



AValiação DO DESEMPENHO DE UMA CÉLULA DE DAWES UTILIZANDO AÇÚCAR VHP

M.M. SOUSA¹, L. MASSARO SOUSA¹ e J.T. FREIRE¹

¹ Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: jotefreire@gmail.com

RESUMO – Este trabalho tem por objetivo testar e avaliar o desempenho da célula de Dawes, utilizando como material particulado o açúcar VHP. Para tanto, foram analisadas algumas variáveis que podem influenciar na reprodutibilidade das medidas, como: o efeito da compactação do pó no corpo da célula, a quantidade de massa mínima no esqueleto da tampa de consolidação e a influência do tipo de material do fio. Os resultados mostraram que o processo de compactação e a existência de uma massa mínima na tampa de consolidação são condições necessárias para a reprodutibilidade das medidas de tensões de cisalhamento da célula, e que o material do fio utilizado não foi significativo nas medidas. Por fim, foi ponderado o uso da célula como um equipamento para avaliação da escoabilidade de materiais particulados sob baixas tensões de consolidação.

1. INTRODUÇÃO

Em indústrias dos mais diversos setores, etapas que envolvem o escoamento de sólidos particulados geralmente são gargalos em um processo produtivo, visto que as características do escoamento dependem das propriedades do material, das interações com a parede dos equipamentos, entre outros. Em linhas gerais, o escoamento de um sólido particulado ocorre quando as forças restritivas, devido ao atrito partícula-partícula, partícula-parede, etc., são superadas por uma força cisalhante, com direção e sentido igual à do escoamento.

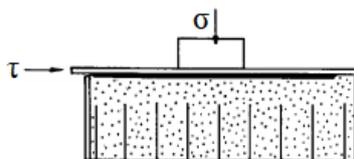
Na Figura 1 é mostrado um esquema de uma célula de Dawes, no qual sólidos particulados são colocados em escoamento por meio da ação de uma tensão cisalhante (τ), sob diferentes tensões de consolidação (σ) aplicadas. Esse equipamento foi utilizado por Freitas (1996) para estimar o ângulo de fricção interna de esferas de vidro sob baixas tensões de consolidação (inferiores 1,2 kPa), contudo não foram encontrados trabalhos em literatura que utilizassem a célula de Dawes com materiais os quais possuíssem aplicação industrial. Além disso, a influência de variáveis estruturais da célula na reprodutibilidade das medidas de tensão cisalhante ainda não foi avaliada.

Assim, o presente trabalho possui o objetivo de testar o uso da célula de Dawes e avaliar seu desempenho quanto a um material particulado específico - o açúcar VHP. Esse material foi escolhido por ser produzido em larga escala em aplicações reais e por apresentar escoabilidade facilitada, alta granulometria e formato uniforme o que é interessante para uma primeira análise com a célula de Dawes. Para seguir a avaliação, o material foi analisado sob



cinco tensões de consolidação diferentes observando-se algumas variáveis que podem influenciar na reprodutibilidade das medidas com a célula: o efeito da compactação do pó no corpo da célula, a quantidade de massa mínima no esqueleto da tampa de consolidação, influência do tipo de material do fio.

Figura 1 – Esquema da célula de Dawes.

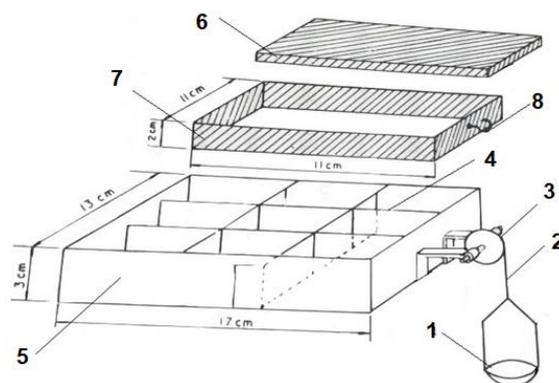


Fonte: adaptação de Brown e Richards (1970).

2. METODOLOGIA

Na Figura 2 são mostrados detalhes da construção da célula de Dawes utilizada.

Figura 2 – Célula de Dawes, em que: 1-Cesta; 2-Fio; 3-Polia; 4-Gradeamento interno; 5-Corpo da célula; 6-Tampa de consolidação; 7-Esqueleto da tampa de consolidação; 8-Haste.



Fonte: adaptação de Freitas (1996).

O equipamento, confeccionado em aço inox, consiste em um uma caixa retangular com 17 cm de comprimento, 13 cm de largura, altura de 3 cm e gradeamento com altura 2 cm no seu interior onde é alocada a primeira camada do pó. Além disso, tem-se um esqueleto quadrado com 11 cm de lado, no qual é colocada uma camada adicional do material particulado. Acima dessa segunda camada de pó é colocada uma tampa de aço inox cujo objetivo é consolidar o açúcar nessa região com diferentes tensões de consolidação. Por fim, nota-se que o esqueleto é tracionado por um sistema de fio, polias e pesos.

O açúcar VHP foi fornecido pela Usina São Martinho™, localizada na cidade de Jaboticabal-SP. O procedimento experimental consistia, inicialmente, em colocar uma primeira camada do açúcar - em torno de 400 g - no corpo da célula, e compactá-la manualmente por meio de batidas verticais, atentando-se em deixar uma fina película de 1 mm sobre o gradeamento interno. Em seguida, depositou-se a segunda camada de açúcar no

esqueleto da tampa de consolidação, com auxílio de um funil. A camada tinha em torno de 200 g, e sobre a mesma alocou-se a tampa de consolidação.

As tensões normais aplicadas à tampa de consolidação foram de 0,8; 0,6; 0,4; 0,2 e 0,13 kPa. Para atingir esses valores de tensão foram inseridos pesos acima da tampa de consolidação com massa de 819, 574, 330, 85 e 0 g respectivamente. A massa do esqueleto (66,67 g) e da tampa de consolidação (90,09 g) foram somadas aos pesos para o cálculo das tensões de consolidação. A área adotada foi a área da tampa de consolidação da célula (11x11 cm). A expressão que resume a tensão normal empregada é mostrada na Equação 1.

$$\sigma = \frac{m_{\text{esqueleto}} + m_{\text{tampa}} + m_{\text{pesos}}}{\text{Área}} \quad (1)$$

Para os experimentos, foram utilizados dois materiais diferentes de fio – lã e nylon – a fim de se avaliar a influência desses nas tensões de cisalhamento medidas. A cesta e a tampa de consolidação são interligadas por meio do fio, conforme mostrado na Figura 2. A tensão de cisalhamento mínima (τ) do material particulado foi calculada utilizando a Equação 2, em que $m_{\text{mín}}$ é a massa mínima colocada na cesta e a área é igual à da tampa de consolidação (121 cm²).

$$\tau = \frac{m_{\text{mín}}}{\text{Área}} \quad (2)$$

O procedimento para a determinação de τ consistia em inserir massas na cesta e verificar qual a massa mínima que deslocava a tampa de consolidação até a haste da célula de Dawes. Após a determinação de τ para cada tensão de consolidação aplicada, as massas de açúcar no esqueleto da tampa de consolidação e no corpo da célula foram quantificadas a fim de se avaliar a efeitos de compactação e rearranjo de partículas durante as medições das tensões. As medidas das tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada foram obtidas em quadruplicata e para todas as medidas de massas experimentais utilizou-se uma balança com precisão de $\pm 0,001$ g, modelo Gehaka BG-4000.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta algumas propriedades físicas e de escoabilidade do açúcar VHP.

Tabela 1 – Propriedades físicas e de escoabilidade do açúcar VHP.

X (b.s.)	d₁₀ (µm)	d₅₀ (µm)	d₉₀ (µm)	d_s (µm)	ρ_{ba} (kg/m³)	ρ_{bc} (kg/m³)	IH (-)	AoR^e (°)
0,15	320	691	880	648	900±10	1000±30	1,11±0,02 Excelente	36,8±0,5 Boa

Pelos valores dos diâmetros que representam 10, 50 e 90% da distribuição granulométrica da amostra (d₁₀, d₅₀ e d₉₀) e o diâmetro médio de Sauter (d_S) é possível perceber que o açúcar VHP possui granulometria relativamente alta. Além da granulometria, é possível perceber que a umidade de equilíbrio do açúcar é baixa, e que existe pouca diferença entre as densidades bulk aerada e compactada.

Embora neste trabalho não tenha sido feita uma análise sobre o formato do açúcar VHP, este mesmo açúcar foi avaliado por Santos (2017). Segundo a autora, a microscopia eletrônica de varredura evidenciou para as partículas deste material formatos homogêneos e cúbicos. Isto justifica a pouca variação da densidade bulk aerada e compactada mostrada na Tabela 1, possivelmente com pouca mudança no arranjo das partículas via compactação pelo próprio peso das partículas. Quanto à escoabilidade, o açúcar VHP foi tido como excelente segundo o IH, e como bom segundo o AoRe. Valores similares para esses índices de escoabilidade foram obtidos por Santos (2017).

A célula de Dawes foi utilizada na literatura até então para avaliar ângulos de fricção interna de esferas de vidro sob baixas tensões de consolidação (Freitas, 1996). As caracterizações físicas e de escoabilidade do açúcar VHP sugeriram que esse material poderia ser interessante para uma primeira análise com a célula de Dawes, pois é um material bem-comportado, com escoabilidade facilitada, alta granulometria e formato uniforme, mas largamente presente em aplicações reais.

Por meio de testes preliminares determinou-se que o máximo de tensão normal suportada pela célula, nas configurações mostradas na Figura 2, era de cerca de 0,8 kPa. Assim, os resultados que serão apresentados dizem respeito a um equipamento trabalhando a baixas tensões de consolidação. Notou-se que a reprodutibilidade das medidas de tensão de cisalhamento dependiam que algumas condições experimentais fossem obedecidas.

A primeira destas condições consistia na compactação no corpo da cela. Na Tabela 2 é possível verificar a influência da compactação na reprodutibilidade das tensões cisalhantes para tensões normais de consolidação de 0,8 e 0,6 kPa. Os ensaios foram realizados sob duas circunstâncias: i) com densidade bulk aerada, denominada de “sem compactação” e ii) com densidade bulk próxima à compactada, denominada de “com compactação”.

Tabela 2 – Resultados das análises quanto a influência da compactação.

	Sem compactação			Com compactação	
	σ (kPa)	τ (kPa)	Desvio (%)	τ (kPa)	Desvio (%)
Teste 1	0,8	171,6	28	310,6	0,2
Teste 2	0,8	277,9		311,2	
Teste 3	0,6	122,6	38	239,9	0,7
Teste 4	0,6	212,5		237,5	

É possível observar na Tabela 2 a baixa reprodutibilidade das tensões de cisalhamento quando não há compactação no corpo da célula. Em contrapartida, notaram-se baixos desvios (inferiores a 1%) quando o procedimento de compactação foi realizado. Na Tabela 3 é possível perceber o que ocorre com as massas medidas em cada um dos testes realizados.

Para cada um dos testes, a massa inicial na célula era igual a 500g, sendo 400g alocados na 1ª camada (corpo da célula) e 100g alocados na 2ª camada (esqueleto da tampa de consolidação). As perdas de massa durante os testes (m_p) devem-se aos movimentos bruscos ao deslizar uma camada de açúcar sobre a outra, contudo estas perdas foram inferiores 5%. Conforme mostrado na Tabela 3, ao final dos experimentos notou-se que a maior parte do açúcar foi direcionado para a 1ª camada, diferentemente do observado nos testes com

compactação do açúcar no corpo da célula. Neste contexto, o processo de compactação surge como uma forma de diminuir os espaços vazios para acomodação da segunda camada sobre a primeira e, conseqüentemente, possibilita a permanência de uma maior quantidade de massa no esqueleto da tampa de consolidação. Assim, o processo de compactação promove a estabilidade da célula de Dawes.

Tabela 3 – Massas finais das duas camadas na célula de Dawes.

	Sem Compactação (g)			Com Compactação (g)		
	1ªcamada	2ªcamada	m _p	1ªcamada	2ªcamada	m _p
Teste 1	472,7	17,6	9,7	436,3	60,4	3,3
Teste 2	477,5	15,5	7,0	433,3	61,3	5,4
Teste 3	468,8	19,1	12,1	424,6	56,6	18,8
Teste 4	477,1	12,5	10,4	430,3	50,6	19,1

Além disso, comparando-se as Tabelas 2 e 3, constata-se que a baixa reprodutibilidade dos processos sem compactação é devido à pouca quantidade de material presente no esqueleto da tampa de consolidação, evidenciando a necessidade de uma massa mínima na 2ª camada para a reprodutibilidade das medidas utilizando a célula de Dawes. Essa mínima quantidade pode ser vista como uma segunda condição a ser respeitada para se alcançar a reprodutibilidade, de modo que foi estimado que é necessário cerca de 35% dos 100 g alocados no esqueleto a fim de se obter tensões consistentes.

Quanto à análise do tipo de material do fio utilizado, a Tabela 4 mostra as tensões de cisalhamento obtidas para as tensões normais aplicadas na célula para os dois diferentes tipos de fio. Observa-se que os desvios padrões foram baixos, em geral inferiores a 10% do valor da medida, evidenciando que a célula apresenta uma reprodutibilidade satisfatória independentemente do material do fio empregado.

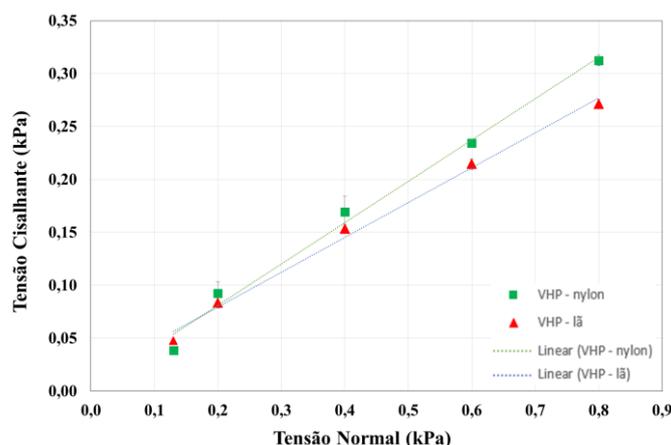
Tabela 4 – Tensões cisalhantes para dois materiais diferentes de fio – nylon e lã.

σ (kPa)	VHP - Nylon		VHP - lã	
	τ (kPa)	Desvio (%)	τ (kPa)	Desvio (%)
0,8	0,315 ± 0,005	1,5	0,274 ± 0,004	1,6
0,6	0,237 ± 0,001	0,5	0,217 ± 0,005	2,2
0,4	0,172 ± 0,001	8,7	0,156 ± 0,004	2,6
0,2	0,090 ± 0,010	11,2	0,086 ± 0,005	5,4
0,13	0,041 ± 0,001	0,3	0,050 ± 0,001	0,7

A Figura 3 mostra o comportamento destas mesmas tensões cisalhantes em função das tensões normais aplicadas para o açúcar VHP, para os dois tipos de materiais de fio utilizados. Observa-se o comportamento linear da tensão cisalhante em função da tensão normal aplicada à tampa de consolidação. O pequeno afastamento das duas retas pode ser decorrente do atrito existente entre o fio e a polia ao ocorrer a transferência de movimento, contudo, é possível afirmar que o tipo de fio exerce pouca influência nas medidas. Os desvios entre as tensões de cisalhamento medidas com o fio de nylon e o lã foram inferiores a 10%.

O coeficiente angular das retas mostradas na Figura 3 é chamado de ângulo efetivo de fricção interna. Para o açúcar VHP, tem-se que o valor obtido foi de $20,8^\circ$, medido sob tensões de consolidação entre 0,1 e 0,8 kPa. Não foram encontrados trabalhos na literatura que possibilitassem a comparação desse valor. Apesar disso, Freitas (1996) reporta um valor de $33,1^\circ$ para esferas de vidro, sob tensões de consolidação entre 0,2 e 1,2 kPa, bem como mostra dados com comportamento linear similares aos da Figura 3.

Figura 3 – Tensão cisalhante em função da tensão normal com fios lã e nylon.



Em vista do comportamento linear apresentado pelas esferas de vidro e VHP, bem como pelos materiais apresentarem diferentes valores de inclinação da reta, infere-se que as medidas em célula de Dawes podem ser capazes de qualificar diferentes tipos de materiais. A fim de constatar a proposição levantada, outros estudos serão realizados utilizando diferentes tipos de materiais.

4. CONCLUSÕES

As medidas de tensão de cisalhamento com açúcar VHP foram reprodutíveis utilizando uma célula de Dawes sob baixas tensões de consolidação. A realização da compactação do material particulado no corpo da célula e a presença de uma massa mínima no esqueleto da tampa de consolidação, para o açúcar VHP igual 35 g, são condições necessárias para a estabilidade e reprodutibilidade das medidas com a célula. Os resultados apontam que a célula de Dawes pode ser capaz de qualificar materiais diferentes com diferentes valores de inclinação de reta, contudo outros estudos são necessários para comprovar essa proposição.

5. REFERÊNCIAS

- BROWN, R.L.; RICHARDS, J.C. Principles of Powder Mechanics. Pergamon Press, 1970.
- FREITAS, L.A.P. Fluidodinâmica e transferência de calor em leite de jorro com alimentação contínua. Tese de doutorado - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos - SP, 1996.
- SANTOS, L.C. Obtenção das propriedades de fluxo de diferentes tipos de açúcares. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos - SP, 2017.