



DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS ÓTIMAS NO PROCESSO DE DESÁGUE EM PENEIRAS VIBRATÓRIAS

RAFAEL Y. M. BARBOSA^{1*}, VINÍCIUS L. SOUSA¹, KAOANDER ANTONIO², JULIA P. A. SILVA², LUIZ G. M. VIEIRA¹, RUBENS GEDRAITE¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química

²Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química

*e-mail: rafayuri@ufu.br

RESUMO – A etapa de controle de sólidos na indústria petrolífera tem como principais objetivos recuperar o máximo de fluido de perfuração possível para reutilização no processo e adequar o sólido residual para o descarte correto de acordo com a legislação ambiental. Na etapa de controle de sólidos, as peneiras vibratórias são os primeiros equipamentos utilizados e têm como função recuperar o máximo de fluido de perfuração possível, minimizando o teor deste fluido no sólido residual para as demais etapas do controle de sólidos. Por se tratar do primeiro equipamento do controle de sólidos, o funcionamento otimizado das peneiras vibratórias, beneficia o processo como um todo. Neste trabalho é apresentada uma abordagem para a determinação da condição de operação ótima que minimiza o teor de fluido no sólido residual e, ao mesmo tempo, maximiza a vida útil do equipamento. Os resultados obtidos no estudo realizado indicam que a melhor condição de operação para este equipamento é a que proporciona maiores tempos de residência do material sobre a tela de separação e mantém a posição da interface suspensão/material sólido em 175 cm, que é um valor tipicamente praticado em equipamentos usados na indústria de prospecção do petróleo.

INTRODUÇÃO

Uma das etapas iniciais do processo de exploração de petróleo é a perfuração de poços. Os fragmentos de rocha oriundos do processo de perfuração, também denominados de cascalho, são continuamente retirados do poço pelo fluido de perfuração que é injetado no reservatório por bombeamento através do interior de uma coluna e retorna à superfície pelo espaço anular entre a coluna e as paredes do reservatório (Thomas, 2004).

Geralmente o fluido de perfuração é reutilizado no processo para reinjeção no reservatório e quando o material sólido proveniente da perfuração não é devidamente removido, este compromete as propriedades físicas do fluido. O cascalho é removido em uma unidade de controle de sólidos, cujo

objetivo é adequar o fluido para reinjeção no reservatório (American Association of Drilling Engineers, 1999). Uma unidade de controle de sólidos é, tipicamente, constituída de peneiras vibratórias, hidrociclones e centrífugas decantadoras.

Além do aspecto econômico, o sistema de controle de sólidos também é necessário devido às legislações ambientais cada vez mais rígidas ao redor do mundo. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental Americana, o teor de fluido de perfuração sintético aderido aos cascalhos descartados em plataformas *offshore* deve ser inferior a 6,9% em massa, sendo ainda proibido o descarte de cascalhos impregnados com fluido de base oleosa (White, 2000).

As peneiras vibratórias são os primeiros equipamentos de um sistema de controle de

sólidos, sendo responsáveis pela recuperação de grandes quantidades de fluido de perfuração, que passam pelas aberturas da tela da peneira e, também, por reduzir o teor de fluido no sólido residual para as etapas seguintes do processo (Nascentes, 2019).

Por se tratar do primeiro equipamento da unidade de controle de sólidos, não é difícil perceber que, quando este equipamento opera de forma otimizada, o processo de controle de sólidos como um todo é também otimizado.

Além de garantir que o sólido retido terá o mínimo teor de fluido possível, também é importante determinar condições que prezem pela vida útil do equipamento. Peneiras vibratórias são equipamentos robustos, porém suas telas de separação podem sofrer avarias quando o equipamento é operado em condições impróprias, resultando na perda de eficiência do processo e, conseqüentemente, substituição da tela. De acordo com Scott e Varco (2006), a operação ótima da peneira ocorre quando $\frac{3}{4}$ da tela é inundada pelo fluido de perfuração e o $\frac{1}{4}$ restante é destinado à secagem do sólido retido.

Sendo assim, nota-se a existência de um problema de otimização restrita: o equipamento deve operar no intuito de minimizar o teor de fluido (umidade) no sólido residual, restrito à condição de que $\frac{3}{4}$ da tela de separação do equipamento deve ser ocupado pelo fluido (ou pela região de piscina).

Em um processo real, não se pode definir qual será a viscosidade do fluido, características do material sólido ou outras características inerentes do processo. A obtenção da condição ótima de operação deve ser realizada manipulando apenas variáveis operacionais do equipamento, sendo estas a inclinação do cesto da peneira (I) e o fator-g (Fg) – variável relacionada à aceleração imposta pelos motores vibratórios que relaciona quantas vezes a máxima aceleração imposta pelo sistema é, em módulo, maior que a aceleração da gravidade local.

Devido à importância das peneiras vibratórias para o sistema de controle de sólidos, este trabalho tem por objetivo a determinação de condições ótimas de operação deste equipamento de forma a minimizar o teor de fluido no sólido residual e maximizar a vida útil das telas do equipamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Unidade Experimental

A unidade experimental utilizada foi composta por uma peneira vibratória industrial *MONGOOSE PRO Shaker* produzida pela empresa *M-I Swaco*, do grupo *Schlumberger*. A peneira era composta por 4 telas de peneiramento, sendo cada tela com comprimento de 0,585 m e largura de 1,165 m, possuindo um diâmetro de abertura de 0,075 mm (200 *mesh*). O equipamento ainda contava com dois motores vibratórios com 1800 RPM e 2,5 hp operando em contrarotação. Segundo o fabricante, o equipamento pode operar em modo *normal* com fator-g de até 6,5, enquanto que, no modo *capacity*, o valor do fator-g pode atingir até 7,5. Com relação à inclinação da tela, ainda segundo o fabricante, a inclinação pode variar de 2° a 8°.

A peneira vibratória utilizada foi instalada na Unidade de Pesquisa da Engenharia Química (UPEQ), anexo da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

A peneira vibratória encontrava-se montada a 3 m de altura do solo, utilizando uma estrutura de sustentação construída em aço-carbono, abaixo da qual se encontra um tanque de mistura equipado com agitador de 3000 L de capacidade.

A suspensão utilizada nos testes foi formada por água e areia, sendo a concentração mássica de sólidos na mistura de 1,86%. A distribuição granulométrica da areia utilizada seguia o modelo de distribuição granulométrica *RRB*, ajustado com $R^2=0,96$ e apresentado na Equação 1.

$$X = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D}{721,14}\right)^{2,54}\right] \quad (1)$$

A suspensão era bombeada por uma bomba de lama *Warman Weir 4/3C – AH* com motor *WEG* de 15 CV. A unidade utilizada nos ensaios experimentais está esquematizada na Figura 1.

A operação da peneira vibratória era controlada por um programa desenvolvido no software *LabView™*, no qual foi implementada uma malha de controle que atuava na frequência dos motores vibratórios, por meio de um

inversor de frequência *WEG CFW700*, de forma a manter o fator-g em torno de um *setpoint* definido pelo usuário.

Os valores do fator-g utilizados neste estudo referem-se à componente normal à tela da aceleração induzida pelos motores vibratórios, embora não seja o mais correto, para simplificar a referência dessa variável, esse parâmetro será chamado de apenas fator-g, embora se refira apenas a uma componente. Os valores de fator-g foram obtidos por meio de um sensor piezoelétrico da marca *PCB Piezoelectronic* modelo 646B00. Toda a comunicação entre o computador utilizado e os equipamentos era feita por meio de uma placa de aquisição de dados da fabricante *National Instruments* modelo NI-6008.

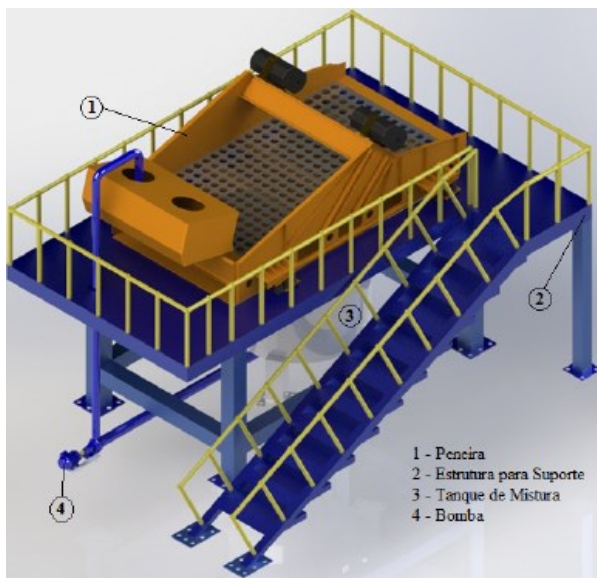


Figura 1: Esquematização da unidade experimental utilizada.

As medidas da vazão foram realizadas indiretamente utilizando uma correlação para medida de vazão em canais abertos, utilizando para isso dados da geometria da caixa de alimentação da peneira e altura da crista de fluido passante no vertedouro presente nessa caixa de alimentação. Na Equação 2 é apresentada a expressão matemática utilizada para o cálculo da vazão (Tilton, 2008).

$$Q_A \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{2}{3} cW \sqrt{2gh}^{3/2} \quad (2)$$

Na Equação 2, W é a largura do vertedouro, sendo $W = 0,75$ m, c é um parâmetro ajustado, sendo seu valor obtido experimentalmente e valendo $c = 0,11$ e h é a

altura da crista de fluido que varia de acordo com a vazão de operação expressa em metros na Equação 2.

Metodologia Experimental

De forma a alcançar o objetivo proposto neste trabalho, foi necessária a obtenção de modelos que descrevam o comportamento da umidade do sólido residual do processo de deságue e também da posição da região de piscina em função de variáveis operacionais.

Em se tratando de modelos, os mesmos podem ser obtidos por meio de modelagem fenomenológica, através de balanços de massa, energia e quantidade de movimento, ou podem ser identificados. Peneiras vibratórias são equipamentos cujo comportamento físico é muito complexo de ser obtido por equações de base fenomenológica, por isso, neste trabalho, optou-se por utilizar modelos identificados a partir de dados experimentais.

Com o intuito de obter um modelo representativo e sem a realização de uma quantidade exagerada de experimentos, montou-se um planejamento experimental de três níveis (3^k) e dois fatores com duas réplicas no centro (Box *et al.*, 2005). Os dois fatores adotados foram a inclinação da tela da peneira (I) e fator-g (Fg), duas variáveis operacionais de fácil manipulação. *A priori*, a vazão de alimentação também é uma variável interessante de se quantificar o efeito, porém devido às incertezas observadas no sistema de medição utilizado (Equação 2), optou-se por, em vez de incluí-la como um fator, realizar três planejamentos fatoriais 3^2 para três condições diferentes de vazão. Na Tabela 1 é apresentada a matriz de planejamento utilizada neste trabalho.

Tabela 1: Matriz de planejamento.

Experimento	x_1	x_2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	0	0
6	-1	0
7	1	0
8	0	-1
9	0	1
10	0	0

Na matriz de planejamento, as variáveis x_1 e x_2 estão codificadas e referem-se, respectivamente, à inclinação da tela da peneira e ao fator-g, sendo as equações de codificação representadas pelas Equações 3 e 4.

$$x_1 = \frac{I-5^\circ}{3^\circ} \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{Fg-2,1}{1,1} \quad (4)$$

As variáveis de interesse que foram avaliadas nos experimentos eram o teor de umidade do sólido residual e a posição da região de piscina. Elas foram avaliadas para três condições diferentes de vazão volumétrica. As respostas foram nomeadas de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Variáveis estudadas versus vazão.

Vazão (L/min)	Umidade (%)	Posição (cm)
72,2	U ₁	P ₁
108,3	U ₂	P ₂
139,5	U ₃	P ₃

Com relação ao procedimento de obtenção das respostas, a umidade foi coletada para cada condição da matriz de planejamento (Tabela 1) e para cada condição de vazão (Tabela 2), em béqueres de massa previamente determinadas, após o sistema alcançar a condição de estado estacionário. A condição de estado estacionário foi identificada quando variações não foram visualmente observadas no sistema. As amostras contendo o sólido úmido foram então pesadas e depois secadas em estufa a 105°C por 24 h. A determinação do teor de umidade foi realizada com base na Equação 5.

$$U(\%) = \frac{m_{su}-m_{ss}}{m_{su}} 100\% \quad (5)$$

O processo de determinação da posição da região de piscina era feito de maneira análoga à determinação do teor de umidade. Para cada condição de matriz de planejamento e para cada vazão, após o sistema entrar em regime estacionário, com auxílio de uma trena foi determinada a posição da região de piscina. A coleta desta informação foi realizada de forma simultânea com a coleta do teor de umidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinação dos Modelos Estacionários

Os valores experimentais médios para teor de umidade e posição da região de piscina são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Valores medidos de teor de umidade.

Experimento	U ₁ (%)	U ₂ (%)	U ₃ (%)
1	51,74	22,51	20,08
2	17,88	16,42	18,15
3	32,76	26,09	25,95
4	21,46	21,94	21,89
5	20,80	18,48	22,45
6	52,29	22,54	20,53
7	18,70	20,36	19,01
8	23,15	19,49	20,43
9	21,45	20,48	20,58
10	22,70	21,27	19,51

Tabela 4: Valores medidos da posição da região de piscina.

Experimento	P ₁ (cm)	P ₂ (cm)	P ₃ (cm)
1	234,0	223,5	221,5
2	186,5	198,5	184,5
3	209,5	188,5	223,5
4	97,5	99,5	126,0
5	165,0	150,0	182,5
6	217,5	217,5	205,5
7	109,5	109,5	128,0
8	230,5	227,5	227,5
9	149,0	139,0	158,0
10	165,0	166,0	194,5

Nos experimentos de coleta de teor de umidade e posição da região de fluido para a vazão de 72,19 L/min, nas condições referentes ao experimento 1, não se verificou a formação da interface entre região de piscina e região de praia, com a região de piscina preenchendo todo o comprimento da tela da peneira, justificando desta maneira o elevado valor de umidade obtido. Na condição referente ao experimento 6, a interface formou-se próxima ao fim da peneira e as condições operacionais não foram ideais para realização do deságue, resultando em uma mistura com alto teor de fluido.

De posse dos resultados experimentais, o tratamento estatístico foi realizado com o emprego da linguagem R e usando a interface gráfica RStudio, por meio da biblioteca *RSM*

(LENTH, 2009). O tratamento estatístico teve por objetivo a análise dos efeitos de cada parâmetro dos modelos obtidos por regressão em um intervalo de confiança de 90%, sendo os efeitos não significativos para o modelo removidos um a um.

As Equações 6, 7 e 8 apresentam as equações de regressão obtidas para a umidade do sólido residual nas diferentes vazões utilizadas.

$$U_1 = 22,02 - 13,12x_1 + 5,64x_1x_2 + 10,45x_1^2 \quad (6)$$

$$U_2 = 19,93 - 2,07x_1 + 1,682x_2 + 1,71x_1^2 \quad (7)$$

$$U_3 = 20,34 - 1,25x_1 + 1,63x_2 - 0,53x_1x_2 + 0,06x_1^2 + 0,80x_2^2 \quad (8)$$

Os modelos de segunda ordem para a posição da região de piscina são apresentados nas Equações 9, 10 e 11.

$$P_1 = 164,2 - 44,6x_1 - 32,5x_2 - 12,1x_1x_2 + 20,2x_2^2 \quad (9)$$

$$P_2 = 160,8 - 37,0x_1 - 37,1x_2 - 16,0x_1x_2 + 18,7x_2^2 \quad (10)$$

$$P_3 = 185,2 - 35,3x_1 - 21,0x_2 - 15,1x_1x_2 \quad (11)$$

Como métrica de avaliação para os ajustes, utilizou-se a raiz quadrada do erro relativo quadrado (*RQERQ*). Seja \hat{y}_i o valor predito por um modelo e y_i o valor real, o *RQERQ* é calculado pela Equação 12.

$$RQERQ(\%) = 100 \cdot \sqrt{\sum_i \left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right)^2} \quad (12)$$

Na Tabela 5 são apresentados os valores da raiz quadrada do erro relativo quadrado para cada modelo ajustado.

Conforme observado nas Figuras 1 a 6 e corroborado pelas Equações 1 a 6, todos os modelos ajustados (equações de regressão) apresentaram comportamento não linear. Observa-se também que, com exceção do modelo descrito pela Equação 1, referente à

umidade do sólido residual para a vazão de 72,19 L/min, todos os modelos tiveram *RQERQ* inferior a 10%, mostrando boa capacidade de ajuste aos dados por parte dos modelos identificados.

Tabela 5: Raiz quadrada do erro relativo quadrado para cada modelo ajustado.

Modelo	<i>RQERQ</i> (%)
U ₁	12,44
U ₂	5,62
U ₃	5,73
P ₁	4,37
P ₂	7,08
P ₃	7,67

As superfícies de resposta geradas a partir das equações de regressão ajustadas são apresentados nas Figuras 2 a 7.

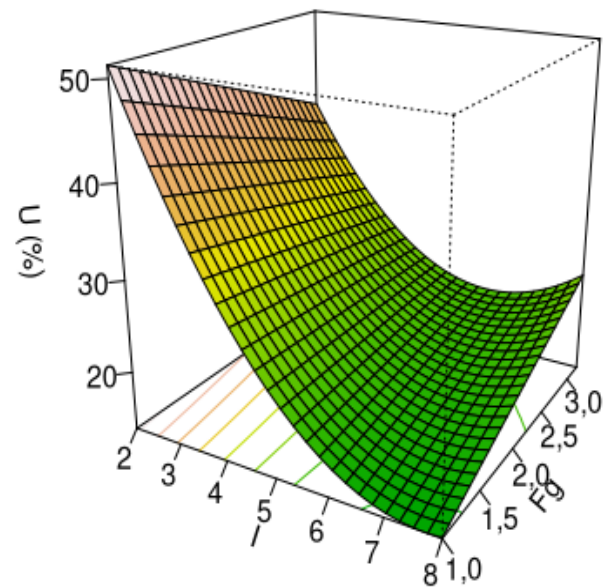


Figura 2: Teor de Umidade em função da inclinação (*I*) e do fator-g (*Fg*) para a vazão de 72,19 L/min.

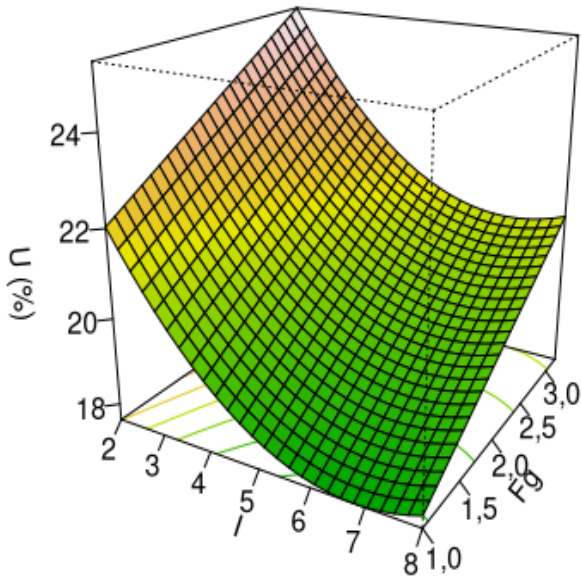


Figura 3: Teor Umidade em função da inclinação (I) e do fator-g (Fg) para a vazão de 108,28 L/min.

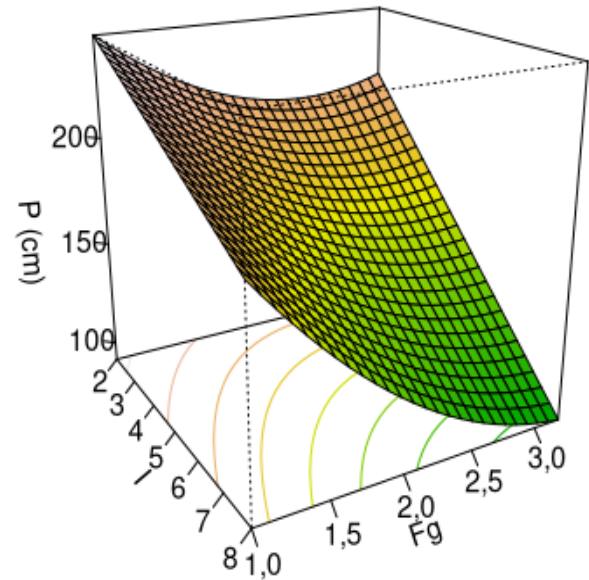


Figura 5: Posição da região de piscina em função da inclinação (I) e do fator-g (Fg) para a vazão de 72,19 L/min.

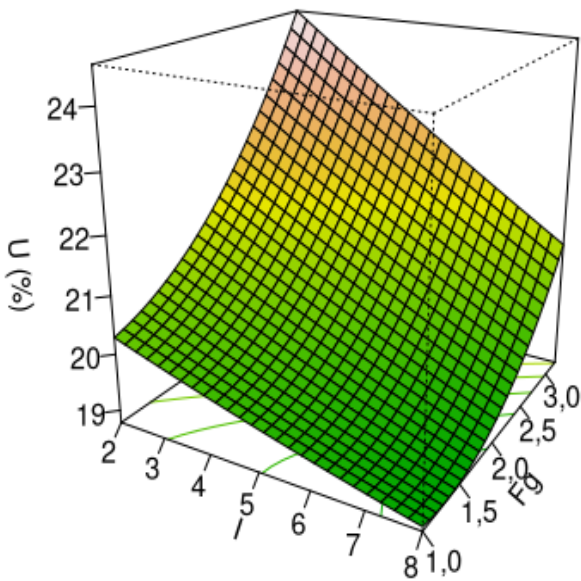


Figura 4: Teor de Umidade em função da inclinação (I) e do fator-g (Fg) para a vazão de 139,53 L/min.

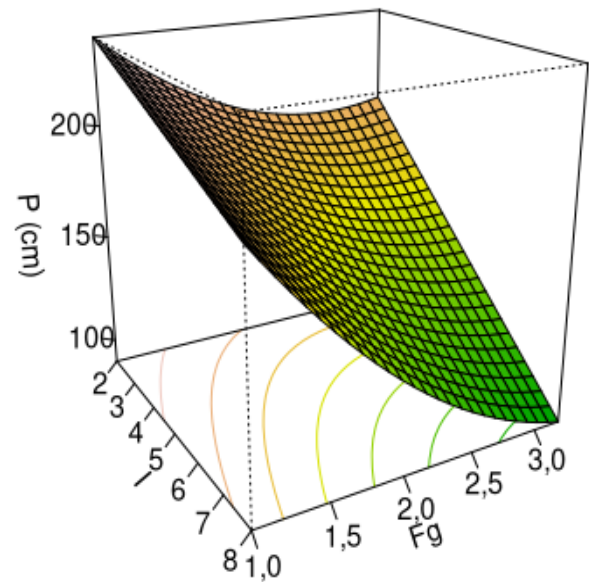


Figura 6: Posição da região de piscina em função da inclinação (I) e do fator-g (Fg) para a vazão de 108,28 L/min.

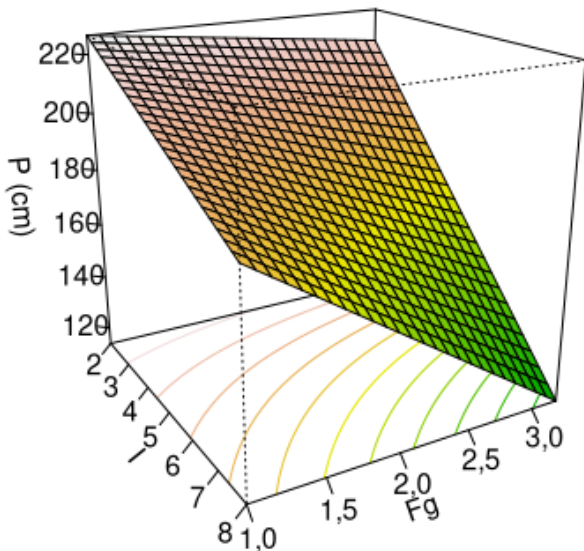


Figura 7: Posição da região de piscina em função da inclinação (I) e do fator-g (Fg) para a vazão de 139,53 L/min.

Antes de prosseguir para as análises e interpretações dos modelos, é importante definir, do ponto de vista teórico, os efeitos isolados de cada variável no processo de deságue, a saber:

- Vazão de alimentação: quanto maior a vazão de alimentação, maior será a velocidade de transporte da mistura sólido-líquido no início da tela de separação, sendo esta velocidade propagada ao longo do comprimento da tela e desta forma reduzindo o tempo de residência. Por outro lado, maiores vazões de alimentação aumentam o tamanho da coluna de fluido em um determinado ponto da tela, o que aumenta a vazão de fluido passante pelas aberturas da tela da peneira;
- Inclinação da tela: a inclinação da tela interfere na ação do vetor da aceleração da gravidade sobre a mistura. Maiores inclinações fazem com que a mistura seja acelerada mais intensamente no sentido contrário à saída de sólidos, aumentando o tempo de residência, com a aceleração no sentido contrário à saída de sólidos também ocorre um aumento na coluna de fluido na região de piscina, o que favorece o aumento da vazão de fluido passante. Porém, se comparado com inclinações menores, maiores inclinações reduzem a vazão de

fluido passante pelas aberturas da tela da peneira;

- Fator-g: valores maiores de fator-g contribuem para uma maior vazão de fluido passante pelas aberturas da tela da peneira, porém o material sobre a tela tende a ser acelerado na direção da saída de sólidos, reduzindo o tempo de residência do material sobre a tela.

Na Equação 6, observa-se que inclinações maiores da tela de peneiramento (inclinações superiores a 5°), combinadas com valores baixos de fator-g favorecem a redução do teor de fluido do sólido residual, evidenciando que, para essa condição de vazão, o tempo de residência é o fator que mais influencia o deságue. Com o aumento da vazão até a condição da Equação 7, ainda é possível notar que inclinações superiores a 5° aliadas a baixos valores de fator-g favorecem o deságue. Na condição de vazão referente à Equação 8, nota-se que o efeito quadrático de inclinação é muito pequeno, por isso, pode-se pressupor que inclinações próximas à inclinação máxima (8°) favorecem o deságue, também se observa que baixos valores de fator-g (abaixo de 2,1) favorecem a redução do teor de fluido do sólido ao final da tela da peneira. A partir da simples análise dos modelos obtidos pela técnica da superfície de resposta, é possível observar que a condição que favorece a redução do teor de fluido no sólido residual é a condição de maior tempo de residência (inclinações maiores e menores valores de fator-g).

As condições ótimas poderiam ser obtidas facilmente a partir da obtenção dos pontos críticos das Equações 6, 7 e 8, porém a otimização da operação não é irrestrita, cabe ressaltar que, além de se determinar condições operacionais que minimizem o teor de umidade no sólido residual, é necessário que a condição de operação do equipamento maximize a vida útil da tela da peneira, e isto acontece quando a região de piscina ocupa $\frac{3}{4}$ do comprimento total da tela de separação, ou seja, 175,5 cm, no caso do equipamento estudado. Para cumprir com esse objetivo, um problema de otimização restrita foi proposto, conforme mostrado na Equação 12.

$$F_{obj}(I, Fg) = \left\{ \begin{array}{l} \min: U_i(I, Fg) \\ P_i(I, Fg) = 175,5 \pm 1 \\ 2^\circ \leq I \leq 8^\circ \\ 1 \leq Fg \leq 3,2 \end{array} \right\} \quad (12)$$

O valor ± 1 cm foi inserido no problema de otimização de forma fornecer uma certa folga para a restrição de posição.

De posse dos modelos de teor de umidade e posição da região de piscina, para cada condição de vazão, resolveu-se o problema de otimização descrito pela Equação 12 por meio do algoritmo da evolução diferencial (Yang, 2014) e os resultados dos parâmetros ótimos estão exibidos na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros ótimos de operação para o processo de deságue analisado.

Vazão (L/min)	Inclinação (°)	Fator-g (-)
72,19	7,9	1,13
108,28	7,3	1,34
139,53	8,0	1,34

Os valores de umidade do sólido residual e posição da região de fluido, obtidos a partir dos modelos de superfície de resposta, avaliados nas condições ótimas de operação da Tabela 6 são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Valores de teor de umidade e posição avaliados nas condições ótimas de operação.

Vazão (L/min)	Umidade (%)	Posição (cm)
72,29	14,3	175,5
108,3	18,2	175,5
139,5	18,8	174,7

Observa-se a partir dos dados da Tabela 4, que embora o problema de otimização seja restrito pela posição da região de piscina, os parâmetros operacionais obtidos a partir da otimização foram condizentes com a análise realizada a partir da observação dos parâmetros do modelo.

Cabe ressaltar novamente que, conforme os parâmetros ótimos obtidos sugerem, o melhor cenário de execução do processo de deságue em peneiras vibratórias é o que favorece o aumento do tempo de residência do material sobre a tela da peneira, ou seja, inclinações elevadas e valores baixos de fator-g. Porém, a suspensão utilizada no estudo era

bastante diluída, em contraposição aos fluidos de perfuração tipicamente empregados em processos reais associados à indústria de petróleo que são mais viscosos, fazendo-se necessária a utilização de valores de fator-g mais elevados para que o fluido atravessasse as aberturas da tela da peneira.

CONCLUSÃO

Com base no estudo desenvolvido neste trabalho, foi possível determinar um modelo que descreveu o comportamento do teor de umidade no sólido residual e para a posição da região de piscina, referentes ao processo de deságue em peneiras vibratórias.

Com base nos modelos obtidos (equações de regressão), foi possível a determinação das condições ótimas de operação de uma peneira vibratória, no tocante ao fator-g e à inclinação da tela da peneira.

Conforme o processo de otimização, as melhores condições de operação, independentemente da vazão de alimentação e desde que respeitada a capacidade de processamento da peneira, são aquelas que favorecem o aumento do tempo de residência do material sobre a tela da peneira.

Cabe ressaltar que os experimentos foram conduzidos com uma concentração de sólidos na alimentação constante e utilizando água como fluido, logo, as conclusões deste estudo podem ser extrapoladas apenas para operações de deságue que utilizem fluidos com propriedades semelhantes à da água e para concentração de sólidos na alimentação semelhante àquela utilizada neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela FAPEMIG e pela CNPq por meio das bolsas de pós-graduação concedidas e à PETROBRAS, por meio do Termo de Cooperação 0050.0118740.21.9.

NOMENCLATURA

- D : Diâmetro das partículas [μm]
- g : Aceleração da gravidade [m/s^2]
- m_{ss} : Massa de sólido seco [g]
- m_{su} : Massa de sólido úmido [g]

- P_i : Posição da região de piscina [cm]
 U_i : Teor de umidade [%]
 x_1 : Variável codificada para inclinação [-]
 x_2 : Variável codificada para o fator-g [-]
 X : Fração de sólidos com diâmetro igual ou menor que D [-]

REFERÊNCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS (1999), Shale Shakers and Drilling Fluids Systems: Techniques and Technology for Improving Solids Control Management. Gulf Publishing Company.
- BOX, G. E. P., HUNTER, J. S., HUNTER, W. G. (2005), Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery. 2 ed, Wiley-Interscience.
- LENTH, R. V. (2009), Response-Surface Methods in R: Using RSM. Journal of Statistical Software, v.32, n.7, p. 1–17.
- NASCENTES, C. L. (2019), Separação Sólido-Fluido de Perfuração em Peneiras Vibratórias. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG, 153p. (tese de doutorado).
- SCOTT, E. L., VARCO, N. O. (2006), Automatic Shaker Control. In: IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- THOMAS, J. E. (2004), Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2 ed., Editora Interciência.
- TILTON, J. N. (2008), Fluid and Particle Dynamics. Seção 6. Em: PERRY, R. H.; GREEN, D. W. (Ed.). Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8 ed., McGraw-Hill.
- WHITE, C. E. (2000), Statistical Analyses Supporting Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for Synthetic-Based Drilling Fluids and Other Non-Aqueous Drilling Fluids in the Oil and Gas Extraction Point Source Category. United States Environmental Protection Agency, Office of Water.
- YANG, X. -S. (2014), Nature-Inspired Optimization Algorithms. Elsevier.