

CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO PARA DESAGUAMENTO*

Carlos de Figueiredo Gontijo¹

Resumo

Um minério de ferro, reconhecido por sua dificuldade de desaguamento, foi caracterizado. As forças capilares e a composição mineralógica do minério explicam seu comportamento frente ao desaguamento. Através de ensaios de compactação a forma de ocorrência da água pode ser inferida. A água no estado pendular e funicular ficam retidas por capilaridade no leito. Parte da água intersticial e a água livre podem ser drenadas, por gravidade ou com aplicação de vácuo, mas nunca atingindo o valor de umidade onde ocorre um mínimo na curva de densidade aparente.

Palavras-chave: Minério de ferro; Desaguamento; Ensaio de compactação; Força capilar.

IRON ORE CHARACTERIZATION FOR DEWATERING

Abstract

An iron ore, known for its difficult dewatering, was characterized. Capillary forces and its mineralogical composition explain its dewatering behavior. Through compaction tests, the form of water occurrence can be inferred. The water in the pendular and funicular state are retained by capillarity in the particle bed. Part of the interstitial water and free water can be drained by gravity or with vacuum application, but never reaching the moisture value where a minimum occurs in the apparent density curve

Keywords: Iron ore; dewatering; Compaction assays; Capillary force.

¹ Engenheiro de Minas, UFMG, pesquisador associado, Tratamento de Minérios e Fenômenos de Transporte, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Minérios de ferro com tendência a reter umidade podem gerar uma série de problemas operacionais, como o derramamento durante o manuseio em transportadores de correia, causando sujeira e aumento nas intervenções de manutenção, entupimento de chutes de transferência, desmoronamento de pilhas nos pátios de estocagem, aderência de minério nos vagões ferroviários, dificuldade de descarga nos viradores de vagões do porto, acarretando em perda de produtividade, desgaste prematuro das correias transportadoras, aumento do custo no transporte ferroviário e marítimo e finalmente atraso no carregamento de navios se a umidade exceder ao valor limite de umidade para transporte, TML – “Transportable Moisture Limit”, sendo necessário aguardar por um período de tempo até que a umidade seja reduzida por drenagem da água livre e evaporação [Munro & Mohajerani, 2016].

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para a caracterização de minério de ferro com foco no seu desaguamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma amostra de minério de ferro do quadrilátero ferrífero foi usada nos experimentos.

A análise granulométrica foi caracterizada por peneiramento e difração a laser, utilizando um analisador Malvern Mastersizer 2000 a composição mineralógica foi caracterizada por microscopia ótica e a massa específica da amostra foi caracterizada com um ultrapicnômetro Quantachrome Ultrapyc 1200e.

Foram realizados experimentos de percolação de água em uma coluna, mostrada na Figura 1. A coluna tem 6 polegadas de diâmetro e é dividida em seções flangeadas para permitir a análise da umidade por seção. A coluna é dividida em 5 seções. A seção superior tem altura de 480 mm, sendo apenas preenchida por água. Abaixo da seção superior podem ser montadas até 3 seções com 120 mm de altura, preenchidas com um leito de partículas e uma seção inferior com 12 mm de altura, é a camada de base, também preenchida com um leito de partículas. Abaixo da seção inferior é introduzido um papel de filtro com poros com de 14 μm de diâmetro médio. Abaixo do papel de filtro há um cone, conectado por uma válvula a uma mangueira sobreposta a uma escala graduada, onde era possível medir a altura do líquido. Na saída do cone, uma válvula de esfera que ao abrir permitia a drenagem da água. Esta coluna foi usada para realização de diversos ensaios: ensaios de compactação, determinação de permeabilidade à carga variável, ensaios de retenção de água e ensaios de drenagem. Foram realizados ensaios por ação da gravidade ou sob vácuo, utilizando um kitasato. Para geração de vácuo foi usado um ejetor MICRO, modelo SBP 10 S2 DAS. Para medição do nível de vácuo foi utilizado um vacuômetro modelo D.63 RETO 0-760MMH 1/4 NPT SAIDA RETA, ambos fornecidos pela OMNI Automação. Nos ensaios sob vácuo, a vazão de ar será foi medida por um rotâmetro modelo BLI-200-AL– AL.

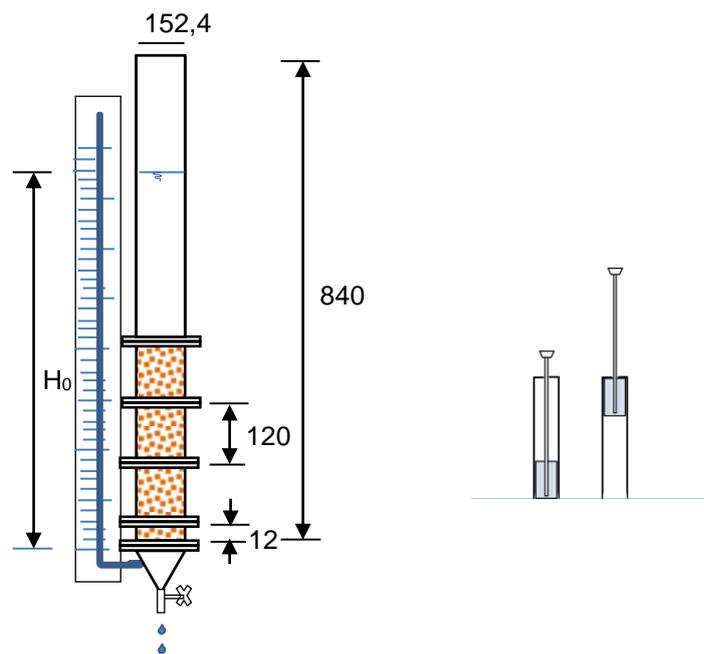


Figura 1. Aparato para ensaios de percolação em coluna, mostrando dimensões em mm (esquerda) e Martelo para ensaios de compactação (direita).

Os ensaios de compactação foram realizados para diferentes umidades, ajustadas previamente adicionando água em um tambor rotativo. Um molde constituído por uma das seções com 120 mm de altura e volume de 2064 cm³, era preenchido em 5 camadas, cada uma das quais foi compactada utilizando um martelo composto por um êmbolo confeccionado com um tubo contendo um corpo cilíndrico preso a uma haste. O deslocamento do corpo cilíndrico é limitado por uma tampa superior, como mostrado na Figura 1 (direita). A massa total do corpo cilíndrico e sua haste é 214 g e a altura de queda é 15 cm. Durante a compactação da 5ª camada uma seção com 60 mm de altura era sobreposta ao molde. A massa das 5 camadas foi determinada de modo que a altura da última camada ficasse acima de 120 mm. O número de golpes foi calculado para obter uma determinada energia de compactação. Para 0,227 kg/cm² foram aplicados 28 golpes, correspondendo à 80 % da energia de compactação de um ensaio Proctor D. Para 0,081 kg/cm² foram aplicados 10 golpes, correspondendo à 50 % da energia de compactação de um ensaio Proctor D. Terminada a sequência de golpes a seção com 60 mm de altura era removida e o minério compactado era raspado para obter o volume exato de 2064 cm³. Para determinação da umidade o minério era levado a uma estufa com temperatura de 100 °C. A amostra foi pesada diversas vezes até que a massa se estabilizasse.

Para os ensaios de permeabilidade o minério era compactado como descrito anteriormente em uma seção de 120 mm de altura. A seguir a seção com 480 mm de altura era flangeada na coluna. O minério era saturado lentamente de baixo para cima, introduzindo água pela mangueira conectada ao cone. O volume de água era completado até atingir 320 mm, contados a partir da camada de base. A válvula de saída do cone era aberta e a altura do líquido era monitorada em função do tempo cronometrado. Baseado em uma modificação da Lei de Darcy proposta por Rumer e Drinker [1966], a altura do líquido pode ser calculada pela Equação 1.

$$h = h_0 e^{\left(-\frac{kt n}{l}\right)} \quad (1)$$

onde h é a altura da coluna de água no tempo t , h_0 é a altura inicial da coluna de água, k é o coeficiente de permeabilidade, n é a porosidade e l é a altura da camada de minério. Usando a Equação 1 o coeficiente de permeabilidade foi calculado por regressão.

No ensaio de retenção o minério compactado com $0,227 \text{ kg/cm}^2$, em função da diferença de pressão aplicada na sucção, de 0 a $75,5 \text{ kPa}$. As amostras foram saturadas lentamente de baixo para cima. A água removida para cada diferença de pressão aplicada foi coletada até que o fluxo deixasse de ser contínuo e iniciasse um gotejamento muito lento, sendo então pesada. Ao fim do experimento a amostra foi removida e levada a uma estufa com temperatura de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. A amostra foi pesada diversas vezes até que a massa se estabilizasse para obter a umidade final.

Os ensaios de drenagem foram realizados em períodos maiores de tempo (até 55 horas). Alguns testes foram realizados inicialmente com a aplicação de vácuo até se iniciar um gotejamento lento, quando então o vácuo foi desligado e a amostra deixada a drenar sob o efeito da gravidade.

Para demonstrar a magnitude da força necessária para deslocar a água retida em capilares e explicar a tendência que um leito de minério tem de reter umidade, foi realizado um experimento com partículas de quartzo, classificadas em duas classes de tamanho, entre 50 e $250 \text{ }\mu\text{m}$ e entre 150 e $600 \text{ }\mu\text{m}$. O quartzo foi usado como modelo porque sua superfície pode ser modificada quimicamente, sem afetar a tensão superficial da água. Numa reação com triclorometilsilano estas partículas foram hidrofobizadas e compactadas em tubos capilares cuja porção superior estava em uma câmara fechada, onde foi instalado uma célula de carga. A parte inferior do tubo capilar era então imersa em água pura e o menisco começava a subir até que a pressão na câmara superior equilibrasse a pressão capilar, causando a interrupção da ascensão da água no leito de partículas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A massa específica medida foi $4,317 \pm 0,006$, sendo esta a média de três medidas. A Figura 2 apresenta a análise granulométrica do minério de ferro. Trata-se de um sínter feed grosso, com apenas $11,54 \%$ passante em $0,15 \text{ mm}$.

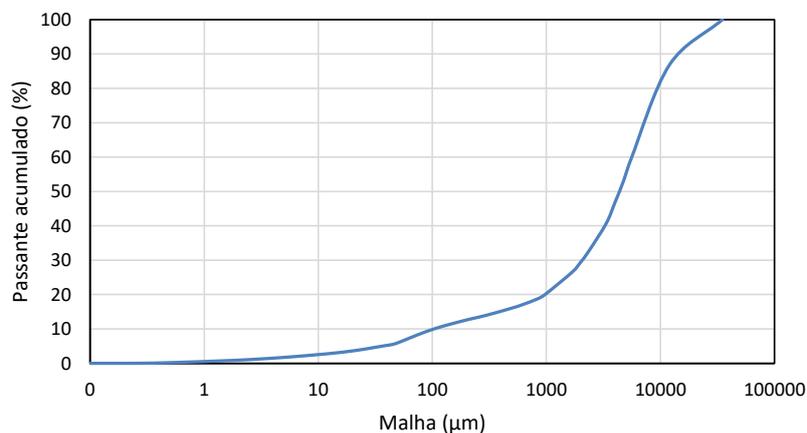


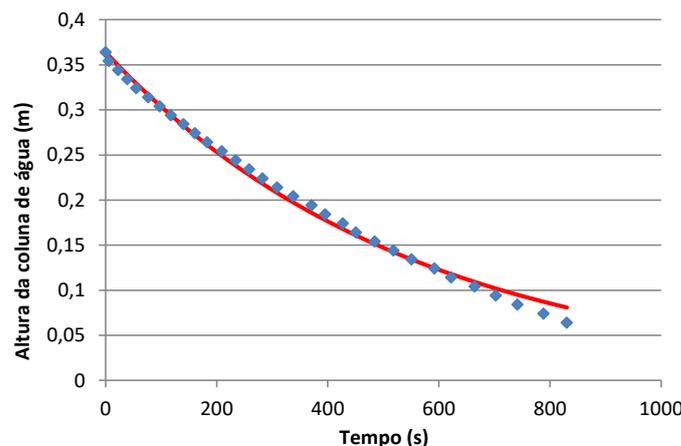
Figura 2. Distribuição granulométrica da amostra de minério de ferro.

A Tabela 1 mostra a composição mineralógica da amostra de minério de ferro. Nota-se a presença de uma grande proporção de minerais hidratados ou pouco compactos, que tem afinidade por água, sendo que a goethita representa 48,4 % do minério em volume e a martita 28,1 % em volume. A participação de argilominerais é pequena, sendo que a gibbsita represente 0,2 % em volume.

Tabela 1. Composição mineralógica da amostra de minério de ferro

MINERAIS	% em volume	% em massa
Hematita lamelar monocristalina	4,0	5,1
Hematita granular monocristalina	2,9	3,7
Hematita lamelar policristalina	0,2	0,3
Hemata granular policristalina	0,1	0,2
Hematita lobular	5,6	6,7
Martita	28,1	29,5
Magnetita	1,8	2,2
Goethita	48,4	46,5
Agregado	0,4	0,3
Quartzo	7,7	5,0
Gibbsita	0,2	0,1
Outros	0,5	0,4

A Figura 3 mostra a altura da coluna de água durante um ensaio de permeabilidade, em função do tempo de escoamento na coluna de percolação. O coeficiente de permeabilidade, obtido por regressão mostrou um ajuste razoável do modelo aos dados experimentais, apenas mostrando uma tendência a superestimar a altura da coluna de água no final do experimento. Para reduzir a variabilidade dos coeficientes de permeabilidade obtidos em ensaios de permeabilidade é importante que a umidade da amostra seja bem ajustada antes de executar a compactação.

**Figura 3.** Altura da coluna de água em função do tempo de escoamento na coluna de percolação (energia de compactação = 0,227 kg/cm² e umidade inicial = 11,3 %)

O coeficiente de permeabilidade e a porosidade em função da umidade, para energia de compactação $0,227 \text{ kg/cm}^2$, são mostrados na Figura 4. A precisão obtida nestes ensaios foi muito boa, o que é evidenciado pela barra de erro mostrada na figura. Existe uma boa correlação entre a porosidade e o coeficiente de permeabilidade. Entretanto, a magnitude dos coeficientes de permeabilidade medidos, entre $4,7$ e $7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, são bastante elevados, típicos de uma areia grossa. Portanto, aumentar a porosidade não seria uma forma adequada para melhorar o desaguamento deste minério.

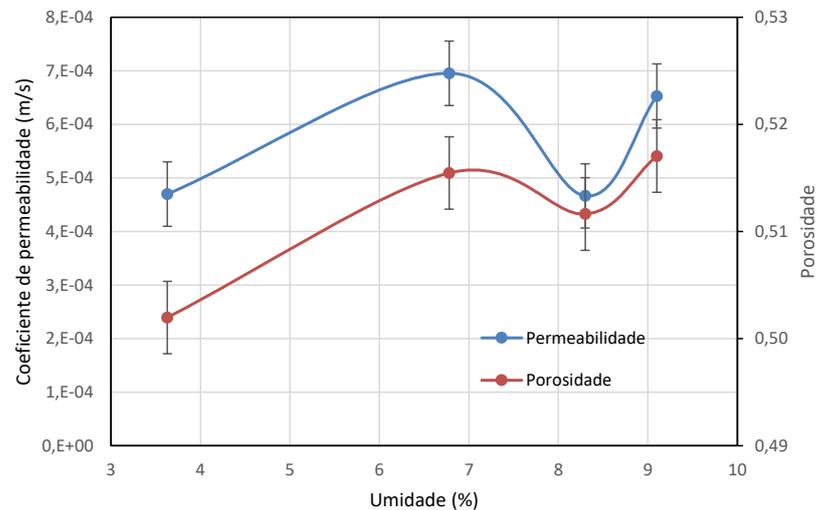


Figura 4. Coeficiente de permeabilidade e porosidade em função da umidade, medido para a energia de compactação de $0,227 \text{ kg/cm}^2$.

A Figura 5 apresenta as curvas de retenção do minério de ferro compactado com energia de $0,227 \text{ kg/cm}^2$, em umidade volumétrica e mineira (em massa), em função da diferença de pressão na sucção. Este ensaio em geotecnia utiliza a umidade volumétrica, definida pela Equação 2. Para facilitar a comparação com o conceito usual de umidade empregado em mineração também é apresentada a umidade mineira, definida pela Equação 3. As curvas não apresentam o formato característico em forma de “s”. O minério inicia o desaguamento por gravidade e não atinge umidade volumétrica inferior a 24 % ou umidade em massa inferior a 10,51 %. Ao drenar parte da água livre, formam-se canais vazios, causando a perda de selagem do vácuo. A partir deste momento, apenas água livre é drenada lentamente do minério.

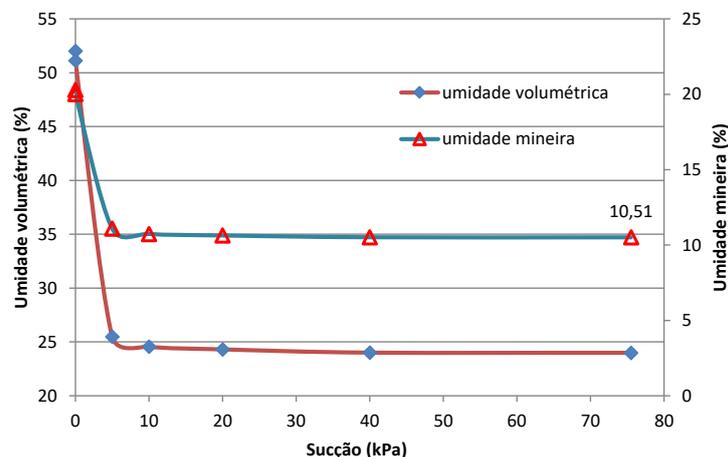


Figura 5. Umidade volumétrica e umidade mineira em função da intensidade de sucção aplicada.

$$Umidade\ volumétrica = \frac{volume\ de\ água}{volume\ da\ amostra} \times 100 \quad (2)$$

$$Umidade\ mineira = \frac{massa\ de\ água}{massa\ de\ água + massa\ de\ sólidos} \times 100 \quad (3)$$

A Figura 6 mostra a umidade do minério de ferro para as 4 seções utilizadas nos ensaios de drenagem. As amostras tinham inicialmente uma umidade próxima à condição de saturação. Pode ser visto que a umidade cresce à medida que a altura da seção diminui, o que é esperado, uma vez que a água migra para baixo. A aplicação de vácuo no início do processo de drenagem acarretou em um ligeiro aumento da umidade da camada superior. Em uma das amostras foi aplicado um vácuo de 0,2 bar, interrompendo a drenagem com uma hora e 6 minutos. Os mesmos dados são mostrados na Figura 7, apresentando a remoção porcentual de umidade em função do tempo de drenagem. Com o tempo, o porcentual de remoção de água tende ao mesmo valor. A aplicação de vácuo apenas acelera o início do processo.

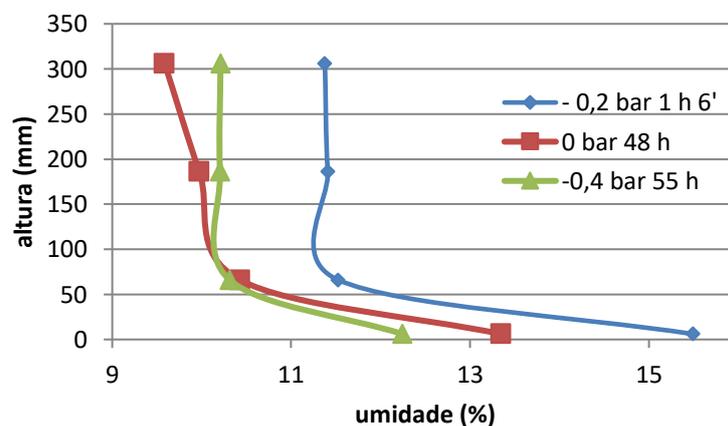


Figura 6. Umidade do minério em diferentes alturas da coluna para diferentes níveis de vácuo.

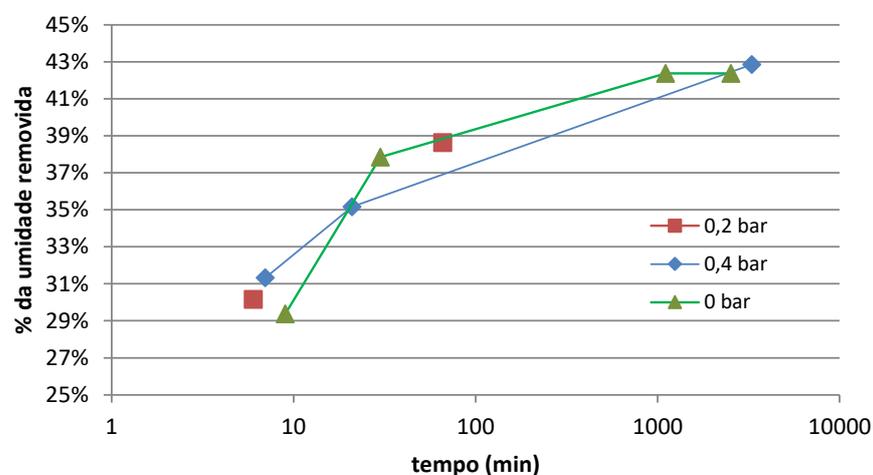


Figura 7. % de umidade do minério removida em função do tempo para diferentes níveis de vácuo.

A Figura 8 mostra os resultados dos ensaios de compactação. Vemos as curvas de densidade aparente em função da umidade para diferentes graus de compactação, 0,227, 0,081 kg/cm² e minério sem compactação. Para todas as curvas o comportamento é o mesmo. A amostra seca tem a máxima densidade aparente. Acrescentando-se água, a densidade aparente diminui, passando por um mínimo que ocorre em 9,02 % para a energia de compactação de 0,227 kg/cm², 9,26 % para a energia de compactação de 0,081 kg/cm² e 9,38 % para o minério sem compactar. Aumentando-se ainda mais a umidade a densidade aparente aumenta, ocorrendo um máximo em 12,85 % para a energia de compactação de 0,227 kg/cm², 13,33 % para a energia de compactação de 0,081 kg/cm² e para a amostra sem compactar o ponto de máximo não foi atingido. Estes pontos de mínimo e máximo da curva de densidade aparente em função da umidade representam limites para o modo como a água ocorre no leito de partículas. Da umidade zero até a umidade onde ocorre a mínima densidade aparente, estão sendo formadas pontes de líquido entre as partículas e esta água está no estado pendular.

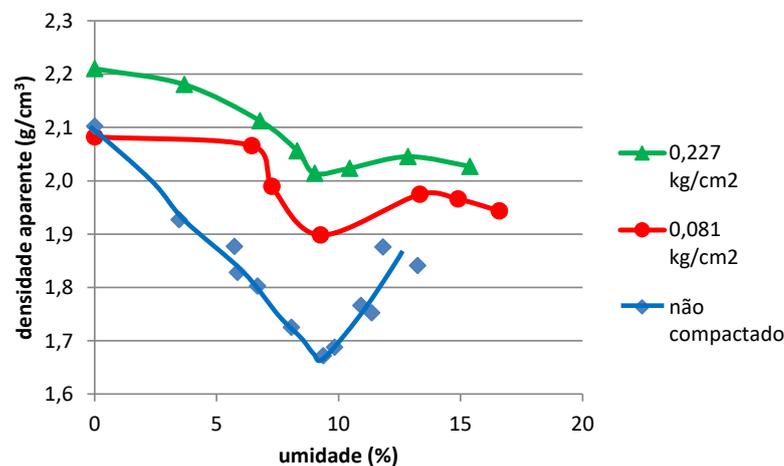


Figura 8. Densidade aparente em função da umidade para diferentes graus de compactação.

A Figura 9 representa os limites para o modo como a água ocorre no minério. Em (a) a água está no estado pendular e as pontes de líquido afastam as partículas, gerando uma diminuição na densidade aparente. Em (b) a água está no estado funicular. Quando o líquido ocupa o lugar onde anteriormente havia ar, a densidade aparente aumenta com o aumento da umidade. Em (c) a água está no estado intersticial e começa a ocorrer a saturação de umidade em alguns pontos. Em (d) a água está no estado livre, não havendo mais forças capilares unindo as partículas. Neste estado o minério passa a ser uma polpa.

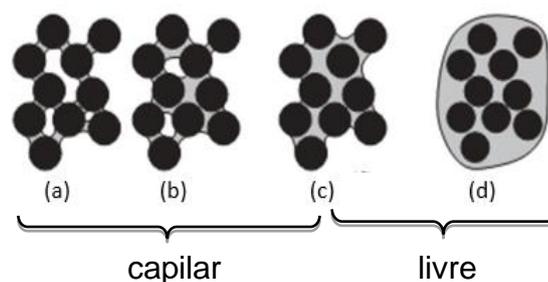


Figura 9. Diferentes formas nas quais a água pode ser encontrada num leito de partículas.

A Figura 10 mostra o índice de vazios em função da umidade da amostra. Estas curvas são o inverso das curvas de densidade aparente. No ponto onde ocorre um mínimo na densidade aparente, ocorre um máximo no índice de vazios. Onde ocorre um máximo na densidade aparente, ocorre um mínimo no índice de vazios. Entretanto estas curvas adicionam uma informação. Após o máximo índice de vazios, a queda deste valor indica que ao acrescentar água, ocorre saturação em alguns pontos do leito, que perde a estrutura mostrada na Figura 9 e o minério se compacta.

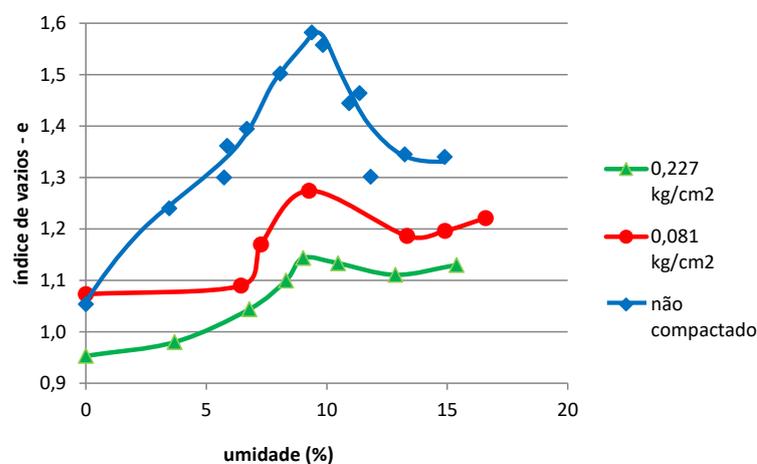


Figura 10. Índice de vazios em função da umidade da amostra.

A Figura 11 mostra a pressão capilar necessária para interromper a ascensão capilar, que equivale à pressão necessária para deslocar o menisco de líquido para realizar o desaguamento da amostra. A linha horizontal na Figura 11, em 18 polegadas de mercúrio é a maior pressão disponível em filtros verticais. Um filtro vertical neste caso somente seria capaz de deslocar o menisco no leito de partículas entre 150 e 600 μm , se o ângulo de contato destas partículas for superior à 45°. Na natureza os óxidos, entre eles os óxidos de ferro, são naturalmente hidrofílicos, portanto, a água capilar não seria removida por um filtro a disco, ou drenaria por gravidade.

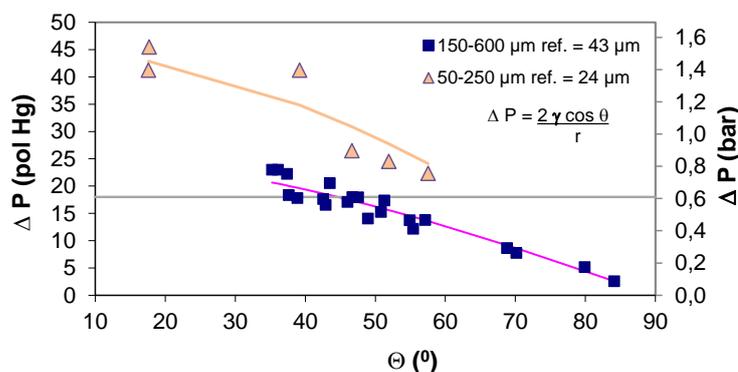


Figura 11. Pressão necessária para mover o menisco capilar em função do ângulo de contato.

4 CONCLUSÃO

O minério estudado tem uma grande quantidade de goethita, um minério bastante hidratado e associado à retenção de líquido. O minério é bastante grosso, o que explica os altos coeficientes de permeabilidade encontrados. A permeabilidade não é a restrição ao desaguamento deste minério. A curva de retenção mostrou que a umidade residual tende ao valor de 10,51 %, o que foi confirmado nos ensaios de drenagem, com ou sem o uso de vácuo para acelerar o desaguamento. A densidade aparente mostra os pontos de mínimo entre 9,02 e 9,38. A umidade residual de 10,51 mostra que parte da água no estado intersticial é água livre e por isto drena com o tempo.

REFERÊNCIAS

- 1 Munro, M. C., Mohajerani, A.. Moisture content limits of iron ore fines to prevent liquefaction during transport: review and experimental study. International Journal of Mineral Processing. 2016; 148: 137-146.
- 2 Rumer, Drinker. Resistance to Laminar Flow Through Porous Media. Journal of the Hydraulics Division. 1966; 92 (5): 155-163.