



## **INFLUÊNCIA DO CONTEÚDO DE UMIDADE NAS PROPRIEDADES DE FLUIDIZAÇÃO E DESAERAÇÃO DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO**

HEITOR O. N. ALTINO<sup>1,\*</sup>, GIOVANI A. LOURENÇO<sup>2</sup>, CLÁUDIO R. DUARTE<sup>1</sup>, CARLOS H. ATAÍDE<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Faculdade de Engenharia Química

<sup>2</sup>Instituto Federal de Goiás

\*e-mail: heitor.engquimica@gmail.com, †*in memoriam*

**RESUMO** – A influência do conteúdo de umidade nas propriedades de fluidização e desaeração de cascalhos de perfuração foi examinada no presente estudo. Cascalhos de perfuração com dez diferentes conteúdos de umidade (1,4-44,0% em peso) foram estudados quanto à suas características de fluidização e comportamento de desaeração. Foi demonstrado que o aumento do conteúdo de umidade até 15,2% propiciou o desenvolvimento de estruturas interparticulares mais aeradas, que eram menos resistentes a percolação de ar. Essas estruturas, no entanto, eram mais estáveis e apresentavam maiores dificuldades na fluidização e retenção do ar. Além de 15,2% de umidade, estruturas de interparticulares mais densas e resistentes a percolação de ar foram formadas. O material podia reter mais ar, sendo relativamente mais fácil de fluidizar. Adicionalmente, foi possível estabelecer uma classificação dos diferentes comportamentos dos cascalhos de perfuração de acordo com a umidade.

### **INTRODUÇÃO**

Com uma expectativa de produção global de 17 milhões de barris de óleo equivalente por dia até 2025, a produção de petróleo e gás desempenha um papel importante no suprimento da demanda mundial de energia. Nesse cenário, prevê-se que a produção *offshore* represente cerca de 5 milhões de barris de óleo equivalente, ou 29% de toda a produção (Enscorowan, 2019). Para a obtenção de petróleo e gás, os poços *offshore* são perfurados por meio de uma broca rotativa, ligada a uma sonda *offshore* por meio de um tubo oco, que é girado por meio de um motor elétrico ou hidráulico. Nesse processo, um fluido de perfuração é injetado no interior do tubo oco e retornado à plataforma através da região anular. Tal fluido tem a função de manter a pressão, lubrificar e reduzir a temperatura da broca. O movimento de rotação da broca tritura as formações rochosas, gerando pequenas partículas de rocha,

denominadas cascalhos de perfuração, que ficam suspensas no fluido e retornam à sonda junto com ele. Os cascalhos são separados por um sistema de controle de sólidos na sonda, e o fluido de perfuração retorna ao processo de perfuração. Dependendo da legislação local, os cascalhos separados podem ser descartados de diferentes maneiras: reinjeção em poços *offshore*, tratamento e descarte *onshore* e descarte em ambientes marinhos após tratamento adequado. Para realizar o descarte, os cascalhos devem ser transportados desde a plataforma de perfuração até a embarcação de transporte. Para isso, os métodos convencionais, como *skip-and-ship*, esteiras transportadoras e roscas transportadoras, estão dando lugar a métodos mais eficientes, como o transporte pneumático (IOGP, 2016).

Um dos principais desafios para o manejo de cascalhos de perfuração, principalmente no transporte pneumático, é a natural inconsistência do material. Nesse sentido, a umidade do material é uma das variáveis mais críticas, sendo constituída por

uma mistura de óleo e água. Algumas patentes descrevem que os cascalhos são manejados e transportados, tanto como pastas coesivas de alto conteúdo de umidade, quanto como sólidos secos granulares (Burnett *et al.*, 2006, 2007; Crabb *et al.*, 2007). Tais umidades são dependentes de diversos fatores, mas principalmente de qual etapa do sistema de controle de sólidos os cascalhos são originários (IOGP, 2016; Seaton; Morris, 2005). Por exemplo, as patentes citadas descrevem que os cascalhos provenientes de peneiras vibratórias são muito coesivos, com umidades variando de 10 a 20% em peso. Já cascalhos de perfuração provindos do fundo de secadores Vortex são geralmente sólidos de boa escoabilidade, com 5% de umidade (Burnett *et al.*, 2006, 2007; Crabb *et al.*, 2007). Deste modo, o comportamento de alimentação, descarga e transporte dos cascalhos varia muito conforme o conteúdo de umidade do material. Por exemplo, cascalhos saídos de agitadores de peneiras tendem a serem transportados em fase densa fluidizada. Por outro lado, cascalhos provindos de secadores Vortex, geralmente, tendem a serem transportados em fase diluída. Assim, se as condições operacionais e configurações do sistema não forem alteradas para atender essas mudanças de comportamento, o entupimento de bocais de descarga de silos, vasos de pressão e tubulações de transporte pode ocorrer. Em casos mais extremos, esses problemas de entupimento podem levar à paralisação de todo o processo de perfuração, uma vez que o descarte dos cascalhos não pode ser realizado (IOGP, 2016; Seaton; Morris, 2005).

Para reduzir as possibilidades de entupimentos e auxiliar no manejo do material, algumas patentes descrevem que auxiliares de descarga são frequentemente colocados na lateral tronco-cônica de silos e vasos de pressão (Burnett *et al.*, 2006, 2007; Crabb *et al.*, 2007). Nesses dispositivos, ar comprimido é injetado na lateral tronco-cônica de modo a fluidizar o material, aumentando sua aeração e facilitando sua descarga. Injetores de ar comprimido também são colocados em curvas e tubulações de transporte pneumático para prevenir entupimentos. Nesse caso, esses dispositivos buscam aumentar o grau de

aeração do material, bem como manter a pressão na linha de transporte e separar plugues (Burnett *et al.*, 2006, 2007; Crabb *et al.*, 2007).

Contudo, para o dimensionamento e correta operação de sistemas de transporte pneumático com esses dispositivos, é necessário se conhecer as propriedades de fluidização e retenção de ar (desaeração) do material. Destaca-se ainda, que a forma como o material é pneumáticamente transportado nas tubulações, em parte, também é ditada por essas propriedades. Assim, o conhecimento destas é importante não só para se projetar auxiliares de descarga e injetores de linha, mas também para se determinar o regime mais adequado de transporte do material (Mills, 2004).

Para mensurar como as propriedades de fluidização e desaeração do material são afetadas pelo *MC*, vários parâmetros podem ser usados. A velocidade mínima de fluidização indica qual a velocidade do ar necessária para iniciar a fluidização do leito. Após a fluidização, a capacidade de um material manter um estado aerado durante certo período de tempo pode ser representada pelo tempo de desaeração (Abrahamsen; Geldart, 1980; Mills, 2004; Sanchez *et al.*, 2003).

Estudos abordando a influência do *MC* nas propriedades de fluidização e desaeração de cascalhos de perfuração ainda são escassos na literatura. Malagalage (2018) estudou a influência do conteúdo de umidade no comportamento de fluidização de areias, representando cascalhos de perfuração. O autor concluiu que pequenas quantidades de fluido adicional (1%) foram suficientes para aumentar a velocidade mínima de fluidização. Incrementos adicionais do conteúdo de umidade levaram a alterações insignificantes nesses parâmetros até 6%. Após este valor, um estado saturado foi alcançado onde a velocidade mínima de fluidização foi reduzida. Entretanto, no estudo citado, uma pequena faixa de umidade foi analisada, não contemplando todos os intervalos reportados em patentes descritivas do processo, o que pode limitar a aplicabilidade dos resultados (Burnett *et al.*, 2006, 2007; Crabb *et al.*, 2007). Além disso, as propriedades de desaeração dos

cascalhos de perfuração ainda não foram descritas na literatura, o que impede que se tenha uma completa compreensão de como o conteúdo de umidade propriamente influencia as propriedades de fluidização e desaeração dos cascalhos, e as faixas de *MC* nas quais as mudanças de comportamento podem ocorrer. Assim, uma análise aprofundada e comparativa de como o conteúdo de umidade influencia as propriedades de fluidização e desaeração de cascalhos de perfuração se faz necessária. Esta análise pode ajudar a elucidar os diferentes efeitos da umidade no comportamento de cascalhos relatados em patentes. Além disso, do ponto de vista prático, esta análise pode contribuir para o aprimoramento das operações de manejo de cascalhos de perfuração.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar a influência do conteúdo de umidade nas características de fluidização e desaeração de cascalhos de perfuração. Para isso, estudou-se a influência de dez conteúdos distintos de umidade dos cascalhos de perfuração, no comportamento de fluidização, velocidade mínima de fluidização, comportamento e tempo de desaeração. Além disso, um modelo para estimativa do tempo de desaeração de materiais com alto conteúdo de umidade foi proposto, o que reforça a novidade deste trabalho. Por fim, a análise desses parâmetros permitiu estabelecer uma classificação dos diferentes comportamentos dos cascalhos de acordo com o conteúdo de umidade.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Cascalhos de Perfuração de Poços de Petróleo e Gás

Os cascalhos de perfuração foram fornecidos por Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras®). O material foi amostrado a partir da perfuração de rochas carbonatadas na Bacia de Campos, Campos, Rio de Janeiro, Brasil. O processo de perfuração foi realizado utilizando um fluido de perfuração polimérico à base de água com goma xantana e amido modificado. A Tabela 1 e Figura 1 mostram detalhes das características do material seco.

Tabela 1: Características dos cascalhos secos.

|                                      |                                       |              |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| Classificação de Geldart             | B                                     |              |
| Esfericidade                         | 0,77 ± 0,01                           |              |
| Densidade Real (g.cm <sup>-3</sup> ) | 2,6990 ± 0,0061                       |              |
| Porosidade de Partícula              | 0,0355                                |              |
| Composição                           | C <sub>w</sub> (% g,g <sup>-1</sup> ) | 0,45 ± 0,08  |
|                                      | C <sub>o</sub> (% g,g <sup>-1</sup> ) | 0,86 ± 0,22  |
|                                      | C <sub>s</sub> (% g,g <sup>-1</sup> ) | 98,70 ± 0,24 |
| Modelo RRB                           | x <sub>0</sub> (μm)                   | 615,96       |
|                                      | n                                     | 1,09         |
|                                      | R <sup>2</sup>                        | 0,9954       |
|                                      | RMSE                                  | 0,0260       |
| Principais Óxidos (%)                | CaO                                   | 65,41 ± 0,16 |
|                                      | SiO <sub>2</sub>                      | 12,65 ± 0,62 |
|                                      | MgO                                   | 6,65 ± 0,87  |
|                                      | BaO                                   | 6,15 ± 1,13  |

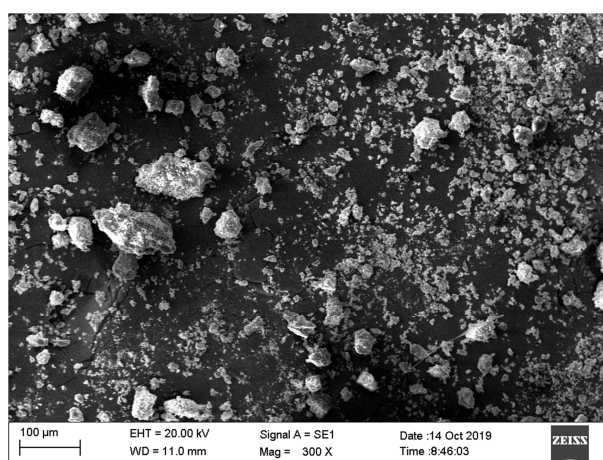


Figura 1: Imagem de MEV do cascalho seco.

### Conteúdos de Óleo, Água e Sólidos

Os conteúdos de óleo, água e sólidos dos cascalhos de perfuração foram determinados pelo teste de retorta em duplicata, utilizando o método gravimétrico, permitindo a determinação dos conteúdos de óleo (*C<sub>o</sub>*), água (*C<sub>w</sub>*) e sólidos (*C<sub>s</sub>*) (American Petroleum Institute, 2012).

### Caracterização do Cascalho de Perfuração Seco

Distribuição de Tamanho de Partículas: a distribuição do tamanho das partículas dos cascalhos de perfuração foi determinada em triplicata pelo método de peneiramento, com base nos procedimentos descritos por ASTM (2015) e RETSCH (2015). Para descrever a distribuição granulométrica, o modelo Rosin, Rammler e Bennet (RRB), especificado pela Equação (1), foi ajustado aos dados

experimentais (Macías-García; Cuerda-Correa; Díaz-Díez, 2004).

$$Y(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n} \quad (1)$$

em que  $Y(x)$  é a fração cumulativa em peso de material com partículas menores que o tamanho  $x$ ,  $x$  é o tamanho de partícula ( $\mu\text{m}$ ),  $n$  é a constante de uniformidade e  $x_0$  é o tamanho ( $\mu\text{m}$ ) o qual 63,2% das partículas são menores.

Espectrometria de Fluorescência de Raios X: uma análise semi-quantitativa dos principais óxidos presentes nos cascalhos secos foi realizada através da técnica de espectroscopia de fluorescência de raios X utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X (Bruker<sup>®</sup>, S8 Tiger).

Densidade aparente e real: densidade aparente ( $\rho_a$ ) foi estimada com base na massa e volume das partículas, utilizando a técnica de picnometria líquida. Já a densidade real ( $\rho_r$ ) dos cascalhos de perfuração foi determinada em triplicata utilizando um picnômetro de gás (He) (Micromeritics<sup>®</sup>, Accupyc 1330). O estabelecimento das densidades aparente e real permite estimar a porosidade das partículas ( $\varepsilon_p$ ) pela seguinte equação:

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (2)$$

Esfericidade: a esfericidade ( $\varphi$ ) de quinhentas partículas foi determinada pela técnica de análise de imagem utilizando um microscópio óptico (Nikon<sup>®</sup>, Eclipse E-200). O *software* Image-Pro Plus<sup>®</sup> 6.0 foi utilizado no estabelecimento da área ( $A$ ) e perímetro ( $P$ ) das partículas. A esfericidade foi calculada pela equação:

$$\varphi = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3)$$

Microscopia eletrônica de varredura (MEV): a caracterização foi realizada utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com um microscópio (Zeiss<sup>®</sup>, EVO MA10) na ampliação de 300x.

## Procedimento de Umidificação do Material

Neste trabalho, o conteúdo de umidade ( $MC$ ) é referido como a soma dos conteúdos de água e óleo, conforme a Equação (4).

$$MC(\% \text{ g.g}^{-1}) = \frac{m_w + m_o}{m_w + m_o + m_s} 100 \quad (4)$$

em que  $m_w$  é a massa de água (g),  $m_o$  é a massa de óleo (g) e  $m_s$  é a massa de sólido (g).

O nível de saturação ( $S$ ) pode ser definido como a fração do volume interparticular de um leito empacotado que é preenchido por um líquido e foi calculado pela equação:

$$S(\% \text{ mL.ML}^{-1}) = \frac{V_l}{V_t - V_s} 100 \quad (5)$$

em que  $V_l$  é o volume total de líquido (água + olefina) no leito,  $V_t$  é o volume total do leito seco e  $V_s$  é o volume ocupado pelo sólido (baseado na densidade real).

Para avaliar a influência do conteúdo de umidade dos cascalhos de perfuração nas propriedades *bulk* de leitos fixos e escoabilidade o material foi umidificado pela adição de água para atingir dez  $MC$ s diferentes: 1,3%, 5,4%, 7,7%, 10,0%, 12,5%, 15,2%, 21,0%, 27,6%, 35,2% e 44,0%. Esses conteúdos de umidade correspondem, respectivamente, aos níveis de saturação de: 5,4%, 18,9%, 25,7%, 32,5%, 39,2%, 46,0%, 59,5%, 73,0%, 86,5% e 100,0%. Que abrange os três estados característicos de pós úmidos: pendular (0% a 25%), funicular (25% a 80-90%) e capilar (80-90% a 100%) (Althaus; Windhab, 2012).

O procedimento de umidificação consistiu em adicionar a quantidade necessária de material em um saco do tipo *zip-lock*. Em seguida, foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir o  $MC$  desejado. O saco foi selado e o processo de mistura manual foi realizado por mais de 10 min. O saco permaneceu fechado por pelo menos 1 h, para a completa homogeneização da mistura, antes de se utilizar o material.

## Fluidização e Desaeração

Os experimentos de fluidização e desaeração foram realizados em triplicata no sistema experimental mostrado na Figura 2. O ar fornecido pelo compressor radial (1) era conduzido através do tubo principal (2) até a válvula solenoide principal (4), que controlava a passagem ou não de ar pela tubulação. Ao fechar esta válvula (4) o ar poderia, alternativamente, ir para uma válvula solenoide de *by-pass* (3), que controlava a passagem ou não de ar para o ambiente atmosférico. Após passar pela válvula solenoide principal (4), o ar era conduzido através de tubulações para um retificador de fluxo de ar (5) e, em seguida, para uma placa de orifício (6). A velocidade do ar foi estimada indiretamente pela diferença de pressão gerada na placa de orifício (6), que foi lida por um transdutor de pressão diferencial (7-c). A velocidade do ar foi controlada por um dispositivo de multifuncional I/O (7-a), associado a um inversor de frequência (WEG®, CFW500), que foi conectado ao

compressor radial (1). Em seguida, o ar era conduzido por tubulações para outro retificador de fluxo de ar (8) e para uma placa sinterizada de bronze (11), que auxiliava na distribuição do ar no leito fluidizado (13). É importante destacar que os flanges do tubo do leito de fluidização foram vedados por *o-rings*, de modo a evitar vazamentos do leito em altos MCs. Em seguida, o ar passava pelo leito fluidizado, e as partículas elutriadas eram conduzidas através de uma mangueira de borracha flexível (14) até um ciclone (15) para a separação da mistura. A queda de pressão do leito foi medida antes da placa sinterizada (9) e após o leito (12) por um sensor de pressão diferencial (7-d para baixas pressões e 7-b para altas pressões). A temperatura e a umidade do ar foram medidas por um sensor (10) antes da placa de sinterizada. Os sinais dos sensores foram processados por um dispositivo multifuncional I/O (7-a), encaminhados para um computador (DELL®, Inspiron 14, P74G) e apresentados e registrados por meio de um *software* supervisor (National Instruments®, LabView®, NI-DAQmx 19,6).

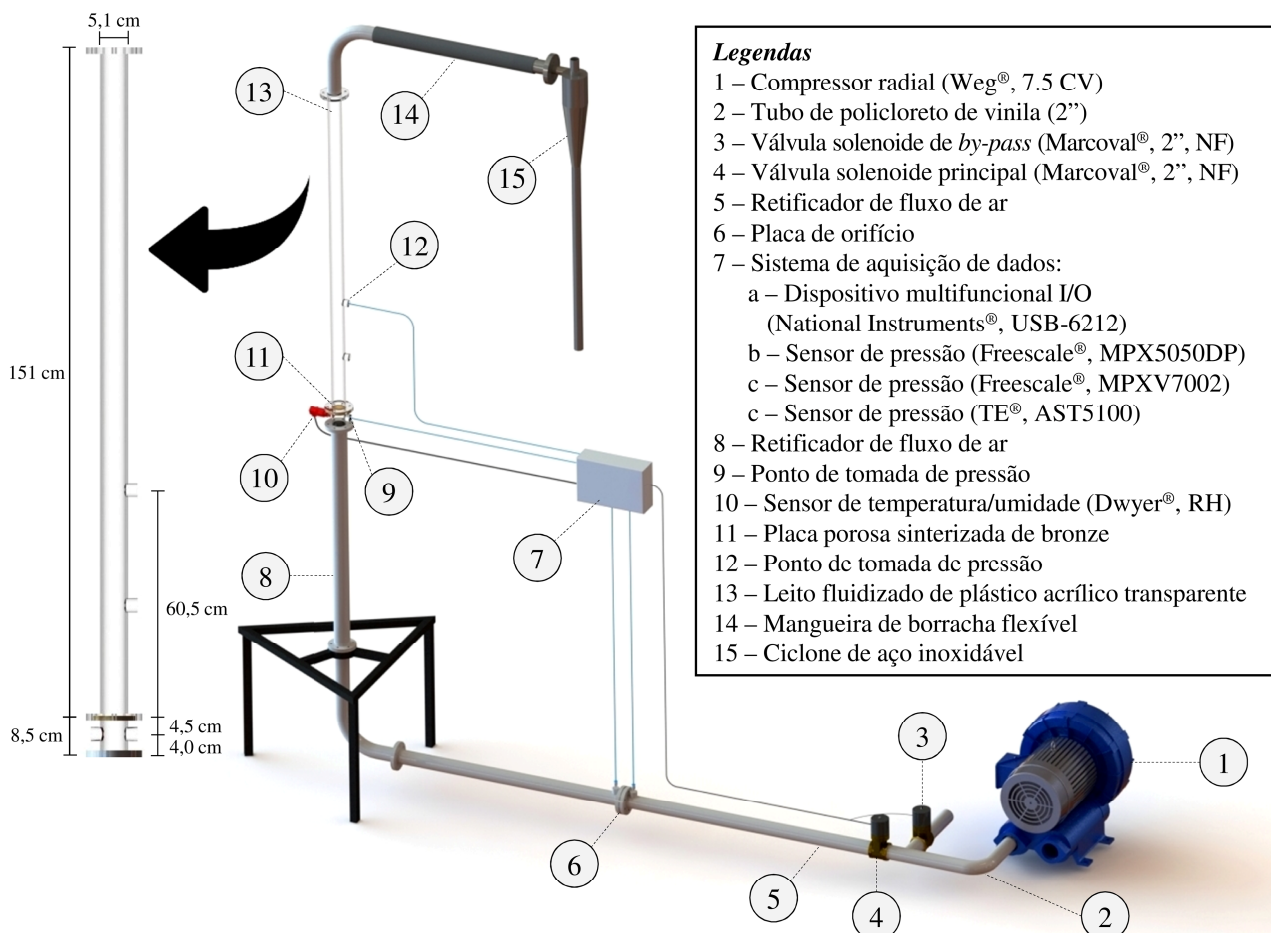


Figura 2: Sistema experimental para fluidização e desaeração de cascalhos de perfuração.

O procedimento dos experimentos de desaeração consistiu, inicialmente, na pesagem de 200 g de material em balança digital (Marte<sup>®</sup>, UX6200H). Em seguida, o material foi despejado em quantidades constantes no leito fluidizado (13) com auxílio de um funil, de uma altura fixa. O leito foi totalmente fluidizado por 5 s e, em seguida, a velocidade do ar foi reduzida a zero, permitindo que o leito se compactasse lentamente. Este procedimento foi adotado para reduzir a influência do método de empacotamento. A altura do leito foi medida por uma fita métrica fixada no leito fluidizado. O material foi então totalmente fluidizado e quando a queda de pressão se estabilizou, a válvula solenoide principal (4) foi rapidamente fechada e a válvula solenoide de *by-pass* (3) foi aberta, direcionando o ar para o ambiente atmosférico. A queda de pressão através do leito empacotado foi registrada ao longo do tempo até a estabilização (30 s). A cada 0,02 s o sistema registrava a média de 1000 dados. Para descontar a contribuição da queda de pressão da placa sinterizada, experimentos em branco foram realizados em triplicata antes e depois de cada réplica, utilizando as mesmas condições. Após cada réplica, todo o leito (13) foi limpo e a placa sinterizada foi submetida à limpeza ultrassônica (Retsch<sup>®</sup>, UR2) por 30 min e posteriormente seca em estufa (Quimis<sup>®</sup>, Q314M252) a 105°C por 12 h.

O tempo de desaeração ( $t_{da}$ ) foi usado para quantificar a capacidade de desaeração do material. Neste trabalho, observou-se por meio de pré-testes que o modelo proposto por Chambers *et al.* (1998) (Equação (6)) se ajustou bem aos dados experimentais, sendo selecionado para a estimativa de  $t_{da}$ . No entanto, para *MCs* altos: 27,6%, 35,2% e 44,0%, esse modelo não se ajustou tão bem aos dados. Para estes *MCs*, as curvas de queda de pressão apresentaram dois períodos distintos (Figura 7 (c)). Assim, um modelo de decaimento exponencial duplo é proposto neste trabalho para prever a queda de pressão dos dois períodos distintos. O modelo é representado pela Equação (7), e foi utilizado para estimar os tempos de desaeração para os *MCs* citados.

$$\frac{\Delta P}{\Delta L_0} \sim \exp\left(\frac{-t}{t_{da}}\right) \quad (6)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta L_0} \sim \exp\left(\frac{-t}{t_{da1}}\right) + \exp\left(\frac{-t}{t_{da2}}\right) \quad (7)$$

em que  $\Delta P$  é a queda de pressão,  $\Delta L_0$  é a altura inicial do leito,  $t$  é o tempo,  $t_{da}$  é o tempo de desaeração,  $t_{da1}$  é o tempo de desaeração do período de decaimento rápido e  $t_{da2}$  é o tempo de desaeração do período de decaimento lento.

Após realizar os experimentos de desaeração, o mesmo material empacotado foi usado para realizar os experimentos de fluidização. A velocidade do ar foi aumentada gradativamente alterando-se a velocidade de rotação do compressor radial em passos de 50 RPM ou 100 RPM, até a fluidização total do material, e depois reduzida gradativamente nos mesmos passos até zero. Em cada passo, foram registradas as médias de 100.000 dados de velocidade do ar, queda de pressão do leito, altura do leito e umidade e temperatura do ar. Destaca-se que as perdas de umidade induzidas pela secagem não foram superiores a  $4,0 \pm 1,7\%$ . Os experimentos foram realizados em temperatura e umidade do ar de  $26,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$  e  $42,9 \pm 0,7\%$ . Assim, com os experimentos realizados, foi possível obter as curvas de fluidização e determinar as velocidades mínimas de fluidização ( $U_{mf}$ ).

A velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) foi determinada analisando a velocidade superficial do gás na qual o desvio padrão das flutuações de pressão atingiu um máximo na desfluidização do material (Grace *et al.* 1997).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Características do Cascalho de Perfuração Seco

A Tabela 1 mostra que o material seco apresentava baixos conteúdos de água e óleo, sendo adequado para ser umidificado.

De acordo com Ishizaki *et al.* (1998), materiais porosos possuem porosidades de partículas ( $\varepsilon_p$ ) que variam entre 0,2 e 0,95. Assim, o valor de  $\varepsilon_p$  observado na Tabela 1 indica que os cascalhos de perfuração

estudados podem ser classificados como um material não poroso.

Quanto a composição, os resultados da análise de FRX mostram a presença principal de CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO e BaO, em ordem decrescente de quantidade. Tal resultado é consistente com a informação que os cascalhos de perfuração analisados eram provenientes da perfuração de rochas carbonatadas.

### Comportamento de Fluidização

A influência da umidade no comportamento de fluidização dos cascalhos de perfuração é mostrada na Figura 3. Um esquema, mostrado na Figura 4, foi criado para melhor elucidação dos fenômenos. Os limites de umidade, estados e sub-estados ilustrados na Figura 4 foram estabelecidos neste trabalho com base em comportamentos semelhantes das partículas durante a fluidização e desaeração. Nessa figura, as setas representam as correntes de ar que percolam o leito. As curvas da Figura 3 foram separadas seguindo os estados ilustrados na Figura 4: estado seco (Figura 3 (a)), estado agregado/desagregado (Figura 3 (b)) e estado de lama (Figura 3 (c)). Os símbolos preenchidos representam a fluidização do material (FD), enquanto os símbolos parcialmente preenchidos a desfluidização (DFD).

Para os cascalhos no estado seco, o nível de saturação era de um estado pendular, onde as forças interparticulares geralmente são

fracas (Althaus; Windhab, 2012). Assim, as partículas se encontram mais dispersas, como ilustrado no estado (1) da Figura 4. Experimentalmente, foi possível observar um comportamento semelhante ao dos materiais do grupo B da classificação de Geldart, com formação de bolhas durante fluidização (GELDART, 1973). As curvas de fluidização (Figura 3 (a)) mostram que a fluidização plena é atingida sem haver sobrepressões durante o processo. Isso pode ser devido à grande faixa de tamanho de partículas demonstrada pelo material, tendo finos menores que 19 µm até partículas maiores que 3350 µm. De acordo Richardson e Coulson (2020), partículas pequenas tendem a fluidizar em velocidades mais baixas do que as maiores devido à maior área superficial das partículas por unidade de volume do leito. Este fenômeno foi visualmente constatado durante os experimentos.

A linha tracejada em cinza na Figura 3 (a) representa a queda de pressão média esperada nas condições mínimas de fluidização, calculada pela Equação (8) (Levenspiel, 2014).

$$\Delta P = L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (|\rho_s - \rho_g|) \quad (8)$$

em que  $L_{mf}$  é a altura do leito na condição de mínima fluidização,  $\varepsilon_{mf}$  é a porosidade na condição de mínima fluidização,  $\rho_s$  é a densidade do sólido e  $\rho_g$  é a densidade do gás.

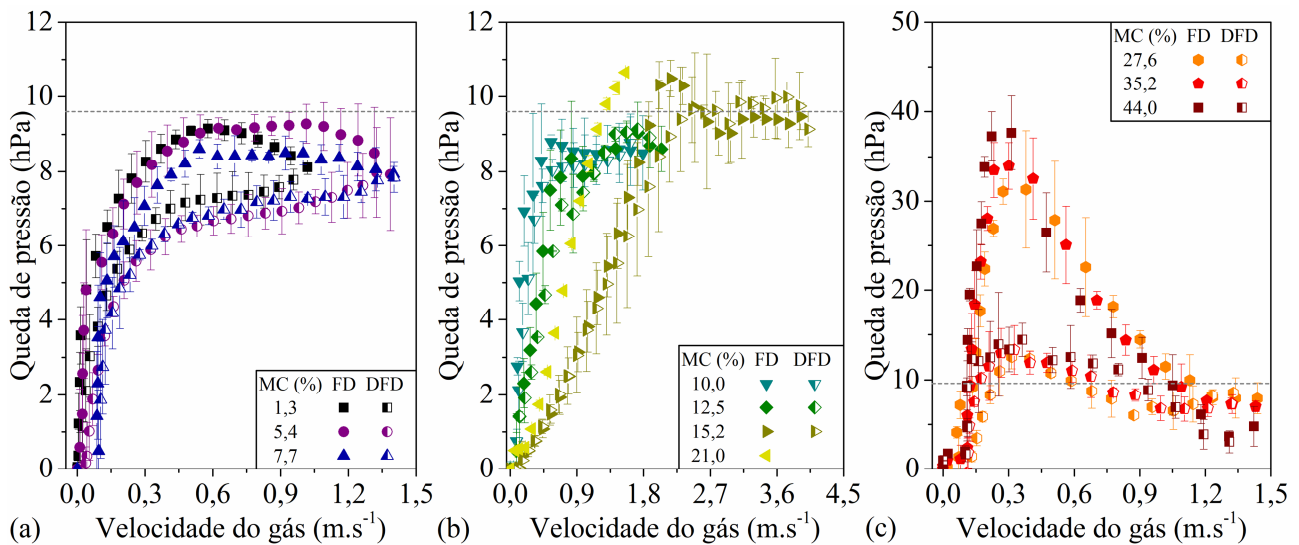


Figura 3: Curvas de fluidização dos cascalhos agrupadas por estados: seco (a), agregado/desagregado (b) e lama (c)

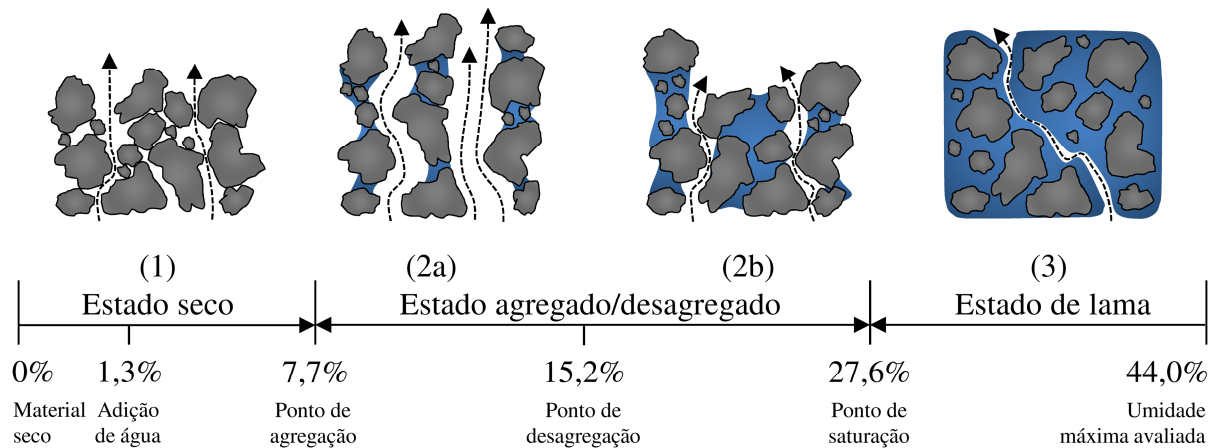


Figura 4: Esquema de classificação do comportamento de cascalhos de acordo a umidade

Uma boa concordância entre as quedas de pressão previstas e observadas pôde ser constatada. Por outro lado, a curva de desfluidização mostra que ocorreu uma redução gradual e de valores muito mais baixos de quedas de pressão com a redução da velocidade do gás, formando uma grande histerese. Este fenômeno é entendido como sendo devido à elutriação de finos ( $<75 \mu\text{m}$ ), os quais representavam de 13,0 a 20,1% das partículas no estado seco (Coulson; Richardson, 2002). Assim, acredita-se que a elutriação de uma parcela dessas partículas pequenas acabou reduzindo o peso do leito e, conseqüentemente, a queda de pressão na condição de fluidização plena.

No estado agregado/desagregado, percebe-se que o comportamento de fluidização das partículas se assemelhou ao dos materiais do grupo C da classificação de Geldart (Geldart, 1973). Grandes dificuldades para fluidização de forma suave foram observadas, assim como a formação de canais preferenciais e o leito empacotado inteiro subindo como um plugue. Em geral, a fluidização ocorreu de forma abrupta, o que pode ser constatado como o aparecimento de sobrepressão logo antes da condição da fluidização plena (Figura 3 (b)). A natureza instável deste tipo de fluidização também se refletiu no aumento dos intervalos de confiança nas curvas de fluidização. Apesar disto, foi encontrada uma boa concordância com a queda de pressão esperada (linha cinza tracejada). Destaca-se também a redução da histerese anteriormente observada, o que pode ser creditado à redução da quantidade de finos ( $<75 \mu\text{m}$ ), para apenas 3,0-7,9%. Sendo que tal

redução pode ser atribuída a agregação das partículas pequenas em clusters de partículas maiores (Kristensen, 1995). Nesse estado o nível de saturação era de um estado funicular, onde o aumento das forças interparticulares induzidas pela umidade geralmente é atribuído ao fortalecimento das forças de ponte líquida. O incremento de tais forças acaba por reduzir a mobilidade das partículas, formando uma rede interparticular mais estável e aerada, como ilustrado no estado (2) da Figura 4, implicando em uma maior dificuldade de expansão e fluidização do leito (Jain *et al.* 2004; Wright Raper, 1998). Assim, grande parte do gás pode ter passado através do leito por canais preferenciais ou o gás não passava adequadamente pelo leito, promovendo um movimento pistonado (Coulson; Richardson, 2002). Este fenômeno teve um ponto crítico no *MC* de 21,0%, onde as forças interparticulares eram fortes o suficiente para manter o leito fixo e mesmo em altas velocidades do gás a fluidização não ocorria.

Aumentos adicionais do *MC* levaram o material para o estado de lama (3). Observou-se o desaparecimento dos canais preferenciais e a presença de bolhas novamente. Embora a classificação de Geldart não tenha sido projetada para materiais com *MC* tão alto, o comportamento geral observado pode ser considerado semelhante ao dos materiais do grupo B (Geldart, 1973). No estado de lama, acredita-se que a quantidade de líquido era suficiente para reduzir as forças interparticulares e promover o espaçamento entre as partículas, como ilustrado no estado (3) da Figura 4. Como resultado, a mobilidade das partículas era aumentada em relação ao



estado anterior, permitindo assim que o ar passasse pelo leito compactado na forma de bolhas. As curvas de fluidização (Figura 3 (c)) mostram que a queda de pressão inicialmente aumentava abruptamente com a velocidade, gerando altas quedas de pressão antes que ocorresse a fluidização. Este fenômeno pode ser atribuído ao alto nível de saturação do material nessa condição, sendo equivalente a um estado capilar. À medida que o líquido satura os espaços vazios, os caminhos interparticulares preenchidos com ar através dos quais o gás podia percolar mais facilmente eram reduzidos (Figura 4 (3)) (Wright; Raper, 1998). Assim, antes do início da fluidização o leito permanecia estático, com quase nenhuma passagem visual de ar através dele, o que gerava altas quedas de pressão. À medida que a velocidade do gás se aproximava da velocidade mínima de fluidização, as forças de arrasto que atuavam no leito começavam a neutralizar a força peso das partículas, iniciando o processo de fluidização. À medida que a fluidização ocorria, o leito ficava mais aerado por borbulhamento e, conseqüentemente, a queda de pressão diminuía fortemente e se estabiliza em valores próximos aos previstos pela Equação (8) (linha cinza tracejada). No processo de desfluidização, o leito já está em um estado mais aerado/expandido. Assim, baixas sobrepressões eram observadas com a redução da velocidade do gás. As grandes histereses e intervalos de confiança observados na Figura 3 (c) também podem ser creditados ao espalhamento da mistura enlameada nas paredes do tubo, que fluía lentamente de volta para o leito. Deste modo, o peso efetivo do leito era alterado ao longo do processo de fluidização.

O efeito do *MC* dos cascalhos na velocidade mínima de fluidização é apresentado na Figura 5. Aumentando o *MC* nos estados (1) e (2a), a velocidade mínima de fluidização dos leitos atingiu valores maiores. Este fenômeno também foi observado por diversos autores analisando materiais não porosos (Jain *et al.* 2004; Wright; Raper 1998; Wright; Raper 1998). Tais autores teorizam que as forças de ponte líquida parecem proporcionar a formação de leitos mais aerados e estáveis, como ilustrado no estado

(2a) da Figura 4. Assim, velocidades de gás maiores são necessárias para dar a mesma velocidade intersticial e, portanto, o arrasto adequado para promover a fluidização. Para verificar essa tendência, a porosidade *bulk* relativa aos espaços interparticulares preenchidos com ar do leito empacotado, antes do início da fluidização, foi estimada. Os resultados são mostrados na Figura 6 e corroboram a afirmação de que o aumento de umidade promove a formação de estruturas empacotadas mais aeradas no estado (1) e (2a).

Por outro lado, aumentos adicionais do *MC* nos estados (2b) e (3) (Figura 5) resultaram na redução da velocidade mínima de fluidização. De acordo com Wright *et al.* (1998), para uma mesma velocidade superficial do gás, à medida que o líquido preenche os vazios interparticulares, a porosidade efetiva diminui, conforme observado na Figura 6, e as forças de arrasto do fluido aumentam proporcionalmente. Ao mesmo tempo, nos estados (2b) e (3), acredita-se que os leitos sejam menos estáveis, devido ao enfraquecimento das forças de ponte líquida. Assim, a corroboração entre esses fenômenos pode refletir em menores velocidades mínimas de fluidização.

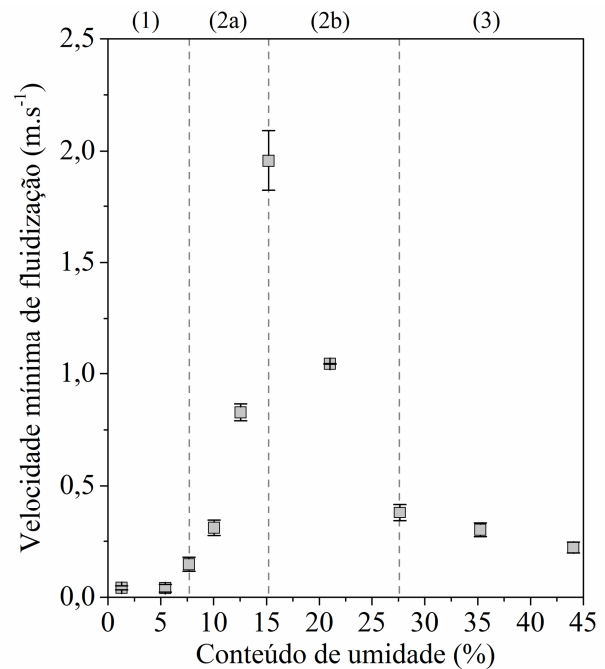


Figura 5: Efeito da umidade na velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) de cascalhos.

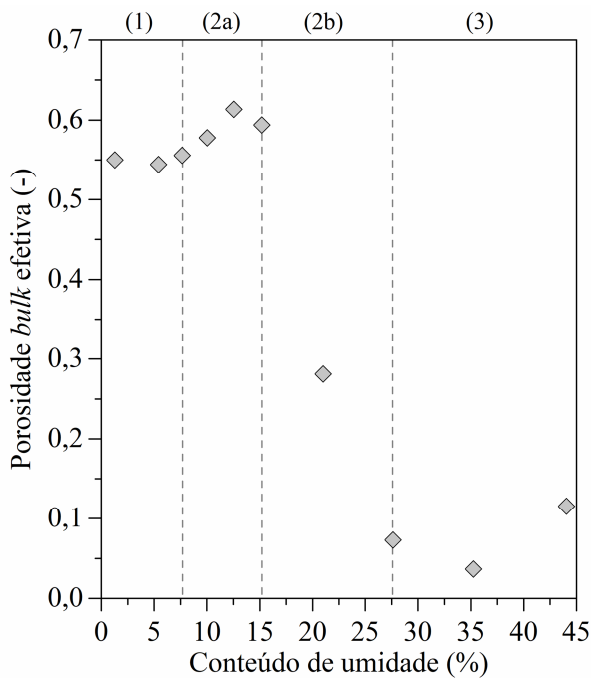


Figura 6: Efeito da umidade na porosidade *bulk* do leito não fluidizado de cascalhos.

### Capacidade de Desaeração

A Figura 7 exhibe a influência do *MC* nas curvas de desaeração dos cascalhos de perfuração. Os altos valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) evidenciam o bom ajuste das Equações (6) e (7) aos dados. As constantes de tempo de desaeração obtidas pelo ajuste dessas equações são mostradas na Figura 8. No processo de desaeração, à medida que o ar fornecido é desligado, os espaços vazios entre as partículas são reduzidos e as partículas se repousam umas sobre as outras. Neste ponto, o sólido *bulk* se comporta como

um filtro e suas propriedades interparticulares irão determinar a facilidade com que o ar irá escapar (Kennedy, 1998).

Para cascalhos de perfuração com *MC* nos estados (1) e (2), o aumento do *MC* resultou em decaimentos de queda de pressão mais rápidos ao longo do tempo (Figura 7 (a) e (b)) e, conseqüentemente, menores tempos de desaeração (Figura 8). Este comportamento é consistente com o padrão de porosidade observado na Figura 6 para esses estados. Como citado anteriormente, o incremento do *MC* parece reduzir a mobilidade das partículas, o que pode ter gerado leitos mais aerados (maiores porosidades), que oferecem menor resistência ao escape de ar, como ilustrado no estado (2) da Figura 4. Visualmente, observou-se que para os cascalhos no estado (1) o ar escapava principalmente na forma de bolhas, e a altura do leito se reduzia continuamente, sendo este um comportamento típico de materiais do grupo B de Geldart. Já para materiais no estado (2), o ar escapava por canais preferenciais, jorrando partículas, o que também pode ter contribuído para a desaeração mais rápida observada. Essas características são geralmente evidenciadas em materiais do grupo C de Geldart. Nesse caso, Abrahamsen e Geldart (1980) ressaltam que a velocidade de colapso é geralmente controlada pela velocidade na qual o gás escapa pelos canais preferenciais. Ressalta-se que o leito não fluidizável de *MC* de 21,0%, como esperado, apresentou o menor tempo de desaeração.

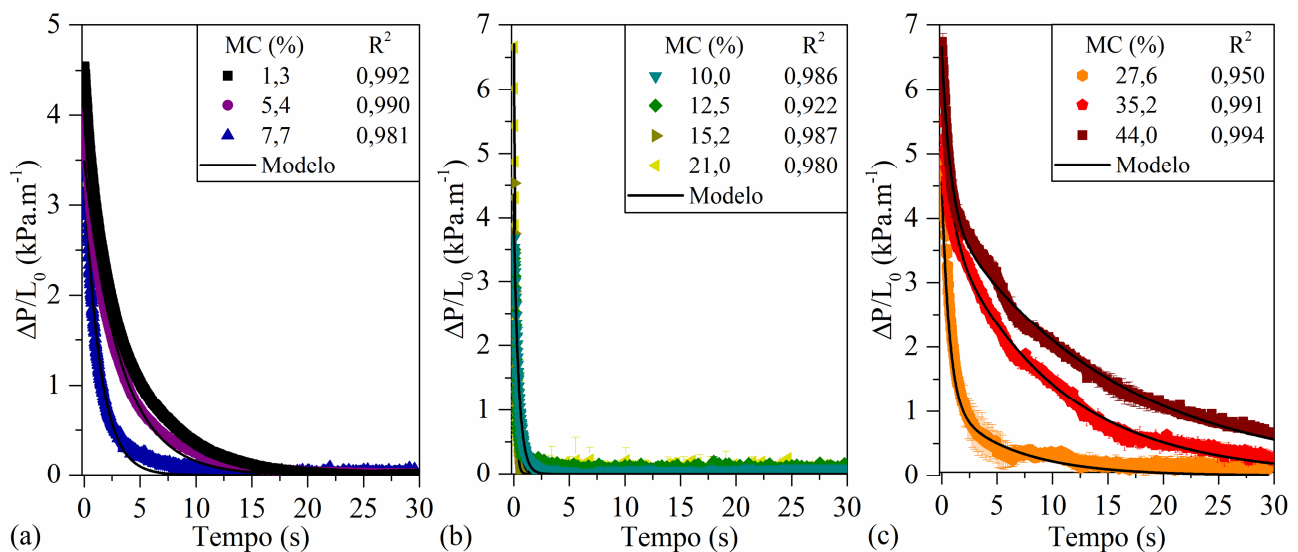


Figura 7: Curvas de fluidização dos cascalhos de perfuração agrupados por estado: seco (a), agregado/desagregado (b) e lama (c).

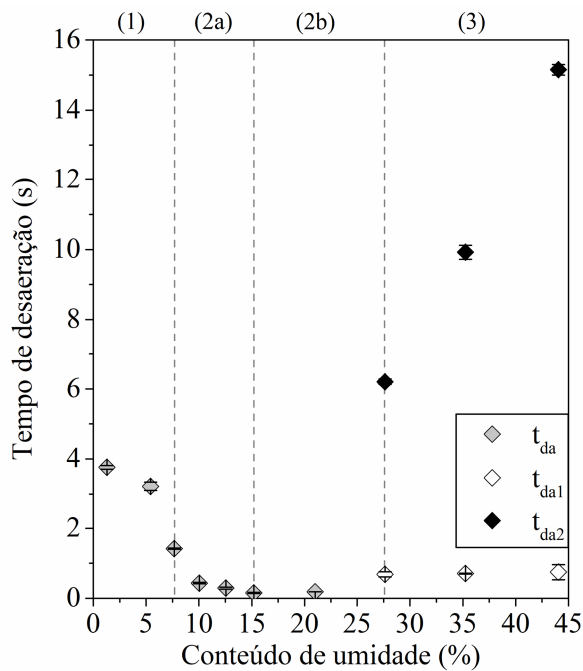


Figura 8: Efeito do conteúdo de umidade no tempo de desaeração ( $t_{da}$ ) dos cascalhos.

Ao incrementar o *MC* no estado (3), foram observadas mudanças nas formas das curvas de desaeração (Figura 7 (c)). O decaimento exponencial homogêneo, uma vez observado para umidades mais baixa, deu origem a uma curva de dois períodos distintos. Um primeiro de decaimento exponencial rápido, seguido por um segundo, de decaimento exponencial mais lento e longo. No momento em que o ar foi desligado, o leito estava aerado devido à fluidização, permitindo assim que o ar escapasse mais facilmente do leito na forma de grandes bolhas. Este fenômeno levava aproximadamente 1-2 s e gerava um decaimento rápido na queda de pressão. Ao mesmo tempo, a mistura começava a se organizar numa configuração de menor porosidade (Figura 6). Nesta nova configuração, a resistência do leito para o escape de ar era muito maior. Assim, o ar escapava do leito principalmente na forma de pequenas bolhas, evidenciadas experimentalmente. Como resultado, a queda de pressão decaía a uma taxa muito mais lenta. Duas constantes de tempo de desaeração foram então obtidas neste caso (Figura 8 (3)). As de menor valor (pontos preenchidos em preto) correspondem ao primeiro período, enquanto as de maior valor (pontos preenchidos em cinza) ao segundo período. O aumento do *MC* não parece afetar a constante do primeiro

período enquanto a do segundo aumentou quase que linearmente. Uma hipótese para esses resultados é que a fluidização gerava maiores volumes de vazios no leito, reduzindo as forças interparticulares e permitindo que o ar escapasse mais facilmente no primeiro período. À medida que o leito colapsava as interações interparticulares se tornavam mais fortes, o que pode ter contribuído para a retenção de ar e, conseqüentemente, maiores tempos de desaeração.

## CONCLUSÃO

Foram identificados quatro estados característicos, considerando as propriedades de fluidização e desaeração: seco (1,3-7,7%), agregado (7,7-15,2%), desagregado (15,2-27,6%) e de lama (27,6-44,0%).

Três comportamentos distintos de fluidização foram constatados. No estado seco, observou-se um comportamento do grupo B de Geldart. A velocidade mínima de fluidização aumentou pouco com a umidade. No estado agregado/desagregado, o comportamento de fluidização das partículas mudou para o grupo C de Geldart. Um incremento mais acentuado da velocidade mínima de fluidização foi notado com o aumento da umidade, até um valor máximo de 15,7%, após o qual passou a diminuir. Um comportamento do grupo B de Geldart das partículas foi observado novamente no estado de lama, com altas sobrepressões antes da fluidização plena.

A capacidade de retenção de ar do material foi gradualmente reduzida com o aumento da umidade nos estados seco e agregado/desagregado até um mínimo, em uma condição não fluidizável. No estado de lama, o material passou a ser capaz de reter mais ar com o aumento da umidade, apresentando dois mecanismos distintos de desaeração, um primeiro de escape rápido de ar por grandes bolhas, seguido por um segundo de escape mais lento por pequenas bolhas.

## REFERÊNCIAS

- ABRAHAMSEN, A. R.; GELDART, D. (1980), Behaviour of gas-fluidized beds of fine powders part II. Powder Technol., v. 26, n. 1, p. 47-55.

- ALTHAUS, T. O.; WINDHAB, E. J. (2012), Characterization of wet powder flowability by shear cell measurements and compaction curves. *Powder Technol.*, v. 215–216, p. 59–65.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. (2012), Recommended Practice for Field Testing Oil-Based Drilling Fluids: API Recommended Practice 13B-2.
- ASTM C136-06. (2015), Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken: ASTM International.
- BURNETT, G. A.; CRABB, C.; WOOD, D. SEYFERT, K. W.; HERBEN, W. C.; MCINTOSH, J. M. (2006), Drill cuttings conveyance systems and methods. US20060102390A1.
- BURNETT, G. A.; CRABB, C.; WOOD, D. SEYFERT, K. W.; MCINTOSH, J. M. (2007), Systems and methods for storing and handling drill cuttings. US7195084B2.
- CHAMBERS, A. J.; KEYS, S.; PAN, R. (1998), The influence of material properties on conveying characteristics. 6th international conference on bulk materials storage, handling and transportation. Wollongong.
- COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. (2002), *Chemical Engineering: Particle Technology and Separation Processes*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- CRABB, C.; WOOD, D. SEYFERT, K. W.; HERBEN, W. C.; MCINTOSH, J. M. (2007), Drill cuttings conveyance systems and methods. US20070215386A.
- ENSCOROWAN. (2019), Offshore Market Recovery. Disponível em: <<http://www.ensco.ws>>.
- GELDART, D. (1973), Types of gas fluidization. *Powder Technol.*, v. 7. p. 285-292
- GRACE, L. R.; AVIDAN, A. A.; KNOWLTON, T. M. (1997), *Circulating fluidized beds*. London: Lackie.
- IOGP. (2016), Drilling waste management technology review. . The International Association of Oil & Gas Producer.
- ISHIZAKI, K.; KOMARNENI, S.; NANKO, M. (1998), *Porous Materials*. Boston: Springer.
- JAIN, K.; SHI, D.; MCCARTHY, J. J. (2004), Discrete characterization of cohesion in gas-solid flows. *Powder Technol.*, v. 146., p. 160-167.
- KENNEDY, O. C. (1998), Pneumatic conveying performance characteristics of bulk solids. 321 f. University of Wollongong. (tese de doutorado).
- KRISTENSEN, H. G. (1995) Particle agglomeration. *Advances in Pharmaceutical Sciences*, v. 7. p. 221-272
- LEVENSPIEL, O. (2014), *Flow in Fluidized Beds*. Engineering Flow and Heat Exchange. Boston: Springer.
- MACÍAS-GARCÍA, A; CUERDA-CORREA, E. M; DÍAZ-DÍEZ, M.A. (2004), Application of the Rosin–Rammler and Gates–Gaudin–Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork. *Materials Characterization*, v. 52, n. 2. p. 159-164
- MALAGALAGE, A. (2018), Pneumatic conveying and storage of wet particles to illustrate offshore drill cutting handling. University of South-Eastern Norway. (tese de doutorado).
- MILLS, D. (2004), *Pneumatic Conveying Design Guide*. Oxford: Elsevier.
- RETSCH. (2015), *Sieve Analysis: taking a close look at quality*. Haan: RETSCH.
- SANCHEZ, L.; VASQUEZ, N.; KLINZING, G. E.; DHODAPKAR, S. (2003), Characterization of bulk solids to assess dense phase pneumatic conveying. *Powder Technol.*, v. 138. p. 93-117
- SEATON, S.; MORRIS, R. G.. (2005), Unique Drilling-Waste Handling and Transport System Offers Advantages to Drilling Operations. SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference. San Antonio.
- WRIGHT, P.C.; RAPER, J.A. (1998), Role of Liquid Bridge Forces in Cohesive Fluidization. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 76, p. 208-226
- WRIGHT, P. C.; RAPER, J. A. (1998), Examination of dispersed liquid-phase three-phase fluidized beds Part 1. *Powder Technol.*, v. 97, n. 3. p. 753-760