

ADSORÇÃO DE AMINA EM QUARTZO PARA FLOTAÇÃO REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO¹

Carlos de Figueiredo Gontijo²

Resumo

Uma revisão bibliográfica sobre hidrofobicidade e ângulo de contato é apresentada, proporcionando ao leitor não familiarizado com esta literatura um embasamento teórico para que ele possa se valer das metodologias apresentadas, aplicando-as no seu ambiente de trabalho. São apresentadas duas técnicas para medição do ângulo de contato de quartzo, os métodos da ascensão capilar e da gota séssil em lâminas de vidro, aqui desenvolvido. A flotação catiônica reversa do quartzo foi estudada através de testes em escala de bancada. Foram detectadas condições mínimas de ângulo de contato e dosagem de amina em solução, para que a flotação ocorra. Nas condições usuais para flotação catiônica reversa de quartzo, uma quantidade mínima da amina em suspensão é adsorvida na superfície do quartzo. Uma condição necessária para atingir a adsorção máxima é a presença de um excesso de amina em solução. As dosagens utilizadas industrialmente confirmam esta observação. O efeito do tamanho das partículas é discutido e a importância do estágio de deslamagem é evidenciada. Foi observado que a dosagem de amina nas usinas de flotação decresce com o aumento do teor de sílica da alimentação.

Palavras-chave: Amina; Adsorção; Ângulo de contato; Deslamagem.

ADSORPTION OF AMINE ON QUARTZ FOR OF IRON ORE REVERSE FLOTATION

Abstract

A review on hydrophobicity and contact angle is shown, giving the reader not familiar with this literature a theoretical framework so that it can make use of the methodologies presented, applying them in its workplace. Two techniques for measuring the contact angle of quartz are presented, the methods of capillary rise and the sessile drop on glass slides, developed here. The reverse cationic flotation of quartz was studied through tests in a bench scale. Minimum contact angle and dosage of amine in solution, so that the flotation occurs, were determined. In the usual conditions for reverse cationic flotation of quartz, a minimum amount of the amine in suspension is actually adsorbed on the surface of quartz. A necessary condition to achieve maximum adsorption is the presence of an excess of amine in solution. The dosages used industrially confirm this observation. The effect of the particle size is discussed and the importance of the desliming stage is evidenced. It was observed that the dosage of amine in the flotation plants decreases with increasing silica content in the feed.

Key words: Amine; Adsorption; Contact angle; Desliming.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Especialista em processamento mineral - VALE S.A. – Rua Paraíba, 1122, Savassi, CEP 30139-141, Belo Horizonte, MG, Brasil. E.mail: carlos.gontijo@vale.com.

1 INTRODUÇÃO

A hidrofobicidade das superfícies é de grande importância em campos tão diversos como flotação, impressão litográfica, detergentes e adesão.⁽¹⁾ Na flotação, a adesão da bolha à partícula mineral depende do ângulo de contato na linha de interface sólido-líquido-gás. A equação de Young dá uma medida desta adesão por unidade de comprimento da linha de tripla contato das três fases (Figura 1).

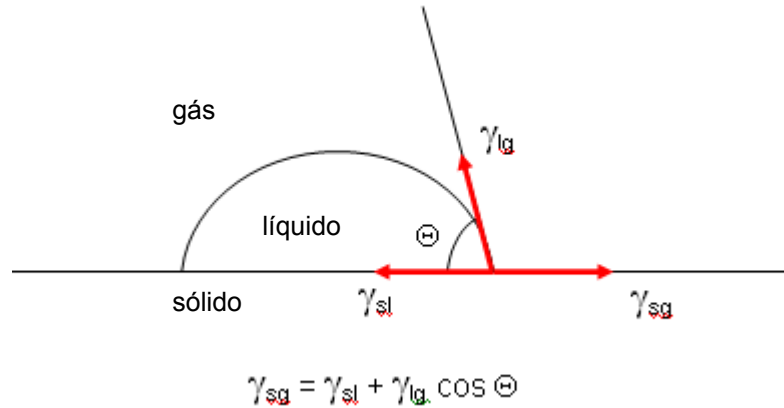


Figura 1. Gota de líquido colocada sobre a superfície de um sólido, mostrando a definição de Young para o ângulo de contato.⁽²⁾

A superfície de sólidos reais é rugosa e heterogênea.⁽¹⁾ Johnson e Dettre⁽³⁾ demonstraram o efeito da rugosidade da superfície sobre o ângulo de contato através de um modelo (Figura 2). A Figura 2 mostra que diferentes ângulos de contato entre as três fases podem ser observados numa superfície rugosa, quando a água avança (Θ_a) e recua (Θ_r) sobre a superfície do sólido. Entretanto, numa escala microscópica, os ângulos de contato de avanço e recuo são o mesmo, Θ .

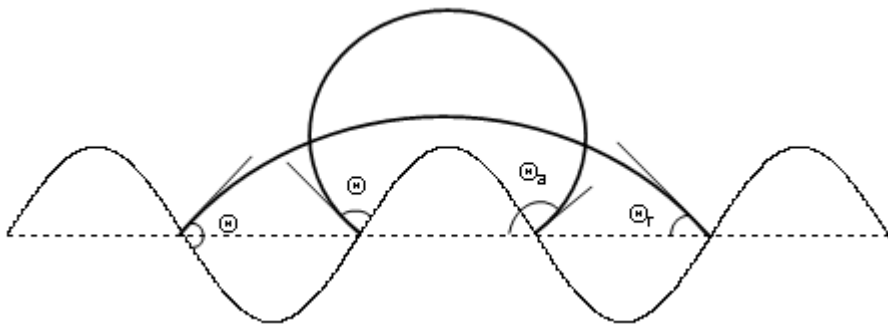


Figura 2. Dois diferentes ângulos de contato observados quando uma gota de líquido colocada sobre a superfície de um sólido avança (Θ_a) e recua (Θ_r), enquanto que numa escala microscópica os ângulos de avanço e recuo são o mesmo, Θ .

Superfícies que tenham áreas com diferentes composições químicas, das quais as partículas mistas são um exemplo, terão um ângulo de contato diferente dos componentes. De acordo com Cassie,⁽⁴⁾ o ângulo de contato de equilíbrio de uma superfície lisa e micro heterogênea, consistindo de um arranjo semelhante a uma “colcha de retalhos” de dois elementos homogêneos, pode ser descrito por:

$$\cos \Theta_s = f_1 \cos \Theta_1 + f_2 \cos \Theta_2 \quad (1)$$

Onde Θ_s é o ângulo de contato médio da superfície, f_1 é a fração de área tendo um ângulo de contato intrínseco Θ_1 e f_2 é a fração de área tendo um ângulo de contato intrínseco Θ_2 . Generalizando a Equação 1, podemos escrever para uma superfície com n regiões em sua superfície:

$$\cos \Theta_s = \sum_{i=1}^n f_i \cos \Theta_i \quad (2)$$

A determinação do ângulo de contato em partículas é um problema de interesse prático. Uma forma de medir o ângulo de contato dinâmico em partículas foi proposto por Washburn.⁽⁵⁾ A técnica de Washburn relaciona a velocidade de penetração de um líquido em um leito de partículas ao ângulo de contato destas. Crawford comparou o ângulo de contato medido em lâminas de quartzo polido e partículas de quartzo com tamanho médio de 37 μm e 46 μm que foram metiladas simultaneamente em um mesmo reator, usando o procedimento detalhado a seguir.⁽¹⁾ Tubos de vidro com diâmetro interno de 2 mm e comprimento de 100 mm foram lavados em ácido nítrico antes de serem usados. Estes tubos foram tamponados em uma extremidade com tecido de papel antes que as partículas fossem introduzidas pela outra extremidade e compactadas até atingir uma altura de camada de 60 mm. A compactação das partículas foi obtida batendo-se manualmente os cilindros sobre uma superfície dura por 20 vezes. Washburn⁽⁵⁾ desenvolveu uma equação para prever a penetração de líquidos em capilares, baseado na lei de Poiseuille. A velocidade na qual o líquido penetra um capilar com raio efetivo r_e é:

$$\frac{dh_p}{dt} = \frac{Pr_{ef}^2}{8\eta h_p} \quad (3)$$

Onde h_p é a altura de penetração no tempo t , η é a viscosidade do líquido penetrante e P é a força motriz. Para um capilar vertical, a força motriz é a diferença entre a pressão de Laplace e o peso do líquido. Se o raio do capilar for suficiente pequeno, o peso do líquido pode ser desprezado, comparado com a pressão de Laplace. A pressão de Laplace ou pressão capilar, ΔP , que força o líquido para dentro do leito de partículas compactadas é calculado por:

$$\Delta P = \frac{2\gamma_{lg} \cos \Theta}{r_{ef}} \quad (4)$$

Onde γ_{lg} é a tensão superficial líquido-gas e Θ é o ângulo de contato em avanço do leito de partículas. A integração da Equação 3, seguida pela substituição da Equação 4, resulta em:

$$\frac{h_p^2}{t} = \frac{r_{ef} \gamma_{lg} \cos \Theta}{2\eta} \quad (5)$$

Para um leito de partículas uniformemente compactado o raio efetivo, r_{ef} , deveria ser substituído por uma constante K , que é um parâmetro composto de um raio de poro efetivo no leito de partículas, junto com um fator de tortuosidade, respondendo pelos complexos caminhos formados pelos canais entre as partículas.

$$\frac{h_p^2}{t} = \frac{K \gamma_{lg} \cos \Theta}{2\eta} \quad (6)$$

Para um leito de partículas uniformemente compactado, um gráfico de h_p^2 em função do tempo é linear. Experimentalmente, o fator de tortuosidade é desconhecido e o ângulo de contato das partículas é obtido por comparação entre a velocidade de

penetração de um líquido que molha e um líquido que não molha o leito de partículas. Se um líquido que molha as partículas perfeitamente ($\Theta_m = 0$) é usado, o valor de K pode ser experimentalmente determinado. Isto possibilita que o ângulo de contato para outro líquido que não molha as partículas, como a água, pode ser obtido, assumindo que K é uma constante para um leito de partículas homogeneamente compactado. Reorganizando a Equação 6 para um líquido que molha as partículas perfeitamente, se obtém:

$$\cos \Theta_m = \left(\frac{h_p^2}{t} \right)_m \frac{2\eta_m}{K (\gamma_{lg})_m} \quad (7)$$

Onde γ_{lg} é a tensão superficial para o líquido que molha as partículas. Para água, o líquido que não molha as partículas, cujo ângulo de contato deve ser medido,

$$\cos \Theta_{nm} = \left(\frac{h_p^2}{t} \right)_{nm} \frac{2\eta_{nm}}{K_p (\gamma_{lg})_{nm}} \quad (8)$$

Dividindo a Equação 8 pela Equação 7, o ângulo de contato para o líquido que não molha as partículas pode ser obtido diretamente,

$$\cos \Theta_{nm} = \frac{\left(\frac{h_p^2}{t} \right)_{nm} (\gamma_{lg})_m \eta_{nm}}{\left(\frac{h_p^2}{t} \right)_m (\gamma_{lg})_{nm} \eta_m} \quad (9)$$

Crawford, Koopal e Ralston⁽¹⁾ relataram que ciclohexano é um líquido ideal que molha perfeitamente partículas de quartzo metilado. Se ciclohexano é usado como um líquido que molha e água é o líquido que não molha as partículas, então $(\gamma_{lg})_m = 25,5 \text{ mNm}^{-1}$, $(\gamma_{lg})_{nm} = 72,75 \text{ mNm}^{-1}$, $\eta_m = 1,02 \text{ mNm}^{-2}\text{s}$ e $\eta_{nm} = 1,002 \text{ mNm}^{-2}\text{s}$. A Equação 9 se reduz a:

$$\cos \Theta_{nm} = 0,3443 \times \frac{\left(\frac{h_p^2}{t} \right)_{nm}}{\left(\frac{h_p^2}{t} \right)_m} \quad (10)$$

O ângulo de contato das lâminas foi medido utilizando os métodos da gota séssil e da velocidade de ascensão capilar.⁽¹⁾ Os resultados encontrados são mostrados nas Figuras 3 a 5. Nota-se que os ângulos medidos para partículas e lâminas estão em acordo com o predito pela equação de Cassie, considerando que o ângulo de contato para 100% de cobertura da superfície com grupos metil é 88° . Em termos de área, 100% de cobertura equivalem a 72% da área do quartzo.⁽¹⁾ Não foram observadas diferenças significativas entre os resultados obtidos para partículas em equilíbrio com o vapor do líquido penetrante e partículas que não foram expostas ao vapor do líquido penetrante. Também não foram encontradas diferenças significativas entre o ângulo de contato medido em lâminas metiladas no mesmo reator, juntamente com as partículas e o ângulo de contato medido utilizando as partículas. Os resultados da Figura 5 estão próximos a linha com inclinação de 45° traçada para referência, significando que a equação de Cassie fornece um bom modelo para o sistema estudado. Apenas para partículas com alta porcentagem de

cobertura de superfície, o resultado desviou do valor calculado (valor de 72° medido contra 88° calculado).

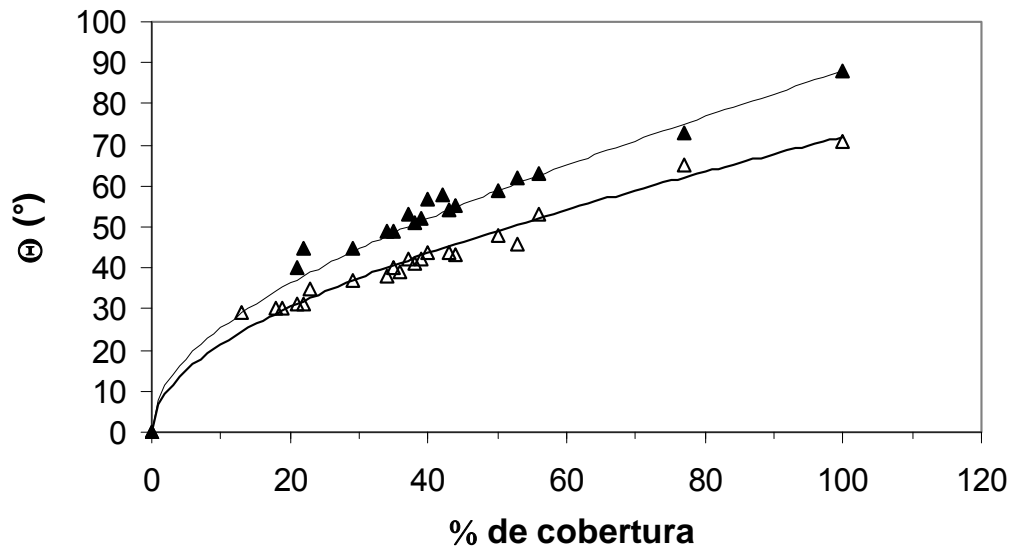


Figura 3. Ângulo de contato medido em lâminas de vidro pelo método da gota séssil para (▲): avanço e (△): recuo da linha de contato entre as três fases. As linhas foram calculadas usando a equação de Cassie.

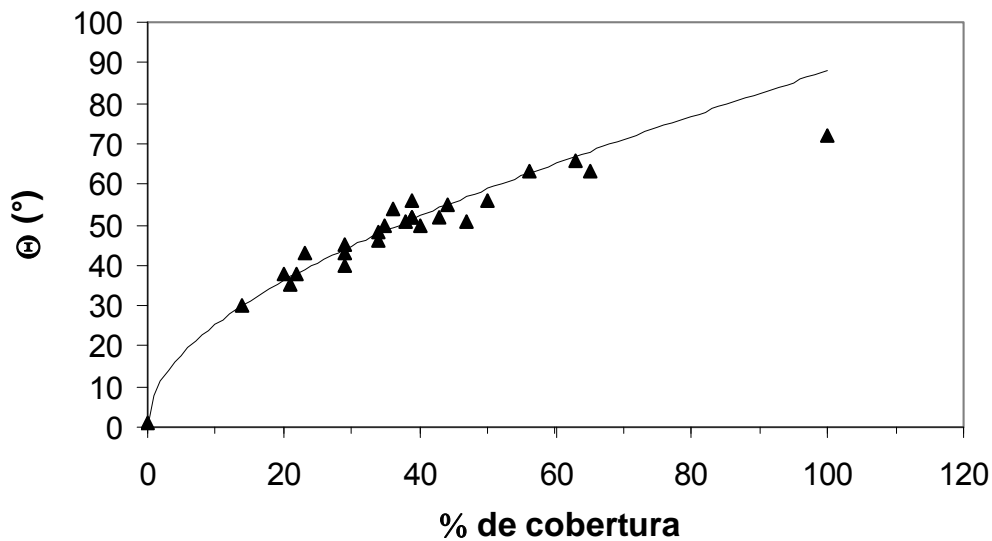


Figura 4. Ângulo de contato medido em partículas de quartzo pelo método da ascensão capilar para o avanço da linha de contato entre as três fases (▲). A linha foi calculada usando a equação de Cassie.

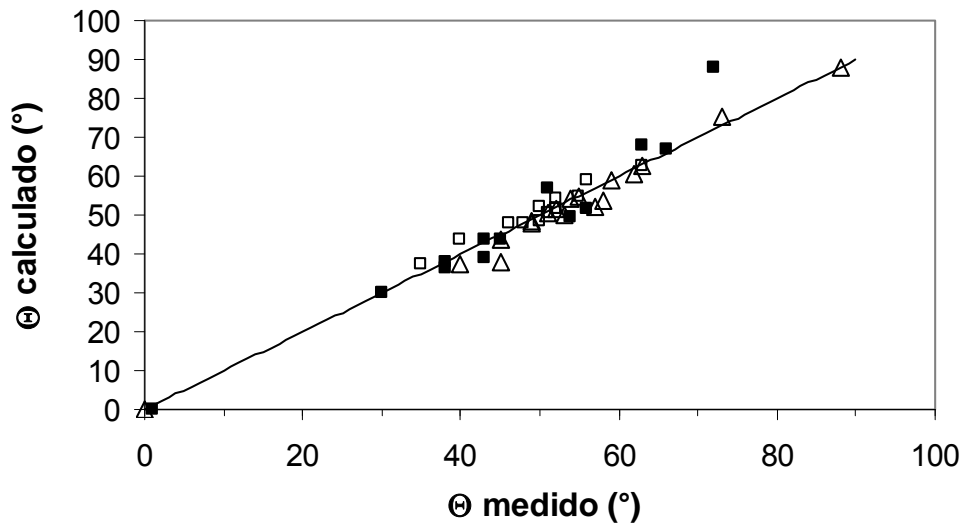


Figura 5. Ângulo de contato medido pela velocidade de penetração de um líquido em um leito de partículas de quartzo submetidas à reação de metilação versus ângulo de contato calculado pela equação de Cassie para (■): partículas que não foram expostas ao líquido penetrante e (□): partículas em equilíbrio com o vapor do líquido penetrante. Ângulo de contato medido pelo método da gota sessil em lâminas de vidro (Δ). Para referência, foi traçada uma linha com inclinação de 45°.

Analisando os dados anteriores podemos concluir que as partículas de quartzo e a lâmina de quartzo adsorveram a mesma concentração do reagente por unidade de área e adquiriram o mesmo ângulo de contato ao serem submetidas à reação de metilação conjuntamente no mesmo recipiente. Não é razoável ocorrer um consumo desproporcional de reagente por área unitária, variando o tamanho das partículas.⁽⁶⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi usada uma amostra de acetato de éter-amina EDA-B, fornecida pela Clariant. Amostras de quartzo de alta pureza foram cominuídas, bitoladas na faixa de tamanho entre 90 μm e 150 μm e limpas com água-régia aquecida, enxaguadas repetidamente com água pura até obter pH neutro, limpas com solução de hidróxido de sódio a 30%, para remover impurezas orgânicas e novamente enxaguadas com água pura até obter pH neutro. Lâminas de vidro do tipo borossilicato foram limpas da mesma forma. Foram preparadas soluções de amina em diversas concentrações, nas quais as lâminas de vidro foram imersas por cinco minutos. Posteriormente as lâminas de vidro foram secas em estufa a 60°C em uma atmosfera inerte de nitrogênio puro. Após a secagem foi feita a determinação do ângulo de contato utilizando a técnica da gota sessil⁽¹⁾ e análise de imagem. As imagens foram obtidas utilizando uma câmera digital com sensor tipo CCD (*charge coupled device*), e o ângulo de contato foi analisado usando os programas Image J e Drop Snake, desenvolvidos pela *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*.⁽⁷⁾ Ensaios de flotação foram realizados em tubo de Hallimond modificado, utilizando alíquotas de 1 g da amostra de quartzo, em diversas concentrações de amina.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 mostra o ângulo de contato medido em lâminas de vidro, em função da concentração de amina. A curva atinge um patamar em torno de 75°. Uma questão que se coloca é: podemos inferir o ângulo de contato das partículas de quartzo, a partir dos resultados medidos em lâminas de vidro? O método da ascensão capilar, apesar de aparentemente muito simples pode se tornar extremamente difícil de ser aplicado, para partículas maiores do que 90 μm devido a diversos fatores, como a heterogeneidade dos leitos de partículas preparados. Esta heterogeneidade vai se manifestar no grau de compactação, no tamanho dos capilares formados no leito de partículas (raio médio efetivo), formando caminhos preferenciais. Além disto, sendo as partículas muito grandes, o raio médio efetivo também será grande, não favorecendo a ascensão capilar. Outro ponto que pode gerar erros é o excessivo manuseio das amostras, causando a contaminação das mesmas. Sendo assim, é interessante desenvolver um método mais confiável, principalmente quando se quer medir o ângulo de contato de partículas com diâmetro médio acima de 90 μm .

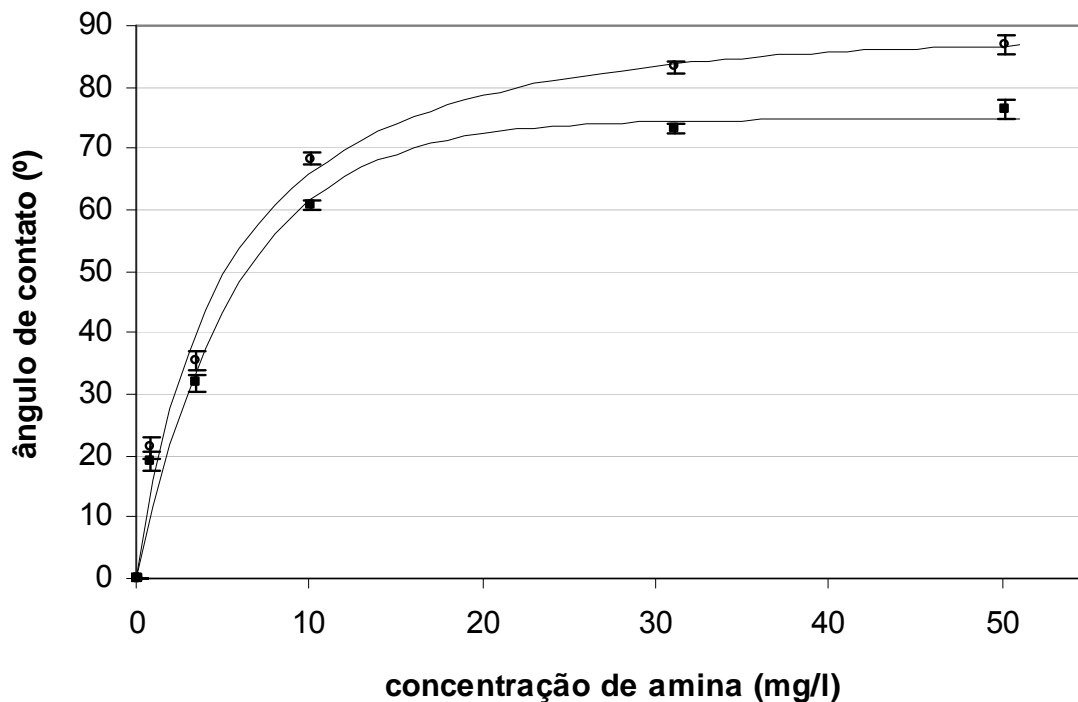


Figura 6. Ângulo de contato medido pelo método da gota séssil, em função da concentração de amina (■) e ângulo de contato calculado para partículas de quartzo submetidas à mesma concentração de amina (○).

Vidros são produtos resultantes da fusão de óxidos, tendo como principal constituinte o óxido de silício. As composições individuais dos vidros são muito variadas, para obter propriedades específicas, tais como índice de refração, cor, viscosidade etc. O teor de sílica do vidro tipo borossilicato é 81%. Outros constituintes do vidro tipo borossilicato são 12% B_2O_3 , 4% Na_2O e 2% Al_2O_3 .⁽⁸⁾ Rearranjando a Equação 1 é possível calcular o ângulo de contato da sílica:

$$\Theta_1 = \arccos\left(\frac{\cos(\Theta_s) - f_2 \cos(\Theta_2)}{f_1}\right) \quad (11)$$

Lembramos que na Equação 11 e anteriores a unidade de Θ_1 é radianos. O máximo ângulo de contato medido em lâminas de vidro foi $76,4 \pm 1,5^\circ$. Assumindo que 81% do vidro é sílica e que o restante da massa é hidrofílica, e substituindo estes valores na Equação 11, temos $\Theta_1 = 86,8 \pm 1,7^\circ$. Este valor é muito próximo ao reportado por Subrahmanyam et al.,⁽⁹⁾ 88° , medido com o método da penetração de líquido em capilares. Com a Equação 11 foi calculada a curva para o quartzo, também mostrada na Figura 6.

A Figura 7 apresenta os resultados da recuperação de quartzo obtidos na flotação, em função do ângulo de contato calculado conforme explicado acima. O patamar de 100% de recuperação foi obtido na concentração de 22 mg/l de amina.

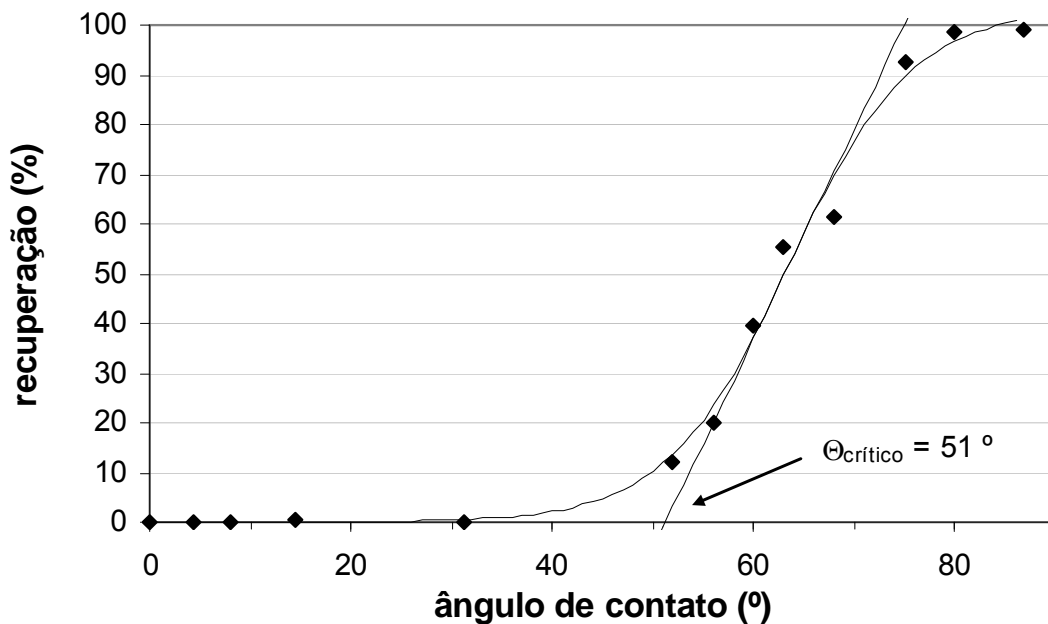


Figura 7. Recuperação na flotação de quartzo, obtida em tubo de Hallimond modificado, em função do ângulo de contato do quartzo, calculado usando a Equação 11.

A curva desenhada na Figura 7 foi obtida por análise de regressão dos dados de flotação, utilizando o método dos mínimos quadrados. O ponto em que a tangente a esta curva toca o eixo das abscissas é o ângulo de contato crítico, $\Theta_{\text{crítico}}$, que marca o limiar da flotação para as condições do teste, neste caso 51° .

Podemos apresentar a recuperação em função da concentração de amina (Figura 8). Pode ser visto que o limiar para flotação se inicia a partir da concentração de amina de 4,6 mg/l. Também se nota o patamar que ocorre a partir da concentração de amina de 22 mg/l. O patamar de adsorção de dodecilamina para o quartzo é $3 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ e ocorre à concentração de amina de $5 \times 10^{-5} \text{ M}$, em pH 10.^(10,11) Usando estes valores podemos estimar a adsorção de amina no sistema em estudo. Uma análise dos gráficos 6 e 8 nos permite inferir que o início da formação de hemimicelas ocorre à concentração de 4,6 mg/l ($1 \times 10^{-5} \text{ M}$). A adsorção aumenta em um sistema contendo moléculas iônicas e neutras, porque a adsorção de moléculas neutras reduz a repulsão entre as cabeças polares da amina protonada. Por isto a flotação é feita em pH 10,5, no qual ambas as espécies coexistem. A adsorção conjunta de espécies iônicas e não iônicas de amina permite a formação de uma camada adsorvida compacta, aumentando o ângulo de contato.⁽¹²⁾ Os dados do estudo atual indicam que esta adsorção conjunta ocorre em

concentrações superiores a 8,5 mg/l ($1,9 \times 10^{-5}$ M). A Figura 9 mostra a porcentagem de amina adsorvida em função da concentração de amina em solução, calculadas para uma amostra de quartzo com distribuição granulométrica equivalente a uma alimentação típica de um circuito flotação (escala à esquerda) e outra amostra com distribuição granulométrica similar à lama (escala à direita), assumindo a máxima adsorção possível. Um valor maior do que 100 indica que falta amina para uma adsorção completa. Os mesmos resultados são apresentados na Tabela 1. Considerando uma flotação de quartzo puro, em uma dosagem comumente encontrada em flotações industriais, como 50 mg/l, apenas 1,7% da amina seria adsorvida, caso a amostra tenha uma distribuição granulométrica típica, no entanto se esta amostra tivesse a mesma distribuição granulométrica de uma lama, 79% da amina seria consumida para adsorção. Por isto a etapa de deslamagem é tão importante para os circuitos de flotação. A Figura 10 apresenta a porcentagem de amina adsorvida em função da concentração de amina em solução, para minérios contendo 10% e 30% de sílica, uma faixa de teores mais comumente encontrados na prática, e com distribuição granulométrica típica da alimentação de um circuito de flotação. Estas minérios na presença de amina em concentração de 50 mg/l, adsorverão uma porcentagem de amina, respectivamente, de 0,17% e 0,51%, valores pequenos. Para uma grande diferença no teor de sílica a diferença na porcentagem adsorvida é de apenas 0,34%. Isto deve servir de alerta caso se pense em utilizar dosagem específica de amina, a partir de medição *on-line* do teor de sílica, que pode se mostrar não somente ineficaz, como causar distúrbios no processo. O melhor ponto a ser analisado automaticamente neste caso seria o concentrado final. Uma consequência importante para a prática industrial é a necessidade de haver certa concentração de amina em solução, muito maior do que a quantidade a ser efetivamente adsorvida, para que a adsorção de amina na superfície do quartzo atinja um platô, diferentemente do que ocorre na flotação de sulfetos.

Confirmando esta afirmativa, a Figura 11 mostra a dosagem empregada em usinas industriais de flotação, localizadas no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, em função do teor de sílica na alimentação. Contrariamente ao que se poderia esperar, a dosagem de amina em solução decresce com o aumento do teor de sílica na alimentação, para os dois tipos de minério mostrados, um mais hidratado e outro mais metamorfizado. Este comportamento já havia sido identificado anteriormente⁽¹³⁾ e foi atribuído à maior estabilidade do agregado quando a carga nas bolhas aumenta. Esta tendência segue uma correlação linear, cujas curvas apresentam um bom ajuste em relação aos dados industriais. A principal diferença entre estes dois tipos de minério é a maior tendência à geração de lamas encontrada nos minérios mais hidratados, reflexo da ocorrência de maior teor de goethita e limonita. A dosagem empregada na flotação de minérios hidratados é em média 30 mg/l superior à dosagem para um minério metamorfizado, para o mesmo teor de sílica na alimentação. Este valor seria atingido, por exemplo, se tivémos mais 37% da área coberta por sílica e alumina, que são consumidores de amina.

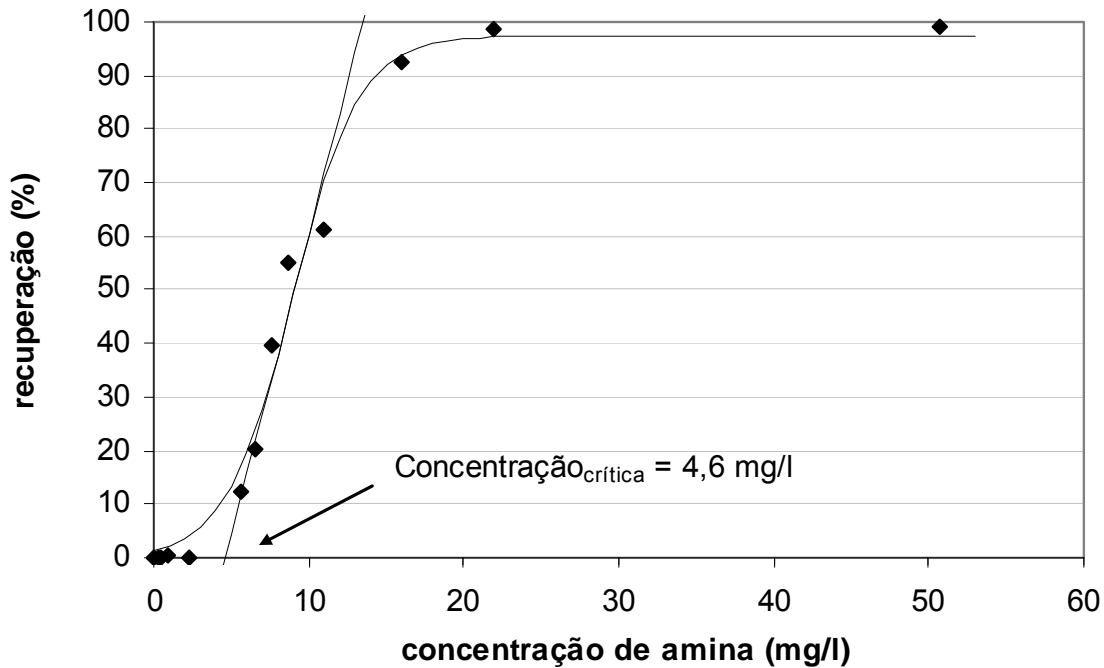


Figura 8. Recuperação na flotação de quartzo, obtida em tubo de Hallimond modificado, em função da concentração de amina em solução.

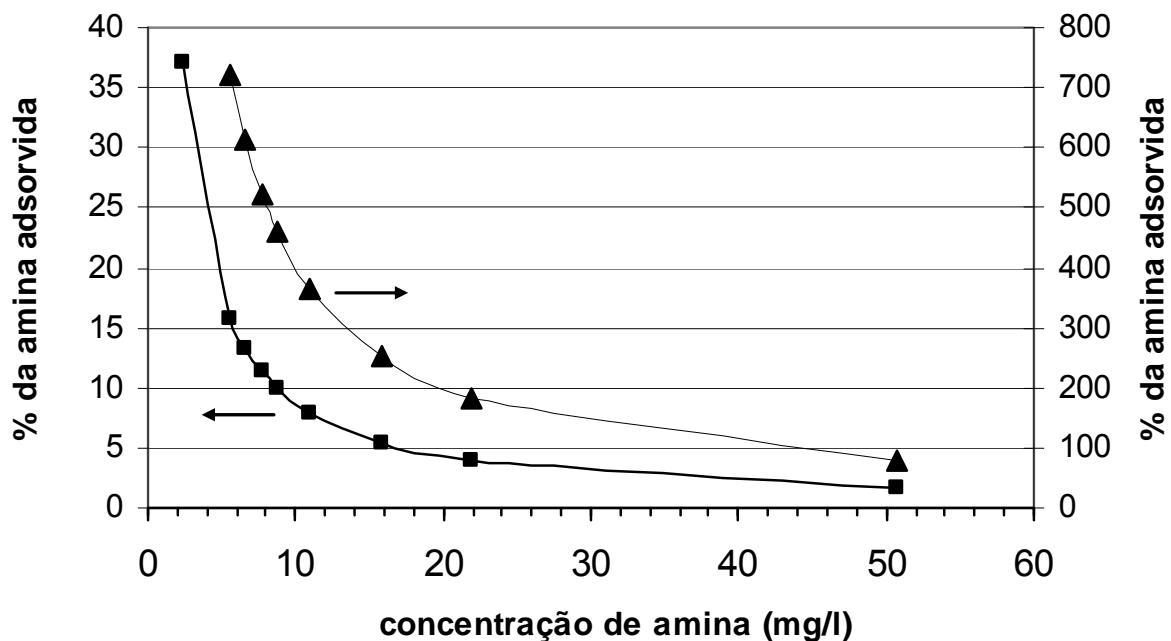


Figura 9. Porcentagem da amina adsorvida em função da concentração de amina em solução, calculada assumindo a máxima adsorção possível, considerando a concentração de sólidos em polpa de 50%, para duas amostras de quartzo puro, com (■): distribuição granulométrica típica da alimentação de um circuito de flotação (95% menor que 150 μm , 47% menor que 45 μm , e 4,6% menor que 5 μm) e (▲): tamanho típico de lama (90,5% menor que 15 μm , 84 % menor que 10 μm , e 60% menor que 3,2 μm).

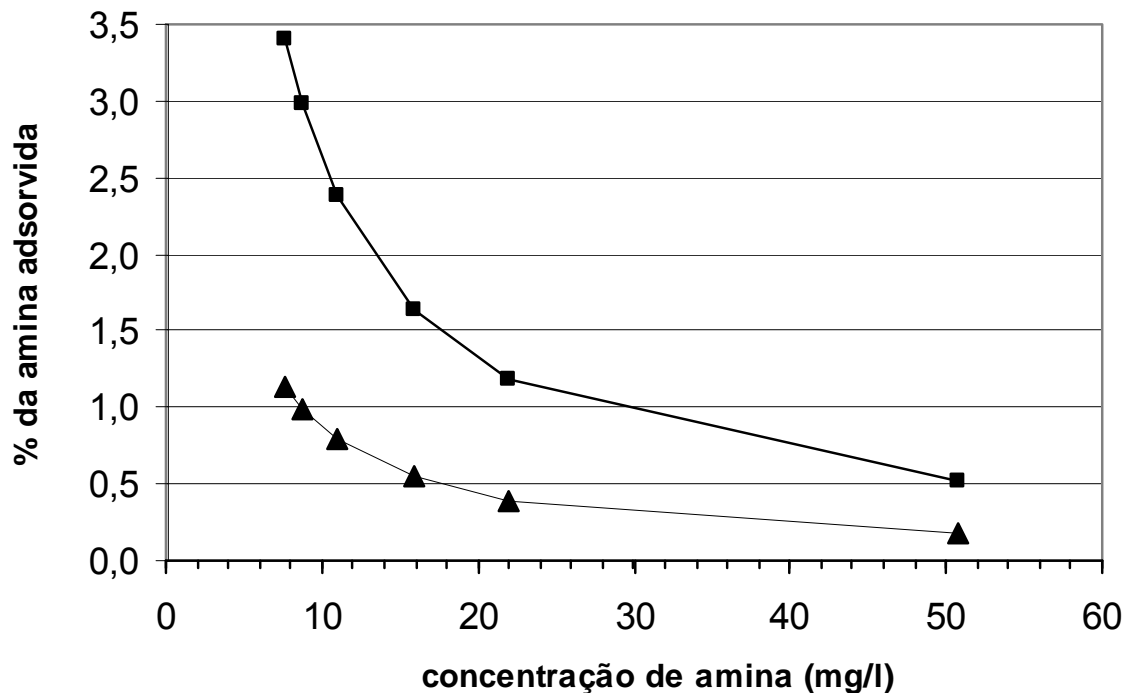


Figura 10. Porcentagem da amina adsorvida em função da concentração de amina em solução, calculada para uma polpa de minério de ferro com 50% de sólidos, distribuição granulométrica típica da alimentação de um circuito de flotação (95% menor que 150 μm , 47% menor que 45 μm , e 4,6% menor que 5 μm) e teor de sílica respectivamente de (■): 30% e (▲): 10%.

Tabela 1. Porcentagem da amina adsorvida em função da concentração de amina em solução, calculada para uma polpa com 50% de sólidos, para amostras de quartzo puro com distribuição granulométrica típica da alimentação de um circuito de flotação (95% menor que 150 μm , 47% menor que 45 μm , e 4,6% menor que 5 μm) e tamanho típico de lama (90,5% menor que 15 μm , 84% menor que 10 μm , e 60% menor que 3,2 μm)

Amostra →	tipica	lama	tipica	lama	tipica	lama
Dosagem de amina (mg/l)	teor de sílica					
	100		30		10	
0,27	326,19	15061,78	97,86	4518,54	32,62	1506,18
0,48	180,14	8318,21	54,04	2495,46	18,01	831,82
0,89	97,86	4518,54	29,36	1355,56	9,79	451,85
2,35	37,06	1711,09	11,12	513,33	3,71	171,11
5,56	15,65	722,61	4,69	216,78	1,56	72,26
6,54	13,31	614,82	3,99	184,45	1,33	61,48
7,68	11,33	523,23	3,40	156,97	1,13	52,32
8,74	9,96	459,86	2,99	137,96	1,00	45,99
10,98	7,92	365,89	2,38	109,77	0,79	36,59
15,92	5,47	252,41	1,64	75,72	0,55	25,24
21,94	3,97	183,18	1,19	54,96	0,40	18,32
50,71	1,72	79,25	0,51	23,77	0,17	7,92

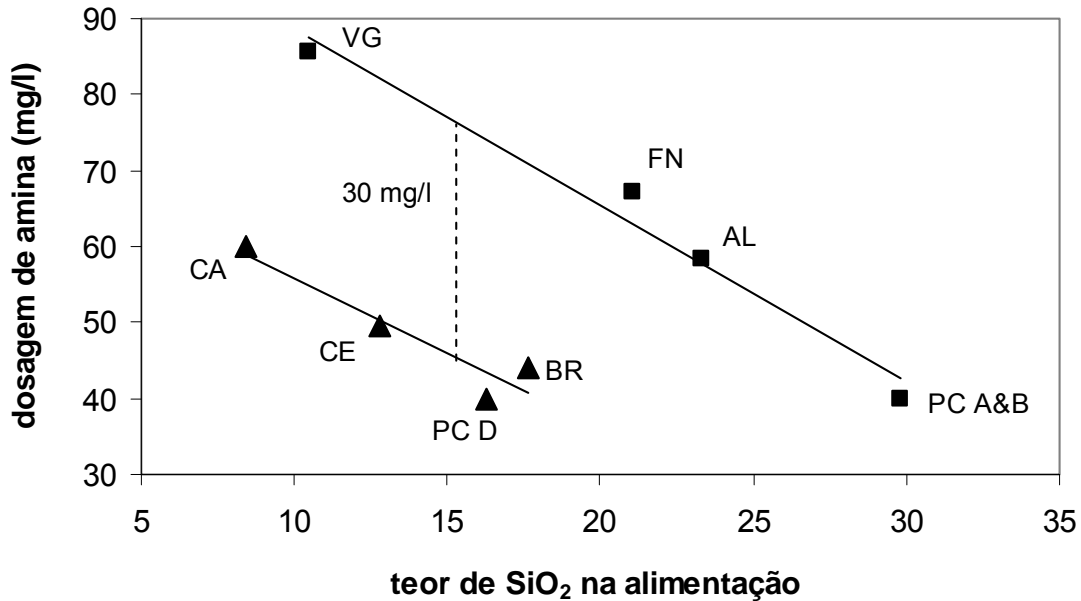


Figura 11. Dosagem de amina em solução em função do teor de sílica na alimentação, para polpas de minério de ferro de Vargem Grande (VG), Fábrica Nova (FN), Alegria (AL) Pico – Instalações A e B (PC A&B), Cauê (CA), Conceição (CE), Brucutu (BR) e Pico – instalação D (PC D), com concentração de sólidos entre 50% e 60% e constituídas por minérios relativamente hidratados (■) e predominantemente metamorfizados (▲).

4 CONCLUSÕES

Foram apresentadas duas alternativas para medição do ângulo de contato de partículas de quartzo. O método da ascensão capilar e o método da gota séssil em lâminas de vidro. O ângulo de contato máximo obtido com o método da gota séssil em lâminas de vidro, obtido em concentrações de amina EDA-B de 50 mg/l, $86,8 \pm 1,7^\circ$ se aproximou do valor relatado na literatura, 88° .

A flotação de quartzo nas condições apresentadas só é possível para ângulos de contato iguais ou maiores que o ângulo de contato crítico, 51° (ou concentrações de amina iguais ou maiores do que 6 mg/l).

Nas condições normalmente empregadas para a flotação catiônica reversa de quartzo, o percentual de amina em solução que é adsorvido na superfície do quartzo varia entre 0,17% a 0,51%. Grossos e finos adsorvem a mesma quantidade de amina por área de superfície. É preciso haver um excesso de amina em solução para que as moléculas de amina neutras se adsorvam conjuntamente com as espécies iônicas, quando a adsorção atinge um platô. As concentrações de amina em solução usadas industrialmente confirmam esta afirmativa. A média das concentrações usadas industrialmente é 56 mg/l.

A dosagem de amina é bastante afetada pela presença de lamas, cuja presença requer maiores dosagens, não somente pela maior área das partículas de lama, como também pelo fato de que a flotação é afetada pela composição da superfície das partículas, que podem estar alteradas e não pela composição da massa total. Para um mesmo tipo de minério em operações industriais, a dosagem, e conseqüentemente o consumo de amina, decrescem com o aumento do teor de sílica na alimentação.

REFERÊNCIAS

- 1 CRAWFORD, R.; KOOPAL, L. K; RALSTON, J. Contact angles on particles and plates. *Colloids and Surfaces*, v. 27, p. 57-64, 1987.
- 2 YOUNG, T. *Philosophical Transactions*, v. 95, p. 65-xx, 1805.
- 3 JOHNSON, R. E.; DETTRE, R. H. *Surface and Colloid Science*, v. 2, editor E. Matijevic, Wiley-Interscience, Nova Iorque, 1969.
- 4 CASSIE, A., B., D. *Disc. Faraday Society*, v. 3, p. 11-xx, 1948.
- 5 WASHBURN, E. W., The dynamics of capillary flow, *Phys. Rev.*, v. 17, n. 3, p. 374-375, 1921.
- 6 RALSTON, J. A unified approach to flotation, *Fifth Mill Operator's Conference*, p. 15-27, Roxby Downs, 1994.
- 7 STALDER, A. F., KULIK, G., SAGE, D., BARBIERI, L., HOFMANN, P., A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 286, n. 1-3, p. 92-103, 2006.
- 8 VAN VLACK, L. H., *Propriedades dos materiais cerâmicos*. São Paulo, Edgard Blücher, 7ª edição, p. 55-67, 1973.
- 9 SUBRAHMANYAM, T. V., MONTE, M. B. M., MIDDEA, A., VALDIVIEZO, E., LINS, F. F., Contact angles of quartz by capillary penetration of liquids and captive bubble techniques, *Minerals Engineering*, v. 12, n. 11, p. 1347-1357, 1999.
- 10 LI, H. C., DE BRUYN, P. L., Electrokinetic and adsorption studies on quartz, *Surface Science*, v. 5, p. 203-220, 1966.
- 11 TAKEDA, S., USUI, S., Cationic flotation of quartz from an artificial mixture with hematite using hexylamine, *Colloids and Surface*, v. 29, p. 221-232, 1988.
- 12 VIDYADHAR, A., HANUMANTHA, R., CHERNYSHOVA, I. V., PRADIP, FOSSBERG, K. S. E., Mechanisms of amine-quartz interaction in the absence and presence of alcohols studied by spectroscopic methods, *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 256, p. 59-72, 2002.
- 13 GONTIJO, C. de F., Aumento da seletividade da flotação reversa de minério de ferro com a utilização de polieletrólitos, *Anais do 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas & 11º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*, ABM, 2010.