério estar sendo processado a seco, é que precisa ser mencionada.

A mistura de minério e água é chamada polpa. Uma polpa de um concentrado qualquer, obviamente, não pode ser comercializada – é necessário eliminar a água contida, razão pela qual as operações de

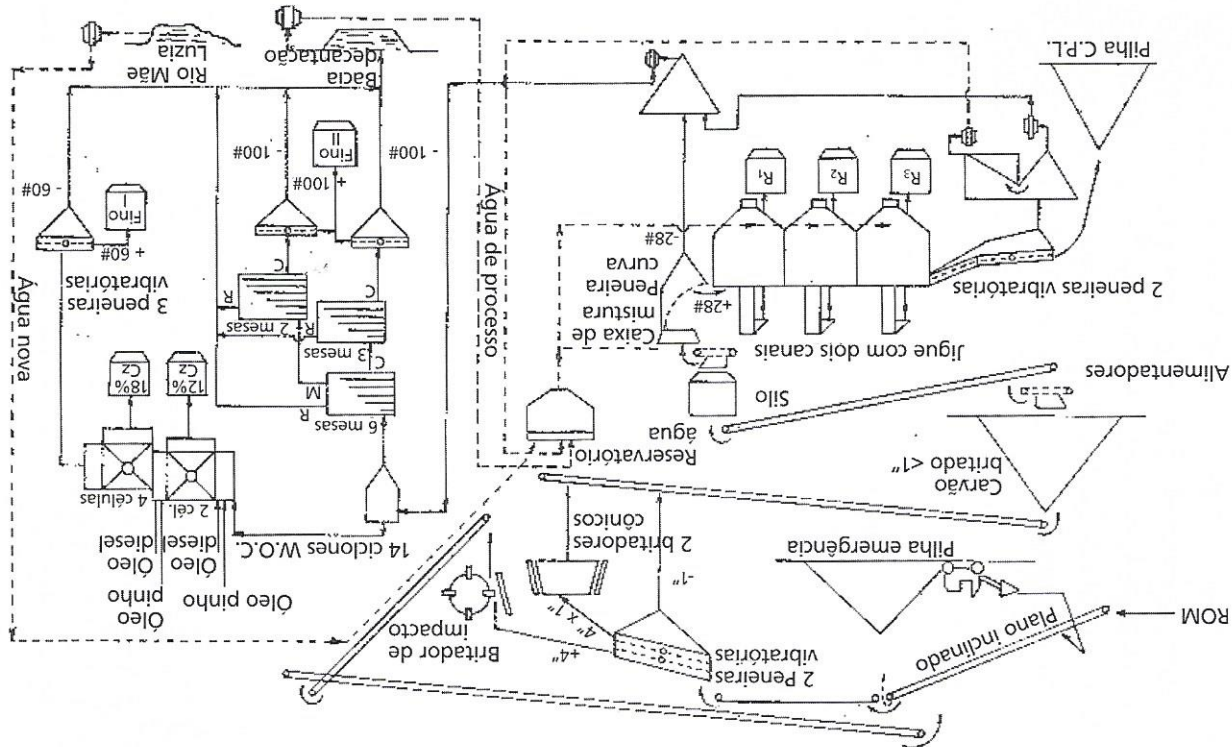


Fig. 1.5 Fluxograma da usina de beneficiamento da mina Verدينho – Carbonífera Críciúma S.A.

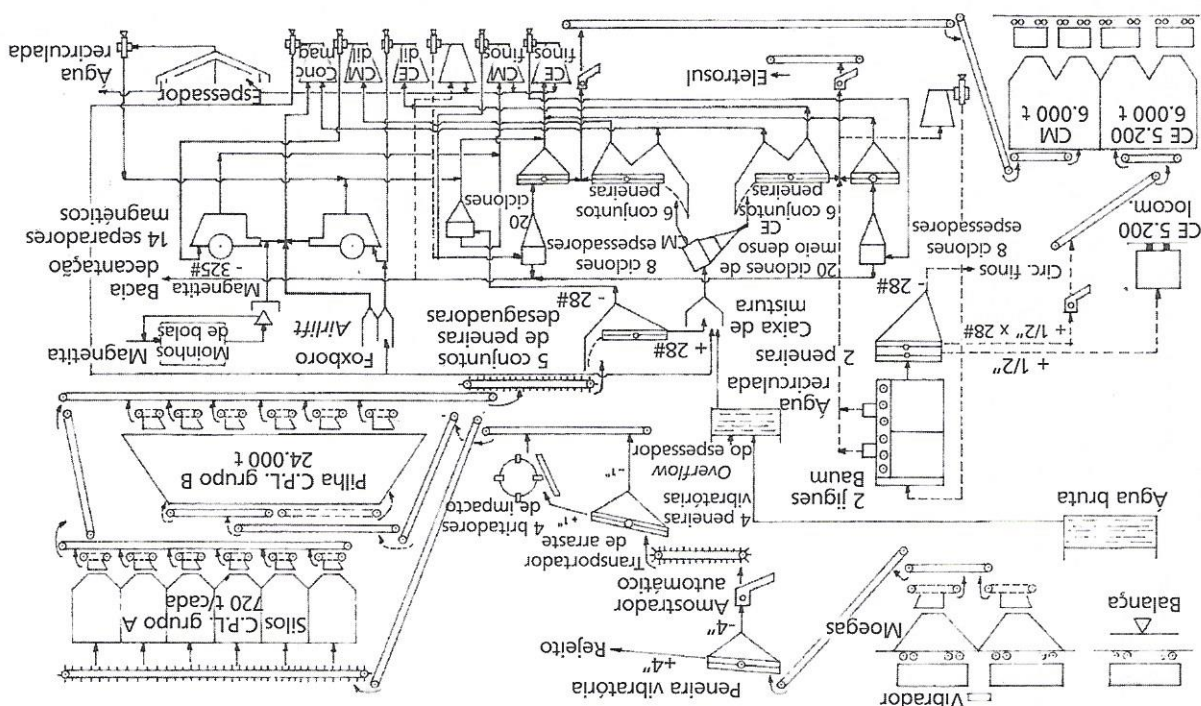


Fig. 1.6 Fluxograma de beneficiamento no lavador de Capivari (Tubarão, SC).
Fonte: Luz e Almeida (1989).

desaguamento e secagem têm a sua participação sempre garantida em qualquer fluxograma.

1.3 Outros conceitos importantes

1.3.1 Teor

Define-se teor como a massa de um elemento ou substância pura, em relação à massa total em consideração.

Pensemos numa substância pura, por exemplo, o óxido de cálcio, CaO, constituinte básico das calcs virgens. Essa substância é constituída de duas espécies atômicas diferentes: o cálcio, de peso atômico 40, e o oxigênio, de peso atômico 16. O seu peso molecular é, portanto, $40 + 16 = 56$. O teor de cálcio será de $(40/56) \times 100 = 71,4\%$ de cálcio. Consideremos outra substância, também pura, ou seja, sem contaminação alguma, não mais uma cal, mas uma doloma, CaO.MgO. Como o peso atômico do magnésio é de 24, o peso molecular da doloma passa a ser $40 + 16 + 24 + 16 = 96$, e o teor de cálcio passa a $(40/96) \times 100 = 41,7\%$ de cálcio. Logo, a massa de cálcio contida no CaO é sempre a mesma, mas a massa total da molécula (que agora é CaO.MgO) variou, fazendo variar, em consequência, a relação entre ambas, que é o teor de cálcio.

Esses dois exemplos referem-se a substâncias puras. Quando elas não são puras, isto é, estão diluídas por outras substâncias diferentes, o conceito permanece o mesmo. Imagine-se que a nossa doloma te-

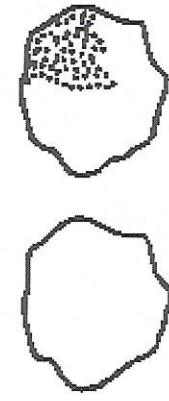


Fig. 1.7 Partículas de doloma pura e de doloma contaminada

nhá também 20% de substâncias estranhas (somente 80% da massa da nossa amostra é doloma – 20% são outras substâncias, como argila, por exemplo). O teor de cálcio passará a ser de 33,4%. A Fig. 1.7 é autoexplicativa.

Em Tratamento de Minérios, teor significa sempre a quantidade das substâncias que nos interessam, em relação à quantidade total da amostra (peso seco). O conceito é amplo e podemos nos referir a:

- ♦ teor de um elemento: g de ouro por t de minério (ppm) ou % Fe em um minério ou concentrado;
- ♦ teor de uma substância ou mineral: quilates de diamante por m³ de cascalho ou % de caulinita em uma argila;
- ♦ teor de alguma coisa que nem sequer tenha existência real: % de P₂O₅ num fosfato;
- ♦ teor de um conjunto de minerais, substâncias ou elementos: % de terras-raras num mineral, % de minerais pesados num concentrado, ou % de R₂O₃ num minério ($R_2O_3 = Al_2O_3 + Fe_2O_3$).

1.3.2 Polpas e sólidos particulados

Em tecnologia mineral, trabalha-se com sólidos particulados, ou seja, compostos de partículas. Esses sólidos podem ser manipulados com a umidade natural com que se apresentam, sem que se adicione qualquer quantidade de água a mais, ou sem necessidade de secagem, e essa circunstância é dita “a seco”. Operação a seco não significa, portanto, que o material tenha sido secado! Isso é a regra geral para britagem, estocagem em pilhas, ensilagem e peneiramento grosseiro. As demais operações, ou seja, peneiramento fino, moagem e classificação e as operações de concentração são, de um modo geral, executadas a úmido. Isso significa que são adicionadas quantidades substanciais de água, formando uma mistura, chamada polpa, em que as partículas sólidas estão em suspensão em água. É sempre muito mais conveniente trabalhar a úmido que a seco, porque a água facilita o transporte do minério, retira o excesso de calor gerado, impede a geração de poeiras etc. A quantidade de água sempre presente, então, no minério ou sólido granulado que está sendo manuseado pode ser quantificada de duas maneiras:

- ♦ *umidade* é a quantidade de água presente no sólido dividida pela massa de sólidos (seca). É o que se chama “umidade base seca” e é a referência normalmente utilizada em Tratamento de Minérios.

Sempre que nos referirmos à umidade, trata-se da umidade base seca, salvo menção em contrário. Existe outra umidade, que é a umidade base úmida, muito conveniente para a indústria cerâmica, para o projeto de transportadores contínuos, de transporte em caminhão, mas que não é tão prática para os nossos objetivos como a umidade base seca;

◆ *porcentagem de sólidos* é a massa de sólidos (seca) dividida pela massa de polpa (massa de sólidos mais massa de água). Sempre que nos referirmos à porcentagem de sólidos, trata-se da porcentagem de sólidos em peso, salvo menção em contrário. Da mesma forma, nesse contexto, outros grupos costumam utilizar a porcentagem de sólidos em volume, mas isso é próprio deles. Aqui, porcentagens em volume serão utilizadas apenas no bombeamento de polpas e no dimensionamento de ciclones classificadores.

Dizer que uma polpa tem 15% de sólidos significa que, em 100 g de polpa, existem 15 g de sólidos. Existirão, portanto, 85 g de água. Em termos de vazão, se a vazão dessa polpa for 200 t/h, estarão passando 30 t/h de sólidos e 170 t/h de água. Na lista de exercícios deste capítulo existem alguns que tornarão o leitor familiarizado com umidades e porcentagens de sólidos. É conveniente tentar resolvê-los sozinho, antes de acompanhar a resolução.

1.3.3 Balanços de massas, metalúrgico e de água

O conceito mais importante do Tratamento de Minérios e também a ferramenta mais utilizada pelo engenheiro tratamentista é o balanço.

Ele consiste na aplicação pura e simples da Lei de Lavoisier: todas as massas que entram numa operação de tratamento têm que sair em seus produtos – não há geração nem consumo de massa no Tratamento de Minérios!

Estudemos o conceito de balanços pelo exemplo da operação unitária mostrada na Fig. 1.8.

O balanço de massas corresponde à soma das vazões mássicas de minério, $40 = 25 + x$, onde x é a vazão do rejeito. Para satisfazer à Lei de Lavoisier, x só pode ser 15 t/h.

Na alimentação existem $40 \times 0,5 = 20$ t/h de Fe contido. No concentrado, $25 \times 0,64 = 16$ t/h de Fe contido. Para atender à Lei de Lavoisier, no que se refere às massas de ferro contido, a quantidade de ferro que sai com o rejeito só pode ser $20 - 16 = 4$ t/h de Fe contido.

Este balanço, $20 = 16 + 4$, é chamado de balanço metalúrgico e corresponde à aplicação da Lei de Lavoisier para o metal contido. Entretanto, ele é expresso por meio dos teores do metal na alimentação, no concentrado e no rejeito.

O teor de Fe do rejeito é:

$$\frac{45 \text{ t/h Fe}}{15 \text{ t/h totais}} \times 100 = 26,7\% \quad (1.1)$$

Na alimentação, existe $40 \times 0,1 = 4$ t/h de água contida; no concentrado, $25 \times 0,07 = 1,75$ t/h de água contida. Para atender à Lei de Lavoisier, a quantidade de água que sai com o rejeito só pode ser $4 - 1,75 = 2,25$ t/h de água contida. Este balanço, $4 = 1,75 + 2,25$, é chamado de balanço de água e corresponde à aplicação da Lei de Lavoisier para as massas de água que acompanham a alimentação e os produtos. Entretanto, esse balanço é expresso por meio das umidades da alimentação, do concentrado e do rejeito.

A umidade do rejeito é, então:

$$\frac{2,25 \text{ t/h de água}}{15 \text{ t/h de sólidos}} \times 100 = 15\% \quad (1.2)$$

Os balanços de massas, de água e metalúrgico da Fig. 1.8 ficarão, assim, expressos como mostrado na Fig. 1.9.

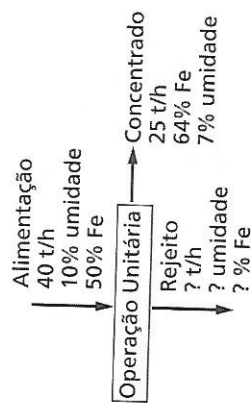


Fig. 1.8 Operação unitária e seus fluxos de alimentação e produtos

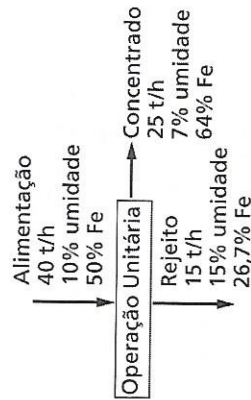


Fig. 1.9 Balanços de massas, de água e metalúrgico completos da operação unitária mostrada na Fig. 1.8

Um processo de beneficiamento de um minério qualquer (e que é representado pelo desenho chamado de fluxograma) é sempre a soma de muitas operações unitárias. Cada uma delas deve ter os seus balanços de massas, metalúrgico e de água. Usualmente, é útil, ou necessário, para casos específicos, fazer ainda outros balanços – volumétricos, de polpa etc. A ideia e o objetivo são sempre os mesmos. Como o procedimento mostrado anteriormente acaba tornando-se muito trabalhoso e sujeito a erros, adota-se uma representação gráfica que facilita muito o trabalho, como se explica a seguir.

a] A bandeira mostrada na Fig. 1.10 passa a representar o fluxo. Cada janelinha da bandeira representa um parâmetro específico do processo que está sendo acompanhado.

b] Cada balanço passa a ser feito na janelinha correspondente.

Dessa forma, a Fig. 1.9 passa a ser representada conforme a Fig. 1.10.

É importante ressaltar que todos esses exercícios se referem a situações de perfeito equilíbrio da usina, ou a balanços médios de um dado período de operação. Na prática industrial ocorrem variações instantâneas durante todo o tempo em que se está trabalhando. Fechar os balanços de uma usina a partir das medidas experimentais (valores instantâneos) é tarefa bastante difícil e que exige métodos mais sofisticados. Uma boa discussão desses métodos e um programa de computador para isso são apresentados em Chaves e Hennies (1995) e Nunes (1992).

Os exercícios 1.10 a 1.16 no final deste capítulo tratam de balanços de massas, metalúrgicos e de água. Existem várias profissões e ofícios em que só é possível aprender a fazer fazendo, e Engenharia de Processos é um deles. Portanto, mãos à obra! Somente resolvendo os

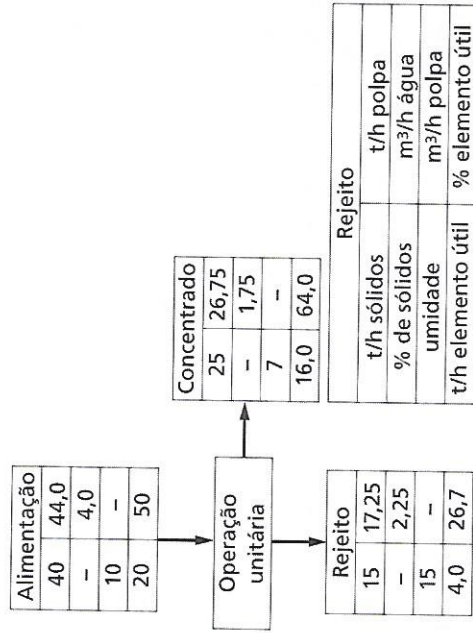


Fig. 1.10 Representação gráfica da operação unitária

exercícios é que você adquirirá desembaraço e competência. Não deixe, portanto, de tentar resolvê-los, primeiro sozinho(a), depois conferindo com o exercício resolvido. Finalmente, dê-se ao trabalho de acompanhar passo a passo a resolução, na qual possíveis dúvidas poderão ser solucionadas.

1.3.4 Quantificação de processos

Ninguém faz Tratamento de Minérios por hobby ou por filantropia.

Como toda atividade de Engenharia, essa deve produzir um bem necessário à utilização industrial, em condições economicamente saudáveis, isto é, com lucro. A quantificação do processo medirá exatamente o desempenho das nossas operações unitárias.

Existe um sem-número de índices que foram sendo criados ao longo dos anos para quantificar processos de Tratamento de Minérios. Schulz (1970) relaciona 37 índices diferentes, desenvolvidos por vários pesquisadores e engenheiros entre os anos de 1913 e 1970, e depois apresenta outros nove. Leal Filho (1991) apresenta uma discussão muito sensata do assunto. Na realidade, apenas dois desses índices são realmente úteis e significativos para qualquer operação – os demais podem

ser muito convenientes para casos particulares. Estamos nos referindo à recuperação e ao enriquecimento.

$$\text{Recuperação} = \frac{t/h \text{ de concentrado}}{t/h \text{ de alimentação}} \quad (1.3)$$

Esse parâmetro de processo também é chamado, conforme a situação específica, de rendimento, recuperação em massa ou de partição. Os dois primeiros termos são reservados para operações de concentração ou para a usina de beneficiamento como um todo. Partição é utilizado para operações de classificação ou de separação densitária e tem um significado mais abrangente, que será estudado mais adiante (Chaves, 1992).

É muito importante, em particular, a extensão do conceito de recuperação para o elemento ou substância de interesse contido no minério e objeto da operação de tratamento. Por exemplo, recuperação do ouro contido num cascalho ou do P_2O_5 contido numa rocha fosfática. Utiliza-se, então, a recuperação metalúrgica, definida como:

$$\text{recuperação metalúrgica} = \frac{t/h \text{ de elemento útil no concentrado}}{t/h \text{ de elemento útil na alimentação}} \quad (1.4)$$

No caso discutido da operação unitária da Fig. 1.8, tem-se:

$$\text{recuperação} = \frac{15 \text{ t/h de concentrado}}{40 \text{ t/h de alimentação}} = 0,375 \text{ ou } 37,5\%$$

$$\text{recuperação metalúrgica} = \frac{16 \text{ t/h Fe no concentrado}}{20 \text{ t/h Fe na alimentação}} = 0,8 \text{ ou } 80\%$$

Note que o nome “metalúrgico” é utilizado independentemente de a substância de interesse ser um metal ou não. Utiliza-se esse termo para o ferro, que efetivamente é um metal, e para o P_2O_5 , que se refere a um minério não metálico, o fosfato. No caso, P_2O_5 nem sequer existe como tal.

Define-se enriquecimento como:

$$\text{enriquecimento} = \frac{\text{teor do elemento útil no concentrado}}{\text{teor do elemento útil na alimentação}} \quad (1.5)$$

No caso estudado, tem-se:

$$\text{enriquecimento} = \frac{64}{50} = 1,28$$

A utilização e o significado completo desses dois conceitos ficarão bem claros quando for discutido, mais adiante, o conceito de curva de seletividade.

Em muitos tipos de operação (por exemplo, nas operações de concentração densitária), é mais comum falar-se em relação de concentração, que é o inverso da recuperação (relação de concentração = massa de alimentação/massa de concentrado), porém o conceito é o mesmo. Nos minérios de minerais pesados, como geralmente se parte de teores muito baixos, as reduções de massa numa operação de concentração podem ser muito grandes – da ordem de 50 a 200 vezes. A relação de concentração torna-se, então, mais expressiva e traduz melhor o fenômeno físico do que a recuperação.

A água distribui-se diferentemente no concentrado e no rejeito ou nos produtos de separação de tamanhos. Para muitas aplicações, é importante conhecer a sua partição (em inglês, *split*), sempre referida como a água que acompanha o concentrado em referência à água que vem com a alimentação.

Você poderá resolver os exercícios de 1.17 a 1.20. Eles deverão ajudá-lo(a) a tornar bem claro o conceito de teor, necessário para o cálculo correto dos balanços metalúrgicos. Se, por acaso, houver dificuldade com o cálculo dos balanços metalúrgicos, pode ser que esse conceito ainda não esteja claro para você. Nesse caso, torne a fazer os balanços.

1.3.5 Curva de seletividade

O objetivo de qualquer operação de concentração é obter a máxima recuperação e o máximo enriquecimento. Na prática, isso é impossível de obter simultaneamente, pois a alimentação é composta de partículas e cada partícula tem uma composição química própria,

que será mantida, mesmo que ela vá para o concentrado ou para o rejeito.

Vamos exemplificar com a população de 1.000 partículas, compostas dos minerais A e B, cujos teores das partículas variam conforme mostrado na Fig. 1.11. Vamos admitir, para efeito didático, que a separação entre A e B é possível de ser executada com perfeição total e modulada segundo a nossa vontade. A e B têm a mesma densidade.

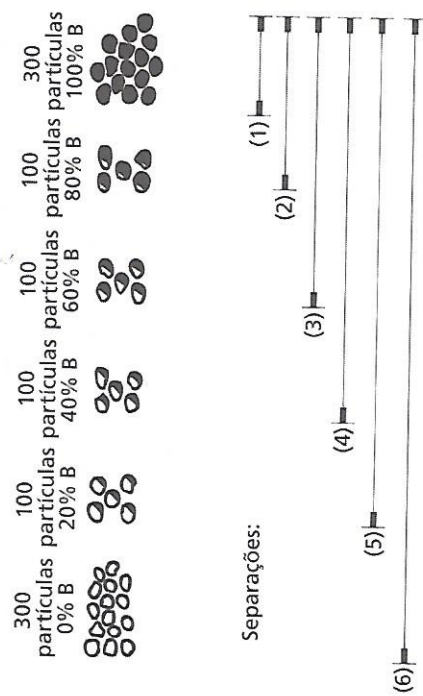


Fig. 1.11 Distribuição de partículas liberadas e mistas

Ao se ponderar as massas de A e B em partículas equivalentes, resulta que existem 500 partículas equivalentes de A e 500 de B. Em outros termos, o teor dessa população é 50% B.

Já que podemos separar com perfeição, do jeito que quisermos, existe a possibilidade de se fazer as seguintes separações:

- 1) obtém-se um concentrado com 100% B (teor máximo). A recuperação mássica será de 30%; a recuperação metálgica, de 300/500 = 60% e o teor do concentrado, 100% B;
- 2) obtém-se um concentrado contendo as partículas de mais alto teor: 100 e 80% B. A recuperação mássica será de 40%; a recuperação metálgica, de 76% e o teor do concentrado, 95%. Aumenta-se a recuperação, apesar de se perder um pouco de teor;

- 3) aceita-se um concentrado de teor mais baixo, para se obter uma recuperação um pouco melhor. A recuperação mássica será de 50%; a recuperação metálgica, de 88% e o teor do concentrado, 88%;
- 4) obtém-se um concentrado com teor mais baixo ainda, recuperando-se até as partículas com 40% B. A recuperação mássica será de 60%; a recuperação metálgica, de 80% e o teor do concentrado, 80%;
- 5) obtém-se um concentrado com recuperação total de B (máxima recuperação metálgica). A recuperação mássica será de 70%; a recuperação metálgica, de 100%, mas o teor do concentrado cai para 71,4%. O rejeito terá 0% B, isto é, não haverá perdas de B no rejeito;
- 6) obtém-se um concentrado igual à alimentação (máximas recuperações mássica e metálgica). A recuperação mássica será de 100%; a recuperação metálgica, de 100% e o teor do concentrado, 50%.

Se for construído um gráfico teor do concentrado versus recuperação, seja ela mássica (R) ou metálgica (Rm), conforme for mais conveniente, obtêm-se gráficos como os mostrados na Fig. 1.12, denominados curvas de seletividade.

Na prática operacional, nunca o processo será tão seletivo como o afirmado. Então, as separações reais ficarão situadas dentro do espaço delimitado pela origem e pela curva de seletividade.

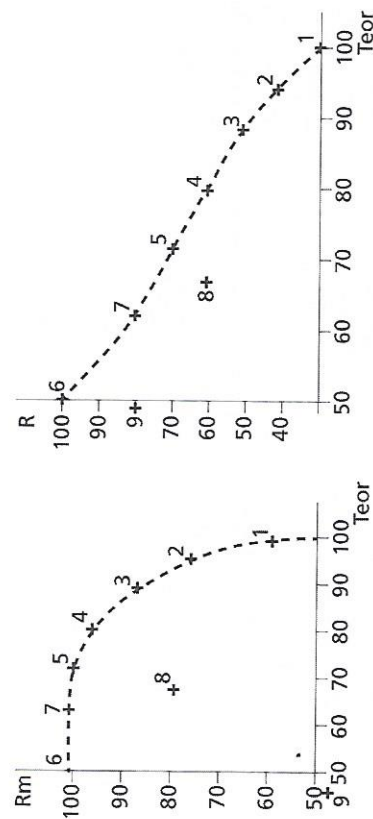


Fig. 1.12 Curvas de seletividade em função da recuperação em massa (R) e da recuperação metálgica (Rm)

Nenhuma separação pode ser representada por um ponto fora desse limite. Exemplos:

- 7) recupera-se todo o B contido na alimentação, mas o concentrado arrasta 1/3 das partículas de A puro (100 partículas). A recuperação mássica será de 80%; a recuperação metalúrgica, de 100% e o teor do concentrado, 62,5%;
- 8) recuperam-se todos os B, mas se perde 1/3 das partículas de B puro. A recuperação mássica será de 60%; a recuperação metalúrgica, de 80% e o teor do concentrado, 66,7%;
- 9) recuperam-se as partículas com 100% A, 20% B, 60% B e 100% B. A recuperação mássica será de 80,5%; a recuperação metalúrgica, de 47,5% e o teor do concentrado, 47,5%.

Note que não há nenhum ponto à direita da curva de seletividade. A Fig. 1.13 mostra a curva de seletividade de uma campanha experimental de ensaios de concentração de um minério de fluoreta e a curva de seletividade dos resultados experimentais.

1.3.6 Rougher, cleaner e scavenger

É muito difícil, numa única operação de concentração, conseguir simultaneamente os dois objetivos do beneficiamento: máxima recuperação + máximo enriquecimento.

Como vimos no item anterior, eles geralmente são antagonísticos para os minérios reais. Os equipamentos também têm limitações de projeto, de construção ou de desempenho, que limitam o enriquecimento ou a relação de concentração que se pode

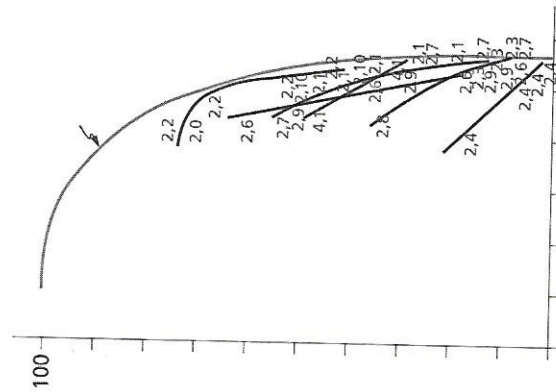


Fig. 1.13 Curvas de ensaios reais e curva de seletividade
Fonte: Chaves (1989).

obter em uma única passada. Veja o que acontece com uma operação unitária qualquer (no caso, é um exemplo real de flotação catiônica de um itabirito):

a) operação com alto enriquecimento (Fig. 1.14):

O concentrado de alto teor

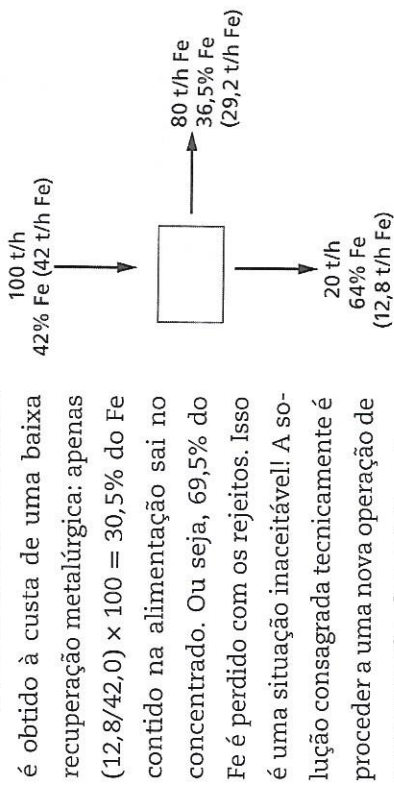


Fig. 1.14 Operação unitária com alto enriquecimento

português que a traduza com precisão e clareza, embora vários termos tenham sido propostos e utilizados. Por isso, sempre será utilizado o termo inglês neste texto (Fig. 1.15).

Dessa forma, apenas 6% do Fe contido na alimentação são perdidos.

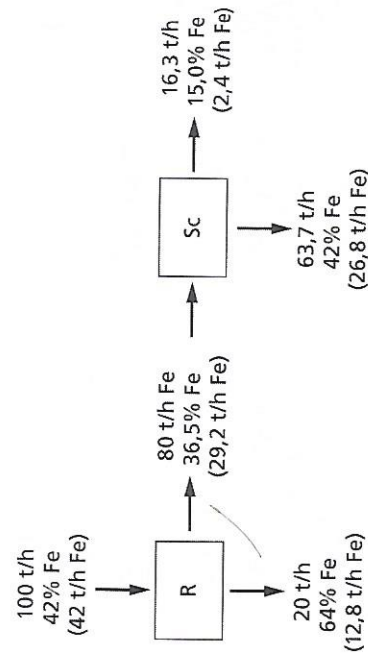


Fig. 1.15 Operação scavenger para aumentar a recuperação

b] operação com alta recuperação (Fig. 1.16):

A elevada recuperação metalúrgica (92,9%) é obtida à custa de um baixo enriquecimento: apenas $(48,7/42,0) = 1,16$. Ou seja, isso é outra situação inaceitável! A solução consagrada tecnicamente é proceder a uma nova operação de concentração do concentrado. Essa operação é chamada de *cleaner*. Não existe também uma palavra em português que a traduza com precisão e clareza, embora os termos “limpeza” e “relavagem” tenham sido propostos e utilizados. Por isso, sempre será utilizado o termo inglês neste texto (Fig. 1.17).

Assim, o concentrado chega a um teor compatível com as exigências do mercado. Note, entretanto, que o concentrado da operação *scavenger* tem um teor muito baixo para ser considerado

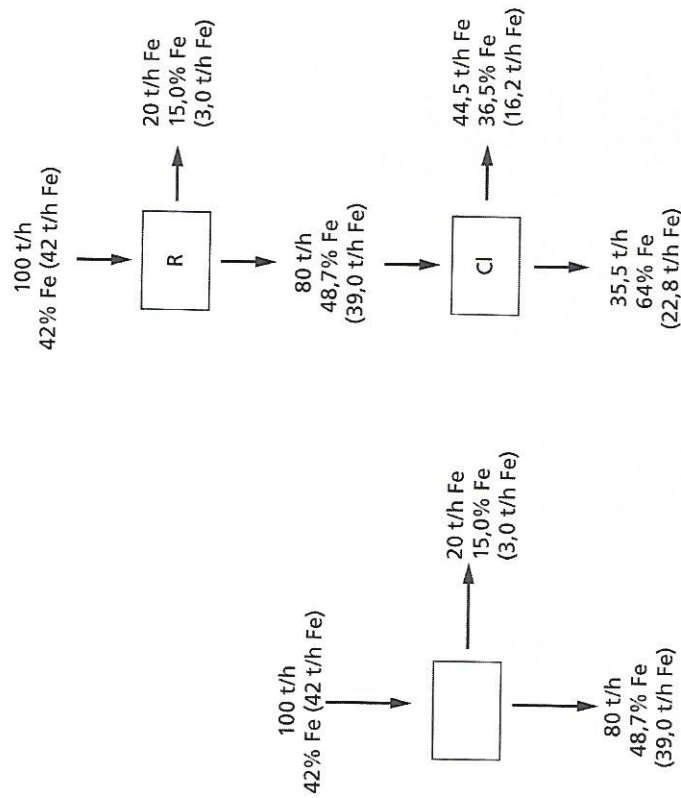


Fig. 1.16 Operação unitária com alta recuperação

Fig. 1.17 Operação *cleaner* para aumentar o teor do concentrado

um concentrado final (26,8% Fe). Já o rejeito da operação *cleaner* tem um teor muito alto para ser descartado (36,5% Fe). É, pois, forçoso recirculá-los internamente. O circuito mais geral fica, portanto, com uma aparência como mostrado na Fig. 1.18, em que todos os produtos intermediários são re-realimentados junto com a alimentação do estágio *rougher*.

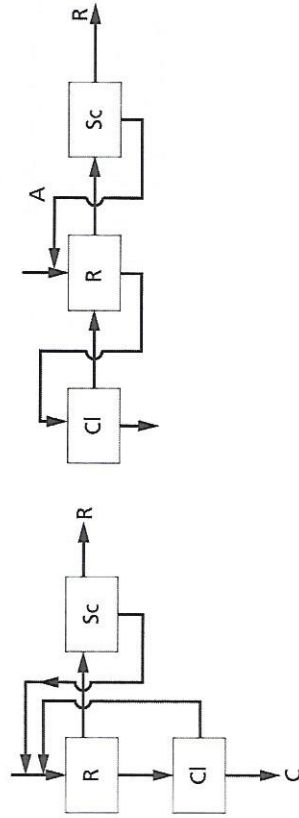


Fig. 1.18 Circuito *rougher* – *cleaner* – *scavenger*

1.3.7 Tamanho

O conceito de tamanho, embora primário para todos, é muito difícil de ser corretamente entendido e, em especial, de ser entendido da mesma maneira por todos.

Intuitivamente, entendemos de imediato que um campo de futebol é maior que uma quadra de vôlei e menor que um campo de pouso, porque são três figuras planas de mesma forma e o seu tamanho pode ser quantificado pela área respectiva. Entretanto, é difícil comparar indivíduos de três dimensões, mesmo que sejam de uma mesma espécie. Por exemplo, qual dessas duas pessoas é maior: uma de 1,90 m de estatura, pesando 70 kg e outra de 1,70 m, pesando 100 kg?

A resposta, obviamente, dependerá do padrão de medida:

- ♦ se for utilizada como padrão de medida a estatura ou a envergadura, o indivíduo de 1,90 m será maior;
- ♦ se for utilizado como padrão de medida o diâmetro da cintura, o indivíduo de 100 kg (gordo) será maior que o de 70 kg (magro);

♦ se for utilizado como padrão de medida, não um parâmetro geométrico, mas a massa corporal do indivíduo, o gordo novamente é maior.

Essa dificuldade não se atém apenas a indivíduos humanos. Ela se apresenta também quando são medidas partículas minerais.

As partículas minerais podem ser medidas de várias maneiras, cada qual fornecendo um valor de medida diferente. Podem-se medir volumes, diâmetros, área das partículas ou áreas projetadas. Na prática usual do Tratamento de Minérios, nas granulometrias usuais em que se trabalha, usualmente se medem diâmetros. Quando se medem diâmetros, há que se convencionar qual, dentre os infinitos diâmetros existentes numa partícula, se deseja medir.

Produtos de desmonte na frente de lavra são medidos – quando o são – com régua, trena ou algo do gênero. Na medição de partículas no microscópio com uma objetiva dotada de retículo, o princípio do procedimento é o mesmo. Os diâmetros escolhidos, entretanto, são diferentes. No chão, no monte de pedras, o operador vai medir apenas aquelas que estão por cima. Ele pode escolher medir o diâmetro máximo, o mínimo ou ambos, e calcular alguma média deles. No microscópio, o operador vai movendo a platina, primeiro numa direção, e anotando os valores interceptados pelo cabelo do retículo. Depois, move a platina na direção perpendicular e anota os valores interceptados pelo outro cabelo, como mostra a Fig. 1.19.

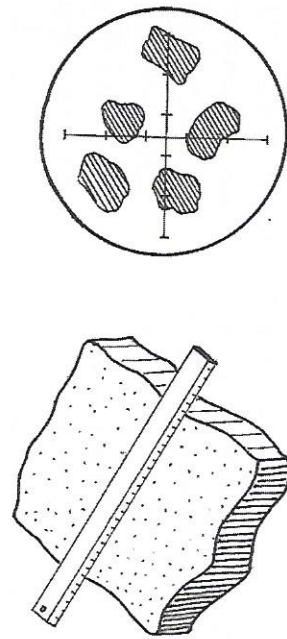


Fig. 1.19 Medidas de tamanho por régua e no microscópio

Entretanto, as partículas sempre se apresentarão com as duas maiores dimensões expostas. É o caso de uma moeda: ela cairá sempre com a cara ou com a coroa para cima; nunca cairá de pé. Ao microscópio, é impossível medir a menor dimensão da partícula. O resultado da medida direta com uma régua será, portanto, sempre alguma média das duas maiores dimensões.

Outro processo de medida é o passa-não-passa, que se utiliza, por exemplo, para os calibres de fios elétricos ou espessímetros de folgas ou de chapas. Na realidade, não se faz uma medida direta, mas se estabelece que o diâmetro do fio está compreendido entre o valor em que ele passou e o valor em que ele não passou. A operação de separação em peneiras atua desse mesmo modo: a partícula passa numa tela, de modo que sabemos que seu diâmetro de medida é menor que a abertura daquela tela, e fica retida na seguinte, de modo que sabemos que o seu diâmetro de medida é maior que a abertura daquela tela (Fig. 1.20). Não se tem a medida do seu tamanho; sabe-se apenas que ela está entre aqueles dois valores limitantes (máximo e mínimo).

Se uma partícula tem o formato de um paralelepípedo de lados ligeiramente menores que a , $2a$ e $3a$, ela passará na tela de malha $3a$, em qualquer posição; passará na malha $2a$ na posição perpendicular a ela e ficará retida na malha a , também em qualquer posição. Ou seja, o que se está medindo, no peneiramento, é a segunda maior dimensão da partícula.

O tamanho das partículas também pode ser medido pelos processos de sedimentação. Essa medição pode ser feita em campo gravitacional (pipeta de Andreasen ou proveta), no campo centrífugo (equi-

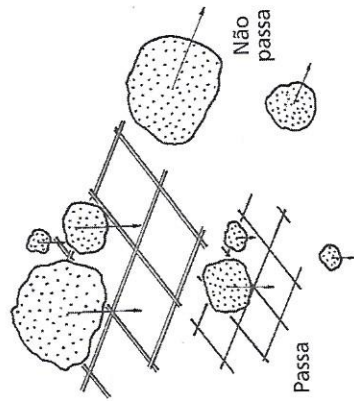


Fig. 1.20 Medida de tamanho passa-não passa

pamentos Cyclosizer e sedimentômetro) ou em ambos (equipamentos Sedigraph e Shimadzu). Prepara-se uma polpa muito diluída, de viscosidade conhecida, e se deixa afundar as partículas. Se elas todas têm a mesma densidade, alcançarão uma velocidade constante, conhecida como velocidade terminal, e que pode ser calculada pela lei de Stokes:

$$v_t = g \cdot \frac{\rho_s - \rho_l}{\eta} \cdot \frac{d^2}{18} \quad (1.6)$$

onde:

v_t é a velocidade terminal (cm/s);

g é a aceleração da gravidade, 980 cm/s² (ou do campo centrífugo, se for o caso);

ρ_s é a densidade da partícula sólida (g/cm³);

ρ_l é a densidade da partícula líquida (g/cm³);

d é o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula (cm);

η é a viscosidade do líquido ($\eta = \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$). A viscosidade da água à temperatura ambiente é de 10^{-2} p.

Então, o que se está medindo, na realidade, é o diâmetro aparente da partícula, ou seja, o diâmetro da esfera de mesmo volume que ela. Esse valor é ideal e pode nem sequer corresponder a nenhuma das dimensões físicas reais da partícula, conforme mostra a Fig. 1.21. A Tab. 1.1 compara os diâmetros hidráulicos de partículas cilíndricas de

diferentes relações altura (h) / diâmetro (D).

A primeira classe de partículas são partículas planas, como as de mica ou caulinita. A última são partículas longas, como as de amianto. Todas elas, entretanto, no peneiramento teriam o mesmo diâmetro (20 mm) e na classificação, o diâmetro mostrado na última coluna da tabela!

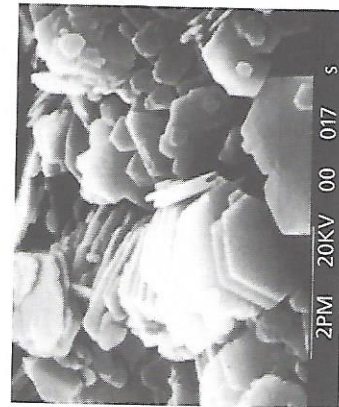


Fig. 1.21 Partículas de caulinita

Tab. 1.1 DIÂMETROS EQUIVALENTES PARA CILINDROS DE DIFERENTES RELAÇÕES h/D

h/D	D	h	diâmetro equivalente
0,01/1	20 mm	0,2 mm	4,9 mm
0,1/1	20 mm	2 mm	10,6 mm
0,2/1	20 mm	4 mm	13,4 mm
0,5/1	20 mm	10 mm	18,2 mm
1/1	20 mm	20 mm	22,9 mm
2/1	20 mm	40 mm	28,8 mm
5/1	20 mm	100 mm	39,1 mm
10/1	20 mm	200 mm	49,3 mm
20/1	20 mm	400 mm	62,1 mm

Fonte: Rawle (s.d.).

O equipamento Malvern trabalha por outro princípio: prepara-se uma polpa com a amostra a analisar em água, álcool ou outro líquido adequado, e bombeia-se a polpa para uma câmara. Essa câmara é atravessada por um fluxo de raios laser. Quando eles encontram uma partícula, mudam de direção e produzem uma sombra com a forma e as dimensões da partícula projetada. Uma célula fotoelétrica recebe o fluxo de raios laser e um analisador de imagens transforma essa informação em dados quantitativos – diâmetros de partículas –, conta os números de diferentes diâmetros e os totaliza. Como o movimento na célula é turbulento, a partícula sofre rotações durante sua passagem diante da célula fotoelétrica. Como consequência, não há a prevalência de um dos diâmetros da partícula, e o resultado da medida é a média aritmética de todos os diâmetros de cada partícula. Uma medida, portanto, totalmente distinta das anteriores.

Assim, o resultado dá medida de tamanho de partículas em Tratamento de Minérios depende do processo de medida. Comparando grosseiramente, uma mesma partícula medida pelos três processos descritos forneceria os seguintes resultados:

microscopia/réguia – média das duas maiores dimensões: 1,4;

peneiramento – segunda maior dimensão: 1,0; classificação/sedimentação – diâmetro hidráulico: 0,9.

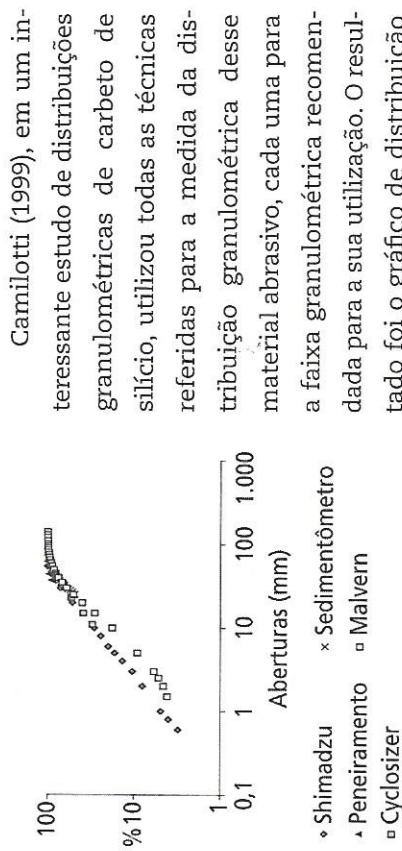
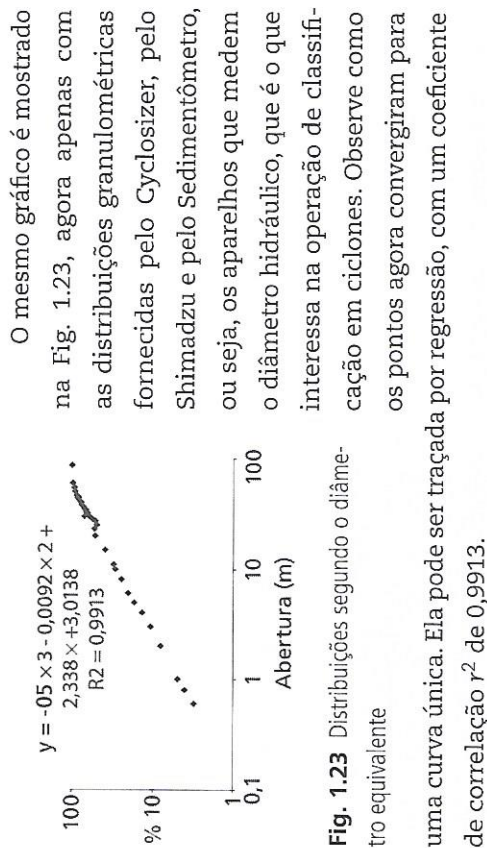


Fig. 1.22 Resultados experimentais de análise granulométrica de SiC outras porque o parâmetro de medida não é o mesmo.



Em processos de medida de distribuição granulométrica por sedimentação, existe um efeito perturbador, que é o do peso específico (densidade) da partícula. Note que na equação de Stokes, a velocidade terminal é função de ρ_s , a densidade do sólido. Assim, numa população com partículas de densidades diferentes, as partículas mais pesadas sedimentarão mais depressa, ou seja, como se fossem mais grossas que

as partículas leves de mesmo diâmetro. Isso não acontece no peneiramento nem no Malvern. Gaudin calculou a relação entre as velocidades terminais de esferas de diferentes pares de minerais (sedimentação livre, isto é, em água e longe das bordas da vasilha) (Tab. 1.2).

Tab. 1.2 VELOCIDADES TERMINAIS DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS DE DIFERENTES ESPÉCIES MINERAIS

Mineral	ρ específico	Mineral	ρ específico	$\frac{v}{v_0} = 1$	$\frac{v}{v_0} = 0,03$	$\frac{v}{v_0} = 0,01$	$\frac{v}{v_0} = 0,005$
Ouro	17	Quartzo	2,65	9,70	6,91	4,38	3,11
Galena	7,5	Quartzo	2,65	3,94	3,20	2,44	1,98
Cassiterita	6,9	Quartzo	2,65	3,57	2,95	2,29	1,89
Hematita	5,2	Quartzo	2,65	2,55	2,22	1,84	1,60
Esfalerita	4,1	Quartzo	2,65	1,88	1,71	1,51	1,37
Rodocrosita	3,5	Quartzo	2,65	1,51	1,42	1,30	1,23
Ardósia	2,7	Antracito	1,7	2,43	2,13	1,78	1,56
Ardósia	2,5	Carvão	1,3	5,00	3,94	2,85	2,24

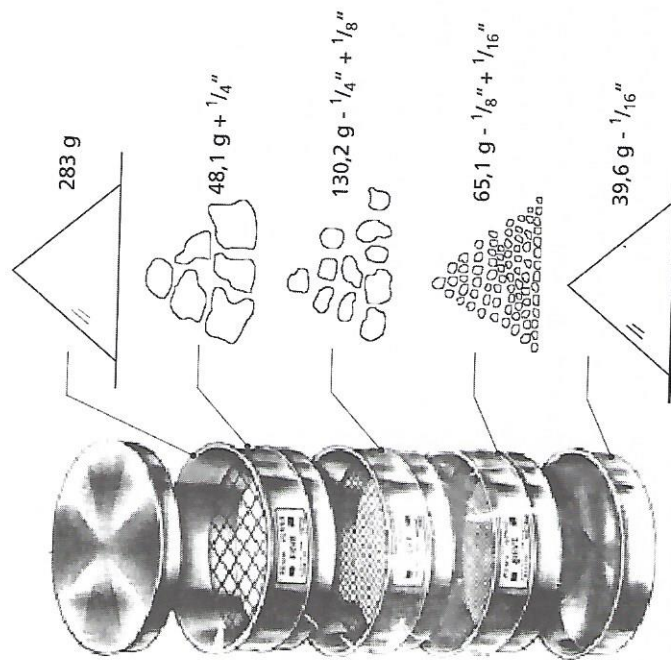
Outra consideração que é preciso ter em mente é que em Tratamento de Minérios não se trabalha nunca com partículas individuais, mas sempre com populações de partículas. Assim, a medida direta de tamanhos individuais é substituída pela medida de frequências relativas de partículas dentro de intervalos de tamanhos. O resultado obtido passa, então, a ser o histograma dos tamanhos, ou seja, a frequência relativa com que os diferentes tamanhos – entre um limite superior e um limite inferior (que pode ser zero) – estão presentes na população.

Isso pode ser feito, por exemplo, ao se anotar num papel as frequências dos diâmetros medidos no microscópio. Na prática do Tratamento de Minérios, utilizam-se séries padronizadas de peneiras (no caso, a série Tyler) ou uma série de ciclones, com diâmetros de corte conhecidos. A sedimentação em provetas está praticamente

bandonada, e hoje é substituída pelo Sedigraph e por métodos instrumentais semelhantes.

O procedimento para a análise granulométrica por peneiramento ilustrado na Fig. 1.24. As peneiras escolhidas são colocadas uma sobre outra, em ordem decrescente de abertura da tela. Elas têm um encaixe, de modo que não haja perdas de material, uma tampa e um fundo. Uma massa de minério suficiente para fornecer massas significativas em cada tela e insuficiente para deformar as telas em decorrência do seu peso é colocada na tela maior. O conjunto é levado a um dispositivo prador e lá deixado vibrando por um tempo suficiente para que haja a separação das partículas de diferentes tamanhos.

A título de ilustração, imagine que a massa seca alimentada ao conjunto anteriormente descrito tenha sido de 283 g. Ficaram retidas na tela de $\frac{1}{4}$ " 48,1 g - passaram 234,9 g por ela. Estas 234,9 g são



1.24 Procedimento para análise granulométrica por peneiramento

apresentadas à tela de $\frac{1}{8}$ ", onde ficam retidas 130,2 g e passam 104,7 g. Estas são apresentadas à tela de $\frac{1}{16}$ ", onde ficam retidas 65,1 g e passam 39,6 g. O resultado experimental é mostrado na Tab. 1.3. Note que o método não informa sobre o tamanho da maior partícula presente na amostra.

Tab. 1.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Abertura	1/4"	1/8"	1/16"	Fundo	Total
Massa retida (g)	48,1	130,2	65,1	39,6	283,0
Massa passante (g)	234,9	104,7	39,6	-	-

O valor da massa, 283 g, é um número incômodo e não permite a comparação imediata com outras distribuições de tamanhos. Por isso, é de toda conveniência expressar distribuições de tamanhos em porcentagens. A Tab. 1.4 mostra os mesmos resultados expressos dessa maneira.

Tab. 1.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS TRATADOS

Abertura	1/4"	1/8"	1/16"	Fundo	Total
Porcentagem retida	17,0	46,0	23,0	14,0	100,0
Porcentagem passante	83,0	37,0	14,0	-	-

As porcentagens retidas indicam a quantidade de material que ficou retida entre cada duas telas sucessivas, exceto para os valores das extremidades. Representando passante por - e retido por +, $-2+1$ significa passante em 2" e retido em 1". Na realidade, os resultados da Tab. 1.4 estariam expressos de maneira mais correta conforme a Tab. 1.5.

Tab. 1.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Fração	+1/4"	-1/4 + 1/8"	-1/8 + 1/16"	-1/16"	Total
% retida	17,0	46,0	23,0	14,0	100,0

Com muita frequência, é interessante conhecer outras expressões da mesma distribuição, como porcentagens retidas acumuladas, o que é mostrado na Tab. 1.6.

Tab. 1.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Abertura	1/4"	1/8"	1/16"	Fundo
% retida acumul.	17,0	63,0	86,0	100,0

Muito frequentemente, esses resultados também são expressos na forma de gráficos. Existem certas fórmulas de distribuição a que algumas distribuições granulométricas se adaptam muito bem: logarítmicas, normais (de Gauss, ou de probabilidade) e de Rosin-Rammler.

Note que, nas telas utilizadas para a análise granulométrica, há uma relação de progressão geométrica. Isso é uma convenção utilizada há muito tempo, estabelecida por um fabricante de telas chamado W.S. Tyler. No seu tempo, cada fabricante produzia telas com a abertura medida entre os centros dos fios. Se ele recebesse um arame de diâmetro diferente, já resultaria uma tela com abertura diferente. Fazia-se necessário estabelecer uma regra a ser seguida por todos os fabricantes, de modo que as aberturas das telas tivessem sempre os mesmos tamanhos. Tyler, então, definiu que, a partir de uma tela-base, com abertura a , as peneiras de malhas maiores teriam aberturas de, respectivamente, $a\sqrt{2}$, $a\sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2}$ etc. As peneiras de malhas menores teriam aberturas de, respectivamente, $a/\sqrt{2}$, $a/\sqrt{2} \times \sqrt{2}$, $a/\sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2}$ etc. Resultou então, uma série, denominada série Tyler completa, que é a seguinte:

$$\dots, 2a\sqrt{2}, 2a, a\sqrt{2}, a, a/\sqrt{2}, a/2, a/2\sqrt{2}, \dots$$

Esta série é reproduzida na Tab. 1.7, bem como outras séries normalizadas. Cada tela é a diagonal do quadrado que é a tela anterior, como mostra a Fig. 1.25.

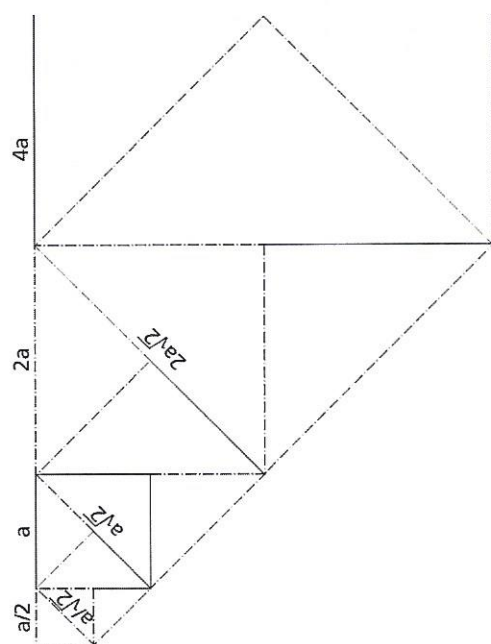


Fig. 1.25 Série Tyler

O número que designa a peneira da série Tyler é o número de aberturas que se contam no comprimento de 1" de tela. Não é o número de aberturas em 1 sq.in. (polegada quadrada), nem a abertura da malha 20 é 1"/20, pois é necessário descontar a espessura dos 20 fios metálicos utilizados.

Geralmente não se utiliza a série Tyler completa, mas sim uma série em que se pula sempre uma peneira intermediária. A relação entre a malha e a malha seguinte é sempre $a/2$. Por exemplo, a série de peneiras n° 6, 10, 20, 35, 65, 150 e 270 obedece a essa relação, bem como a série 3", 1½", 3/4", 3/8", 4#, 8#, 14#, 28#, 48#, 100#, 200# e 400#.

1.3.8 Área de superfície

A área de superfície (surface area) ou área específica, muitas vezes chamada erroneamente de superfície específica (a medida é a área; superfície é o ente geométrico que é medido pela área), é o quociente da área de uma partícula pelo seu volume (ou pela sua massa). Os exercícios contribuirão para você firmar bem esse conceito e verificar que, conforme um sólido é pulverizado, a sua área de superfície aumenta.

Essa circunstância é muito importante para o Tratamento de Minérios, pois, aumentando as áreas, aumentam as cargas elétricas na superfície das partículas, enquanto que, diminuindo o volume das partículas, diminui a massa individual de cada uma delas. Quanto mais finas as partículas, mais elas se tornam sensíveis à ação de suas cargas de superfície, com consequências extremamente importantes, por exemplo, na floculação e no espessamento. Na flotação, os reagentes são adsorvidos na superfície; portanto, quanto maior a área das superfícies das espécies minerais, maior a avides pelos reagentes. Isso ajuda a compreender o efeito nocivo das lamas no processo de flotação.

Existem vários processos de medida de área de superfície: adsorção de gases, permeametria Blaine, permeametria Fischer etc. Na indústria do cimento e na pelotização de minérios de ferro, a permeametria Blaine é o parâmetro mais importante e funciona, na prática, como mais uma medida de granulometria.

Tab. 1.7 ABERTURAS DE TELAS NORMALIZADAS

Malha (mm)	Tyler	ASTM/ASA/USSSS	ABNT (EB 22-R)
101,6	-	4"	-
88,9	-	3 1/2 "	-
76,2	-	3"	76
63,8	-	2 1/2 "	-
50,8	-	2"	50
44,4	-	1 3/4 "	-
38,1	-	1 1/2 "	38
31,7	-	1 1/4 "	-
25,4	-	1"	25
19,1	-	3/4"	19
15,9	-	5/8"	-
12,7	-	1/2"	-
9,52	-	3/8"	9,5
7,93	-	5/16"	-
6,35	-	1/4"	-
5,66	3,5	3,5	-

Tab. 1.7 ABERTURAS DE TELAS NORMALIZADAS (CONT.)

Malha (mm)	Tyler	ASTM/ASA/USSSS	ABNT (EB 22-R)
4,76	4	4	4,8
4	5	5	-
3,36	6	6	-
2,83	7	7	-
2,38	8	8	2,4
2	9	10	2
1,68	10	12	-
1,41	12	14	-
1,19	14	16	1,2
1	16	18	-
0,84	20	20	-
0,71	24	25	-
0,59	28	30	0,6
0,50	32	35	-
0,42	35	40	0,42
0,35	42	45	-
0,297	48	50	0,3
0,250	60	60	-
0,210	65	70	-
0,177	80	80	-
0,149	100	100	-
0,125	115	120	-
0,105	150	140	-
0,088	170	170	-
0,074	200	200	0,075
0,062	250	230	-
0,053	270	270	-
0,044	325	325	-
0,037	400	400	-

1.3.9 Densidades

Densidade é a relação massa/volume de um corpo. Um cubo de 1 ml de água, ao nível do mar, pesa 1 g. Sua densidade é,

portanto, de 1 g/ml. Já um cubo de ouro pesa 19,3 g. Sua densidade é, portanto, 19,3 g/ml ou 19,3 vezes a da água. Existem, por isso, duas expressões tecnicamente corretas para a densidade: 19,3 g/ml ou kg/l ou t/m³, chamada densidade absoluta, ou apenas 19,3, sem nenhuma unidade, chamada densidade relativa (à densidade da água).

O conceito de densidade tem de considerar se estamos tratando de uma partícula individual ou de um conjunto de partículas. No conjunto de partículas, há o volume de vazios entre uma partícula e outra, de modo que é necessário distinguir:

- ◆ densidade real (*specific weight*), que é a densidade real ou relativa das partículas individuais, ou da sua média. Na prática, é a massa das partículas dividida pelo seu volume;
- ◆ densidade aparente (*bulk density*), que considera o volume das partículas mais o volume dos vazios.

Exercícios resolvidos

1.1 Em 100 g de uma polpa a 10% de sólidos, quantos g de sólidos existem? E de água?

Solução:

Em Tratamento de Minérios, diluições de polpa são sempre expressas em peso, a menos que explicitamente mencionado em contrário! Assim, 100 g de polpa, das quais 10% são sólidos, significa que 10 g são de sólidos e 90 g são de água.

1.2 Mesma pergunta para 4,5 t/h de sólidos.

Solução:

Não muda nada, exceto que a unidade agora não é mais de massa, mas de vazão. Se 4,5 t/h de sólidos correspondem a 10% de uma polpa, a massa total da polpa (sólidos + água) será:

$$\begin{array}{rcl} 4,5 \text{ t/h} & - & 10\% \\ x & - & 100\% \end{array} \quad \therefore x = 4,5 \times \frac{100}{10} = \frac{4,5}{0,1} = 45 \text{ t/h de polpa.}$$

Se nessas 45 t/h, 4,5 são de sólidos, a vazão de água será 45 – 4,5 = 40,5 t/h.

1.3 Mesma pergunta para 150 g de polpa.

Solução:

Analogamente, $150 \times 10/100 = 15$ g de sólidos
 $150 - 15 = 135$ g de água.

1.4 Idem a 1.2, exceto que agora a polpa tem o dobro da porcentagem de sólidos (20%).

Solução:

$$\begin{aligned} 4,5/0,2 &= 22,5 \text{ t/h de polpa} \\ 22,5 - 4,5 &= 18 \text{ t/h de água} \end{aligned}$$

1.5 Qual a porcentagem de sólidos em volume (v/v), de uma polpa a 10%? A densidade do sólido é 3,0.

Solução:

100 g de polpa terão 90 g de água e 10 g de sólidos. Os volumes ocupados serão:

$$\begin{aligned} \text{volume de água} &= 90/1 = 90,0 \text{ ml de água} \\ \text{volume de sólidos} &= 10/3 = 3,3 \text{ ml de sólidos} \\ \text{volume de polpa} &= 93,3 \text{ ml de polpa} \\ \text{Portanto, \% sólidos v/v} &= 3,3/93,3 = 0,035 \text{ ou } 3,5\% \text{ v/v.} \end{aligned}$$

1.6 Quanta água é preciso adicionar a uma polpa a 60% de sólidos para levá-la a 35%? A vazão considerada é de 300 t/h de sólidos.

Solução:

$$35\%: 300/0,35 = 857,1 \text{ t/h polpa}$$

$$857,1 \text{ t/h polpa} - 300,0 \text{ t/h sólidos} = 557,1 \text{ t/h água}$$

$$60\%: 300/0,60 = 500 \text{ t/h polpa}$$

$$500 \text{ t/h polpa} - 300 \text{ t/h sólidos} = 200 \text{ t/h água}$$

$$\text{Portanto, água a adicionar} = 557,1 - 200 = 357,1 \text{ t/h água} = 357,1 \text{ m}^3/\text{h água}.$$

1.7 Qual o volume de polpa do exercício anterior, se o sólido for calcário (densidade 2,65)?

Solução:

$$35\%: 300 \text{ t/h sólidos}/2,65 = 113,2 \text{ m}^3/\text{h sólidos}$$

$$113,2 + 557,1 = 670,3 \text{ m}^3/\text{h de polpa}.$$

$$60\%: 300 \text{ t/h sólidos} = 113,2 \text{ m}^3/\text{h sólidos}$$

$$113,2 + 200 = 313,2 \text{ m}^3/\text{h de polpa}.$$

1.8 Idem ao exercício 1.7 para, respectivamente, 8% e 6% de sólidos. O sólido agora é carvão mineral (densidade 1,7).

Solução:

$$8\%: 300/0,08 - 300 = 3.450 \text{ t/h água} = 3.450 \text{ m}^3/\text{h água}$$

$$300/1,7 = 176,5 \text{ m}^3/\text{h carvão}$$

$$3.450 + 176,5 = 3.626,5 \text{ m}^3/\text{h de polpa}$$

$$6\%: 300/0,06 - 300 = 4.700 \text{ t/h água} = 4.700 \text{ m}^3/\text{h água}$$

$$300/1,7 = 176,5 \text{ m}^3/\text{h carvão}$$

$$4.700 + 176,5 = 4.876,5 \text{ m}^3/\text{h polpa}$$

Note que no exercício 1.7, para passar de 60 para 35% de sólidos (variação de 25%), foi necessário adicionar 357,1 m³/h. No exercício

1.8, para passar de 6 para 8% (variação de apenas 2%), foi necessário adicionar 1.250 m³/h!

1.9 Qual é a umidade base úmida de um material com 10% de umidade base seca?

Solução:

$$\text{umidade base seca} = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de sólidos}} \times 100$$

Admitindo 100 g de sólidos, teremos: 10 g água e 110 g de sólidos + água.

$$\text{umidade base úmida} = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de sólidos} + \text{massa de água}} \times 100 = \frac{10}{110} \times 100 = 9,09\%$$

1.10 Disponimos das informações apresentadas na Tab. 1.8, sobre uma dada operação unitária.

Tab. 1.8

	vazão de sólidos (t/h)	% sólidos	% Fe	vazão de polpa (t/h)	vazão de água (m ³ /h)
alimentação	40	48	48		
concentrado	25		64		
rejeito		30		50	

Complete a tabela.

Solução:

$$a] \text{ vazão de rejeito} = 40 - 25 = 15 \text{ t/h}$$

$$b] \text{ Fe contido no rejeito} = \text{Fe na alimentação} - \text{Fe no concentrado} \\ = 40 \times 0,48 - 25 \times 0,64 \\ = 3,2 \text{ t/h}$$

$$\text{Então, \% Fe rejeito} = (3,2/15) \times 100 = 21,3\% \text{ Fe}.$$

- c] vazão de polpa da alimentação = 40/0,48 = 83,3 t/h
 vazão de polpa do rejeito = 15/0,3 = 50,0 t/h
 vazão de polpa do concentrado = 83,3 – 50,0 = 33,3 t/h
 Como a vazão de sólidos do concentrado = 25 t/h, a % sólidos do concentrado é $(25/33,3) \times 100 = 75,1\%$.
- d] vazão de água da alimentação = 83,3 – 40 = 43,3 m³/h
 vazão de água do concentrado = 33,3 – 25 = 8,3 m³/h
 vazão de água do rejeito = 50,0 – 15 = 35,0 m³/h

A Tab. 1.8 fica, portanto, conforme se observa na Tab. 1.9.

Tab. 1.9

	vazão de sólidos (t/h)	% sólidos	% Fe	vazão de polpa (t/h)	vazão de água (m ³ /h)
alimentação	40,0	48,0	48,0	83,3	43,3
concentrado	25,0	75,1	64,0	33,3	8,3
rejeito	15,0	30,0	21,3	50,0	35,0

Note que algumas colunas (vazão de sólidos, vazão de polpa e vazão de água) são aditivas, porque são massas ou volumes, e para eles vale a Lei de Lavoisier. As respectivas somas têm que fechar sempre, como se fosse um balanço contábil. Esse tipo de tabela é chamado de balanço de massas, metalúrgico e de água.

1.11 Calcular as recuperações de massa e metalúrgica do exercício 1.10 aplicando a regra dos dois produtos.

Solução:

A “regra dos dois produtos” nada mais é do que a expressão do balanço metalúrgico. Vamos deduzi-la.

Seja uma alimentação, caracterizada por uma vazão m_a e por um teor t_a , e um concentrado e um rejeito, caracterizados, respectivamente,

por vazões m_c e m_r e teores t_c e t_r . As expressões dos balanços de massas e metalúrgico são, respectivamente:

$$m_a = m_c + m_r$$

$$m_a \times t_a = m_c \times t_c + m_r \times t_r$$

Dividindo a segunda equação por m_a , fica:

$$\frac{m_a}{m_a} \times t_a = \frac{m_c}{m_a} \times t_c + \frac{m_r}{m_a} \times t_r$$

Explicitando m_r na primeira equação e substituindo na segunda, fica:

$$t_a = \frac{m_c}{m_a} \times t_c + \frac{m_a + m_c}{m_a} \times t_r$$

$$t_a = \frac{m_c}{m_a} \times t_c + \frac{m_a}{m_a} \times t_r - \frac{m_c}{m_a} \times t_r$$

$$t_a = \frac{m_c}{m_a} (t_c - t_r) + t_r$$

$$t_a - t_r = \frac{m_c}{m_a} (t_c - t_r)$$

$$\therefore \frac{m_c}{m_a} = \text{recuperação} = \frac{t_a - t_r}{t_c - t_r}$$

De maneira semelhante, demonstra-se que:

recuperação metalúrgica = recuperação $\times \frac{\text{teor do concentrado}}{\text{teor da alimentação}}$ ou,

$$\text{recuperação metalúrgica} = \frac{t_a - t_r}{t_c - t_r} \times \frac{t_c}{t_a}$$

Essas duas fórmulas constituem uma das ferramentas mais úteis de que o tratamentista dispõe.

O exercício fica:

$$\text{recuperação} = \frac{48 - 21,3}{64 - 21,3} = \frac{26,7}{42,7} = 0,625 \text{ ou } 62,5\%$$

$$\text{recuperação metalúrgica} = \frac{48 - 21,3}{64 - 21,3} \times \frac{64}{40} = 0,83 \text{ ou } 83\%$$

1.12 Usando a representação gráfica abaixo, refaça o exercício 1.10.

Alimentação			
t/h sólidos	40	83,3	t/h polpa
% sólidos	48	43,3	m ³ /h água
densidade	-	48	teor do elemento útil

Solução:

A operação unitária pode ser representada graficamente como na Fig. 1.26.

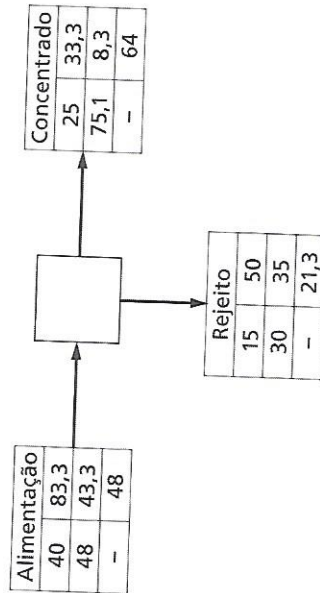


Fig. 1.26

1.13 Com a mesma técnica, complete os balanços seguintes (Figs. 1.27A-D)

Os valores que aparecem ou deixam de aparecer nas bandeiras dos fluxogramas não são mero capricho de um professor chato. Eles traduzem uma realidade industrial – a de que nem sempre é possível tomar amostras ou medidas de vazão em todos os pontos de um circuito. Outros valores, especialmente de porcentagens de sólidos, traduzem parâmetros de processo que, por isso, são impositivos. Ainda mais, outros valores medidos são pouco confiáveis, razão pela qual precisam ser desprezados.

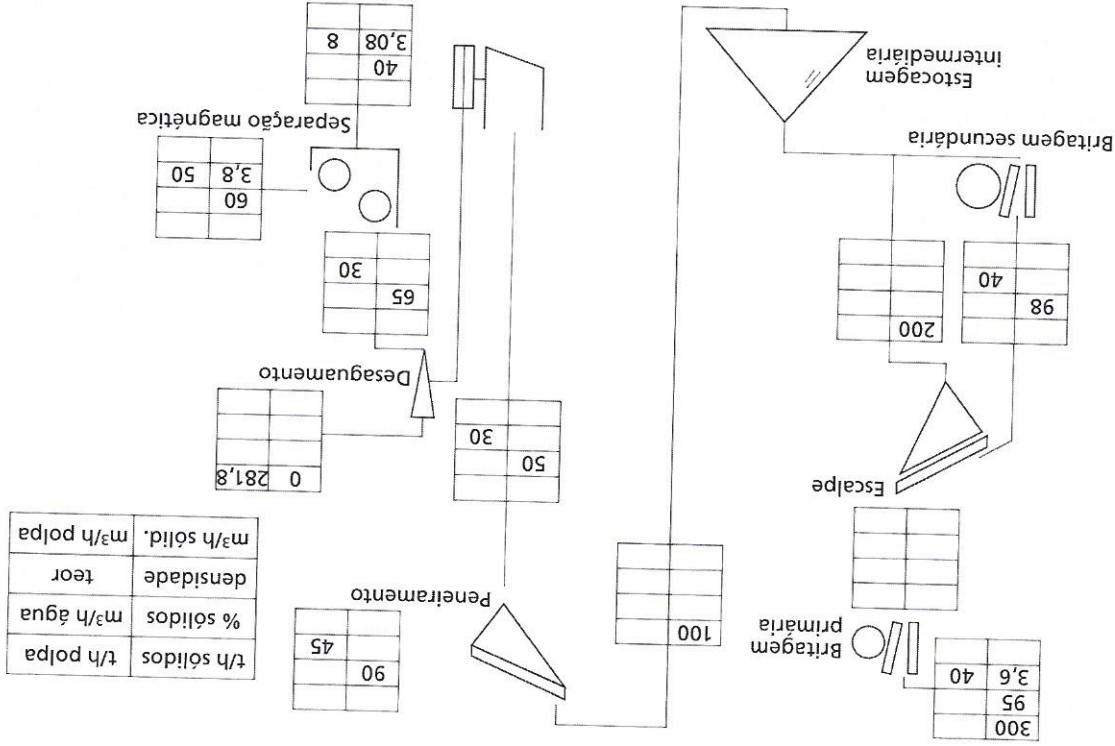


Fig. 1.27A

Solução:

1º tempo

Inicialmente vamos resolver os balanços de massas e de água. Devemos começar sempre pelo mais fácil ou mais óbvio, procurando

apenas completar as informações a serem apresentadas em cada bandeira. Os algoritmos arábicos ao lado das bandeiras, entre parênteses, indicam a sequência seguida para preenchê-las.

(1) Alimentação do circuito:

$$300/0,95 = 315,8$$

$$315,8 - 300 = 15,8$$

(2) Produto do britador: tudo o que entra no britador tem de sair por aqui. Portanto, esta bandeira tem de ser absolutamente igual à bandeira da alimentação (1).

(3) e (4) Produtos do peneiramento:

$$300 - 200 = 100$$

$$100/0,98 = 102$$

$$102 - 100 = 2$$

$$15,8 - 2 = 13,8$$

$$200 + 13,8 = 213,8$$

$$(200/213,8) \times 100 = 93,6\%$$

(5) Criamos uma bandeira auxiliar representando a alimentação da pilha. Essa bandeira não existia no fluxograma original; porém, como ela é de nossa conveniência, nós a abrimos quando e onde quisermos. (5) será a soma das bandeiras (4) e (3) ou, o que dá no mesmo, será igual às bandeiras (1) e (2).

(6) Após a pilha, a vazão de sólidos mudou. A vazão indicada é exatamente 1/3 da vazão antes da pilha. É o caso, por exemplo, de a britagem e a rebitagem trabalharem apenas um turno diário, e o peneiramento e separação magnética trabalharem três turnos. Todas as características permanecem as mesmas (% sólidos, densidade e teor); apenas as vazões é que variam.

$$100/0,95 = 105,3$$

$$105,3 - 100 = 5,3$$

(7) e (8) Como não dispomos dos valores de vazão para fechar os balanços, mas temos os teores da alimentação e dos produtos, pode-se fazê-lo pela regra dos dois produtos.

$$R = \frac{t_a - t_r}{t_c - t_r} = \frac{40 - 30}{45 - 30} = 0,677 = 67,7\%$$

Portanto, 67,7% da alimentação vai para o produto de maior teor; no caso, o oversize.

$$100 \times 0,667 = 66,7$$

$$100 - 66,7 = 33,3$$

$$33,3/0,5 = 66,6$$

$$66,6 - 33,3 = 33,3$$

$$66,7/90 = 74,1$$

$$74,1 - 66,7 = 7,4$$

Verificação do balanço de águas: $7,4 + 33,3 \neq 5,3$!

O balanço de águas não fecha! Escândalo! Como a Lei de Lavoisier ainda não foi revogada, a conclusão a que podemos chegar é de que entrou água no peneiramento. A quantidade de água adicionada, então, é a necessária para fechar o balanço:

$$7,4 + 33,3 - 5,3 = 35,4 \text{ m}^3/\text{h}, \text{ adicionados na peneira.}$$

$$(9) \text{ e } (10) \quad 33,3 - 0 = 33,3$$

$$281,8 - 0 = 281,8$$

$$0/281,8 = 0$$

(o teor, obviamente, também é 0)

$$33,3/0,65 = 51,2$$

$$51,2 - 33,3 = 17,9$$

Verificação do balanço de águas: $281,8 + 17,9 - 33,3 \neq 0$!

Portanto, entrou água na operação de cicloneagem (na caixa de bomba): $281,8 + 17,9 - 33,3 = 266,4 \text{ m}^3/\text{h}$.

Vamos então, apenas a título de curiosidade, criar uma bandeira para representar a alimentação da ciclonagem:

$$(11) \quad 266,4 + 33,3 = 299,7 = 281,8 + 17,9$$

$$299,7 + 33,3 = 333,0$$

$$33,3/333,0 = 10\%$$

O teor, obviamente, é o mesmo da bandeira (7).

(12) e (13) Novamente, somos obrigados a utilizar a regra dos dois produtos:

$$R = \frac{30 - 8}{50 - 8} = 0,52 \text{ ou } 52\%$$

$$0,52 \times 33,3 = 17,4 \text{ t/h} = \text{vazão de sólidos no concentrado (fluxo de maior teor)}$$

$$33,3 - 17,4 = 15,9$$

$$15,9/0,4 = 39,8$$

$$39,8 - 15,9 = 23,9$$

$$17,4/0,6 = 29,0$$

$$29,0 - 17,4 = 11,6$$

Verificação do balanço de águas: $23,9 + 11,6 - 17,9 \neq 0$!

Portanto, $23,9 + 11,6 - 17,9 = 17,6 \text{ m}^3/\text{h}$ água adicionados no separador magnético (ou na sua alimentação).

2º tempo: cálculo do balanço metalúrgico

Como não existe, nas bandeiras, uma casa para as t/h do elemento ou substância útil contidas em cada fluxo, anotaremos esse valor ao lado da casa do teor.

(1) $300 \times 0,4 = 120$ - é o mesmo valor que tem de aparecer em (2) e (5).

$$(3) \quad 100 \times 0,4 = 40$$

$$(4) \quad 120 - 40 = 80$$

$$(80/200) \times 100 = 40$$

$$(6) \quad 100 \times 0,4 = 40$$

(7) $33,3 \times 0,3 = 10,0$ - é o mesmo valor de (10) e (11).

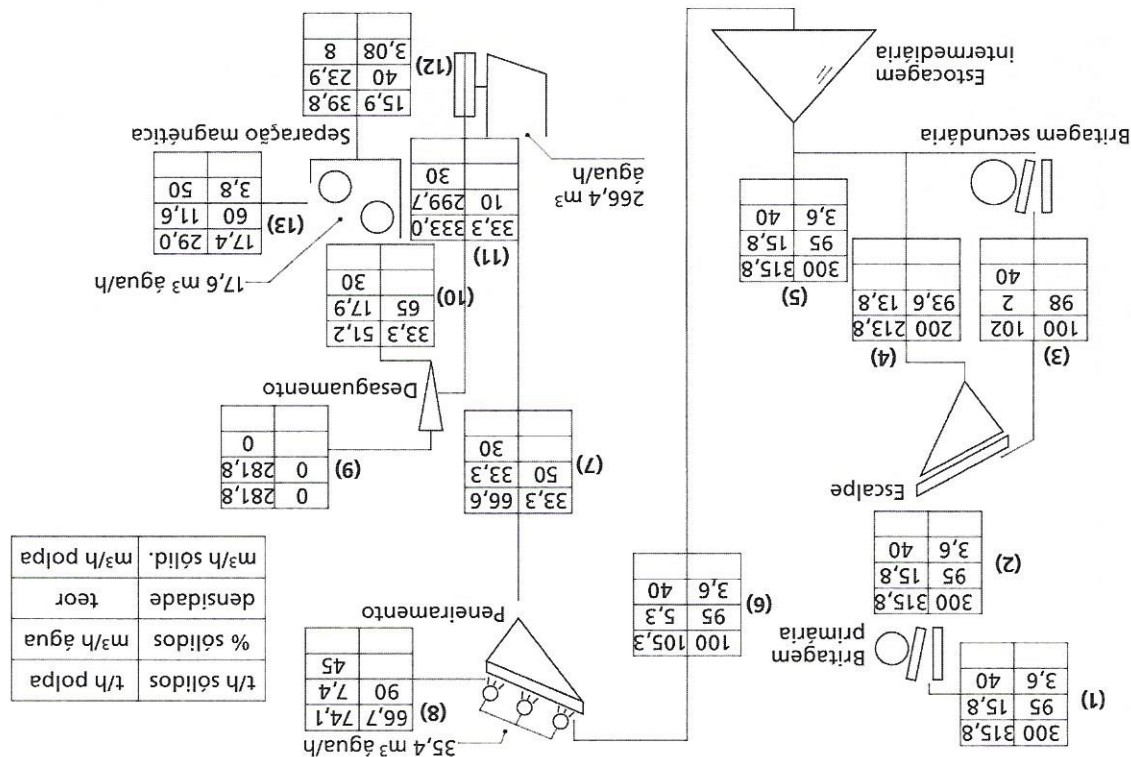


Fig. 1.27B

$$(8) \quad 67,7 \times 0,45 = 30,5$$

Verificação do balanço metalúrgico no peneiramento:

$$30,5 + 10,0 \neq 40,0$$

Há aqui uma diferença de 0,5 t/h. Isto é um erro acumulado dos sucessivos arredondamentos dos valores analíticos. Se aceitarmos 30% como o valor correto, o teor do oversize terá de ser:

$$\frac{100 \times 0,4 - 33,3 \times 0,3}{67,7} \times 100 = 44,3\%$$

$$(12) 15,9 \times 0,08 = 1,3$$

$$(13) 17,4 \times 0,5 = 8,7$$

Verificação do fechamento do balanço metalúrgico na separação magnética: $10 = 1,3 + 8,7$.

3º tempo: cálculo dos balanços volumétricos

$$\text{densidade} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

onde:

$$\text{volume} = \frac{\text{massa}}{\text{densidade}} \quad (\text{no caso, densidades reais})$$

volume de polpa = volume dos sólidos + volume da água

$$(1) 300/3,6 = 83,3$$

$$83,3 + 15,8 = 99,1$$

Esses valores se repetem em (2) e (5).

$$(6) 100/3,6 = 27,8$$

$$27,8 + 5,3 = 33,1$$

$$(12) 15,9/3,08 = 5,2$$

$$5,2 + 23,9 = 29,1$$

$$(13) 17,4/3,8 = 4,6$$

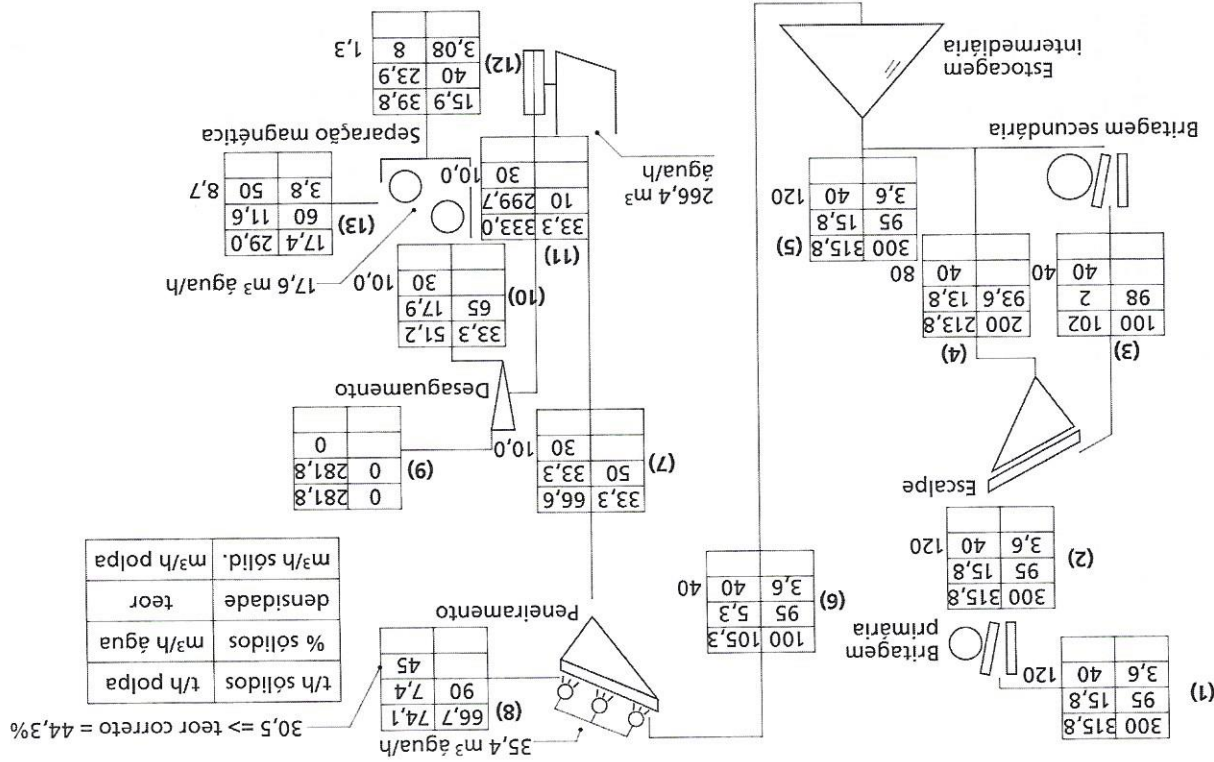
$$4,6 + 11,6 = 16,2$$

(10) Na separação magnética, foram adicionados 17,6 m³/h de água. Esse valor não está presente no fluxo (10). Então: vazão de polpa em (10) = $16,2 + 29,1 - 17,6 = 27,7$

$$27,7 - 17,9 = 9,8 = \text{volume dos sólidos}$$

$$\text{densidade dos sólidos} = 33,3/9,8 = 3,4$$

Esse valor é o mesmo de 11 e 7.



(11) $33,3/3,4 = 9,8$ - é o mesmo valor de (7).

$$9,8 + 299,7 = 309,5$$

(7) $9,8 + 33,3 = 43,1$

No peneiramento entram $27,8 \text{ m}^3/\text{h}$ de sólidos e saem no *undersize*

9,8. A vazão volumétrica dos sólidos no *oversize* é, portanto:

$$27,8 - 9,8 = 18,0$$

$$18,0 + 6,4 = 24,4$$

$$66,7/18,0 = 3,7$$

Faltam as bandeiras (9), (3) e (4).

(9) Como o fluxo é só de água, idealmente não existe sólido. Não coloque, entretanto, 0 nas casas correspondentes. Coloque um - que é mais correto. O volume de polpa é o volume de água.

Para (3) e (4), teremos de adotar um volume estimado ("chutar").

Mas como "chutar" dentro do gol? Como estimar um valor coerente?

O tratamentista é frequentemente obrigado a adotar valores arbitrários, estimados por ele mesmo, de acordo com o seu bom senso. Esses valores podem estar errados - e frequentemente estão. O que não se admite é que o engenheiro fuja da responsabilidade de estimá-los, pelo medo de errar.

A solução é, portanto, usar o melhor do seu bom senso e, depois, verificar os cálculos. Se estes estiverem errados, muito provavelmente a fonte do erro será o valor da estimativa, e é aí que a correção deve ser feita.

No nosso caso, essa estimativa é fácil. Note que a densidade aumenta com o teor. Para teores de 40%, temos 4 bandeiras com a mesma densidade 3,6. É esse o valor que foi adotado:

$$100/3,6 = 27,8$$

$$27,8 + 2 = 29,8$$

$$200/3,6 = 55,6$$

$$55,6 + 13,8 = 69,4$$

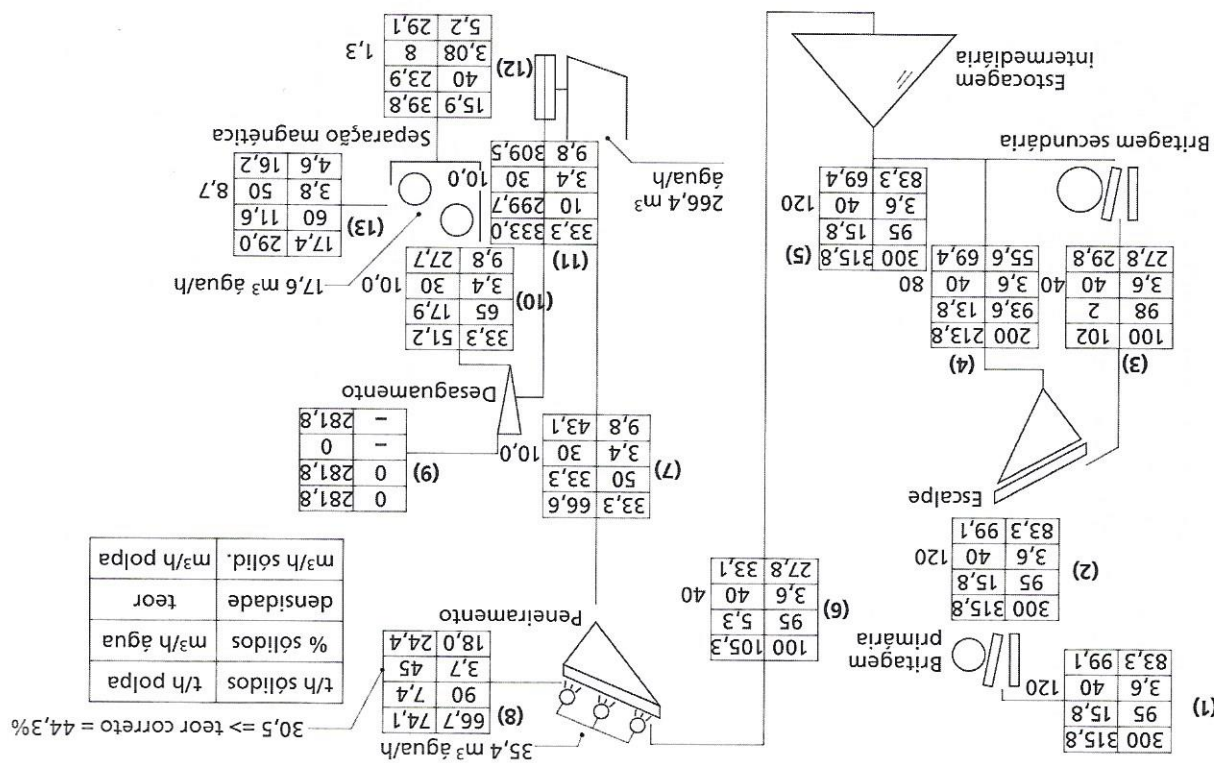


Fig. 1.27D

Verificação do balanço volumétrico: $27,8 + 55,6 = 83,4 \neq 83,3$.

Há, portanto, um erro de $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, que, ou decorre da estimativa adotada, ou de erros acumulados nas operações aritméticas.

Corrigindo a bandeira (4), ela fica:

vazão de sólidos = $83,3 - 27,8 = 55,5$

vazão de polpa = $55,5 + 13,8 = 69,3$

densidade = $\frac{55,5}{200} = 3,6$

O erro é, portanto, de aproximação dos resultados.

1.14 Resolva os balanços dos fluxogramas apresentados nas Figs. 1.28A-C.

Solução:

$$(1) \quad 1.440/1.600 \times 100 = 90$$

$$1.600 - 1.440 = 160$$

$$160/1.440 \times 100 = 11,1 \text{ (umidade base seca)}$$

$$(2) \quad 1.440 - 720 = 720$$

$$720/839,2 \times 100 = 85,8$$

$$839,2 - 720 = 119,2$$

$$119,2/720 \times 100 = 16,6$$

$$(3) \quad 1.600 - 839,2 = 760,8$$

$$720/760,8 \times 100 = 94,6$$

$$760,8 - 720 = 40,8$$

$$40,8/720 \times 100 = 5,7$$

(4) A vazão certamente será diferente de (1). Todos os demais parâmetros são iguais. De (5) é obtida a informação sobre o teor, que é o mesmo que em (4) e (1).

Pode-se, então, fazer o balanço metalúrgico do trecho do fluxograma antes da pila. Como não há janela para ast/h do elemento/substância de interesse, anotamos o valor respectivo debaixo da casa do teor:

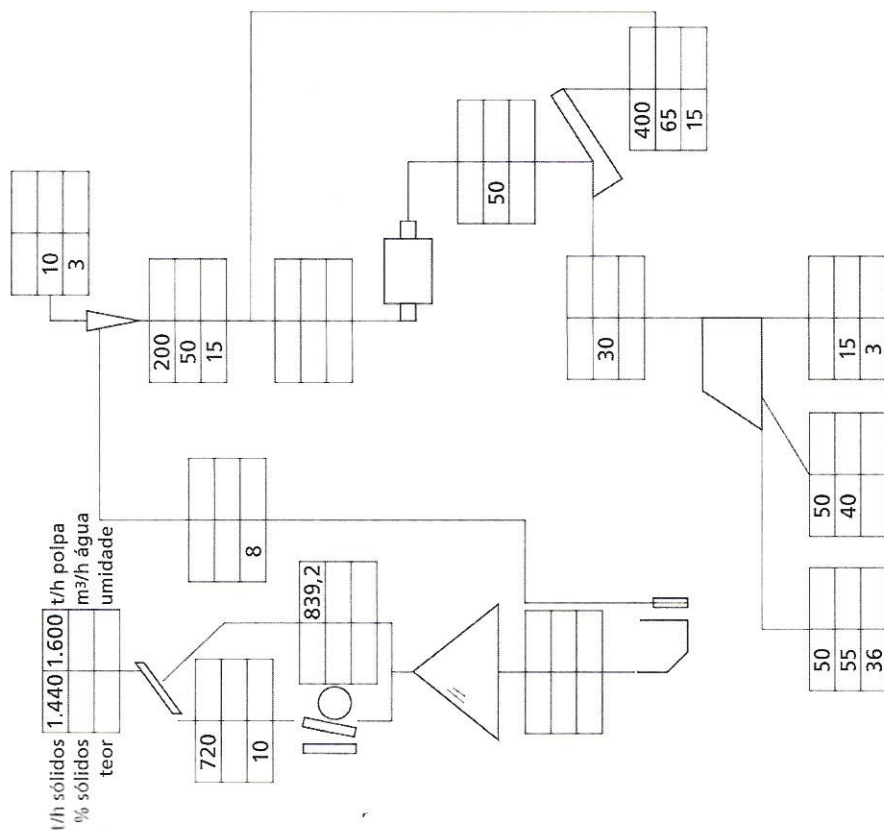


Fig. 1.28A

$$(1) \quad 1.440 \times 0,08 = 115,2$$

$$(3) \quad 720 \times 0,10 = 72,0$$

$$115,2 - 72,0 = 43,2 \text{ t/h em (2) - portanto, } 43,2/720 \times 100 = 6\%.$$

$$(6) \quad 200/0,5 = 400$$

$$400 - 200 = 200$$

Não serão calculadas as umidades acima de 100%, por não reconhecermos significado físico nesse número.

(7) Note que o circuito dentro do polígono tracejado se comporta como uma caixa fechada. Com exceção da % de sólidos, que é

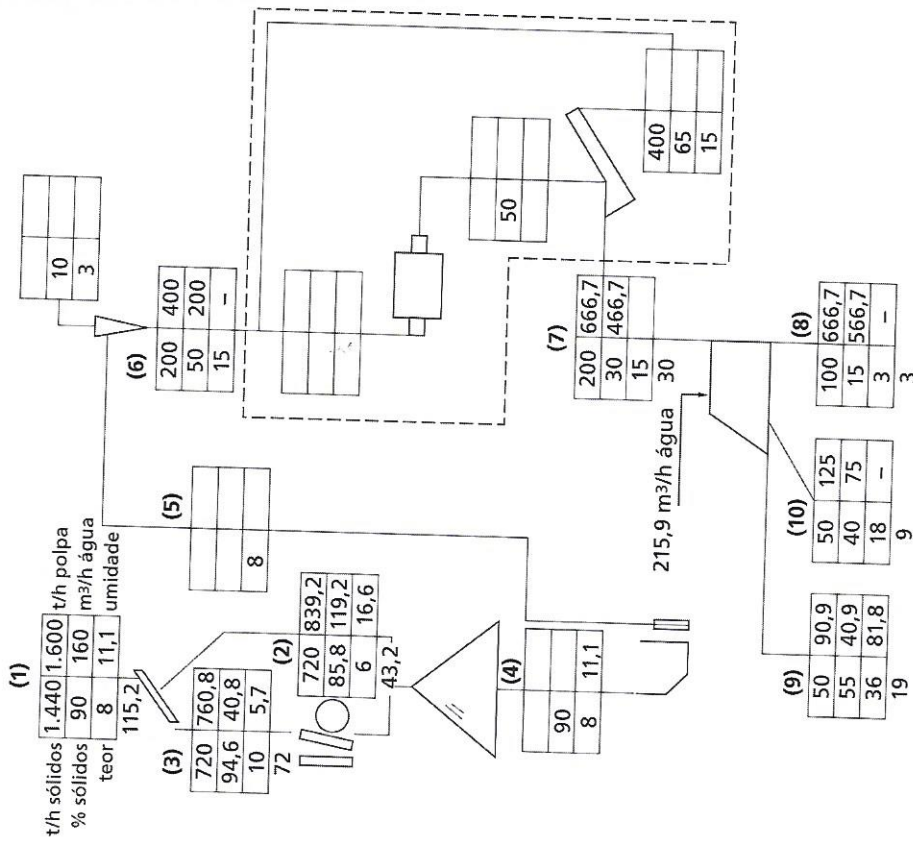


Fig. 1.28B

diferente - na caixa fechada houve adição ou retirada de água
-, os demais parâmetros são iguais.

$$200/0,3 = 666,7$$

$$666,7 - 200 = 466,7$$

$$(8) \quad 200 - 50 - 50 = 100$$

$$100/0,15 = 666,7$$

$$666,7 - 100 = 566,7$$

$$(9) \quad 50/0,55 = 90,9$$

$$90,9 - 50 = 40,9$$

$$(10) \quad 50/0,4 = 125$$

$$125 - 50 = 75$$

$$200 \times 0,15 - 50 \times 0,36 - 100 \times 0,03 \times 100 = 18$$

Verificação do balanço de água: $40,9 + 75 - 1.566,7 - 466,7 = 215,9 =$ água adicionada na mesagem.

Vamos agora voltar e resolver as bandeiras faltantes.

Na ciclonagem, não há as informações de vazão suficientes para fechar o balanço, mas há os teores. Então:

$$R = \frac{8 - 3}{15 - 3} = 0,42$$

Ou seja, 200 t/h correspondem a 42% da alimentação da ciclonagem. Então:

$$\frac{200}{0,42} = 480 \text{ t/h} = \text{alimentação da ciclonagem. Aparece em (5) e (4).}$$

$$(4) \quad 480/0,9 = 533,3$$

$$533,3 - 480 = 53,3$$

Conferindo a umidade: $53,3/480 \times 100 = 11,1$ - portanto, está correto.

$$(11) \quad 480 - 200 = 280$$

$$280/0,1 = 2.800$$

$$2.800 - 280 = 2.520$$

$$(5) \quad 200 + 2.520 = 2.720$$

$$2.720 + 480 = 3.200$$

$$480/3.200 \times 100 = 15$$

Portanto, há a adição de $2.720 - 53,3 = 2.666,7 \text{ m}^3/\text{h}$ de água na caixa de bomba.

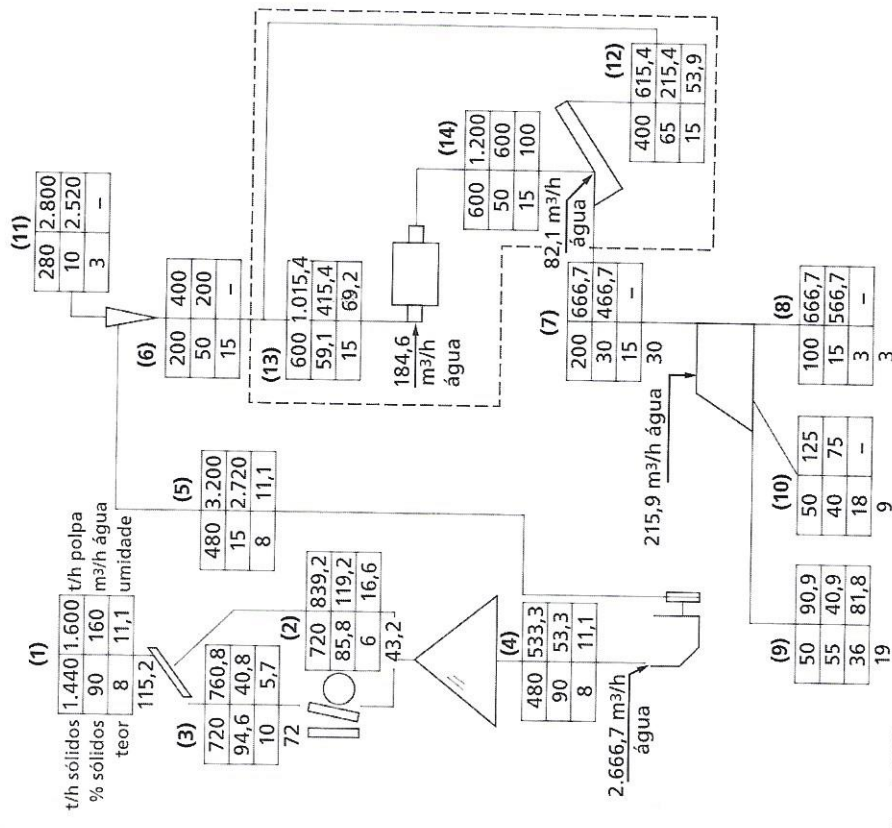


Fig. 1.28C

$$\begin{aligned}
 (12) \quad & 400/0,65 = 615,4 \\
 & 615,4 - 400 = 215,4 \\
 (13) \quad & 200 + 400 = 600 - \text{aparece também em (14).} \\
 & 215,4 + 200 = 415,4 \\
 & 600 + 415,4 = 1.015,4 \\
 & 600/1.015,4 \times 100 = 59,1 \\
 & 200 \times 0,15 + 400 \times 0,15 \\
 & \quad \quad \quad \times 100 = 15 - \text{aparece também em (14).} \\
 & \quad \quad \quad 600
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (14) \quad & 600/0,5 = 1.200 \\
 & 1.200 - 600 = 600 \\
 & 600 - 415,4 = 184,6 \text{ m}^3/\text{h} \text{ água adicionados no moinho.}
 \end{aligned}$$

1.115 Agora, resolva o balanço apresentado na Fig. 1.29A. É o balanço de um lavador de carvão de alto enxofre. Há dois balanços metalúrgicos a serem feitos: o de cinzas e o de enxofre (S). A Fig. 1.29B mostra o exercício resolvido.

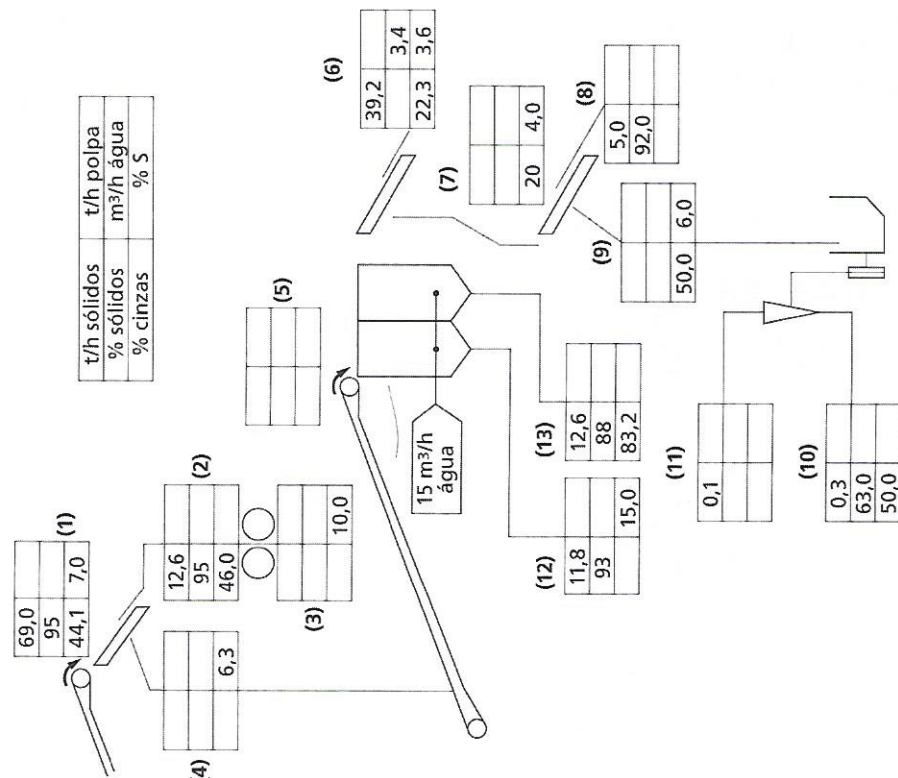


Fig. 1.29A

Solução:

É possível montar uma planilha eletrônica e resolver automaticamente os balanços. As Tabs. 1.10 e 1.11 mostram o mesmo balanço do exercício 1.15 resolvido dessa maneira. Isso é muito cômodo e conveniente em uma série de casos, e permite colocar mais informações em comparação com as bandeiras. Entretanto, estas dão uma informação mais imediata e compreensível sobre o processo.

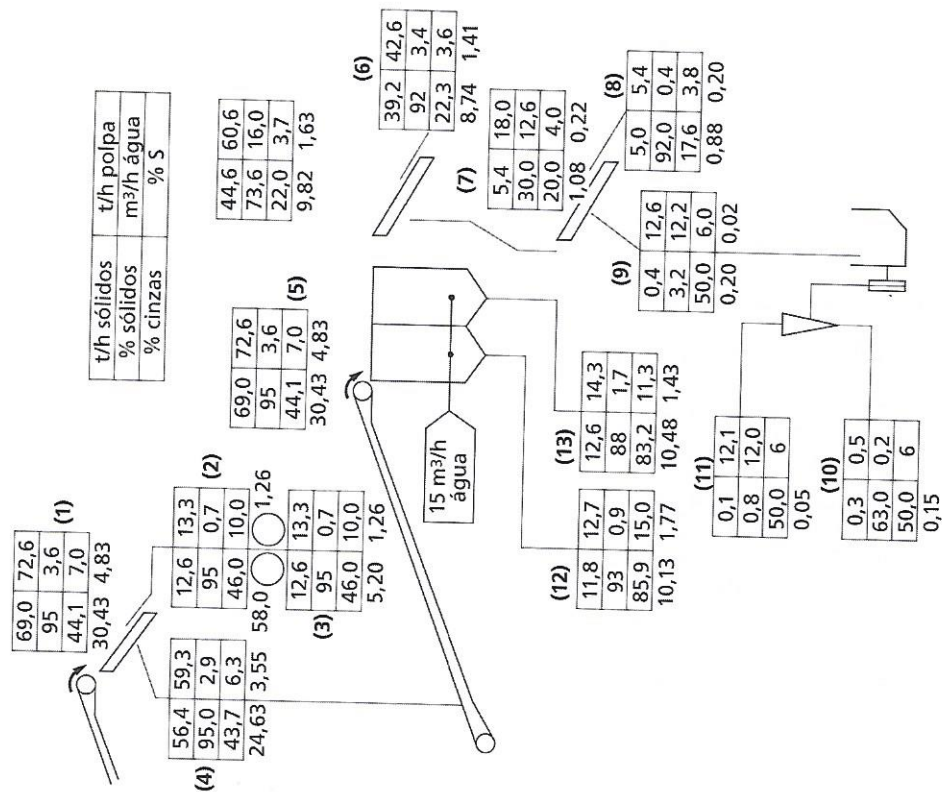


Fig. 1.29B

Tab. 1.10 BALANÇO DE MASSAS POR PLANILHA ELETRÔNICA – DADOS DE ENTRADA

FLUXO	t/h	% sólidos	% sólidos	t/h polpa	m³/h água	% cinzas	t/h cinzas	% S	t/h S
1	69	95				44,1			
2	12,6	95				46			
3								10	
4								6,3	
5									
6	39,2				3,4	22,3		3,6	
7						20		4	
8	5	92							
9						50		6	
10	0,3	63,0				50		6	
11	0,1								
12	11,8	93						15	
13	12,6	88				83,2			

Tab. 1.11 BALANÇO DE MASSAS POR PLANILHA ELETRÔNICA – CÁLCULOS FEITOS

FLUXO	t/h	% sólidos	% sólidos	t/h polpa	m³/h água	% cinzas	t/h cinzas	% S	t/h S
1	69,0	95,0		72,6	3,6	44,1	30,4	7,0	4,8
2	12,6	95,0		13,3	0,7	46,0	5,8	-	-
3	56,4	95,0		-	-	-	-	-	-
4	56,4	95,0		59,3	2,9	43,7	24,7	-	-
5	69,0	95,0		72,6	3,6	44,1	30,4	7,0	4,8
6	39,2	92,0		42,6	3,4	22,3	8,7	3,6	1,4
7	5,4	30,0		18,0	12,6	20,0	1,1	4,0	0,2
8	5,0	92,0		5,4	0,4	17,6	0,9	4,0	0,2
9	0,4	-		12,6	12,2	50,0	0,2	6,0	0,0
10	0,3	30,0		-	-	50,0	0,2	6,0	0,0
11	0,1	59,8		0,3	0,2	50,0	0,0	6,0	0,0
12	11,8	93,0		12,7	0,9	85,9	10,1	15,0	1,8
13	12,6	88,0		14,3	1,7	83,2	10,5	39,3	5,0

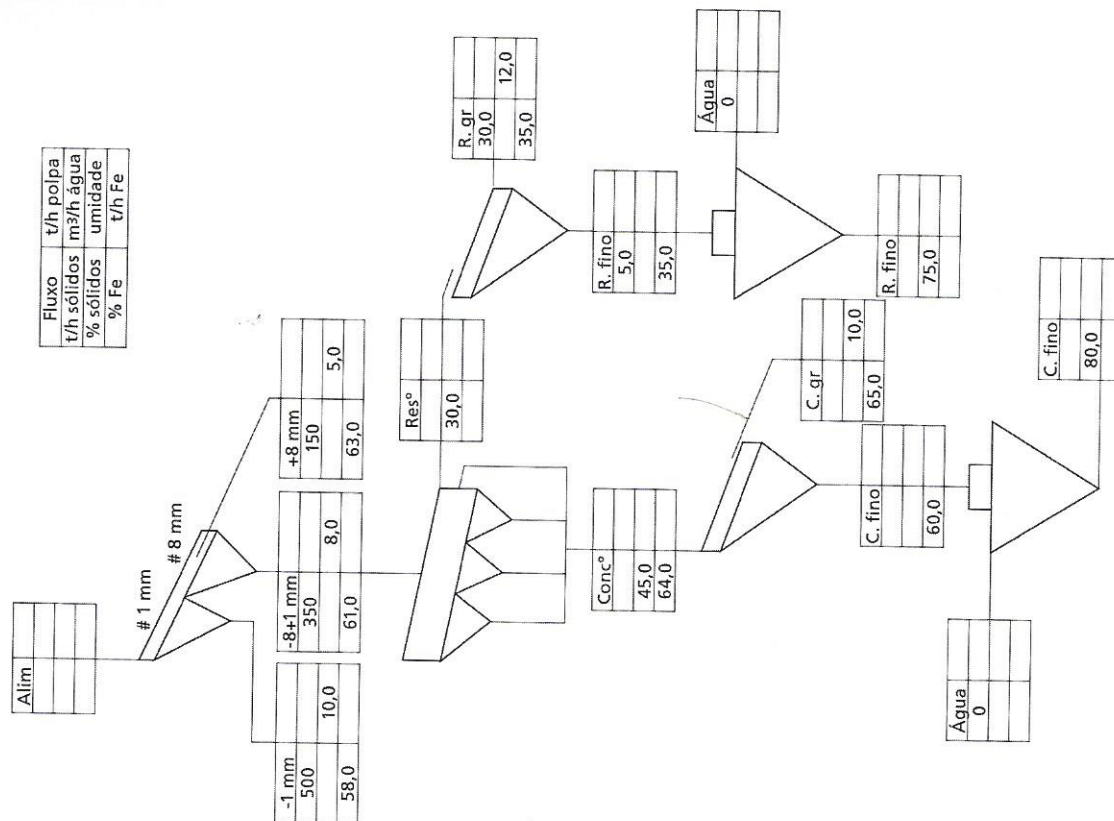


Fig. 1.31A

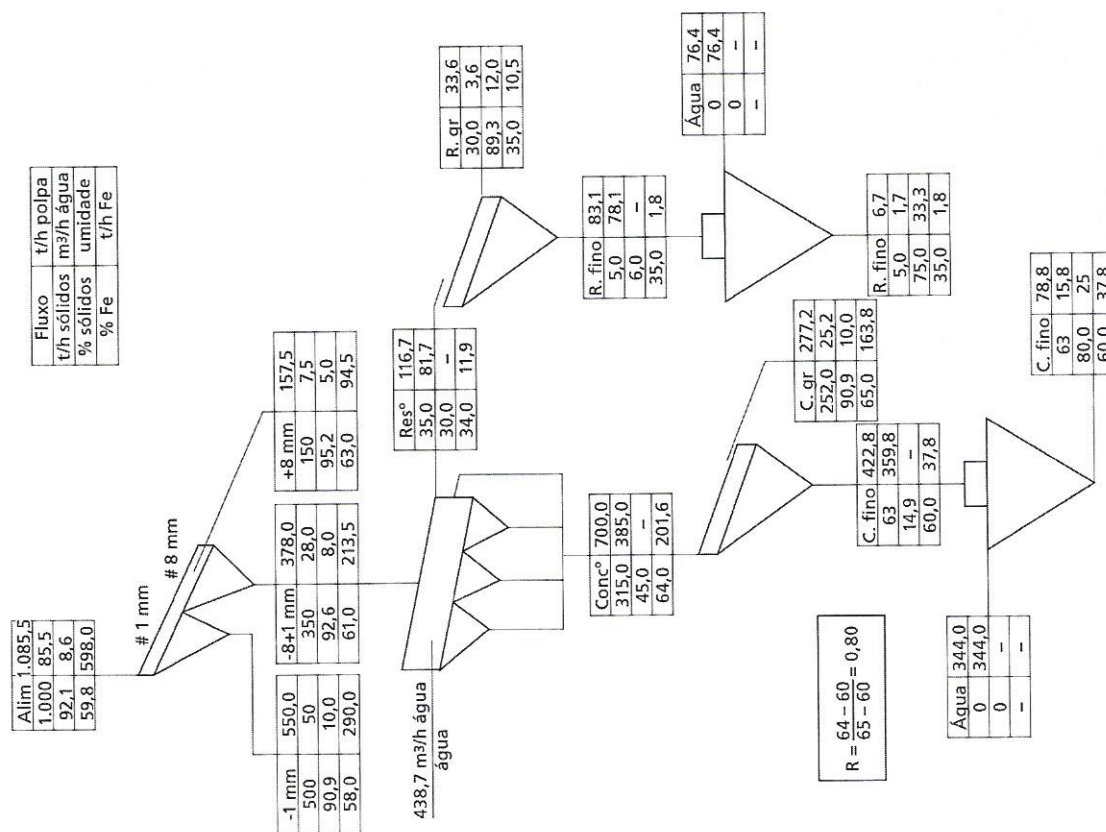


Fig. 1.31B

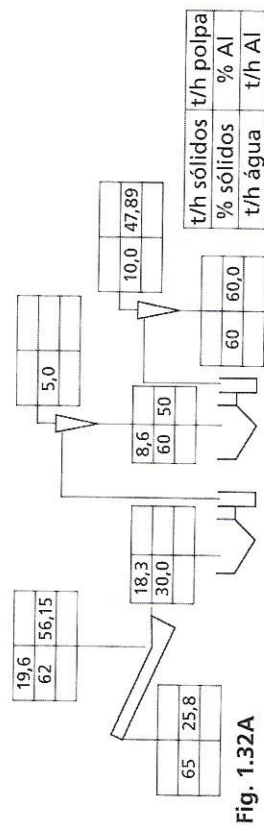


Fig. 1.32A

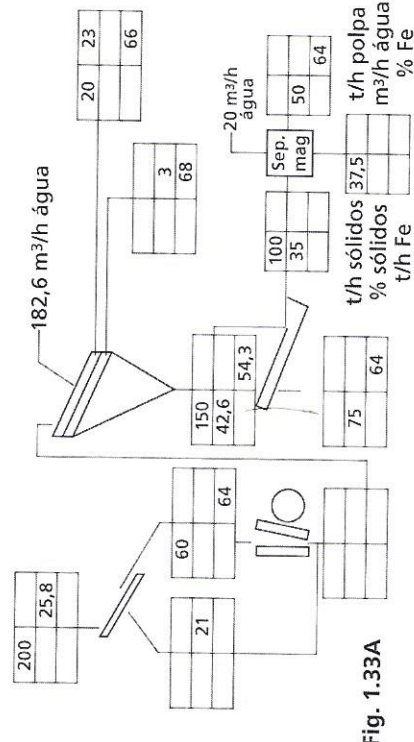


Fig. 1.33A

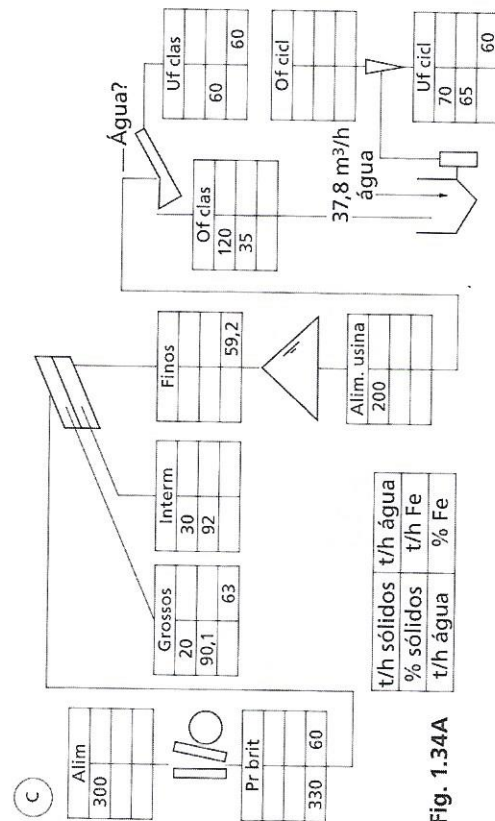


Fig. 1.34A

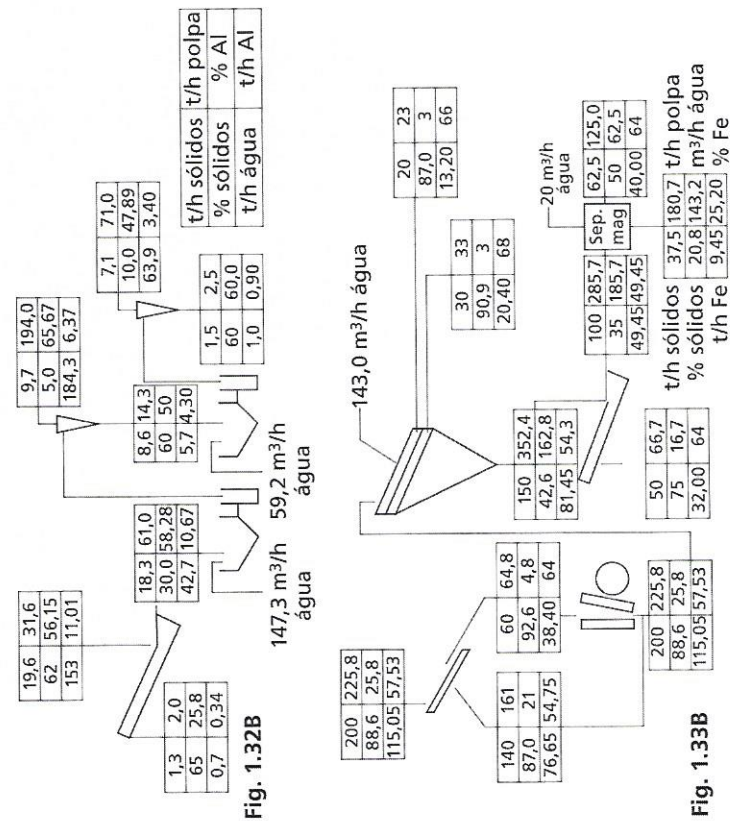


Fig. 1.32B

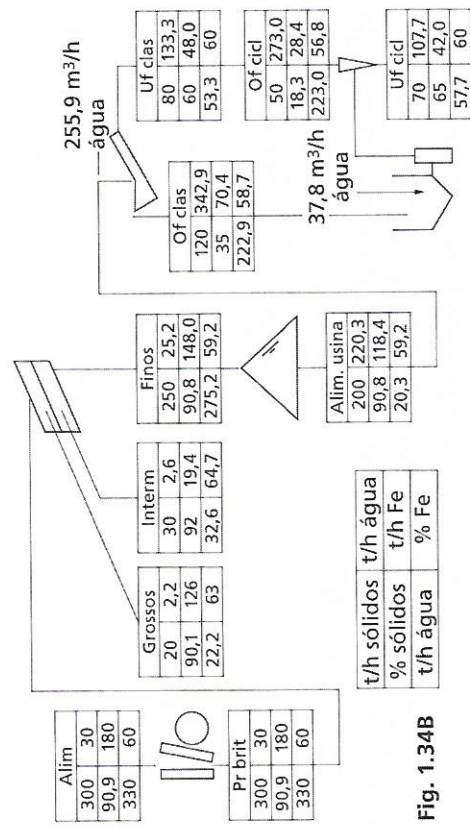


Fig. 1.33B

1.17 Qual o teor em cálcio de uma cal pura? E de uma doloma pura? Em se tratando de uma doloma contaminada com 20% de argilominerais, para quanto passa esse teor? Qual o teor máximo de ferro de uma hematita? E de uma siderita? Dados os pesos atômicos: Ca = 40, O = 16, Mg = 24, C = 12, Fe = 56.

Solução:

Este exercício já foi resolvido em parte. Tente agora fazê-lo sozinho.

a] cal = CaO $\Rightarrow$ peso molecular = 40 + 16 = 56

teor de Ca = $(40/56) \times 100 = 71,4\%$ Ca

b] doloma = CaO.MgO $\Rightarrow$ peso molecular = 40 + 16 + 24 + 16 = 96

teor de Ca = $(40/96) \times 100 = 41,7\%$ Ca

c] doloma contaminada com 20% de material estranho: só 80% são doloma $\Rightarrow 41,7 - 100$
teor - 80

teor = $0,8 \times 41,7 = 33,3\%$ Ca

d] hematita = Fe₂O₃ $\Rightarrow$ peso molecular = 2 $\times$ 56 + 3 $\times$ 16 = 160

teor de Fe = $2 \times 56/160 = 70,0\%$ Fe

e] siderita = FeCO₃ $\Rightarrow$ peso molecular = 56 + 12 + 3 $\times$ 16 = 116

teor de Fe = $56/116 = 48,3\%$ Fe

Nota: Para ter o mesmo teor que uma siderita pura, um minério de hematita teria de ter $48,3/70,0 = 69\%$ de hematita, ou seja, 31% de impurezas! Carregar num alto-forno 31% de impurezas é um absurdo, porque seria gasta uma quantidade proporcionalmente maior de coque para aquecer o minério e escorificar essa contaminação. Além disso, o volume de escórias dentro do forno cresceria proporcionalmente (ou

seja, a parte do volume do alto-forno carregado com minério diminuiria). Em consequência, um minério de siderita a 45% Fe é realmente um minério. Uma matéria-prima mineral de hematita com 45% Fe não pode ser considerada um minério – nem aqui nem na França!

1.18 No exercício 1.10, qual a recuperação em massa (rendimento) da operação?

Qual a recuperação metalúrgica? Qual o enriquecimento? Qual a relação de concentração? Qual a partição de massas? Qual a partição de água? Qual a partição do Fe?

Solução:

Temos apenas de aplicar as definições desses parâmetros de processo:

a] recuperação de massa = $\frac{\text{vazão de concentrado}^*}{\text{vazão de alimentação}} = \frac{25}{40} = 0,625$
ou 62,5%

b] recuperação metalúrgica = $\frac{\text{vazão do elemento útil no concentrado}^*}{\text{vazão do elemento útil na alimentação}}$
 $= \frac{25 \times 0,64}{40 \times 0,48} = 0,83$ ou 83%

c] enriquecimento = $\frac{\text{teor do elemento útil no concentrado}^*}{\text{teor do elemento útil na alimentação}} = \frac{64}{48} = 1,33$

d] relação de concentração = $\frac{\text{vazão da alimentação}}{\text{vazão de concentrado}} = \frac{40}{25} = 1,6$

e] partição (de massas) = $\frac{\text{vazão de concentrado}^*}{\text{vazão de alimentação}} = \frac{25}{40} = 0,63$

f] partição de água = $\frac{\text{vazão de água contida no concentrado}^*}{\text{vazão de água contida na alimentação}}$
 $= 8,3 / 43,3 = 0,19$

g] partição do ferro = $\frac{\text{vazão do elemento útil no concentrado}^*}{\text{vazão do elemento útil na alimentação}}$

$$\frac{064 \times 25}{0,48 \times 40} = 0,83$$

* ou underflow.

1.19 Calcular a relação de concentração do exercício 1.10 usando a regra dos dois produtos.

Solução:

Como relação de concentração = $1/\text{recuperação}$, a fórmula dos dois produtos pode ser escrita como:

$$\text{relação de concentração} = \frac{t_c - t_r}{t_a - t_r} = \frac{42,7}{26,7} = 1,6$$

1.20 O peneiramento em tela de 4,8 mm de uma areia de cobertura de pedra deu os produtos cujas análises granulométricas são apresentadas na Tab. 1.12 (% retidas por faixa). Calcule a partição desse peneiramento e o seu balanço de massas, sabendo que a alimentação é de 240 t/h.

Tab. 1.12

malha (mm)	9,5	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	0,075	-0,075
alimentação	0	0,9	6,2	14,5	12,3	11,5	12,9	9,4	21,1
oversize	0	8,5	11,9	7,0	0	0	0	0	38,9
undersize	0	0	5,5	15,4	13,8	12,9	14,5	10,5	18,9

Solução:

A regra dos dois produtos pode também ser usada para operações de separação granulométrica. Nesse caso, podemos aplicá-la para obter estimadores da partição de todas as frações granulométricas apresentadas na Tab. 1.12, exceto da + 9,5 mm. A regra é sempre a mesma: (teor da alimentação - teor do rejeito)/(teor do concentrado - teor do rejeito). Embora não estejamos tratando de teores, a convenção é sempre a mesma: concentrado é o produto de valor mais elevado e rejeito é o de valor menos elevado. Aplicando a fórmula, teremos os valores indicados na Tab. 1.13.

Tab. 1.13

malha (mm)	9,5	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	0,075	-0,075
alimentação	0	0,9	6,2	14,5	12,3	11,5	12,9	9,4	21,1
oversize	0	8,5	11,9	7,0	0	0	0	0	38,9
undersize	0	0	5,5	15,4	13,8	12,9	14,5	10,5	18,9
partição 1	-	0,106	0,109	0,893	0,891	0,891	0,890	0,895	0,110

Note que os valores sofrem uma variação enorme quando se passa da malha 2,4 para a malha 1,2 mm e, novamente, quando se passa da malha 0,075 mm para o fundo. A razão dessa variação é que até a malha 2,4 mm, as porcentagens de oversize em cada fração granulométrica são maiores no oversize que no undersize, o mesmo acontecendo na fração -0,075 mm. No intervalo de 1,2 até 0,075 mm, ocorre o inverso. A partição, então, aplicada literalmente, até a malha 2,4 mm é para o oversize; daí até a malha 0,075 passa a ser para o undersize, e na fração -0,075 mm volta a ser para o oversize. Temos de unificar o critério. Considerando apenas a partição para o oversize (1 - partição para o undersize), teremos os valores mostrados na Tab. 1.14.

Tab. 1.14

malha (mm)	9,5	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	0,075	-0,075
partição	-	0,106	0,109	0,107	0,109	0,109	0,110	0,105	0,110

Tem-se, portanto, uma estimativa de 0,105, uma de 0,106, uma de 0,107, três de 0,109 e duas de 0,110. Ao aceitarmos como verdadeira a mais frequente (moda), a partição será de 0,109 para o oversize. Para a vazão de 240 t/h, tem-se o seguinte balanço de massas:

$$\text{alimentação} = 240 \text{ t/h}$$

$$\text{oversize} = 0,109 \times 240 = 26,2 \text{ t/h}$$

$$\text{undersize} = 240 - 26,2 = 213,8 \text{ t/h}$$

1.21 Uma amostra de minério pesou 14,4 kg. Após a secagem, esse peso passou para 13,6 kg. Qual a umidade do minério? Qual a sua porcentagem de sólidos?

Solução:

$$\text{umidade} = \frac{\text{peso úmido} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100 = \frac{\text{água contida}}{\text{peso seco}} \times 100$$

$$\frac{14,4 - 13,6}{13,6} \times 100 = 5,9\%$$

Em Tratamento de Minérios, a umidade é sempre expressa em base seca!

Entretanto, para se ter uma boa noção do que significa a base úmida, vamos calculá-la também.

$$\text{umidade b. úmida} = \frac{\text{peso úmido} - \text{peso seco}}{\text{peso úmido}} \times 100$$

$$= \frac{14,4 - 13,6}{14,4} \times 100 = 5,7\%$$

$$\% \text{ sólidos} = \frac{\text{peso dos sólidos}}{\text{peso dos sólidos} + \text{peso da água}} \times 100$$

$$= \frac{13,6}{14,4} \times 100 = 94,4\%$$

1.22 A amostra do exercício 1.21 foi colocada em um recipiente no qual já havia 10 L de água. O volume do recipiente subiu para 14,9 L. Previamente havia sido medido o volume de material seco, que se verificou ser de 9,2 L. Pergunta-se: quais as densidades real e aparente do material seco e do material úmido?

Solução:

$$\text{material seco: volume real} = 14,9 - 10 = 4,9 \text{ L} = 4.900 \text{ mL}$$

$$\text{massa} = 13.600 \text{ g}$$

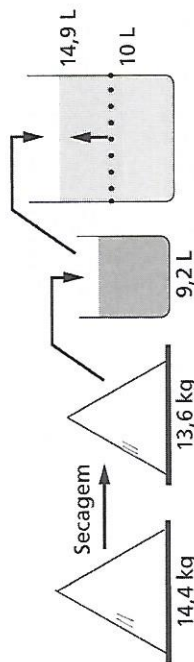


Fig. 1.35

$$\text{densidade real} = 13.600 / 4.900 = 2,8 \text{ g/mL}$$

$$\text{volume aparente} = 9,2 \text{ L} = 9.200 \text{ mL}$$

$$\text{densidade aparente} = 13.600 / 9.200 = 1,48 \text{ g/mL}$$

material úmido: volume real = 4.900 mL

$$\text{massa} = 14.400 \text{ g}$$

$$\text{"densidade real"} = 14.400 / 4.900 = 2,94 \text{ g/mL}$$

$$\text{volume aparente} = 9.200 \text{ mL}$$

$$\text{densidade aparente} = 14.400 / 9.200 = 1,57 \text{ g/mL}$$

Nota: A "densidade real" do material úmido é conceitualmente incorreta. O que se quer expressar aqui é que o filme de água que acompanha o sólido é uma camada monomolecular e não ocupa um volume mensurável na escala de grandezas da prática industrial. Então, embora a massa das partículas úmidas seja maior que a das partículas secas, o seu volume, dentro de certos limites, não o é. Já a densidade aparente do material úmido é conceitualmente correta – todo o mundo sabe que uma pá de terra úmida pesa mais que uma pá de terra seca.

A densidade aparente varia com a distribuição granulométrica, com o tamanho das partículas, com a umidade e com o grau de compactação da amostra. Com pedaços de granito, por exemplo:

- ♦ um bloco dentro da bancada, ainda não desmontado, terá uma densidade de $2,7 \text{ t/m}^3$, que é a densidade real do granito;
- ♦ depois de desmontada a rocha, a brita n° 2 terá densidade aparente de $1,5 \text{ t/m}^3$;
- ♦ o pedrisco terá densidade aparente de $1,4 \text{ t/m}^3$;
- ♦ a bica corrida, isto é, brita com finos, terá densidade aparente de $1,76 \text{ t/m}^3$;

- ◆ se o pedrisco estiver contaminado com areia e finos, terá densidade aparente de $1,68 \text{ t/m}^3$;
- ◆ finalmente, a areia de brita tem densidade aparente de $1,7 \text{ t/m}^3$.

1.23 Apresentar a distribuição granulométrica da Tab. 1.15 (massa retida por faixa) em termos de:

- ◆ % retida por faixa;
- ◆ % retida acumulada (ou % acima);
- ◆ % passante (ou % abaixo, ou ainda % passante acumulada).

Tab. 1.15

abertura (")	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	-1/32
massa (g)	50	70	100	150	140	130	360

Solução:

Calcula-se a % retida por faixa simplesmente dividindo cada valor de massa pela massa total e multiplicando por 100. As porcentagens acumuladas resultam da acumulação dos valores numa direção ou na outra. Os respectivos valores estão na Tab. 1.16.

Tab. 1.16

abertura (")	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	-1/32	total
massa (g)	50	70	100	150	140	130	360	1.000
% retida/faixa	5	7	10	15	14	13	36	100
% acima	5	12	22	37	51	64	100	-
% passante	95	88	78	63	49	36	-	-

1.24 Calcular a área de superfície (surface area) de um cubo de lado l .

Solução:

$$\text{área} = 6 \times l^2$$

$$\text{volume} = l^3 \therefore \text{área de superfície} = \frac{6 \times l^2}{l^3} = \frac{6}{l}$$

$$\text{ou, densidade} = \rho \Rightarrow \text{peso} = \rho \times l^3 \Rightarrow \text{a.s.} = \frac{6}{\rho l}$$

1.25 Idem para a esfera de diâmetro l .

Solução:

$$\text{área} = 4\pi \frac{l^2}{4}$$

$$\text{volume} = \frac{4}{3} \pi \frac{l^3}{8} = \frac{\pi l^3}{6} \therefore \text{a.s.} = \frac{6}{l} \text{ ou } \frac{6}{\rho l}$$

1.26 Idem para um cubo de lado $l/2$ (1/8 do cubo do exercício 1.24, conforme a Fig. 1.36).

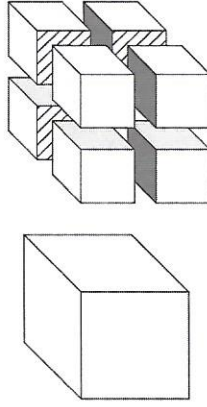


Fig. 1.36

Solução:

$$\text{área} = 6 \times \frac{l^2}{4}$$

$$\text{volume} = \frac{l^3}{8} \therefore \text{área de superfície} = \frac{6 \times \frac{l^2}{4}}{\frac{l^3}{8}} = \frac{12}{l}$$

Ou seja, embora o volume da partícula tenha diminuído para 1/8 do inicial, a sua área de superfície é o dobro da anterior. Considerando o mesmo volume inicial (8 partículas de lado $l/2$), a área de superfície aumenta 16 vezes!

1.27 Idem para cilindro de diâmetro l e altura l .

Solução:

$$\text{área} = \frac{3}{2} \pi l^2 \therefore \text{a.s.} = \frac{6}{l}$$

$$\text{volume} = \frac{\pi}{4} l^3$$

1.28 Calcular a área específica de um cubo de $150\ \mu\text{m}$ (100#) e de um cubo de $15\ \mu\text{m}$ (lama).

Solução:

$$100\# = 150\ \mu\text{m} = 0,0150\ \text{cm}; AE = \frac{6}{0,0150} = 400\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$$

$$\text{lama} = 15\ \mu\text{m} = 0,00150\ \text{cm}; AE = \frac{6}{0,00150} = 4.000\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$$

Se considerarmos que no cubo de $150\ \mu\text{m}$ cabem 1.000 cubinhos de $15\ \mu\text{m}$, a área específica do conjunto de cubinhos de $15\ \mu\text{m}$ que ocupa o mesmo volume de um cubo de $150\ \mu\text{m}$ será $4.000.000\ \text{cm}^2/\text{cm}^3$!

É por isso que a presença de lamas é tão nociva em algumas operações unitárias, como a flotação: as partículas competem entre si pelos reagentes e as lamas levam vantagem.

Considere que à medida que diminui o diâmetro, diminui a massa (o cubinho de $150\ \mu\text{m}$, se tiver densidade 2,7, pesará 9,1 mg, e o de $15\ \mu\text{m}$, 0,09 μg !) e aumenta a área específica. Aumentarão também as cargas elétricas de superfície e a tendência de as partículas se repelirem mutuamente. Quanto mais fina a população, maior a dificuldade de as partículas afundarem.

1.29 Calcular o grau de liberação do minério de feldspato e quartzo cuja contagem de grãos ao microscópio forneceu os resultados apresentados na Tab. 1.17.

Tab. 1.17

% #	% fdpt. ret.	% fdpt. livre	% fdpt. nos grãos mistos					qtzo. grãos livre totais	
			100-75	75-50	50-25	25-0			
40	5	2	2	1	1	2	90	98	
50	10	4	1	4	4	9	180	202	
70	20	6	6	8	9	3	70	202	
100	25	30	8	2	3	5	450	498	

150	15	85	10	2	8	16	400	521
200	10	190	4	6	6	4	800	1.010
-200	5							

Solução:

Somos obrigados a assumir hipóteses simplificadoras:

- 1 - todos os grãos em cada fração têm o mesmo volume;
- 2 - quartzo e feldspato têm mesma densidade.

a] cálculo dos volumes de feldspato em cada fração (expressos em grãos):

$$40\#: 2 + 2 \times 0,875 + 1 \times 0,625 + 1 \times 0,375 + 2 \times 0,125 = 5\ \text{grãos}$$

$$50\#: 4 + 1 \times 0,875 + 4 \times 0,625 + 4 \times 0,375 + 9 \times 0,125 = 10\ \text{grãos}$$

$$70\#: 6 + 6 \times 0,875 + 8 \times 0,625 + 9 \times 0,375 + 3 \times 0,125 = 20\ \text{grãos}$$

$$100\#: 30 + 8 \times 0,875 + 2 \times 0,625 + 3 \times 0,375 + 5 \times 0,125 = 40\ \text{grãos}$$

$$150\#: 85 + 10 \times 0,875 + 2 \times 0,625 + 8 \times 0,375 + 16 \times 0,125 = 100\ \text{grãos}$$

$$200\#: 190 + 4 \times 0,875 + 6 \times 0,625 + 6 \times 0,375 + 4 \times 0,125 = 200\ \text{grãos}$$

b] cálculo da % de feldspato em cada fração:

$$40\#: 5/98$$

$$50\#: 10/202$$

$$70\#: 20/202$$

$$100\#: 40/498$$

$$150\#: 100/521$$

$$200\#: 200/1.010$$

c] feldspato livre em cada fração:

#	40	50	70	100	150	200	-200
2/5	4/10	6/20	30/40	85/100	190/200	100% (admitido)	

d] volume (= massa) de feldspato em cada fração =
= número de grãos $\times$ % feldspato
40#: $5 \times 5/98 = 0,25$

50#: $10 \times 10/202 = 0,98$
 70#: $20 \times 20/202 = 1,98$
 100#: $25 \times 40/498 = 2,00$
 150#: $15 \times 100/521 = 2,90$
 200#: $0 \times 200/1.010 = 2,00$

–200#: $15 \times 200/1.010 = 3,00$ (admitimos o mesmo valor da malha anterior)

e] % em massa = % em volume de feldspato livre ($c \times d$):

40#: $2/5 \times 0,25 = 0,1$
 50#: $4/10 \times 0,98 = 0,4$
 70#: $6/20 \times 1,98 = 0,6$
 100#: $30/40 \times 2,00 = 1,5$
 150#: $85/100 \times 2,90 = 2,5$
 200#: $190/200 \times 2,00 = 1,9$
 –200#: $1 \times 3,00 = 3,0$

total: 10,0

$$f] \text{ grau de liberação} = \frac{\text{quant. fđpt. pres. em partículas liberadas}}{\text{quantidade de feldspato total}} = \frac{10}{13,2} = 0,76 \text{ ou } 76\%$$

1.30 Uma polpa de um sólido de densidade 2,6 tem densidade 1,5. Qual a percentagem de sólidos da polpa?

Solução:

Aplicar a fórmula:

$$\% \text{ sólidos} = \frac{\rho_s \times 100 (\rho_p - 1)}{(\rho_s - 1) \times \rho_p} = \frac{2,6 \times 100 \times 0,5}{1,6 \times 1,5} = 54,2\%$$

1.31 Qual a densidade de uma polpa a 20% de sólidos, sabendo que a densidade do sólido é 3,2?

Solução:

Aplicar a fórmula:

$$\text{densidade da polpa} = \frac{\rho_s \times 100}{(\rho_s \times 100) - (\rho_s - 1) \times \% \text{ sól.}} = \frac{3,2 \times 100}{3,2 \times 100 - 2,2 \times 20} = 1,16$$

Referências bibliográficas

- CAMILLOTTI, L. A. *Estudo de classificação de granas abrasivas de carvão de silício por ciclonação*. 1999. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- CHAVES, A. P. *Caracterização e beneficiamento da fluorita de Apiaí, SP*. 1989. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- CHAVES, A. P. *Partição*. Texto adicional à prova de erudição. Concurso para professor titular, São Paulo, EPUSP, 1992.
- CHAVES, A. P.; HENNIES, W. T. Mass, water and metallurgical balances conciliation via computer. Operation Research and Engineering Design. *Proceedings of IFORS, 4th Specialized Conference*, St. Louis, 1995.
- LOYOLA, L. C. *Matéria-prima: talco*. Brasil Cerâmica, ano 1, n. 2, p. 16, 2005.
- LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. *Manual de usinas de beneficiamento*. Rio de Janeiro: CNPq/CETEM, 1989.
- HORTA, R. M. *O estado da arte em tratamento de minérios de ouro – estudo de caso: Serra Pelada*. 1996. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- LEAL FILHO, L. S. *Aspectos relevantes na separação apatita / minerais de ganga via processo Serrana*. 1991. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

NUNES, A. C. *Sistema computadorizado para ajuste de balanço de massas e metalúrgico*. 1992. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

RAWLE, A. *The basic principles of particle size analysis*. Leaflet MRK 034/01, Malvern Instruments Ltd., Malvern, s.d.

SCHULZ, N. F. Separation efficiency. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, v. 247, p. 81-87, mar. 1970.

Bombeamento de polpas

2

Arthur Pinto Chaves

Takashi Nakae

Olímpio Ribeiro Salgado

2.1 Equipamentos e instalações

2.1.1 Bombas centrífugas de polpa

A Fig. 2.1 mostra uma bomba centrífuga de eixo horizontal para bombeamento de polpas, que difere das bombas projetadas para o bombeamento de água em muitos aspectos. A Fig. 2.2 mostra uma bomba de água, para comparação entre os dois equipamentos.

Com relação às bombas centrífugas de polpa:

- a] o rotor tem menos aletas e sua curva é menos acentuada que a das bombas de água. Isso se deve às exigências do bombeamento de partículas sólidas; em decorrência da abrasão, recomenda-se o uso de aletas mais robustas e com perfil mais brando. A possibilidade de existirem partículas grosseiras faz com que as aletas estejam em menor número, deixando espaços maiores entre elas. Eventualmente, o rotor pode ser aberto para permitir a passagem livre dessas partículas maiores;
- b] as partes em contato com a polpa são revestidas de material resistente ao desgaste. Os dois materiais mais tradicionais são o Ni-hard, ferro fundido ligado ao níquel, e a borracha natural. O critério básico de escolha entre os dois é que a borracha pode ser “cortada” por partículas mais grosseiras ou angulosas presentes no material a ser bombeado – o que obriga a sua rejeição, nesse caso;
- c] a carcaça da bomba é bipartida e pode ser aberta, de modo a permitir o desentupimento, a limpeza, a manutenção e a troca de rotor ou de revestimento com máxima rapidez e facilidade. Isso