

ESTUDO DA DINÂMICA DE DISSOLUÇÃO DE SAL

¹ Wanderson Cabral. F. Patrão, ² Sérgio da Cruz Magalhães Filho, ³ Luis Américo Calçada, ³ Cláudia Miriam Scheid

¹ Bolsista de Iniciação Científica Faperj /UFRRJ, discente do curso de Engenharia Química

² Bolsista de Iniciação Científica FAPUR /UFRRJ, discente do curso de Engenharia Química

³ Docente do curso de Engenharia Química da UFRRJ

^{1,2} Endereço dos autores (Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Endereço: BR. 465, Km 7, Centro – Seropédica, CEP: 23890-000)

E-mail: scheid@ufrj.br

RESUMO – Este estudo teve como objetivo avaliar o processo dinâmico de dissolução de sal comercial em salmoura, através da proposta de uma correlação empírica que descreva a dependência da dissolução com as variáveis operacionais elegidas. As variáveis são a vazão volumétrica de salmoura, vazão mássica de sal, comprimento de escoamento e concentração da salmoura. Buscou-se avaliar também uma correlação destas variáveis com a granulometria do sal antes e após o contato com a salmoura. Para os experimentos, uma unidade piloto foi construída, constituída basicamente de 3 calhas de PVC com 3 metros de comprimento e 15 cm de caimento, um alimentador de sólidos denominado laboreto, bomba centrífuga e tubos e válvulas e 1 polegada. A metodologia empregada nos experimentos mostrou-se coerente justificado nos testes de reprodutibilidade. As correlações empíricas se mostraram válidas para as condições idealizadas neste trabalho, apresentando desvios menores que 10% para os valores experimentais e teóricos.

Palavras-Chave: Dissolução, granulometria, correlação.

INTRODUÇÃO

Com os avanços da tecnologia de perfuração de poços de petróleo já é possível alcançar e dar início às pesquisas na área do pré-sal, que são reservatórios de óleo que ficam abaixo de uma camada de sal composta basicamente por cloretos de sódio, potássio e magnésio, existentes em regiões de águas ultra-profundas.

Um dos principais problemas ocasionados por esta camada é durante a perfuração, no qual o sal invade o poço formado, dissolvendo-se no fluido de perfuração, alterando suas propriedades físico-químicas e reológicas, prejudicando o processo de perfuração. Sendo assim, o conhecimento da dinâmica de dissolução do sal é de grande importância para a avaliação das propriedades do fluido durante este procedimento.

Para elucidar a comparação entre as variáveis operacionais existentes no campo de perfuração e aquelas elegidas na unidade piloto pode-se afirmar que:

1) A alimentação de sólidos na unidade experimental faz menção à taxa de penetração de sal no poço de petróleo durante a perfuração;

2) A vazão volumétrica faz menção à vazão de bombeio de fluido de perfuração;

3) O comprimento de calha, ou seja, o comprimento total ao qual o sal está impelido a escoar junto à salmoura faz menção ao comprimento total do poço em perfuração;

4) A concentração da salmoura faz menção à concentração de íons presentes no fluido de perfuração no qual o sal tem a tendência de se dissolver.

O cerne deste trabalho foi avaliar como as variáveis dependentes e independentes se relacionam entre si e propor uma correlação empírica que descreva essa dependência. Por mais empírico que seja este procedimento, ele servirá como estudo preliminar no processo de dissolução de sais em salmouras, além de permitir prever problemas operacionais e soluções para futuras instalações de pesquisa com sal.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo, construiu-se uma unidade experimental composta de uma linha de escoamento a partir de 3 calhas de PVC, possuindo cada uma 6 metros de extensão e 15 centímetros de caimento, tubos de 1 polegada, válvulas, 1 alimentador de sólidos denominado laboreto modelo Retsch DR 100/75 e armações de ferro para sustentação. O sistema de calhas era conectado a um tanque de alimentação de

500 litros e através de uma bomba centrífuga CAM W4C, ¼ cv, DANCOR, a salmoura era admitida nas calhas. Ao final da calha a mesma era recolhida em outro tanque de 500 litros e o sal não dissolvido separado por peneiras de mesh 100.

A estrutura desta unidade pode ser observada nas figuras 1, 2 e 3.

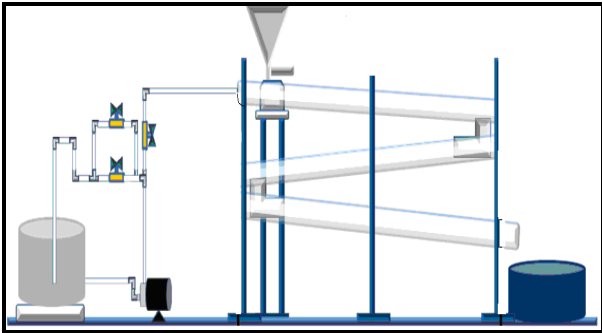


Figura 1 – Esquema da unidade experimental de escoamento de sais



Figura 2 – Foto da unidade experimental vista de cima



Figura 3 – Foto da unidade experimental vista parcialmente de lado

Como descrito anteriormente, as variáveis elegidas são: Q (vazão volumétrica de solução salina), W (vazão mássica de sal alimentada pelo

laboreto), CR (comprimento da calha), C (concentração de cloreto de sódio na solução de alimentação) e Dpe (diâmetro médio de Sauter dos sólidos alimentados). E as variáveis dependentes são FD (fator de dissolução) e Dps (diâmetro médio de Sauter após o processo dissolutivo).

Para montar a malha de experimentos, uma metodologia foi arbitrada. Temos preliminarmente 5 variáveis independentes (Q, C, W, CR, Dpe) para manipulação e duas variáveis dependentes FD e Dps.. De início a variável Dpe foi fixada em um valor médio aproximado, através da homogeneização de toda a matéria prima pela técnica de quarteamento. O principal objetivo foi retirar uma variável da malha para diminuir o número de experimentos, trabalhos futuros darão conta do efeito da variação deste termo sobre FD. O quarteamento pode ser verificado nas figuras 4, 5 e 6.



Figura 4 – Foto da massa total de sal



Figura 5 – Foto da aplicação da técnica de quarteamento



Figura 6 – Foto da estocagem das amostras

A tabela 1 mostra a malha de experimentos montada. A metodologia consistiu em fixar três variáveis e manipular uma sempre entre dois valores, um máximo e um mínimo.

Tabela 1 – Malha de experimentos.

EXP	C (%)	W (g/s)	CR (m)	Q (l/s)
1	25%	W1(mín)	18	Q1 (mín)
2	25%	W2(máx)	18	Q1 (mín)
3	25%	W1(mín)	6	Q1 (mín)
4	25%	W2(máx)	6	Q1 (mín)
5	25%	W1(mín)	6	Q2 (máx)
6	25%	W2(máx)	18	Q2 (máx)
7	25%	W1(mín)	18	Q2 (máx)
8	25%	W2(máx)	6	Q2 (máx)
9	50%	W1(mín)	18	Q1 (mín)
10	50%	W2(máx)	18	Q1 (mín)
11	50%	W1(mín)	6	Q1 (mín)
12	50%	W2(máx)	6	Q1 (mín)
13	50%	W1(mín)	6	Q2 (máx)
14	50%	W2(máx)	18	Q2 (máx)
15	50%	W1(mín)	18	Q2 (máx)
16	50%	W2(máx)	6	Q2 (máx)

Para elucidação dos termos da tabela, afirma-se que o CR (comprimento de escoamento do sal nas calhas) sendo 18 e 6 metros, implica em entender que o laboreto foi colocado em 2 pontos distintos para alimentação.

As porcentagens referentes à concentração da solução salina **C** são sobre a concentração de saturação da água. É conhecido na literatura

que o ponto de saturação da água se dá a 360g/l (PERRY, 1980), logo as concentrações usadas foram de 90g/l e 180g/l.

Antes de dar início aos experimentos, foram feitas análises granulométricas, a fim de determinar o diâmetro médio de Sauter de cada amostra. As peneiras utilizadas para esta análise foram as de mesh 4, 6, 8, 10, 14 20 e fundo. Toda massa retida no mesh 4 era descartada para uma maior homogeneização das amostras. Apesar de ter sido promovido a homogeneização das amostras, optou-se por esse procedimento para minimizar qualquer erro advindo de possíveis diferenças no diâmetro médio de Sauter de uma amostra para a outra. As figuras 7 e 8 mostram o agitador de peneiras e a análise granulométrica com corte no mesh 4 marcado pelo “x vermelho” respectivamente.



Figura 7 – Agitador de peneiras



Figura 8 – Análise granulométrica com corte na amostra

Após a análise granulométrica a amostra foi adicionada ao Laboreto que fornece uma alimentação contínua de sólidos à estrutura de calhas, que pode ser observado na figura 9. Este aparelho possui um medidor manual de frequência que regula o número de vibrações, permitindo controlar a vazão em que se pretende operar, sendo a mesma constante ao longo da operação. Para maior precisão da vazão de sólidos, foram feitas aferições em duplicata por técnica gravimétrica. A alimentação de sólidos pode ser feita em qualquer lugar da calha, uma vez que o laboreto é completamente móvel.



Figura 9 – Alimentador de sólidos, Laboreto

A alimentação da solução salina, contida no tanque de alimentação, foi feita por uma bomba centrífuga, que diferentemente do laboreto, despeja o fluxo líquido sempre no início das calhas. O fluxo escoava pelas calhas com vazão constante que é coletado no tanque de recepção. A vazão foi controlada pela manipulação das válvulas existentes no recalque e aferida no final das calhas através de técnica gravimétrica em triplicata.

No início do experimento é importante que os fluxos de líquido e de sólidos se encontrem ao mesmo tempo, para evitar que haja acúmulo de sal na calha, o que altera os valores de dissolução do sal.

O sólido escoava juntamente com a água no sistema de calhas, no qual o sal é recolhido utilizando-se uma tela de mesh 100, demonstrado na figura 10, que foi posicionada na saída da estrutura, permitindo que os sólidos ficassem retidos e a solução salina fosse recolhida no tanque de recepção. Na medida em que o sólido era coletado, foi necessário que esta massa fosse deslocada com o auxílio de um pincel, para uma região da tela na qual não estivesse em contato com a solução que descia das calhas, a fim de evitar que o resultado da dissolução fosse prejudicado.



Figura 10 – Tela de recolhimento de sal mesh 100

Após o recolhimento do sal, foi necessária a utilização de uma técnica de secagem do material. A primeira escolhida foi a secagem em estufa, porém quando o material a ser secado era retirado deste equipamento, havia aglomeração dos sólidos, impedindo que fosse feita análise granulométrica do sal, como mostra a figura 11.



Figura 11 – Aglomeração do sal após secagem em estufa

Por este motivo foi adotada outra técnica de secagem, através de um processo convectivo. Foi construída uma pequena unidade de secagem, contendo basicamente tubos, válvulas, um soprador de 4cv, uma caixa de madeira termicamente isolada contendo resistências para um eventual aquecimento do ar, flanges e telas de contenção de mesh 100 para aprisionamento do sal. A figura 12 mostra o esquema da unidade de secagem utilizada.

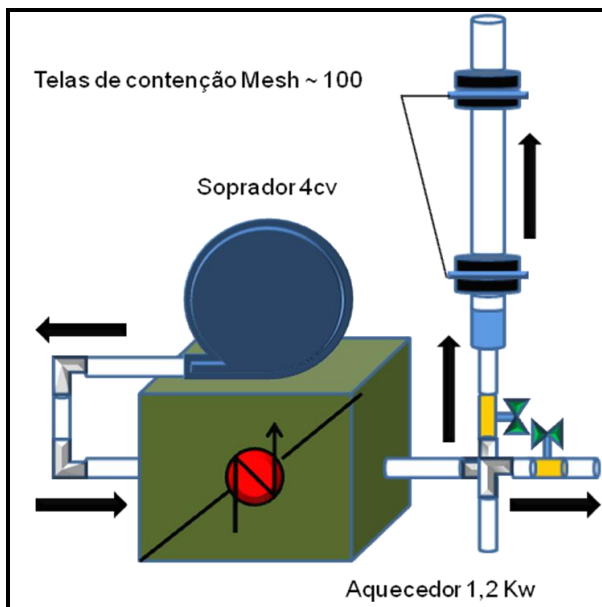


Figura 12 – Esquema de secagem por convecção

Após a secagem do material utilizando a secagem convectiva, observa-se que não houve aglomeração do sal, diferentemente do método de secagem por estufa, como mostra a figura 14.



Figura 14 – Material seco por processo convectivo

Após a secagem das amostras de sal advindas do processo dissolutivo, análises granulométricas foram feitas para determinar o diâmetro médio de Sauter e a massa total não dissolvida, visando o cálculo de FD. A quantidade de sal dissolvida pode ser obtida por um balanço de massa analítico, já que a massa de sal alimentada é conhecida pela análise granulométrica inicial, bem como a massa restante não dissolvida. O FD é obtido através da divisão da massa total dissolvida pela massa total alimentada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 mostra a malha de experimentos executados com os resultados experimentais obtidos, seguindo a metodologia descrita pela tabela 1.

Tabela 2– Malha de experimentos executados.

Exp	Q (l/s)	W (g/s)	CR (m)	C (g/l)	Dpe (mm)	FD (%)	Dps (mm)
1	0,53	11,02	18	94,00	1,75	74,15	1,58
2	0,54	24,05	18	94,00	1,78	72,78	1,58
3	0,50	12,36	6	94,00	1,69	49,55	1,54
4	0,53	24,51	6	94,00	1,71	54,07	1,53
5	1,00	12,53	6	92,33	1,71	45,85	1,58
6	0,99	26,19	18	92,33	1,75	70,64	1,59
7	0,95	11,36	18	93,33	1,71	67,82	1,53
8	0,97	23,70	6	93,33	1,80	38,81	1,67
9	0,55	11,62	18	182,33	1,66	55,45	1,52
10	0,57	26,05	18	182,33	1,73	55,51	1,59
11	0,56	25,12	6	182,33	1,69	32,79	1,57
12	0,58	11,81	6	182,33	1,72	28,00	1,64
13	0,96	11,19	6	183,00	1,72	28,47	1,63
14	0,96	25,66	18	183,00	1,70	54,42	1,53
15	0,94	12,15	18	178,33	1,79	47,44	1,65
16	0,94	24,10	6	178,33	1,80	24,33	1,65

As colunas em vermelho são as variáveis dependentes obtidas a partir dos experimentos executados.

É visto que a vazão volumétrica mínima foi fixada em 0,55 l/s aproximadamente e a máxima em 0,95 l/s. As vazões mássicas mínimas e máximas foram fixadas em 11 g/s e 24 g/s aproximadamente. As concentrações iniciais do tanque de alimentação foram ajustadas em 25% e 50% sobre a concentração de saturação da água e o comprimento de calha fixado em 18 e 6 metros.

Para avaliar o efeito que a vazão de salmoura tem sobre o fator de dissolução, analisou-se os experimentos 1 e 7, 2 e 6, 3 e 5, e 4 e 8. Observa-se que cada um destes pares possui valores constantes de (W, CR, C e Dpe), variando somente o valor de Q. Com isto, observou-se que com o aumento da vazão de salmoura, o fator de

dissolução (FD) diminui, pois o tempo de residência do sal nas calhas diminui, reduzindo o tempo de contato do sólido com a salmoura.

Para avaliar o efeito que o comprimento de escoamento do sal nas calhas tem sobre o fator de dissolução, analisou-se os experimentos 1 e 3, 2 e 4, 7 e 5, e 6 e 8. Observa-se que cada um destes pares possui valores constantes de (Q, W, C e Dpe), variando somente o valor de CR. Com isto, observou-se que com o aumento do comprimento, o fator de dissolução (FD) aumenta, pois aumentou o tempo de residência do sal nas calhas, o que aumenta o tempo de contato do sólido com a salmoura.

Para avaliar o efeito que a concentração de saturação tem sobre o fator de dissolução, analisou-se os experimentos 1 e 9, 2 e 10, 3 e 12, e 4 e 11. Observa-se que cada um destes pares possui valores constantes de (Q, W, CR e Dpe), variando somente o valor de C. Com isto, observou-se que com o aumento da concentração de saturação da salmoura, o fator de dissolução (FD) diminui, devido ao efeito do aumento da presença de íon comum.

Para avaliar o efeito que a vazão de sólidos tem sobre o fator de dissolução, analisou-se os experimentos 1 e 2, 3 e 4, 5 e 8, e 7 e 6. Observa-se que cada um destes pares possui valores constantes de (Q, CR, C e Dpe), variando somente o valor de W. Com isto, observou-se que o fator de dissolução (FD) apresentou valores com tendência aleatória, sendo necessário novas metodologias de avaliação.

Os dados contidos na tabela 2 foram confrontados quanto a sua confiabilidade através da reprodutibilidade de alguns experimentos aleatórios. A tabela 3 mostra os resultados obtidos para a repetição do experimento 1 e 15.

Tabela 3 – Resultados experimentais obtidos a partir da reprodução das condições operacionais do experimento 1 e 15.

Exp	Q (l/s)	W (g/s)	CR (m)	C (g/l)	Dpe (mm)	FD (%)	Dps (mm)
1	0,53	11,01	18	94	1,752	74,15	1,584
1'	0,55	12,47	18	89,33	1,715	73,35	1,575
15	3,392	12,14	18	178,33	1,785	47,44	1,646
15'	3,656	11,13	18	180	1,802	45,01	1,651

Pode-se observar que os resultados são similares quando repetidos, isso mostra que a unidade experimental está bem ajustada e dimensionada, bem como o processo usado para avaliar a dissolução dinâmica do sal está coerente.

Resultados obtidos para as correlações propostas.

Correlação para o FD

O cerne desses resultados é a proposta da correlação empírica da dissolução. Conhecer como FD se relaciona com as demais e prever qual será seu valor em condições diferentes é fundamental.

Matematicamente objetivou-se:

$$(FD)_{\%} = f(Q, W, CR, C, dpe) \quad (1)$$

Chegando à seguinte correlação adimensional:

$$(FD)_{\%} = A \left(\frac{W^B \cdot CR^C}{Q^D \cdot C^E \cdot dpe^F} \right) \quad (2)$$

Onde:

$$[A] = \left(\frac{kg^{0,4925} \cdot m^{2,2597}}{(m^3)^{0,4169} \cdot h^{0,0756}} \right) \quad (3)$$

$$A = 908,032; B = 0,0894; C = 0,4565$$

$$D = 0,1650; E = 0,5819; F = 2,7157$$

Para o estudo dessa correlação a ferramenta computacional utilizada foi o software STATISTICA.

Vale ressaltar que este modelo surgiu a partir de uma análise dimensional e é absolutamente empírico, válido somente para os dados experimentais até agora levantados e não é conclusivo. O modelo é absolutamente potencial entre si e apresenta o seguinte desempenho observado na tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre os valores experimentais e previstos pela correlação

Exp.	Experimental	Correlação	Exp / Corr
1	74,153	72,430	1,024
2	72,777	74,551	0,976
3	49,546	49,277	1,005
4	54,075	50,664	1,067
5	45,855	43,179	1,062
6	70,638	71,177	0,992
7	67,822	70,898	0,957
8	38,806	39,794	0,975
9	55,452	56,748	0,977
10	55,511	54,344	1,021

11	32,788	35,066	0,935
12	28,000	31,306	0,894
13	28,471	28,364	1,004
14	54,420	52,420	1,038
15	47,442	43,558	1,089
16	24,332	27,331	0,890
Resultado 0,994 ± 0,057			

Observando a tabela 4 e seu resultado, resultado este representado pela média dos desvios entre os valores experimentais e os advindos da correlação, que a correlação ajusta com satisfação a previsão da massa dissolvida de sal nas condições propostas.

Importante ressaltar que o modelo não foi testado para a extrapolação de dados nem tão pouco é intencionado que o mesmo preveja e permeie as reais condições de invasão de sal em processos de perfuração na camada pré-sal. As condições reais são a altas pressões, perfis completamente não isotérmicos, taxas de penetração variáveis e o fluido no qual o sal invade é não-newtoniano base óleo, ou seja, este modelo é preliminar e visa nortear as condições laboratoriais.

Correlação para o Dps

O objetivo da criação desta correlação foi avaliar como varia o diâmetro de partícula de saída (Dps) com as variáveis manipuladas e a determinação do seu valor final.

Para o estudo dessa correlação e determinação de seus parâmetros a ferramenta computacional utilizada foi o software STATISTICA.

Vale ressaltar que esta correlação também surgiu através de uma análise dimensional totalmente empírica.

$$\left(\frac{Dps}{Dpe}\right) = A \cdot \left(\frac{C.Q.CR}{W.Dpe}\right)^B \quad (4)$$

Onde:

$$A = 0,889$$

$$B = 0,004$$

A tabela 5 apresenta os resultados dos valores experimentais confrontados com os advindos da correlação empírica proposta.

Tabela 5 – Comparação entre os valores experimentais e os teóricos

Exp	(Dps/Dpe)exp	(Dps/Dpe)corr	exp / corr
1	0,904	0,903	1,001
2	0,891	0,901	0,989
3	0,91	0,899	1,012
4	0,899	0,897	1,002
5	0,921	0,902	1,021
6	0,916	0,903	1,014
7	0,896	0,906	0,989
8	0,926	0,899	1,030
9	0,915	0,906	1,010
10	0,918	0,903	1,017
11	0,927	0,899	1,031
12	0,954	0,902	1,058
13	0,947	0,904	1,048
14	0,899	0,905	0,993
15	0,922	0,907	1,017
16	0,915	0,901	1,016
Resultado 1,015 ± 0,019			

Observa-se que os valores dos desvios entre o resultado experimental e o advindo da correlação não suplantam 5%, o que mostra uma boa coerência entre a correlação proposta e a tendência experimental.

CONCLUSÕES

Sobre as variáveis que exercem maior influência sobre FD, dentre as avaliadas, estão C (concentração da salmoura) e CR (comprimento de calha), respectivamente, por apresentarem os maiores impactos sobre a dissolução, como pode ser observado na tabela 2. Logo em seguida, está a vazão volumétrica da salmoura, Q, que oferece impacto na dissolução de maneira mais branda. A vazão mássica de sólidos apresenta um impacto aleatório sobre FD, concluindo que mais experimentos com novas metodologias experimentais se fazem necessárias. Para a secagem do sal advindo do processo dissolutivo, o mais indicado é o processo de secagem convectivo, por apresentar um produto final seco e não aglomerado. Todos os testes foram conduzidos à temperatura ambiente, e seus efeitos não foram avaliados e não pertence ao escopo deste trabalho, assim como a influencia de Dpe, ambos serão avaliados em oportunidades futuras de trabalhos mais complexos.

Sobre as correlações, as mesmas se mostraram válidas para as condições idealizadas nes-

te trabalho, apresentando desvios menores que 10% para os valores experimentais e os advindos das correlações. Mesmo a correlação sendo empírica e preliminar, pode trazer idéias e noções para tomadas de decisão em momentos críticos durante o processo de perfuração real, além de servir de base para trabalhos mais complexos e vindouros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PERRY, R. H. & CHILTON, H. C. Manual de Engenharia Química. 5ª edição. Editora Guanabara Dois, São Paulo: 1980.