

1. Conceito de ângulo de contato

Conforme ilustra a Figura 1, se uma bolha de gás for colocada em contato com a superfície de um sólido imerso em um líquido, ela vai formar um ângulo (θ) com a fase sólida. Tal ângulo é denominado de ângulo de contato. Via de regra, na mineração, a fase sólida é um mineral ou rocha, a fase líquida é a água e a fase gasosa é o ar atmosférico. Portanto, define-se ângulo de contato (θ) como o ângulo formado entre a fase sólida e a fase gasosa, medido através da fase líquida.

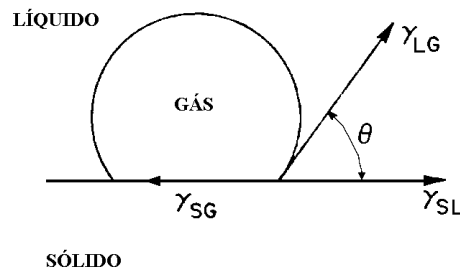


Figura 1: Representação gráfica do ângulo de contato.

Voltando à Figura 1, podemos observar três vetores assim identificados como: $\gamma_{S/L}$, $\gamma_{S/G}$ e $\gamma_{L/G}$, que representam a tensão superficial das interfaces S/L, S/G e L/G, respectivamente. Eles agem paralelamente às suas respectivas interfaces e se encontram orientados no sentido oposto ao aumento da área interfacial.

Ao chamarmos os três vetores ($\gamma_{S/L}$, $\gamma_{S/G}$ e $\gamma_{L/G}$) de **tensão superficial**, enfoca-se o fenômeno sob o ponto de vista da Mecânica e, por isto, as unidades mais apropriadas são: N/m no sistema SI e dyn/cm no Sistema CGS.

Se enfocarmos o fenômeno através da Termodinâmica, então os termos $\gamma_{S/L}$, $\gamma_{S/G}$ e $\gamma_{L/G}$ serão definidos como **variação da energia livre interfacial por unidade de área**, mantendo-se constantes a temperatura e pressão, conforme ilustram as Equações (1), (2) e (3). Neste caso, as unidades mais adequadas seriam J/m² no sistema SI, assim como erg/cm² no sistema CGS.

Para a interface sólido/gás (SG), temos:

$$\gamma_{SG} = \left(\frac{\partial G_{SG}}{\partial A} \right)_{T,P} \quad (1)$$

Para a interface sólido/líquido (SL), temos:

$$\gamma_{SL} = \left(\frac{\partial G_{SL}}{\partial A} \right)_{T,P} \quad (2)$$

Para a interface líquido/gás (LG), temos

$$\gamma_{LG} = \left(\frac{\partial G_{LG}}{\partial A} \right)_{T,P} \quad (3)$$

2. Relação entre ângulo de contato e energia superficial do mineral

As grandezas definidas pelas equações (1), (2) e (3) estão relacionadas ao ângulo de contato através da Equação (4), que também é chamada de Equação de Young.

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (4)$$

3. Relação entre ângulo de contato e molhabilidade dos minerais

Dependendo da magnitude do ângulo de contato (Θ), pode-se prever a molhabilidade do sólido por qualquer líquido, ou seja:

- (a) Se $\Theta=0^\circ$ o sólido tem total afinidade pelo líquido e será plenamente molhado pelo mesmo;
- (b) Se $0^\circ < \Theta \leq 90^\circ$, diz-se que o sólido é parcialmente molhado pelo líquido;
- (c) Quando $\Theta > 90^\circ$, o sólido repele o líquido completamente.

No que concerne à água, nenhum mineral apresenta ângulo de contato maior do que 90° . Todavia, produtos confeccionados pela indústria (Teflon) podem apresentar $\Theta \sim 108^\circ$. Minerais portadores de oxigênio geralmente apresentam $\Theta \sim 0^\circ$, mas após adsorção de surfactantes na interface mineral/solução, Θ pode chegar a valores de até 90° .

4. Medição direta do ângulo de contato

A magnitude do ângulo de contato de um mineral pode ser determinada por medidas diretas ou indiretas. A adoção do método está condicionada ao fato da amostra do mineral ser um fragmento ou um pó. Nesta situação, vamos focar na medida direta, abordando os minerais quartzo (SiO_2), grafita (C), ouro nativo (Au) e calcocita (Cu_2S).

Quando a amostra do mineral é suficientemente grande para ser cortada em placas com dimensões mínimas de 2cm x 2cm, utiliza-se um equipamento denominado de **goniômetro de contato**, realizando-se medidas diretas através desse equipamento:

- (a) Se a placa que representa o mineral for imersa no líquido e uma bolha de ar for colocada em contato com ela (Figura 1), a medida é feita pela técnica chamada de “Bolha Cativa” ou “Captive Bubble”;
- (b) Se uma gota do líquido for posicionada sobre uma placa seca do mineral (Figura 2), o ângulo de contato será medido através de uma técnica chamada de “Gota Sessil” ou “Sessile Drop”.

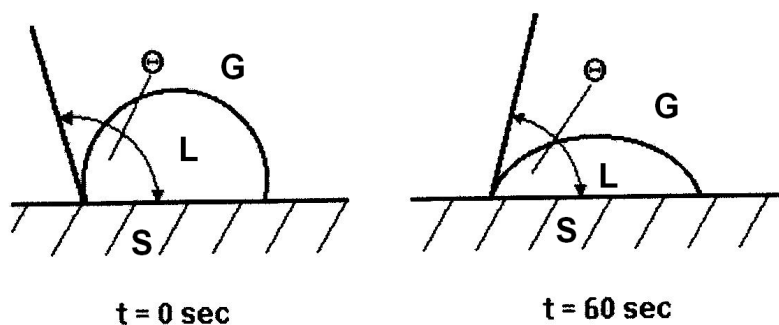


Figura 2 – Ângulo de contato medido pelo Método da Gota Sessil.

A magnitude do ângulo de contato não é independente do tempo, visto que pode mudar em segundos ou minutos, dependendo do líquido usado e da natureza do sólido (Figura 2). Tal fenômeno é denominado de histerese e será abordado na Seção 4.2. Quando não se leva em consideração a variação com o tempo, a reprodutibilidade de medidas do ângulo de contato será baixa.

4.3 Histerese do ângulo de contato: avanço versus retrocesso

Ângulos de contato, quando medidos diretamente através de goniômetros, podem apresentar variações (avanço ou retrocesso) em função de características da interface sólido/líquido durante o processo de molhabilidade do sólido pelo líquido. No caso da medida indireta, o ângulo é sempre de avanço do líquido sobre o sólido (todavia esta técnica não será abordada nesta aula prática).

Ângulo de contato de avanço pode ser medido com o aumento da gota de líquido posicionada sobre a superfície sólida (Figura 3). Isto pode ser feito com uma seringa que permanece na gota durante a medida. A gota é aumentada inserindo-se mais líquido através da agulha. Enquanto o volume aumenta, a linha divisória entre líquido e sólido se move (Figura 4). O ângulo de contato tem que ser medido durante o aumento de volume da gota, pois, deste modo, efeitos como sedimentação, mudanças devido a diferentes pressões de vapor de diferentes componentes do líquido ou dissolução da superfície sólida serão eliminados e somente a interação sólido/líquido é medida.

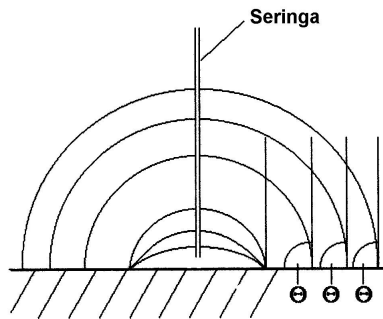


Figura 3 - Ângulo de contato de avanço.

O ângulo de contato de retrocesso pode ser medido posicionando-se uma gota relativamente grande (~6mm) sobre a superfície do mineral e o seu volume é diminuído sugando-se o líquido com uma seringa (Figura 4). Quando a linha divisória sólido/líquido começa a se mover, o ângulo tem que ser medido.

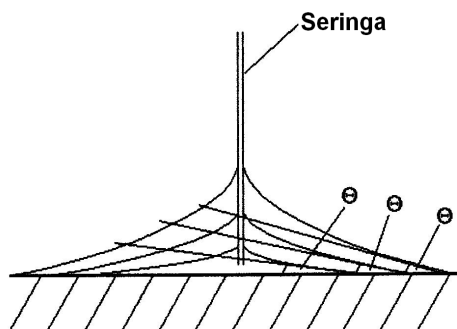


Figura 4 - Ângulo de contato de retrocesso.

Procedimentos Experimentais

Utilizando-se um goniômetro de contato:

- (a) Medir o ângulo formado pelo mineral (placa de quartzo, ouro, grafita e calcocita) e uma bolha de ar na presença de água pura ($6 < \text{pH} < 8$);
- (b) Medir o ângulo formado por quartzo, calcocita, ouro ou grafita na presença do coletor xantato.

Materiais necessários:

- Placa de quartzo, grafita, ouro e calcocita;
- Água de pureza analítica;
- Reguladores de pH;
- Lixa para limpeza das placas antes e após medidas de ângulo de contato.

AVALIAÇÃO P2

Redigir relatório da aula prática e dar resposta às duas questões abaixo:

1. Por que o ângulo de contato do quartzo é muito menor do que o ângulo de contato da calcocita, ouro ou grafita? Em outras palavras, o que o mineral quartzo possui na sua superfície que as demais espécies não possuem?
2. O que aconteceu com o ângulo de contato do quartzo, ouro, grafita e calcocita na presença do reagente amil xantato?