

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

PMI - 500 - TRABALHO DE FORMATURA EM ENGENHARIA DE MINAS

**Análise da Viabilidade Técnica de Redução do Teor de Umidade da
Bauxita da MRN, via Agentes Tensoativos**

(Versão Preliminar)

outubro de 1993

Autor: Luis Gustavo Esteves Pereira

Orientador: Prof. Dr. Laurindo de Salles Leal Filho

EPM 1993

TF-1993

P414a

Supr-1587962

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

P411 - 500 - TRABALHO DE FOMATURA EM ENGENHARIA DE MINAS

Análise da Viabilidade Técnica e Econômica de Redução do Teor de Umidade da

Bauxita da EPM, via Agente Tensioativo

(Versão Preliminar)

Outubro de 1993

M1993A

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700004078

1. Introdução

O desaguamento, no sentido amplo, é a última etapa do processo de tratamento a qual um minério é submetido. Numa ordem sucessiva de processo, pode-se dividir tal conjunto de operações em desaguamento propriamente dito, espessamento, filtragem e secagem. Um determinado tipo de minério pode passar por uma ou por até todas essas etapas. Como a maioria dos processos de beneficiamento é por via úmida, fatalmente, pelo menos uma destas etapas estará presente no processo. A necessidade de uma ou mais etapas de desaguamento dependerá de inúmeras variáveis, dentre elas a granulometria do minério - minérios mais finos por possuírem maior área específica são mais difíceis de desaguar e em geral pedem por várias etapas de desaguamento - problemas de manuseio - minérios muito úmidos são de difícil manuseio - fatores de contrato que exigem o minério comercial abaixo de determinado valor de umidade. Esses fatores de contrato em geral estão associados a especificações de ordem técnica, que exigem o minério abaixo de determinada umidade para a etapa seguinte de industrialização, ou para o manuseio - a Mineração Rio do Norte precisa exportar para o Canadá o minério a 5 % de umidade máxima para que o mesmo não congele ao navegar pelas águas geladas do Atlântico Norte e fique preso dentro do navio - ou especificações de ordem exclusivamente econômicas, que exigem o minério à baixa umidade para minimizar o custo do transporte externo - A Companhia Vale do Rio Doce exporta atualmente o minério de ferro de Carajás à umidade de 9%. Considerando-se a sua produção anual em 35 milhões de toneladas, tal fato significa que cerca 3 milhões de toneladas de água são transportadas anualmente, implicando no aumento do custo de fretes e conseqüente diminuição da margem de lucro da companhia. A presença de umidade num carvão é outro exemplo que ilustra bem o que foi dito acima. Além de produzir dificuldades de manuseio, faz com que os custos de frete sejam elevados e reduz a produtividade em fornos de coque.

Por outro lado, à medida que o número de etapas de desaguamento aumenta, o custo do desaguamento, obviamente, aumenta, tornando-se crítico quando a etapa da

secagem é envolvida. Note-se, que neste último caso, além dos altos custos da produção de energia térmica por queima de óleos, que são bastante elevados, deve-se considerar os custos ambientais dessa forma pouco nobre de produção de energia, que além de possuir um rendimento baixo, descarrega para o meio ambiente considerável quantia de poluentes gasosos como o SO_2 , uma vez que os óleos queimados, em geral, possuem elevado teor de enxofre. Essas emissões nada mais são do que custos, ainda que futuros, associados aos métodos de controle e monitoramento desses poluentes.

Dentro deste panorama, duas forças agem em sentido contrário. Por um lado, a umidade deve ser a menor possível para minimizar os custos de transporte, de outro, os custos de desaguamento por secagem, o método mais difundido de se reduzir bruscamente a umidade, é alto. Assim, uma solução seria o desenvolvimento de novas tecnologias no sentido de reduzir a umidade sem a utilização da secagem. Isto implica em atuar nas demais etapas do processo de desaguamento, no sentido de otimizá-los. Uma solução possível, que há tempos vem sendo sugerida, porém pouco difundida, refere-se à adição de surfactantes à polpa de minério para facilitar o escoamento da água via abaixamento da tensão superficial da água.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Mecanismos de Desaguamento

O fluxo de um líquido através de um meio poroso pode ser descrito pela Lei de Darcy. (Coulson & Richardson, 1954, Nicol, 1980; Clement & Bonjer)

$$u = \frac{B}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

onde ΔP é a variação da pressão através do leito, L é a espessura do leito, μ é a viscosidade do fluido e B é a permeabilidade do meio. No regime laminar, a permeabilidade se relaciona com a porosidade do meio, ϵ , e a superfície específica das partículas, S , através da equação de Kozeny:

$$B = \frac{1}{K} \frac{\epsilon^3}{S^2 (1 - \epsilon)^2} \quad (2)$$

onde K é a constante de Kozeny, a qual é função da porosidade, da forma das partículas, da orientação das partículas e da distribuição granulométrica.

De (1) e (2), vem:

$$u = \frac{1}{K \mu S^2} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

Nesta equação, percebe-se que o fluxo do fluido aumenta com a queda da pressão e diminui com o comprimento capilar e a espessura da camada.

Assim, se o tamanho das partículas aumentar, permanecendo constante os demais fatores, a permeabilidade aumentará conforme a equação (2), e o coeficiente de filtragem também aumentará pois o fluxo u aumenta. A porosidade, ϵ , é a fração do volume do

leito não ocupada por material sólido, e portanto, depende da forma e distribuição de tamanho das partículas, e ainda do comportamento do leito.

De acordo com esse modelo, a cinética do desaguamento é determinada pela diferença de pressão através do leito, e da resistência devidas as forças de fricção originadas do fluxo do líquido através da geometria do leito e do meio filtrante.

A validade da equação do Kozeny aplicada a filtração de um leito composto de partículas abaixo de $0,5 \mu\text{m}$ é afetada pela compressibilidade que sofrem as partículas "floculadas" durante a filtração (Nicol, 1980), afetando a superfície específica e a porosidade.

Outra maneira de se chegar a resultado semelhante (Tiller, 1953), é a partir da equação de Kozeny, que é derivada da equação de Poiseuille:

$$\frac{dP_x}{dx} = -\frac{k\mu}{R_H^2} u \quad (4)$$

onde k é constante adimensional, u é a velocidade linear, μ é a viscosidade, R_H é o raio hidráulico e x é a distância.

O raio hidráulico é dado por:

$$R_H = \left(\frac{\text{área de fluxo}}{\text{perímetro molhado}} \right) \left(\frac{\text{comprimento do caminho}}{\text{comprimento do caminho}} \right) \quad (5)$$

$$= \frac{\text{volume de vazios}}{\text{superfície de sólidos}}$$

Sendo $\frac{\epsilon}{(1-\epsilon)}$ a razão entre o volume de vazios e o volume de sólidos, então, o

volume de vazios é dado por:

$$\text{volume de vazios} = \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)} (\text{volume de sólidos}) \quad (6)$$

substituindo (6) em (5) vem:

$$R_H = \frac{\epsilon(\text{vol. de sólidos})}{(1-\epsilon)(\text{área superf. dos sólidos})} \quad (7)$$

mas a área superficial dos sólidos pelo volume dos sólidos é a superfície específica, S , a qual pode ser substituída na equação (7):

$$R_H = \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)} \frac{1}{S} \quad (8)$$

Levando-se em conta que a verdadeira velocidade, u , nos interstícios do sólido é dada pela velocidade superficial, q , dividida pela porcentagem de vazios, temos: $u = q/\epsilon$.

Finalmente pode-se escrever:

$$\frac{dPx}{dx} = -k\mu \frac{(1-\epsilon)^2 S^2}{\epsilon^3} q \quad (9)$$

Integrando-se a equação (9) vem:

$$kq\mu S^2 \int_0^L dx = - \int_P^{P_1} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} dPx \quad (10)$$

onde L é a espessura do leito

Rearranjando-se os termos de (10) chegamos a:

$$q = \frac{1}{k\mu S^2 L} \int_{P_1}^P \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} dPx \quad (11)$$

que nada mais é que a equação (3). Contudo, neste caso, considera-se que a porosidade não é constante, mas varia com a pressão.

Seja w a massa total de sólido seco. Se ε representa a porcentagem de vazios a distância x , abaixo da superfície, e densidade do sólido ρ_s . Então, a massa de sólido por unidade de área na distância dx é dada por:

$$dw = (\text{densidade})(\text{volume}) = \rho_s(1 - \varepsilon)dx \quad (12)$$

Como $(1 - \varepsilon)$ representa o volume real de sólidos, integrando de 0 a L vem:

$$w = \rho_s \int_0^L (1 - \varepsilon)dx \quad (13)$$

$$\text{Combinando (13) com (11) tem-se: } q = \frac{\rho_s}{k\mu w S^2} \int_{P_1}^P \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} dPx \quad (14)$$

Mas $w = W/A$, massa depositada por unidade de área.

Defini-se, ainda, como resistência específica a filtragem (Tiller, 1955) o termo:

$$a_s = \frac{kS^2 (1 - \varepsilon)}{\rho_s \varepsilon^3} \quad (15)$$

Conforme o processo de separação sólido/líquido se completa, os interstícios do leito permanecem completamente preenchidos de líquido (estado capilar) a menos que a pressão de sucção aplicada exceda a pressão capilar negativa na interface ar/partícula/líquido. Essa pressão capilar negativa é denominada pressão de entrada, P_e (*entry pressure*), a qual deriva da equação de Young-Laplace

$$P_e = \gamma \cos \theta S \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \quad (16)$$

sendo γ a tensão superficial e θ o ângulo de contato de equilíbrio.

O desaguamento continuará desde que a pressão P_e seja exercida pelo vácuo.

A forma geral de uma curva de umidade em função da pressão de sucção é similar a apresentada abaixo.

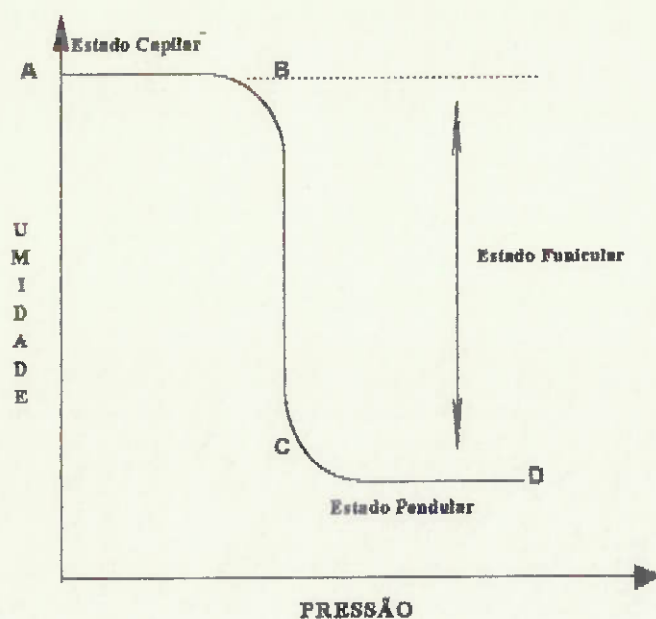


Figura - Estados da água no decorrer do desaguamento (proposto por Versluys, 1917 segundo NICOL, 1975)

Essa curva pode ser interpretada em termos de três estados de equilíbrio descritos por Versluys, 1917 (Nicol, 1975). À sucção zero, os vãos intersticiais estão saturados e o leito, conforme já mencionado acima, é dito estar no estado capilar (AB). Conforme aumenta-se o vácuo, atinge-se um ponto onde a pressão aplicada é maior que a pressão capilar negativa na interface ar/água (pressão P_e), e inicia-se a movimentação da água. A partir daí, diz-se que a água se encontra no "estado funicular" (BC), no qual uma rede contínua de água existe em equilíbrio com o ar através dos poros construídos. Conforme a sucção é aumentada mais ainda, o fluxo do fluido ocorre até que não haja mais água suficiente para formar um filme contínuo de líquido. Neste momento, inicia-se o chamado "estado pendular" (DE), no qual discretas lentes de água formam-se nos pontos de contato entre as partículas, e qualquer remoção futura de umidade ocorrerá primariamente como resultado de um processo de difusão evaporativa. O autor acredita que tal processo seja causado pelo ar que é succionado a alta pressão e acaba causando a evaporação da água.

O estado pendular representa o limite inferior de umidade que se pode obter por qualquer processo de separação sólido/líquido mecânico, como peneiramento, filtragem ou centrifugação. Qualquer redução além disso só pode ser conseguida por evaporação.

Nicol, 1975, concluiu, ainda, que a umidade final não depende do tamanho das partículas, mas somente da configuração do empacotamento do leito. Os resultados de seus experimentos sobre carvão mostraram que a umidade retida aumentava com o decréscimo da granulometria quando o leito era drenado por gravidade, contudo, independia do tamanho das partículas quando a drenagem era realizada à pressão limite (pressão no início do estado pendular). Tal conclusão é bastante controversa, uma vez que partículas mais finas possuindo maior área específica deveriam reter maior quantidade de água no estado pendular.

Nicol, 1980, constatou que a pressão P_e calculada é bem menor que o vácuo usualmente empregado na prática industrial. Isto porque a vasta gama de tamanhos de partículas conduz ao bloqueio de interstícios por ultrafinos, o que reduz o tamanho dos poros, resultando numa pressão de entrada maior.

Contudo, se as partículas forem aglomeradas, o tamanho médio das "partículas" aumenta, e conforme a equação 14, o fluxo deve aumentar, pois a porosidade aumenta, proporcionando canais de fluxo mais largos para um mesmo potencial de sucção.

O sistema de poros de um leito qualquer de minério, como por exemplo o de uma torta de filtragem, pode ser considerado como um conjunto de capilares de diâmetros variáveis (Stroh & Stahl, 1991; Nicol, 1976). Aumentando-se a diferença de pressão através do sistema de poros, os capilares com maiores diâmetros irão desaguar após atingida a pressão de entrada P_e , e com o aumento da pressão capilares mais estreitos também irão desaguar pois a pressão de entrada para esses também é atingida. Num modelo mais real deve-se levar em conta as interações entre os poros. Na verdade a movimentação do líquido se dá por um caminho tortuoso, ao longo do qual os diâmetros dos capilares são os maiores (Stroh & Stahl, 1991). (Vide figura)

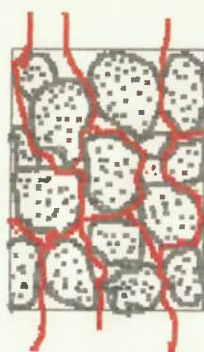


Figura -Representação esquemática do caminho percorrido pelo líquido através do leito.

Assim, baseado no que foi apresentado até o momento, pode-se dizer que existem três fatores básicos que influem no fluxo através de um leito poroso: A porosidade, a diferença de pressão através do meio e, associada a ambas, a capilaridade.

Assim, aumentando-se a pressão de sucção tanto a taxa de filtração quanto a eficiência do desaguamento aumentam. Isso pode ser conseguido por um sistema avançado de filtração contínua sobre pressão. Contudo, este processo está limitado à pressão limite no início do estado pendular. Por outro lado, pode-se abaixar a pressão capilar por meio de surfactantes tensoativos, bem como aumentar os canais de fluxos se esses agentes forem flocculantes ou aglomerantes, ou ainda diminuir a camada de água adsorvida nas partículas se esses agentes forem hidrofobantes. Note-se que no caso dos surfactantes, pode-se chegar abaixo do estado pendular uma vez que o agente químico ao adsorver na partícula expulsa parte desta água

2.2. Fisicoquímica de Superfície Relacionada ao Desaguamento

2.2.1 Agentes Químicos Auxiliares do Desaguamento

Dentro do campo o desaguamento via ação de agentes químicos existem duas linhas de raciocínio, baseadas nas equações de fluxo através de um meio poroso. Por um lado este fluxo depende da diferença de pressão aplicada ao leito e da porosidade do leito. Assim, um reagente químico que proporcionasse um aumento da porosidade do meio, estaria contribuindo para o abaixamento da pressão necessária para o início do desaguamento, aumentando a taxa específica de fluxo através do leito (no caso da filtração, a taxa específica de filtração [$\text{t.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$]). Tal efeito pode ser conseguido através de agentes floculantes, aglomerantes e coagulantes, que fazem com que as partículas se aglomerem, tornando os canais de fluxo mais espessos. Por outro lado, a pressão capilar, que faz com que a água fique presa na interface sólido-líquido, depende da tensão superficial da água. Assim, agentes químicos que fossem capazes de abaixar a tensão superficial da água, estariam abaixando a pressão necessária para o escoamento da água, ou seja, estariam abaixando a curva dos estados do líquido, proposta por Versluys (figura). Esses agentes são os tensoativos (surfactantes).

2.2.1.1. Floculantes, Aglomerantes e Coagulantes

este tópico ainda está sendo escrito!

2.2.1.2. Surfactantes

Um surfactante, do inglês, *surface active agent*, é uma substância que quando presente num sistema, a baixa concentração, tem a capacidade de se adsorver nas superfícies e interfaces do sistema, alterando a energia livre destas superfícies. ()

A energia livre interfacial é a mínima quantidade de trabalho requerida para criar a superfície. Essa energia por unidade de área é que é medida quando ao se determinar a tensão superficial ou interfacial. Quando expandimos uma superfície, o trabalho mínimo para criar uma quantidade adicional de superfície é a tensão superficial vezes a área criada no aumento dessa superfície.

Um surfactante possui uma estrutura molecular composta de dois grupos: o liofóbico e o liofilico.

Dissolvido num solvente, o grupo liofóbico pode causar uma distorção da estrutura do solvente líquido, aumentando a energia livre do sistema. ()

Numa solução aquosa de surfactante, a distorção da água pelo grupo liofóbico (hidrofóbico) e como consequência o aumento da energia livre do sistema quando este está dissolvido, significa que será necessário um menor trabalho para trazer uma molécula do surfactante para a superfície do que trazer uma molécula de água. Assim, a presença de um surfactante diminui o trabalho realizado para criar uma unidade de área na superfície, ou seja, diminui a tensão superficial.

O grupo liofilico (hidrofilico) propicia a não expulsão do surfactante do solvente, formando uma fase separada.

Assim, a função do grupo liofóbico () é a de produzir a adsorção espontânea da molécula do surfactante na interface, e aumentar a interação através da interface entre as moléculas adsorvidas de surfactante e as moléculas na fase adjacente.

A porção liofilica deve providenciar forte interação entre as moléculas do surfactante na interface e as moléculas do solvente.

Essa estrutura antipática do surfactante, além de propiciar a concentração do surfactante na superfície e abaixar a tensão superficial, faz com que as moléculas fiquem orientadas, com o grupo hidrofilico na fase aquosa e o hidrofóbico orientado para fora.

2.2.2. Capilaridade

Este capítulo ainda está sendo preparado!

2.2.3. O potencial Zeta

Este capítulo ainda está sendo preparado!

2.2.4. Mecanismos de Molhabilidade de Partículas

Pode -se classificar o umidecimento de uma partícula em três tipos distintos:

- a) Umidecimento por espalhamento (*spreading wetting*)
- b) Umidecimento por adesão (*Adhesional wetting*)
- c) Umidecimento por imersão (*Immersional wetting*)

(o restante deste subtema ainda está sendo estudado e em vias de confecção do texto!).

2.3 Mecanismos de Ação dos Surfactantes sobre a Redução da Umidade

O abaixamento da tensão superficial com a adição de um surfactante pode ser compreendido em termos do fenômeno da capilaridade.

A capilaridade, h , de um leito de partículas com raio médio dos poros, r , pode ser entendida com a medida da saturação do líquido e é dada por:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{r\rho g} \quad (17)$$

onde γ é a tensão superficial de um líquido de densidade ρ , e θ é o ângulo de contato. Consequentemente, seria esperado que uma redução de γ e θ devida a ação de um surfactante deveria produzir uma redução concomitante na umidade do leito

(ver STROH & STAHL.1991)

(Este capítulo ainda está incompleto !)

2.4. Relação Umidade x Densidade Aparente e a Umidade Limite

No campo de estudo das areias para moldes de fundição, há muito tempo que se conhece sobre as propriedades aglomerantes das argilas, que quando adicionadas as areias de fundição a determinada porcentagem, bem como à definida quantia de água, resultam, após a compactação, em moldes de excelente qualidade.

Muitos estudos têm sido realizados a fim de se compreender os mecanismos que regem o processo dessa cimentação, como o realizado por Grim, R. E. e Cuthbert, F. L., 1940. Em seus estudos, quatro fatores principais são considerados: a porcentagem de argila a ser acrescentada a areia, a quantidade de água a ser acrescentada (*tempering water*), a resistência a compressão a verde* (*green compression*), e a densidade da mistura (*bulk density*).

Estes autores estudaram a relação entre a resistência a compressão a verde e a quantidade de água adicionada a mistura (*tempering water*), para várias porcentagens de argila adicionada à mistura. O resultado dos estudos mostrou que a máxima resistência à compressão ocorre a uma umidade definida, e a resistência da mistura diminui gradualmente, à medida que se acrescenta mais ou menos água do que o necessário. A figura abaixo ilustra esta situação.

* Uma areia de moldagem úmida é chamada "areia verde". Quando os moldes não sofrem secagem antes do vazamento, costuma-se usar o termo "moldagem e areia verde". Assim, resistência a compressão a verde significa a resistência à compressão do molde de "areia verde". (MARIOTO, 1978)

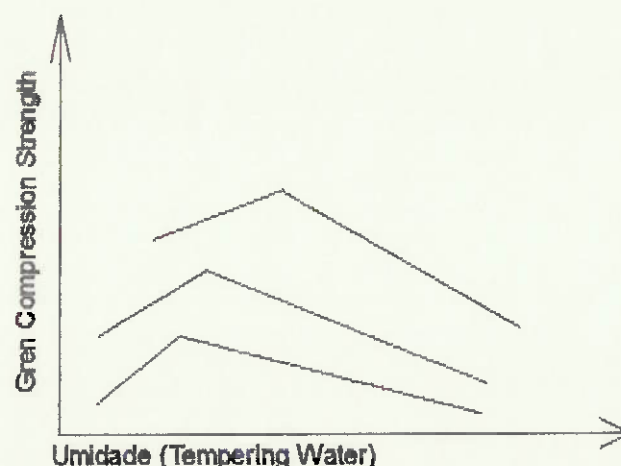


Figura - Relação entre umidade da mistura e resistência a compressão a verde. (GRIM & CUTHBERT, 1940)

Neste gráfico, as três curvas representadas são para porcentagens crescentes de argilas, sendo a curva inferior a de menor porcentagem.

Os autores estudaram, ainda, a relação entre a densidade aparente da mistura e a umidade (tempering water). Conforme a quantidade de água (tempering water) acrescentada à mistura argila seca-areia aumentava, o peso por unidade de volume da mistura diminuía até um valor específico de umidade, e em seguida aumentava novamente. Muitos especialistas na área costumam chamar de *temper point* das areias de moldagem, a umidade na qual a areia tem menor peso por unidade de volume (*minimum bulk density point* - mbdp). O aspecto da curva densidade em função da umidade é mostrado na figura abaixo, para várias porcentagens de argilas adicionadas.

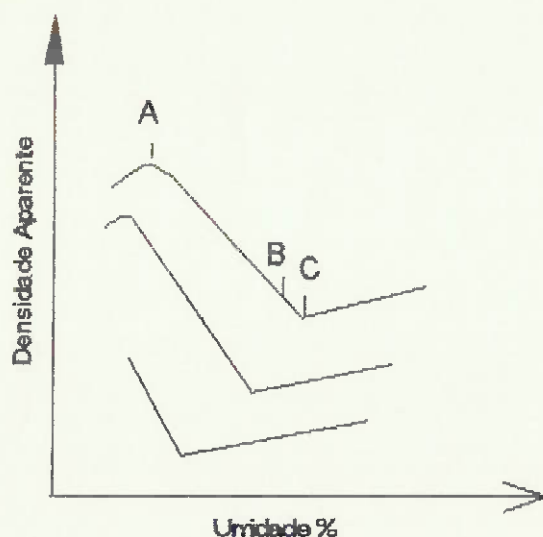


Figura - Relação entre umidade e densidade aparente. O ponto de mínimo equivale ao limite entre água rígida e água fluida. (GRIM & CUTHBERT, 1940).

Existe uma certa correlação entre o ponto de mínima densidade e o ponto de maior resistência a compressão, contudo, estes muitas vezes diferem entre si, conforme o tipo de argila acrescentada, bem como a quantidade acrescentada. Em geral, o ponto de mínima densidade encontra-se ligeiramente deslocado para o lado úmido da curva de resistência à compressão.

Microscopicamente, quando a água é adicionada à mistura areia-argila, esta penetra na argila e forma um filme que recobre a superfície da argila. A espessura do filme de água aumenta conforme mais água é adicionada. Quando o filme é pouco espesso, as moléculas de água que compõem o filme ocupam posições fixas definidas com respeito à superfície da argila. Esta água, na qual as moléculas estão orientadas e fixas, não é fluida, mas sólida e rígida. Assim, a primeira água adicionada à mistura areia-argila assume uma condição de rigidez sobre a superfície da argila. (Grim & Cuthbert, 1940).

Conforme adicionas-se mais água, o filme torna-se mais espesso, formando camadas. Isto é, a primeira água forma uma camada da espessura de uma molécula, adicional água forma uma segunda camada e assim por diante. A água encontra-se na condição rígida somente até uma determinada espessura. Acima desta espessura, a

rigidez gradualmente diminui, de maneira que não existe uma fronteira abrupta entre a água rígida e a água fluida. (Grim & Cuthbert, 1940).

A causa da orientação das moléculas de água e sua conseqüente rigidez está no arranjo dos átomos que constituem a argila. Este efeito do arranjo dos átomos se estende a uma distância limitada em relação à superfície da argila. Assim, a rigidez da água também está limitada a essa mesma distância.

No lado esquerdo da curva de densidade por umidade, a água que é adicionada até o ponto A, penetra na argila, mas não é suficiente para permitir a separação das moléculas do mineral e cobertura dos grãos de quartzo. Com menos água que o indicado pelo ponto A, existe na realidade pouca argila cobrindo os grãos de quartzo, e conseqüentemente a argila e a água estão presentes nos poros entre os grãos. A água adicionada é, neste caso, uma adição ao peso específico da mistura.

Conforme o ponto A é ultrapassado, a quantidade de água torna-se adequada para permitir a quebra (separação) das partículas minerais e o desenvolvimento de uma cobertura de argila e água em torno dos grãos de quartzo. Conforme esta cobertura torna-se mais espessa e perfeita com aumento da água (*tempering water*), o empacotamento dos grãos torna-se mais difícil.

O ponto de mínima densidade, C, é o ponto onde os grãos de quartzo possuem maior resistência ao empacotamento.

O ponto B indica o ponto de máxima resistência à compressão (*Grenn compression*) para certas argilas. Para umidades acima do ponto C, a cobertura dos grãos de quartzo torna-se mais leve, permitindo que parte desta cobertura fique espremida no espaço intersticial, aumentando, desta maneira, a densidade.

Uma explicação para a variação da densidade aparente da mistura é oferecida baseada no conceito de que certa quantidade limite de água se adere na superfície basal das argilas no estado rígido, e esta água, controlando as características do recobrimento dos grãos de quartzo, influi na forma do ajuste mútuo, ou empacotamento dos grãos de areia e conseqüente redução dos poros da mistura. (WENNINGER, 1963)

Finalmente, pode-se ligar a teoria dos fundidores ao presente estudo de redução de umidade. Esta ligação ocorre na chamada água rígida. Retornando ao gráfico densidade por umidade (figura), o ponto de mínimo representa justamente a umidade na qual tem-se o limite entre a água rígida e a água fluida. Em outras palavras, representa o ponto limite onde se pode desaguar um composto granular. Por analogia, do ponto A ao ponto C, a explicação pode ser dada da mesma maneira que os fundidores o fazem. Contudo, tem-se em princípio apenas um elemento (apesar de às vezes este ser composto por vários minerais) e a faixa granulométrica é mais extensa. A figura explica esquematicamente o que acontece.

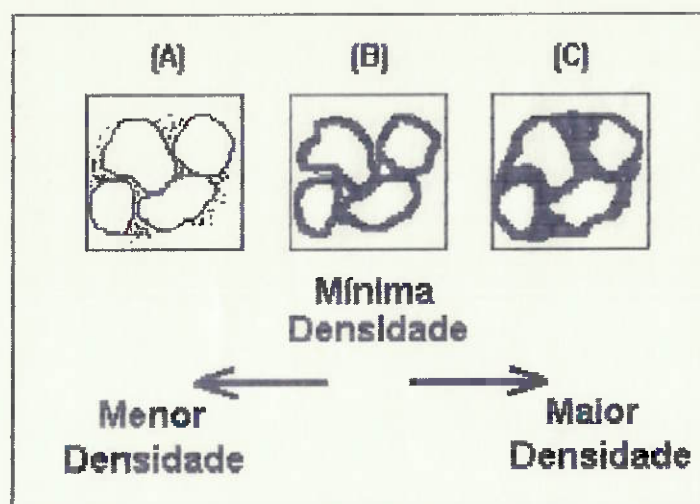


Figura - Esquema explicativo para a curva densidade X umidade.(MARIOTTO, 1978). (A) a água começa a aderir rigidamente mas é ainda insuficiente para todas as partículas. A densidade aparente começa a cair. (B) o número de camadas de água aderidas rigidamente é máximo. A densidade é mínima. (C) a água fluida em excesso passa a ocupar os interstícios, aumentando a massa por unidade de volume. A densidade cresce novamente.

Assim, pode-se dizer que em princípio, a quantidade de água não é suficiente para molhar todas as partículas de maneira a permitir uma maior aderência desta às partículas. À medida que a água adicionada aumenta, o número de camadas de água aderida as partículas, e portanto, água rígida aumenta, de maneira a atingir o ponto C (situação (B) na figura), limite entre a água rígida e a água fluida. Essa queda na densidade ocorre pois conforme mais água é adicionada e o filme de água rígida adquire maior espessura, cada vez menos grãos podem ser acomodados numa mesma unidade de

volume, e a densidade da água é menor que a densidade dos minerais. Assim, para uma mesma unidade de volume tem-se uma troca de mineral por água, e a densidade aparente diminui. Após o ponto C, a água que é acrescentada deixa de aderir-se rigidamente às partículas e passa a ocupar os interstícios intergranulares das partículas, fazendo com que o peso da mistura aumente, apesar do volume permanecer constante, pois a água aloja-se nos espaços vazios. Desta forma, a densidade aparente torna a crescer.

Comparando-se o conceito de água rígida com os três estados em que a água pode se apresentar durante o fluxo por um leito poroso, definidos por Versluys, 1917, conforme visto no capítulo 2.1, conclui-se que o valor equivalente à água rígida, retirada da curva densidade aparente em função da umidade, representa a umidade em que o material se encontrará no início do estado pendular. Em outras palavras, esta é a umidade limite de desaguamento que possível de se atingir por um meio mecânico.

2.5. Trabalhos Correlacionados ao Tema

O primeiro trabalho que se tem notícia a respeito do uso de reagentes químicos no auxílio à redução de umidade foi apresentado por Silverblatt, C. E. e Dahlstrom, D. A., 1954. Estes autores estudaram o efeito da viscosidade e da tensão superficial na umidade da torta de filtração de carvão fino. Utilizou-se amostras de carvão a 60% de sólidos, contendo várias quantias de surfactantes. Usou-se Aerosol AT e Tergitol CW. Em cada teste media-se o tempo necessário para determinado volume de ar passar através da torta, a espessura final da torta e a sua umidade. No filtrado, media-se a tensão superficial do líquido e a sua viscosidade. Conseguiu-se abaixar a umidade da ordem de 20%, quando o teste era realizado sem agentes químicos, para umidades da ordem de 6,5%, quando da dosagem ótima do agente químico. A conclusão final dos autores é de que a viscosidade foi um fator mais importante na redução da umidade que a tensão superficial, quando utiliza-se baixas concentrações do surfactante.

Em 1976, Nicol, S. K. estudou o efeito de surfactantes no desaguamento de carvão fino. Este autor propôs duas maneiras de interferência no desaguamento causadas pelo surfactante. Primeiramente, a adição de um surfactante sob a forma de floculante pode influenciar o comportamento da polpa na sedimentação e espessamento, além de poder também controlar a taxa unitária de filtração. Em segundo lugar, a adição de um surfactante na forma de tensoativos abaixa a tensão superficial do líquido, e desta forma influi na quantidade de umidade retida. Os testes realizados mostraram que os floculantes conduziram a ótimas taxas de sedimentação. Contudo, a adição de floculantes conduziu a piores taxas de filtração. Os resultados mostraram, ainda, sob baixa sucção, a taxa de diminuição da umidade é maior que a alta sucção, onde a umidade passa a ser constante. Este resultado já foi apresentado mais detalhadamente no capítulo 2.1 (curva de umidade em função da sucção, de Versluys). O uso de surfactantes tensoativos mostrou redução da umidade residual (no início do estado pendular) de 8% para 5%. O uso de floculantes causou o aumento da umidade em cerca de 1% para cada 5 ppm acrescentado, para as mesmas condições do teste com tensoativo. Ao contrário de

publicações anteriores de La Mer & Smillie, 1962 e Leutz & Clement, 1970.(NICOL, 1976). Os dados não revelaram nenhuma dosagem ótima para o polímero floculante. Nicol concluiu, ainda, que parte do surfactante adicionado adsorve-se ao carvão, uma vez que o valor limite de umidade residual é controlado pelo valor limite da tensão superficial, que no caso do dodecil sulfato de sódio é de aproximadamente 38 mN/m, correspondendo a uma concentração nominal de 2 ppm. Contudo, neste trabalho, a umidade residual limite ocorreu à concentração muito maior de 50 ppm, o que sugere adsorção de parte do reagente ao mineral. Esta adsorção significa que o componente de energia livre de adsorção que governam a interação entre as moléculas do surfactante e a superfície é maior que o correspondente componente elétrico.

Nicol, 1980, após considerar os mecanismos de desabamento (vide capítulo 2.1), propôs a utilização de óleo como auxiliar ao desagumamento de carvão fino. O óleo teria a função de aglomerar os finos de carvão, aumentando a espessura dos canais de drenagem, conduzindo à menor umidade da torta de carvão após a filtragem. Esse processo levaria a custos de investimento e operacionais menores que os custos de secagem, além de evitar o risco de deterioração do carvão durante o aquecimento sofrido no processo de secagem e proporcionar outras vantagens como a redução do custo de frete, maior resistência à oxidação do carvão em pilhas de estoque, redução da possibilidade de congelamento do carvão nos porões de navios em regiões frias, benefícios ambientais e maior produtividade dos fornos de coque.

Clement, M. e Bonjer, J., 19..., realizaram estudos sobre desagumamento de finos através do uso de floculantes. Após considerarem a equação de Kozeny, (TILER, 1953, TILER, 1955), conforme foi visto no capítulo 2.1 deste trabalho, apresentaram duas propostas básicas para o mecanismo de adsorção de polieletrólitos na superfície mineral, baseadas nos estudos de Healy e La Mer: junção física por atração eletrostática entre os grupos iônicos do polímero e os centros ativos da superfície mineral, e ou ponte de hidrogênio entre vários grupos do polímero (OH^- , NH_2^- etc) e átomos de oxigênio da superfície mineral ou seus hidratos. A formação de uma ligação química também é possível. Em seus ensaios, utilizaram os seguintes minerais em ordem crescente de

hidrofobicidade : caulim, barita e galena. Foram usados os seguintes reagentes: poliacrilamida não iônica, poliacrilato aniônico e polietilenimin catiônico. Foram medidos o tempo de filtragem, a taxa específica de fluxo, o volume de vazios e a estrutura da torta formada. A umidade da torta de caulim dependia do tipo e da concentração do polímero. O fator mais relevante é o volume de vazios, o qual é influenciado pelo tamanho das partículas. A formação de flocos aumenta tanto a porosidade quanto a água contida nas amostras de caulim. Os autores concluíram que, consideradas as diferentes propriedades superficiais, os minerais apresentaram comportamentos na adsorção com respeito aos íons OH^- e H^+ . Medidas da concentração residual dos polímeros na solução mostraram que estes são adsorvidos na superfície mineral até um determinado "valor de saturação". Após este valor, a concentração do polímero na solução é diretamente proporcional a quantidade de polímero adicionada e esse excesso causa um conseqüente aumento no tempo de fluxo. Isto significa que o polímero remanescente entope os poros da torta. Os polímeros não mudaram a carga superficial do mineral. Os testes de filtragem mostraram que os polímeros afetam a taxa de fluxo, principalmente quando os grupos ativos do polímero e do mineral têm cargas elétricas de diferente sinal. Análises em microscópio eletrônico mostraram que a estrutura da torta é determinada principalmente pela forma e pelo tamanho das partículas minerais. Os polímeros conduzem a uma distribuição mais uniforme dos poros e a uma maior porosidade da torta. A eficiência de desaguamento dos polímeros é melhor sobre os minerais hidrofílicos, como o caulim e a barita, do que com minerais hidrofóbicos, como a galena.

Stroh, G. e Stahl, W., 1991, estudaram os mecanismos de ação dos surfactantes no processo de desaguamento, e como estes contribuem para uma menor umidade das tortas de filtragem submetidas à diferença de pressão. Os conceitos por eles discutidos estão apresentados em maior detalhe no capítulo 2.3. deste presente trabalho. Os testes de laboratório mostraram que o ângulo de contato no desaguamento de poros estreitos deve estar em torno de zero. Então ocorre umidecimento completo, o que é suportado pela rugosidade da superfície porosa. O principal efeito constatado no uso de surfactantes diz respeito ao abaixamento da tensão superficial dinâmica, e esse processo é mais efetivo

com o aumento da concentração do reagente. Na prática é possível se conseguir importante redução da umidade das tortas de filtração.

Mwaba, C. C., 1991, investigou sobre o efeito de surfactantes no desaguamento de suspensões minerais, em termos dos fenômenos da físico-química de superfície e dos processos físicos envolvidos na filtração e no desaguamento. Neste trabalho o autor estudou especificamente o efeito do sódio di-(2 etilexil) sulfossuccinato no desaguamento de suspensões de grafite e de hematita. Os conceitos discutidos estão apresentados no capítulo 2.3 deste presente trabalho. O autor concluiu que sem dúvida alguma o SD2EHS melhora o desaguamento das suspensões de hematita e grafite. Os resultados mostraram que a tensão superficial por si só não deu muita indicação da efetividade do sódio di-(2 etilexil) sulfossuccinato como um agente desaguante. A correlação dificuldade de correlação entre a redução da tensão superficial, umidade final da torta e hidrofobicidade da superfície mineral tornou ainda mais difícil de deduzir a lei para surfactantes a partir da equação de Laplace-Young, como frequentemente é sugerido. É óbvio que a efetividade de tal surfactante como um agente desaguador seja determinada pelo fenômeno interfacial, associado a sua influência nas propriedades da dupla camada elétrica das partículas minerais.

Ramos, L. T. S., Santana, A. N., Valadão, G. E. S. e Pevez, O. F., 1992, estudaram a influência de reagentes auxiliares na filtração sobre "pellet feed fines" de minério de ferro. Nos ensaios foram usados os floculantes poliacrilamida aniônica (PAM) de alto peso molecular e floculantes catiônicos de baixo peso molecular. Como surfactantes empregou-se acetato de éter-amina e um auxiliar de filtração comercial. A nível de testes de bancada, a adição de floculantes de baixo peso molecular (poliaminas 1 e 2) não apresentou resultados promissores. Houve tanto aumento da umidade quanto redução da taxa de filtração. A adição de éter-amina, sem adição conjunta de floculante, mostrou tanto redução da umidade quanto da taxa unitária de filtração, com o aumento da concentração do surfactante. O aumento da concentração de éter amina na presença do floculante (PAM) mostrou crescimento da taxa unitária de filtração e redução da umidade até 100 g/t do surfactante. O auxiliar de filtração comercial reduziu a umidade

O minério é comercializado a várias especificações, sendo que o item que mais varia de contrato para contrato, a umidade. Para a exportação, a umidade máxima admissível é de 5% pois acima deste valor o minério congela no porão do navio quando este navega pelas águas geladas do Atlântica Norte. Para contratos internos, a umidade varia entre 6% e 12 %. Nestes casos, para se chegar à umidade desejada, faz-se uma blendagem entre o minério fino/superfino úmido e o minério granulado seco a 5%.

3.3. Relevância do Problema.

O custo de secagem representa uma considerável porcentagem no custo final de produção do minério, uma vez que o custo da energia térmica é bastante alto. Além disso, a capacidade de produção de minério seco representa um gargalo na linha de produção uma vez que além de suprir os embarques de minério seco, o minério ainda deve suprir a blendagem para os embarques úmidos.

Desta maneira, qualquer redução de umidade, tanto do produto granulado quanto do produto fino/superfino, representa redução do custo unitário de secagem e conseqüentemente, do custo unitário de produção do minério.

A redução da umidade do produto fino/superfino, que consiste no minério mais úmido (18 %), via agentes tensoativos, traria inúmeros benefícios, a saber:

- Redução do custo unitário de secagem, uma vez que menos material seco seria utilizado na blendagem com o minério úmido;
- Redução do custo de transporte ferroviário entre a Mina e o Porto e aumento da produtividade deste processo;
- Redução da umidade da torta de filtragem com conseqüente possibilidade de redução da umidade na pilha, uma vez que o minério chega mais seco a esta;
- Possibilidade de redução do custo unitário de frete com o estabelecimento de contratos a umidades mais baixas. Ou com o ganho de bonificações por entrega do minério abaixo da umidade de contrato.
- Possibilidade futura de se utilizar reagentes tensoativos sobre o minério granulado também.

3. Objetivos e Relevância.

3.1. Objetivos deste Trabalho.

O presente trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade técnica da utilização de agentes tensoativos na redução do teor de umidade da bauxita da Mineração Rio do Norte, além de contribuir para a difusão deste método pouco utilizado de resolver problemas relacionados ao desaguamento, bem como a proposição de metodologias para o desenvolvimento deste tipo de análise..

3.2. Apresentação da Situação

A mineração Rio do Norte S.A. produz anualmente cerca de 8,5 milhões de toneladas de bauxita lavada, constituindo-se numa das maiores empresas nessa categoria e entre as cinco maior empresas de mineração do País. O minério da MRN é composto de três produtos básicos: o produto granulado (-3" +14#), o produto fino (-14 +150#) e o produto superfino (-150 +400#). A fração -400# compõe o rejeito.

O minério granulado após a etapa de peneiramento é empilhado em pilha alongada, onde acaba de desaguar, num tempo de residência de 8 a 24 horas, saindo à umidade de cerca de 12%. O produto fino é filtrado em filtro circular horizontal. O produto superfino é filtrado em filtro de disco vertical. Após a filtragem, tanto o produto fino quanto o superfino são empilhados na mesma pilha cônica, onde permanecem de 8 a 24 horas, saindo à umidade de cerca de 18%. Os minérios são transportados da mina para o porto por ferrovia, num percurso de 28 km. Na área do porto o minério granulado e o minério composto pelo fino e pelo superfino são empilhados em pilhas cônicas diferentes. O minério granulado é retomado por baixo da pilha e conduzido a uma planta secagem constituída por dois secadores rotativos onde a energia térmica produzida provém da queima do óleo BFP. A temperatura de secagem é bastante elevada, da ordem de 1200 °C, e a umidade do produto final é de 5%, no máximo. A capacidade do secador de minério é de 750 t/h, ao passo que a capacidade de produção da usina de beneficiamento é de 2250 t/h.

4. Materiais e Métodos

O minério utilizado corresponde à bauxita da Mineração Rio do Norte de Porto Trombeta, na fração granulométrica -14# +400#, industrialmente conhecida como produto fino/superfino, coletada na correia de retomada do minério para a operação de transporte até a área do Porto.

4.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada em peneiras manuais de laboratório, segundo a série mesh tyler, nas frações 14, 28, 35, 48, 65, 100, 150, 325 e 400#. O peneiramento foi realizado a úmido.

4.2. Análises de Umidade

As análises de umidade foram realizadas de acordo com uma norma japonesa adotada pela Companhia Vale do Rio Doce para a venda do minério de ferro. Tal fato e deveu ao fato da familiaridade que o autor já tinha com esta norma, além do que esta tem se apresentado bastante satisfatória. A umidade é medida em termos de base úmida. A norma completa encontra-se descrita no anexo I deste trabalho.

4.3. Testes de Filtragem

Os testes de filtragem foram realizados em funil de Büchner de 150 mm com papel de filtro qualitativo padrão de 150 mm, associado a um kitassato, onde era ligada uma rede de vácuo com capacidade máxima de 760 mmHg. A polpa do minério a porcentagens de sólidos variadas era jogada sobre o funil após condicionamento por tempo determinado. Em seguida abria-se o vácuo e deixava-se o material filtrando por tempo pré estabelecido. Após a filtragem, a torta era submetida a análise de umidade e media-se o volume de filtrado.

4.4. Teste de Umidade Limite via Filtragem.

Em análise preliminar optou-se por amostras de 500 g de minério para a execução do teste.

O teste consiste em oferecer diferentes quantidades de água para uma mesma massa de minério e deixar a mistura filtrando por tempo suficientemente grande para que toda água possível seja retirada, de maneira a atingir-se o início do estado pendular, conforme visto no capítulo 2.1. Assim tem-se a informação da umidade máxima que o minério pode ser desaguado.

Neste caso, as amostras de minério foram de 500g e ofereceu-se sucessivamente 100ml, 200ml, 400 ml, 600 ml e 800ml de água. O volume de filtrado foi coletado e medido na mesma proveta utilizada para adicionar a água ao minério. Antes da filtragem o minério era condicionado à água por dois minutos e o tempo de filtragem foi de 40 minutos para todos os casos.

4.5. Teste de Umidade Limite pela Curva Densidade Aparente X Umidade

Conforme proposto por Grim & Cuthbert, 1940 (ver capítulo 2.4), levantou-se a curva densidade aparente mínima em função da umidade, a fim de se obter de maneira mais precisa o valor da umidade limite de desaguamento. O procedimento detalhado do teste encontra-se descrito no anexo I deste trabalho.

4.6. Determinação do Ponto de Carga Zero

Com o objetivo de determinar o ponto de viragem de carga do minério bem como o da escolha de reagentes, conforme capítulo 2.2.3., determina-se o pcz do minério, conforme procedimento descrito no anexo I deste trabalho.

4.7. Teste de Desaguamento via Agentes Tensioativos

O teste consiste, em princípio, na adição à mistura água/minério de surfactantes a concentrações variadas, com tempos de condicionamento definido, deixando-se a mistura filtrar por um tempo definido e seleccionar qual o reagente e qual a concentração tiveram o melhor resultado. Em seguida esse reagente é testado para uma situação que simule melhor as condições da filtração que é realizada industrialmente. Uma próxima etapa é a quebra deste reagente numa família de reagentes filhos, e a repetição do teste, a fim de otimizar técnica e economicamente a operação.

(os tempos de condicionamento e filtração ainda estão em testes, bem como a escolha dos reagentes iniciais)

5. Caracterização do Minério para a Umidade

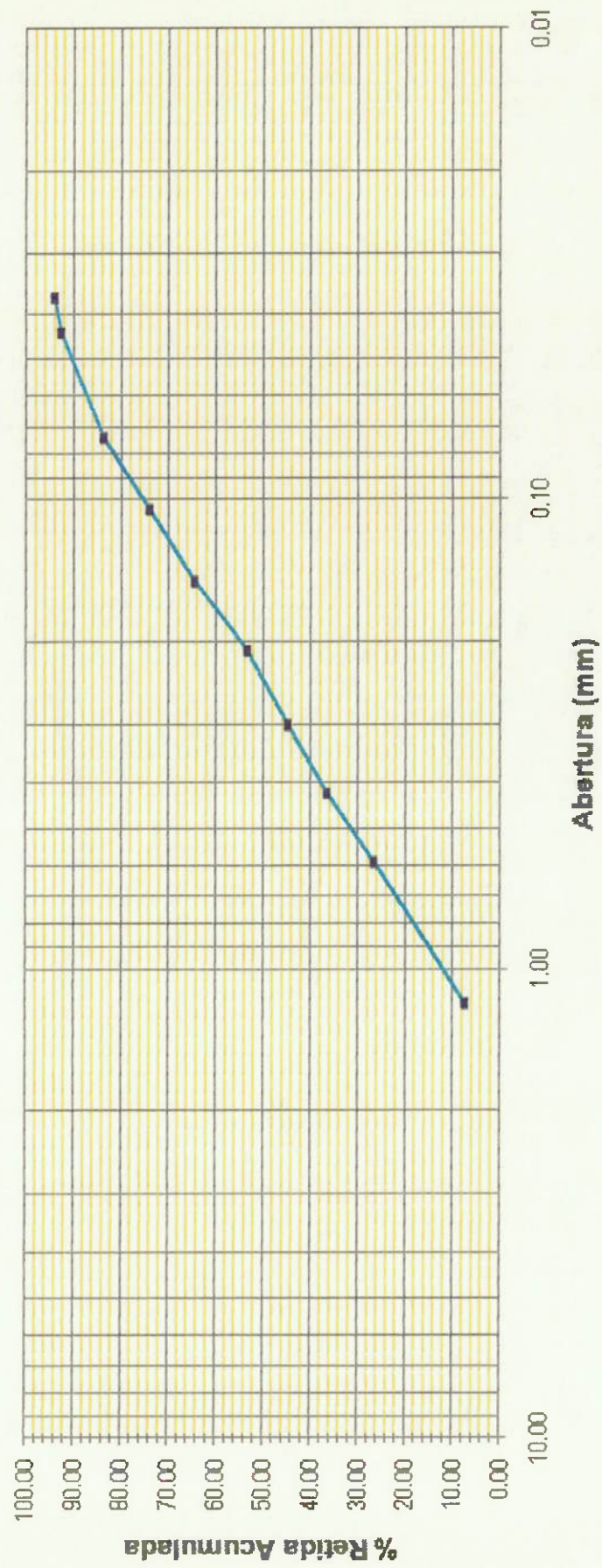
Análise Granulométrica

Abertura Mesh Tyler	Abertura (mm)	Peso Retido (g)	% Peso (%)
+14	1.18	146.87	7.40
-14 +28	0.59	380.21	19.16
-28 +35	0.42	197.33	9.94
-35 +48	0.30	164.70	8.30
-48 +65	0.21	168.37	8.49
-65 +100	0.15	219.91	11.08
-100 +150	0.105	192.35	9.69
-150 +200	0.074	189.95	9.57
-200 +325	0.044	180.33	9.09
-325 +400	0.037	26.21	1.32
-400	0.037	118.08	5.95
Total		1984.31	100.00

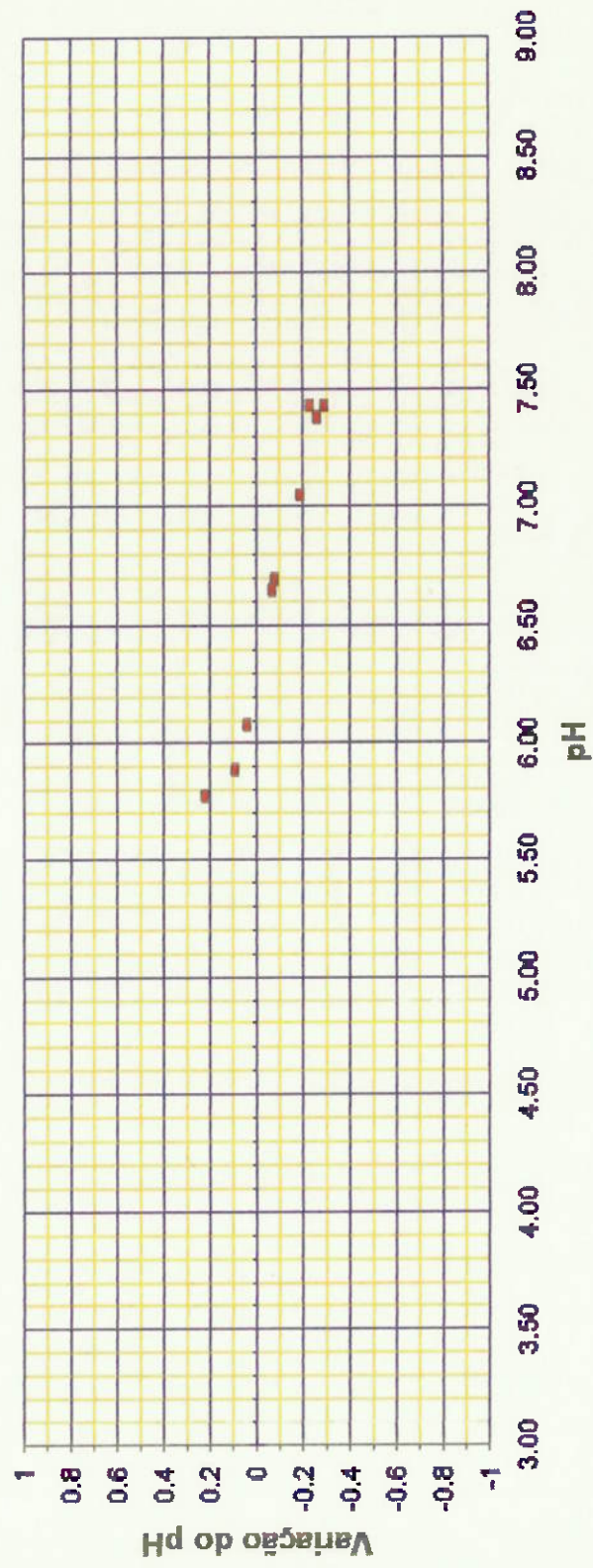
Determinação do PCZ do Minério de Bauxita

pH inicial	pH final	Delta pH
7.05	6.86	-0.19
7.43	7.20	-0.23
7.43	7.14	-0.29
6.08	6.12	0.04
6.70	6.62	-0.08
5.78	6.00	0.22
5.89	5.98	0.09
6.65	6.58	-0.07
7.38	7.12	-0.26

Análise Granulométrica



Determinação do PCZ



Análise de Umidade Limite Após Vácuo Prolongado
Amostras de 500 g

Teste No	Vol Água (ml)	Vol Água Filtrada (ml)	Vol Água Retida (ml)	Umidade (%)	Relação Água/minério	% Água Retida	% Água Filtrada	Água filtrada/ g de Minério	Água Retida/ g de Minério
42	800	705	95	12.87	1.6	11.88%	88.13%	1.41	0.03
43	100	13	87	11.95	0.2	87.00%	13.00%	0.03	0.02
44	200	126	74	9.30	0.4	37.00%	63.00%	0.25	0.02
45	400	325	75	10.62	0.8	18.75%	81.25%	0.65	0.02
46	600	517	83	11.74	1.2	13.83%	86.17%	1.03	0.02
47	800	715	85	10.56	1.6	10.63%	89.38%	1.43	0.02
48	600	535	65	11.95	1.2	10.83%	89.17%	1.07	0.02
49	400	317	83	11.82	0.8	20.75%	79.25%	0.63	0.02
50	200	133	67	9.39	0.4	33.50%	66.50%	0.27	0.02
51	100	14	86	11.63	0.2	86.00%	14.00%	0.03	0.02
52	200	126	74	9.22	0.4	37.00%	63.00%	0.25	0.02
53	400	318	82	12.52	0.8	20.50%	79.50%	0.64	0.03
54	600	500	100	12.18	1.2	16.67%	83.33%	1.00	0.02

Umidade Média

11.21 %

Desvio Padrão

1.26 %

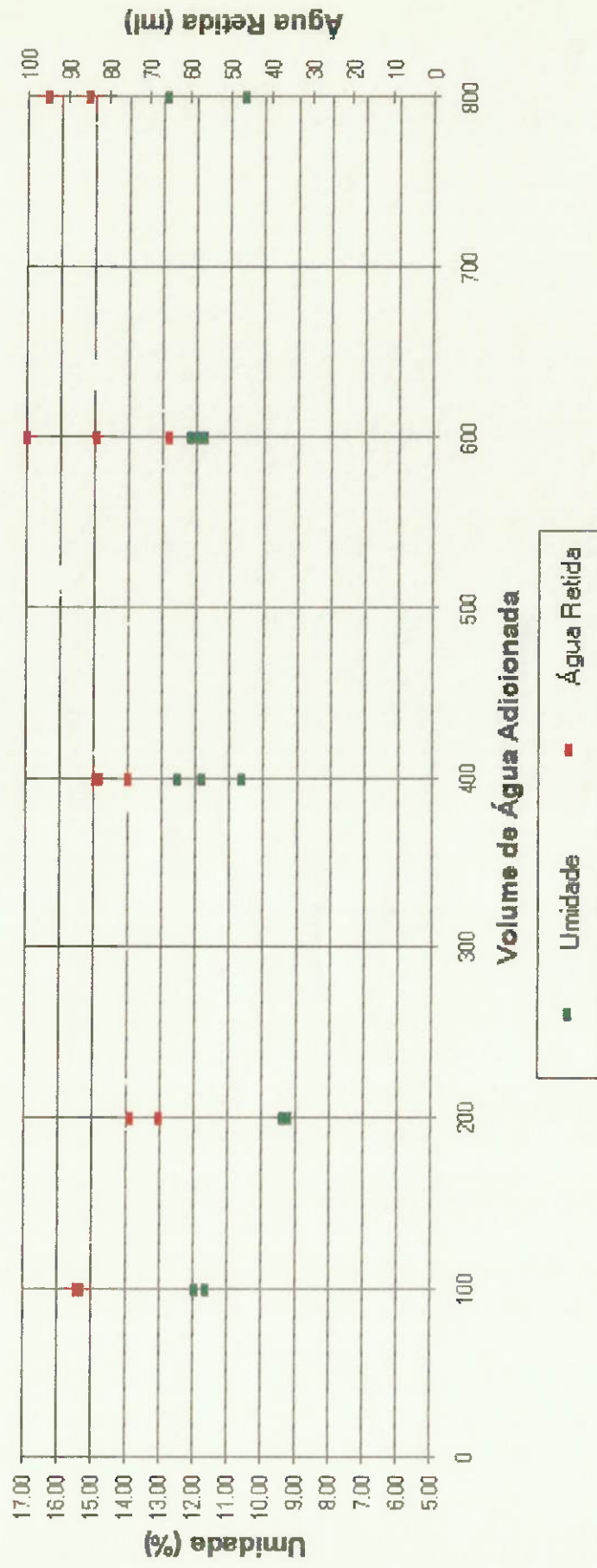
Água Retida Média

81.23 ml

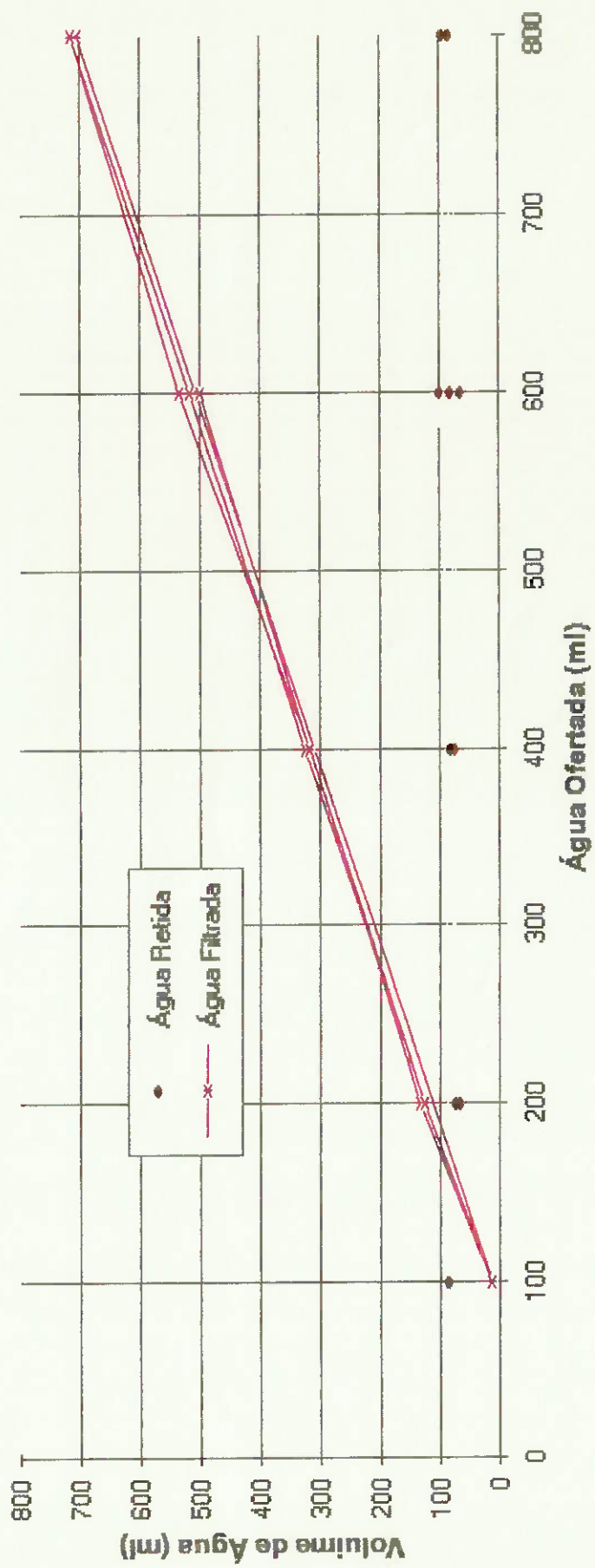
Desvio Padrão

10.12 ml

Umidade/Água Retida Após Vácuo Prolongado



Relação Entre Águas (amostras de 500 g)



**Análise de Umidade Limite
Minério +35# (500g)**

Teste No	Vol. Água (ml)	Vol Água Filtrada (ml)	Vol. Água Retida (ml)	Umidade (%)	Relação Água/g minér	% Água Retida	% Água Filtrada	Água filtrada/ g de Minério	Água Retida/ g de Minério
62	200	123	77	9.37	0.4	38.50%	61.50%	0.49	0.31
63	400	338	62	7.09	0.8	15.50%	84.50%	1.35	0.25
64	600	538	62	7.10	1.2	10.33%	89.67%	2.15	0.25
65	200	122	78	6.62	0.4	39.00%	61.00%	0.49	0.31

Umidade Média
Água Retida Média

7.55 %
69.75 ml

Desvio Padrão
Desvio Padrão

1.24 %
8.96 ml

**Análise de Umidade Limite
Minério -25 +100# (500g)**

Teste No	Vol. Água (ml)	Vol Água Filtrada (ml)	Vol. Água Retida (ml)	Umidade (%)	Relação Água/g minér	% Água Retida	% Água Filtrada	Água filtrada/ g de Minério	Água Retida/ g de Minério
66	200	112	88	10.28	0.4	44.00%	56.00%	0.45	0.35
67	400	326	74	8.23	0.8	18.50%	81.50%	1.30	0.30
68	600	525	75	7.93	1.2	12.50%	87.50%	2.10	0.30

Umidade Média
Água Retida Média

8.81 %
79.00 ml

Desvio Padrão
Desvio Padrão

1.28 %
7.81 ml

Análise de Umidade Limite
Minério -100# (500g)

Teste No	Vol. Água (ml)	Vol Água Filtrada (ml)	Vol. Água Retida (ml)	Umidade (%)	Relação Água/g minér	% Água Retida	% Água Filtrada	Água filtrada/ g de Minério	Água Retida/ g de Minério
69	200	70	130	14.74	0.4	65.00%	35.00%	0.28	0.52
70	400	304	96	12.16	0.8	24.00%	76.00%	1.22	0.38
71	600	500	100	13.20	1.2	16.67%	83.33%	2.00	0.40
72	300	200	100	12.57	0.6	33.33%	66.67%	0.80	0.40

Umidade Média

13.17 %

Desvio Padrão

1.13 %

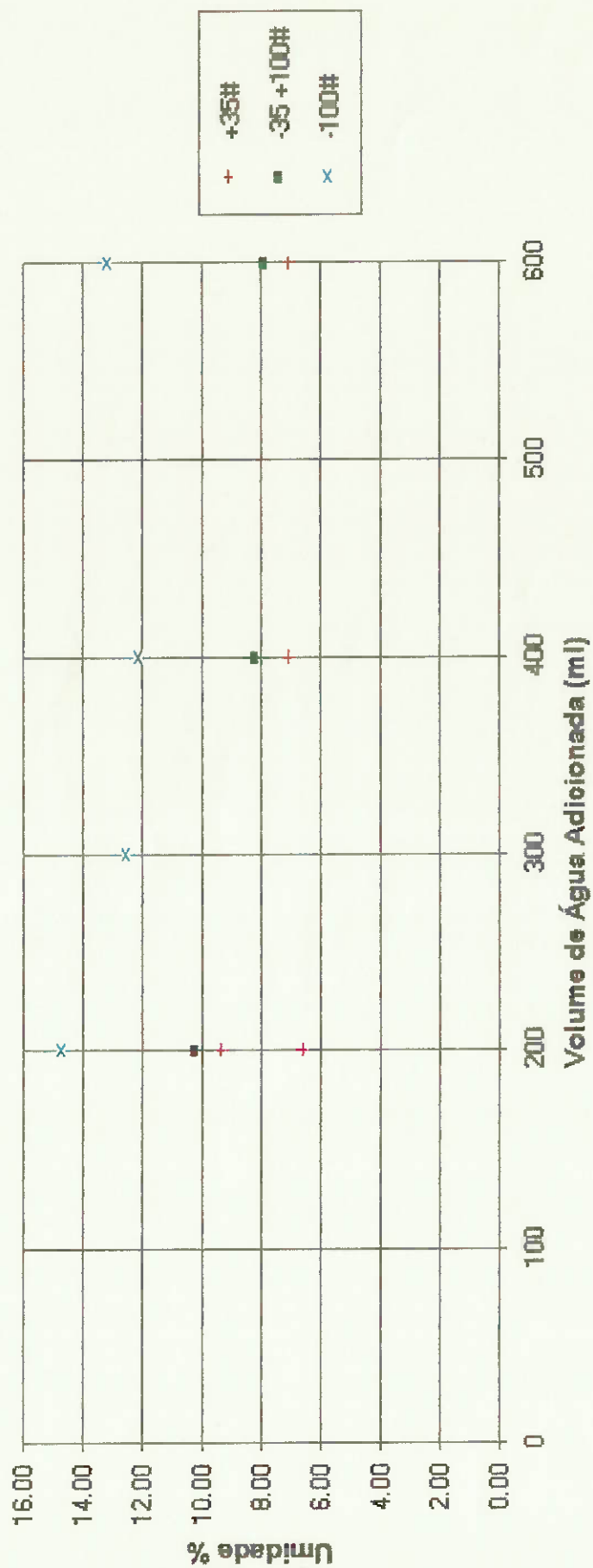
Água Retida Média

106.50 ml

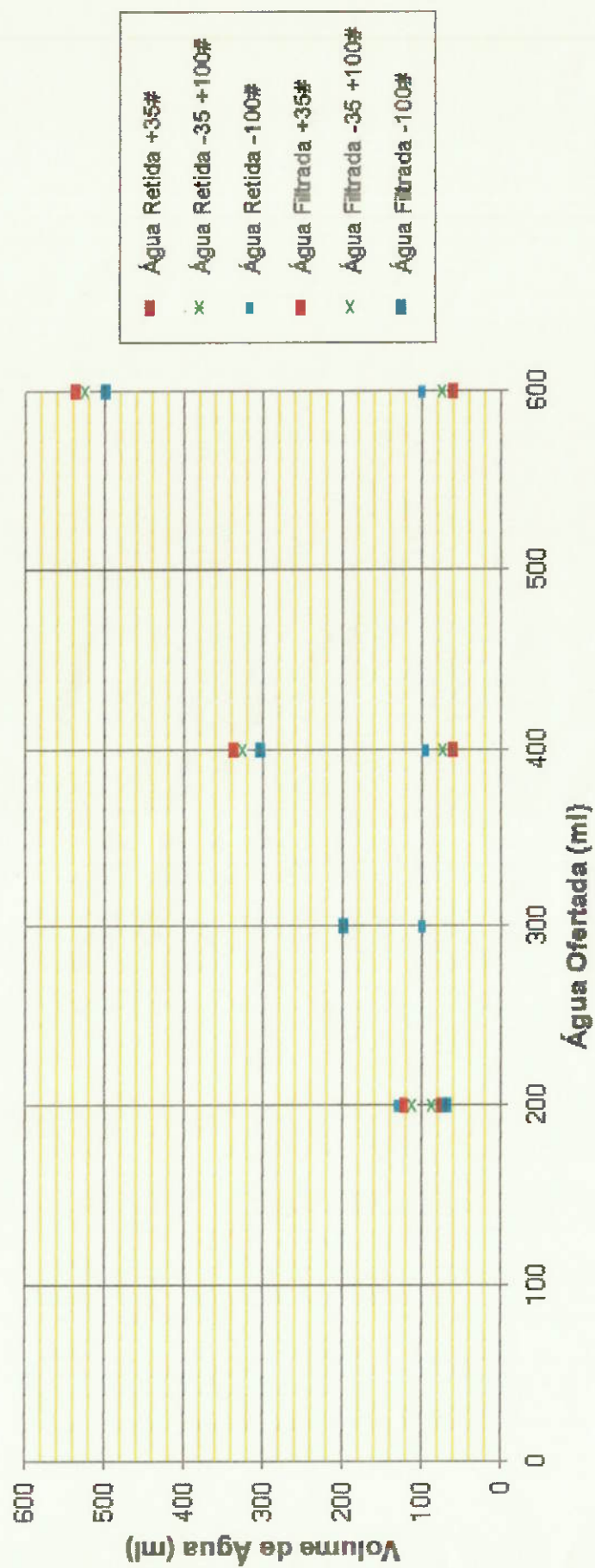
Desvio Padrão

15.78 ml

Unidade Após Vácuo Prolongado por Fração Granulométrica



Relação Entre Águas por Granulometria



Análise de Umidade Limite pela Curva Densidade X Umidade

Teste No	Umidade (%)	Peso do Recip de teste (g)	Desvio (g)	Dap Minima (t/m3)
74	7.78	991.3	17.5	0.857
75	8.47	980.5	7.5	0.847
76	9.19	980.6	5.9	0.847
77	10.00	1001.5	5.6	0.867
78	10.52	1018.6	5.6	0.883
79	6.55	1042.0	9.8	0.905
80	6.68	1022.5	8.6	0.887
81	4.00	1136.7	27.1	0.995
82	0.00	1366.7	6.7	1.214
83		968.9	4.4	0.836
84		1038.7	8.6	0.902

Tara do Recipiente = 90.68g

Volume do Recipiente = 1.05E-03 m3

da torta sem reduzir a taxa unitária de filtragem. A nível de teste industrial, a adição do PAM aumentou tanto a taxa unitária de filtragem quanto a umidade da torta.

Leal Filho, L. S., 1993, tem realizado estudo de desaguamento por drenagem em pilha, via agentes tensoativos, sobre minério de ferro. Até o momento conseguiu-se a redução de 2 pontos percentuais na umidade final do minério, com grandes expectativas implantação do processo a nível industrial.

Densidade Aparente X Umidade

