

Artigo Técnico

Estudo comparativo de aglomeração em disco rotativo e peletizadora.

*Comparative study of agglomeration
in rotating disk and pellet mill*

Samantha Custódio Aquino de Faria^a, Sandra
Lúcia de Moraes^b

^a Mestrado Profissional em
Processos Industriais, Instituto
de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo
S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Diretora Técnica do centro de
Materiais Avançados, Instituto
de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo
S.A., São Paulo-SP, Brasil.

Palavras-chave: aglomeração; peletização;
compressão; estudo comparativo; disco rotativo.

*Keywords: agglomeration; pelletizing; compaction;
comparative study; rotating disc.*

Resumo

O tema aglomeração é pouco pesquisado de forma aberta em universidades ou instituições de pesquisa, ocasionando uma relativa dificuldade de se encontrar dados gerais sobre os processos existentes. Desta forma, buscando contribuir com o avanço desta área do conhecimento, foram levantados dados e aspectos gerais para a seleção de equipamentos de aglomeração, comparando-se os processos por tombamento em disco rotativo e o método de baixa compressão utilizando peletizadora, utilizando areia 100% passante em 75 µm, para minimizar as variáveis de composição, que pudessem interferir na comparação dos resultados proporcionados pelos equipamentos. Dentre as comparações de formulações de aglomerantes, foi selecionado 1% de bentonita na composição da mistura e 10% de umidade inicial. No disco, foi adicionada água durante o processo, atingindo 19,5% de umidade (base úmida); já na peletizadora a umidade final foi 13%. Os resultados comparativos mostraram que para o disco rotativo a mistura não pode apresentar plasticidade que possa deformar as pelotas durante a operação; outro fator é que este processo utilizou 6,5% a mais de umidade, gerando maior custo energético de secagem. Por outro lado, o gasto de energia apenas do disco foi 10 vezes menor ao gasto de energia obtido na peletizadora. O rendimento do processo foi menor, chegando à razão de reciclo de 1:3 e promovendo maior porosidade no produto. Já a peletização mostrou maior aceitação de misturas plásticas, o produto obteve maior resistência mecânica, mas apresentou baixa porosidade. O rendimento do processo também foi melhor, chegando a 50,5% e a produtividade foi 10 vezes maior que a do disco rotativo.

Abstract

The subject of agglomeration is rarely studied openly within academic or research institutions, creating a relative difficulty of finding general data about existing processes. In this way, seeking to contribute to the progress of this field of knowledge, data and general aspects were collected for the selection of agglomeration equipment, comparing the rotating disc tumbling processes and the low compression method using a pelletizing equipment, with silica sand, 100% passing through 75µm sieve, to reduce the composition variations that could interfere in the comparison of the agglomeration methods provided by the equipment. Among the comparisons of binder formulations, bentonite was employed at 1% in the composition and 10% initial moisture. In the case of the disc, water added during the process reached 19,5% of moisture (wet base).

In the pelletizer, the moisture reached 13%. The comparative results demonstrated that for the rotating disc process the mixture mustn't have plasticity that can deform the pellets during the operation; besides, this process used 6,5% more water, causing a larger energy expenditure for drying. On the other hand, the energy expenditure for only the disc machine was 10 times lower than the energy expenditure of the pellet mill. The process yield was lower, reaching a recycle ratio of 1:3 and promoting greater porosity in the product. The pelleting showed greater acceptance of plastic mixtures. The product had greater mechanical strength, but showed lower porosity. The process yield was better, reaching 50.5% and the productivity was 10 times higher than that of the rotating disc.

1 Introdução

As indústrias de forma geral lidam com insumos em seus processos. Por mais variados que sejam esses insumos ou até mesmo produtos acabados, muitas vezes se encontram na forma de pequenas partículas sólidas. Desta forma, devido às suas características de fluidez, o manuseio e transporte destes não são tão simples. Os materiais podem apresentar características de alta fluidez, com partículas soltas umas das outras, assemelhando-se ao manuseio de um líquido, fluindo por equipamentos e pequenas frestas deles, formando uma nuvem de pó no ambiente em que são manuseados. Este pó pode trazer riscos, tanto para as pessoas que estão no entorno, como até mesmo ao meio ambiente. Pós muito finos também apresentam riscos de geração de cargas eletrostáticas, e devem sempre ser processados em equipamentos de forma adequada.

Outros materiais podem apresentar características de baixa fluidez, formação de pontes, causando empedramento, absorção de umidade e dificultando o processo ao qual será submetido. Estes problemas de manuseio podem ser mitigados de diversas formas, com alterações nos equipamentos, como o formato de um silo, por exemplo incluindo vibradores pneumáticos para forçar o escoamento do material, ou incluir algum tipo de agitação mecânica, dentre outras opções. No entanto, estas opções quase sempre não resolvem o problema por completo. Outra opção é alterar a característica das partículas, aumentando o tamanho delas (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002).

Exemplos do aumento de tamanho das partículas para facilitar o manuseio estão presentes na vida de todos, como no caso dos comprimidos de remédios, onde há uma massa de finas partículas adensadas e comprimidas. Outro exemplo é o caso de alguns tipos de

fertilizantes, formados por pequenos grânulos para aplicação no campo, em substituição à aplicação direta na forma de pó muito fino que provavelmente seria levado pelo vento. Neste caso, os nutrientes são aglomerados em grânulos esféricos para facilitar a aplicação e homogeneização do produto na área. O adensamento de biomassa também vem ganhando mercado; este processo tem o objetivo compactar fontes de biomassa como pinus, cascas de arroz, por exemplo, para melhorar o seu manuseio e estocagem e/ou para uso energético. (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002; SILVA *et al.*, 2021).

Além disso, a aglomeração em pesquisas abertas ainda é um tema pouco divulgado, ficando mais restrito em pesquisas dentro das indústrias para melhoria dos processos internos. Esses fatores dificultam o acesso a dados mais genéricos sobre a aglomeração propriamente dita, como forma de novas aplicações. Ainda, industrialmente, cada área nomeia as tecnologias de forma diferente, como o disco rotativo, que também é chamado de prato rotativo ou prato granulador; são peculiaridades de cada área que acabam dificultando as pesquisas (PIETSCH, 2002).

Dessa forma, neste trabalho, foram levantadas informações gerais, teóricas e práticas, tanto de mecanismo de aglomeração quanto de técnicas empregadas, visando subsidiar a etapa de seleção desses métodos, independente da área de atuação. Optou-se por utilizar a areia como um material padrão para ser aglomerado, uma vez que não possui composição muito variada, com mínimo de 98,5% de SiO₂, podendo ser facilmente classificada quanto as suas características que eventualmente possam vir a interferir como mais uma variável no estudo, como reações na mistura por exemplo. Com isso, buscou-se levantar os resultados que são mais impactados pelos equipamentos utilizados. Além disso, a areia é utilizada em diversos estudos fundamentais sobre efeitos da distribuição granulométrica na aglomeração, estudos sobre mecanismos de aglomeração, como o realizado por Iveson and Listster (1998), ou estudos de mecanismos de crescimento, como os realizados por Nagayashi *et al.* (2018) e Capes (1967).

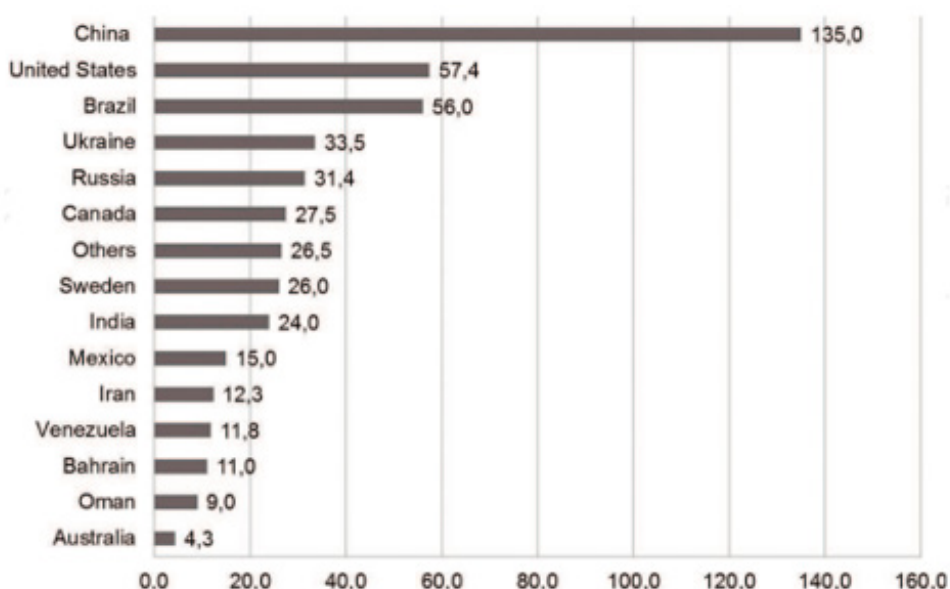
1.1 A evolução da aglomeração como estudo

Os processos de aglomeração são tão antigos quanto a formação das rochas, por exemplo, no solo o processo de aglomeração sempre ocorreu. Na natureza, algumas espécies de pássaros fazem seus ninhos com alguns artifícios para aglomerar materiais; os cupins também usam desta técnica para construir os cupinzeiros. Estes e outros exemplos só mostram o quanto essa técnica está presente no dia a dia. Apesar de ser uma técnica antiga e necessária, como estudo e desenvolvimento é relativamente recente. A primeira patente registrada foi a de briquetagem, no ano de 1848 nos EUA, intitulada “Um método

de conversão de carvão moído”, registrada em nome de William Easby. A partir disso, e com as dificuldades encontradas no manuseio de produtos, a busca por soluções foi crescendo na área da aglomeração. Em 1912, na Suécia, foi publicada uma nova patente do processo de aglomeração de minério de ferro pelo processo úmido em tambor rotativo, por A. G. Anderson, mas essa técnica só se tornou comercial em 1950 (MORAES; LIMA; RIBEIRO, 2018; SAMPAIO; COSTA; ANDRADE, 2007).

Uma publicação de Tuck and Virta (2011 apud Moraes, Lima e Ribeiro, 2018) indica a capacidade instalada no mundo para pelotização na área de mineração de minério de ferro que é da ordem de 491 milhões de toneladas por ano, mostrando o quanto este processo é importante nessa área. O gráfico da **FIGURA 1** mostra as capacidades por país.

Figura 1 - Capacidade instalada no mundo para pelotização de minérios, em milhões de toneladas por ano



Fonte: Tuck and Virta (2011 apud Moraes, Lima e Ribeiro, 2018)

Com o avanço do uso da técnica em diversos segmentos industriais, diferentes tecnologias foram desenvolvidas, sejam na linha de aglomeração por tombamento de partículas ou por compressão. Com isto, a disponibilidade de publicações sobre o tema acaba se dispersando em áreas específicas como mineração, fertilizantes, fármacos, biomassa, dificultando o estudo para novas aplicações de equipamentos em outras áreas que poderiam se beneficiar da técnica.

1.2 Aglomeração e seus mecanismos

A aglomeração consiste na união de partículas menores formando partículas maiores. Esse fenômeno pode ocorrer por diversos mecanismos que foram analisados e distribuídos dentre cinco grupos distintos e estão apresentados na **TABELA 1**, conforme descrito por Pietsch (2002).

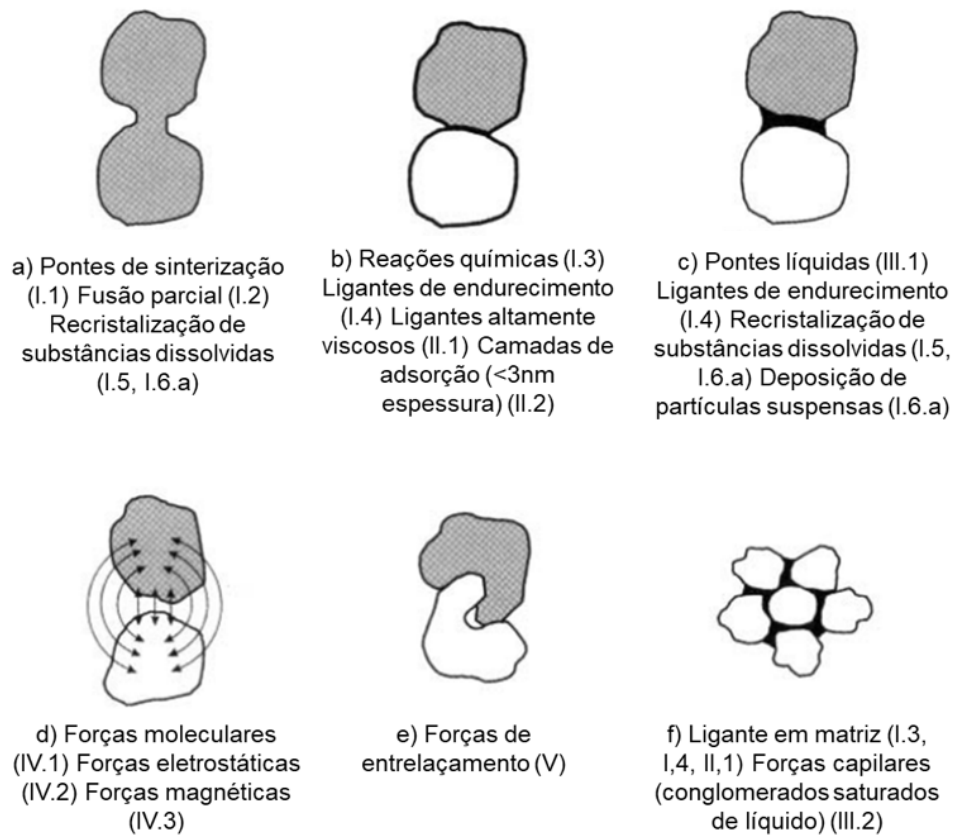
Tabela 1 - Mecanismos de ligações

I - Pontes sólidas
1. Sinterização
2. Fusão parcial
3. Reações químicas
4. Ligantes de endurecimento
5. Recristalização
6. Durante a secagem
a) Recristalização (substâncias dissolvidas)
b) Deposição (partículas suspensas)
II - Força de adesão e coesão
1. Ligantes altamente viscosos
2. Camadas de adsorção (< 3nm de espessura)
III - Tensão superficial e pressão capilar
1. Pontes líquidas
2. Forças capilares
IV - Forças de atração entre sólidos
1. Forças moleculares
a) Forças de van der Waals
b) Ligações químicas livres (forças de valência)
c) Associações (não-valência); pontes de hidrogênio
2. Forças elétricas (eletrostática, dupla camada elétrica, excesso de carga)
3. Forças magnéticas
V - Ligações de entrelaçamento

Fonte: Traduzido de Pietsch (2002)

A FIGURA 2 ilustra esquematicamente o modelo de como esses fenômenos acontecem fisicamente.

Figura 2 - Representação dos mecanismos de aglomeração



Fonte: Traduzido de Pietsch (2002)

Vale ressaltar que num sistema de aglomeração, sejam de partículas mais arredondadas ou mais alongadas, é improvável que esteja ocorrendo apenas um mecanismo de ligação. São vastas as possibilidades de aglomeração em cada ponto microscópico do sistema que envolve partículas, aglomerantes e agentes externos, podendo ocorrer uma situação diferente em cada ponto de contato (PIETSCH, 2002).

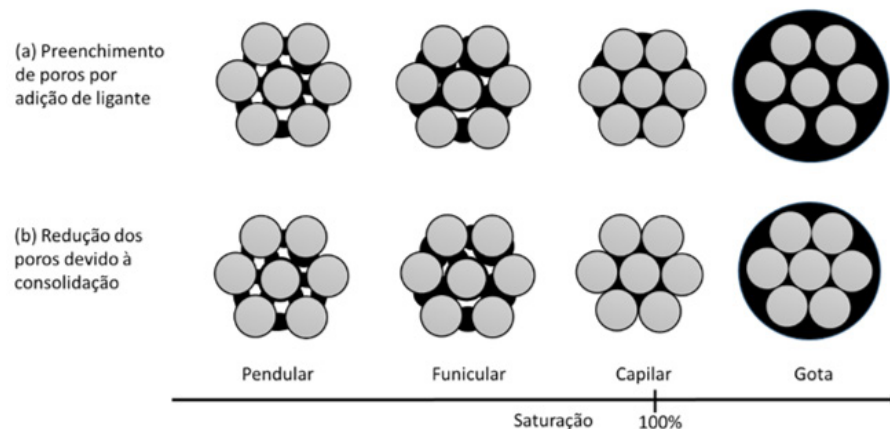
Além dos mecanismos de aglomeração, há também mecanismos de formação dos grânulos. No sistema de aglomeração há diversas fases ocorrendo, sendo elas:

a. Saturação dos poros

Conforme o líquido ligante é adicionado, e a proximidade entre partículas diminui, a saturação do grânulo que está sendo formado é elevada. Ocorre também a diminuição dos poros dentro do grânulo à medida que o líquido preenche esses vazios. A taxa de saturação pode ser elevada também com colisões entre partículas quando estas se aproximam, e após algum tempo, elas precisam ficar aderidas umas às outras para o efeito ser satisfatório.

Quando mais ligante é adicionado, os grânulos tendem a crescer mais, entretanto, se a quantidade for excessiva e o grânulo obtiver saturação próxima a 100%, uma massa poderá ser formada e a granulação perderá suas características. Na prática, é comum a expressão “over” granulação quando ocorre o excesso de líquido e a massa fica com aspecto de pasta. A Figura 3 representa como ocorre a saturação nos grânulos em formação.

Figura 3 - Representação do aumento de saturação



Fonte: Rodrigues (2012)

Legenda: a) adição de ligante e b) aproximação das partículas

Segundo estudos realizados por Saleh et. al., (2005 apud Rodrigues, 2012), definiu-se que o grau de saturação pode ser calculado conforme a Equação 1, a seguir:

$$S = \left(\frac{c+1}{mw-md-c} \right) \frac{\rho g}{\rho 1X} \quad (1)$$

Onde:

- ρ_l (kg/m³) é a densidade do líquido utilizado,
- X é a fração de espaços dentro da própria partícula, dada por:
- $X=1-\rho_g/\rho_s$,
- ρ_s (kg/m³) é a densidade real da partícula, determinada por picnômetro a gás,
- ρ_g (kg/m³) é a densidade do grânulo,
- m_w (kg) é a massa da amostra em base úmida,
- m_d (kg) é a massa da amostra em base seca,
- S é um adimensional representando o grau de saturação do líquido contido no grânulo,
- c é a fração mássica de material seco contida no ligante.

b. Formação de núcleos

No início da aglomeração, há o crescimento de pequenos grânulos, denominados núcleos, onde as partículas se unem devido à tensão superficial do ligante por dois mecanismos principalmente, como a dispersão e a imersão. (RODRIGUES, 2012).

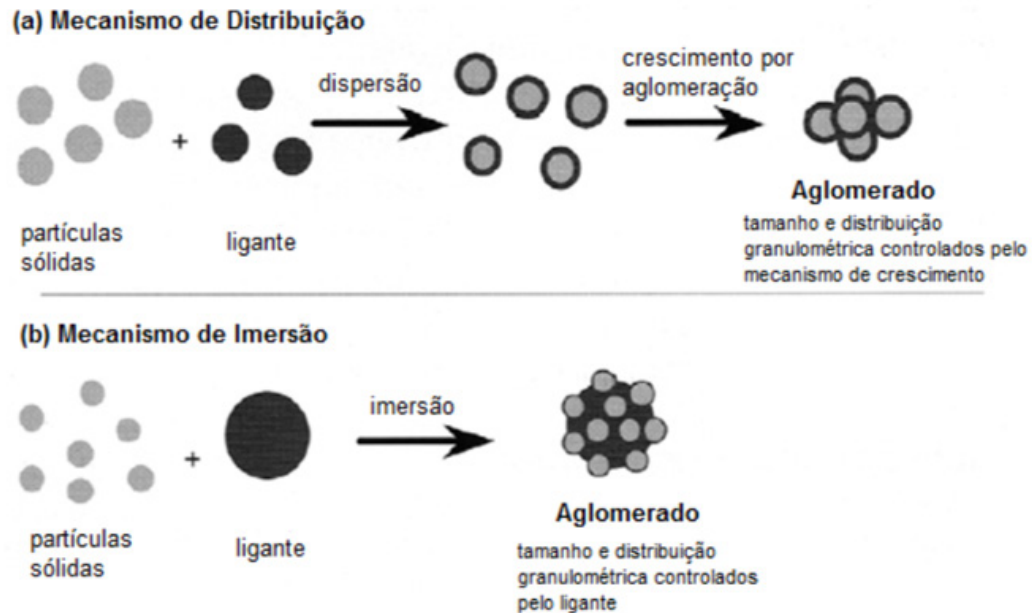
No mecanismo de dispersão, as partículas ficam totalmente cobertas pelo líquido ligante, disperso no meio. Assim, as partículas podem colidir e se manter unidas por pontes líquidas ocasionadas pelo ligante. Este mecanismo ocorre normalmente se as gotas de líquido forem maiores que o tamanho das partículas secas, **FIGURA 4a**.

No mecanismo da imersão, as partículas ficam ao redor da gota de ligante e o líquido concentrado no centro do núcleo, podendo ser controlado na forma de adição do ligante no processo. Neste caso, o mecanismo ocorrerá quando o tamanho das gotas do líquido for menor que o tamanho das partículas sólidas, **FIGURA 4b**.

$$\frac{D_{gota}}{D_{partícula}} \gg 1 \rightarrow \text{Mecanismo de Dispersão é dominante}$$

$$\frac{D_{gota}}{D_{partícula}} \ll 1 \rightarrow \text{Mecanismo de Imersão é dominante}$$

Figura 4 - Mecanismos de nucleação



Fonte: Rodrigues (2012)

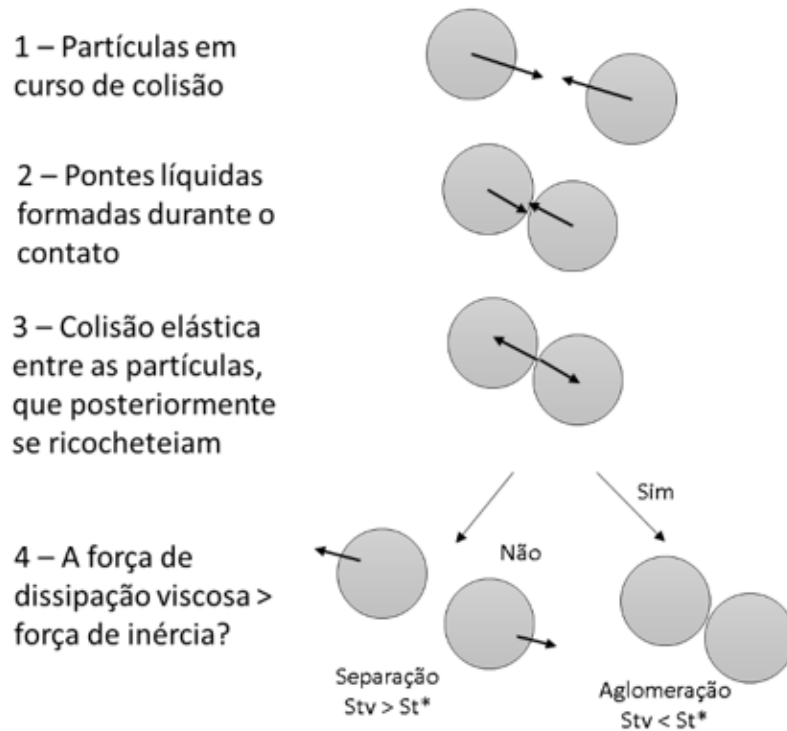
Legenda: a) distribuição e b) imersão

c. Formação de aglomerados

Um dos principais mecanismos para a formação de grânulos é a colisão das partículas que, com as forças envolvidas como as capilares e as viscosas, afetam e corroboram o mecanismo de união destas (ENNIS et. al, 1991).

Na **FIGURA 5** pode-se observar a representação do processo de colisões entre duas partículas. No regime não inercial, a probabilidade de que todas as colisões sejam efetivas é muito alta. É nesta fase que se inicia a formação dos grânulos e o crescimento deles, ocorrendo o processo de coalescência aleatória. Ainda neste estágio, há baixa umidade e o equilíbrio da distribuição granulométrica é atingido. No estágio inercial, o crescimento dos grânulos é o fenômeno predominante e maior umidade é requerida para obter maior número de colisões bem-sucedidas e, assim, ocorrer o crescimento. Como muitas colisões não são efetivas, a distribuição granulométrica fica bastante distinta, com a formação de grânulos maiores, que cresceram preferencialmente com partículas maiores por coalescência e partículas menores, formando a porção de finos no processo.

Figura 5 - Representação da colisão entre duas partículas durante o processo de aglomeração segundo critério de Stokes



Fonte: adaptado de Rodrigues (2012)

d. Coalescência

A coalescência ocorre após o mecanismo de nucleação, onde já foram formados pequenos aglomerados com excesso de líquido na superfície, permitindo maior deformação plástica. Quando outras partículas colidem com os núcleos, é causada uma deformação parcial aumentando assim a área superficial, auxiliando na união das partículas. A taxa de coalescência depende da deformação e, de outros aspectos, como tamanho das partículas, energia cinética do grânulo e características físicas da mistura, que afetam o crescimento do grânulo também. Quando os núcleos são bem menores, os grânulos formados podem ser mais resistentes, e por isto, podem apresentar menor deformação, ocasionando um crescimento demorado. Outros fatores, como a rotação do tambor interferem na energia cinética envolvida nos grânulos maiores, proporcionando maior deformação. As características dos materiais também são fatores importantes (LITSTER; ENNIS, 2004).

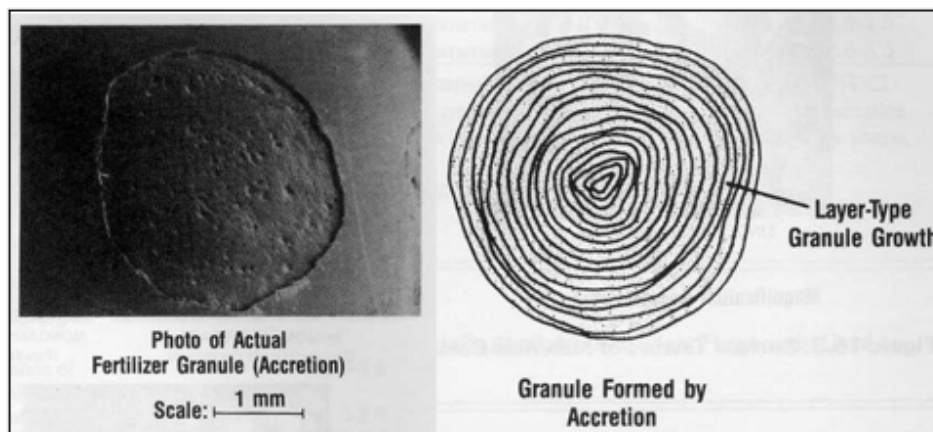
e. Crescimento

A granulação via úmida ocorre por diversos mecanismos e, se se observar de forma macro, serão encontrados dois mecanismos de crescimento, por camadas e por matriz (BERNARDES, 2006; SNOW, *et al.*, 1999).

O crescimento por camadas ou *layering*, normalmente ocorre quando já há um núcleo maior pré-formado, como em casos de reciclo de material grosseiro que passa por moagem e retorna para a aglomeração. Uma desvantagem são as altas taxas de reciclo; por outro lado, os grânulos possuem menor tendência ao empedramento em relação aos grânulos formados por aglomeração “sem padrão”, considerando mesma umidade e podem gerar distribuições granulométricas mais estreitas durante o processo. As durezas dos materiais também tendem a ser maiores; um estudo realizado pelo Centro Internacional de Desenvolvimento de Fertilizantes (IFDC) mostrou um aumento significativo na resistência à compressão dos fertilizantes produzidos pelo método de crescimento em camadas, comparativamente ao processo de aglomeração sem a formação das camadas (FERTILIZER MANUAL, 1998; SINDEN, 2010).

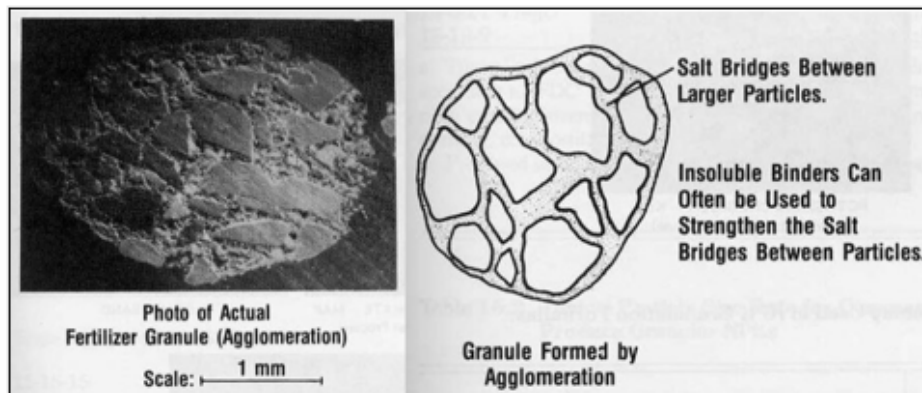
Segundo Kiiski (2011), estes mecanismos de crescimento dependem dos equipamentos utilizados que auxiliam o crescimento do grânulo, seja por *layering*, FIGURA 6, ou em aglomeração sem padrão, FIGURA 7 (GRIFFIN, 2015).

Figura 6 - Aglomeração por “layering”



Fonte: Griffin (2015)

Figura 7 - Processo de aglomeração (sem padrão)



Fonte: Griffin (2015)

Benes e Dortmund (1991) propuseram uma relação entre o diâmetro médio do granulado ($d_{\text{granulado}}$) (m) e o diâmetro médio das partículas de alimentação ($d_{\text{alimentação}}$) (m), conforme Equação 2.

$$k = \frac{d_{\text{granulado}}}{d_{\text{alimentação}}} \quad (2)$$

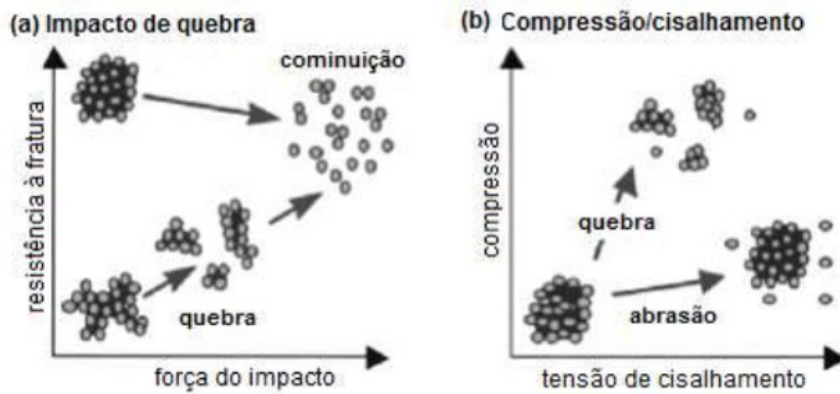
A obtenção do fator “k” em valores abaixo de 2 indica que a aglomeração ocorrerá. Já no caso de se obter valores próximos a 4,2, o processo de formação de camadas será favorecido.

f. Atrito e Quebra

Alguns autores como Capes e Danckwerts (1965) e Sastry *et al.* (1977) (apud Rodrigues, 2012) realizaram estudos sobre atrito e quebra em leito de granulação, onde os grânulos de maior diâmetro tendem a moer os de menores diâmetros durante as quedas dentro do equipamento. Assim, as partículas mais finas, resultantes das quebras, eram aderidas com maior probabilidade às partículas maiores. Van den Dries *et al.* (2003) sugerem que este comportamento mecânico traz maior homogeneidade e maior dureza ao produto, promovendo maior consolidação dos grânulos. Os grânulos podem sofrer vários tipos de efeitos mecânicos, como a quebra, fratura, erosão, abrasão. Estes efeitos estão ligados ao processo e às características do material; os grânulos podem se desfazer completamente ou

em partes, mantendo aglomerados. A FIGURA 8 representa como os grânulos podem se quebrar a partir do impacto, FIGURA 8a, e a partir de compressão ou cisalhamento, FIGURA 8b.

Figura 8 - Efeito da deformação dos grânulos na formação de pontes



Fonte: Rodrigues (2012)

g. Consolidação

A consolidação do grânulo consiste em sua compactação. Para tal, as partículas dos grânulos vão se aproximando e diminuindo os espaços entre elas, podendo aumentar a saturação de líquido ligante na superfície. Este efeito pode gerar a coalescência, caso a saturação exceda o ponto crítico, formando uma gota. Autores como Wildeboer et. al. (2005) consideram que quando o grânulo inicia sua consolidação, os finos no processo podem ser agregados pelo ligante que migrou para a superfície.

1.3 Aglomerantes

Os aglomerantes são, portanto, qualquer aditivo capaz de aglutinar partículas. A seleção destes irá depender do material que se deseja aglomerar. Os tipos de aglomerantes foram categorizados conforme sua forma de atuação. Cada uma das categorias está descrita a seguir (EISELE; KAWATRA, 2003):

Filme inativo: os aglomerantes que formam um filme inativo são aqueles que formam uma camada sobre as partículas e aglomeram por forças capilares, ou por adesão ou coesão e são normalmente reversíveis.

Filme químico: este tipo de aglomerante sofre uma reação química na superfície das partículas e enrijece, assim este tipo de aglomeração é normalmente irreversível.

Matriz inativa: as ligações deste tipo de aglomerante são normalmente reversíveis com aquecimento. São formadas por uma película não contínua em contato com as partículas, podendo ser alcatrão, ou piche ou cera que formam emulsões líquidas e após resfriamento ou secagem se tornam sólidos. Muitas vezes, necessitam de alta concentração de aglomerante e altas pressões para compactação.

Matriz química: este tipo normalmente possui ligações irreversíveis; estes aglomerantes formam uma película nas partículas e sofrem reação química, enrijecendo as ligações.

Reação química: o aglomerante neste caso também sofre uma reação química, mas com as partículas que estão sendo aglomeradas, formando ligações bem fortes.

Durante os processos de aglomeração, o aditivo aglomerante pode ser classificado em mais de uma categoria a depender de suas dosagens e suas características.

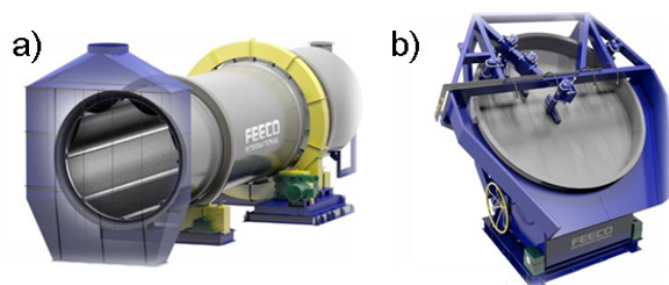
1.4 Processos de aglomeração

As tecnologias para aumento de tamanho ou “*size enlargement*”, do inglês, incluem vários processos que unem propositalmente pequenas partículas em grandes massas permanentes, nas quais as unidades primárias iniciais ainda são identificáveis. Durante um processo de aglomeração, vários aspectos devem ser levados em consideração, sejam relativos à tecnologia utilizada, como também em relação aos materiais que se deseja aglomerar. Os métodos são classificados em granulação por tombamento, granulação por mistura, por fluidização, por centrifugação, por spray, por compactação, por processos térmicos, sistemas líquidos e floculação. Cada método possui alguns tipos de equipamentos que operam por estes modos (RICHARDSON *et al.*, 2002; SNOW *et al.*, 1999; TUMURULU *et al.*, 2010).

1.4.1 Disco rotativo

Esta técnica consiste no “tombamento” ou mistura das partículas que são alimentadas no equipamento e com elas o aglomerante e a água, para a formação dos grânulos ou pelotas. A **FIGURA 9** apresenta exemplos de equipamentos de tombamento, tais como o tambor rotativo na **FIGURA 9a**, o disco rotativo na **FIGURA 9b**, equipamentos muito utilizados nas indústrias mineral e fertilizantes (FEECO INTERNATIONAL, 2018).

Figura 9 - Equipamentos de granulação



Fonte: FEECO International (2018)

Legenda: a) Tambor rotativo e b) Disco rotativo

Equipamentos como tambor e disco rotativos proporcionam o crescimento do grânulo por meio da equalização das forças centrífugas e da gravidade. A aplicação é vasta, podendo ser utilizado por empresas de diferentes ramos, como por exemplo, indústrias farmacêuticas, indústria de minério de ferro, indústria de fins agrícolas, dentre outros. Os grânulos produzidos ficam na faixa de 1 mm a 20 mm de diâmetro. São equipamentos que operam em regime contínuo de alimentação de matérias-primas sólidas e líquidas, podendo trabalhar com altas capacidades de produção. Para uma produção de 100 t/h, um tambor poderá ter 4 m de diâmetro, por exemplo. (SNOW *et al.*, 1999).

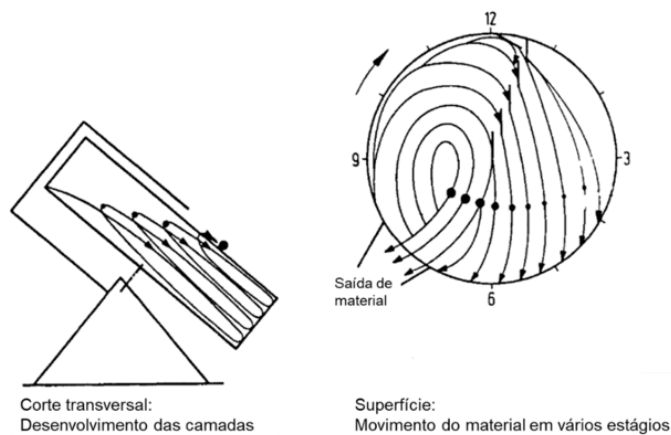
O produto produzido em tambor ou disco possui maior esfericidade quando comparado aos produtos produzidos por misturadores intensivos, por exemplo. Isto porque a rotação do equipamento promove a elevação das partículas e em seguida elas caem formando uma cortina. Este movimento ocorre de forma contínua no interior do equipamento, permitindo a formação de partículas com maior esfericidade (KIRK-OTHMER, 1997; SNOW *et al.*, 1999).

Os discos rotativos são chapas planas inclinadas, que possuem profundidade para reter os aglomerados em suas bordas laterais e, também, possuem raspadores para retirar a camada de material que fica aderida à superfície do equipamento, conforme a alimentação de matérias-primas é realizada. Este processo é conhecido também como aglomeração por tombamento, devido ao padrão de fluxo do material dentro do equipamento. A **FIGURA 10** mostra como o fluxo se comporta durante o processo. Conforme os grânulos vão crescendo, os mais pesados sobem até o topo do disco e saem do equipamento para seguir o fluxo do processo; é uma segregação natural do tamanho de partículas. A eficiência deste processo também se deve ao local de aplicação do líquido aglomerante. Se, por exemplo, o líquido for aplicado na posição das 3 horas (conforme **FIGURA 10**), e a alimentação de

pó for realizada próximo à posição das 5 horas, o pó seco irá aglomerar nas sementes já formadas e as fará descer. Ao caminhar para a região das 6 horas, as sementes que ganharam mais massa com as novas partículas aderidas serão compactadas no fundo do leito ou serão divididas por atrito, e assim causando o crescimento. Com as alimentações desta forma, os aglomerados formados serão relativamente pequenos, dependendo da aplicação. Se a alimentação de líquidos for realizada próximo à posição de 11 horas e os sólidos alimentados próximo à posição de 6 horas, com turbulência, os aglomerados terão maior granulometria (PIETSCH, 2002; SNOW *et al.*, 1999).

A técnica de aglomeração de minério de ferro começou no Brasil, na década de 60, através da Companhia Vale do Rio Doce, atualmente Vale S.A., que, junto com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, sob orientação do professor Carlos Dias Brosch, estudaram e desenvolveram este método que resultou no projeto da usina de pelotização, localizada em Vitória, ES, posta em operação no ano de 1969 (LIMA, 1991)

Figura 10 - Esquema do padrão de fluxo do material durante processo no disco rotativo



Fonte: Pietsch (2002) traduzido

A velocidade de rotação destes equipamentos precisa ser avaliada calculando a velocidade crítica, que corresponde à velocidade na qual uma partícula é mantida estacionária no equipamento pela ação da força centrípeta. Para este cálculo, a Equação 3 é utilizada (SNOW *et al.*, 1999).

$$N_c = \sqrt{\frac{g \sin\theta}{2\pi^2 D}} \quad (3)$$

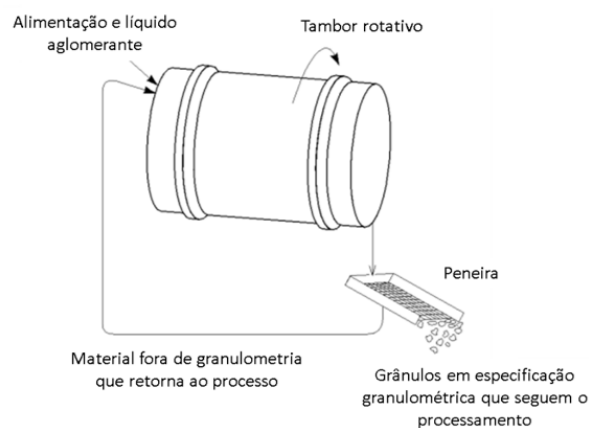
Sendo:

- N_c a velocidade crítica,
- g é a aceleração da gravidade,
- \varnothing é o ângulo de inclinação do equipamento,
- D é o diâmetro do disco.

Valores típicos ficam na faixa de 50% a 75% da velocidade crítica, utilizando ângulos de inclinação de 45° a 55°. Caso a velocidade esteja alta demais, os grânulos serão jogados para fora do equipamento e, se for muito baixa, o material irá deslizar pelo equipamento. Enquanto os sólidos são adicionados no disco com o equipamento em rotação, as partículas menos úmidas vão para o fundo do disco. Com a adição de água, essas partículas menos úmidas vão sendo umedecidas e, ao entrar em contato com outras partículas, se iniciam os processos de nucleação e crescimento. Com mais partículas se unindo a esses núcleos, os grânulos vão se formando, aumentando de diâmetro e assumindo formas mais esféricas a partir do tempo em que ficam no equipamento em rotação. Com o aumento de tamanho dos grânulos, o coeficiente de atrito vai diminuindo e a força centrífuga eleva as partículas para o topo do disco, fazendo um trajeto maior dentro do equipamento, até que saiam, indo para a sequência do processo (MORAES; LIMA; RIBEIRO, 2018; SNOW *et al.*, 1999).

A **FIGURA 11** mostra o esquema de reciclo, válido tanto para tambor rotativo como para disco rotativo. Nestes equipamentos, o crescimento dos grânulos em camadas é favorecido, muito devido a esse reciclo gerado no sistema que retorna partículas de aglomerados menores, as quais são úteis como sementes, e à adição de matéria-prima nova em pó fino e de aglomerantes, formam as cascas do grânulo (KIRK-OTHMER, 1997; SCHERER *et al.*, 2000).

Figura 11 - Esquema de processo em tambor rotativo

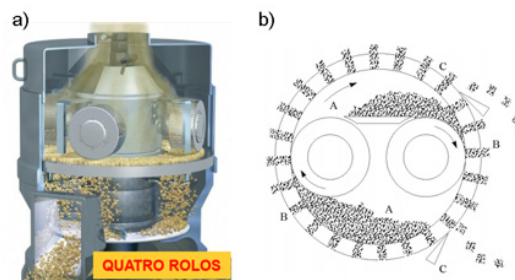


Fonte: traduzido de Kirk-Othmer (1997)

1.4.2 Peletizadora

Equipamentos que utilizam a compressão produzem aglomerados de partículas aplicando forças ao material em um espaço confinado. Entre as diferentes tecnologias de compressão, estão as peletizadoras. Estas são compostas basicamente por um silo, uma rosca de alimentação que também desempenha a função de pré-compactação e a câmara de peletização propriamente dita. Na câmara de compactação há uma matriz perfurada e rolos que giram sobre o material que será pressionado contra os orifícios da matriz. Após a matriz, há uma faca de corte para ajustar o comprimento do pellet desejado. Na FIGURA 12, podem ser observados os tipos de matrizes, sendo que os dois principais são o de placa horizontal, FIGURA 12a, e de matriz circular, FIGURA 12b. A matriz de placa plana é fixa e perfurada, com rolos atuando em sua superfície, pressionando o material contra os orifícios. Já a matriz circular tem forma de um anel, onde os rolos ficam na parte interna, compactando o material através dessa matriz. Neste caso, a matriz é rotativa (KIRK-OTHMER, 1997; PIETSCH, 2003).

Figura 12 - Ilustração dos tipos de peletizadoras



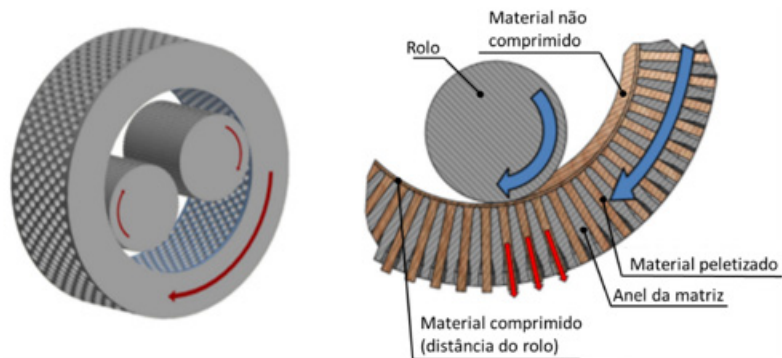
Fonte: a) Soffioni (2015), b) Kirk-Othmer (1997)

Legenda: a) peletizadora de matriz plana e b) peletizadora de matriz cilíndrica

Na FIGURA 12b, é possível observar a matriz com os orifícios pelos quais o material será moldado por compressão contra essa peça. Logo após a matriz, há uma faca de corte, para que os pellets saiam no tamanho desejado (SOFFIONI, 2015).

A matéria-prima ao ser alimentada à câmara de peletização acaba sendo distribuída no interior onde os rolos irão comprimir o material contra a matriz. No caso da matriz em anel, a própria matriz gira com o motor dela, assim, o atrito gerado entre a matriz, as matérias-primas e os rolos ocasiona o giro também dos rolos, sem que haja necessidade de motor adicional para este equipamento, conforme as setas vermelhas indicam na FIGURA 13. Neste processo, durante a compressão, a fricção de todos os itens que compõem o sistema gera calor e a temperatura do material pode ultrapassar os 100°C. Esta temperatura também auxilia na diminuição da umidade dos pellets, com a evaporação da água (NIELSEN *et al.*, 2020).

Figura 13 - Sentido de rotação da matriz e dos rolos compressores

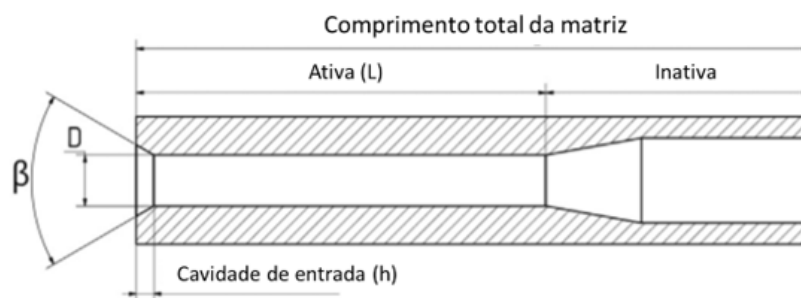


Fonte: Nielsen *et al.*, (2020) traduzido pelas autoras

A resistência à compressão também pode ser denominada de contrapressão, e é causada por dois diferentes mecanismos. O primeiro é a fricção interna, que é a energia requerida pela resistência do atrito interno ocasionado pela quebra de ligações entre partículas da matéria-prima. O atrito interno ocorre quando há compressão ou cisalhamento. O outro mecanismo é o atrito externo, localizado na região onde a matéria-prima está deslizando contra a superfície da matriz (NIELSEN *et al.*, 2020).

A pressão de peletização não é medida diretamente, devido às características do equipamento, sendo sua avaliação realizada pelo consumo de energia. Dando como referência a biomassa, é usual a faixa de 210 MPa a 450 MPa para a compressão deste tipo de material. O *design* dos canais da matriz possui diferentes medidas que podem gerar diferentes razões de compressão. A FIGURA 14 exemplifica como é o design interno desses canais.

Figura 14 - Vista em corte de um canal de compressão de matriz



Fonte: Nielsen *et al.*, (2020), traduzido pelas autoras

Os canais possuem uma área ativa, onde há a entrada em um trecho de canal cilíndrico e uma contração cônica com certo ângulo, β , e profundidade, h . O canal possui comprimento, L , e diâmetro, D ; esta é a área que define o diâmetro dos pellets e a taxa de compressão é medida pela razão entre o comprimento e o diâmetro, sendo L/D . A área inativa é a região ligeiramente maior em diâmetro que a área ativa, a qual adiciona resistência a matriz frente às tensões de compressão (NIELSEN *et al.*, 2020).

As capacidades deste tipo de equipamento variam até 75 t/h com rotação de 75 rpm a 300 rpm. A potência de transmissão pode chegar a 592 kW (KIRK-OTHMER, 1997, SNOW *et al.*, 1999).

O grau de compactação depende das características de transmissão eficaz de forças que são aplicadas ao material e, depende também, das propriedades físicas das matérias-primas. Por se tratar de métodos que aplicam forças aos materiais contra uma matriz, há muito atrito gerado no processo. Para minimizar tais efeitos na máquina, alguns aditivos são utilizados, como aglomerantes ou até mesmo nível variado de umidade, visando promover plasticidade na mistura, os quais acabam operando como lubrificantes internos. Os tipos de materiais que podem ser processados são inúmeros, como por exemplo, ração animal, fármacos, biomassa, catalisadores, migalhas de borracha, dentre muitos outros. (KIRK-OTHMER, 1997, SNOW *et al.*, 1999)

O custo operacional deste tipo de equipamento é devido ao consumo de energia e do desgaste de peças, como os rolos e as matrizes. O consumo de energia é afetado pelas características das matérias-primas em processamento, pelo tipo de matriz, parâmetros operacionais, tamanho de partícula, umidade, entre outros. O custo operacional está muito relacionado com a qualidade final produto desejado, que, dependendo do consumo de energia requerido, vai demandar muito mais do equipamento, que poderá sofrer muito com o atrito e ter sua durabilidade reduzida. Por outro lado, reduzir o consumo de energia, por diferentes formas, pode levar à baixa qualidade do pellet produzido. Este é um ponto que deve ser avaliado caso a caso (NIELSEN *et al.*, 2020).

O consumo de energia, P_T (kW), pode ser medido pela Equação 4, onde V_L é a tensão (V) e I_L é a corrente (A), (JACKSON *et al.*, 2016).

$$P_T = \frac{\sqrt{3} \times V_L (V) \times I_L (A)}{1000} \quad (4)$$

Para o cálculo da energia específica consumida (SEC em inglês, sendo “*specific energy consumption*”) na produção de um produto específico, pode-se utilizar a Equação 5 (JACKSON *et al.*, 2016).

$$SEC = \frac{P_{Tavg} \times \frac{120 \text{ s}}{3600 \text{ s/h}}}{M_P \times \frac{1 \text{ Mg}}{1000 \text{ kg}}} \quad (5)$$

Onde:

- P_{Tavg} (kW) é o consumo de energia calculado pela equação 14, acima,
- M_P (kg) é a massa dos pellets produzidos em uma faixa de tempo, podendo utilizar o tempo de 120 s, e
- SEC é calculada em kWh/Mg

O mecanismo de aglomeração predominante neste tipo de equipamento é o entrelaçamento mecânico, ocasionado pelo processo que envolve a aplicação de pressão sobre o material contra a matriz. Outros efeitos de aglomeração também ocorrem, a depender das matérias-primas e dos aglomerantes aplicados nas misturas a serem processadas. Para a peletização, é necessário que a massa de produto tenha certa plasticidade para fluir e se moldar no processo, podendo ser utilizados aditivos de aglomeração ou de plastificação (BERNARDES, 2006; SNOW, *et al.* 1999; SOFFIONI, 2015).

2 Procedimento metodológico

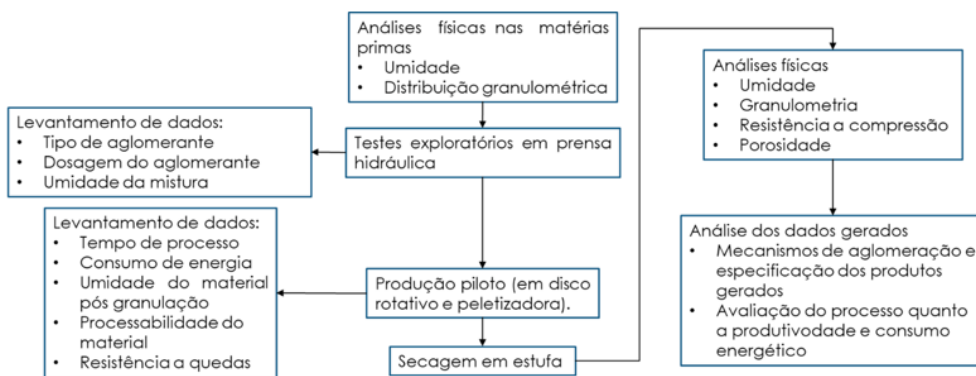
Previamente aos experimentos pilotos, a areia utilizada foi submetida a testes exploratórios de aglomeração em prensa hidráulica de bancada, da marca Ciola, com três aglomerantes definidos, a bentonita, o amido e o silicato de sódio, variando os teores em 1% e 2% e as umidades (base úmida) em 10% e 13%, sendo realizados no total 12 testes. Esta etapa visou selecionar o melhor aglomerante para a areia. Após a definição do aglomerante, as matérias-primas foram misturadas em maior quantidade em um misturador intensivo de forma a obter uma mistura homogênea.

Na etapa seguinte, os testes foram realizados nos equipamentos selecionados, disco rotativo e peletizadora. Durante os testes, foram levantados dados de operação, como corrente dos equipamentos, aspectos de processabilidade do material, produtividade, ou seja, quantidade de produto por tempo, mecanismos de aglomeração. Após os experimentos,

amostras foram analisadas quanto ao aspecto de aglomeração, resistência mecânica à compressão e a quedas sucessivas, distribuição granulométrica e umidade dos aglomerados finais em cada um dos processos.

Em seguida, os aglomerados foram levados para estufa a 105°C por 24 h a fim de realizar uma secagem próxima ao que se espera em um processo industrial (HALT, 2017). Após a secagem, foram realizadas novamente análises de granulometria, determinação da resistência à compressão, umidade e porosidade. A **FIGURA 15** ilustra o fluxo de blocos com o resumo do plano de experimentos:

Figura 15 - Resumo dos experimentos



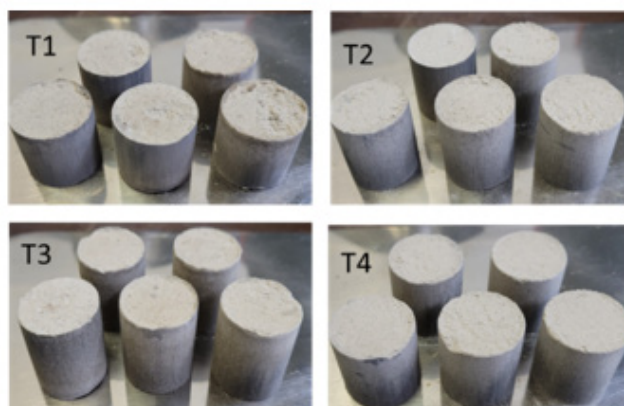
Fonte: elaborado pelas autoras

As variáveis de processo, como vazão de alimentação e adição de umidade para ajuste do processo, são aspectos que foram determinados durante os testes, avaliando a melhor especificação para o produto desejado. Tendo sido definidos, os parâmetros se mantiveram constantes para a coleta de amostras para análise.

3 Resultados e discussão

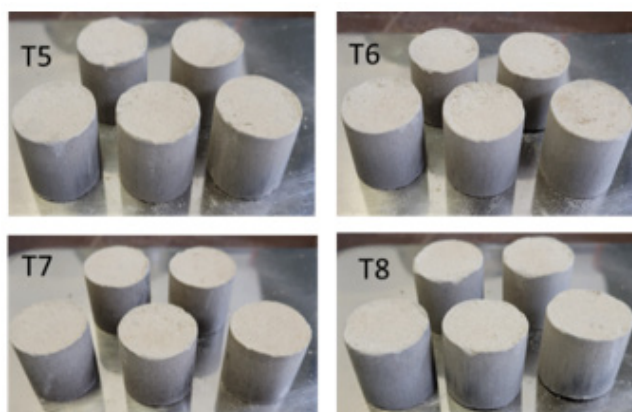
Os testes exploratórios foram realizados com os três aglomerantes e variação da umidade como já mencionado. Em avaliação visual, as **Figuras 16, 17 e 18** mostram o aspecto dos briquetes nos diferentes testes. Os testes de “T1” a “T4” são referentes aos testes com amido de milho, de “T5” a “T8” são referentes aos testes com bentonita e de “T9” a “T12” são referentes aos testes com silicato de sódio.

Figura 16 - Aspecto dos briquetes com amido de milho após secagem



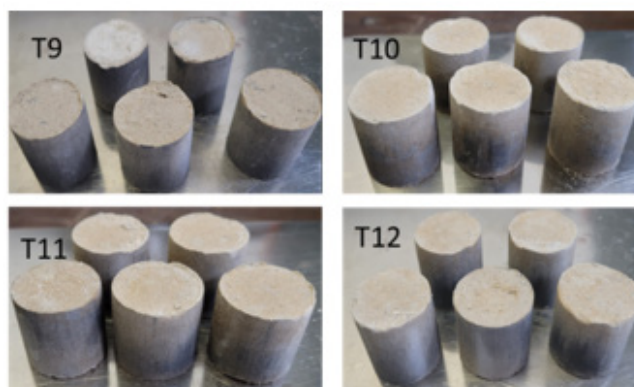
Fonte: Fotos tiradas pelas autoras durante os testes

Figura 17 - Aspecto dos briquetes com bentonita após secagem



Fonte: pelas autoras

Figura 18 - Aspecto dos briquetes com silicato de sódio após secagem

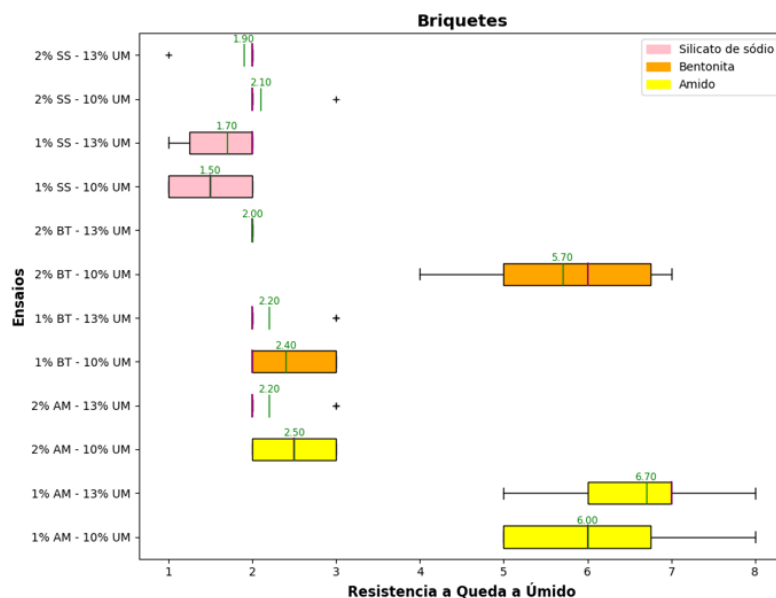


Fonte: pelas autoras

Conforme as a imagens, os briquetes visualmente não apresentaram diferenças significativas, apenas coloração um pouco mais amarelada quando utilizado o silicato de sódio como aglomerante.

Os resultados dos testes de compressão a úmido e a seco, quedas sucessivas e umidade após a secagem encontram-se na **FIGURA 19**, onde a identificação dos ensaios são as abreviações dos aglomerantes utilizados, sendo: SS para Silicato de Sódio, BT para Bentonita, AM para Amido de Milho e UM para umidade.

Figura 19 - Box Plot com os resultados de resistência a quedas sucessivas

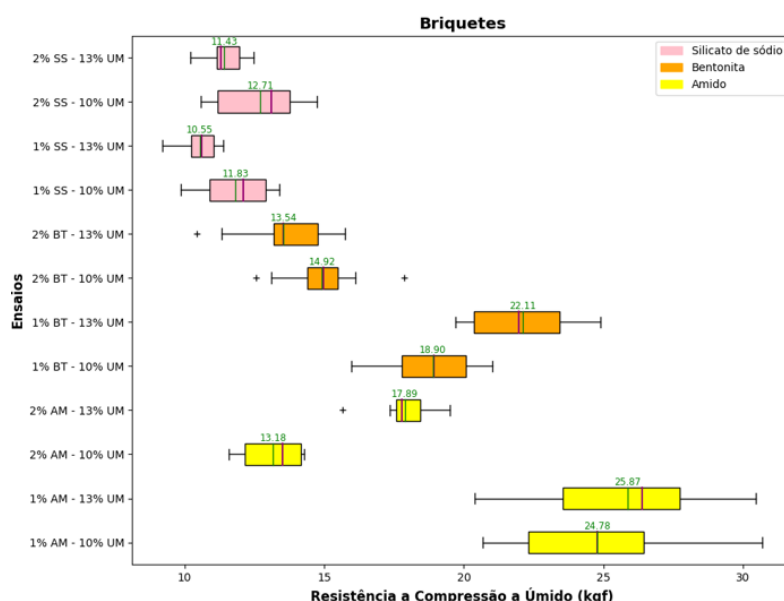


Fonte: pelas autoras

Os resultados de quedas dos briquetes a verde (úmido), ou seja, logo após a sua confecção, indicam a plasticidade que o aglomerado terá logo após o processo de aglomeração. Este resultado tem influência no percurso que o material terá até o final do processo, passando por outros equipamentos de transporte, secagem e peneiramento, dentre outros. Pelo blox pot das quedas (**FIGURA 19**), pode-se observar que os testes com silicato de sódio atingiram resultados mais baixos e o amido com 2% nas duas umidades e a bentonita 1% com 10% de umidade obtiveram os maiores resultados.

As amostras também foram submetidas a testes de resistência à compressão a verde e os resultados estão apresentados na **FIGURA 20**.

Figura 20 - Box Plot com os resultados de resistência à compressão a verde



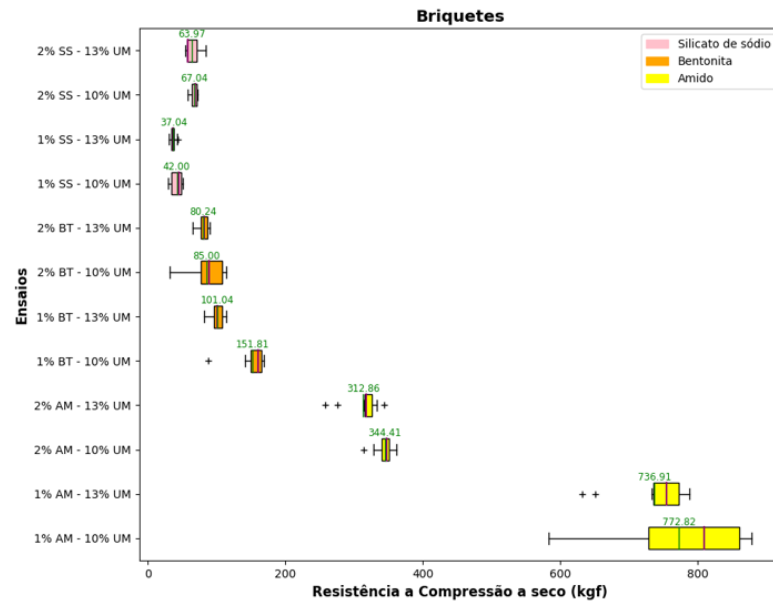
Fonte: pelas autoras

Dentre os resultados obtidos com as amostras com silicato de sódio, as médias ficaram entre 10,55 kgf/briquete a 12,71 kgf/briquete, sendo os resultados mais baixos comparativamente aos demais aglomerantes. Os resultados de resistência à compressão das amostras contendo bentonita ficaram com médias de 13,54 kgf/briquete e 14,92 kgf/briquete com o teor de 2% e umidades de 13% e 10%, respectivamente. Esses valores são mais baixos quando comparados com a bentonita na dosagem de 1%, que apresentaram valores de 22,11 kgf/briquete com umidade de 13% e 18,90 kgf/briquete, com umidade de 10%.

Em relação ao amido, os resultados também foram superiores nos testes com teores de 1% em relação aos teores de 2%. Neste caso, as médias com teores de 2% ficaram em 17,89 kgf/briquete com umidade de 13% e 13,18 kgf/briquete na umidade de 10%, contra médias de 25,87 kgf/briquete com umidade de 13% e 24,78 kgf/briquete com umidade de 10%, nas concentrações de 1% de amido.

Os resultados de resistência à compressão a verde indicam o comportamento do produto durante o processo até a sua secagem, no qual pode sofrer alteração de suas características de resistência mecânica. Na **FIGURA 21**, encontram-se os resultados do teste após a secagem dos briquetes.

Figura 21 - Box Plot com os resultados de resistência à compressão a seco



Fonte: pelas autoras

Os resultados dos testes a seco seguem uma analogia similar entre os tipos de aglomerantes quanto ao teste a verde, sendo que com 1% de amido foram obtidos resultados discrepantes em relação aos demais, atingindo médias de 736,91 kgf/briquete, com umidade de 13%, e 772,82 kgf/briquete com a umidade de 10%. Esse resultado é cerca de 20 vezes superior ao menor resultado obtido com o silicato de sódio (37,04 kgf/briquete), por exemplo.

Os resultados obtidos indicam que, para a aglomeração da areia, o amido é a melhor opção dentre os três aglomerantes avaliados, no que diz respeito aos maiores resultados de resistência à compressão. Por outro lado, o resultado de quedas sucessivas mostrou que o produto apresenta maior plasticidade quando utilizado amido como aglomerante. Este pode ser um fator de desvantagem quando são avaliadas as demais etapas do processo industrial ao qual o material será submetido, podendo perder sua forma ao longo do processo e algumas características. Entretanto, esta plasticidade pode ser favorável em processos que envolvam a compressão, promovendo melhor processabilidade no equipamento e auxiliando na redução do atrito.

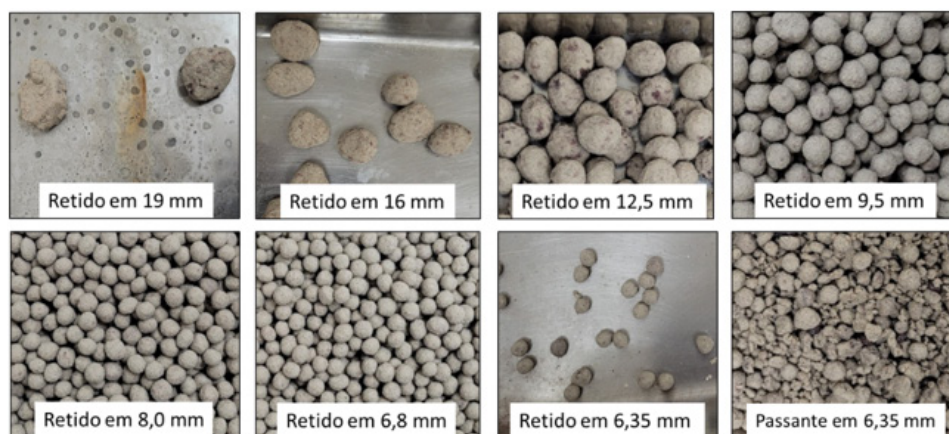
Em relação aos resultados, uma segunda opção de aglomerante que se mostrou favorável foi a 1% de bentonita na umidade de 10%. Esta formulação apresentou resistência média a quedas a verde de 2,4 quedas, ficando entre os resultados do amido e do silicato de sódio. Os resultados de resistência à compressão também foram intermediários em relação aos demais. Quanto à resistência à compressão a verde, apresentou média de 18 kgf/briquete e 151,81 kgf/briquete a seco. Esta foi a segunda opção de aglomerante para os testes.

3.1 Testes Piloto em Disco Rotativo e Peletizadora

Os testes iniciaram no disco rotativo utilizando o amido de milho como aglomerante, mas como visto nos resultados dos testes exploratórios, a massa de material ficou plástica a ponto de deformar o material e dificultar o crescimento dos grânulos. Desta forma, o teste foi repetido, mas desta vez utilizando a bentonita a 1% na massa como aglomerante e 10% de umidade inicial.

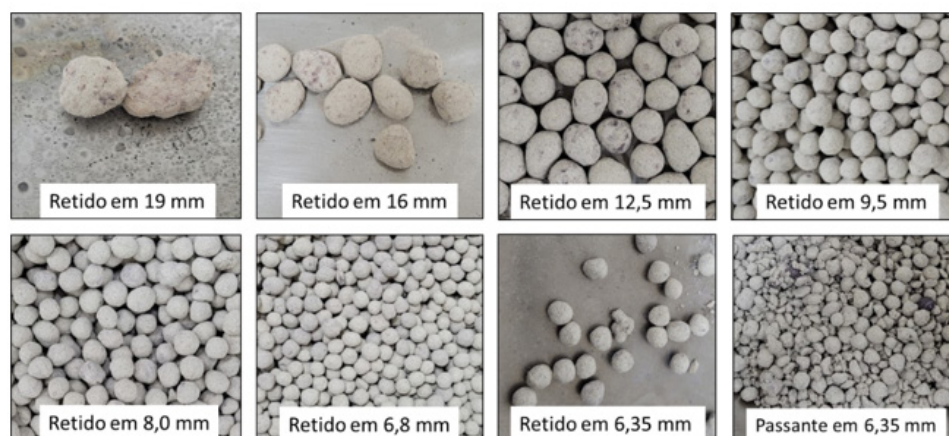
Neste caso, a aglomeração se deu com maior facilidade e melhor controle no tamanho dos grânulos. Nas **Figuras 22 e 23** pode-se observar o aspecto dos aglomerados formados.

Figura 22 - Aspecto visual das frações do teste com 1% bentonita, a verde



Fonte: pelas autoras

Figura 23 - Aspecto visual das frações do teste com 1% bentonita, a seco

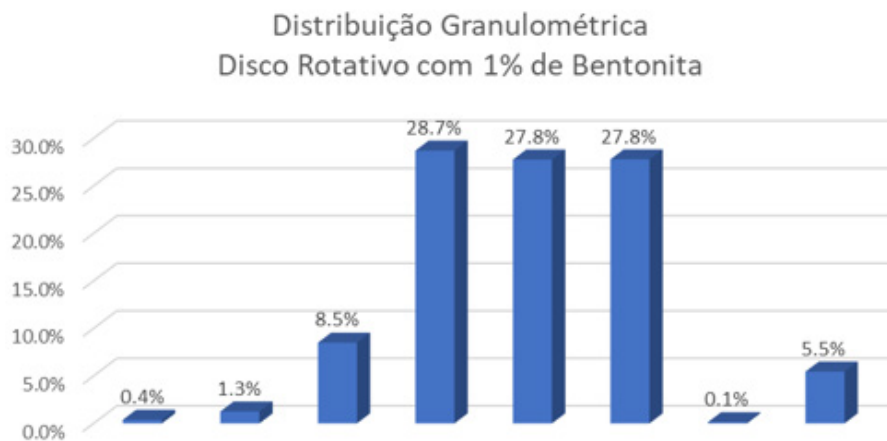


Fonte: pelas autoras

O consumo de energia ficou na faixa de 0,096 kWh, devido ao tempo menor de processo em relação a medição obtida com amido. Em 1086 s, que foi o tempo de processo, a energia consumida foi de 0,02896 kWh. Utilizando-se a equação 5, tem-se 0,00506 kWh/kg. Ou se for considerado o gasto energético em relação apenas a massa de produto acabado, considerando 27,8% de produto dentro da faixa granulométrica, tem-se 1,58 kg e o consumo aumenta para 0,01803 kWh/kg.

A umidade total ficou na ordem de 19,7%, considerando os 10% de umidade inicial da mistura, mais 9,7% de umidade adicional durante o processo. Na **FIGURA 24** pode-se observar a distribuição granulométrica obtida neste teste. Foi possível obter 84,3% dos aglomerados na faixa entre 6,8 mm e 16 mm, sendo que a quantidade de material abaixo de 6,35 mm ficou baixa (5,5%).

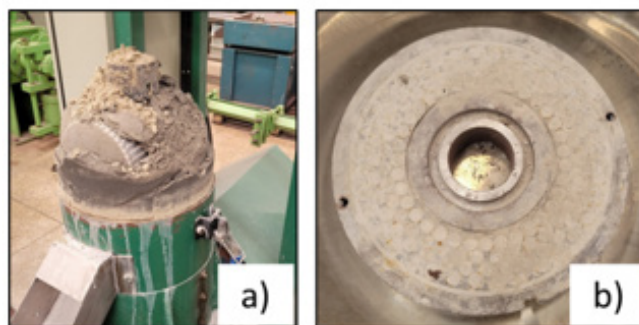
Figura 24 - Distribuição granulométrica do teste com 1% de bentonita em disco rotativo



Fonte: pelas autoras

Na sequência, foram realizados os testes na peletizadora já com a mistura de 1% de bentonita com umidade de 10%. O teste foi iniciado, mas ao longo da adição de material foram encontradas algumas dificuldades, a primeira foi a umidade que estava baixa para o processo e, a segunda foi a adição de muito material de uma única vez. Neste primeiro teste, o material ficou muito seco dentro dos furos da matriz e foi necessário interromper o teste para limpeza. Também foi observada evaporação de água, muito provavelmente devido a alteração na pressão de vapor da água dentro dos furos com a pressão dentro do equipamento. Foi observada também a elevação da temperatura dos peletes que foram gerados; a temperatura do material dentro do equipamento ficou na faixa de 80°C. A **FIGURA 25a** mostra como ficou o interior da peletizadora com a obstrução dos furos por falta de umidade e travamento dos rolos com a quantidade de material. A **FIGURA 25b** mostra como ficaram os furos da matriz com a obstrução com material.

Figura 25 - Aspecto visual da peletizadora e matriz após obstrução



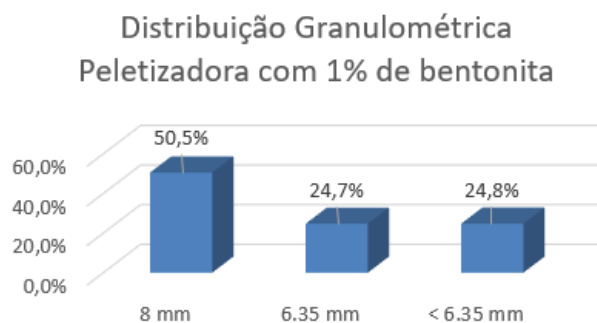
Fonte: pelas autoras

Nos testes seguintes, a umidade da mistura foi ajustada para 13%, sendo esta a umidade ideal identificada para a peletização da areia com 1% de bentonita.

Durante o processo, foi anotada a corrente elétrica do motor para o cálculo da potência consumida, ficando a corrente em torno de 15 A, com alguns picos momentâneos durante a adição de material dentro da câmara. Com base na equação 4, o consumo de energia ficou em 0,053 kWh/kg ou se for considerado apenas o produto acabado, sendo a massa total de 5,9 kg, considerando 50,5% de produto dentro da faixa granulométrica, tem-se 0,105 kWh/kg.

Como os peletes são obtidos com diâmetro constante, o peneiramento para avaliação de distribuição granulométrica foi mais restrito, utilizando 3 faixas granulométricas, sendo as de 8,0 mm, 6,35 mm e abaixo de 6,35 mm, para separar o pó que poderia voltar como reciclo ao processo e os cilindros mais longos, já que o equipamento utilizado não possui faca de corte. Desta forma, a distribuição granulométrica encontra-se na FIGURA 26, mostrando que 24,8% do material era menor que 6,35 mm.

Figura 26 - Distribuição granulométrica do teste com 1% de bentonita em peletizadora



Fonte: pelas autoras

Para a realização das caracterizações, os peletes foram cortados manualmente, logo após o processo, de forma a ficarem com aproximadamente 8 mm de comprimento, conforme mostra a FIGURA 27. A umidade final do produto após secagem ficou em 2,8%. No teste de quedas sucessivas, o valor médio ficou em 11,5 quedas. Observou-se que o pelete ficou bem coeso, sendo que os pontos que quebravam eram as extremidades que ficaram mais frágeis.

Figura 27 - Aspecto visual das amostras cortadas manualmente



Fonte: pelas autoras

3.1.1 Comparativos de resultados dos testes

A TABELA 2 mostra um resumo dos resultados obtidos nos testes nos dois equipamentos, disco rotativo e peletizadora, com o uso do aglomerante bentonita na dosagem de 1%.

Tabela 2 - Resumo dos resultados dos produtos nos dois equipamentos

Parâmetro - Produto	Disco Rotativo	Peletizadora
Quedas (úmido)	2,4	11,5
Resistência à compressão (úmido) (kgf/pelota ou pelete)	0,2	1,2
Resistência à compressão (seco) (kgf/pelota ou pelete)	1,7	4,1
Porosidade (úmido) (%)	37,5	24,0
Porosidade (seco) (%)	47,4	33,3
Umidade inicial (%)	19,5	13
Umidade pós secagem (%)	2,6	2,8
Distribuição granulométrica (>9,5, <8,0 mm) (%)	28,7	50,5

Fonte: pelas autoras

Avaliando os resultados obtidos nas caracterizações dos produtos nos dois processos, pode-se inferir alguns pontos para cada processo:

Disco rotativo:

A característica principal do produto em relação a este processo é a porosidade. Quando se busca como resultado um produto com porosidade alta, este processo de tombamento se mostra superior em relação ao processo de peletização. Como a porosidade do produto foi mais alta, é muito provável que tenha colaborado para um menor valor de resistência à compressão, aumentando a fragilidade das pontes e estruturas formadas no aglomerado.

Outra característica é a resistência a quedas sucessivas, comparando também ao teste utilizando amido como aglomerante, foi possível verificar que a mistura para este processo pode não apresentar plasticidade suficiente para que o produto sofra deformações durante o processamento, que podem ser indesejadas ao produto.

Como já é conhecido, é comum este processo apresentar grande razão de reciclo, a qual no teste foi de aproximadamente 1:3. Este parâmetro irá depender muito da característica dos materiais que estiverem sendo processados e podem contribuir para tamanho de equipamentos maiores devido a capacidade de carga circulante ser 3 vezes maior que a vazão de produto acabado.

A umidade é outra característica do processo de aglomeração por tombamento, no qual a demanda é maior em relação ao processo por compressão, o que acaba resultando em maior energia gasta para a secagem deste material. Comparativamente, neste teste, a umidade requerida para o processo de tombamento foi 50% superior a umidade necessária para o processo de compressão em peletizadora.

Peletizadora:

O valor de porosidade do aglomerado obtido no processo foi 42% inferior ao obtido no disco.

Por outro lado, a resistência à compressão foi 2,4 vezes superior, sendo um fator relevante para a maioria das indústrias, uma vez que os produtos passam por processos de transporte e manuseio que requerem resistência mecânica elevada. A resistência a quedas também foi outro fator com valores superiores, sendo fraturadas apenas as extremidades onde há maior fragilidade no pelete.

Avaliando a distribuição granulométrica, e a possível fração de reciclo, ficou praticamente em razão 1:1, mas neste caso, estes valores podem ser melhorados com a inserção da faca de corte no equipamento para ajustar o tamanho dos peletes de saída. Como no equipamento utilizado não havia faca de corte, muitos peletes saíram muito compridos e foram se quebrando e fragilizando durante o manuseio, contribuindo para a uma maior geração de finos. Neste processo, a umidade requerida foi inferior ao processo do disco rotativo, necessitando de um tempo menor de secagem.

Para comparação da operação dos processos, a **TABELA 3** mostra os resultados de parâmetros obtidos em cada um dos processos.

Tabela 3 - Resultados de parâmetros dos processos

Parâmetro - Processo	Disco Rotativo	Peletizadora
Tempo de estabilização	2 min 42 s	32 s
Tempo de processo total	18 min 06 s	3 min 46 s
Quantidade de material processada	5,7 kg	11,7 kg
Vazão de processo	18,9 kg/h	186,4 kg/h
Rendimento do processo (produto acabado)	27,8%	50,5%
Massa de produto acabado	1,58 kg	5,9 kg
Consumo de energia por kg de produto acabado	0,01803 kWh/kg	0,105 kWh/kg
Operacionalidade	Necessita do olhar do operador	Boa e automatizável

Fonte: pelas autoras

Em relação à vazão de processo, a peletizadora atingiu uma vazão 10 vezes maior que a do disco rotativo, com um rendimento de processo também superior, sendo que poderia ser ainda maior, caso a peletizadora tivesse um sistema de corte para padronizar o comprimento dos peletes.

Outro ponto de destaque é o consumo de energia, especificamente no equipamento disco rotativo. Sem avaliar os equipamentos que fazem parte do restante do processo, este equi-

pamento consumiu cerca de 10 vezes menos energia no caso estudado. Vale ressaltar que pode haver variações em consumo de energia dependendo da marca do equipamento e das capacidades de cada um. Este é um ponto já esperado pelo tipo de equipamento, pois a peletizadora precisa de um motor maior para conseguir imprimir pressão no produto, enquanto o disco rotativo não precisa imprimir força no produto e sim, manter o disco em rotação com a massa de material que estiver sendo processada.

Sobre a operacionalidade, a peletizadora possui uma maior facilidade de processamento, uma vez que o material já é previamente misturado, com a umidade adequada e apenas adicionado ao processo de peletização, o que pode ser completamente automatizado. Já no disco rotativo, é necessário maior controle de umidade no processo, em que em escala industrial, e havendo variação de umidade da matéria-prima de entrada, esta precisará ser corrigida no disco. Este é um ponto que pode ser automatizado, mas dependerá de mais instrumentos para se obter o controle. Por outro lado, do ponto de vista de manutenção e limpeza, no disco rotativo é muito mais simples de realizar tais tarefas, além de já possuir raspadores que vão retirando o material que pode se acumular. No caso da peletizadora, foi observado no teste que estava com baixa umidade do material, a necessidade de um esforço maior para realizar a limpeza, sendo que no teste em escala laboratorial, foi necessário utilizar furadeira para desobstruir os furos da matriz. Porém, este é um caso atípico de um produto ainda em teste, no entanto, industrialmente, há a chance de ocorrer algum erro de operação e ser necessária a limpeza e desobstrução dos furos também. Outro ponto crítico na peletizadora é o desgaste devido ao atrito com o material, que tanto a matriz, quanto os rolos podem sofrer ao longo do tempo.

4 Conclusões

Com os dados apresentados e as comparações entre os dois métodos estudados, tombamento em disco rotativo e baixa compressão em peletizadora, foi possível a construção da **TABELA 4**, que traz a comparação e o levantamento de informações para cada técnica em relação às características das matérias-primas e do produto que se deseja obter. Os sinais (+) e (-) em cada item apenas ilustram qual método aceita melhor a característica em questão. Se os métodos serão bons ou ruins vai depender dos materiais, das características que se deseja obter no produto e qual será sua aplicação.

Tabela 4 - Tabela comparativa das características dos materiais com os processos

Características – Matéria prima e Produto	Disco Rotativo	Peletizadora
Umidade da mistura	(-) Necessita de mais umidade para realizar a aglomeração durante o processo de tombamento.	(+) Utiliza menor umidade em comparação ao disco, porém é necessário avaliar de acordo com o material que será processado.
Plasticidade da mistura	(-) Não aceita que a mistura seja muito plástica, podendo causar deformação dos aglomerados.	(+) Aceita materiais mais plásticos, podendo auxiliar na lubrificação do equipamento.
Resistência à compressão	(-) Este método proporciona menor resistência à compressão. No teste estudado, cerca de 4 vezes menor.	(+) Este método proporciona maior resistência à compressão, podendo estar ligada também a porosidade que é menor neste método.
Porosidade	(+) Comparativamente à peletizadora, proporciona maior porosidade ao aglomerado final.	(-) Com o processo de compressão, diminui a distância entre as partículas e resulta numa menor porosidade comparativamente ao método de tombamento.
Distribuição granulométrica	(-) Possui grande variação de distribuição granulométrica, mas todo o material fora de especificação granulométrica retorna ao processo como reciclo.	(+) É um método que a distribuição granulométrica é mais controlada pelo diâmetro da matriz e por facas de corte.
Temperatura	(+) O método por si só não aquece o produto.	(-) Neste método, por haver atrito e pressão, pode ocorrer fusão ou evaporação de algum constituinte da mistura.

Fonte: pelas autoras

Quanto aos aspectos dos equipamentos e da operacionalidade, a TABELA 5 traz as comparações entre os métodos.

Parâmetros - Processo / Equipamento	Disco Rotativo	Peletizadora
Tempo de estabilização	(-) A estabilização depende do controle de processo, da umidade das matérias-primas e da adição de umidade durante o processamento, mas pode levar mais tempo comparativamente a peletizadora.	(+) Possui estabilização mais rápida do processo.
Consumo de energia específica	(+) O gasto de energia é menor avaliando apenas o disco. (-) O gasto de energia pode ser maior dependendo da umidade necessária ao processo que deverá passar por posterior secagem.	(-) O consumo de energia é maior, visto que é necessária aplicação de forças maiores para ocorrer a compressão no material.
Rendimento de processo	(-) Este é um fator que o disco sai perdendo, pois os equipamentos precisam ser maiores do que a capacidade produtiva, devido a razão de reciclo no processo.	(+) O rendimento de processo é maior que o do disco e pode ser controlado. O material fora de especificação também pode retornar como reciclo.
Operacionalidade	(-) A operação do disco depende muito das características das matérias-primas, a automatização pode ser mais difícil que a da peletizadora.	(+) A operação é simples e facilmente automatizada com equipamentos de alimentação e dosagem no processo.
Manutenção	(+) A manutenção e limpeza do disco é simples, o equipamento é aberto e possui raspadores que fazem uma certa limpeza contínua. Pouco desgaste do equipamento.	(-) A manutenção e limpeza da peletizadora é mais trabalhosa, podendo obstruir os furos da matriz e ser difícil a remoção. O equipamento é fechado, e pode dificultar a identificação de obstrução no equipamento. Alto desgaste de matriz e rolos.

Fonte: pelas autoras

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Mestrado Profissional do IPT pela disponibilização de equipamentos e materiais para a realização do estudo, aos profissionais do Centro de Materiais Avançados do IPT e a todos de contribuíram diretamente ou indiretamente, como familiares, empresas e banca avaliadora.

6 Referências

- BENES, J. A., DORTMUND, U., **Granulation**, Omnia Fertilizers Limited, 1991.
- BERNARDES, Laudo José Landi. A Granulação de Materiais. **Cerâmica Industrial: A revista do técnico cerâmico brasileiro**, [S.l.], p.17-22, maio 2006. Trimestral.
- CAPES, C. E.. Mechanism of Pellet Growth in Wet Pelletization. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design And Development**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 390-392, jul. 1967. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/i260023a023>.
- EISELE, T. C.; KAWATRA, S. K.. A review of binders in iron ore pelletization. **Mineral Processing And Extractive Metallurgy Review**, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 1-90, jan. 2003. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/O8827500306896>.
- FEECO INTERNATIONAL, 2018, Green Bay. **The Agglomeration Handbook: An Overview of agglomeration**. Green Bay, Wi: Feeco, 2018. 50 p.
- GRIFFIN, Curtis. **History of Granulation and the State of Art Granulation Techniques**. Tampa, Fl: Pegasus Tsi Inc, 2015. 11 p.
- HALT, Joseph A. **Controlling Properties of Agglomerates for Chemical Processes**. 2017. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Philosophy in Chemical Engineering, Michigan Technological University, Michigan, 2017.
- IVESON, S., LITSTER, J., Liquid-bound granule impact deformation and coeficiente of restitution, **Powder Technology**, v. 99, p. 234-242, 1998.
- JACKSON, Joshua *et al.* Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill. **Fuel Processing Technology**, [S.L.], v. 148, p. 43-49, jul. 2016.
- KIRK-OTHMER (EUA) (ed.). **Kirk-Othmer Encyclopedia of chemical technology**. 4. ed. New York: Wiley, 1997. 22 v.
- LIMA, José Renato Baptista de. **Estudo da carboxi-metil-celulose como aglomerante para pelotização**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

LITSTER, Jim; ENNIS, Bryan. **The science and engineering of granulation processes**. Brisbane: Kluwer Academic Publishers, 2004. 258 p.

MORAES, Sandra Lúcia de; LIMA, José Renato Baptista de; RIBEIRO, Tiago Ramos. Iron Ore Pelletizing Process: an overview. **Iron Ores And Iron Oxide Materials**, [S.L.], p. 41-59, 11 jul. 2018. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73164>.

NIELSEN, Simon Klinge *et al.* Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process. **Powder Technology**, [S.L.], v. 364, p. 971-985, mar. 2020.

PIETSCH, Wolfgang. An interdisciplinary approach to size enlargement by agglomeration. **Powder Technology**, [S.L.], v. 130, n. 1-3, p. 8-13, fev. 2003.

PIETSCH, Wolfgang. **Agglomeration Processes: phenomena, technologies, equipment**. Weinheim: Wiley-Vhc Verlag Gmbh, 2002. 617 p.

RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R.. **Chemical Engineering: particle technology and separation processes**. 5. ed. [S.l.]: Butterworth Heinemann, 2002. 2 v.

RODRIGUES, Rafaella da Fonseca. **Influência das condições de processo na granulação de super simples em tambor rotativo**. 2012. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2012.

SALEH, K.; VIALATTE, L.; GUIGON, P.. Wet granulation in a batch high shear mixer. **Chemical Engineering Science**, [S.L.], v. 60, n. 14, p. 3763-3775, jul. 2005.

SAMPAIO, J. A.; COSTA, L. S.; ANDRADE, M. C. de. Ensaio contínuo de briquetagem em bancada e piloto - Aglomeração. Part. IV. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. Cap. 22. p. 379.

SCHERER, Heinrich W. *et al.* Fertilizer Granulation. **Ullmann'S Encyclopedia Of Industrial Chemistry**, [S.L.], p. 70-86, 15 jun. 2000. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. http://dx.doi.org/10.1002/14356007.a10_323.

SILVA, Dafne Pereira da *et al.* Biomassa e tecnologias de adensamento para aplicação energética. **Revista IPT Tecnologia e Inovação**, [S.L.], v. 5, n. 16, p. 6-37, 16 abr. 2021. Revista IPT: Tecnologia e Informacao. <http://dx.doi.org/10.34033/2526-5830-v5n16-1>

SNOW, Richard H. *et al.* Size reduction and size enlargement. In: PERRY, Robert H.; GREEN, Don H.; MALONEY, James O. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1999. Cap. 20. p. 1-90.

SOFFIONI, E. (Brasil). **Peletização**. Curitiba: Andritz Feed And Biofuel Brazil, 2015. 34 slides, color.

TUMURULU, J. S.; WRIGHT, C. T.; KENNY, K. L.; HESS, J. R. A review on biomass densification technologies for energy application. Idaho National Laboratory of U. S. Department of Energy. 2010.

VAN DEN DRIES, K., DE VEGT, O., GIRARD, V., VROMANS, H., Granule breakage phenomena in a high shear mixer; influence of process and formulation variables and consequences on granule homogeneity, **Powder Technology**, v. 133, p. 228-236, 2003.

WILDEBOER, W.J.; LITSTER, J.D.; CAMERON, I.T.. Modelling nucleation in wet granulation. **Chemical Engineering Science**, [S.L.], v. 60, n. 14, p. 3751-3761, jul. 2005.

10.29327/2152495.9.28-3

