

Cinética de dissolução de NaCl em fluidos não newtonianos

B. J. S. BRONSATO¹, G. C. AZEVEDO¹, E. C. H. PARAISO¹, L. A. CALÇADA¹ e C. M. SCHEID¹

¹ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: scheid@ufrj.br

RESUMO – A perfuração de zonas salinas tem sido um desafio para a indústria petrolífera. Este trabalho avaliou o processo dissolutivo das partículas de cloreto de sódio em fluidos aquosos, não newtonianos, utilizados como base na elaboração de fluidos de perfuração de poços de petróleo. Foi utilizada goma xantana como viscosificante e os ensaios foram realizados em tanque agitado. Testes de imagem e condutividade foram utilizados para uma maior rapidez e precisão no monitoramento da dinâmica de dissolução. Verificou-se o efeito da turbulência sobre o processo, identificando uma tendência que relaciona a cinética do processo com as velocidades: terminal da partícula, e de escoamento. Um modelo matemático foi proposto para o acompanhamento do diâmetro das partículas com o tempo. Além disso apresentamos uma unidade experimental com similaridade dinâmica que foi dimensionada e parcialmente desenvolvida.

1. INTRODUÇÃO

Em cenários de perfuração de zonas de sal, os fluidos de perfuração, além de suas funções usuais devem ser inibidores da dissolução de sal. Nesse sentido, fluidos à base de água saturada em cloreto de sódio (NaCl) e fluidos sintéticos têm sido atualmente empregados. Os fluidos à base água tem vantagens claras frente aos sintéticos, no entanto, possuem elevado potencial corrosivo, e a não inibição da dissolução de sais como carnalita e taquidrita, além das necessidades de grandes volumes de sal para atingir a saturação (Rocha e Azevedo, 2009).

A análise de dissolução de partículas já vem sendo discutido e estudado por esse grupo de pesquisa ao longo dos anos. No intuito de obter maior conhecimento sobre os efeitos da dinâmica de dissolução do cloreto de sódio, Scheid *et al* (2014) desenvolveram uma unidade experimental para o escoamento de partículas de NaCl em salmouras. Eles avaliaram o comportamento da dissolução de partículas salinas frente a mudanças nas condições operacionais. Além disso, propuseram e validaram um modelo matemático composto por equações diferenciais parciais (EDP) que descreveu esse processo de dissolução com desvios entre os dados experimentais e simulados inferiores a 10%.

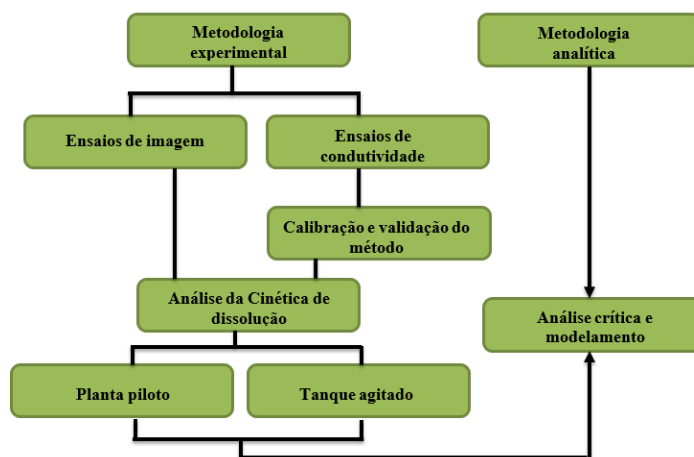
Corroborando para o assunto, Calçada *et al* (2015) desenvolveram uma unidade para a obtenção de dados experimentais de concentração de salmoura e sal particulado ao longo do sistema de escoamento. Os autores propuseram e validaram um modelo matemático baseado nas equações de conservação de massa para ambas as fases, sólida e líquida. Para tal modelo foi necessário estimar o coeficiente global de transferência de massa.

Em diferentes cenários operacionais o coeficiente convectivo de massa e a difusividade em processos complexos são funções de uma série de variáveis. Nesse contexto, surge a necessidade de modelos com um maior range de aplicação, uma vez que as correlações já existentes na literatura são específicas para um determinado cenário operacional. Sendo assim, esse trabalho objetiva a obtenção de uma correlação experimental capaz de reproduzir a cinética de dissolução de sal em fluidos não newtonianos com aplicabilidade em um range mais expressivo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida e aplicada neste trabalho possui uma vertente experimental conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma simplificado da metodologia adotada.



2.1. Unidade de Bancada, Condutividade e Cinética de dissolução

O sistema agitado foi concebido utilizando relações dimensionais citadas em Cremasco (2012). O aparato experimental (Figura 2 (a)) conta com duas hélices navais, garantindo uma corrente de fluxo com maior capacidade de mistura ao longo do recipiente (Figura 2 (b)). Além disso, a unidade foi instalada em banho termostático para controle da temperatura em $25(\pm 1)^{\circ}\text{C}$, (Figura 3).

Figura 2 - Esquema da unidade de bancada: a – dimensionais; b- curvas de fluxo

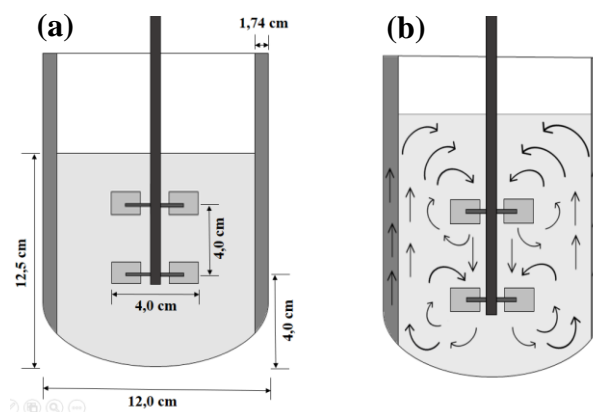
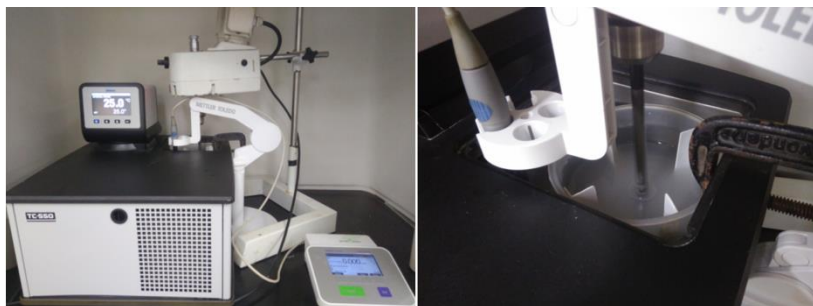


Figura 3 - Fotos da unidade de bancada.



A faixa de RPM selecionada variou entre 600 e 2000. Com estes valores, utilizando a Equação 1, foi possível reproduzir faixas similares de números de Reynolds impostos nas perfurações de zonas salinas. Nesta equação D é o diâmetro do impelidor, ρ_f é a massa específica do fluido, β é o parâmetro de forma da hélice (hélice naval - 10), k e n representam os parâmetros do modelo da potência, N é a rotação do impelidor, Re_{tq} é o número de Reynolds em tanque agitado e μ_{ap} é a Viscosidade aparente do fluido.

$$Re_{tq} = \frac{DN\rho_f}{\mu_{ap}} = \frac{D\rho_f}{k\beta^{n-1}N^{n-2}} \quad (1)$$

2.2. Ensaios de Imagem, Condutividade, Cinética de Dissolução e Análise granulométrica

Os ensaios de imagem foram realizados com o microscópio ParticleView V19. Os testes dinâmicos foram iniciados com soluções de goma xantana (GX) 1lb/bbl, com a gradativa adição de cloreto de sódio até o alcance da saturação. As soluções foram submetidas a intensa agitação e, sob tais condições, as imagens foram coletadas. Os testes estáticos foram realizados adicionando uma pequena alíquota de sal sobre a lente do equipamento e capturadas as imagens. O teste condutimétrico foi realizado utilizando o equipamento SevenCompact™ 230, sendo necessária uma curva de calibração prévia, onde as condutividades de amostras com concentrações conhecidas foram registradas e relacionadas em um gráfico cartesiano.

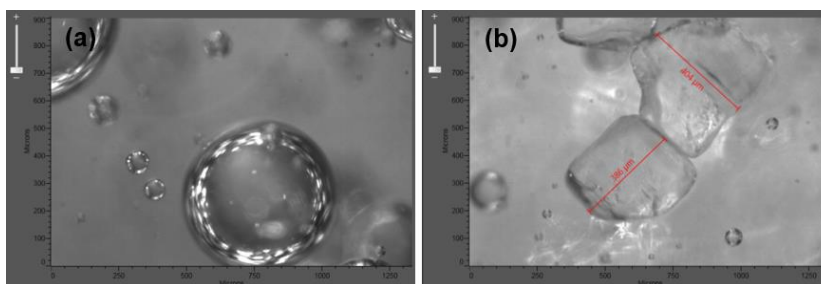
Para os ensaios de cinética de dissolução foram utilizadas diferentes faixas de Reynolds, similares as utilizadas nas perfurações de poços. Em todos os casos foi utilizado 1L de solução de GX (1,5lb/bbl) com 32g/L de NaCl (conc. de sal na água do mar) inicial e adicionados 320g de sal com diâmetro médio inicial de 1,016mm. Após isso a condutividade foi acompanhada, e de forma indireta, obteve-se a concentração de sal dissolvido. A análise granulométrica foi realizada em um agitador eletromagnético com peneiras, marca Bertel e foi determinado o diâmetro médio Sauter.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaios de Imagem

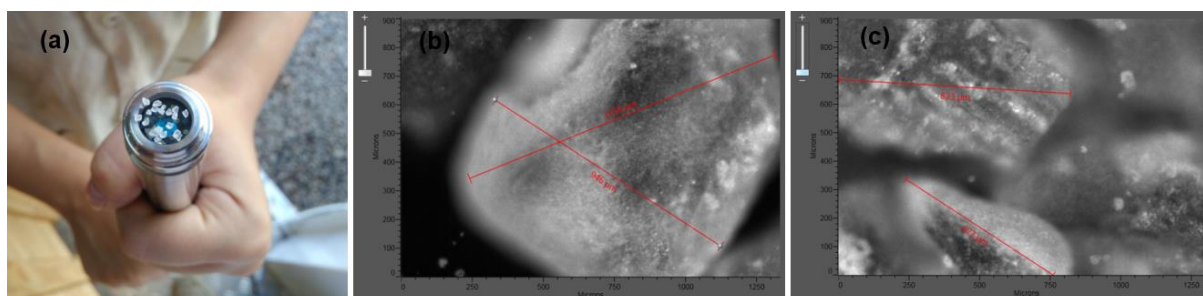
Através do ensaio dinâmico, utilizando o ParticleView V19 foram obtidas imagens que ilustram a capacidade de detecção do aparelho e a forma dos cristais salinos (Figura 4).

Figura 4 – (a) Solução de GX 1lb/bbl 32g/l de sal – sem partícula de sal; (b) Solução de GX 1lb/bbl saturada em sal – com particulado em excesso de 450 a 200 micra.



Para o ensaio estático foram obtidas imagens para partículas com tamanhos de 1050 a 850micra (Figura 5). Tal ensaio foi importante para percepção de limitação técnica do equipamento, uma vez que, partículas maiores que 800micra praticamente ocupavam toda a objetiva do equipamento (Figura 5 (b)). A partir disto, as partículas para o teste dinâmico foram limitadas às menores que 450micra. Apesar da qualidade de imagem apresentada na Figura 5, não foi possível acompanhar a redução do tamanho das partículas ao longo do tempo, pois a movimentação aleatória das partículas prejudicava o contato dessas com a lente do equipamento.

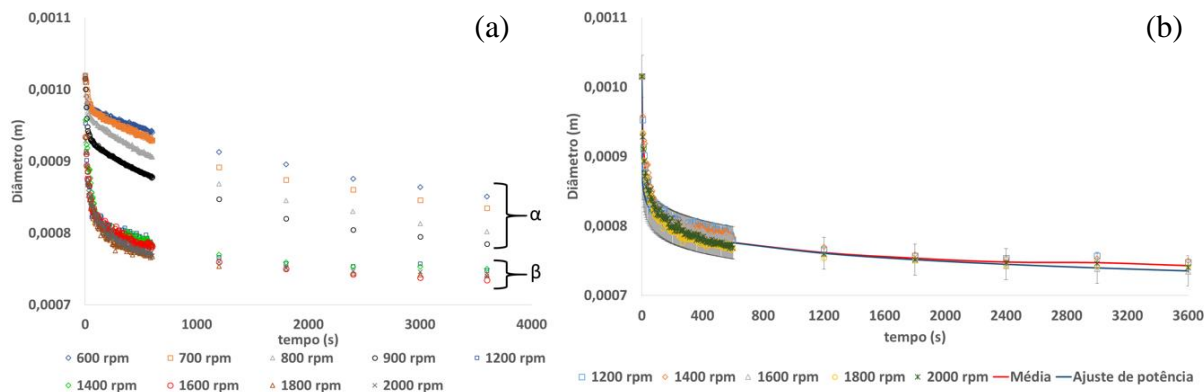
Figura 5 – (a) Posicionamento da amostra; (b) Imagem capturada de amostra de sal estática de 1050 – 850 micra. (c) Imagem capturada de amostra de sal estática de 850 – 450 micra.



3.2. Avaliação da cinética de dissolução por condutimetria

Os resultados da variação do diâmetro em função do tempo para diferentes RPM são apresentados na Figura 6. O diâmetro foi determinado pela combinação de balanço de massa (partícula/solução), na qual considerou-se a massa de sal adicionada composta apenas por partículas esféricas e com diâmetro inicial igual ao diâmetro médio de Sauter, obtido a partir de análise granulométrica prévia. Além disso, foi considerado que o consumo de sal era homogêneo e comum a todas as partículas. A concentração de sal dissolvida foi medida de forma indireta utilizando-se a condutividade do meio.

Figura 6 – Acompanhamento da redução do diâmetro das partículas de sal ao longo do tempo: (a) em diferentes taxas de cisalhamento; (b) em altas taxas de cisalhamento



Na Figura 6, é possível observar dois grupos de curvas distintos, divididos em α e β . O primeiro, a baixos RPM, o aumento da taxa de cisalhamento causa um aumento na velocidade de dissolução do cloreto de sódio. Neste grupo, a energia de agitação não é suficiente para manutenção das partículas em suspensão. Já grupo β , em elevados RPM, as correntes de fluxo impostas no sistema são capazes de manter as partículas em suspensão. Neste grupo, os resultados mostram que não há uma diferença clara na cinética de dissolução do sal. Nessa etapa há uma completa exposição da partícula e consequente aumento na superfície de contato. Neste grupo de interesse, apresentado na figura 6 (b), foi traçada uma curva média e um ajuste matemático exponencial. Além disso, barras de desvio padrão de 3% foram inseridas ao longo da curva de ajuste, mostrando que os dados experimentais, em sua maioria, podem ser representados, com certo grau de precisão por este ajuste matemático (Equação 2), onde d é o diâmetro da partícula (m), d_i é o diâmetro inicial da partícula (m) e t é o tempo (s).

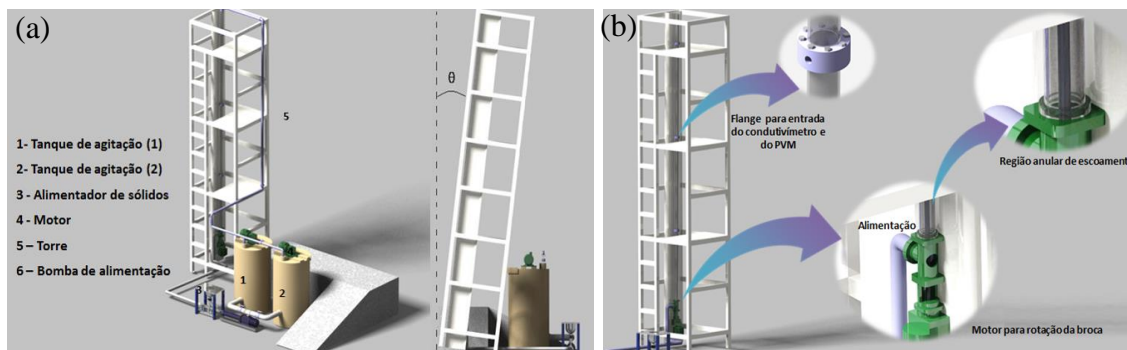
$$d = \left(\frac{1}{d_i} + 143,74t^{0,117} \right)^{-1} \quad (2)$$

A Equação 2 é uma ferramenta útil na previsão da variação do tamanho das partículas em sistemas onde o regime de escoamento seja equivalente ao imposto nesses experimentos (entre 1300 e 2000 RPM). A validade dessa equação está relacionada para solução de goma xantana de 1,5lb/bbl e partículas de diâmetro médio de Sauter da ordem de 1,016mm. Cabe ainda uma avaliação dessa equação em planta piloto, onde a geometria se assemelha com aplicação real de campo.

3.3. Planta Piloto

Para validação dos resultados obtidos em bancada foi projetada uma planta piloto (Figura 7 (a)) com similaridade dinâmica com o processo real. Esta é composta por tubo de acrílico externo de 4pol, tubo interno girante de 1 pol, com rotações de 100 a 150 rpm. A unidade pode ter sua inclinação alterada, para simulação de poços horizontais. Sua construção está em fase de finalização e seus resultados serão apresentados em trabalhos futuros.

Figura 7 – (a) Desenho da unidade piloto de dissolução de sal; (b) detalhamento do sistemas de rotação, flanges de análise e região anular de escoamento.



4. CONCLUSÃO

Os testes de imagem realizados com o ParticleView V19 foram importantes no estudo da forma, dimensão e aspecto da partícula de sal, no entanto, não foi possível uma coleta de imagens em intervalos de tempo satisfatórios para acompanhamento da redução do tamanho com o tempo. Os testes condutimétricos foram essenciais para obtenção dos resultados. O equipamento apresentou uma resposta instantânea da concentração da solução trazendo, ganho de tempo analítico e redução de erros gravimétricos de outras técnicas. A metodologia aplicada permitiu a obtenção de uma correlação experimental. Esta equação prevê o diâmetro instantâneo das partículas como função do tempo de residência em soluções de goma xantana GX (1,5lb/bbl) com concentração inicial de 32g/L de NaCl (conc. de sal na água do mar). A equação proposta desvia em cerca de 3% dos dados experimentais. O uso isolado desta equação ainda é precoce uma vez que sua aplicação depende de uma análise conjunta da dissolução de partículas e parede do poço. Ensaios futuros com soluções de GX a 2lb/bbl e 1lb/bbl, serão realizados para avaliar a cinética de dissolução em diferentes concentrações. Os ensaios na planta piloto trarão maior lucidez a questões dinâmicas do processo.

5. REFERÊNCIAS

- CALÇADA, L.A.; MARTINS, L.A.A.; SCHEID, C.M.; MAGALHÃES, S.C.; MARTINS, A.L. *Mathematical model of dissolution of particles of NaCl in well drilling: Determination of mass transfer convective coefficient. Journal of Petroleum Science & Engineering*, v. 126, p. 97-104, 2015.
- CREMASCO, M. A.; *Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos*. 5ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2012.
- ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. *Projeto de Poços de Petróleo: geopressões e assentamentos de colunas de revestimento*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2009.
- SCHEID, C. M.; PATRÃO, W.; SILVA, R; MARTINSEN, K. H.; MAGALHÃES, S. C.; CALÇADA, L. A. *Experimental evaluation and computational simulation of the dissolution of sodium chloride particles in a brine fluid flow. Acta Scientiarum. Technology*. v. 36, p. 287, 2014.