

INFLUÊNCIA DO CONTEÚDO DE UMIDADE NAS PROPRIEDADES DE EMPACOTAMENTO DE LEITOS E ESCOABILIDADE DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO

HEITOR O. N. ALTINO^{1,*}, GIOVANI A. LOURENÇO², CLÁUDIO R. DUARTE¹, CARLOS H. ATAÍDE^{1,†}

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

²Instituto Federal de Goiás

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

RESUMO - O presente estudo apresenta uma análise da influência do conteúdo de umidade nas propriedades de empacotamento e escoabilidade de cascalhos de perfuração. A dinâmica de agregação/desagregação das partículas, propriedades de leitos empacotados e escoabilidade de cascalhos de perfuração com dez conteúdos da umidade distintos (1,4-44,0% em peso) foram analisados. Notou-se que o incremento de umidade em até 15,2% promoveu a agregação de partículas e a formação de estruturas interparticulares mais aeradas. No entanto, tais estruturas apresentavam maior dificuldade para escoar. O aumento da umidade acima de 15,2% proporcionou a desagregação das partículas, formando estruturas interparticulares mais densas e de melhor escoabilidade. Além disso, foi possível estabelecer uma classificação do comportamento dos cascalhos de perfuração de acordo com a umidade.

INTRODUÇÃO

A produção de petróleo e gás contribui para uma importante parte da quantidade de energia necessária para atender a demanda global, com previsão de crescimento de produção total para 17 milhões de barris de óleo por dia até 2025. A expectativa é que a produção *offshore* seja responsável por aproximadamente 5 milhões de barris de óleo em 2025, representando 29% da produção total (Enscorowan, 2019). Para a obtenção de petróleo e gás, os poços *offshore* são perfurados por meio de uma broca rotativa conectada a uma plataforma de perfuração por meio de um tubo oco. Para manter a pressão, lubrificar e reduzir a temperatura da broca, um fluido de perfuração é injetado no interior do tubo oco e retornado à plataforma através da região anular entre a coluna de perfuração e a parede do poço perfurado. À medida que a broca gira e tritura as formações rochosas, pequenas partículas de rocha, conhecidas como cascalhos de perfuração, são geradas e ficam suspensas no fluido de perfuração,

retornando à plataforma junto com o fluido. Na superfície, a mistura de cascalhos e fluido de perfuração é encaminhada ao sistema de controle de sólidos, e submetida a diversas operações unitárias, como: desgaseificadores, peneiras vibratórias (*shale shakers*) primárias, hidrociclones, peneiras vibratórias secundárias e secadores Vortex, as quais visam a recuperação do fluido de perfuração e a separação dos cascalhos. 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 os navios transportadores, o que pode ser realizado por diversos métodos, como *skip-and-ship*, esteiras transportadoras, roscas transportadoras e transporte pneumático (Gerrard *et al.*, 1999; IOGP, 2016).

Um dos principais desafios do manejo de cascalhos de perfuração nessas operações é a sua natural inconsistência (IOGP, 2016;

Seaton; Morris, 2005). Em particular, o conteúdo de umidade (*MC*) dos cascalhos de perfuração é uma variável crítica, sendo constituído por uma mistura de água e óleo. É possível observar cascalhos tanto na forma de pastas com mais de 60% de umidade em peso, quanto na forma de sólidos granulares, com menos de 5%. Tais umidades são dependentes de diversos fatores, mas principalmente de qual etapa do sistema de controle de sólidos os cascalhos são originários. Por exemplo, algumas patentes descrevem que os cascalhos provenientes de peneiras vibratórias são muito coesivos, com umidades variando de 10 a 20% em peso. Já cascalhos de perfuração providos do fundo de secadores Vortex são geralmente sólidos de boa escoabilidade, com 5% de umidade (Burnett *et al.*, 2006, 2007; Crabb *et al.*, 2007).

Nas operações unitárias do sistema de controle de sólidos, bem como na etapa de transporte para embarcação, o material é armazenado em silos, tanques e vasos de pressão, e deve escoar por calhas, bocais de descarga e tubulações de transporte. Entretanto, devido às alterações significativas no conteúdo de umidade do material ao longo desses processos, as propriedades de empacotamento de leitos fixos e escoabilidade são completamente alteradas, levando a mudanças no comportamento *bulk* do material. Desta forma, é de suma importância o estabelecimento de como a umidade influencia essas propriedades. Tal conhecimento é necessário para projeção de diversos equipamentos, bem como para a operação de sistemas de manejo de cascalhos. As propriedades de empacotamento, por exemplo, são necessárias para determinar o volume *bulk* de material que pode ser carregado em um vaso de pressão, bem como a variação de volume que pode ser esperada devido a vibrações do sistema. Já as propriedades de escoabilidade indicam a facilidade com que o material pode ser descarregado e transportado. Além disso, durante a operação desses sistemas, a falta deste conhecimento pode levar a baixas eficiências de processo e problemas de entupimento (Burnett *et al.*, 2007; IOGP, 2016; Seaton; Morris, 2005).

Para medir como essas propriedades são afetadas pelo *MC*, vários parâmetros podem

ser utilizados. As densidades e porosidades *bulk* aerada e compactada indicam como a umidade pode influenciar o rearranjo relativo das partículas para formação de leitos empacotados. Já a facilidade de escoamento dos materiais pode ser indiretamente estimada e classificada pela razão de Hausner e pelo ângulo de repouso. Além disso, esses indicadores também fornecem informações importantes das forças interparticulares presentes no material (Schulze, 2008). Nesse ponto, destaca-se ainda que alterações nas forças interparticulares também podem induzir a agregação/desagregação das partículas, sendo possível quantificar esses fenômenos pela distribuição granulométrica do material (Kristensen, 1995).

Contudo, estudos abordando a influência do *MC* nas características de empacotamento e escoabilidade de cascalhos de perfuração ainda são escassos na literatura, havendo, em grande parte, apenas a descrição do comportamento do material segundo algumas patentes, como anteriormente citado (Burnett *et al.*, 2006, 2007; Crabb *et al.*, 2007). Alguns autores também relatam que a escoabilidade dos cascalhos de perfuração pode ser melhorada pela adição da quantidade correta de fluido de diluição (Seaton; Morris, 2005). No entanto, devido ao aumento de volume, a diluição dos cascalhos de perfuração aumenta os custos relacionados ao tratamento, transporte e descarte do material.

Assim, percebe-se que o comportamento dos cascalhos de perfuração pode ser afetado pela umidade de várias maneiras. No entanto, como o conteúdo de umidade propriamente influencia as características de empacotamento e escoabilidade de cascalhos de perfuração, e os limites de *MC* nos quais essas mudanças ocorrem, ainda não estão claros. É importante destacar que dados de densidade e porosidade *bulk* aerada e compactada, bem como razão de Hausner e ângulo de repouso, de cascalhos de perfuração com diferentes umidades ainda não são encontrados na literatura. Assim, uma análise comparativa de como o conteúdo de umidade influencia as propriedades de empacotamento e escoabilidade de cascalhos, bem como a dinâmica de agregação/desagregação das partículas se faz necessária. Esta análise pode ajudar a elucidar os

diferentes efeitos da umidade sobre as características de manejo de cascalhos relatados na literatura. Consequentemente, 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 propriedades de empacotamento e escoabilidade de cascalhos de perfuração. Para tanto, estudou-se a influência de dez conteúdos distintos de umidade dos cascalhos na dinâmica de agregação/desagregação das partículas, densidades e porosidades bulk aerada e compactada, razão de Hausner e ângulo de repouso. A análise desses parâmetros permitiu uma melhor elucidação dos diferentes comportamentos relatados na literatura. Além disso, foi possível estabelecer uma classificação dos diferentes comportamentos dos cascalhos de acordo com a umidade, o que reforça a novidade deste trabalho.

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 à base de água com goma xantana e amido modificado. A Tabela 1 e a Figura 1 mostram detalhes das características do material seco.

Tabela 1: Características gerais de cascalhos.

Classificação de Geldart		B
ϕ		$0,77 \pm 0,01$
$D_{Sauter} (\mu m)$		$161,73 \pm 20,56$
$\rho_a (g.cm^{-3})$		$2,6032 \pm 0,0145$
$\rho_r (g.cm^{-3})$		$2,6990 \pm 0,0061$
ε_p		0,0355
Composição	$C_w (\% g.g^{-1})$	$0,45 \pm 0,08$
	$C_o (\% g.g^{-1})$	$0,86 \pm 0,22$
	$C_s (\% g.g^{-1})$	$98,70 \pm 0,24$
Modelo RRB	$x_0 (\mu m)$	615,96
	n	1,09
	R^2	0,9954
	RMSE	0,0260

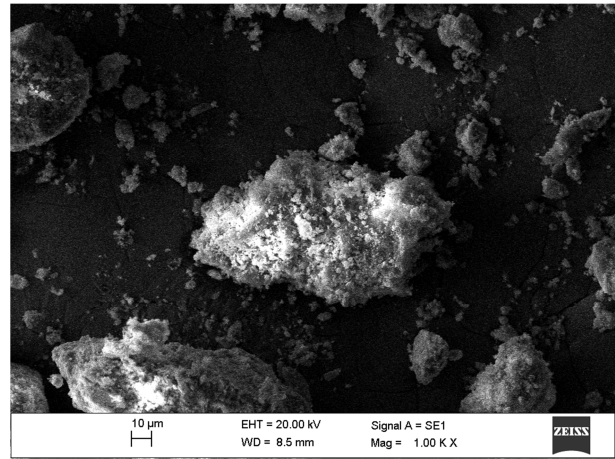


Figura 1: Imagem de MEV do cascalho seco.

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_o), água (C_w) e sólidos (C_s) de acordo com as Equações (1)-(3), respectivamente (API, 2012).

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

$$C_o (\% g.g^{-1}) = \frac{m_o}{m_w + m_o + m_s} 100 \quad (2)$$

$$C_s (\% g.g^{-1}) = \frac{m_s}{m_w + m_o + m_s} 100 \quad (3)$$

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

Caracterização dos Cascalhos de Perfuração Secos

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

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (4)$$

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

$$\phi = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (5)$$

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 (6), foi ajustado aos dados experimentais (Vesilind, 1980).

$$Y(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n} \quad (6)$$

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 (μm), n é a constante de uniformidade e x_0 é o tamanho (μm) no qual 63,2% das partículas são menores

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS): a caracterização foi realizada utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com um microscópio (Zeiss®, EVO MA10) e um detector de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) (Oxford®, 51-ADD0048) na ampliação de 1000x.

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 (7).

$$MC(\% \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{m_w + m_o}{m_w + m_o + m_s} 100 \quad (7)$$

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:

$$S(\% \text{ mL} \cdot \text{mL}^{-1}) = \frac{V_l}{V_t - V_s} 100 \quad (8)$$

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%, como pode ser visto na Figura 2. 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.

Caracterização dos Cascalhos de Perfuração com Diferentes Umidades

Microscopia óptica: microscopia óptica foi utilizada para observar o efeito do MC no aspecto visual dos cascalhos de perfuração e quantificar a aglomeração/agregação das

partículas. Um microscópio óptico (Nikon®, Eclipse E-200) equipado com uma câmera digital (Motic®, Moticam 5) foi utilizado para a captura das imagens no aumento de 4x. O diâmetro médio de mais de cem partículas foi obtido por meio do *software* Image-Pro Plus® 6.0 para cada *MC* estudado.

Determinação das propriedades bulk de leitos fixos: as densidades *bulk* aerada (ρ_0) e compactada (ρ_t) dos cascalhos de perfuração foram determinadas em triplicata de acordo com as principais normas para o estabelecimento da densidade *bulk* (ASTM, 2009; USP, 2018; WHO, 2012). O sistema automatizado para aquisição de dados de densidade *bulk* de materiais granulares descrito por Altino *et al.* (2021) foi usado para este fim. O número, frequência e amplitude das batidas foram: 3000, 250 batidas/min e 16,0 mm. Essas condições foram observadas por Altino *et al.* (2021) como ótimas para promover o empacotamento da areia “S50”. Assim, devido à semelhança entre cascalhos de perfuração e areias, e as fortes forças de coesão interparticular induzidas pela umidade, essas condições foram escolhidas para serem utilizadas neste trabalho.

Para empacotar o material na proveta, um tubo plástico (diâmetro interno de 21,20 mm, diâmetro externo de 25,00 mm e altura de 275 mm) foi colocado concentricamente na proveta. O material foi introduzido no tubo plástico despejando quantidades constantes de material, da mesma altura, com o auxílio de um funil. Após o enchimento, o tubo foi retirado a uma velocidade constante de $12,2 \pm 1,5 \text{ mm.s}^{-1}$. O pó fluía gradualmente para fora do tubo e enchia o cilindro graduado. Para cada *MC* analisado, a massa de material foi selecionada para prover o volume inicial de empacotamento de 100 mL.

As porosidades *bulk* aerada (ε_0), compactada (ε_t) e efetiva (ε_{eff}) foram determinadas respectivamente pelas Equações (9)-(11) (Altino *et al.*, 2021; Traina *et al.*, 2013).

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{intra} + V_t}{V_{bulk}} + \frac{V_{add}}{V_{bulk}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_t = \frac{V_{intra} + V_{opt}}{V_{bulk}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{V_{intra} + V_t + V_{add} - V_{liq}}{V_{bulk}} \quad (11)$$

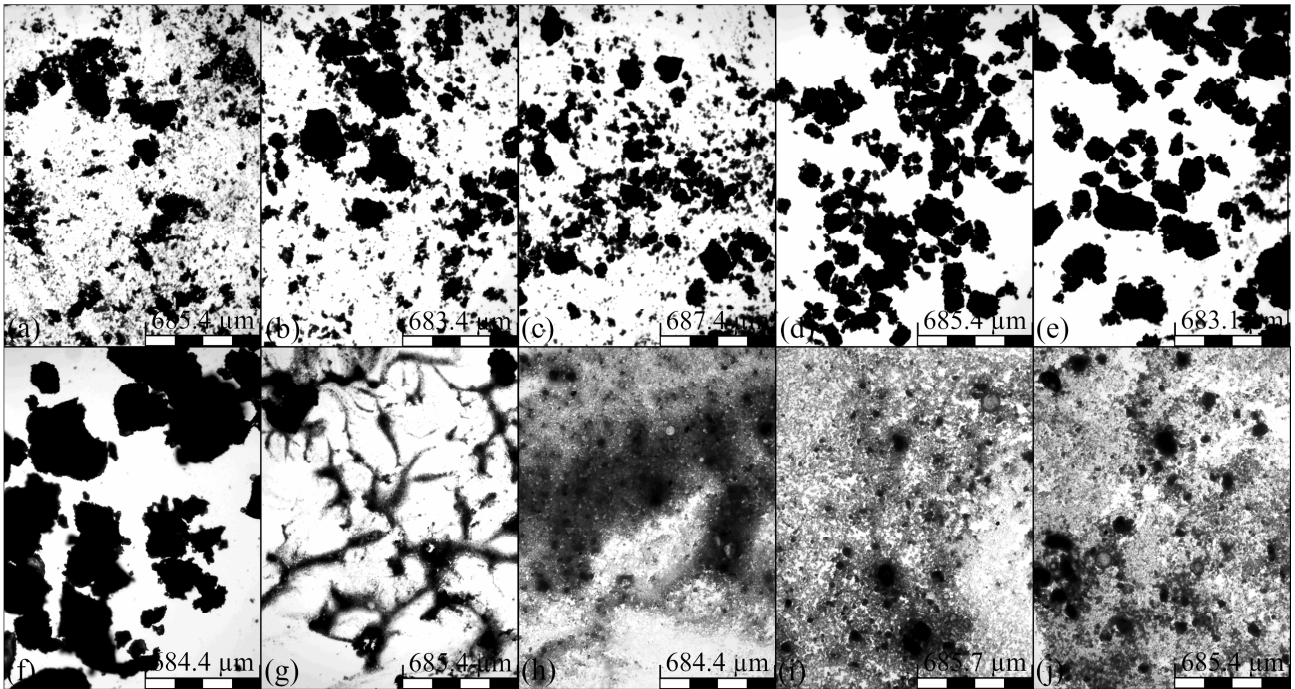


Figura 2: Micrografias dos cascalhos em diferentes conteúdos de umidade: 1,3% (a), 5,4% (b), 7,7% (c), 10,0% (d), 12,5% (e), 15,2% (f), 21,0% (g), 27,6% (h), 35,2% (i) e 44,0 (j).

em que V_{bulk} é o volume *bulk*, V_{intra} é o volume intraparticular, V_t é a soma dos espaços interparticulares quando o sistema granular está em um estado em empacotamento ótimo, V_{add} é o volume adicional retido no material empacotado, V_{liq} é o volume de líquido que ocupa os espaços interparticulares.

Os experimentos foram realizados em temperatura ambiente ($25,2 \pm 0,5^\circ\text{C}$) com umidade relativa do ar de $55,4 \pm 2,7\%$, o que foi suficiente para eliminar visualmente as cargas estáticas.

Indicadores de escoabilidade: a escoabilidade dos cascalhos de perfuração foi analisada por dois indicadores: ângulo de repouso (AoR) e razão de Hausner (HR), em triplicata. A primeira foi determinada pelo método do funil descrito pela ASTM (ASTM, 2000). Destaca-se que para cascalhos com umidades superiores a 15,2% não foi possível determinar o ângulo de repouso devido ao comportamento de pastoso da mistura. O segundo indicador (HR) foi calculado pela razão entre a densidade *bulk* compactada (ρ_c) e aerada (ρ_0) (Schulze, 2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características dos Cascalhos Secos

A Tabela 1 mostra que o material seco apresentava baixos conteúdos de água e óleo, sendo adequado para ser umidificado. Para entender como a umidade pode afetar o comportamento dos cascalhos de perfuração, é importante classificá-lo como um material poroso ou não-poroso. Em geral, em materiais porosos, a umidade preenche os poros das partículas e adiciona peso ao leito. Por outro lado, para materiais não-porosos, a umidade se encontra preferencialmente na superfície das partículas e contribui para as forças de ponte líquida, alterando as forças interparticulares (Kalman; Portnikov, 2021). Normalmente, materiais porosos possuem porosidades de partículas (ε_p) que variam entre 0,2 e 0,95 (Ishizaki *et al.*, 1998). Assim, de acordo com o valor de ε_p observado na Tabela 1, os cascalhos de perfuração estudados podem ser classificados como um material não poroso.

A esfericidade (ϕ) observada para os cascalhos de perfuração estava de acordo com o valor relatado por Hyun *et al.* (2000) (0,80). As densidades aparente (ρ_a) e real (ρ_r) dos cascalhos também foram semelhantes à densidade real relatada por Petri *et al.* (2015) ($2,6830 \text{ g.cm}^{-3}$). Já o diâmetro médio de Sauter (D_{Sauter}) foi inferior ao valor relatado por Petri *et al.* (2015) ($238 \mu\text{m}$). Com base nos valores de densidade real e diâmetro médio de Sauter, os cascalhos de perfuração secos podem ser classificados como sendo do grupo B da classificação de Geldart (Geldart, 1973).

A micrografia obtida por MEV exibida na Figura 1 mostra partículas sem poros definidos com uma ampla variedade de tamanhos e formas, bem como superfícies ásperas. A presença de aglomerados de partículas também pode ser observada, o que indica certo grau de coesividade do material. Os resultados da análise de EDS (Figura 3) evidenciam a existência de diversos elementos presentes nas partículas de cascalhos. Carbono e ouro aparecem em maiores quantidades, porém, é importante destacar que as partículas foram revestidas com ouro e presas a uma fita adesiva condutora de carbono para realizar as análises. Também é possível observar a presença de cálcio, oxigênio e magnésio, o que é consistente com a informação de que os cascalhos de perfuração analisados eram provenientes de rochas carbonatadas. Essas rochas são formadas principalmente por calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e aragonita (CaCO_3) (Reeder, 1983).

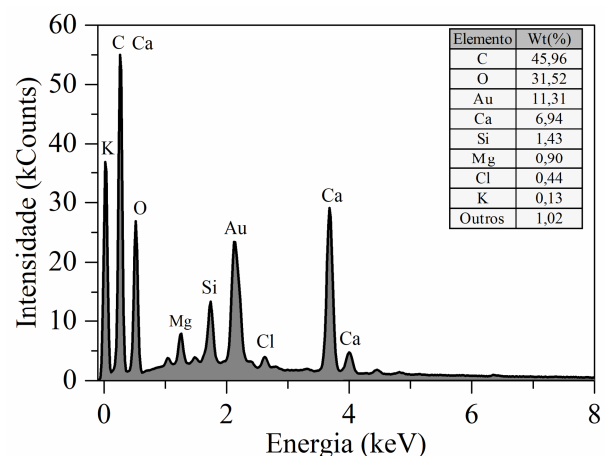


Figura 3: Resultados da análise de EDS do cascalho de perfuração secos.

Efeitos do Conteúdo de Umidade dos Cascalhos de Perfuração na Agregação e Desagregação de Partículas

O efeito do *MC* no aspecto visual dos cascalhos de perfuração é mostrado nas micrografias da Figura 2. As pequenas variações entre as escalas das micrografias permitiram realizar uma análise comparativa da influência do *MC* no aspecto visual dos cascalhos. O aumento do *MC* até 15,2% (Figura 2 (f)) promoveu uma redução no número de partículas finas, enquanto o tamanho das partículas aumentou. Para maiores *MCs*, o material passou a se tornar pastoso, reduzindo a quantidade de finos enquanto o tamanho médio das partículas aumentou. O aumento do tamanho das partículas e a redução dos finos com o aumento do *MC* podem ser caracterizados como aglomeração ou agregação (Kristensen, *et al.*, 1987; Singer *et al.*, 2019). No entanto, como o agrupamento das partículas mostrou-se reversível pelo aumento do *MC*, o fenômeno pode ser classificado como agregação (Singer *et al.*, 2019).

A agregação de partículas ocorre por interações muito complexas entre aumento e redução de tamanho do agregado, o que significa um equilíbrio entre forças de ligação e ruptura (Kristensen, 1995). No caso de materiais não porosos, para que os agregados se formem e cresçam, é necessário: (i) uma quantidade suficiente de líquido de superfície livre (por exemplo, gotas de água) para estabelecer ligações líquidas e (ii) agregados que contenham líquido superficial suficiente para permitir a coalescência entre outros agregados (Kristensen *et al.*, 1987; Kristensen, 1996). Assim, a umidade tem forte influência no crescimento do agregado. Para quantificar as alterações do tamanho das partículas em função do *MC*, foram analisados o diâmetro médio das partículas e a quantidade de finos menores que 75 μm . Os resultados são apresentados na Figura 4.

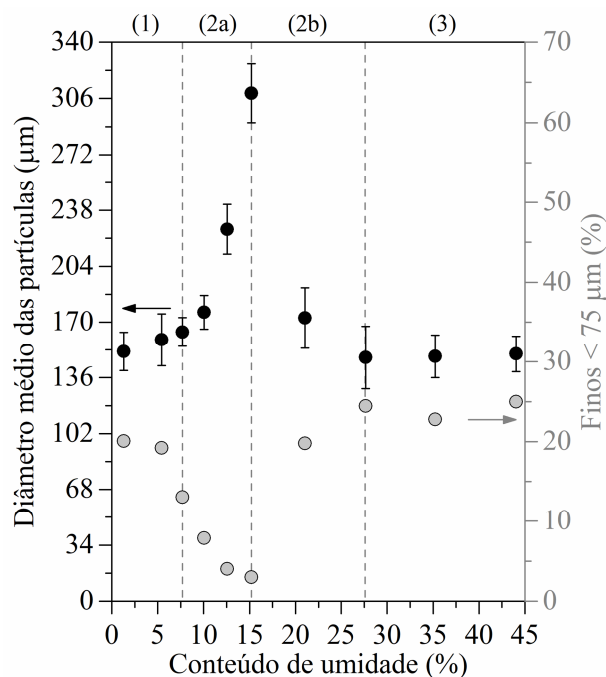


Figura 4: Efeito do conteúdo de umidade no tamanho médio das partículas e na quantidade de finos de cascalhos de perfuração.

Um esquema, mostrado na Figura 5, foi criado para melhor elucidação dos fenômenos. Os limites de umidade, estados e sub-estados ilustrados na Figura 5 foram estabelecidos neste trabalho com base no comportamento semelhante das partículas considerando: características de agregação/desagregação, propriedades *bulk* de leitos fixos e indicadores de escoabilidade. Esses limites também foram marcados na Figura 4. No estado seco (1) (Figura 5 (1)), a faixa de nível de saturação é de um estado pendular. As partículas estavam dispersas e o diâmetro médio das partículas permaneceu quase constante com o incremento do *MC*. Isso é esperado, considerando as fracas forças de ponte líquida geralmente observadas no estado pendular (Althaus; Windhab, 2012).

Prosseguindo para o sub-estado agregado (2a) (Figura 5 (2a)), à medida que o *MC* foi acrescido, o tamanho médio das partículas aumentou e a quantidade de finos reduziu até o *MC* de 15,2% (2a). A faixa de nível de saturação é de um estado funicular. Assim, o aumento do *MC* pode ter induzido a formação de pontes líquidas, aumentando as forças interparticulares e promovendo a agregação de finos e pequenas partículas em aglomerados de maior tamanho.

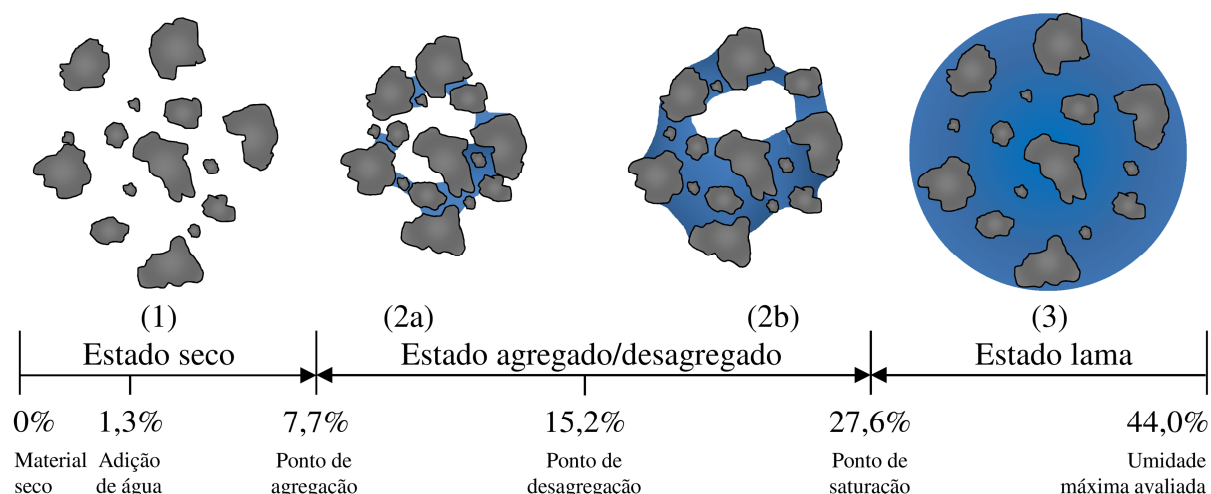


Figura 5: Esquema de classificação do comportamento de partículas de cascalhos de acordo com o conteúdo de umidade.

Já no sub-estado desagregado (2b) (Figura 5 (2b)), a quantidade de líquido parecia ser suficiente para iniciar uma redução gradual das forças de coesão e atuar como lubrificante, espaçando as partículas e iniciando a dispersão dos agregados em partículas de menor diâmetro e finos. Finalmente, em 27,6% um ponto de saturação foi alcançado, iniciando o estado de lama (3) (Figura 5 (3)), onde o nível de saturação é de um estado capilar. É possível observar que os agregados foram dispersos de tal forma que o tamanho médio das partículas e a quantidade de finos foram semelhantes aos do estado seco (1) (Capes, 1980; Litster, 2017).

Propriedades de Empacotamento de Leitos

A Figura 6 mostra a influência do MC nas densidades *bulk* aerada (ρ_0) e compactada (ρ_t) dos cascalhos de perfuração. Conteúdo, o efeito do MC nas propriedades de empacotamento do material pode ser mais bem interpretado analisando as porosidades *bulk* aerada (ε_0) compactada (ε_t), exibidas na Figura 7. Os limites de estados da Figura 5 também foram marcados nessa figura.

Nos estados (1) e (2a), é possível observar que as porosidades *bulk* aerada e compactada aumentaram com o incremento de umidade até 15,2% para ε_0 e 12,5% para ε_t . Este comportamento é geralmente atribuído ao aumento das forças de coesão através do fortalecimento das pontes líquidas entre as partículas, conforme ilustrado na Figura 5 (2a) (Kalman; Portnikov, 2021; Lu *et al.*, 2018).

Como consequência, a mobilidade relativa das partículas é reduzida, resultando em leitos mais aerados (Crouter; Briens, 2014). Pode-se esperar que ε_t também apresentasse um ponto de virada no MC de 15,2%, como observado para ε_0 . No entanto, no processo de compactação, energia é aplicada ao leito empacotado para provocar o rearranjo das posições relativas das partículas. Assim, à medida que o processo de compactação avança, os espaços vazios são reduzidos e o nível de saturação é gradualmente aumentado (Schulze, 2008). Estima-se que o nível de saturação tenha aumentado devido à compactação de 46,0% para 53,3% no MC de 15,2%. Nesse maior nível de saturação, as forças de coesão e atrito podem ter sido reduzidas, permitindo que as partículas se rearranjem em uma configuração de leito mais denso.

Após este ponto, no sub-estado (2b) da Figura 7, o aumento do MC reduziu ε_0 e ε_t , provavelmente devido à redução das forças de coesão mencionadas anteriormente, como também observado por alguns autores (Kalman; Portnikov, 2021; Lu *et al.*, 2018). Essa redução ocorreu até 27,6% para ε_0 e 21,0% para ε_t . Mais uma vez pode-se esperar que ε_t apresentasse um ponto de virada em 27,6%, conforme percebido para ε_0 . No entanto, como citado anteriormente, o processo de compactação pode aumentar o nível de saturação. Neste caso, calcula-se que o nível de saturação tenha aumentado por compactação de 73,0% para 100,0%, passando de um estado de saturação funicular para um estado capilar.

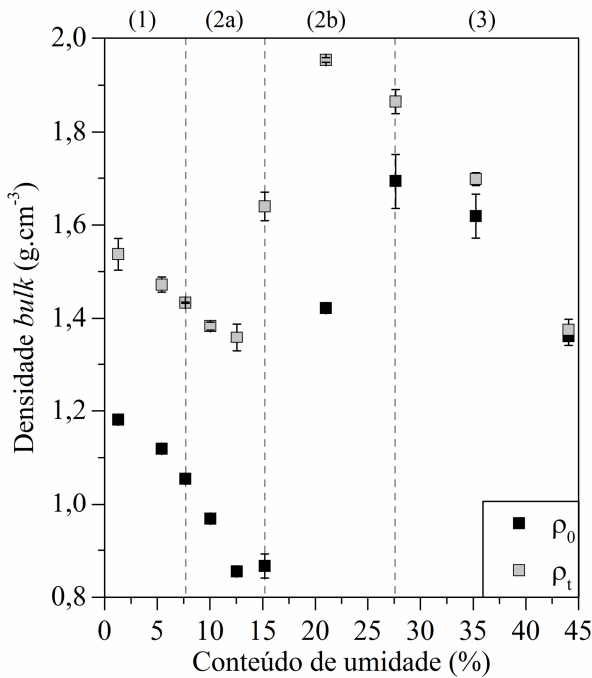


Figura 6: Efeito do conteúdo de umidade nas densidades *bulk* aerada (ρ_0) e compactada (ρ_t) dos cascalhos de perfuração.

Já no estado (3), o incremento do *MC* induziu o aumento de ε_0 e ε_t . Uma hipótese para esse fenômeno é que as forças de coesão e atrito eram menores nesse estado, e a quantidade relativa de sólidos era reduzida pelo incremento da umidade, espaçando as partículas e aumentando a porosidade.

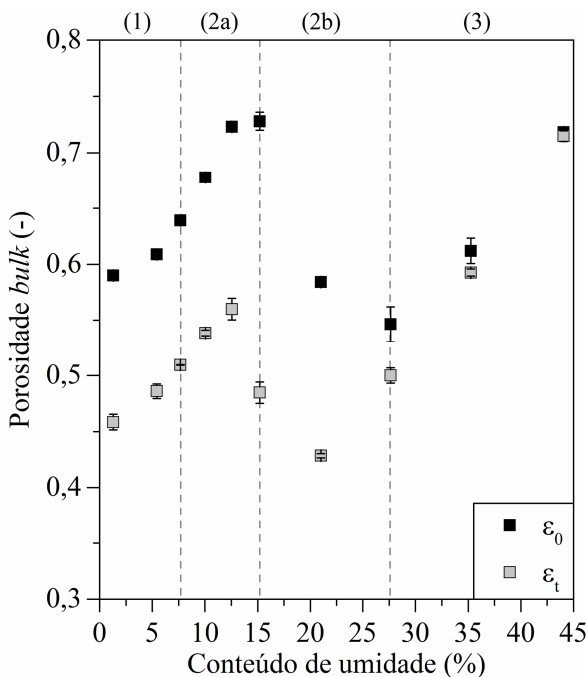


Figura 7: Efeito do conteúdo de umidade nas porosidades *bulk* aerada (ε_0) e compactada (ε_t) de cascalhos de perfuração.

A porosidade *bulk* é inversamente relacionada com a densidade *bulk* (Osman, 2013). Portanto, como esperado, os efeitos observados para as porosidades *bulk* aerada e compacta foram respectivamente inversamente observados para as densidades *bulk* aerada e compactada.

A Figura 8 mostra que porosidade *bulk* efetiva (ε_{eff}) foi similarmente afetada pelo *MC*. Este parâmetro representa a fração de volume de vazios preenchidos com ar em comparação com o volume total do leito. À medida que o *MC* aumentou, a ε_{eff} permaneceu quase constante no estado (1), o que pode ser esperado devido às baixas forças interparticulares mencionadas anteriormente. Este resultado também sugere que o aumento de ε_0 com a umidade (Figura 7) neste estado é provavelmente devido ao incremento dos volumes de vazios preenchidos com líquido.

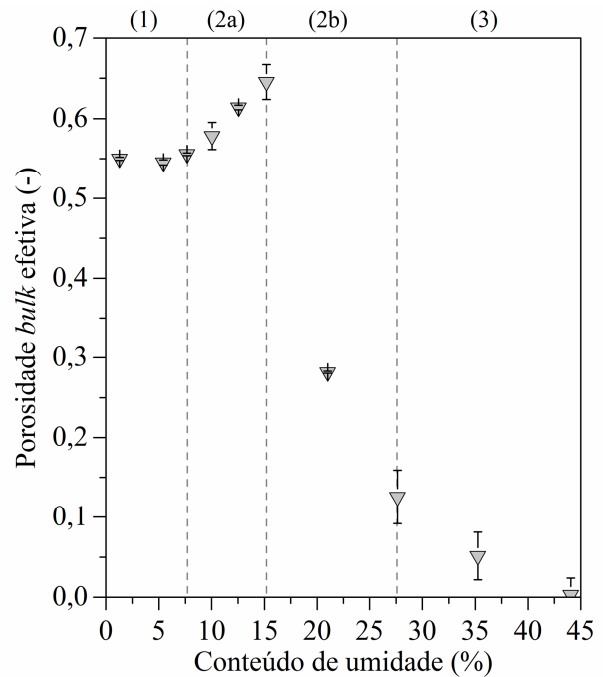


Figura 8: Efeito do conteúdo de umidade na porosidade *bulk* efetiva (ε_{eff}) de cascalhos.

Já no sub-estado (2a), o aumento de *MC* pareceu ser suficiente para intensificar as forças de coesão e promover a formação de leitos mais aerados com ar. No sub-estado (2b), o aumento de *MC* promoveu uma redução da ε_{eff} , o que pode ser creditado à redução das forças citadas, permitindo que as partículas se orientassem em configurações interparticulares mais densas. A ε_{eff} continuou diminuindo com o aumento da umidade no

estado (3) até valores próximos à zero, em contraste com o incremento de ε_0 observado para este estado na Figura 7. Este resultado sugere que o volume dos espaços vazios preenchidos com líquido aumentava gradualmente, em detrimento da redução do volume daqueles preenchido com ar à medida que o material ficava saturado.

Indicadores de Escoabilidade

A correlação entre HR e AoR para todos os conteúdos de umidade analisados é apresentada na Figura 9, juntamente com as classificações de escoabilidade (Gaisford; Saunders, 2012).

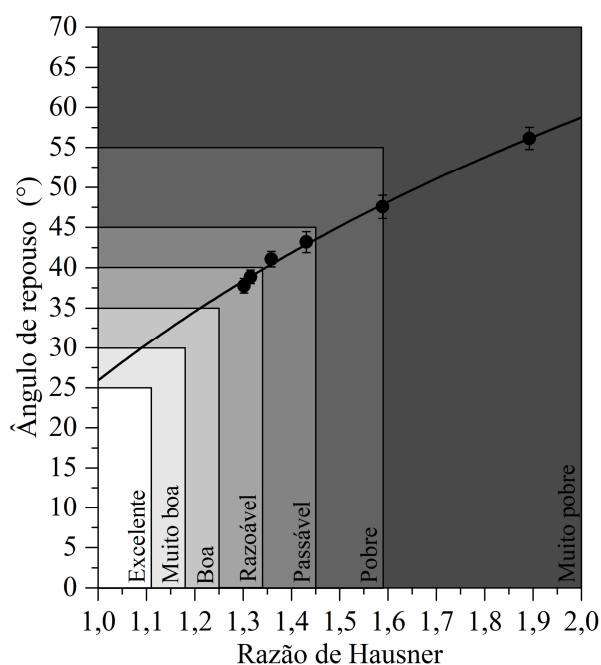


Figura 9: Correlação entre razão de Hausner e ângulo de repouso para diferentes umidades de cascalhos de perfuração.

Como observado por diversos autores para diferentes materiais secos (Geldart *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2018), foi percebida uma fraca tendência logarítmica. Assim, a Equação (12) foi ajustada aos dados com R^2 de 0,996, o que indica um bom ajuste. Observa-se que ambos os indicadores forneceram valores de escoabilidade apontando na mesma direção. Isso significa que uma classificação de escoabilidade determinada a partir do HR correspondeu àquela determinada pelo AoR , o que evidencia a coerência entre os dados.

$$AoR(^{\circ}) = 47.377 \ln(HR) + 25.910 \quad (12)$$

A Figura 10 mostra a razão de Hausner de cascalhos de perfuração com diferentes MCs , juntamente com as classificações de escoabilidade e limites de estados da Figura 5. As mesmas tendências também foram similarmente observadas para AoR . O incremento da umidade, desde o estado seco (1), até o final do sub-estado agregado (2a), resultou na redução da escoabilidade do material de “razoável” para “muito pobre”. Este fenômeno também foi observado de forma semelhante por distintos autores (Crouter; Briens, 2014; Kalman, 2021; Lu *et al.*, 2018), analisando diferentes materiais, e geralmente é atribuído ao aumento das forças de coesão. O incremento dessas forças pode gerar uma redução da mobilidade entre partícula-partícula e partícula-parede, resultando em uma menor escoabilidade. Nos estados desagregado (2b) e lama (4) a escoabilidade gradualmente aumentou de “muito pobre” para “excelente” com o incremento da umidade. Acredita-se que esse fenômeno se deve à lubrificação das superfícies das partículas e à redução do efeito relativo das forças de coesão, o que acabou aumentando a escoabilidade.

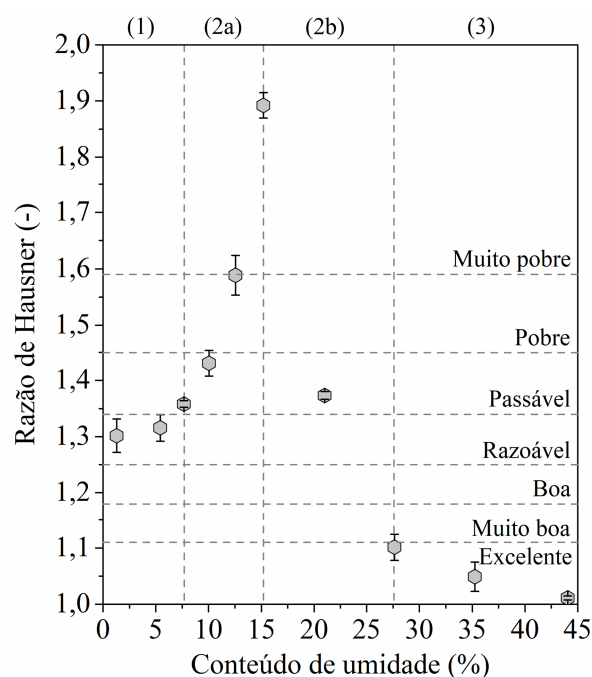


Figura 10: Efeito do conteúdo de umidade na razão de Hausner (HR) de cascalhos.

CONCLUSÃO

Foram identificados quatro estados característicos, considerando os parâmetros de manejo e comportamento das partículas de cascalho, denominados: seco (1,3-7,7%), agregado (7,7-15,2%), desagregado (15,2-27,6%) e de lama (27,6-44,0%).

O incremento de umidade promoveu a agregação gradativa das partículas em aglomerados de maiores diâmetros do estado seco para o agregado, os quais foram desagregados em maiores umidades nos estados desagregado e de lama.

Estruturas interparticulares mais aeradas foram formadas pelo aumento da umidade no estado seco. Aumentos adicionais, no sub-estado agregado, promoveram a formação de estruturas mais aeradas com espaços vazios preenchidos por ar. No sub-estado desagregado, os vazios preenchidos por ar foram reduzidos, em detrimento ao aumento dos espaços vazios preenchidos por líquido, tornando as estruturas mais densas. No estado de lama, os espaços cheios de líquido eram grandes o suficiente para produzir estruturas saturadas mais aeradas.

A escoabilidade dos cascalhos foi reduzida com o aumento da umidade de “passável” no estado seco, para “muito pobre” no final do sub-estado agregado. Ao aumentar novamente a umidade, observou-se uma melhoria gradual da escoabilidade nos estados desagregado e de lama até “excelente”.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ALTINO, H. O. N.; LOURENÇO, G. A.; ATAÍDE, C. H. (2021), System development for bulk density data acquisition of granular materials: Effect of operational conditions and optimization. *Powder Technol.*, v. 391., p. 184-197.
- API. (2012), Recommended Practice for Field Testing Oil-Based Drilling Fluids: API Recommended Practice 13B-2. Washington.
- ASTM. (2000), Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders. C 1444-00.
- ASTM C136-06. (2015), Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM D7481-09. (2009), Standard test methods for determining loose and tapped bulk densities of powders using a graduated cylinder. *Annual Book of ASTM Standards*, n. October, p. American Society for Testing and Materials, West C.
- BURNETT, G. A.; CRABB, C.; WOOD, DA.; SEYFFERT, K. W.; MCINTOSH, J. M. (2006), Drill cuttings conveyance systems and methods. United States, US20060102390A1,
- BURNETT, G. A.; CRABB, C.; WOOD, D.; SEYFFERT, K. W.; HERBEN, W. C.; MCINTOSH, J. M. (2007), Systems and methods for storing and handling drill cuttings. US7195084B2.
- CAPESE, C. E. (1980) Particle size enlargement. Amsterdam: Elsevier.
- CRABB, C.; BURNETT, G. A.; WOOD, D.; SEYFFERT, K. W.; HERBEN, W. C.; MCINTOSH, J. M. (2007), Drill cuttings conveyance systems and methods. US20070215386A1.
- CROUTER, A.; BRIENS, L. (2014), The effect of moisture on the flowability of pharmaceutical excipients. *AAPS PharmSciTech*, v. 15, n. 1.
- ENSCOROWAN. (2019), Offshore Market Recovery. Disponível em: <<http://www.ensco.ws>>.
- GAISFORD, S.; SAUNDERS, M. (2012), *Essentials of Pharmaceutical Preformulation*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- GELDART, D.; ABDULLAH, E.C.; HASSANPOUR, A.; NWOKE, L.C.; WOUTERS, I. (2006) Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. *China Particuology*, v. 4, n. 3–4, p. 104–107.
- GELDART, D. (1973), Types of gas fluidization. *Powder Technol.*, v. 7, n. 5., p. 285-292.

- GERRARD, S.; GRANT, A.; MARSH, R.; LONDON, C. (1999), Drill cuttings piles in the north sea: management options during platform decommissioning. Norwich.
- HYUN, C.; SHAH, S.; OSISANYA, Samuel. (2000), A Three-Layer Modeling for Cuttings Transport with Coiled Tubing Horizontal Drilling. Society of Petroleum Engineers,
- IOGP. (2016), Drilling waste management technology review. . The International Association of Oil & Gas Producer,
- ISHIZAKI, K.; KOMARNENI, S.; NANKO, M. (1998), Porous Materials. Boston, MA: Springer US. v. 4.
- KALMAN, H. (2021), Effect of moisture content on flowability: Angle of repose, tilting angle, and Hausner ratio. *Powder Technol.*, v. 393, p. 582–596.
- KALMAN, H.; PORTNIKOV, D. (2021), Analyzing bulk density and void fraction: B. Effect of moisture content and compression pressure. *Powder Technol.*, v. 381, p. 285–297.
- KRISTENSEN, H. G. (1995), Particle agglomeration. *Advances in Pharmaceutical Sciences*, v. 7, n. C.
- KRISTENSEN, H. G.; SCHAEFER, T. (1987), Granulation: A Review on Pharmaceutical Wet-Granulation. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, v. 13, n. 4–5, p. 803–872.
- KRISTENSEN, H. G. (1996), Particle agglomeration in high shear mixers. *Powder Technol.*, v. 88, n. 3., p. 197–202.
- LITSTER, J. (2017), Dispersion, Disintegration, and Dissolution. *Design and Processing of Particulate Products*. Cambridge: Cambridge University Press.
- LU, H.; GUO, X.; JIN, Y.; GONG, X. (2018), Effect of moisture on flowability of pulverized coal. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 133.
- OSMAN, K. T. Soils. (2013), Dordrecht: Springer Netherlands.
- PETRI, I.; ATAÍDE, C. H.; DUARTE, C. R.; TOLEDO, R. N.; MORAIS, A. S.; PANISSET, C. M.; SÁ, C. H. M. MARTINS, A. L. (2015), Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. *Offshore Technology Conference*.
- PETRI, I.; PEREIRA, M. S.; SANTOS, J. M.; DUARTE, C. R.; ATAÍDE, C. H.; PANISSET, C. M. Á. (2015), Microwave remediation of oil well drill cuttings. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 134, p. 23–29.
- REEDER, R. J. (1983), Carbonates: Mineralogy and Chemistry. New York: Stony Book.
- RETSCH. (2015), Sieve Analysis: taking a close look at quality. Haan: RETSCH.
- SCHULZE, D. (2008), Powders and Bulk Solids. New York: Springer.
- SEATON, S.; MORRIS, R. G.. (2005), Unique Drilling-Waste Handling and Transport System Offers Advantages to Drilling Operations and Assists Operators in Achieving Safety and Environmental Compliance. *SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference*.
- SINGER, A.; BARAKAT, Z.; MOHAPATRA, S.; MOHAPATRA, S. S. (2019), Nanoscale Drug-Delivery Systems. *Nanocarriers for Drug Delivery*, p. 395–419.
- TRAINA, K.; CLOOTS, R.; BONTEMPI, S.; LUMAY, G.; VANDEWALLE, N.; BOSCHINI, F. (2013), Flow abilities of powders and granular materials evidenced from dynamical tap density measurement. *Powder Technol.*, v. 235, p. 842–852.
- USP. (2018), The United States Pharmacopeia: the National Formulary. USP 41, NF ed. Rockville: The United States Pharmacopeia Convention.
- VESILIND, P.A. (1980), The Rosin-Rammler particle size distribution. *Resource Recovery and Conservation*, v. 5, n. 3, p. 275–277.
- WHO. (2012) Bulk density and tapped density of powders.
- XU, G.; LU, P.; LI, M.; LIANG, C.; XU, PA.; LIU, D.; CHEN, X. (2018), Investigation on characterization of powder flowability using different testing methods. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 92, p. 390–401.