

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA - DEQ

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**UMA REVISÃO SOBRE OS ATRIBUTOS DE
ESCOABILIDADE DE DIFERENTES
VARIEDADES DE AÇÚCAR**

Gustavo Fonseca Cambaúva

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof^a. Maria do Carmo Ferreira

São Carlos – SP

2020

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14 de outubro de 2020 perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Maria do Carmo Ferreira, DEQ/UFSCar

Convidado: Dr. Lucas Massaro Sousa, IFP Energies Nouvelles, Lyon, França

Professora da Disciplina: Alice Medeiros de Lima, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu núcleo familiar que viabilizou esse meu sonho de cursar Engenharia Química na UFSCar, meu pai Raul, minha mãe Paula, Marlene, minha avó, meu avô Roberto e minha irmã Rafaela. Também não poderia esquecer das minhas tias-avós Marilza, Marília e Yeda. O apoio emocional, afetivo e financeiro foram fundamentais para que eu concretizasse cada desafio dessa trajetória.

À professora Maria do Carmo pela orientação, dedicação, atenção e apoio integral em todas as atividades que desenvolvi com ela, seja em trabalhos, disciplinas de graduação e conclusão de curso. Uma excelente profissional e grande ser-humano que pude conviver nessa jornada.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Engenharia Química (DEQ UFSCar), sobretudo aqueles que tive a honra de assistir aulas e interagir de alguma forma. Em especial ao convidado Dr. Lucas Massaro Sousa, que gentilmente aceitou o convite de fazer parte da banca.

Aos meus familiares Marcela, Lucas e Rebeca, verdadeiros irmãos que apesar da distância sempre estiveram muito próximos nessa jornada. Aos meus parceiros de trabalho da Suzano SA, que sempre deram todo apoio nessa minha reta final de graduação.

À família que construí em São Carlos: Mateus, Matheus, Vinicius, João, Lucas, Klenia, Gabriela, Amanda, Laira, Mariana, Natália, Beatriz Pugliero, Beatriz Borges, Beatriz Buzelin, Joice e James. À Milena, Mirella, Alice e por fim Giovanna e Ana Helena. Todos esses são especiais de alguma forma e tiveram contribuição ímpar na minha adaptação e manutenção em São Carlos durante esses 5 anos.

No mais, meu muito obrigado mais sincero a cada citado, pois sem um pouco de cada um, nada disso seria possível.

RESUMO

O conhecimento das propriedades físico-químicas e de fluxo dos materiais particulados é importante para o correto dimensionamento e otimização de equipamentos da cadeia produtiva e aumento da eficiência da planta industrial. Na indústria sucroalcooleira, em específico no processo de produção de açúcar, o manuseio e transporte adequado dos açúcares produzidos pode ser beneficiado quando se conhece a influência das propriedades físico-químicas no escoamento das partículas. Com base na leitura, fichamento, análise de publicações, textos e artigos, este trabalho de revisão da literatura compilou dados experimentais de caracterização e avaliação de atributos de escoabilidade dos açúcares confeiteiro (IS), cristal (GS), refinado (RS) e o tipo exportação (VHP sugar – VS). Com os dados encontrados discutiu-se como as características físico-químicas afetam os índices de escoabilidade desses materiais particulados. A investigação de dados de massa específica real, porosidade do leito solto, densidade bulk (aerada e compactada), umidade e distribuição granulométrica e seus respectivos atributos: índice de Hausner, ângulo de repouso estático e dinâmico, função fluxo, índice de estabilidade e fluxo variável permitiu concluir que uma análise criteriosa de cada método experimental, de diferenças das condições de processamento, de matéria-prima, de temperatura ambiente e de umidade relativa é essencial para se entender possíveis diferenças e tendências de escoamento desses materiais particulados.

ABSTRACT

The knowledge of physicochemical properties and particulate material flow is important for correct scaling and equipment's optimization of production chain and increasing the mill's efficiency. The sugarcane sector, specifically in the sugar production process, the appropriate transport and manipulation of sugar production can be helped by knowing the physicochemical properties and their influences in the particles' flow. Based on reading, annotations, publications analysis, texts and articles, this revision of literature work compiled experimental datas of characterization and flow attributes' validation of icing sugar (IS), granulated sugar (GS), refined sugar (RS) and "very high polarization" (VHP) sugar (or VS). With the found data was discussed how the physicochemical characteristics influence the flowability index of these materials. The data investigation of real specific mass, porosity, bulk density (aerated or compacted), humidity and granulometric distribution and their respective attributes: Hausner index, static and dynamic repose angle, flow function, stability index and variable flow allowed to conclude that a careful analysis of every experimental method, different of processing conditions, raw material, environment temperature and relative humidity is essential to understand the possible differences and flowability tendencies of particulate materials.

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
NOMENCLATURA	2
LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABELAS.....	5
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	6
2. ABORDAGEM UTILIZADA	8
2.1. Materiais	8
2.2. Estratégia empregada.....	8
3. REVISÃO DA LITERATURA	9
3.1. Definições e conceitos básicos associados ao escoamento de sólidos particulados	9
3.2. Propriedades de leitos particulados e de partícula	10
3.2.1. Massa específica (ou densidade real) de uma partícula.....	11
3.2.2. Densidade bulk e porosidade do leito solto	11
3.2.3. Umidade dos materiais.....	13
3.2.4. Distribuição granulométrica e formato de partículas.....	14
3.2.5. Rugosidade de superfície	15
3.3. Forças em sólidos particulados	16
3.3.1. Forças de van der Waals.....	17
3.3.2. Forças eletrostáticas.....	18
3.3.3. Pontes Líquidas	19
3.4. Índices de escoabilidade	19
3.4.1. Fluxo de funil x fluxo de massa	19
3.4.2. Índice de Hausner.....	21
3.4.3. Ângulo de repouso.....	22
3.4.4. Ângulo de repouso estático	22
3.4.5. Ângulo de repouso dinâmico	24
3.4.6. Função Fluxo	25
3.4.7. Índice de estabilidade e fluxo variável.....	27
4. AVALIAÇÃO DA ESCOABILIDADE DE AÇÚCARES	30

4.1.	Açúcar: processo de fabricação	30
4.2.	Caracterização físico-química dos açúcares	32
4.2.1.	Massa específica real	32
4.2.2.	Distribuição granulométrica	33
4.2.3.	Porosidade do leito solto	35
4.2.4.	Densidade bulk	36
4.2.5.	Umidade	37
4.3.	Pesquisas sobre escoabilidade de açúcares	39
4.4.	Propriedades de fluxo dos açúcares	40
4.4.1.	Índice de Hausner	40
4.4.2.	Ângulo de repouso estático	42
4.4.3.	Ângulo de repouso dinâmico	43
4.4.4.	Função Fluxo	44
4.4.5.	Índice de estabilidade e fluxo variável	49
5.	COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES	56
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

NOMENCLATURA

AR	Ângulo de repouso, [°]
AR _d	Ângulo de repouso dinâmico, [°]
AR _e	Ângulo de repouso estático, [°]
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BFE	Energia básica de fluxo, [mJ]
CCI	Índice de compressibilidade de Carr
c	Coesão do material particulado
D	Diâmetro da placa de Petri (base fixa), [m]
D _i	Diâmetro médio das partículas retidas na peneira i, [m]
dp	Diâmetro de partícula, [m]
ε	Porosidade do leito de partículas
ε _{bc}	Porosidade do leito no de partículas estado compactado
FRI	Índice de fluxo variável
F _{vdw}	Forças de van der Waals
GS	Açúcar cristal
h	Altura do monte cônico no ensaio de AR _e , [m]
HR	Índice de Hausner
IS	Açúcar de confeitiro
m	Massa, [kg]
m _l	Massa do leito de açúcar, [kg]
N	Massa de água evaporada, [kg]
σ	Tensão normal aplicada, [N]
P	Massa total de amostra úmida, [kg]
ρ _b	Densidade <i>bulk</i> , [g/cm ³]
ρ _{ba}	Densidade <i>bulk</i> aerada, [g/cm ³]
ρ _{bc}	Densidade <i>bulk</i> compactada, [g/cm ³]
ρ _f	Densidade do fluido, [g/cm ³]
ρ _r	Densidade da partícula obtida por picnometria gasosa, [g/cm ³]
R	Raio das partículas, [m]
RH	Umidade Relativa (Relativity Umidity)
RS	Açúcar refinado

SI	Índice de Estabilidade
S	Grau de saturação de água presente no leito
τ	Tensão cisalhante, [N]
μ	Coeficiente de atrito interno
u.b.u	Umidade média em base úmida
V	Volume, [m ³]
V_{la}	Volume do leito aerado, [m ³]
V_{lc}	Volume do leito compactado, [m ³]
V_s	Volume total de sólido desprezando espaços vazios, [m ³]
V_t	Volume total do leito compactado, [m ³]
VHP / VS	“very high polarization” – açúcar tipo exportação
x_i	Fração mássica retida na peneira i
z	Distância entre as partículas, [m]

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1. Estruturas de empacotamento de partículas formadas para materiais coesivos e não coesivos.....	11
Figura 3. 2. Pontos de contato entre duas partículas de superfície irregular.	16
Figura 3. 3. Forças cisalhantes em função do diâmetro de partícula e principais forças interparticulares.....	18
Figura 3. 4. Característica de fluxo de funil (à esquerda) e fluxo de massa (à direita).	20
Figura 3. 5. Determinação do ângulo de repouso estático.	23
Figura 3. 6. Círculos de Mohr usados para a obtenção da “yield loci” (linha em negrito) e dos pares de dados de tensão não confinada de deslizamento (σ_c) e tensão principal de consolidação (σ_1). O Ponto “E” é o ponto do estado estacionário, obtido no pré-cisalhamento. O ponto “C” é a coesão do material, obtido por extrapolação da “yield loci” quando tensão normal é nula.....	25
Figura 3. 7. Função fluxo exemplo (linha A) e linhas de escoamento constante.....	26
Figura 3. 8. Exemplo de gráfico obtido no teste de estabilidade e fluxo variável. ...	27
Figura 4.1. Diagrama de blocos simplificado do processamento de açúcar.....	30
Figura 4.2. Distribuição granulométrica com base na fração mássica acumulada em diferentes tipos de açúcar.....	34
Figura 4.3. Arranjo experimental adotado para despejo de partículas na realização das análises de densidade bulk e ângulo de repouso estático. 1- Recipiente contendo a amostra; 2- funil com saída bloqueada; 3- Proveta de vidro 250 ml para teste de compactação ou placa de Petri (D = 10,6 cm) para base fixa da medida do ângulo de repouso estático.....	41
Figura 4.4. Função de fluxo para as amostras secas.	45
Figura 4.5. Função de fluxo para as amostras úmidas.....	46
Figura 4.6. Funções Fluxo para açúcares e regiões de escoamento.	47
Figura 4.7. Funções de fluxo para açúcar refinado e suas frações finas (RSF) e grossas (RSG).....	49
Figura 4.8. Testes de estabilidade (até o 7º ponto da esquerda para a direita) e de fluxo variável (do 8º ao 11º ponto da esquerda para a direita) obtidos em reômetro de pós.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Algumas propriedades do pó e fatores externos que podem contribuir para mudanças no comportamento do material durante seu escoamento.	10
Tabela 3.2. Estágios de “caking” e seus respectivos graus de saturação para o calcário.	14
Tabela 3.3. Classificação de sólidos particulados de acordo com o tamanho de partículas.	15
Tabela 3.4. Classificação do fluxo de acordo com Índice de Hausner.	22
Tabela 3.5. Classificação do fluxo de acordo com ângulo de repouso.	23
Tabela 3.6. Índice de Estabilidade e sua relação com a fluidez de sólidos.	28
Tabela 3.7. Índice de Fluxo e sua relação com a fluidez de sólidos.	29
Tabela 4.1. Composição de diferentes tipos de açúcar.	31
Tabela 4.2. Massa específica real para cada tipo de açúcar.	32
Tabela 4.3. Valores médios de massa específica (real) para o açúcar.	33
Tabela 4.4. Diâmetros de Sauter de diferentes tipos de açúcar.	34
Tabela 4.5. Valores de porosidade para o açúcar de confeitiro (IS).	36
Tabela 4.6. Valores de densidade bulk aerada para cada tipo de açúcar.	36
Tabela 4.7. Valores de densidade bulk compactada para cada tipo de açúcar.	38
Tabela 4.8. Umidade e níveis de saturação da água em leitos de açúcares comerciais.	39
Tabela 4.9. Conteúdo de umidade para as amostras secas e úmidas de açúcares comerciais.	39
Tabela 4.10. Pesquisas sobre parâmetros de escoabilidade de açúcares e suas respectivas contribuições.	40
Tabela 4.11. Índice de Hausner para diferentes tipos de açúcar e classificação do fluxo segundo a <i>European Pharmacopeia</i>.	42
Tabela 4.12. Ângulo de repouso estático e classificação de acordo com a <i>European Pharmacopeia</i> (2010).	43
Tabela 4.13. Ângulo de repouso dinâmico e classificação de acordo com a <i>European Pharmacopeia</i> (2010).	44
Tabela 4.14. Parâmetros de fluxo obtidos em teste de estabilidade e fluxo variável em reômetro de pós FT4.	51
Tabela 4.15. Parâmetros de fluxo obtidos em teste de estabilidade e fluxo variável para amostras secas e úmidas.	54
Tabela 4.16. Diferença entre os dados obtidos por Santos (2017) e Silva e Condotta (2017) de amostras secas para BFE, SI e FRI.	55

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Inúmeros processos industriais químicos, farmacêuticos e alimentícios utilizam materiais particulados em alguma etapa do processo. Conhecer as propriedades de fluxo de materiais particulados é relevante à medida que contribui para o projeto e otimização de equipamentos, e assim favorece a eficiência da planta industrial. Para Fitzpatrick e Ahrné (2005) esses estudos ainda são muito limitados devido ao baixo investimento nessas áreas de pesquisa, já que envolvem matérias-primas de baixo custo e valor agregado. Entretanto, ainda segundo eles, a necessidade de se pesquisar esses tópicos cresce cada vez mais, principalmente para pós alimentícios.

Há uma ampla variedade de materiais particulados que poderiam ser investigados, mas neste trabalho decidiu-se estudar o açúcar, pois este é uma matéria-prima economicamente importante no cenário nacional e dependendo do tipo de processamento, diferentes características de produto são obtidas. Além disso, o Brasil é historicamente o maior produtor de açúcar do mundo, sendo responsável por 20% da produção global e 45% da exportação mundial segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Este é um ingrediente fundamental para o preparo de alimentos, na obtenção de sabor e consistência, muito presente na cultura e cotidiano dos brasileiros. Desde 2011, estima-se, em média, 10.000.000 hectares/ano de área colhida e plantada com cana de açúcar no Brasil (UNICA, 2020).

De acordo com a aplicação final, o açúcar é comercializado de várias formas: açúcar tipo exportação (ou VHP), açúcar bruto (ou demerara), açúcar cristal, açúcar confeiteiro, açúcar impalpável, açúcar refinado, açúcar orgânico, etc. Os tipos “refinados”, possuem em geral granulometria mais fina e mais dispersa, pois após as etapas de cristalização e secagem, o refino é feito em moinhos (JEGATHEESAN *et al.*, 2012). Já os tipos classificados como “não refinados” são geralmente obtidos após a cristalização e secagem. Dessa forma, o formato de partículas e distribuição de tamanho pode ser significativamente diferente para cada tipo de açúcar, o que pode afetar as características de escoabilidade.

A produção de açúcar a partir da cana passa por diversas operações unitárias até se obter o produto final. Primeiramente tem-se a moagem, seguida da clarificação (e filtração à vácuo), concentração e posterior cristalização. As entradas materiais de cada etapa do processo são essencialmente: vapor, água quente, leite de cal e floculante. As saídas são: bagaço (torta) passível de reaproveitamento, mel e os produtos principais:

açúcar e álcool. Após a secagem do açúcar úmido, o mesmo é armazenado em silos ou big-bags para comercialização ou processamento posterior. As propriedades físico-químicas variam de acordo com o tipo de processamento e seu conhecimento é relevante para o manuseio e operações de transporte e descarga gravitacional.

Diversos trabalhos da literatura buscam caracterizar as propriedades físico-químicas de diferentes açúcares, analisando, principalmente: distribuição granulométrica, características morfológicas, massa específica real, porosidade do leito solto, densidade bulk aerada e compactada. A análise desses dados para cada sistema individualmente, quando associados à parâmetros de fluxo, permitem prever como determinado material particulado (no caso desse trabalho, o açúcar) se comportará em uma dada condição de processo (SANTOS, 2017). Dentro dos parâmetros indicativos de escoabilidade pode-se destacar: Índice de Carr, Índice de Hausner, ângulos de repouso estático e dinâmico, bem como função fluxo e índice de estabilidade, compressibilidade e fluxo variável (os quatro últimos obtidos utilizando um reômetro de sólidos).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo principal a compilação de dados experimentais da literatura sobre a caracterização de atributos de escoabilidade de diferentes variedades de açúcares, com foco nas características físico-químicas dos açúcares e como eles afetam a escoabilidade. Objetiva-se também apresentar uma discussão e análise sobre os dados consultados.

2. ABORDAGEM UTILIZADA

Esta seção apresenta a abordagem utilizada para a realização do trabalho, que se baseou em uma Revisão Bibliográfica.

2.1. Materiais

Para o trabalho foram consultados diversos materiais acerca do tema, sendo eles: livros, artigos, dissertações, normas, sites de usinas de açúcar e álcool. A principal fonte dos parâmetros de escoabilidade obtidos foi a dissertação de Santos (2017), além de publicações em periódicos e em anais de congressos nacionais.

2.2. Estratégia empregada

A estratégia empregada no estudo foi a pesquisa bibliográfica, através principalmente de artigos e dissertações. As fontes utilizadas passaram pelas etapas de leitura exploratória superficial de todo material selecionado inicialmente, seguida da leitura seletiva, para se extrair do número inicial de fontes, apenas aquelas mais relevantes para os objetivos propostos, e por fim, o fichamento e análise das informações relevantes contidas nas fontes.

Após a seleção, as informações foram resumidas e ordenadas, e posteriormente discutidas e analisadas no trabalho.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão apresenta definições e conceitos básicos úteis para a avaliação da escoabilidade de materiais particulados. Em seguida, serão abordados os diferentes critérios e índices utilizados na classificação da escoabilidade de materiais particulados.

3.1. Definições e conceitos básicos associados ao escoamento de sólidos particulados

As indústrias farmacêutica, química e de alimentos possuem uma extensa aplicação de materiais na forma de sólidos granulares e pós, utilizados como matéria-prima ou produzidos a partir de cristalização, moagem, secagem, granulação, etc. São chamados de “sólidos *bulk*”, tanto os grãos quanto os materiais pulverulentos. Tanto as características dessas partículas quanto as do conjunto influenciam seu manuseio durante as operações unitárias.

As forças presentes no escoamento de sólidos *bulk* são gravitacionais, de atrito entre as partículas, de atração interparticulares (de coesão) ou de adesão (entre o material da parede do recipiente e a partícula). A resultante dessas forças definirá se o escoamento ocorrerá e como o fenômeno acontecerá, com mais facilidade ou dificuldade. Quando a força cisalhante mínima (de ruptura) supera as forças de resistência impostas, tem-se o movimento do material, ou seja, seu escoamento (SANTOS, 2017).

No início do século 20, estudos iniciais sobre o escoamento de particulados basearam-se em teorias de mecânica dos sólidos (particulados geralmente úmidos e compactos), e foram desenvolvidos devido a incidentes de deslizamentos de terra e falhas estruturais em construções civis (VERRUIJT, 2012).

No campo da Engenharia Química, por exemplo, o conhecimento sobre o manuseio desses materiais é limitado quando se compara a fluidos como líquidos ou gases. Em um sólido *bulk*, 3 fases podem coexistir: uma matriz sólida formada pelas partículas do sistema, gás que ocupa os interstícios e água (que pode não existir) proveniente da umidade do ambiente em que o sistema se encontra ou adquirida no processo, dependente da higroscopicidade do material.

O conhecimento das características físicas e morfológicas da partícula (tamanho, rigidez, umidade e formato) é parte importante nesse entendimento. Além disso, quando se analisa pós alimentícios, como é o caso do açúcar, há uma preocupação não só com o fluxo livre, mas também com a integridade da partícula (dependendo da aplicação) e segurança microbiológica, de forma que o produto final não ofereça riscos à saúde dos consumidores finais.

Há muitos fatores que mudam significativamente a reologia do escoamento de partículas. Estes são exibidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Algumas propriedades do pó e fatores externos que podem contribuir para mudanças no comportamento do material durante seu escoamento.

Propriedades do pó	Propriedades externas
Distribuição do tamanho de partículas Densidade bulk Homogeneidade Superfície de atrito Compressibilidade Coesividade Coeficiente de atrito com a parede do silo Propriedades Elétricas Dimensões e “design” de silos	Temperatura Umidade relativa do ar Agentes “anticaking” (ou antiaglomerantes) Taxa de alimentação Dimensões e “design” de silos

Fonte: Adaptado de JULIANO e BARBOSA-CÁNOVAS (2010).

As principais propriedades que influenciam o escoamento dos sólidos particulados, as forças importantes e os atributos utilizados para caracterização da escoabilidade de sólidos particulados serão apresentadas nos próximos tópicos.

3.2. Propriedades de leitos particulados e de partícula

A forma mais utilizada para tratar materiais particulados na literatura é enquanto sistema (leito de partículas), pois é praticamente impossível tratar um sistema como completamente homogêneo. Os próximos itens tratam das propriedades que podem influir no escoamento de materiais particulados em geral.

3.2.1. Massa específica (ou densidade real) de uma partícula

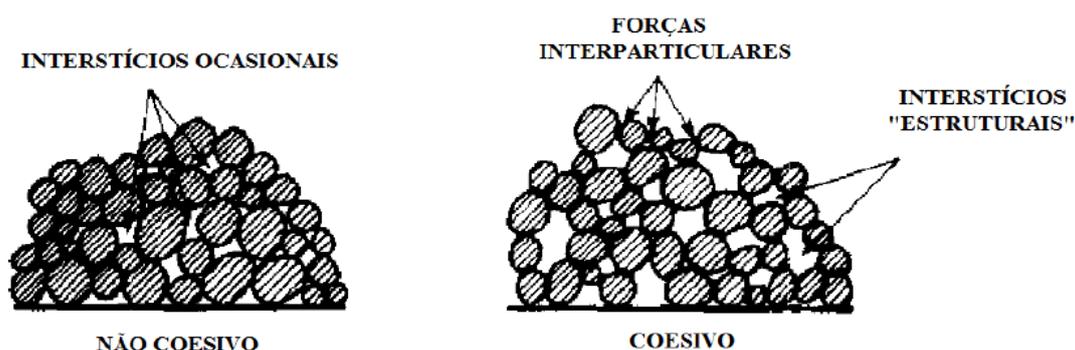
Define-se como massa específica de uma partícula a razão entre a massa e o volume ocupado pela matriz sólida do material, desprezando-se o volume de vazios.

3.2.2. Densidade bulk e porosidade do leito solto

Como a densidade de um material é a quantidade de massa ocupada em determinado espaço, a forma de estender esse conceito para densidade de um conjunto de partículas é a densidade *bulk*. Assim, o volume ocupado por uma determinada massa irá depender da maneira como as partículas se acomodam, se relacionando fortemente com a condição na qual o leito foi formado (segregação, vibrações, etc.), às forças internas de coesão (que influem na tendência de formação de aglomerados), ao atrito entre as partículas, o formato das partículas e outros fatores (PELEG, 1977).

Geralmente, diz-se que uma determinada estrutura é suportada pelas forças interparticulares (van der Waals, pontes líquidas e atrito) presentes no leito, quando se tem um material coesivo, conforme ilustra a Figura 3.1.

Figura 3. 1. Estruturas de empacotamento de partículas formadas para materiais coesivos e não coesivos.



Fonte: Adaptado de PELEG (1977).

Em um estudo sobre a influência da umidade na densidade bulk de leitos de esfera de vidro (diâmetros de 5 à 275 micrômetros e diversas umidades) Scicolone *et al.* (2015) observaram que o aumento da quantidade de água aumentava a densidade *bulk* dos sólidos

devido à intensificação das forças coesivas, uma vez que a formação de pontes líquidas diminuía a porosidade dos leitos desses materiais.

A densidade *bulk* (ρ_b) é uma propriedade que considera o comportamento do conjunto de partículas que, em geral, apresentam uma distribuição de tamanhos. A densidade *bulk* é definida como a razão da massa de material dividida pelo seu volume total, isto é, volume das partículas e dos espaços vazios, como apresentada na equação:

$$\rho_{ba} = \frac{m_t}{V_{ta}} \quad (3.1)$$

A densidade *bulk* aerada relaciona-se com as massas específicas da partícula, do fluido e a porosidade do leito, como mostra a equação:

$$\rho_{ba} = (\rho_b - \rho_f) \cdot (1 - \varepsilon) + \rho_f \quad (3.2)$$

A porosidade do leito é o volume de espaços vazios presente em um sistema particulado não consolidado, dado por:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_r} \quad (3.3)$$

Poros de maior ou menor volume se definem de acordo com o tamanho e a forma como as partículas se acomodam no leito. Para sólidos secos, a massa específica do fluido nos espaços vazios (gás) é muito inferior a massa específica das partículas e, por isso, pode ser desprezada, resultando na Equação 3.4, de densidade *bulk* compactada:

$$\rho_{bc} = \rho_p(1 - \varepsilon_{bc}) \quad (3.4)$$

De forma análoga, a Equação 3.5, também permite o cálculo da densidade *bulk* compactada:

$$\rho_{bc} = \frac{m_t}{V_{tc}} \quad (3.5)$$

Experimentos conduzidos por Zou e Yu (1996) investigaram a influência do formato das partículas no processo de compactação e concluíram que partículas de maior esfericidade têm melhor fluidez, menor Índice de Hausner e assim, menor volume de amostra compactada, além de concluírem que dependendo do formato da partícula e da maneira como o material é despejado no recipiente (altura de despejamento, com ou sem vibração, etc.) têm-se diferentes porosidades iniciais de leito. Mallol *et al.* (2008)

estudaram a cinética de eliminação de poros em leito de partículas de quartzo, por “*tapping*” (compactação por vibrações consecutivas) e mostraram que dependendo da distribuição granulométrica e formato das partículas, os poros são eliminados de maneiras distintas, num primeiro momento eliminando poros maiores e em seguida menores. Condota e Machado (2014) conduziram um estudo de escoabilidade em pós de alumina e concluíram que a porosidade e a distribuição granulométrica interferem na compressibilidade do material, já que quanto maior a quantidade de partículas pequenas, maior a possibilidade de que estas ocupem espaços vazios. Dessa forma, de posse da porosidade material e outras propriedades físicas das partículas pode-se inferir sobre a cinética de compactação.

3.2.3. Umidade dos materiais

Define-se como umidade dos materiais a massa de água presente em um determinado material, corpo de prova ou amostra e pode ser calculada conforme a equação:

$$\text{u. b. u. (\%)} = \frac{N \times 100}{P} \quad (3.6)$$

A grande influência da umidade no escoamento dos materiais se dá devido ao favorecimento da formação de pontes líquidas, forças de grande intensidade que aumentam a coesividade do material. Para que estas forças estejam presentes precisa-se que água esteja num estágio de saturação mínimo, capaz de unir duas ou mais partículas por filmes líquidos superficiais. A umidade pode facilitar o escoamento de materiais particulados em alguns casos como:

- água na superfície de partículas em baixa saturação (estágio pendular) que promovem ação lubrificante;

- água que adentra poros internos de partículas, aumentando a densidade *bulk* da amostra e, conseqüentemente, a força motriz para escoamentos gravitacionais.

O grau de saturação é calculado pela equação:

$$S (\%) = \frac{V_{\text{água}}}{V_t - V_s} \times 100 \quad (3.7)$$

Os 4 estágios de “*caking*” são descritos e classificados de acordo com o grau de saturação na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Estágios de “*caking*” e seus respectivos graus de saturação da água para o calcário.

Estágios de “ <i>caking</i> ”	Descrição	Saturação da água (S)
Pendular (A)	Sem interferência de pontes líquidas, pó considerado em escoamento livre	< 25%
Funicular (B)	Contatos permanentes entre as partículas	25% < S < 80%
Capilar (C)	Conteúdo de água suficiente para formas pontes líquidas	80% < S < 90%
“Gota” (D)	Dissolução das partículas	> 90%

Fonte: Adaptado de ROGÉ e MATHLOUTHI (2003) e ALTHAUS e WINDHAB (2012).

Uma outra condição chamada “cimentação” pode ocorrer, após os estágios B, C ou D, em que os pós não absorvem mais água do ambiente e nessa condição dão origem a um novo aglomerado, pois o filme formado permanece unindo partículas. Esta formação de aglomerados altera a distribuição granulométrica do sólido *bulk*, quando este experimente condições ambientes diferentes, o que explica as particularidades de cada estudo de fluxo de materiais particulados e sua variação de acordo com as condições experimentais do teste.

3.2.4. Distribuição granulométrica e formato de partículas

A distribuição granulométrica e o formato das partículas são muito relevantes na escoabilidade, uma vez que cada material apresenta um conjunto de partículas com ampla distribuição granulométrica e formatos de partículas.

Os diferentes tipos de sólidos podem ser classificados mediante ao tamanho de partícula, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Classificação de sólidos particulados de acordo com o tamanho de partículas.

Classificação dos sólidos	Faixa de tamanho
Sólido grosseiro (coarse)	5 – 100 mm
Sólido granular	0,3 – 5 mm
Pó grosseiro	100 – 300 µm
Pó fino	10 – 100 µm
Pó superfino	1 – 10 µm
Pó ultrafino	< 1 µm

Fonte: Adaptado de WOODCOCK e MASON (1987).

A terminologia “finos” é utilizada por alguns autores para identificar todas as partículas em uma faixa granulométrica inferior à 500 µm (CHITPRASERT e CHEDCHANT, 2006; ROGÉ e MATHLOUTHI, 2003).

No caso de processos onde os fenômenos de transferência são importantes, utiliza-se com maior frequência o diâmetro de Sauter (TANNOUS *et al.*, 1998), definido pela equação:

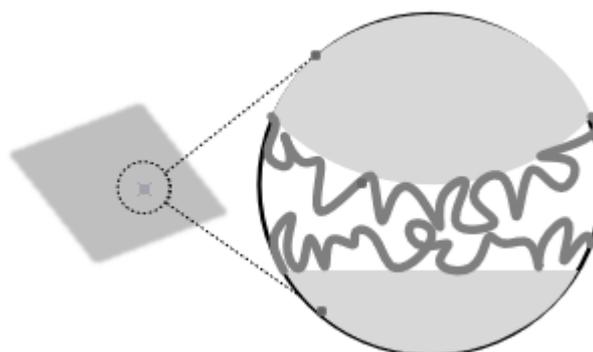
$$D_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{D_i}} \quad (3.8)$$

Existem diferentes métodos de medição de diâmetro, como a difração à laser, sistema de peneiramento diferenciado, utilizando outras definições para o cálculo do diâmetro médio. Outro diâmetro comumente utilizado é o DeBrouke (ou D[4,3]), que considera o volume da partícula para inferir sobre seu diâmetro e por isso também é chamado de diâmetro volumétrico.

3.2.5. Rugosidade de superfície

Pode-se definir a rugosidade como altura das protuberâncias, característica associada à superfície das partículas. Estas influenciam fortemente o escoamento de um conjunto de partículas. Dependendo do número de irregularidades presentes na superfície, pode-se ter diferentes intensidades nas forças de atrito. As forças de coesão estabelecidas nas áreas de contato determinarão o módulo de tensão de cisalhamento necessária para separar as partículas.

Figura 3. 2. Pontos de contato entre duas partículas de superfície irregular.



Fonte: Adaptado de FAUSTINO (2010).

Estudos mostram que quanto maior for o pico de rugosidade, menores as regiões de contato entre as superfícies e, portanto, elas ficam aderidas com menor intensidade de força (FAUSTINO, 2010). A Figura 3.2. ilustra esses pontos de contato interparticulares. Entretanto, durante o escoamento em que uma partícula desliza ou “rola” sobre a outra, é difícil inferir sobre a atuação das forças. Segundo Juliano e Barbosa (2010) as rugosidades podem agir como pequenos “bloqueios mecânicos” que impedem o movimento e a situação de maior ou menor intensidade das forças de adesão não seria pertinente neste caso.

Vale ressaltar que o atrito de rolamento pode ocorrer quando existem rugosidades nas superfícies de partículas com maiores esfericidade (FERENCE *et al.*, 1971). Em termos cinéticos, quando uma partícula se move sobre as outras, dependendo das irregularidades superficiais e da rigidez do material, a força de atrito atua na direção contrária ao movimento, podendo até deformá-lo. Estes desgastes podem produzir partículas muito finas, que mais a frente prejudicarão o escoamento do sólido particulado, já que maximizam as forças coesivas com frações sólidas abaixo de 150 micrômetros.

3.3. Forças em sólidos particulados

No estudo de sistema particulados, tem-se como principais forças de superfície:

- Forças de van der Waals;

- Atrito;
- Eletrostáticas;
- Capilares (pontes líquidas).

Além dessas forças, as de campo gravitacional estarão sempre presentes. O repouso de um material sólido se deve à resultante nula de forças no sistema. O movimento ocorre quando as forças de campo superam as forças de coesão, gerando um somatório de forças não nulo.

Castellanos (2005) estabeleceu uma relação entre essas forças de superfície e a escoabilidade, concluindo que, se a força peso do conjunto de partículas for muito maior que a soma de todas as forças de atração do sistema, esse escoará facilmente. A intensidade dessas forças está diretamente ligada às propriedades físico-químicas da estrutura sólida e do leito de partículas (formato, rugosidade de superfície, distribuição granulométrica, conteúdo de umidade, etc.).

Os próximos itens discutirão cada uma dessas forças interparticulares.

3.3.1. Forças de van der Waals

A origem das forças de van der Waals está nos componentes químicos constituintes das partículas. Os átomos que constituem a molécula se atraem através de dipolos. Para qualquer molécula, uma posição instantânea dos átomos ao redor do núcleo origina um campo elétrico, que polariza uma molécula próxima, induzindo assim um dipolo nessa molécula. Dessa forma, os dois dipolos geram uma força de atração entre as moléculas (CASTELLANOS, 2005).

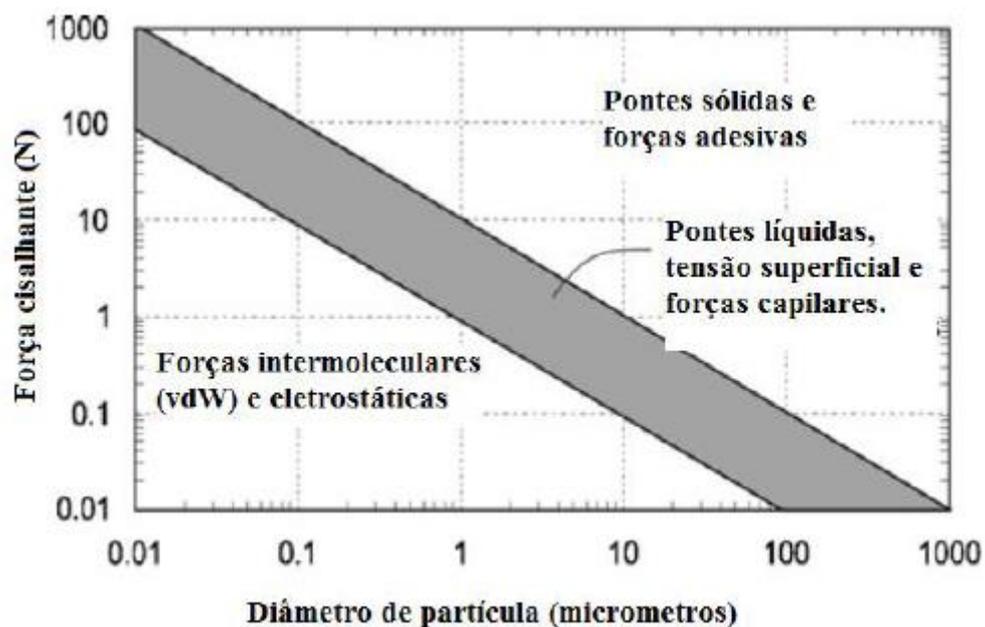
A equação que descreve a força de van der Waals entre duas partículas esféricas é originária do potencial de interação Lennard-Jones, através da integração da função energia potencial que descreve a atração entre as moléculas. Castellanos (2005) propõe a Equação 3.9, considerando seus raios iguais e muito maiores do que a distância entre elas. Esta pode adotar diferentes formas e dependerá principalmente da geometria das partículas. Várias delas estão representadas em Israelachvili (1985).

$$F_{vdW} = \frac{A R}{20 Z^2} \quad (3.9)$$

3.3.2. Forças eletrostáticas

A natureza química das partículas admite que estas apresentem carga ou até mesmo acúmulo, como por exemplo no caso de operações com transporte pneumático. Partículas energeticamente carregadas possuem forças eletrostáticas que atuam como forças de atração ou repulsão no sistema (VERWIJS, 2005). Para partículas mais finas pode-se destacar as forças da Figura 3.3.

Figura 3. 3. Forças cisalhantes em função do diâmetro de partícula e principais forças interparticulares.



Fonte: Adaptado de JULIANO e BARBOSA-CÁNOVAS (2010).

As partículas dissolvidas em um meio líquido estão sujeitas às forças de van der Waals, sempre de atração. Nesse caso, as forças eletrostáticas atuam repulsivamente, a fim de evitar a aglomeração, impedindo que somente as forças atrativas imperem (ISRAELACHVILI, 1985).

3.3.3. Pontes Líquidas

Pontes líquidas, também chamadas de pontes de hidrogênio, são observadas em sistemas particulados úmidos. Como visto anteriormente, é necessário que água esteja num estágio de saturação mínimo (chamado de “capilar”), para que haja influência dessas forças.

O tamanho da partícula também é fator importante associado a esse tipo de força. A Figura 3.3 exibe a predominância de algumas forças interparticulares. O diâmetro da partícula tem papel fundamental quando essas forças prevalecem em um sistema particulado, já que se observa na Figura 3.3 que as pontes líquidas prevalecem na região hachurada onde, para tamanhos de partículas maiores, menor é a força cisalhante requerida.

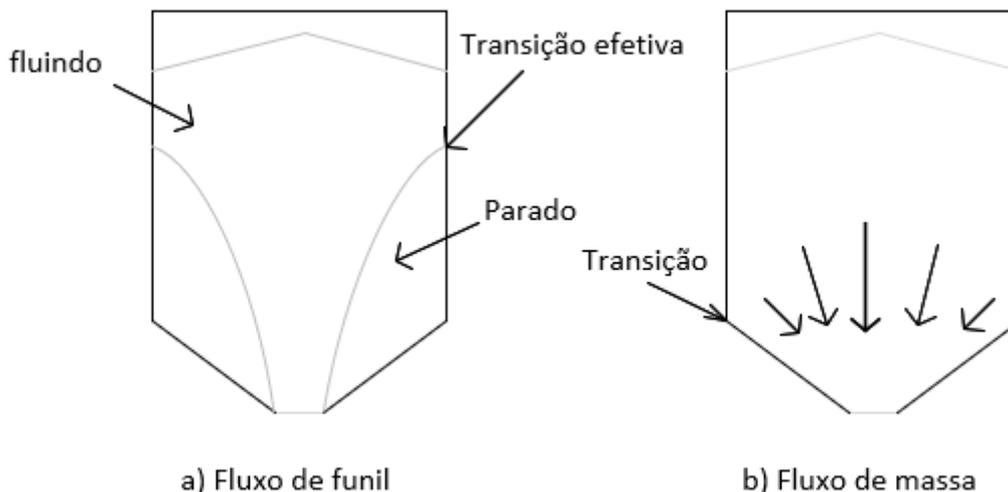
3.4. Índices de escoabilidade

Os índices de escoabilidade são parâmetros indicativos de fluxo que permitem uma melhor compreensão de como se comportam os materiais em situações de escoamentos. Este tópico aborda os diferentes critérios adotados para avaliação da escoabilidade de pós.

3.4.1. Fluxo de funil x fluxo de massa

Diferentes padrões de escoamento são desenvolvidos dependendo das propriedades físicas do material particulado e as características do recipiente (geometria, tipo de material, rugosidades). Indústrias que lidam com sólidos particulados podem encontrar problemas no descarregamento de silos por gravidade. A Figura 3.4 exibe os tipos de classificação definidos por Jenike (1964): fluxo de funil e de massa.

Figura 3. 4. Característica de fluxo de funil (à esquerda) e fluxo de massa (à direita).



Fonte: Adaptado de PALMA (2005).

O fluxo de funil possui esse nome, pelo fato de no interior do silo se desenvolver um caminho preferencial, com parte do produto estagnado nas laterais da tremonha (“first in, last out”). Já o fluxo de massa ocorre quando o material cisalha uniformemente no interior do silo, ou melhor, todas as partículas se movimentam e deixam o recipiente através do canal de saída (“first in, first out”). Sendo assim, esse tipo de fluxo é comumente recomendado na indústria alimentícia, porque quase não há chance de ocorrerem incrustações e riscos à segurança do alimento. Essas incrustações permitem o desenvolvimento de microorganismos indesejáveis, afetando a qualidade do produto. A determinação do tipo de fluxo é feita levando-se em consideração o tempo de armazenamento, pois as forças interparticulares podem favorecer a formação de aglomerados, já que as forças gravitacionais atuam no interior do silo e passam a ser insuficientes para o cisalhamento do material, impedindo o escoamento. É frequente encontrar situações onde pós ficam armazenados durante alguns dias e ao se “tombar” o recipiente, o material não flui. Nessas ocasiões pode-se notar que todas as partículas se tornaram um grande aglomerado.

Uma boa caracterização dos materiais que constituem o meio particulado, e o material de fabricação do recipiente é uma forma de encontrar a melhor configuração para a situação de descarga. Em seguida, a obtenção de parâmetros de fluxo importantes no cálculo do ângulo da tremonha e diâmetro de saída podem ser obtidos por testes de

cisalhamento. Lopes Neto *et al.* (2009) investigaram as propriedades de fluxo instantâneas e temporais, para classificar o melhor tipo de escoamento para 4 tipos de alimentos (amido de milho, farinha de trigo, fécula de mandioca e farinha de milho) e concluíram que a inclinação mínima da tremonha para todos os pós estudados devem ter no mínimo 60° para que não haja segregação. Eles também notaram que não há influência do tempo de consolidação (24 e 48h), sendo classificado fluxo fácil em ambas as condições. Já para Teunou e Fitzpatrick (2000) a escoabilidade de farinha de trigo, por exemplo, foi afetada negativamente durante um período de 7 dias. Este último trabalho não realizou o dimensionamento do reservatório de descarga e apenas reportou propriedades de fluxo.

3.4.2. Índice de Hausner

Dentro do universo dos testes clássicos, o Índice de Hausner é utilizado para classificar as propriedades de escoamento de um material particulado. Definido pela Equação 3.10, é denotado pela razão entre as densidades *bulk* compactada (obtido por testes de compactação por vibração) e aerada.

$$HR = \frac{\rho_{bc}}{\rho_{ba}} \quad (3.10)$$

A formação de aglomerados durante o teste ou mesmo o procedimento adotado pelo operador são consideradas limitações desse método (PELEG, 1977). Isto exige atenção ao consultar a literatura, pois os dados nem sempre são comparáveis, mesmo se tratando do mesmo material.

A Tabela 3.4 mostra a relação entre o Índice de Hausner e a característica de fluxo desenvolvida. Observa-se que para maiores índices, tem-se um pior fluxo, devido à presença de forças coesivas mais intensas no interior do sistema.

Tabela 3.4. Classificação do fluxo de acordo com Índice de Hausner.

Classificação do fluxo	Índice de Hausner
Excelente	1,00-1,11
Bom	1,12-1,18
Razoável	1,19-1,25
Passável	1,26-1,34
Difícil	1,35-1,45
Muito difícil	1,46-1,59
Extremamente difícil	>1,60

Fonte: Adaptado de LUMAY *et al.* (2012).

Objetivando verificar o procedimento experimental utilizado na classificação do fluxo via índice de Hausner, Saw *et al.* (2015) correlacionaram esse valor com o valor encontrado para coesividade através de testes de cisalhamento na célula de Jenike. Para particulados classificados como de fluxo difícil, o erro foi pequeno, daí constatou-se que o índice de Hausner é um bom indicativo de fluidez. Já para materiais de fluxo livre, o erro foi maior, indicando que testes alternativos devem ser considerados quando desejar-se obter informações sobre o fluxo desse tipo de material.

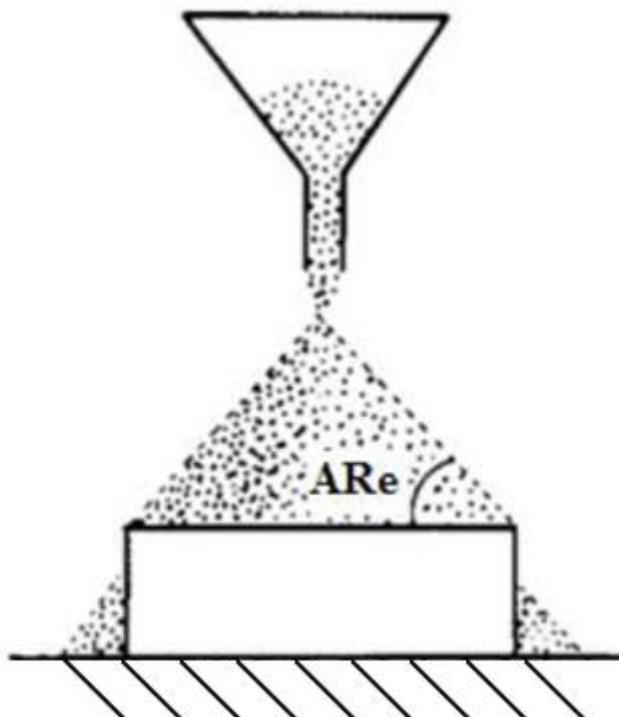
3.4.3. Ângulo de repouso

O ângulo de repouso (AR) de materiais particulados é obtido em duas condições de escoamento: estática e dinâmica. Existem ao menos 8 formas diferentes reportadas para medir o ângulo de repouso, ou seja, envolve uma análise de difícil padronização (GELDART *et al.*, 2006). Os próximos tópicos discutirão as principais diferenças.

3.4.4. Ângulo de repouso estático

O ângulo de repouso estático (AR_e) é definido como o ângulo com a horizontal, no qual o material repousa após formada uma “pilha” de partículas. Um possível método de determinação é representado na Figura 3.5, em que o pó é inserido em um funil a uma distância fixa da base, a partir do qual será despejado por ação gravitacional. Depois da formação da pilha, o ângulo é determinado pela Equação 3.11.

Figura 3. 5. Determinação do ângulo de repouso estático.



Fonte: Adaptado de JULIANO e BARBOSA-CÁNOVAS (2010).

$$AR_e = \arctan \frac{h}{D/2} \quad (3.11)$$

A Tabela 3.5 mostra a classificação do fluxo de um sólido particulado baseado no seu AR_e .

Tabela 3.5. Classificação do fluxo de acordo com ângulo de repouso.

Classificação do fluxo	AR (°)
Excelente	25-30
Bom	31-35
Razoável	36-40
Passável	41-45
Difícil	46-55
Muito difícil	56-65
Extremamente difícil	>66

Fonte: Adaptado de LUMAY *et al.* (2012).

O ângulo de repouso é utilizado para prever o tipo de fluxo de material tanto para partículas finas (pós), quanto partículas mais grossas (grãos e sementes). As

propriedades físicas da partícula e as características do meio externo exercem influência no ângulo de repouso. O procedimento adotado pelo operador também influi na medição do ângulo. Um material com ângulo de repouso maior implica em forças coesivas mais pronunciadas no sistema (características de partículas mais finas). Já para ângulos de repouso menores que 36° tem-se um fácil deslizamento de uma partícula sobre as outras, ou melhor, as forças de atrito são menos intensas e o cisalhamento é mais fácil.

Estudos de fluidez de alimentos em pó, reportaram ângulos de repouso para arroz, leite em pó integral, açúcar moído e morango em pó, com diâmetros médios de partícula de 472, 220, 208 e 254 μm , respectivamente (SZULC e LENART, 2010). O maior ângulo foi encontrado para o açúcar, pois esse alimento apresenta partículas mais finas, implicando a maior atuação das forças coesivas no sistema.

3.4.5. Ângulo de repouso dinâmico

O ângulo de repouso dinâmico (AR_d) tem utilidade na previsão do escoamento de um sólido em condições dinâmicas, ou seja, no processamento em um transportador de partículas, secagem em tambores rotativos, e em outras operações que envolvem o material particulado em movimento. Durante essas operações muitas indústrias relatam problemas como segregação de material, deposição nas paredes do equipamento, em decorrência das más estratégias de operação e utilização dos materiais e das condições de processo, podendo ser causada por falta de conhecimento da fluidez que é função do material e do equipamento.

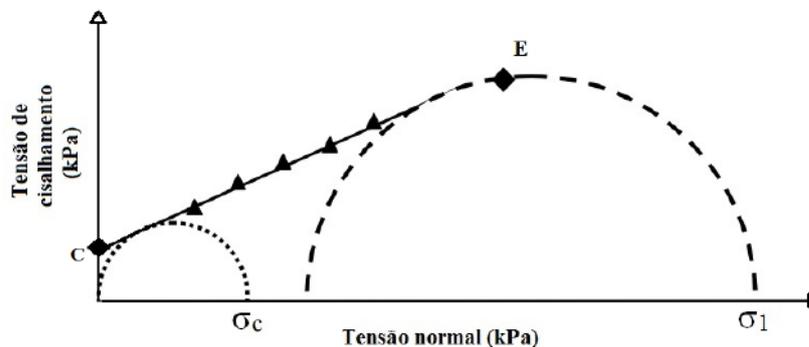
As metodologias mais utilizadas para medir o AR_d são apresentadas por alguns autores (GELDART *et al.*, 2006; LUMAY *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2015) e são determinados pelo ângulo formado pelas partículas no interior de um sistema confinado em rotação constante. O ângulo de repouso estático nem sempre é adequado para avaliar o tipo de fluxo de um material, pois geralmente em processos de transporte, o sólido está em movimento e há uma parcela de gás/ar incorporada no interior do material, tornando-o aerado durante o fluxo, ao passo que a condição estática pressupõe um certo estado de consolidação (GELDART *et al.*, 2006).

3.4.6. Função Fluxo

Um material particulado pode ter seu comportamento de fluxo previsto através da avaliação da relação entre as forças de cisalhamento necessárias para que o pó entre em movimento e as forças normais impostas ao sólido (JENIKE, 1964).

Durante o teste de cisalhamento, Círculos de Mohr são traçados em gráficos de tensão de cisalhamento necessária para movimentar o pó em função da tensão normal aplicada (eixos x e y) durante o teste, em duas etapas: uma de pré-cisalhamento, que permite a construção do círculo maior e outra de cisalhamento, onde os níveis de consolidação aplicada são decrescentes, permitindo assim a construção da “*yield loci*” como exhibe a Figura 3.6.

Figura 3. 6. Círculos de Mohr usados para a obtenção da “*yield loci*” (linha em negrito) e dos pares de dados de tensão não confinada de deslizamento (σ_c) e tensão principal de consolidação (σ_1). O Ponto “E” é o ponto do estado estacionário, obtido no pré-cisalhamento. O ponto “C” é a coesão do material, obtido por extrapolação da “*yield loci*” quando tensão normal é nula.



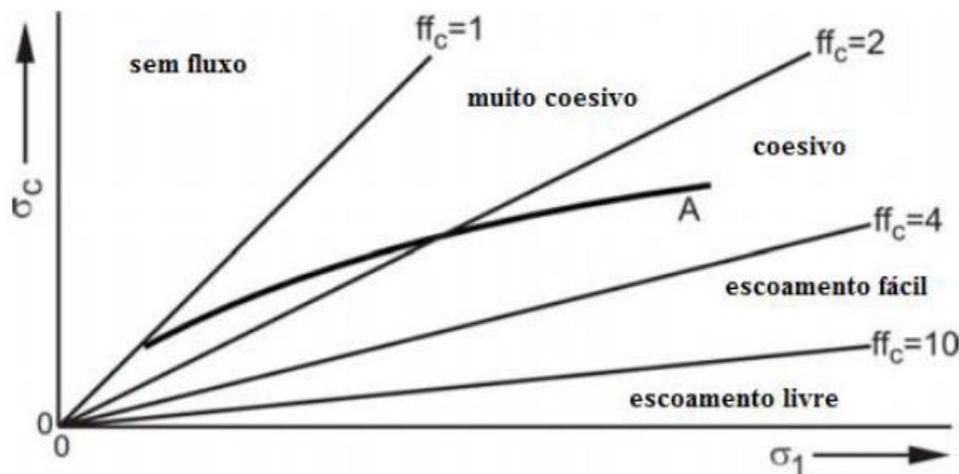
Fonte: Adaptado de VERWIJS (2005).

A Equação 3.12 exhibe o critério de ruptura de Coulomb (COULOMB, 1776 *apud* CASTELLANOS, 2005) e representa a relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal, representada pelo segmento linear conhecido como “*yield loci*” do material conforme exemplificado anteriormente. Coulomb assumiu que um material granular é um meio contínuo de densidade uniforme (CONDOTTA, 2005).

$$\tau = \mu\sigma + c \quad (3.12)$$

A função fluxo é tida como uma medida importante de fluidez. Pode-se obtê-la a partir da construção de círculos de Mohr, em que é possível obter pares de dados de tensão principal de consolidação (σ_1) e tensão não confinada de deslizamento (σ_c), que serão os eixos y e x da função fluxo, como mostra a Figura 3.7.

Figura 3. 7. Função fluxo exemplo (linha A) e linhas de escoamento constante.



Fonte: Adaptado de SCHULZE (2010).

Para casos onde se é possível obter uma função linear nas diferentes tensões de consolidação aplicadas, o cálculo do índice de fluxo é realizado diretamente pelo inverso da inclinação da reta obtida (JULIANO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2010).

Porém, nem todos os materiais seguem um comportamento linear em suas funções fluxo, se fazendo necessária a análise de cada ponto dentro das diferentes regiões de classificação de fluxo.

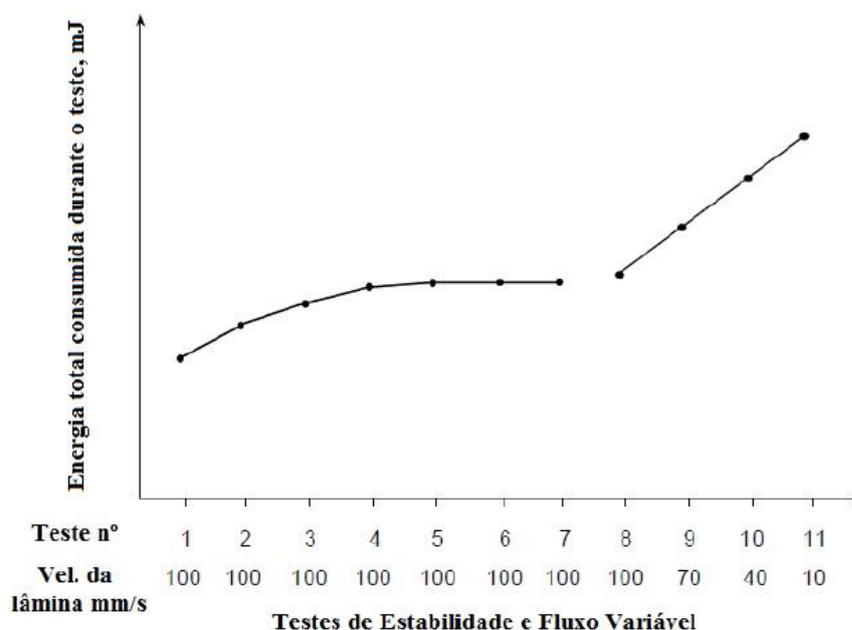
Testes de cisalhamento podem ser realizados em diferentes tipos de células, com aplicação de força radial, como nos reômetros, ou axial, como na célula de Jenike. Koynov, Glasser e Muzzio (2015) realizaram testes em pós de alumina comerciais com diâmetros médios de 59 e 4 μm , e encontraram diferenças significativas entre os parâmetros de fluxo quando variados os tipos de célula e também a condição de tensão normal aplicada nos materiais. Dessa forma, concluíram que funções de fluxo dependem do equipamento e das condições de operação impostas.

3.4.7. Índice de estabilidade e fluxo variável

Um material particulado tem suas propriedades de fluxo alteradas quando sujeito à forças externas constantes ou variáveis. Testes dinâmicos padronizados em reômetros de pós determinam a energia requerida para que determinada operação ocorra, fornecendo assim uma ideia da resistência do pó em condições de escoamento.

O reômetro de pós FT4 fornece medidas empíricas através dos testes de estabilidade e fluxo variável, onde se quantifica a energia necessária para movimentar uma amostra com auxílio de uma lâmina helicoidal. Esses testes permitem obter o gráfico mostrando na Figura 3.8.

Figura 3. 8. Exemplo de gráfico obtido no teste de estabilidade e fluxo variável.



Fonte: Adaptado de FREEMAN (2007).

Por exemplo, o teste n° 7 (transição entre testes a fluxo constante e fluxo variável), permite calcular a energia básica de fluxo (BFE), igual à energia total consumida durante este teste. Quanto maior for o valor de BFE, mais difícil será o fluxo do material particulado em questão, pois infere-se que maior será o esforço da lâmina ao percolar o material, indicando maior resistência do meio.

O índice de estabilidade com base nos valores encontrados no teste é representado pela Equação 3.13.

$$SI = \frac{\text{energia total do teste 7}}{\text{energia total do teste 1}} \quad (3.13)$$

A Tabela 3.6 exhibe a relação entre o número obtido para SI e o fluxo previsto para o sólido particulado.

Tabela 3.6. Índice de Estabilidade e sua relação com a fluidez de sólidos.

SI	Classificação do material
SI < 1.0	Fluxo afetado por fricção entre partículas.
SI ≈ 1.0	Fluidez pouco ou não alterada quando submetido às mesmas condições de fluxo repetidas vezes.
SI > 1.0	Fluidez alterada possivelmente pela formação de aglomerados.

Fonte: Adaptado de FREEMAN TECHNOLOGY (2007).

A partir do teste de fluxo variável (testes de 8 a 11 da Figura 3.6.) que analisa a variação de energia necessária para movimentar o pó em diferentes velocidades, é possível obter o índice de fluxo a partir da equação:

$$FRI = \frac{\text{energia total do teste 11}}{\text{energia total do teste 8}} \quad (3.14)$$

Com base no índice de fluxo, os materiais podem ser classificados conforme a Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Índice de Fluxo e sua relação com a fluidez de sólidos.

FRI	Classificação do material	Aplica-se à materiais
FRI > 3.0	Altamente sensível à variações de fluxo	Muito coesivos
1.5 < FRI < 3.0	Sensível à variações de fluxo	Pulverulentos
FRI ≈ 1.0	Pouco ou não sensível à variações de fluxo	Pós com elevados diâmetros médios de partícula ou tratamentos de superfície
FRI < 1.0	Pseudoplástico ou Newtoniano	Pós com aditivos (antiaglomerantes, antiumectantes, etc.)

Fonte: Adaptado de FREEMAN TECHNOLOGY (2007).

4. AVALIAÇÃO DA ESCOABILIDADE DE AÇÚCARES

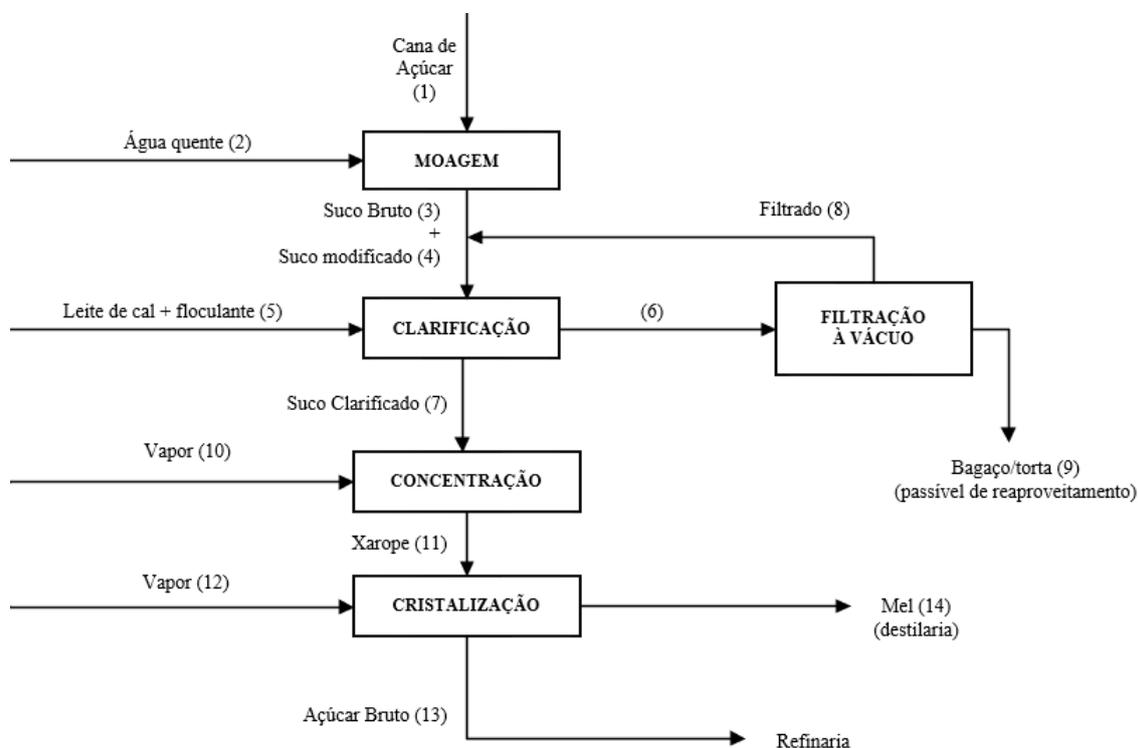
Inicialmente, será apresentada uma breve descrição do processo de fabricação do açúcar, e em seguida serão abordados os tópicos relacionados à escoabilidade e caracterização físico-química dos açúcares, e como elas afetam as suas propriedades de fluxo.

4.1. Açúcar: processo de fabricação

O açúcar, importante matéria-prima básica de produtos de panificação, bebidas, “snacks”, confeitos, etc. Depois de seu processamento, pode ser comercializado ou submetido a etapas de processamento complementares, de acordo com as características e finalidades do produto desejado.

Um diagrama de blocos simplificado da produção de açúcar bruto é exibido na Figura 4.1.

Figura 4.1. Diagrama de blocos simplificado do processamento de açúcar.



Fonte: Adaptado de JEGATHEESAN (2012).

Em linhas gerais, a cana de açúcar (corrente 1) e água quente (corrente 2) são alimentados ao processo de moagem. Dessa primeira operação se origina o suco bruto (corrente 3), que ao se unir ao elemento filtrado (corrente 8) oriundo da filtração à vácuo se torna suco modificado (corrente 4). O suco modificado é alimentado no processo de clarificação, somado a uma corrente (5) contendo leite de cal e floculante. Parte do conteúdo clarificado vai para a filtração a vácuo (corrente 6) e parte para o processo de concentração (corrente 7). O produto da filtração à vácuo, fora o elemento filtrado já citado é o bagaço/torta (corrente 9), passível de reaproveitamento. O suco clarificado (corrente 7), fruto da clarificação, e o vapor (corrente 10) são os fluxos mássicos de entrada do processo de concentração, originando o xarope (corrente 11). Esta última corrente é destinada ao processo de clarificação e produz o açúcar bruto (corrente 13), bem como o mel (corrente 14), normalmente destinado às destilarias. Vale ressaltar que a corrente de vapor (12) é utilizada para “lavar” os cristais do açúcar.

Diversos tipos de açúcares industriais são processados de acordo com a sua finalidade, são eles: cristal, refinado, confeiteiro, impalpável, mascavo, etc. Como o açúcar mascavo passa por menos etapas de processamento, possui maior quantidade de minerais. Já o de confeiteiro, passa por mais uma etapa de branqueamento com compostos químicos e moagem, para conferir a granulometria fina e coloração mais alva. Isso implica que as características morfológicas desse tipo podem ser bem irregulares, bem como para o açúcar refinado, que é submetido a etapas de processamento parecidas. Por fim, o açúcar cristal é obtido por meio da cristalização controlada do caldo de cana, formando cristais finos regulares, com pureza de 99,5% e alto brilho, sendo o açúcar mais utilizado na produção de licores, doces em geral, sorvetes, sucos, e bebidas carbonatadas (CRUZ; SARTI, 2011). A Tabela 4.1 apresenta a composição dos açúcares cristal, refinado e mascavo:

Tabela 4.1. Composição de diferentes tipos de açúcar.

Açúcar (tipo)	Umidade (%)	Energia (kcal)	Proteína (g)	Carboidrato (g)	Cálcio (mg)	Magnésio (mg)	Ferro (mg)
Cristal	0,1	387	0,3	99,6	8	1	0,2
Mascavo	3,3	369	0,8	94,5	127	80	8,3
Refinado	0,1	387	0,3	99,5	4	1	0,1

Fonte: Adaptado de TACO (2011).

Tabela 4.1. (cont.) - Composição de diferentes tipos de açúcar.

Açúcar (tipo)	Potássio (mg)	Lipídeos (mg)	Manganês (mg)	Fósforo (mg)	Sódio (mg)	Cobre (mg)	Zinco (mg)	Riboflavina (mg)
Cristal	3	-	-	-	-	-	-	-
Mascavo	522	0,1	2,03	38	25	0,17	0,5	0,03
Refinado	6	-	-	-	12	-	-	-

Fonte: Adaptado de TACO (2011).

4.2. Caracterização físico-química dos açúcares

Os estudos de caracterização reportados na literatura são relevantes para entender os fenômenos envolvidos no escoamento de sistemas particulados. Nos subtópicos a seguir serão apresentados e discutidos dados de massa específica real, porosidade do leito solto, densidade bulk (aerada e compactada), umidade e distribuição granulométrica para diferentes tipos de açúcares: o açúcar de confeitiro (*icing sugar* - IS), o cristal (*granulated sugar* - GS), o refinado (*refined sugar* - RS) e o açúcar tipo exportação, também conhecido como '*very high polarization*' (VHP sugar - VS).

4.2.1. Massa específica real

A Tabela 4.2 apresenta a densidade real e a porosidade do leito de partículas dos 4 tipos de açúcar, sendo a massa específica real (ρ_{real}) obtida com um picnômetro gasoso (SANTOS, 2017).

Tabela 4.2. Massa específica real para cada tipo de açúcar.

Tipo de Açúcar	ρ_r (g/cm ³)	Porosidade do leito de partículas - ϵ
GS	1,5763±0,0006	0,431±0,004
IS	1,5998±0,0008	0,607±0,003
RS	1,5777±0,0006	0,508±0,002
VS	1,5885±0,0004	0,455±0,003

Fonte: SANTOS, 2017

Pode-se perceber que os números reportados são muito próximos e se aproximam à densidade real da sacarose cristalina, de $1,5737 \text{ g/cm}^3$ em temperatura ambiente (IFA, 2016). A média dos valores de densidades real reportados na Tabela 4.2 para os açúcares é de aproximadamente $1,586 \text{ g/cm}^3$, ou seja, próximos do valor indicado por Fitzpatrick *et al.* (2004), de $1,610 \text{ g/cm}^3$. A diferença percentual entre esses valores (de ambos autores), quando comparados aos valores do banco de dados IFA (2016), é exibida na Tabela 4.3:

Tabela 4.3. Valores médios de massa específica (real) para o açúcar.

Autores	$\rho_{\text{real}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Desvio (%)*
SANTOS (2017)	1,586	0,76%
Fitzpatrick <i>et al.</i> (2004)	1,610	2,31%

*tomando IFA (2016) como referência: $\rho_{\text{real}} = 1,5737 \text{ g/cm}^3$

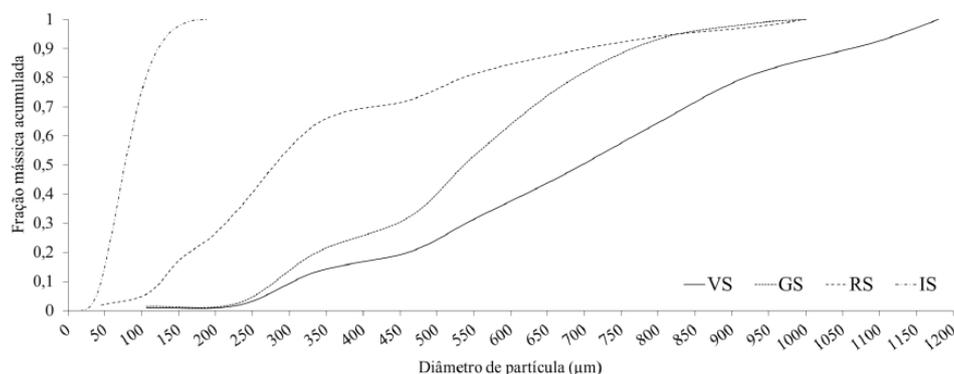
Fonte: Acervo Pessoal (2020)

Tais diferenças mínimas podem estar relacionadas ao fato da composição química estar diretamente relacionada ao processamento dos açúcares, obtidos e fabricados em países diferentes (das três fontes pesquisadas).

4.2.2. Distribuição granulométrica

Os dados analisados de distribuição granulométrica foram obtidos por Santos (2017) inicialmente por técnica de difração a laser para todas as amostras, sendo que apenas o açúcar IS apresentou distribuição granulométrica coerente (o analisador utilizado não mede partículas maiores que $500 \mu\text{m}$). Dessa forma, com base no critério de que para diâmetros médios acima de $75 \mu\text{m}$, deve-se utilizar a técnica de peneiramento (CREMASCO, 2012), a autora utilizou essa técnica para os outros tipos de açúcar. As distribuições granulométricas mostrando a fração mássica acumulada em função do diâmetro é mostrada na Figura 4.2:

Figura 4.2. Distribuição granulométrica com base na fração mássica acumulada em diferentes tipos de açúcar.



Fonte: SANTOS (2017).

Pode-se observar que GS e VS possuem distribuições granulométricas distintas, já que VS possui aglomerados de partículas maiores que 1000 μm , enquanto que a amostra RS possui distribuição semelhante a GS em frações acumuladas maiores, mas se nota maior presença de partículas finas devido à curva mais acentuada no início da distribuição. Para os açúcares cristais (VS e GS), observa-se que para a amostra GS, por exemplo, há 10% das partículas abaixo de 276 μm e 90% abaixo de 772 μm (SANTOS, 2017).

No trabalho citado, o diâmetro de Sauter foi obtido pelo próprio equipamento de difração à laser para o açúcar IS. Para os outros açúcares utilizou-se a Equação 3.8. Dessa forma, os diâmetros médios dos 4 tipos de açúcares foram obtidos e os resultados podem ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Diâmetros de Sauter de diferentes tipos de açúcar.

Tipo de açúcar	Ds (μm)
GS	506±2
IS	69±1
RS	262±5
VS	633±25

Fonte: SANTOS (2017).

Geralmente, um sistema com partículas maiores que 200 μm é considerado de “escoamento livre”, e partículas menores estão mais sujeitas às forças de coesão e exibem

assim, um “escoamento mais difícil” (TEUNOU *et al.*, 1999). No contexto industrial, a não uniformidade do tamanho dos cristais, pode prejudicar a calibração de sistemas de dosagem, gerando a necessidade de reajustes mais frequentes (OLIVEIRA; ESQUIAVETO; SILVA JÚNIOR, 2007).

Powers (1960) apud Oliveira (2015) postulou que açúcar cristal obtido de acordo com procedimentos padrões de cristalização, reportam dados (em base mássica) de uma distribuição granulométrica monomodal, quando submetidos à técnica do peneiramento. Isso, como pode ser visto nos resultados apresentados por Santos (2017), não ocorreu para as amostras utilizadas.

De forma geral, pode-se concluir que o açúcar IS é considerado um pó de granulometria fina enquanto RS apresenta granulometria intermediária e com ampla distribuição (com partículas desde 50 até 1000 μm). Os açúcares GS e VS são os tipos considerados “granulares” com diâmetros variando de 100 a 900 μm e de 250 à 1.200 μm respectivamente, utilizando como critério a Tabela 3.3. já apresentada.

4.2.3. Porosidade do leito solto

Os valores de porosidade média obtidos são exibidos na Tabela 4.4, calculados pela Equação 3.3, podem ter relação com as granulometrias (apresentadas no subtópico 4.1.2) e formato das partículas. A porosidade é uma propriedade muito importante no que diz respeito aos processos de transferência de massa e calor, já que os espaços vazios podem ser preenchidos com gases, líquidos e partículas do meio.

Analisando-se os dados de porosidade, tem-se que açúcar IS apresentou a maior porosidade, mesmo possuindo partículas mais finas. Isso ocorre, porque em leitos particulados de baixa granulometria, a presença acentuada das forças interparticulares do tipo van der Waals e/ou eletrostáticas que contribuem para um aumento na coesão dessas partículas, pode aumentar também, a tendência à formação de aglomerados, tornando a porosidade do leito maior. Já para os açúcares do tipo VS e GS, as porosidades foram semelhantes entre si e menores que IS. RS por sua vez, apresentou distribuição granulométrica ampla, e isso caracterizou sua porosidade como intermediária entre os testados (SANTOS, 2017).

Gijón-Arreortúa e Tecante (2015) avaliaram a porosidade de açúcar IS, e a diferença percentual entre os autores pesquisados se encontra na Tabela 4.5 a seguir:

Tabela 4.5. Valores de porosidade para o açúcar de confeitiro (IS).

Autores	Porosidade (IS) – ε	Diferença (%)
SANTOS, 2017	0,607	10,54%*

* tomando SANTOS (2017) como referência

Fonte: Acervo Pessoal (2020)

Sendo assim, para o açúcar IS, verificou-se uma diferença de aproximadamente 10,54% entre os autores consultados. Para fins de engenharia e aplicações, levando em consideração os fatores que afetam essa medição: as diferenças de matéria-prima, das condições de processamento, umidade relativa e temperatura ambiente, 10,54% de diferença entre os valores de umidade é pouco relevante, ou seja, aceitável no contexto da indústria de açúcar (contexto analisado nesse trabalho).

4.2.4. Densidade bulk

As densidades *bulk* aerada e compactada dos leitos de partículas dos açúcares para as duas fontes selecionadas (julgadas como mais pertinentes) são exibidas nas Tabelas 4.6 e 4.7, respectivamente, bem como suas diferenças percentuais calculadas:

Tabela 4.6. Valores de densidade bulk aerada para cada tipo de açúcar.

Tipo de açúcar	ρ_{ba} (g/cm³) - SANTOS (2017)	ρ_{ba} (g/cm³) - SILVA e CONDOTTA (2017)	Diferença (%)*
GS	0,897	0,9378	4,55%
IS	0,629	0,5984	4,87%
RS	0,777	0,7188	7,49%
VS	0,866	0,8971	3,59%

*tomando SANTOS (2017) como referência

Fonte: Acervo Pessoal (2020)

Tabela 4.7. Valores de densidade bulk compactada para cada tipo de açúcar.

Tipo de açúcar	ρ_{bc} (g/cm ³) - SANTOS (2017)	ρ_{bc} (g/cm ³) - SILVA e CONDOTTA (2017)	Diferença (%)*
GS	0,995	0,997	0,20%
IS	0,840	0,6789	19%
RS	0,949	0,8334	12%
VS	0,962	0,9569	0,53%

*tomando SANTOS (2017) como referência

Fonte: Acervo Pessoal (2020)

Para ambas as fontes examinadas, a menor densidade aerada (sem compactação) foi para o açúcar confeiteiro (tipo IS). Já os açúcares do tipo GS e VS, apresentaram densidades muito próximas (tanto aerada quanto compactada). Por fim, o açúcar RS, apresentou valores intermediários de densidades entre os tipos IS e VS/GS.

Assim como destaca Santos (2017), na caracterização de um leito de partículas, as densidades antes e depois do processo de compactação são dados importantes, pois a maneira na qual cada pó ou sistema particulado tende a se acomodar varia de acordo com as propriedades físicas das partículas presentes no sistema. Para um sistema de partículas com formatos regulares e tamanhos uniformes (esferas de vidro perfeitamente rígidas, por exemplo) poderia se esperar uma densidade constante, pois não há mudança no arranjo antes e após o sistema sofrer compactação (seja esta por aplicação de pressão – estática, ou por vibração – dinâmica).

Finalmente, os dados analisados concordam bem entre si, com uma média de diferença de aproximadamente 5,12% para a densidade *bulk* aerada e em torno de 8,02% para a densidade *bulk* compactada. Vale ressaltar que as diferenças percentuais para a densidade *bulk* compactada são mais pronunciadas para os açúcares de tipo IS e RS, assim como exhibe a Tabela 4.7.

4.2.5. Umidade

No primeiro estudo consultado, o conteúdo de umidade foi determinado segundo a metodologia proposta pelo Instituto Adolfo Lutz 171/IV (IAL, 2008). Os valores de umidade e níveis de saturação foram obtidos após abertas as embalagens comerciais

(SANTOS, 2017), e a umidade em base úmida e a saturação foram calculadas conforme a equação 3.7, bem mostrado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Umidade e níveis de saturação da água em leitos de açúcares comerciais.

Tipo de açúcar	u.b.u. (%)	S (%)
GS	0,03±0,02	0,07
IS	0,17±0,02	0,44
RS	0,31±0,02	0,79
VS	0,06±0,02	0,20

Fonte: SANTOS (2017)

A partir da análise dos dados obtidos, pode-se inferir conforme Duffy e Puri (1996) postularam, que um aumento de apenas 3% na quantidade de água presente em açúcar provoca um aumento significativo na força coesiva de 1,6 para 13,1 kPa. Como parâmetro de umidade máxima permitido na indústria de produção de açúcar, tem se, aproximadamente 0,05 e 0,15% para os tipos mais utilizados (VS e GS) como matéria-prima (USINA ALTO ALEGRE, 2020). Para o caso do açúcar RS que excede esse parâmetro, há a possibilidade de elevação da umidade no processo de transporte e armazenagem.

Para alguns casos, as diferenças nas umidades dos materiais são relevantes e podem influenciar a compactação e fluidez dos açúcares. Para a saturação (S) da água, os valores obtidos nos açúcares citados não ultrapassaram 1% e podem, por conseguinte, serem considerados materiais secos, ou melhor, sem a presença de pontes líquidas que poderiam gerar forças de resistência ao escoamento (SANTOS, 2017).

No segundo estudo examinado, a umidade foi determinada usando um analisador de umidade por infravermelho, com relação aos açúcares cristal (GS) e VHP (VS), houve absorção de uma pequena quantidade de umidade, onde os resultados dos testes clássicos apresentaram praticamente os mesmos resultados para as amostras secas e úmidas (SILVA e CONDOTTA, 2017), como mostra a Tabela 4.9:

Tabela 4.9. Conteúdo de umidade para as amostras secas e úmidas de açúcares comerciais.

Tipo de açúcar	Umidade amostra seca (%)	Umidade amostra úmida (%)
GS	0,2	0,4
IS	0,7	1,8
RS	0,2	0,9
VS	0,2	0,3

Fonte: SILVA e CONDOTTA (2017).

4.3. Pesquisas sobre escoabilidade de açúcares

Como forma de contribuir para o melhor entendimento do comportamento de açúcares em condições de armazenagem e transporte, diversos autores investigaram aspectos como isotermas e influência da umidade na escoabilidade destes materiais. Uma síntese é apresentada na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Pesquisas sobre parâmetros de escoabilidade de açúcares e suas respectivas contribuições.

Autores	Materiais ou Métodos	Contribuições
(DITTMAR; BROTHERS, 1935)	Açúcar cristal e misturas com açúcar invertido	Isotermas de açúcar. 20% de açúcar invertido aumenta capacidade de absorção de água. Pontes líquidas intensificam.
(SOUSA <i>et al</i> , 2019)	Açúcares refinado, demerara e bruto (VHP)	O aumento da umidade piora a escoabilidade dos pós, atingindo classificação razoável ou ruim.
(ROGÉ; MATHLOUTHI, 2003)	Açúcar cristal	Adição de finos ($dp < 500 \mu m$) facilitou a formação de aglomerados.
(CHITPRASERT; CHEDCHANT, 2006)	Açúcar bruto (VHP)	Determinação de condições ideais de estocagem para esse tipo de açúcar, na $T=30^{\circ}C$: $dp > 425 \mu m$ e $RH < 67,89\%$.

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2017

Observa-se que as primeiras pesquisas datam de 1935, com a avaliação de isotermas do açúcar e a conclusão de que as pontes líquidas se intensificavam nas misturas com 20% de açúcar invertido (DITTMAR; BROTHERS, 1935).

Em 1996, foi constatada a relação diretamente proporcional entre coesão e a umidade do açúcar (DUFFY; PURI, 1996).

Com uma abordagem voltada para as melhores formas de estocagem de açúcar bruto (VHP), Chitraseert e Chedchant (2006), determinaram as condições ótimas: temperaturas de 30°C, diâmetros de partícula maiores que 425 μm e HR menores que 67,89%.

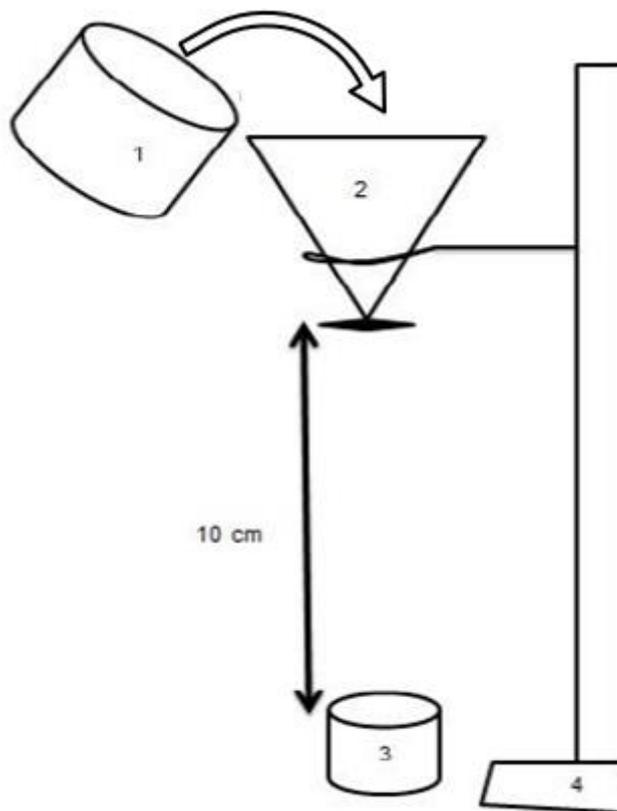
4.4. Propriedades de fluxo dos açúcares

4.4.1. Índice de Hausner

O índice de Hausner é uma medida relativamente simples na análise de fluxo de leitos particulados, bastante aplicado nas indústrias, por ser rápido e de custo baixo (SANTOS, 2017).

Os dados analisados para Índice de Hausner também se originam na dissertação publicada por Santos (2017), em que o método de despejo foi padronizado para as análises de densidade bulk aerada e compactada, e, como pode se ver nos próximos subtópicos, para o ângulo de repouso estático. No caso dos materiais granulares (açúcares VS e GS), foi usada uma massa de 200g enquanto para materiais mais finos (açúcares RS e IS), 100 g. Um esquema que representa o aparato experimental é representado na Figura 4.3.

Figura 4.3. Arranjo experimental adotado para despejo de partículas na realização das análises de densidade bulk e ângulo de repouso estático. 1- Recipiente contendo a amostra; 2- funil com saída bloqueada; 3- Proveta de vidro 250 ml para teste de compactação ou placa de Petri (D = 10,6 cm) para base fixa da medida do ângulo de repouso estático.



Fonte: Adaptado de SANTOS (2017).

As densidades bulk aerada e compactada foram obtidas por testes de compactação no Tap2S (Logan Instruments, EUA) utilizando a metodologia U.S.P.I, sendo que a primeira medida foi a obtida logo após o despejo e a segunda foi obtida depois da batida de número 500, a partir da qual a densidade dos materiais manteve-se praticamente constante (SANTOS, 2017). Os dados obtidos através desses testes de compactação (descritos no item 3.2.4. deste trabalho) possibilitaram o cálculo do índice de Hausner, através da equação 3.10. Com os métodos semelhantes de compactação (diferindo apenas para um número total de 2000 batidas) e cálculos já comentados, Silva (2017) também reportou dados de Índice de Hausner para os açúcares analisados. Eles estão mostrados na Tabela 4.11:

Tabela 4.11. Índice de Hausner para diferentes tipos de açúcar e classificação do fluxo segundo a *European Pharmacopeia*.

Tipo de açúcar	HR (-) - SANTOS (2017)	Classificação do fluxo	HR (-) -SILVA e CONDOTTA (2017)	Classificação do fluxo	Diferença (%)*
GS	1,10	Excelente	1,05	Excelente	4,82%
IS	1,33	Passável	1,21	Razoável	11,29%
RS	1,21	Razoável	1,18	Bom	0,17%
VS	1,11	Excelente	1,08	Excelente	2,69%

*tomando SANTOS (2017) como referência

Fonte: Acervo Pessoal (2020)

O maior valor encontrado foi para o açúcar IS, indicando que este é o material que apresenta pior fluidez, como esperado em razão de seu menor diâmetro médio. Já os açúcares GS e VS apresentaram valores similares de índice de Hausner, o que se justifica porque suas propriedades físicas e morfológicas diferem pouco entre si. Finalmente, um valor de índice de Hausner maior que o encontrado para os açúcares VS e GS e menor que o de IS, foi obtido para o açúcar RS, que mesmo apresentando ampla distribuição granulométrica possui diâmetro médio menor, o que favorece a ação de forças interparticulares como forças de van der Waals e eletrostáticas, potencializando a coesividade deste material. Como pôde ser observado, nenhum açúcar teve seu fluxo classificado como “difícil” nas condições analisadas (SANTOS, 2017).

É interessante observar que mesmo com valores de Índices de Hausner diferentes, as conclusões reportadas para cada trabalho são semelhantes, já que os dados experimentais têm pouca diferença entre si (maior diferença é de, aproximadamente, 11,29%), tomando o valor de Santos (2017) como referência, e em média 4,74%.

4.4.2. Ângulo de repouso estático

Os ângulos de repouso estático dos açúcares VHP (VS) e refinado (RS) para as duas fontes consultadas são exibidas na Tabela 4.12, bem como suas diferenças percentuais calculadas:

Tabela 4.12. Ângulo de repouso estático e classificação de acordo com a European Pharmacopeia (2010).

Tipo de açúcar	ARe (°) - SANTOS (2017)	Classificação do fluxo	ARe (°) – SOUSA <i>et al</i> (2019)	Classificação do fluxo	Diferença (%)*
RS	38±1	Razoável	36 ± 1	Razoável	5,3%
VS	32±1	Bom	36,8 ± 0,5	Razoável	12,5%

*tomando SANTOS (2017) como referência

Fonte: Acervo Pessoal (2020)

Como o ângulo de repouso estático (ARe) é considerado uma medida de rápida análise, que determina a fluidez de um sólido particulado em condições de descarga, relacionada de forma inversamente proporcional, ou seja, quanto menor o ARe, mais facilmente o particulado escoar. Os resultados apresentados na Tabela 4.12. mostram que o açúcar VS possui menor ARe, e assim, pode ser classificado como material de melhor fluidez dentre os tipos estudados. Já o açúcar RS também apresenta valor próximo se considerados os desvios padrão, e foi classificado para ambos autores, como de fluxo razoável, ou seja, mais difícil que RS. O valor mais baixo para o açúcar VS pode estar relacionado às propriedades inerentes ao cristal, mas principalmente às suas características físicas como granulometria maior que os outros tipos. A pilha formada se mostra angulações menores, pois apesar do atrito presente, tais partículas são capazes de deslizar umas sobre as outras com mais facilidade que partículas menores. Como essas medidas são muito dependentes do operador e dos critérios de análise por ele utilizados, esses dados são de difícil comparação. Vale ressaltar também que a caracterização dos materiais deve ser mais explorada, a fim de se minimizar tais diferenças na comparação dos dados (SANTOS, 2017).

Por fim, os dados analisados apresentaram boa concordância, com uma média de diferença de aproximadamente 8,9% para os açúcares analisados e comparados.

4.4.3. Ângulo de repouso dinâmico

Os ângulos de repouso dinâmico dos açúcares VHP (VS) e refinado (RS) para as duas fontes consultadas são exibidas na Tabela 4.13, bem como suas diferenças percentuais calculadas:

Tabela 4.13. Ângulo de repouso dinâmico e classificação de acordo com a European Pharmacopeia (2010).

Tipo de açúcar	ARd (°) - SANTOS (2017)	ARd (°) – SOUSA <i>et al</i> (2019)	Diferença (%)*
RS	50±4	45,2 ± 0,7	10,0%
VS	40±1	43,2 ± 0,4	7,5%

*tomando SANTOS (2017) como referência

Fonte: Acervo Pessoal (2020)

Para os açúcares analisados, nota-se que há relação entre ARe e ARd pois a ordem de classificação do fluxo manteve-se à mesma, sendo VS o de menor ângulo e RS, de fluxo mais difícil, com maior ângulo. As medidas de ângulo de repouso dinâmico também são dependentes do operador. Assim como Santos (2017) destaca, dependem também do regime de escoamento no interior do tambor, que varia dependendo da velocidade de rotação ajustada (cascata, avalanche, e outras nomenclaturas adotadas).

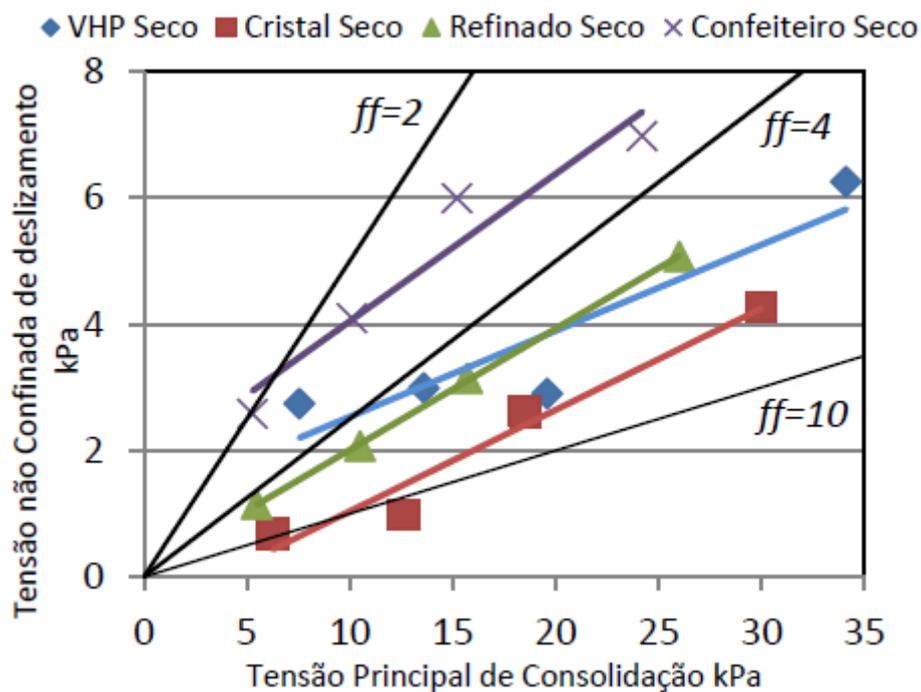
Como não foram encontrados na literatura critérios definidos para classificar o fluxo de ARd, da mesma forma que para o ARe e para o HR, pode-se apenas inferir sobre a fluidez comparando os resultados entre si, sendo o menor ângulo indicativo de maior fluidez e vice-versa. Para os dados analisados, teve-se uma diferença média de aproximadamente 8,8%, o que indica uma boa concordância e confiabilidade dos experimentos reportados nos trabalhos examinados.

4.4.4. Função Fluxo

Os três trabalhos avaliados estudam a função fluxo para os quatro açúcares até agora avaliados, apenas se diferenciando em termos de umidade. Um deles se aprofunda nas frações finas e grossas do açúcar refinado. Os resultados de cada um deles, métodos e possíveis diferenças são apresentados no decorrer do texto.

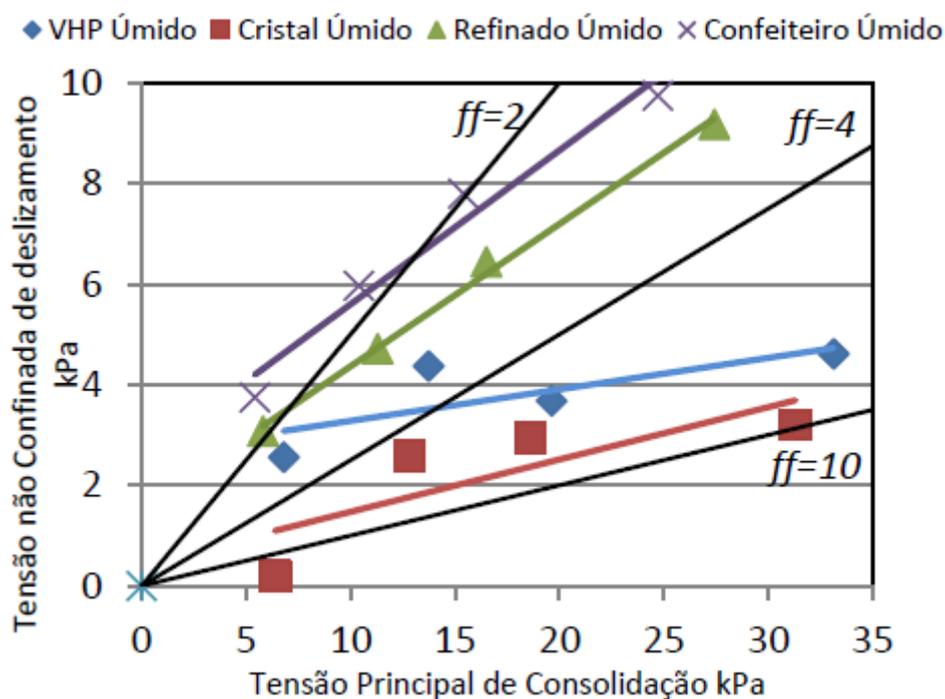
No primeiro estudo analisado, Silva e Condotta (2017) obtiveram as funções fluxo exibidas nas Figuras 4.4 e 4.5 utilizando o teste de cisalhamento no reômetro de pós FT-4, as quais foram realizadas sob tensões de consolidação de 3, 6, 9 e 15 kPa, para açúcares com diferentes umidades. A partir de gráficos semelhantes aos citados no tópico 3.4.5.1 (vide Figuras 3.6 e 3.7), foram obtidas as funções de fluxo, mostradas nas Figuras 4.4 e 4.5.

Figura 4.4. Função de fluxo para as amostras secas.



Fonte: SILVA e CONDOTTI (2017).

Figura 4.5. Função de fluxo para as amostras úmidas.

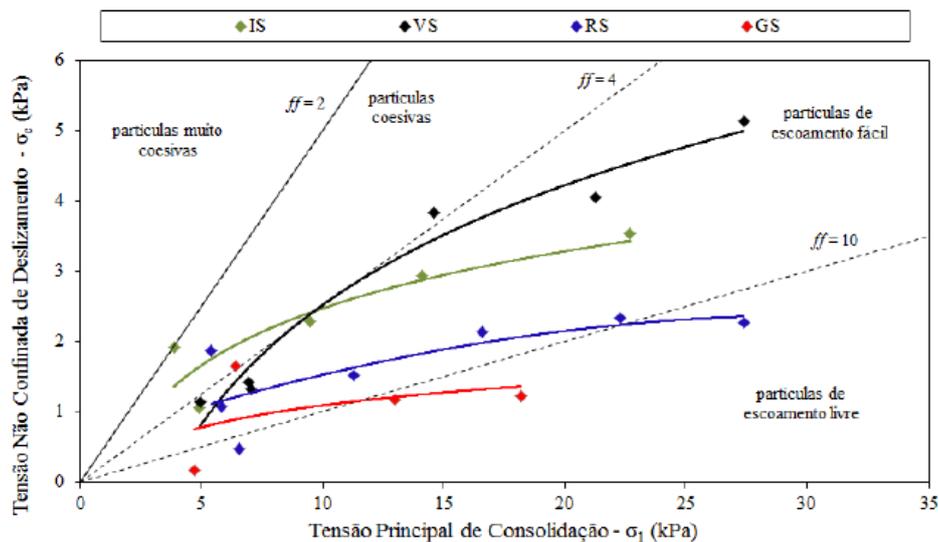


Fonte: SILVA e CONDOTTI (2017).

Dentre os açúcares analisados, o confeiteiro e refinado foram o que absorveram mais umidade e, conseqüentemente, apresentaram menores valores Função de Fluxo (SILVA e CONDOTTI, 2017), inferindo-se fluxos coesivos e de escoamento fácil para ambos, respectivamente.

Para o segundo trabalho estudado, analogamente, foi usado o reômetro de pós FT-4, para o teste de cisalhamento, sob tensões de consolidação 2.2, 3, 6, 9 e 12 kPa e os resultados reportados são exibidos na Figura 4.6.

Figura 4.6. Funções Fluxo para açúcares e regiões de escoamento.



Fonte: SANTOS (2017).

Santos (2017) constatou que o ajuste linear não se mostrou apropriado para obtenção de índices de fluxo. Observa-se que todas as curvas apresentam tendência de crescimento da tensão de cisalhamento com a tensão de consolidação e que existe uma dispersão significativa dos pontos em todo intervalo de consolidação, mais especificamente para os açúcares VS e GS. A autora atribuiu esse comportamento ao formato cristalino e maior granulometria das partículas, que dificultam a identificação precisa das tensões de ruptura no reômetro.

Para os açúcares com menor granulometria IS e RS, representados pelas curvas verde e azul respectivamente, a tendência apresentada corresponde ao esperado. Para IS, o aumento da tensão de consolidação gera um comportamento que passa de coesivo para de fácil escoamento, ao mesmo tempo que RS apresenta-se dentro da faixa de escoamento fácil ou fluxo livre durante toda faixa de consolidação. Tal distinção em condições mais baixas de consolidação deve-se às forças de coesão mais acentuadas (van der Waals e eletrostáticas, possivelmente) no IS devido a maior quantidade de partículas finas e menor diâmetro médio (SANTOS, 2017).

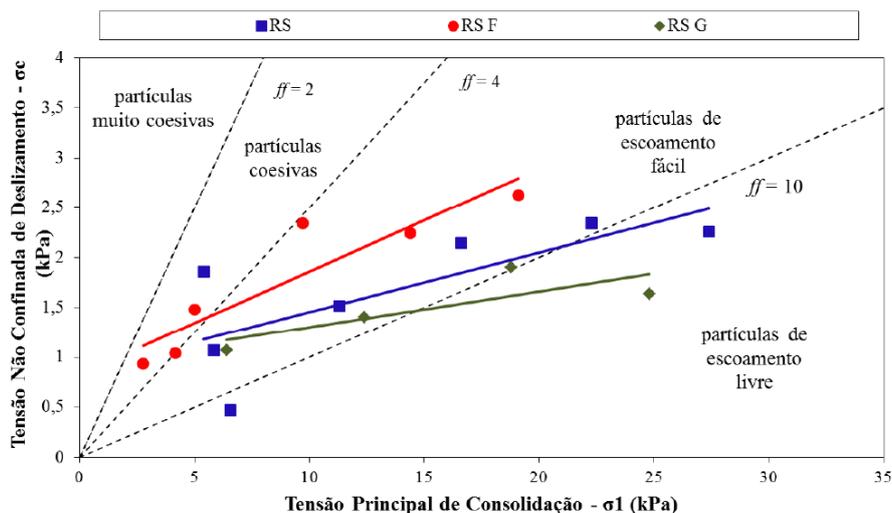
Por fim, Santos (2017) reportou uma maior dispersão dos pontos para os açúcares granulares GS e VS, representados pelas curvas vermelha e preta respectivamente. Para as amostras de GS, infere-se que durante testes realizados à altas tensões normais de consolidação (12 e 15 kPa) o material sofreu quebras e, assim, interferências inerentes ao

próprio material levaram o teste à resultados sem consistência física. Sendo assim, esses pontos não foram incluídos no gráfico da Figura 4.6. Ainda nesse mesmo estudo (SANTOS, 2017) concluiu-se que no caso de VS a curva se apresentou dentro da faixa de partículas de escoamento fácil em toda faixa de consolidação, o que está de acordo com as propriedades físicas que classificaram esse tipo como o de maior diâmetro médio, o que reduz a resistência ao escoamento conferida por forças de coesão.

Freeman (2007) estudou materiais não coesivos (três diferentes pós de lactose – na ordem de 100 μm) e coesivos (talco, lactose moída e calcário – na ordem de 20 μm). Eles verificaram, por meio de testes de cisalhamento em reômetro FT4, que os sólidos bulk classificados como não coesivos não retornaram valores de tensão não confinada de deslizamento (σ_c), dessa forma não puderam ter suas “*yield loci*” representadas e nenhum valor de coesividade (C) foi reportado para esses materiais. No estudo de Santos (2017), dificuldades semelhantes foram observadas com partículas maiores (açúcares VS e GS).

Por fim, o terceiro trabalho analisado, as funções fluxo foram obtidas apenas para o açúcar refinado (RS) em ensaios de cisalhamento em reômetro de pós FT4 para tensões de consolidação: 1,5; 2,2; 3; 6; 9; 12 e 15 kPa (porém nem todas as condições foram utilizadas para construção do gráfico representativo da função fluxo). Os resultados publicados são mostrados na Figura 4.7.

Figura 4.7. Funções de fluxo para açúcar refinado e suas frações finas (RSF) e grossas (RSG).



Fonte: SANTOS *et al* (2017).

Santos *et al* (2017) através do gráfico da função fluxo obtido, previram uma piora na escoabilidade para a fração mais fina do açúcar refinado conforme a tensão de consolidação é aumentada, indicando possíveis dificuldades no fluxo desse tipo de açúcar se uma grande quantidade de partículas nessa faixa de granulometria estiver presente na mistura original.

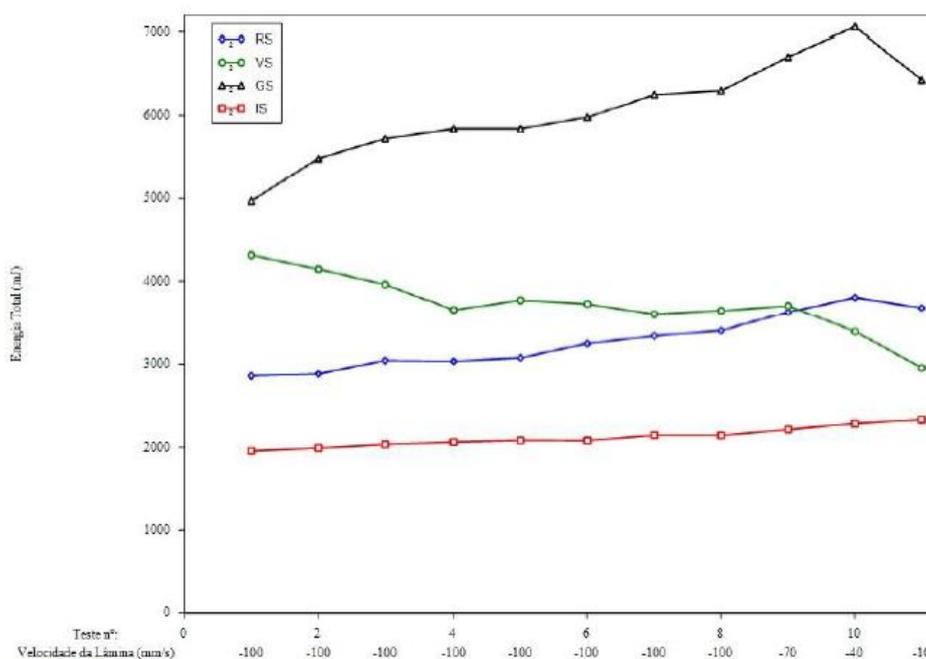
Entre os experimentos analisados foram observadas algumas diferenças nas tensões de consolidação bem como na forma como os dados foram apresentados, porém as conclusões obtidas em cada uma delas concordam entre si.

4.4.5. Índice de estabilidade e fluxo variável

O comportamento de um material particulado quando submetido a alterações em seu estado de repouso pode ser avaliado através do SI. Em geral, esse teste é feito com a pá deslocando o pó a uma velocidade de rotação constante de 100 mm/s. Admite-se que as condições de fluxo são mantidas constantes porque a pá é padronizada e as amostras são homogêneas antes de cada teste, e ao girar através do material particulado, o movimento se dá de forma idêntica para todos os materiais, o que permite a comparação entre os valores da energia dispendida em cada cenário.

Os dois trabalhos consultados propõem uma análise de índice de estabilidade (SI) e energia básica de fluxo (BFE) para os açúcares investigados. Tais resultados foram obtidos utilizando a mesma técnica, que consistiu em efetuar 7 ciclos onde a lâmina (48 mm de comprimento) percorria 160 ml de amostra com velocidade 100 mm/s e a energia dispendida em cada ciclo era monitorada. A variação desta energia ao longo dos 7 ciclos constituiu o índice de estabilidade. Já a energia básica de fluxo (BFE) foi definida como a energia dispendida pela lâmina durante o 7º teste. O teste de fluxo variável consistiu em 4 ciclos onde a velocidade da lâmina foi variável: 100, 70, 40 e 10mm/s. Os índices de estabilidade (SI) e fluxo variável (FRI), assim como a energia básica de fluxo (BFE) obtida para cada tipo de açúcar nas diferentes condições são apresentadas no decorrer desse subtópico. Seguindo tal metodologia, Santos (2017), obteve o gráfico que mostra a variação de energia de acordo com a velocidade da lâmina, apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8. Testes de estabilidade (até o 7º ponto da esquerda para a direita) e de fluxo variável (do 8º ao 11º ponto da esquerda para a direita) obtidos em reômetro de pós.



Fonte: SANTOS (2017).

Para os açúcares de maior granulometria (VS e GS), Santos (2017) observou uma maior variação nos resultados, enquanto que para as amostras de menor granulometria (RS e IS), as linhas praticamente não variam, exceto para o teste de fluxo variável (testes nº 8 a 11) de RS onde foi observado um pequeno crescimento na energia total dispendida

pela lâmina. A autora justificou esse comportamento pelo fato dessas amostras, terem um spam maior e tal dispersão na granulometria pode ter influenciado no fluxo destes em condições variáveis de perturbação no meio. Sendo assim, pôde-se inferir que, devido ao tamanho elevado dos cristais, podem ter acontecido quebras durante a análise, além de oscilações do próprio equipamento causadas por efeitos de parede, levando a flutuações na energia total de cada teste.

A partir do gráfico da Figura 4.8. foram calculados os parâmetros de fluxo apresentados na Tabela 4.14. O Índice de fluxo variável (FRI), assim como o SI também é um dado significativo do comportamento do material, porém em condições dinâmicas de fluxo, obtido para uma velocidade de rotação variável, que decresce entre os testes, conforme indicado na Figura 4.8 (70, 40 e 10 mm/s, nos testes 8 a 11). Esses parâmetros equivalem à energia de fluxo que é medida pelo reômetro de sólidos quando a lâmina percola o material particulado.

Tabela 4.14. Parâmetros de fluxo obtidos em teste de estabilidade e fluxo variável em reômetro de pós FT4.

Tipo de açúcar	BFE (mJ)	SI	FRI
RS	3339 ± 190	1,17 ± 0,01	1,08 ± 0,02
VS	3601 ± 39	0,84 ± 0,09	0,81 ± 0,02
GS	6251 ± 737	1,26 ± 0,03	1,02 ± 0,01
IS	2144 ± 52	1,10 ± 0,01	1,09 ± 0,01

Fonte: SANTOS (2017).

A observação dos valores exibido na Tabela 4.14., obtidos experimentalmente permitiu que Santos (2017) concluísse que para BFE, os açúcares VS e RS apresentaram valores próximos. Devido às diferenças na distribuição granulométrica e na morfologia entre esses tipos, esse resultado não era esperado. Tal resultado poderia indicar que nem a morfologia das partículas nem a quantidade de partículas menores influem na energia dispendida pela lâmina. No entanto sabe-se que essa afirmação não é válida, pois a maior quantidade de finos é indicativa de material mais coesivo, e representa maior resistência ao fluxo devido às forças de coesão mais intensas no meio particulado. Assim, maior deveria ser a energia gasta pela lâmina quando esta percola um leito contendo partículas mais finas.

Assim como nas outras análises de fluxo, quando há uma ampla faixa de distribuição granulométrica, as propriedades de escoamento revelam-se dependentes de outros fatores físicos relacionados à partícula e ao meio particulado, por isso a difícil previsão dos parâmetros de fluxo desses sistemas. Um bom exemplo é o açúcar GS que apresentou propriedades físicas e morfológicas semelhantes às encontradas para o açúcar VS e teve a energia dispendida pela lâmina quase duas vezes maior que o respectivo. Para esse resultado, uma possível explicação seria o fato de cristais terem ficados presos entre a lâmina e o recipiente de vidro, visto que durante as análises, ranhuras foram notadas nos recipientes cilíndricos de vidro, conferindo efeito de parede que não deveria estar presente, pois a lâmina deveria ‘sentir’ apenas a resistência do pó (SANTOS, 2017).

Por fim, Santos (2017) concluiu que o açúcar IS que possui menor granulometria foi o que ofereceu menor resistência à rotação da lâmina, um resultado diferente do esperado. De qualquer forma uma explicação plausível para esse resultado, consiste no maior volume de interstícios presentes nos leitos desse material (vide Tabela 4.3). Assim, os poros preenchidos com ar facilitam o deslocamento da lâmina. Tal resultado também permite inferir que os aglomerados que possam coexistir na amostra não exerçam tanta influência quanto a porosidade, e até mesmo pode-se cogitar que, se esses aglomerados favorecerem a formação de espaços vazios, estes acabam por contribuir com o fluxo. Os índices de estabilidade (SI) encontrados para os açúcares RS e IS foram um pouco maiores que 1 e, portanto, com base nos critérios de classificação exibidos na Tabela 3.6, esses açúcares foram pouco afetados pela variação provocada devido ao movimento constante da lâmina. GS teve seu fluxo caracterizado como instável uma vez que a energia dispendida pela lâmina ao final do teste foi maior do que no início. Já o açúcar VS retornou valor de SI menor que 1, caracterizando-o como um material particulado também de fluxo instável, porém com maiores probabilidades de que a fricção entre as partículas seja o principal responsável pela instabilidade do escoamento. Em geral, as partículas menores estão mais sujeitas à ação de forças coesivas, que contribuem para a formação de aglomerados (SANTOS, 2017).

Com exceção do VS, todos os açúcares apresentaram FRI muito próximos de 1 e assim podem ser considerados materiais que têm sua fluidez pouco afetada nas condições de fluxo impostas pela pá, com base na classificação da Tabela 3.7. Os três tipos que apresentaram essa classificação exibem granulometrias e morfologia bem diferentes entre si, e dessa maneira, não haveria razões plausíveis para que o tipo VS não apresentasse

classificação parecida. Analisado o gráfico da Figura 4.8, Santos (2017) observou que houve diferenças no final de cada curva (teste de fluxo: do 8º ao 11º ponto), sendo que no último ponto, houve uma queda na energia dispendida pela lâmina. Com isso, o valor de FRI não deve ser analisado separadamente, pois considera apenas o último e o primeiro ponto do teste de fluxo. Somente o açúcar IS apresentou energia praticamente constante durante todo o teste, mostrando que a presença de finos não exerceu influência significativa na variação do fluxo, possivelmente devido à formação de aglomerados e da elevada porosidade do leito (SANTOS, 2017).

Assim, a análise gráfica complementa a discussão dos resultados dos índices de fluidez, indicando o açúcar IS como aquele menos sensível às variações de fluxo. O açúcar VS comportou-se como o menos estável a variações, mas é possível que o método de medida não tenha sido adequado para este material. Algumas propriedades de escoamento de misturas de aluminas comerciais foram estudadas por Condotta e Machado (2014). Esses autores utilizaram a mesma metodologia em reômetro de pós FT4 e para BFE, e uma mesma amostra contendo maior porcentagem de finos, também apresentava alta porosidade (75%), mas replicou o valor mais elevado dentre as amostras, indicando maior dificuldade no giro da lâmina. Essa alumina apresentava diâmetro médio de aproximadamente 7 μm , valor baixíssimo, e dessa forma, a coesividade desse material era possivelmente muito elevada, dificultando o escoamento, como esperado. O açúcar de pior fluxo apresentado neste trabalho não chegou a ser considerado como material muito coesivo e possui granulometria da ordem de grandeza 10 vezes maior que a alumina, o que talvez justifique o comportamento contrário (SANTOS, 2017).

Já Silva e Condotta (2017) obtiveram os parâmetros de fluxo para amostras secas e úmidas dos açúcares comerciais analisados no trabalho. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15. Parâmetros de fluxo obtidos em teste de estabilidade e fluxo variável para amostras secas e úmidas.

Material	BFE (mJ)	SI	FRI
RS Seco	2530,0 ± 326	1,021 ± 0,063	0,867 ± 0,0397
VS Seco	2713,8 ± 194	1,008 ± 0,049	1,009 ± 0,0115
GS Seco	5325,4 ± 1059	1,246 ± 0,124	1,177 ± 0,106
IS Seco	1777,9 ± 118	1,025 ± 0,039	1,038 ± 0,0389
RS Úmido	1098,9 ± 74,8	0,923 ± 0,077	1,159 ± 0,049
VS Úmido	1973,1 ± 41,1	0,962 ± 0,070	1,000 ± 0,024
GS Úmido	5218,2 ± 2346	1,116 ± 0,080	0,825 ± 0,418
IS Úmido	1267,4 ± 16,6	1,043 ± 0,051	1,160 ± 0,023

Fonte: SILVA e CONDOTTA (2017).

Silva e Condotta (2017) ao compararem os valores de BFE das amostras úmidas e secas, concluíram que as secas possuem os valores dos parâmetros maiores aos das amostras úmidas, para todos os tipos de açúcar, podendo ser explicado pela diferença da configuração do leito nas amostras úmidas, em que a umidade aumenta as forças interparticulares entre as partículas formando os aglomerados. Estes por sua vez se compactam, disponibilizando poros no leito, devido a morfologia irregular das partículas que não permite um arranjo linear, estes espaços vazios oferecem menor resistência a movimentação da lâmina, necessitando menor energia.

Neste mesmo trabalho, concluiu-se que dentre os açúcares analisados, o refinado e confeiteiro foram o que absorveram mais umidade e, conseqüentemente, apresentaram os menores valores de BFE e Função de Fluxo. Os baixos valores de BFE foram atribuídas a formação de aglomerados vazios que oferecem menos energia ao movimento da lâmina (SILVA e CONDOTTA, 2017).

Finalmente, realizou-se uma comparação entres os dados obtidos por cada trabalho analisado. A Tabela 4.16 ilustra as diferenças, tomando-se Santos (2017) como referência.

Tabela 4.16. Diferença entre os dados obtidos por Santos (2017) e Silva e Condotta (2017) de amostras secas para BFE, SI e FRI.

Tipo de açúcar	BFE (mJ)	SI	FRI
RS	24,2%	12,8%	20,4%
VS	24,7%	19,0%	23,5%
GS	14,8%	1,6%	14,7%
IS	17,1%	7,3%	5,5%

*tomando SANTOS (2017) como referência

Fonte: Acervo Pessoal (2020)

Pode-se observar que a diferença máxima foi de 24,7% para VS e mínimo de 1,6% para GS, fato que corrobora com as comparações realizadas até agora, visto que mesmo com algumas diferenças das condições de processamento, de matéria-prima, temperatura ambiente e umidade relativa, para fins da indústria sucroalcooleira e de engenharia tais porcentagens são pouco relevantes, ou seja, se apresentam em níveis aceitáveis de concordância.

5. COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES

Neste Trabalho de Graduação realizou-se um levantamento de dados experimentais da literatura relacionados à avaliação e caracterização de atributos de escoabilidade de açúcares, com foco na influência das características físico-químicas nos índices de escoabilidade. Foram compilados e comparados dados da literatura, destacando os principais atributos relacionados à escoabilidade de açúcares.

Durante o processo de pesquisa, leitura, fichamento e análise das fontes de dados, foi possível encontrar um volume de dados significativo e consistente sobre o assunto. Nesse contexto, este trabalho cumpriu seu objetivo de compilar os dados para futuros estudos, os quais incluíram dados de massa específica real, porosidade do leito solto, densidade bulk (aerada e compactada), umidade e distribuição granulométrica para diferentes variedades de açúcar: o açúcar de confeitiro (IS), o cristal (GS), o refinado (RS) e o açúcar tipo exportação (VHP sugar - VS). Além disto, foram apresentados atributos de escoabilidade conhecidos desses tipos de açúcar: índice de Hausner, ângulo de repouso estático e dinâmico, função fluxo, índice de estabilidade e fluxo variável.

Por fim, pode-se dizer que uma análise criteriosa de cada método experimental, de diferenças das condições de processamento, de matéria-prima, de temperatura ambiente e de umidade relativa é essencial para se entender possíveis diferenças e tendências de escoamento, extensíveis a diversos sistemas particulados. Tendo em mente cada aplicação envolvida, é possível trabalhar com maiores ou menores intervalos de diferenças e desvios, concluindo-se assim que cada tipo de açúcar retorna um valor para suas propriedades de fluxo, dependendo dos métodos do teste aplicado e do conjunto de suas características morfológicas e físicas.

Para eventuais trabalhos futuros podem ser feitos experimentos e análises para outros tipos de açúcar como: mascavo, demerara, orgânico e outros. Uma comparação com os dados expostos poderá permitir uma melhor análise desse material higroscópico em diversas situações recorrentes do cotidiano industrial. Além disso, uma possível ampliação a respeito de estudos de fluxo desses materiais em diferentes condições de umidade, pode ser relevante para uma análise minuciosa do fenômeno de aglomeração e de como variações mínimas de umidade podem influenciar nas propriedades de fluxo de açúcares.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASFARD, H.; EVANS, G.; MORENO-ATANASIO, R. **Effect of van der Waals force cut-off distance on adhesive collision parameters in DEM simulation.** Powder Technology, v. 299, p. 9–18, 2016.

ALTHAUS, T. O.; WINDHAB, E. J. **Characterization of wet powder flowability by shear cell measurements and compaction curves.** Powder Technology, v. 215-216, p. 59–65, 2012.

BODHMAGE, A. **Correlation between physical properties and flowability indicators for fine powders.** 122 f. University of Saskatchewan, Saskatoon, 2006.

BROWN, R. L.; RICHARDS J. C.; **Principles of Powders Mechanics.** Pergamon Press, 1970.

CARR, R. L., **Evaluating Flow Properties of Solids.** Chemical Engineering, v. 1, p. 163-168. 1965.

CASTELLANOS, A. et al. **Flow Regimes in Fine Cohesive Powders.** Physical Review Letters, v. 82, n. 6, p. 1156–1159, 1999.

CASTELLANOS, A. **The relationship between attractive interparticle forces and bulk behaviour in dry and uncharged fine powders.** Advances in Physics. v. 54, n. 4, p. 263 –376. 2005.

CHITPRASERT, P.; CHEDCHANT, J. **Effects of Grain Size, Reducing Sugar Content, Temperature and Pressure on Caking of Raw Sugar.** Natural Science. v. 147, p. 141–147, 2006.

CONDOTTA, R. **Coulabilité des poudres cohésives : mesures aux faibles contraintes, granulaires humides et application à une poudre industrielle.** (These). Institut National Polytechnique de Toulouse. p. 257 p., 2005.

CONDOTTA, R.; MACHADO, C. S. **Avaliação do efeito da distribuição granulométrica nas propriedades de escoamento de materiais granulares.** In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, 2014 (editado em CD).

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluido mecânicos**. São Paulo: Blucher, 2012.

CRUZ, S. H.; SARTI, D. A. **A Química do Açúcar**. Conselho Regional de Química, 4ª Região. Piracicaba, 2011.

DITTMAR, J. H.; BROTHERS, A. **Hygroscopicity of Sugars and Sugar Mixtures. Industrial and engineering chemistry**, v. 27, n. 3, p. 333–335, 1935.

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.

FAUSTINO, P. B. **Determinação experimental da força de adesão entre partículas e meios filtrantes constituídos de celulose**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2010.

FREEMAN, T.; ARMSTRONG, B. **Consolidation of powders – How to Evaluate the Effect of Vibration Induced Powder Compaction through Flow Property Measurement**. Particulate Systems Analysis, n. 2, p. 1–6, 2011.

FREEMAN, T. C. et al. **The Characterisation of Powder and Bulk Material – a Multivariate approach using Dynamic , Shear and Bulk Property Measurements**. Bulk Solids India, p. 1–10, 2011.

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.

GELDART, D. **Types of gas fluidization. Powder Technology**. v. 7, p. 285 – 292. 1973.

GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; HASSANPOUR, A.; NWOKE, L. C.; WOULTERS, I. **Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. China Particuology**, v. 4, n. 3-4, p. 104–107, 2006.

GIJÓN-ARREORTÚA, I.; TECANTE, A. **Mixing time and power consumption during blending of cohesive food powders with a horizontal helical double-ribbon impeller**. Journal of Food Engineering, v. 149, p. 144–152, 2015.

GOMIDE, R. **Operações unitárias**. Vol.1. São Paulo: Edição do autor. 1980.

GONÇALVES, J. A. S. **Aula Moagem e Granulometria**. São Carlos, 2017.

GREY, R. O.; BEDDOW, J. K. **On the Hausner Ratio and its relationship to some properties of metal powders**. *Powder Technology*, v. 2; n. 6, p. 323–326. 1969.

IAL. Instituto Adolfo Lutz. **Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos**. 4^a ed. p. 298 – 320. São Paulo, 2008.

IFA - Institute for occupational safety and health of the german social accident insurance. GESTIS Substance Database. Disponível em: <[http://gestisen.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/011990.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestisen.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/011990.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)>. Acesso em 24 maio. 2020.

JEGATHEESAN, V. et al. **Evaluating membrane technology for clarification of sugarcane juice**. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 11, n. 2, p. 109–124, 2012.

JENIKE, A.W. **Storage and Flow of Solids**. Bull. n^o 123, Eng. Exp. Station, University of Utah, Salt Lake City, 1964.

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

LOPES NETO, J. P. L.; SILVA, V. R.; NASCIMENTO, J. W. B. **Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, n. 83, p. 639–644, 2009.

LUMAY, G. et al. **Measuring the flowing properties of powders and grains**. *Powder Technology*, v. 224, p. 19–27, 2012.

MALLOL, G. et al. **Densification of monomodal quartz particle beds by tapping**. *Chemical Engineering Science*, v. 63, n. 22, p. 5447–5456, 2008.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations in Chemical Engineering**. 5^aed. McGraw-Hill. 1993.

OLIVEIRA, D. T. **Impactos da granulometria no armazenamento do açúcar**. Apresentação (Seminário). 2015.

OLIVEIRA, D. T.; ESQUIAVETO, M. M. M.; SILVA JÚNIOR, J. F. **Impacto dos itens da especificação do açúcar na indústria alimentícia.** *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 27, p. 99–102, 2007.

PALMA, G. **Pressões e fluxos em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$).** 2005. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

PELEG, M. **Flowability of food powders and methods for its evaluation—a review.** *Journal of Food Processing Engineering*, v. 1:, p. 303– 328., 1977.

POWERS, H. E. C. **Sugar crystallization in thin films.** *International Sugar Journal*, v. 62, p. 307–312, 1960.

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

SANTOS, D. A. et al. **Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and numerical simulations using DEM.** *Advanced Powder Technology*, v. 27, n. 2, p. 692–703, 2015.

SANTOS, L. C. **Obtenção das Propriedades de Fluxo de Diferentes Tipos de Açúcar, São Carlos: UFSCar, Dissertação, 2017.**

SANTOS, L.C.; CONDOTTA, R.; M.C. FERREIRA. **Análise das propriedades de fluxo de açúcar refinado e suas frações.** Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. 9p. Universidade Estadual de Maringá, 2017.

SCICOLONE, et al. **Effect of liquid addition on the bulk and flow properties of fine and coarse glass beads.** *AICHe Journal*. v. 62, n. 3. p. 648 – 658, 2016.

SILVA, P.M.; CONDOTTA, R. **Avaliação do efeito da umidade nas propriedades de escoamento de diferentes tipos de açúcar.** Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. 7p. Universidade Federal de São Carlos, 2017.

SOUSA, L. M.; GENEROSO, B.; ZUTIN, G. M.; ITO, K. K. M.; MELO, M. C.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. **Influência da umidade nos ângulos de repouso estático e dinâmico de diferentes tipos de açúcares.** In: Anais do Simpósio Comemorativo dos 40 anos da Área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar, São Carlos, 2019.

SZULC, K.; LENART, A. **Effect of agglomeration on flowability of baby food powders.** Journal of Food Science, v. 75, n. 5, p. E276–84, 2010.

TACO. **Tabela Brasileira de composição de alimentos.** 2011. 4ª ed. rev. e ampl. 161 p. Universidade Estadual de Campinas: Núcleo de estudos e pesquisas em alimentação. Campinas, 2011.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J. **Effect of storage time and consolidation on food powder flowability.** Journal of Food Engineering, v. 43, n. 2, p. 97–101, 2000.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J.; SYNNOTT, E. C. **Characterisation of food powder flowability.** Journal of Food Engineering, v. 39, n. July 1998, p. 31–37, 1999.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Setor sucroenergético.** Disponível em: <<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/acucar/>>. Acesso em 28 mar. 2020.

USINA ALTO ALEGRE. **Características gerais do açúcar branco cristal e VHP.** Disponível em: <http://www.altoalegre.com.br/produtos/acucar_cristal.aspx>. Acesso em: 06 de setembro de 2020

VERRUIJT, A. **Soil Mechanics.** Delft University of Technology. 2012.

WOODCOCK, C.R.; MASON, J.S. **Bulk Solids Handling: An Introduction to the Practice and Technology.** Glasgow: Leonard Hill, 1987.

YANG, W.C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems.** Marcel Dekker-Nova York. 2003.

ZOU, R. P.; YU, A. B. **Evaluation of the packing characteristics of mono-sized nonspherical particles.** Powder Technology, v. 88, n. 1, p. 71–79, 1996