

**Efeito da umidade na aptidão ao escoamento dos diferentes tipos de açúcar comercial****Effect of humidity on the flowability of different types of commercial sugar**

DOI:10.34117/bjdv5n9-054

Recebimento dos originais: 18/07/2019

Aceitação para publicação: 10/09/2019

**Pâmela Marques da Silva**

Graduação em Engenharia Química pelo Centro Universitário FEI

Instituição: Centro Universitário FEI - Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros

Endereço Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 - Assunção, São Bernardo do Campo - SP, Brasil, CEP 09850-901

E-mail: pamelamaarques@hotmail.com

**Maria do Carmo Ferreira**

Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos.

Instituição: Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos

Endereço: Rod. Washington Luís, km 235, Caixa Postal 676. 13565-905, São Carlo, SP

Email: mariaf@ufscar.br

**Rodrigo Condotta**

Doutor em Engenharia Química pelo Instituto Nacional Politécnico de Toulouse – INP (França)

Instituição: Centro Universitário FEI - Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros

Endereço Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 - Assunção, São Bernardo do Campo - SP, Brasil, CEP 09850-901

E-mail: rcondotta@fei.edu.br

**RESUMO**

O açúcar é uma importante matéria prima na indústria de bebidas, doces, lácteos e também em produtos de panificação. O açúcar é atualmente comercializado de várias formas, dentre as quais citam-se: cristal, mascavo, refinado, confeiteiro, demerara, orgânico, VHP ("very high polarization"), sendo este destinado exclusivamente à exportação. Durante o manuseio doméstico de açúcar é comum observar a formação de aglomerados ou mesmo empedramento total de uma embalagem de açúcar, entretanto esta quantidade é ínfima quando comparada com a escala industrial, onde estes mesmos problemas são preocupantes. Tais fenômenos podem causar dificuldades de transporte e manuseio nas operações de descarga, empacotamento e armazenamento, resultando em prejuízos econômicos e eventual perda de qualidade do produto. A origem deste problema está ligada ao surgimento de forças de resistência ao escoamento como consequência das diferentes propriedades físicas do próprio material, tais como diferenças na granulometria, formato e rugosidade de superfície das partículas, ou mesmo devido a variações nas condições de processamento ou armazenamento do produto. O objetivo desse trabalho foi avaliar a escoabilidade de 5 tipos de açúcar (cristal,

VHP, refinado, confeito e demerara) com base em medidas experimentais cisalhamento e compressão e análises de índices de escoabilidade, no intuito de se identificar como estas propriedades são afetadas pela incorporação de umidade na amostra.

**Palavras-chaves:** Açúcar, Coesão, Umidade, Escoabilidade, Cisalhamento Granular

## ABSTRACT

Sugar is an important raw material in the beverage, candy, dairy industry and also in bakery products. Sugar is currently marketed in various forms, among which are: crystal, brown, refined, confectioner, demerara, organic, very high polarization (VHP), which is intended exclusively for export. During domestic sugar handling it is common to observe the formation of clumps or even total blockage of a sugar package, however this amount is very small compared to the industrial scale, where these same problems are of concern. Such phenomena can cause transportation and handling difficulties in unloading, packaging and storage operations, resulting in economic losses and eventual loss of product quality. The origin of this problem is linked to the emergence of flow resistance forces as a result of the different physical properties of the material itself, such as differences in particle size, shape and surface roughness, or even due to variations in the processing or storage conditions of the material. The objective of this work was to evaluate the flowability of 5 types of sugar (crystal, VHP, refined, confectioner and demerara) based on experimental shear and compression measurements and flowability analysis, in order to identify how these properties are affected by incorporation of moisture in the sample.

**Keywords:** Sugar, Cohesion, Moisture, Flowability, Granular Shear

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, pouco mais de 2/3 da produção brasileira de açúcar é destinada à exportação, na forma de açúcar tipo Very High Polarization (VHP), que é utilizado como insumo no processo de refino, específico de cada país.

Apesar de apenas 1/3 da produção permanecer em território nacional, distribuído entre as indústrias de atacado e varejo, esta quantidade é bastante significativa, visto que o Brasil é o quarto maior consumidor mundial de açúcar (MAPA, 2017). Este consumo se dá nas mais variadas formas na qual açúcar é disponibilizado no mercado brasileiro, visto que se trata de uma matéria prima comumente utilizada por indústrias do setor alimentício, tais como bebidas, produtos de panificação, confeitos, *snacks*, etc.

Estes diferentes tipos de açúcar comerciais disponíveis no mercado são diferenciados pelas etapas adicionais de processamento ao qual ele é submetido, dependendo das características e finalidade específica que se deseja obter, qualificando o produto e agregando maior valor comercial. Dentre os diferentes tipos de açúcares comerciais, tem-se o açúcar refinado (muito utilizado como adoçante de mesa pelos brasileiros), cristal, mascavo, confeito, impalpável, entre outros.

Durante o manuseio doméstico destes diferentes tipos de açúcar, é notável as diferenças no comportamento dos mesmos, principalmente no que se refere a maneira com que eles fluem e na tendência a “empedrar” no recipiente de armazenamento ou na própria embalagem original. Da mesma forma, porém numa escala muito maior, estes fenômenos também são observados nos processos industriais, não só para o açúcar, mas para qualquer outro material granular ou pulverulento.

Assim sendo, independentemente da natureza química do material particulado, características das partículas que o constitui influenciam na maneira em que o conjunto como um todo irá escoar (fluir). Desta forma, os diferentes tipos de açúcar requerem condições diferenciadas ao longo de seu manuseio, processamento, transporte e armazenamento (Condotta, 2017).

O escoamento de uma partícula está relacionado a uma deformação sofrida pelo material como resultado de uma tensão cisalhamento nele atuante. Esta tensão de cisalhamento seria uma dada força que se sobressai às demais forças de resistência a este escoamento (movimento). No estudo de sólidos granulares e pulverulentos, as forças gravitacionais, forças de atrito entre as partículas, forças intermoleculares (coesão e atração entre as partículas), e forças de adesão entre as partículas e a parede do equipamento/dispositivo que as contem, são consideradas para a definição da força de resistência ao escoamento (Juliano; Barbosa-Cánovas, 2010). O resultado obtido da análise dessas forças em um sistema pode indicar o quão apto o material está para o escoamento, ou seja, se escoar com facilidade, com dificuldade ou ocorre ausência de escoamento.

A intensidade dessas forças depende de inúmeras características das partículas, como por exemplo, o tamanho, rugosidade de superfície e formato de partícula (Campos; Ferreira, 2013), ou ainda, fatores relacionados ao ambiente de estocagem (Fitzpatrick; Ahrné, 2005). Neste caso, materiais higroscópicos ou contendo certo teor de umidade, a incorporação de água em sua composição pode afetar significativamente as propriedades de escoamento, pois a água é adsorvida na superfície da partícula, e qualquer alteração na superfície influencia na intensidade de coesão (Fitzpatrick *et al.*, 2004).

A consolidação do material durante o tempo de armazenamento, muitas vezes também é referido como grande problema ao se manusear pós, devido ao fenômeno de aglomeração (*caking*), geralmente causado pela umidificação da superfície da partícula, resultando na sua plastificação e por vezes a dissolução. Isto acontece especialmente para as superfícies amorfas, ou seja, que não possuem forma geométrica específica (Montes, *et al.* 2010).

Caso o fenômeno de aglomeração seja observado durante a etapa de armazenamento, um processo de moagem se faz necessário para transformar os aglomerados formados em partículas individuais ou aglomerados menores. Entretanto em alguns casos, um novo processo de moagem pode destruir a estrutura original das partículas, fazendo-se necessárias outras técnicas mais sofisticadas de separação das partículas, ou até, manualmente (Hartmann; Palzer, 2011).

Para reduzir os custos de processamento, pós-tratamento e aumentar a qualidade dos produtos finais, as indústrias que processam os mais variados tipos materiais particulados devem conhecer as principais propriedades físicas de seus insumos e as condições às que eles são submetidos em seus equipamentos, para evitar qualquer tipo de problemática no que se refere a má fluidez ou até mesmo interrupção do fluxo produtivo (Campos; Ferreira, 2013)

Desta forma, visto que os diferentes tipos de açúcar comerciais são submetidos a processos diferenciados, que confere a cada um deles propriedades diferentes, estes apresentarão diferentes aptidões ao escoamento. Sua classificação segundo esta propriedade é indispensável para identificar os processos compatíveis ou de adequação. Além disso, seu comportamento perante o teor de umidade nele contido permitirá inferir sobre o processo caking ao longo da etapa de armazenamento, que é um problema comumente observado no açúcar.

## **2. METODOLOGIA E RESULTADOS**

As principais propriedades físicas inerentes à aptidão ao escoamento dos diferentes tipos de açúcares comerciais foram obtidas segundo técnicas de análise granulométrica, picnometria, compactação, ensaios de cisalhamento granular e análise de teor de umidade, as quais empregaram amostras de: açúcar VHP fornecido pela *Usina São Martinho*, açúcar Refinado, Confeiteiro (Glaçúcar) e Demerara comerciais, da marca comercial *União*, e o Cristal da marca *Colombo*.

As amostras foram subdivididas em dois grupos: Grupo A – referente aos açúcares secos, ou seja, com umidade normalizada para o consumo ou aplicação; Grupo B – referente aos açúcares umidificados em ambientes herméticos contendo solução aquosa saturada de cloreto de sódio por um período de 15 dias. Todas as amostras foram submetidas à mesma sequência de testes à temperatura ambiente de 25°C.

**2.1 GRANULOMETRIA E CONTEÚDO DE UMIDADE**

Para a determinação do tamanho das partículas dos açúcares testados, utilizou-se o analisador por difração à laser modelo Bluewave, da marca MicroTrac, empregando-se o método de análise por via seca. Já o conteúdo de umidade foi determinado com auxílio do analisador de umidade por infravermelho IV-2000 da marca Gehaka. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tamanho e conteúdo de umidade para as amostras secas e úmidas

<b>Material Seco</b>	<b>Cristal</b>	<b>Refinado</b>	<b>Confeiteiro</b>	<b>Açúcar VHP</b>	<b>Demerara</b>
d <sub>[4,3]</sub> – vol. (µm)	657	334	161	740	755
Umidade b.u. (%)	0,20	0,20	0,70	0,20	0,20
<b>Material Úmido</b>	<b>Cristal</b>	<b>Refinado</b>	<b>Confeiteiro</b>	<b>Açúcar VHP</b>	<b>Demerara</b>
Umidade b.u. (%)	0,40	0,90	1,8	0,30	0,50
Incremento (%)	100%	350%	157%	50%	150%

Estes parâmetros são importantes pois a presença de água em meio particulado intensifica forças de coesão devido à intensidade das pontes líquidas, as quais também são função da granulometria do açúcar (Duffy; Puri, 1996). Rogé e Mathlouthi (2003) verificaram em seus trabalhos que amostras de açúcar constituídas de partículas com tamanho inferior a 0,25 mm ou contendo mais de 10% de partículas inferiores a este tamanho apresentavam uma redução na capacidade de fluxo, e que a incorporação de umidade era um agravante extra e, que neste caso, a natureza do açúcar também é um fator preponderante à granulometria.

**2.2 DENSIDADES BULK AERADA E COMPACTADA**

Diferente da densidade ou massa específica real, que caracteriza a partícula, a densidade bulk representa a densidade de um conjunto de partículas, ou seja, um leito constituído por um conjunto de partículas. Assim, o volume ocupado por uma determinada massa de leito irá depender da maneira como as partículas se acomodam e isso estará relacionado com a condição na qual o leito foi formado (vibrações, segregação, etc.), ao atrito entre as partículas (que permitem o deslizamento de umas sobre as outras), às forças internas de coesão (que permitem inferir sobre a tendência na formação de aglomerados), o formato das partículas e outros fatores. O teor de umidade do material pode alterar a densidade bulk uma vez que se intensificam as forças de coesão devido a presença de pontes líquidas e diminui a porosidade desses materiais (Scicolone *et al.*, 2015).

A densidade aerada (*bulk*) e compactada (*tap*) foram obtidas através da análise experimental com o auxílio do equipamento Atuo Tap, modelo Tap-2S, na marca Logan Instruments, segundo a norma USP-I. O método consiste em colocar certa massa de amostra em um recipiente volumétrico (proveta) de massa conhecida, e submeter o sistema (material + proveta) à um número de batidas programado pelo operador. O volume da proveta padronizado para este estudo foi de 80mL, e a partir dele e da massa de material, foi possível obter a densidade aerada, e o volume obtido após um total de 2000 batidas em relação a massa do material, calculou-se a densidade *bulk*, conforme Equação 1 e 2, e os resultados são apresentados na Tabela 2.

$$\rho_{bulk\ aerada} = \frac{m_{leito\ aerado}}{V_{leito\ aerado}} \quad (1)$$

$$\rho_{bulk\ compactada} = \frac{m_{leito\ compactado}}{V_{leito\ compactado}} \quad (2)$$

A alteração de densidade devido à compactação pode ser um índice da presença de forças de atração e de fricção e é comumente utilizada como um indicativo da fluidez de materiais particulados, denominada Índice de Hausner, através da Equação 3, e classificados de acordo com a literatura do método, cuja classificação também se encontra na Tabela 2.

$$Hr = \frac{\rho_{bulk\ compactada}}{\rho_{bulk\ aerada}} \quad (3)$$

Tabela 2 - Densidades bulk (aerada) e compactada das amostras secas

<b>Material Seco</b>	<b>Açúcar Cristal</b>	<b>Açúcar Refinado</b>	<b>Açúcar Confeiteiro</b>	<b>Açúcar VHP</b>	<b>Açúcar Demerara</b>
$\rho_{compactada}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,997 ±0,002	0,833 ±0,002	0,679 ±0,006	0,957 ±0,009	0,958 ±0,015
$\rho_{aerada}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,938 ±0,008	0,719 ±0,002	0,598 ±0,018	0,897 ±0,010	0,928 ±0,023
Classificação do Fluxo	Excelente	Bom	Bom	Excelente	Excelente

Tabela 3 - Densidades bulk (aerada) e compactada das amostras úmidas

Material Úmido	Açúcar Cristal	Açúcar Refinado	Açúcar Confeiteiro	Açúcar VHP	Açúcar Demerara
$\rho_{compactada}(g/cm^3)$	0,978 $\pm 0,021$	0,735 $\pm 0,037$	0,644 $\pm 0,003$	0,901 $\pm 0,014$	0,869 $\pm 0,053$
$\rho_{aerada}(g/cm^3)$	0,935 $\pm 0,043$	0,623 $\pm 0,047$	0,531 $\pm 0,011$	0,834 $\pm 0,109$	0,781 $\pm 0,155$
Classificação do Fluxo	Excelente	Bom	Razoável	Excelente	Bom

Observa-se que apesar da diferença de umidade, de acordo com o índice de Hausner, não houve alteração da classificação do fluxo, exceto para os Açúcares Confeiteiro e Demerara que mudaram de “Bom” para “Razoável” e “Excelente” para “Bom”, por ser o que mais agregou umidade, aumentando a incidência de formação de aglomerados entre as partículas no leito. Santos *et al.* (2017) atribuiu este fato ao baixo índice de saturação capilar em função da quantidade de umidade presente nos interstícios das amostras quando em equilíbrio com a umidade ambiente, os quais se encontram no primeiro estado de capilaridade, denominada estado “funicular”.

Entretanto, a morfologia das partículas dos diferentes tipos de açúcares começa a influenciar no comportamento quando estes atingem o equilíbrio em ambiente saturado pela solução salina, conforme também apontado por Rogé e Mathlouthi (2003). Observa-se que os açúcares Demerara e VHP, cuja granulometria e umidade inicial são similares, adquirem teores de umidade distintos, implicando numa piora na propriedade de escoamento do açúcar Demerara. Já a piora no fluxo do açúcar confeiteiro se deve basicamente à granulometria reduzida, conforme apontada nos trabalhos de Montes *et al.* (2010).

### 2.3. REÔMETRO DE PÓ FT-4

O reômetro de pó FT4 da marca Freeman usa o princípio da mensuração da energia necessária para garantir o movimento constante de uma lâmina num trajeto helicoidal através de um leito de pó. Uma ampla gama de padrões de fluxo e taxas de fluxo pode ser alcançada dependendo da direção e velocidade de movimento. Todas as forças que atuam sobre a pá, incluindo a força axial e a força de rotação ou o binário, são medidas. Estes dados são utilizados para calcular o trabalho realizado no deslocamento do pó - a base da avaliação da fluidez. Em contraste com os métodos tradicionais que geram um único número de resultados, esta abordagem reconhece a natureza complexa dos pós e a necessidade de avaliar as

propriedades de fluxo em relação às muitas variáveis-chave, incluindo a taxa de fluxo, aeração, consolidação e teor de umidade.

**Função de Fluxo (FF):** A função de fluxo é determinada através do teste de cisalhamento no Reômetro de pós FT-4, as quais foram realizadas neste trabalho sob as tensões de consolidação de 3, 6, 9 e 15 kPa. Após a etapa de consolidação, inicia-se a etapa de cisalhamento propriamente dita, em 5 tensões normais inferiores à de consolidação. A medida que o leito resiste à rotação da cabeça de cisalhamento, a tensão de cisalhamento aumenta até o leito falhar ou romper, situação em que é observada na máxima tensão de cisalhamento. Em seguida, a amostra é consolidada novamente e submetida à uma nova mensuração da tensão máxima de cisalhamento sob uma tensão normal inferior. O conjunto destas 5 tensões de cisalhamento máxima observada em cada tensão normal aplicada permite estimar plano de ruptura ou o “*yield loci*” (YL) para a dada tensão de consolidação da amostra. Cada plano de ruptura permite obter 2 círculos de Mohr, referente à tensão máxima de consolidação (MPS) e a tensão máxima de não confinamento ou “*unconfined yield locus*”, ou seja, fornece a máxima tensão que o material consegue suportar (UYL) para a referida compactação do material (MPS). Finalmente, o conjunto de “*yield loci*” permite obter todos os parâmetros necessários para a obtenção da função de fluxo (FF) de um material, que se trata de um conjunto de dados de *MPS* vs. *UYL*.

Na Figura 1 são apresentados alguns resultados do teste de cisalhamento, enfatizando a construção gráfica do plano de ruptura (YL) e os seus respectivos círculos de Mohr, para a obtenção do MPS e UYL.

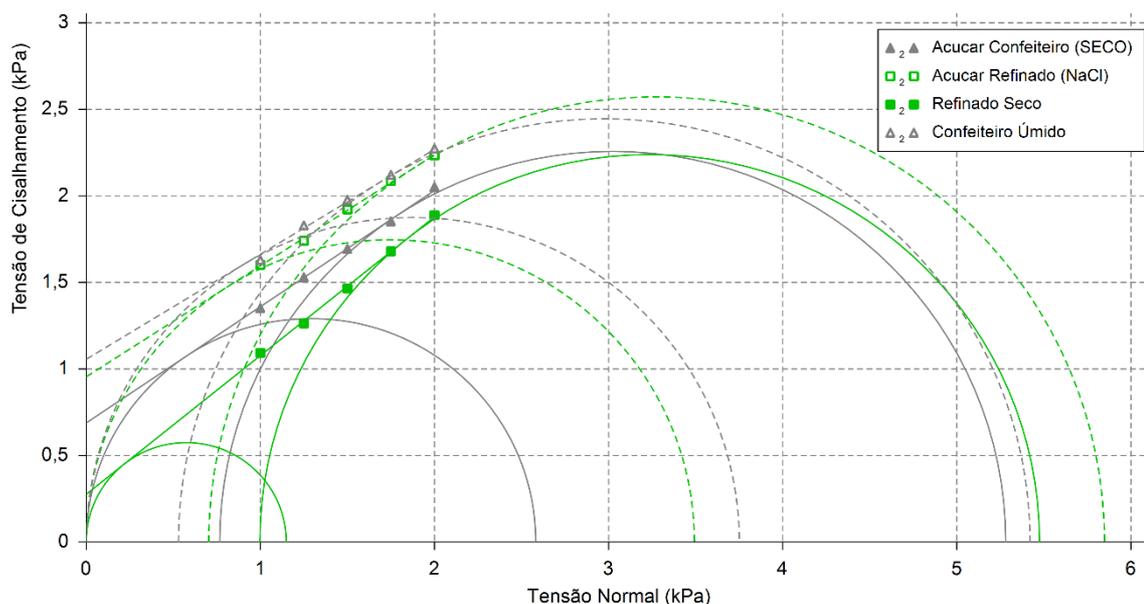


Figura 1: Planos de ruptura (“yield locus”) para açúcares refinado e confeiteiro, nas condições seca e úmida, e os respectivos círculos de Mohr para cada plano.

Nas Figura 2 e 3 são apresentadas as funções de fluxo (FF) dos diferentes tipos de açúcar na condição seco e úmido, respectivamente, bem como as delimitações das regiões de escoamento, representadas pelas linhas tracejadas nos gráficos. Estas regiões são estabelecidas pelos fatores de fluxo (ff) constantes, sendo a região de fluxo muito coesivo para  $ff < 2$ ; fluxo coesivo para  $2 < ff < 4$ ; fluxo fácil para  $4 < ff < 10$  e fluxo livre para  $ff > 10$ .

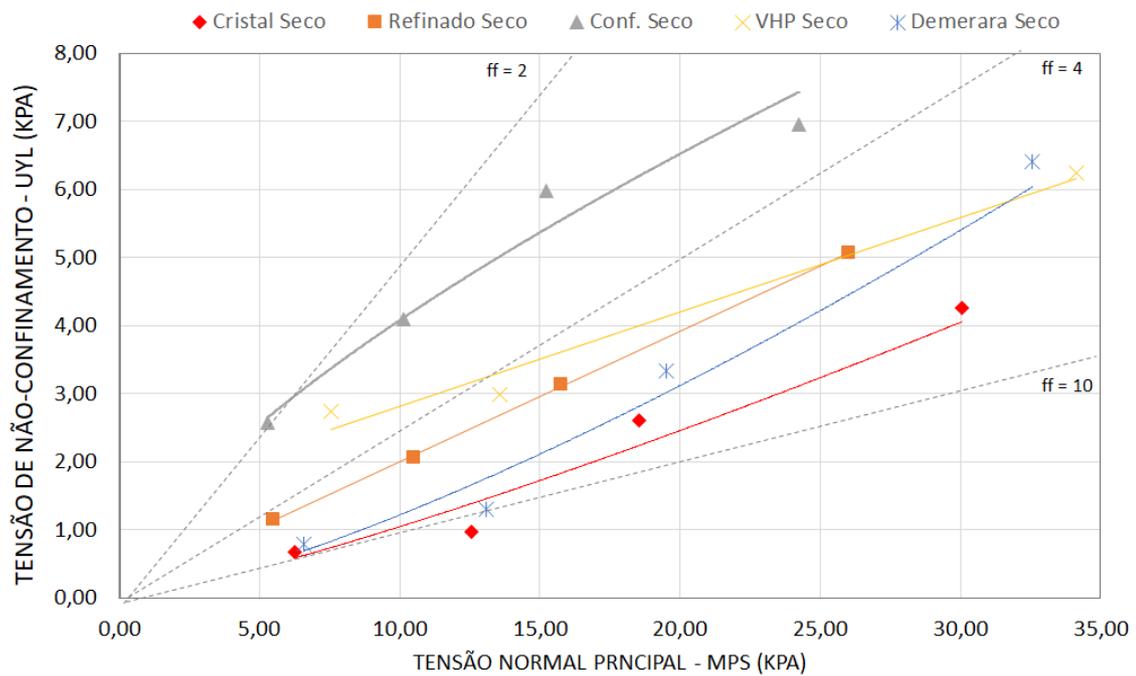


Figura 2 - Função de fluxo para as amostras secas de açúcar.

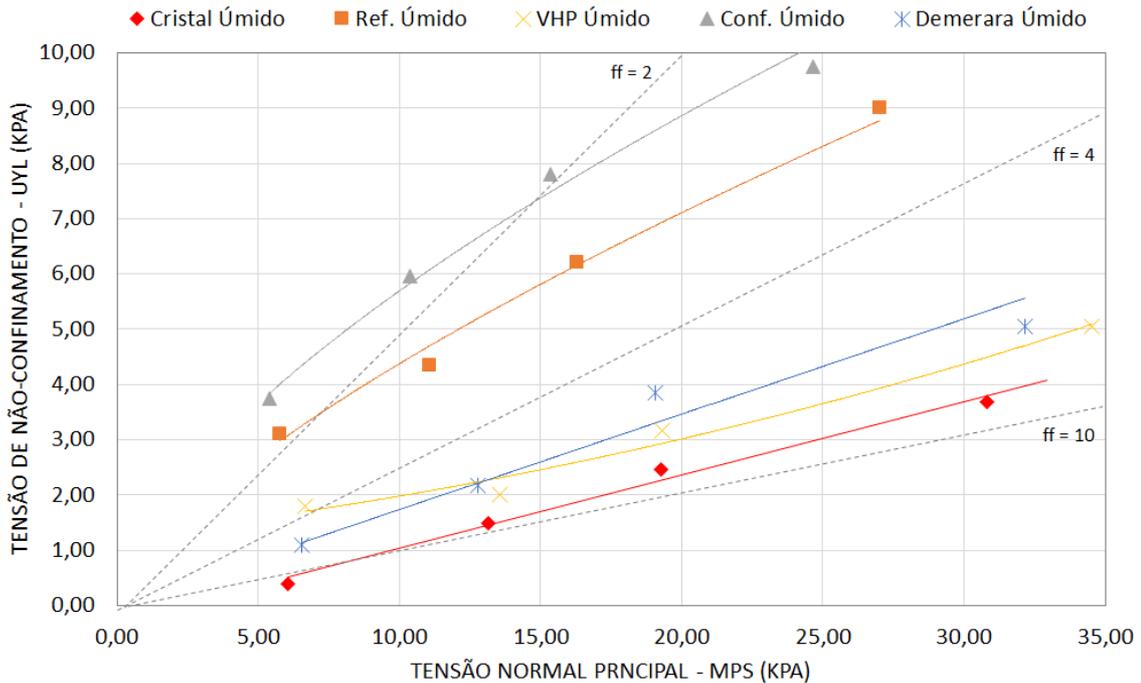


Figura 3 - Função de fluxo para as amostras úmidas de açúcar.

Observa-se o açúcar Confeiteiro é o que apresenta a pior condição de fluxo, próximo à região de fluxo coesivo ( $ff < 2$ ), chegando a adentrar nesta região quando úmido. Os açúcares Cristal e Demerara apresentaram as melhores condição de fluxo quando secos, e os açúcares tipo VHP e Refinado fluxos intermediários.

Quando umidificados por adsorção da umidade em ambiente saturado com solução de NaCl, um ligeira piora no fluxo de todos os açúcares é observada, sendo mais pronunciável para o açúcar Refinado e menor para os açúcares de maior granulometria. Santos (2017) atribui tal explicação ao fato de que um mesmo teor de umidade satura mais rapidamente os interstícios de uma mistura de açúcar de granulometria inferior.

As demais amostras, que apresentam praticamente a mesma granulometria, se comportaram de maneira diferente com o aumento do teor de umidade incorporado. Curiosamente, a função fluxo do açúcar VHP parece ter melhorado com o aumento da umidade, como se a umidade atuasse com lubrificante das partículas. Assim sendo, apenas a granulometria não é suficiente para explicar o comportamento destas amostras, uma vez que são obtidos por diferentes processos, conferindo às partículas diferentes formatos e texturas superficiais, conforme já apontado por Rogé e Mathlouth (2003).

Finalmente, as classificações do escoamento segundo o Índice de Hausner e a função de fluxo fornecem alguns resultados similares, mas divergem em outros. Assim, o Índice de

Hausner não deve ser utilizado como indicativo da condição de fluxo de materiais particulados.

Energia básica de fluxo (BFE), Índice de estabilidade (SI): O teste de estabilidade consiste de 7 ciclos onde uma lâmina torcida de geometria específica (48 mm de comprimento) permeia 160 ml de amostra com velocidade 100 mm/s e a energia dispendida em cada ciclo monitorada. A variação desta energia ao longo dos 7 ciclos constitui o índice de estabilidade. Já a energia básica de fluxo (BFE) é considerada pela energia dispendida pela lâmina durante o 7º teste, quando a amostra já encontra em condição estável. Os índices de estabilidade (SI) e a energia básica de fluxo (BFE) obtidos para cada tipo de açúcar nas diferentes condições são apresentados na Tabela 4.

### 3. CONCLUSÕES

Dentre os açúcares analisados, o Refinado e Confeiteiro foram o que absorveram mais umidade e, conseqüentemente, apresentaram as piores classificações segundo o índice de Hausner e os menores valores de BFE e piores Função de Fluxo. Os baixos valores de BFE se devem à formação de aglomerados vazios que oferecem menos resistência ao movimento da lâmina. Estes aglomerados, por sua vez, sofrem colapso quando submetidos à compressão, o que resultou nas maiores taxas de compressão destes mesmos açúcares.

Em relação aos açúcares de maior granulometria, o Demerara, Cristal e VHP, estes absorveram uma pequena quantidade de umidade, atribuída exclusivamente à granulometria das amostras. Entretanto, as classificações do comportamento de fluxo segundo os testes clássicos de compactação e de cisalhamento, os quais fornecem o Índice de Hausner e Função Fluxo, respectivamente, divergiram ligeiramente entre si. Isto infere que a morfologia e condições superficiais das partículas que constitui a amostras influenciam na maneira com que esta irá fluir. Testes de realizados com o reômetro de pó comprovaram o efeito da morfologia na energia básica de fluxo e no índice de estabilidade das amostras de açúcar, mas ainda necessitam de melhores interpretações.

Dada a dificuldade e complexidade de se realizar ensaios de cisalhamento para a obtenção da função de fluxo, a determinação do Índice de Hausner a partir da diferença das densidades aerada e comprimida por força externa, e não a tradicional compactada pelo próprio peso, pode ser uma abordagem mais confiável para se classificar o comportamento de fluxo de materiais particulados.

Tabela 4 - Parâmetros da energia de fluxo obtidos através para amostras secas e úmidas

Material	Energia Básica de Fluxo – BFE (mJ)		Índice de Estabilidade - SI	
	Seco	Úmido	Seco	Úmido
Açúcar Cristal	5325 ± 1059	5218 ± 2346	1,246 ± 0,124	1,116 ± 0,080
Açúcar Refinado	2530 ± 326	1099 ± 75	1,021 ± 0,063	0,923 ± 0,077
Açúcar Confeiteiro	1778 ± 118	1267 ± 17	1,025 ± 0,039	1,043 ± 0,051
Açúcar VHP	2714 ± 194	1973 ± 41	1,008 ± 0,049	0,962 ± 0,070
Açúcar Demerara	7658 ± 1313	2250 ± 331	1,251 ± 0,091	1,201 ± 0,130

Comparando os valores de BFE dos diferentes tipos de açúcar, verifica-se que as amostras secas possuem os valores dos parâmetros maiores aos das amostras úmidas, para todos os tipos de açúcar. Tal fato pode ser explicado pela diferença da configuração do leito nas amostras úmidas, a umidade aumenta as forças interparticulares entre as partículas formando os aglomerados, disponibilizando espaços vazios no interior leito e, devido à morfologia irregular das partículas, não permite a formação de um leito de partículas com arranjo organizado. Sendo assim, estes espaços vazios oferecem menor resistência à movimentação da lâmina, necessitando então de menor energia para movimentá-la através do leito de partículas, conforme relatado por Condotta e Machado (2015).

Apesar das amostras de açúcar Demerara e Cristal apresentarem tamanhos similares, seus comportamentos são distintos. Observa-se que a energia básica de fluxo e o índice de estabilidade do açúcar Demerara se assemelham ao do açúcar Cristal, que apresenta uma granulometria levemente inferior. Tal fato pode ser explicado pelo intertravamento mecânico oferecido pelas partículas destas amostras que apresentam um formato cúbico, necessitando assim de uma maior energia para forçar a passagem da lâmina através da mesma (Freeman, 2007).

Em termos do fluxo de estabilidade, uma pequena variação deste parâmetro foi observada quando as amostras são umidificadas, apresentando valores inferior a 1 para as mesmas

amostras de açucares (VHP e Refinado) que tiveram as maiores alterações na função de fluxo. Desta forma, conclui-se que a morfologia das partículas realmente tem influência nas propriedades de fluxo.

Índice de compressibilidade: A mudança na densidade do material em função da tensão normal aplicada foi medida e caracterizada como índice de compressibilidade. Cada tensão normal é aplicada durante um tempo definido para permitir que o leito alcance o equilíbrio. A distância percorrida pelo pistão é medida para cada tensão normal aplicada e a compressibilidade é calculada automaticamente como uma variação percentual no volume. Isto também pode ser representado como uma densidade absoluta ou relativa. Os dados obtidos dessa análise para as amostras secas e úmidas estão representados graficamente pela Figura 4.

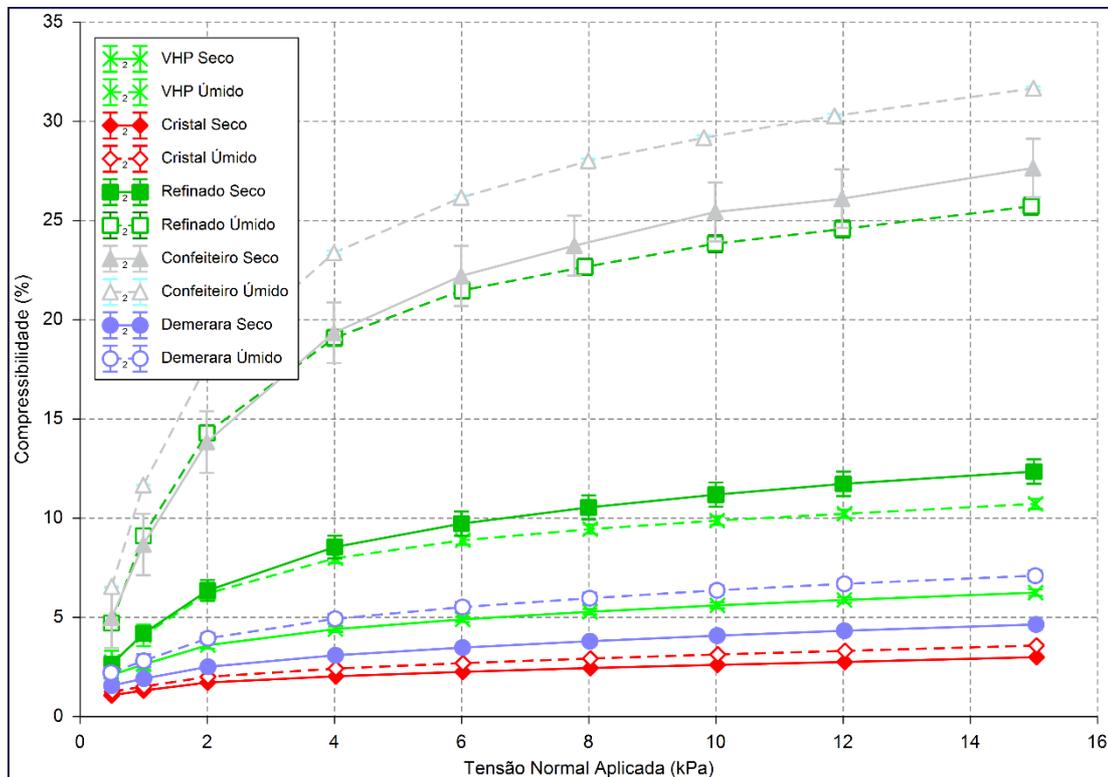


Figura 4: Perfil de compressibilidade para as amostras de açúcar secas e úmidas.

Verifica-se que para ambas condições das amostras (secas e úmidas) o açúcar Confeiteiro apresentou a maior taxa de compactação, isto pode ser explicado através da morfologia do material, que por possuir dimensões menores, tem maior tendência de formar aglomerados e maior facilidade de ocupar os espaços vazios presentes no leito, quando submetido à compressão, e isto é intensificado quando a amostra está úmida pois a intensidade dos

aglomerados é maior, resultando em um maior volume de vazios que são mais facilmente ocupados.

Os açúcares VHP, Demerara e Cristal, na análise seca, obtiveram o resultado esperado, as curvas assemelham-se, e são muito próximas, pois são partículas de dimensões muito próximas. No entanto nas amostras úmidas, o Açúcar Cristal manteve o perfil da curva, portanto conclui-se que a compressibilidade desse material é pouco afetada pela umidade presente no leito.

O açúcar Refinado foi o que obteve a maior diferença de porcentagem de compressibilidade, da amostra seca para a úmida, portanto conclui-se que este açúcar possui maior sensibilidade à umidade sob a influência de compactação, explicando então o “empedramento” do material quando submetido às condições comerciais de empilhamento, armazenamento e exposição às variações ambientes (supermercados), o que ocorre também para o Açúcar Confeiteiro, que se compacta com maior facilidade tanto em condições secas quanto úmidas.

Finalmente, é possível identificar duas regiões distintas na Figura 4, sendo a superior compreendida pelos açúcares Confeiteiro e Refinado, os mesmos que apresentaram as piores funções de fluxo. Assim, os aglomerados formados nestas amostras devido à umidade incorporada não foram colapsados no teste da compactação simples (AutoTap), mas sim no teste de compressão. Desta forma, sugere-se que os Índice de Hausner seja calculado a partir de um teste de compressão para que estes resultados sejam mais coerentes com a função fluxo.

### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento da bolsa de Iniciação Científica.

### REFERÊNCIAS

CAMPOS, M. M; FERREIRA, M C. A Comparative Analysis of the Flow Properties between Two Alumina-Based Dry Powders. **Advances in Materials Science and Engineering**. v. 2013. 2013.

CONDOTTA, R. **Coulabilité des poudres cohesives**, Presses Académiques Francophones, 2017. 272 p.

CONDOTTA, R.; MACHADO, C. S. Effect of particles size on flowability properties of particulate solids, **Récents Progrès en Génie des Procédés**, n. 107. 9 p., 2015

DUFFY, S. P.; PURI, V. M. Flowability parameters and flow functions for confectionery sugar and detergent powder at two moisture contents. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 12, n. 5, p. 601–606, 1996.

FITZPATRICK, J. J.; BARRINGER, S. A.; IQBAL, T. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. **Journal of Food Engineering**. v. 61, n. 3, p. 399–405, 2004.

FITZPATRICK, J. J.; AHRNÉ, L. Food powder handling processing: Industry problems, knowledge barriers and research opportunities. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 44, n. 2, p. 209-214, 2005.

FREEMAN, R. Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders - A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell. **Powder Technology**, v. 174, n. 1-2, p. 25–33, 2007.

FURL, C.; HOFFMANN, T. The influence of the granulometric condition on the flow characteristics of shredded grain products in their dependence on the duration of storage. **Powder Technology**, v. 235, p. 307-311, 2013.

HARTMANN, M.; PALZER, S. Caking of amorphous powders – Material aspects, modelling and applications, **Powder Technology**, v. 206, p. 112-121, 2011.

JULIANO, P.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Food Powders Flowability Characterization: Theory, Methods, and Applications. **Annual Review on Food Science Technology**. v. 1, n. 1, p. 211–239, 2010.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. **Cana-de-açúcar**, 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em 12 de fevereiro de 2017.

MONTES, E. C.; SANTAMARIA, N. A.; GUMY, J. C.; MARCHAL, P. Moisture-induced caking of beverage powders, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 91, p. 2582-2586, 2011.

ROGÉ, B.; MATHLOUTHI, M. Caking of white crystalline sugar. **International Sugar Journal**, v. 105, n. 1251, p. 128-136, 2003.

SANTOS, L. C., CONDOTTA, R., FERREIRA, M. C. Flow properties of coarse and fine sugar powders, **Journal of Food Process Engineering**, v. 41, n. 2, 10 p., 2017.

SCICOLONE, J.; METZGER, M.; KOYNOV, S.; ANDERSON, K.; TAKHISTOV, P.; GLASSER, B. J.; MUZZIO, F. Effect of Liquid Addition on the Bulk and Flow Properties of Fine and Coarse Glass Beads. **AIChE Journal**. 62. 2015.