

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de
Minas

Dissertação de Mestrado

Utilização de maiores percentuais de *pellet feed* na etapa de aglomeração a
frio da sinterização de minério de ferro a partir da adição de aglomerantes

Autor: Fabiano Maia Linhares

Orientador: Prof. Maurício Covcevich Bagatini

Agosto/2019

Fabiano Maia Linhares

Utilização de maiores percentuais de *pellet feed* na etapa de aglomeração a frio da sinterização de minério de ferro a partir da adição de aglomerantes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Maurício Covcevich Bagatini

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2019

L755u	<p>Linhares, Fabiano Maia. Utilização de maiores percentuais de <i>pellet feed</i> na etapa de aglomeração a frio da sinterização de minério de ferro a partir da adição de aglomerantes [recurso eletrônico] / Fabiano Maia Linhares. - 2019. 1 recurso online (82 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Maurício Covcevich Bagatini.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 78-82.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia Metalúrgica - Teses. 2. Sinterização - Teses. 3. Aglomeração - Teses. 4. Minérios de ferro – Teses. 5. Ligantes (Bioquímica) – Teses. 6. Separação por tamanho (Beneficiamento de minério) - Teses I. Bagatini, Maurício Covcevich. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 669 (043)</p>
-------	--

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos se estendem a todos os que, de alguma forma, contribuíram e tornaram possível a realização deste trabalho. De forma especial:

- Ao professor Dr. Leandro Rocha Lemos, pelos conselhos, paciência, discussões e orientações sobre o trabalho desenvolvido;
- Ao professor Dr. Maurício Covcevich Bagatini e aos colegas do Laboratório de Processos Metalúrgicos, local de realização dos experimentos, pela ajuda e discussões sobre o trabalho;
- Ao professor Dr. Dagoberto Brandão Santos e ao Laboratório de Microscopia Eletrônica, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG;
- À Gerdau usina Ouro Branco por todo apoio e ajuda fornecida, de forma especial à Lindaura de Souza Cândido d'Ávila e Ramon Serafim Reis;
- Aos meus Pais e Irmão, pelo apoio concedido durante toda a minha vida, que me permitiu trilhar este caminho;
- A CAPES-PROEX, CNPq e FAPEMIG pelo apoio à realização do trabalho;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO	4
3.1.1 Origem, definição e etapas do processo	4
3.1.2 Principais matérias-primas utilizadas.....	8
3.1.3 Mecanismos de Sinterização	13
3.1.4 Aglomeração a frio da mistura	18
3.1.5 Qualidade do síter	23
3.2 UTILIZAÇÃO DE <i>PELLET FEED</i> NA SINTERIZAÇÃO	24
3.2.1 Motivações	24
3.2.3 Avanços tecnológicos na utilização de ultrafinos no processo de sinterização.....	26
3.3 AGENTES AGLOMERANTES (LIGANTES) NA SINTERIZAÇÃO E NA PELOTIZAÇÃO	30
3.3.1 Definição e classificação.....	31
3.3.2 Ligantes para a sinterização e sua capacidade de aglomeração a frio.....	38
3.3.3 Mecanismos e estruturas moleculares relacionadas aos agentes aglomerantes orgânicos para minério de ferro	41
4. METODOLOGIA	44
4.1. MATERIAIS.....	44
4.1.2 Caracterização dos ligantes	46
4.2 AGLOMERAÇÃO A FRIO.....	47
4.2.1 Teste de umidade máxima da mistura e determinação da umidade ótima	47
4.2.2 Teste de micropelotização da mistura	49
4.2.2.1 Caracterização física das micropelotas produzidas	52
4.2.3 Teste de degradação das micropelotas	55
4.2.3.1 Caracterização física e microestrutural das micropelotas produzidas	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES.....	58
5.2 UMIDADE MÁXIMA DAS MISTURAS E UMIDADE ÓTIMA	60

5.3 AGLOMERAÇÃO A FRIO.....	62
5.4 TESTES DE DEGRADAÇÃO DAS MICROPELOTAS.....	69
5.4.1 Caracterização microestrutural do aglomerado.....	71
.....	72
6. CONCLUSÕES	76
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 – Estrutura do leito de sinterização antes e após a sinterização (adaptado de Loo et. al., 2012).....	7
Figura 3. 2 - Etapas do processo de sinterização e composições típicas de cada uma (Januzzi, 2008).....	8
Figura 3. 3 – Faixa granulométrica de misturas de sinterização e curva de Astier (Pimenta et. al., 1999 citado por Magalhães, 2003).	10
Figura 3. 4 – Efeito da morfologia e mineralogia do minério de ferro sobre a granulação (Lu, 2015).	11
Figura 3. 5 – Esquemática das zonas de sinterização com suas principais características (Honorato et.al. 1993, citado por d’Avila 2015).....	13
Figura 3. 6 – Resultados de experimento de dissolução de minério de ferro em escória primária formada na sinterização (Ponghis e Poos, 1971).....	15
Figura 3. 7 –Distribuição ideal de temperatura no leito de sinterização (adaptada de Cores et. al., 2013).....	16
Figura 3. 8 – Resumo do desenvolvimento microestrutural do sínter (adaptado de Fernández-González et. al., 2017).	17
Figura 3. 9 – Evolução na formação das diferentes fases durante a sinterização (adaptado de Scarlett et. al., 2003).....	18
Figura 3. 10 – Os processos que controlam a granulação (adaptado de Lister, 2003). .	19
Figura 3. 11 – Diferentes tipos de aglomerados formados (Adaptada de Nobu et. al., 2013).	20
Figura 3. 12 – Efeito de diferentes quantidades de umidade adicionada à mistura (adaptada de Matsumura et. al., 2009).....	21
Figura 3. 13 – Efeito da umidade sobre a permeabilidade do leito (adaptada de Honorato et. al., 1993, citado por d’Avila, 2015).....	22
Figura 3. 14 – Regime de operação do tambor misturador (adaptado de Najjar et. al., 1981, citado por Honorato, 2005).....	23
Figura 3. 15 – Média de produtividade de planta de sinterização de 7 empresas brasileiras (Harano, 2013).....	25
Figura 3. 16 – Média do teor de sílica no sínter produzido em plantas de sinterização de 7 empresas brasileiras (Harano, 2013).....	25
Figura 3. 17 – Fluxograma do processo HPS na NKK (adaptado de Lu e Ishiyama, 2016).....	27
Figura 3. 18 - – Granulação seletiva e seus efeitos sobre a sinterização (adaptado de Lu e Ishiyama, 2016).....	28
Figura 3. 19 – Influência da adição da cal fina sobre a produtividade e o tempo de sinterização (Azevedo et. al., 2013, citado por d’Ávila, 2015)	31
Figura 3. 20 – Estrutura idealizada do monômero do carboximetilcelulose, composto básico do Peridur (adaptado de Eisele e Kawatra, 2003).	35

Figura 3. 21 – Teste de queda de pelotas cruas para diferentes ligantes utilizados (adaptado de Srivastava et. al.,2013)	39
Figura 3. 22 – Estrutura molecular dos humatos proposta por Shnitzer (Schnitzer, 1972, citado por Qiu et. al. 2003)	40
Figura 3. 23 – Tipos de forças atuantes no sistema minério-ligante-minério (adaptada de Qiu et. al., 2003).....	43
Figura 4. 1 – Aparato experimental utilizado para o teste de umidade máxima	48
Figura 4. 2 – Tambor, disco e sistema de controle de parâmetros dos equipamentos a serem utilizados na aglomeração a frio.....	50
Figura 4. 3 - Determinação do d_{50}	53
Figura 4. 4 - Determinação do tamanho médio pela FCAD	54
Figura 4. 5 – Esquema simplificado dos testes de aglomeração a frio	54
Figura 4. 6 – Esquema simplificado dos testes de aglomeração a frio com etapa de degradação	56
Figura 4. 7 – Metodologia para cálculo da espessura da camada aderente	57
Figura 5. 1 - Difratoograma contendo as identificações dos picos para o Peridur 330. ..	59
Figura 5. 2 - Difratoograma contendo as identificações dos picos para o Alcotac CS....	59
Figura 5. 3 - Proporção de partículas menores do que 0,150mm nos testes de umidade máxima.....	60
Figura 5. 4 - Resultado do teste de umidade máxima.....	61
Figura 5. 5 - Resultados obtidos nos testes de aglomeração a frio com diferentes porcentagens da umidade máxima.	62
Figura 5. 6 - Valores de I.G. obtidos para todos os testes realizados.	63
Figura 5. 7 - Resultados de d_{50} para teor mínimo de ligantes.	66
Figura 5. 8 - Resultados de d_{50} para teor médio de ligantes.	66
Figura 5. 9 - Resultados de d_{50} para teor máximo de ligantes.....	66
Figura 5. 10 - Resultados de d_{50} para todos os testes.	68
Figura 5. 11 - Resultados de TMsauter para todos os testes.....	68
Figura 5. 12 - Resultados de FCAD para todos os testes.....	69
Figura 5. 13 - Efeito do peridur 0,05% sobre o d_{50}	70
Figura 5. 14 - Efeito do peridur 0,05% sobre o teste de degradação das micropelotas. 70	
Figura 5. 15 - Imagens da seção lixada obtidas com lupa binocular.	72
Figura 5. 16 - Valores de espessura de camada aderente para os testes realizados com o Peridur.....	73
Figura 5. 17 - Imagens de MEV obtidas para três pelotas de testes diferentes. Aumento de 50 vezes.....	74
Figura 5. 18 - Imagens de MEV obtidas para três pelotas de testes diferentes. Aumento de 1000 vezes.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Exemplos de vários sistemas de ligantes (adaptado de Eisele e Kawatra, 2003).....	32
Tabela 4.1 – Proporção de cada matéria-prima utilizada como teste padrão.....	44
Tabela 4.2 – Massa de material recebida.....	45
Tabela 4.3 – Granulometria das matérias-primas recebidas.....	45
Tabela 4.4 – Análise química das matérias-primas recebidas.....	46
Tabela 4.5 – Composição química aproximada dos ligantes fornecidos.....	46
Tabela 4.6 - Proporções das matérias-primas utilizadas nos ensaios de aglomeração a frio.....	51
Tabela 4.7 - Proporção dos aglomerantes a serem utilizados.....	51
Tabela 5.1 - Resultado da análise elementar dos três ligantes utilizados (% em massa).....	58

RESUMO

A sinterização é o principal processo produtivo de carga ferrífera aglomerada para os altos-fornos. A tendência mundial de redução das reservas de minérios de ferro de alta qualidade, levando a uma crescente geração de ultrafinos, e a necessidade de aumentar a produtividade deste processo colocou em foco a melhoria da etapa de aglomeração a frio da mistura a sinterizar, anterior à sinterização. Diversos estudos já foram realizados visando a produção de misturas com maior tamanho médio de quase partículas a partir de matérias-primas mais finas, porém a substituição parcial de *sinter feed* por *pellet feed* ainda possui limitações e produz impactos diretos na permeabilidade do leito. A adição de ligantes orgânicos, apesar de muito estudada e utilizada no processo de pelletização, ainda não é empregada na sinterização.

O presente trabalho teve como principal objetivo estudar uso de agentes aglomerantes orgânicos na mistura de forma a permitir maiores participações de ultrafinos sem a produção de efeitos deletérios sobre o processo e ao produto final, garantindo adequada produtividade, qualidade física e metalúrgica do *sinter*.

Ensaio de aglomeração a frio foram realizados em laboratório, utilizando três agentes aglomerantes: Acotac CS, Peridur e Carvão mineral brasileiro. Os resultados mostraram que o ligante a base de carboximetilcelulose de sódio foi o único que produziu aglomerado com tamanho médio de partículas igual ou superior ao teste base, utilizado como referência, em praticamente todos os testes realizados, quando avaliados os valores de d_{50} e diâmetro médio de Sauter, além de promover o aumento da espessura da camada aderente e estabilidade da interface núcleo-camada aderente das micropelotas. A adição de *pellet feed* na mistura, sem a utilização de ligante, provocou um decréscimo no tamanho médio das partículas.

Palavras-chave: sinterização, ligantes orgânicos, aglomeração a frio, *pellet feed*.

ABSTRACT

The sintering process is the main producer of agglomerated iron burden for the blast furnace. The world tendency on the reduction of high quality iron ore availability, leading to an increase of ultra-fines production, and the necessity of improving the productivity of this process made the cold agglomeration the focus of research and efforts. Many studies were made seeking the production of mixtures with bigger mean particle size but the partial substitution of sinter feed by pellet feed have some limitations and produces direct impact on the bed permeability. The usage of organic binders, although already being used and studied in the pelletizing process, is still not a practice in the sintering process.

This work has as main objective the study of the possibility of the use of organic binders in the sintering mixture in order to allow the increase in the pellet feed participation without producing deleterious effects on the process and the final product, ensuring high productivity and good physical and metallurgical quality of the produced sinter.

Laboratory scale cold agglomeration experiments were made with three binders: Alcotac CS, Peridur and a Brazilian mineral coal. The experiments showed that only the cellulose derivate binder was capable of producing agglomerates with equal or greater mean particle size when compared with the base test, used as reference, for practically all performed tests, regarding the values of d_{50} and Sauter mean diameter, besides promoting the increase on the adhering layer thickness and stability of the nuclei-adhering layer interface of the micro pellets. The addition of pellet feed in the mixture, without the presence of binders, led to a decrease in the particle mean size of the agglomerate produced.

Keywords: sintering, organic binders, cold agglomeration, *pellet feed*.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de minérios finos e ultrafinos diretamente nos altos-fornos é impossibilitada devido ao comprometimento da permeabilidade do leito e, conseqüentemente, da produtividade desses reatores, sendo necessário, portanto, a utilização de minério granulado ou aglomerado (sínter ou pelotas). A sinterização é o principal processo de produção de carga ferrífera aglomerada para os altos-fornos. Ela pode ser dividida em quatro diferentes etapas: preparo e dosagem das matérias primas, visando a obtenção da qualidade química adequada do sínter; a aglomeração a frio da mistura, produzindo microaglomerado com distribuição granulométrica mais grosseira de modo a aumentar a permeabilidade do leito; a sinterização, onde o processo de aglomeração a quente ocorre, produzindo novas fases mineralógicas; e o tratamento final do sínter, ocorrendo o seu resfriamento, fragmentação, classificação e avaliação das características físicas, químicas e metalúrgicas.

A produtividade da planta de sinterização, assim como as propriedades do sínter produzido, é fortemente influenciada pela permeabilidade do leito que, por sua vez, é dependente da granulometria das matérias-primas. Das características físicas dos minérios e finos de retorno utilizados no processo, a granulometria é uma das mais importantes quando se avalia a influência na formação do sínter. Partículas muito pequenas favorecem a formação de uma fusão excessiva, deteriorando a permeabilidade do leito, e partículas grandes não participam na etapa de fusão, tornando o sínter quebradiço, aumentando a sua degradação. Não apenas a granulometria média dos minérios é importante, mas também a distribuição granulométrica destes. A classificação das partículas de diferentes tamanhos na sinterização é separada como nucleantes, intermediária e aderente, e diversos pesquisadores definem os tamanhos de cada uma dessas classificações de forma diferente. Partículas nucleantes possuem tamanho entre 6,3mm e 0,7mm, partículas intermediárias entre 0,7mm e 0,2mm e abaixo de 0,2mm como aderentes. Segundo esta pesquisa, a quantidade de partículas intermediárias deve ser a menor possível, já que não favorece o processo de aglomeração inicial. Partículas abaixo de 0,15mm, denominadas pellet feed, não são

desejáveis ao processo, já que reduzem a permeabilidade do leito a sinterizar comprometendo a produtividade da planta de sinterização.

A tendência cada vez maior de produção de *pellet feed* pelas mineradoras, e a necessidade de métodos de concentração para atingirem teores de ferro elevados, faz com que seja necessário empregar maiores quantidades destes finos nos processos de aglomeração. No processo convencional de sinterização isto significa reduzir a permeabilidade do leito e comprometer a produtividade da planta. Diversos esforços foram e continuam sendo dispendidos para o desenvolvimento de novas tecnologias e métodos de tratamento da mistura na aglomeração a frio. Dentro destes esforços, pode-se citar o Hybrid Pelletized Sinter (HPS), processo este que consiste em se realizar uma etapa inicial de micropelotização de partículas finas (*pellet feed*, finos de retorno e aditivos) para posterior utilização no leito de sinterização.

Mesmo com os diversos avanços tecnológicos a substituição de *sinter feed* por *pellet feed* ainda é problemática, especialmente nas misturas onde a quantidade de ultrafinos é mais elevada. Frequentemente vê-se queda na produtividade devido à menor permeabilidade do leito de sinterização.

A cal virgem é utilizada na mistura como agente aglomerante, aumentando o poder de aglomeração a frio da mistura, permitindo a produção de microaglomerados mais grosseiros. A utilização de ligantes orgânicos, apesar de ser uma prática bastante estudada e utilizada no processo de pelotização, ainda não é feita na aglomeração a frio na sinterização. Ligantes orgânicos normalmente fornecem maior capacidade de aglomeração a frio do que os inorgânicos, sendo interessante a avaliação de seus efeitos na produção dos microaglomerados na sinterização.

O projeto desenvolvido teve como objetivo realizar um estudo da utilização de três ligantes (Alcotac CS, Peridur 330 e Carvão mineral + NaOH) na etapa de aglomeração a frio pelo método HPS da Gerdau usina Ouro Branco, com foco no estudo de viabilidade da utilização de maior percentual de *pellet feed* na mistura a aglomerar. Este estudo será aplicado para a otimização do processo HPS na usina e consequente redução de custos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a possibilidade de adição de *pellet feed* na etapa de aglomeração a frio da sinterização de minério de ferro a partir do uso de agentes aglomerantes e verificar o efeito sobre o tamanho médio e microestrutura do produto produzido.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito de três diferentes tipos de ligantes na mistura a sinterizar, a qual contém *pellet feed*, sobre o desempenho da aglomeração a frio do processo HPS (Hybrid Pelletized Sinter), com utilização de tambor rotativo e disco de pelotização;
- Determinar o ligante mais apropriado para utilização na etapa de aglomeração a frio;
- Determinar o teor adequado de adição de *pellet feed* e ligante à mistura a sinterizar a partir dos resultados de tamanho médio e análise de microscopia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO

Segundo o Steel Statistical Yearbook (2017) a produção total de aço bruto no mundo cresceu de 850 milhões de toneladas no ano 2000 para aproximadamente 1,6 bilhão de toneladas no ano de 2016. Mais de 65% de todo o aço bruto produzido provém dos altos-fornos, nos quais o sínter representa aproximadamente 80% de toda carga ferrífera (Ohno *et. al.*, 2013). Estes dados evidenciam a importância do processo de sinterização para a produção de aço. Mais do que sua importância relativa, eles indicam que contínuas melhorias e investimentos no processo são de grande interesse estratégico das empresas.

Um exemplo disto é a tendência mundial de deterioração dos minérios, sendo necessária a utilização de minérios cada vez mais finos nas plantas de sinterização (Mousa *et. al.*, 2015). Diversos investimentos foram e continuam sendo feitos para atender demandas de qualidade de sínter e de produtividade cada vez mais restritivas (Lu *et. al.*, 2016).

3.1.1 Origem, definição e etapas do processo

O processo de sinterização teve seu início em 1887, quando dois pesquisadores (F. Haberlein e T. Huntington) desenvolveram um método de tratamento para sulfeto de cobre baseado em um leito de sinterização com sopro de ar da região inferior para a superior (Fernández-González *et. al.*, 2017).

Em 1902 foi patenteado um método de sinterização para pirita calcinada e pós de minério de ferro com a adição de carvão e sopro ascendente de ar através do leito. E. J. Savelsberg, em 1905, aplicou a panela de Huntington-Heberlein para a sinterização de minério de ferro, sendo esta utilizada em quinze plantas de minério de ferro em 1912 (Fernández-González *et. al.*, 2017).

A. S. Dwight e R. L. Lloyd inventaram, em 1906, uma máquina para sinterização a vácuo e, em 1909, uma esteira contínua de minérios finos e aditivos que suporta exposição a altas temperaturas. Em 1911 foi montada a primeira máquina de sínter Dwight-Lloyd para operação com minério de ferro (Pereira, 2004). Desde então, o

processo Dwight-Lloyd tem sido a principal tecnologia utilizada na sinterização de minério de ferro (Fernández-González *et. al.*, 2017).

A sinterização, na siderurgia, é um processo do tipo gás-sólido em contra corrente no qual a mistura de minérios, aditivos e combustíveis sólidos é posta em um sistema de grelhas formando um leito de espessura uniforme. A este leito é realizada a ignição dos combustíveis na região superior e constante sucção dos gases na região inferior por um sistema de exaustão (Ball *et. al.*, 1973). O objetivo do processo é promover a aglomeração destas matérias-primas que não possuem granulometria adequada (usualmente <8mm) para sua utilização direta nos altos-fornos. O produto final obtido é o Sínter, material poroso com teor de ferro variando de 50% a 60%, com tamanho médio e resistência mecânica adequada aos processos subsequentes (Cores *et. al.*, 2013).

A sinterização deixou de possuir como única função o aumento do tamanho médio do particulado através da aglomeração a quente e passou a exercer papéis cada vez mais abrangentes. Produção de carga ferrífera auto-fundente, reciclagem de particulados gerados nos processos subsequentes da usina, melhoria na redutibilidade do aglomerado e eliminação de voláteis são exemplos de importantes objetivos que são visados no processo de sinterização (Ball *et. al.*, 1973).

Pode-se dividir o processo de produção do sínter em quatro diferentes etapas (Januzzi, 2008):

- I. Dosagem e adição das matérias-primas: fase inicial do processo, onde a dosagem de cada um dos insumos é feita respeitando-se uma série de critérios: composição química desejada do sínter produto; basicidade adequada para sua utilização nos altos-fornos; balanço de massa da quantidade de finos de retorno gerados na sinterização; umidade visada para um bom processo de microaglomeração, balanço térmico, etc. (Ball *et. al.*, 1973). Normalmente os insumos são adicionados em esteiras transportadoras por silos dosadores automáticos;
- II. Mistura e microaglomeração dos insumos: como a granulometria da matéria-prima normalmente possui uma faixa bastante ampla é necessário assegurar que as

partículas mais finas se aglomerem evitando, assim, uma baixa permeabilidade do leito durante a sinterização (Gan *et. al.*, 2015). Isto é feito a partir da aglomeração a frio das matérias-primas em tambores rotativos e/ou discos pelletizadores com a adição de quantidades específicas de água e a utilização de cal como agente aglomerante. Esta etapa do processo pode variar de acordo com a empresa e o projeto da planta. A quantidade de tambores misturadores utilizados assim como a presença de discos pelletizadores depende essencialmente das matérias-primas utilizadas, do espaço disponível para instalações, data de construção da planta, entre outros fatores. Normalmente existem pelo menos dois estágios de mistura. O primeiro tem como objetivo homogeneizar o material adicionado e iniciar o processo de correção de umidade, dando início ao processo de microaglomeração. O segundo estágio completa a homogeneização e finaliza a correção de umidade, finalizando também a formação das micropelotas (Ball *et. al.*, 1973);

III. Sinterização: nesta etapa o material aglomerado é alimentado na esteira de sinterização que se movimenta com velocidade constante. Após a alimentação o combustível presente na região superior do leito sofre ignição, dando início ao processo de aglomeração a quente. Com a sucção do ar pelos exaustores ocorre a transferência de calor das regiões superiores para as camadas inferiores, fazendo com que o combustível presente nas camadas inferiores entre em combustão, transferindo a frente de queima até a finalização da sinterização. A temperatura da frente de queima pode chegar a 1300 – 1375°C (Lu, 2015). A fusão incipiente causada pela queima do combustível e a formação de novas fases cristalinas são responsáveis pela aglomeração das matérias-primas. A velocidade de avanço da frente de queima pode variar de 10 mm/min a 30mm/min (Fernández-González *et. al.*, 2017) e ela influencia diretamente na formação das diferentes fases cristalinas, porosidade e resistência do sinter produzido (Lu *et. al.*, 2012);

IV. Resfriamento e classificação do sinter produzido: a etapa final é a cominuição do sinter produzido com subsequente resfriamento. O bolo de sinter é cominuído por britadores primários e secundários e, após a classificação granulométrica, a porção adequada para envio ao alto-forno é resfriada em esteiras rotativas. Fernández-

Gonzáles et. al. (2017) comentam as separações mais usuais do sinter produto de acordo com sua faixa granulométrica: sinter abaixo de 5mm são reutilizados no processo de sinterização (finos de retorno); entre 5mm e 20mm são utilizados como camada protetora do leito de sinterização para evitar contato direto da frente de queima com a esteira; sinter entre 20mm e 50mm são utilizados como carga metálica nos altos-fornos.

A figura 3.1 mostra o leito antes e após o processo de sinterização (Loo et. al., 2012).



Figura 3. 1 – Estrutura do leito de sinterização antes e após a sinterização (adaptado de Loo et. al., 2012).

Januzzi (2008) faz um resumo das etapas do processo de sinterização com as composições dos particulados, como pode ser visto na figura 3.2. Na etapa inicial os compostos são apenas dosados e misturados, mantendo sua composição química inalterada. O processo de alteração microestrutural dá-se na etapa de sinterização formando, assim, novas fases mineralógicas.

MISTURA CRUA	AGLOMERAÇÃO A FRIO	SINTERIZAÇÃO	SÍNTER
Oxidos de ferro Hematita (Fe_2O_3) Magnetita (Fe_3O_4) Hidróxido de ferro ($\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) + ganga (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 , K_2O) Combustíveis Carbono+ganga Fundentes Calcário, dolomito Aditivos Serpentinó, manganês	Quase-partícula (aglomerado da mistura crua + água + cal)	Queima do combustível, fusão dos componentes e oxidação	Óxidos de ferro Hematita (Fe_2O_3) Magnetita (Fe_3O_4) Óxidos combinados Ferritas e silicatos de ferro Ganga silicatada Silicato de cálcio

Figura 3. 2 - Etapas do processo de sinterização e composições típicas de cada uma (Januzzi, 2008).

3.1.2 Principais matérias-primas utilizadas

A existência de diferentes plantas de sinterização, cada qual adaptada a contextos econômicos e mercadológicos específicos, faz com que existam variações nas matérias-primas utilizadas no processo. Um exemplo disto é a utilização de subprodutos dos processos subsequentes do processo produtivo como forma de reciclagem. O processo de sinterização possui relativa flexibilidade neste quesito, podendo adaptar-se a diferentes insumos. Segundo Lu (2015) e Cores (2013) as principais matérias-primas utilizadas são: mistura de minérios, fluxantes, combustível sólido, finos de retorno e subprodutos ferrosos. Cada um destes insumos exerce influência sobre o processo de aglomeração a frio e de sinterização, em proporções e maneiras diferentes (Ball *et. al.*, 1973).

I. Minério de Ferro

Lu (2015) e Umadevi *et. al.* (2011) enfatizam a importância das diferentes características dos minérios de ferro utilizados para a qualidade do sinter produto. Segundo Lu (2015) a granulação (aglomeração a frio) e a densificação (durante a sinterização) são duas etapas de fundamental importância para a formação do sinter e influenciam de forma decisiva sobre as propriedades mecânicas e metalúrgicas deste produto. O autor faz uma descrição detalhada da influência das diferentes características físicas, mineralógicas e químicas do minério sobre estas duas etapas.

As características físicas do minério que exercem influência sobre estes processos são a distribuição granulométrica, forma das partículas, porosidade, área superficial, rugosidade e molhabilidade. A granulometria dos minérios de ferro vem variando ao longo dos tempos. A granulometria padrão ideal do minério para a sinterização era definida, antes da utilização de diversos minérios diferentes e de ultrafinos, pela curva de Astier (Azevedo & Carneiro, 1977 citado por Magalhães, 2003) que estipula as seguintes frações de tamanho:

- Nenhuma partícula maior do que 9,5mm;
- Máximo de 5% maior que 6,35mm;
- 45% a 60% entre 1mm e 6,35mm;
- 10% a 25% menor que 0,105mm.

Devido à utilização de mistura de diferentes minérios a granulometria ideal é definida por uma faixa. A figura 3.3 (Pimenta *et. al.*, 1999 citado por Magalhães, 2003) mostra a curva de Astier e a faixa granulométrica ideal para a mistura.

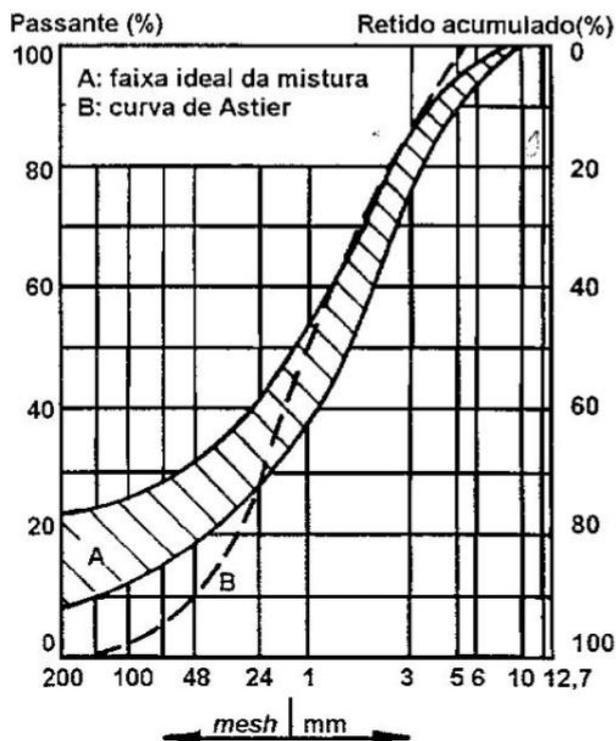


Figura 3.3– Faixa granulométrica de misturas de sinterização e curva de Astier (Pimenta et. al., 1999 citado por Magalhães, 2003).

Existe uma tendência de deterioração na qualidade dos minérios ao longo dos anos, exigindo processos de concentração que geram elevadas quantidades de ultrafinos, além do aumento da produção mundial produzir maiores quantidades de minérios na fração de *pellet feed* (Mousa et. al., 2015).

A partir de estudos experimentais, Umadevi (2011) verificou que a produtividade da sinterização aumenta à medida que o tamanho médio das partículas de minério carregadas na esteira de sinterização for maior. Segundo o pesquisador, isto se deve pelo aumento da velocidade de frente de queima, que tem origem na maior permeabilidade do leito. Também foram observadas diferenças na estrutura do sinter (teor de oxidação do minério) com variação do tamanho médio das partículas (fato este novamente relacionado com a velocidade de frente de queima). Segundo Lu (2015), o aumento da participação de ultrafinos na mistura de sinterização melhora a morfologia do microaglomerado formado, pois maior participação de partículas finas resulta em uma maior fusão no leito de sinterização.

Características superficiais do minério também influenciam o poder de aglomeração da mistura. Segundo Mao (2013), molhabilidade, rugosidade e forma do minério são fatores em comum que afetam o processo de aglomeração a frio. Uma superfície rugosa promove a aderência de finos e ultrafinos. Além disso, nas camadas de partículas finas, os fenômenos de molhabilidade e hidrofobicidade são bastante relevantes ao processo.

Segundo Lu (2015) as características mineralógicas afetam a forma, a distribuição granulométrica dos minérios e sua porosidade. A porosidade do minério, em especial, desempenha uma importância fundamental tanto na granulação quanto na densificação. A quantidade de água absorvida influencia na eficiência de aglomeração e a quantidade de fase líquida (material fundido durante a passagem da frente de queima) absorvida pelos poros influencia a densificação. A figura 3.4 (Lu, 2015) mostra uma comparação de diferentes minérios sobre a morfologia do aglomerado formado a frio.

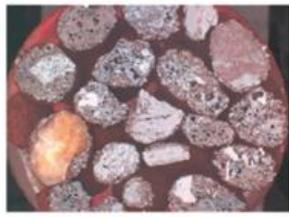
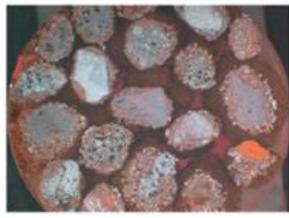
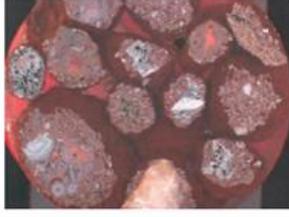
Minério denso hematítico			
Minério Marra-Mamba			
Minério pisolítico			
	Partículas não granuladas (+ 2mm)	Partículas granuladas (+ 4mm)	Estrutura dos grânulos

Figura 3. 4 Figura 3. 4 – Efeito da morfologia e mineralogia do minério de ferro sobre a granulação (Lu, 2015).

II. Fluxantes

Compostos fluxantes possuem a função de facilitar a formação de escórias com baixa temperatura de fusão nos altos-fornos. As impurezas presentes nos minérios e demais insumos devem ser eliminadas através da formação de uma escória líquida, com baixa viscosidade e baixa temperatura de fusão. Segundo Ball *et. al.* (1973) a introdução de agentes fluxantes na mistura de sinterização (ao invés de adição direta no alto-forno) trouxe vantagens consideráveis para o desempenho do reator de redução. Calcário, dolomita, dunita, bauxita e cal são fluxantes usuais utilizados na sinterização. Pode-se adicionar de duas formas diferentes (em relação à quantidade): adição de quantidade suficiente para a quantidade de ganga presente no restante do sínter para a produção de sínter auto fluxante; adição de quantidade suficiente para toda a ganga inserida no alto forno para a produção de sínter super fluxante. A adição é sempre controlada a partir de um índice de basicidade (binária ou quaternária) objetivado (Ball *et. al.*, 1973).

III. Combustível sólido

O combustível sólido tem como função o fornecimento de energia para o processo de sinterização (garantir o avanço da frente de queima). A energia térmica liberada pela combustão promove diferentes fenômenos que influenciam o processo: secagem da umidade presente na mistura, decomposição do calcário e da dolomita e fusão incipiente dos finos presentes na mistura (responsável pela aglomeração).

Segundo Cores (2013) e Fernández-González (2016) coque é o melhor combustível para a sinterização. Sua granulometria ideal, segundo os pesquisadores, varia entre 0,25mm e 3mm pois, nesta faixa, maximiza-se a produtividade e a redutibilidade do sínter. Os finos de coque é o combustível mais utilizado na sinterização devido às suas adequadas características físicas e químicas e, também, pela possibilidade de aproveitar os finos gerados na coqueria que não são adequados para utilização direta nos altos-fornos. Segundo a autora é possível a parcial utilização de Antracito como combustível para a sinterização, gerando resultados aceitáveis. Sua utilização é justificada pela busca constante de redução na geração de finos de coque nas coquerias.

Lovel *et. al.* (2009) investigaram o efeito da reatividade do combustível sólido sobre a sinterização. Maior reatividade do combustível produz menor resistência mecânica do

sínter produto, devido à menor formação de fase líquida e maior velocidade de frente de queima. Por outro lado a maior reatividade aumenta a produtividade do processo. Fica evidente, portanto, a necessidade da utilização de combustíveis que possuam reatividade intermediária.

IV. Sínter de Retorno

O sínter de retorno representa a carga recirculante do processo de sinterização. A quantidade a ser utilizada é determinada pelo limite aceitável de tamanho de partícula a ser enforcada nos altos-fornos (Ball *et. al.*, 1973). Quanto maior a carga recirculante menor a quantidade de sínter disponível para o processo subsequente. Porém pouco sínter de retorno utilizado como matéria-prima provoca redução de permeabilidade do leito, reduzindo a produtividade. Segundo Ball (1973) estes dois fatores contraditórios significam que é necessária a identificação de uma quantidade ótima de finos de retorno a ser utilizada.

3.1.3 Mecanismos de Sinterização

Após a ignição do combustível sólido na região superior do leito, o processo de sinterização dá-se início. É possível dividir o leito em diferentes zonas, como é mostrado na figura 3.5 (Honorato *et.al.* 1993, citado por d'Avila 2015).

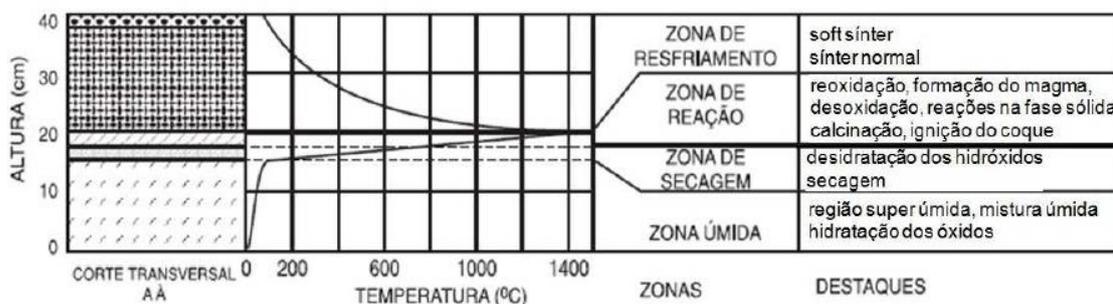


Figura 3. 5 – Esquematização das zonas de sinterização com suas principais características (Honorato *et.al.* 1993, citado por d'Avila 2015)

A Zona úmida, localizada nas regiões inferiores, apresentam temperaturas de até 100°C. Nela, com exceção da hidratação da cal, a mistura microaglomerada está presente sem nenhuma alteração física ou química, e constitui a base do leito.

A Zona de secagem apresenta temperaturas que variam entre 100°C e 500°C. Nesta região ocorrem as reações de desidratação dos hidróxidos e a secagem da mistura a sinterizar.

A Zona de reação apresenta temperaturas acima de 500°C. Nela, a maior parte das reações ocorre, juntamente com a formação do sinter. A queima do combustível sólido produz um aumento abrupto da temperatura até 1200°C – 1400°C. Em temperaturas próximas a 700°C inicia-se a decomposição dos carbonatos, consumindo energia. Reações na fase sólida e formação de fase líquida também ocorrem nesta zona. Esta zona engloba a frente de queima do leito (Honorato, 2015).

Por fim, a Zona de resfriamento é a responsável pela solidificação da fase líquida e formação das novas fases mineralógicas. Tem início em temperaturas próximas a 900°C, com o final das reações da zona de reação.

Segundo investigações feitas por Ponghis e Poos (1971) a principal reação que ocorre no processo de sinterização é a formação de uma fase líquida primária que dissolve certa quantidade de minério de ferro. A taxa com que a reação ocorre depende de diversos fatores, dentre os quais: a basicidade da mistura, a origem do minério, a distribuição granulométrica da mistura e a sua composição mineralógica. A figura 3.6 (adaptada de Ponghis e Poos, 1971) mostra o resultado de experimentos envolvendo a dissolução de uma amostra de minério de ferro em uma escória líquida, evidenciando que este é um importante mecanismo durante a sinterização, onde Δe significa a diferença da espessura do minério após a dissolução e a espessura anterior à dissolução. Basicidade de escória elevada é associada à dissolução mais rápida do minério.

Segundo estes pesquisadores a escória primária formada rapidamente infiltra-se nos poros presentes no minério. Durante a infiltração, íons de cálcio são difundidos para a estrutura da magnetita enquanto íons de ferro provenientes da hematita são dissolvidos pela fase líquida. O cálcio difundido diminui a temperatura de fusão da mistura, aumentando a taxa de dissolução do minério.

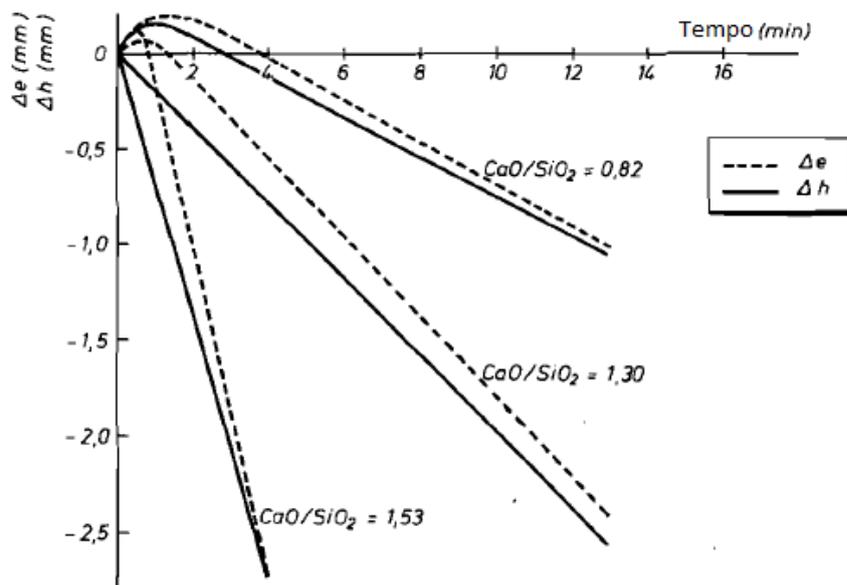


Figura 3. 6 – Resultados de experimento de dissolução de minério de ferro em escória primária formada na sinterização (Ponghis e Poos, 1971).

O processo de solidificação normalmente inicia-se pela precipitação da magnetita seguido pela hematita. Com basicidade adequada, cálcio-ferritas são precipitadas em seqüência. A última fase a solidificar é a escória vítrea, que não é produzida com basicidade de mistura alta. O resfriamento subsequente leva à geração de tensões internas devido à diferença de contração das diferentes fases. No caso da magnetita, este fato é acompanhado da geração de trincas. As trincas também são produzidas quando existe uma quantidade alta de magnetita na mistura a sinterizar (Ponghis e Poos, 1971).

As condições da frente de queima exercem grande influência sobre a produtividade do processo de sinterização e sobre as características físicas, químicas e mineralógicas do sinter produto.

Segundo Cores *et. al.* (2013) o tempo de aquecimento de 1100°C até a temperatura máxima da frente de queima deve ser pequeno (1,5 minutos), pois a pressão parcial de oxigênio nesta região é baixa devido à queima do combustível sólido e a formação de FeO é facilitada, o que é prejudicial à redutibilidade do sinter produto. Ainda segundo os pesquisadores o tempo de resfriamento até 1100°C deve ser longo (de três a cinco minutos) para produzir uma matriz resistente devido à fase líquida formada. A distribuição de temperatura ideal do leito de sinterização é mostrada na figura 3.7 (Cores *et. al.*, 2013).

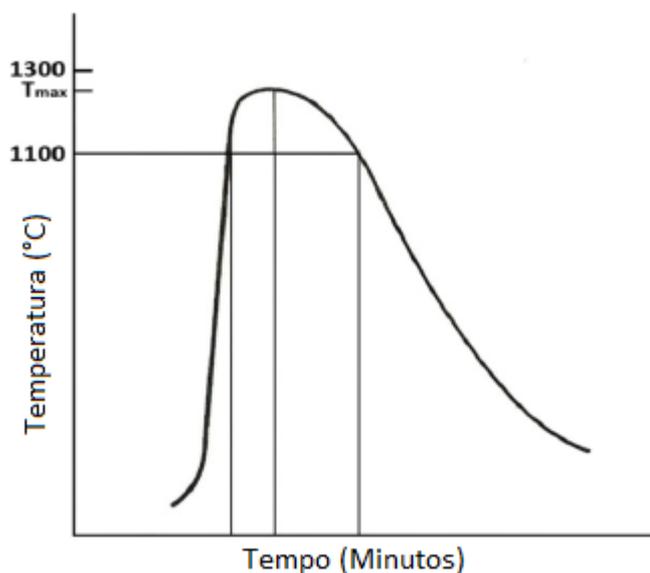


Figura 3. 7 –Distribuição ideal de temperatura no leito de sinterização (adaptada de Cores et. al., 2013)

Quando a sinterização ocorre a temperaturas abaixo de 1300°C, uma fase líquida constituída principalmente de hematita e CaO começa a se formar a aproximadamente 1200°C. Os óxidos de ferro e as partículas finas são assimiladas pelo líquido. Ao penetrar nos grãos de hematita o líquido contendo CaO e Al₂O₃ reage com o óxido de ferro gerando ferritas de cálcio e alumínio aciculares. Estes compostos são benéficos à estrutura do sinter. Neste caso é formado um núcleo de hematita não fundida circundada por uma matriz de ferrita acicular (Fernández-González *et. al.*, 2017).

Quando a temperatura máxima de sinterização atinge valores maiores do que 1300°C parte da ferrita formada se dissolve e funde, convertendo-se em hematita, magnetita e ganga. Durante o resfriamento o líquido forma novas fases como ferrita colunar (que possui menor redutibilidade do que a ferrita acicular) e hematita secundária, deteriorando o índice de degradação sob redução (RDI) (Fernández-González *et. al.*, 2017). A figura 3.8 (Fernández-González *et. al.*, 2017) mostra um esquema da formação da estrutura do sinter de acordo com as temperaturas máximas atingidas pela frente de queima.

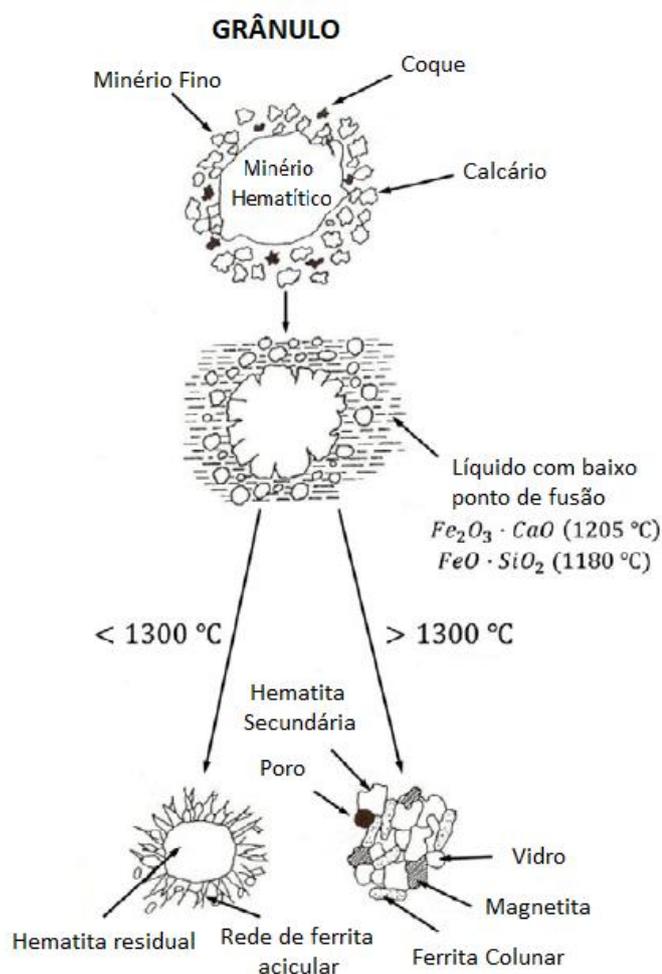


Figura 3. 8 – Resumo do desenvolvimento microestrutural do sinter (adaptado de Fernández-González et. al., 2017).

Trabalhos realizados por Scarlett *et. al.* (2003) visaram entender as reações de formação das fases finais do sinter produto. Segundo esses autores inicialmente o óxido de cálcio produzido a partir da decomposição do calcário reage prontamente com a hematita em baixas temperaturas (reação no estado sólido entre 750°C e 780°C) formando uma fase de ferrita de cálcio denominada C₂F de fórmula Ca₂Fe₂O₅. O C₂F formado continua a reagir com a hematita produzindo outra fase de ferrita de cálcio mais rica em ferro denominada CF de fórmula CaFe₂O₄. Foi verificado na pesquisa destes pesquisadores que a temperatura mínima na qual se passa a produzir CF aumenta proporcionalmente com maiores porcentagens de alumina na mistura, fato que sugere alta reatividade da alumina amorfa produzida pela desidroxilação da gibbsita, entrando em solução sólida nas fases de ferrita. O quartzo não reage com o CaO nem a hematita, permanecendo praticamente inerte até o início de formação dos complexos de sílico-ferrita de cálcio e

alumínio (SFCA e SFCA-I) em temperaturas próximas a 1050°C. Se a temperatura de sinterização excede 1240°C (aproximadamente) SFCA-I é decomposto formando SFCA e hematita como fases produto. Esta sequência de formação de fases é resumida pelo esquema mostrado pela figura 3.9 (adaptado de Scarlett *et. al.*, 2003).

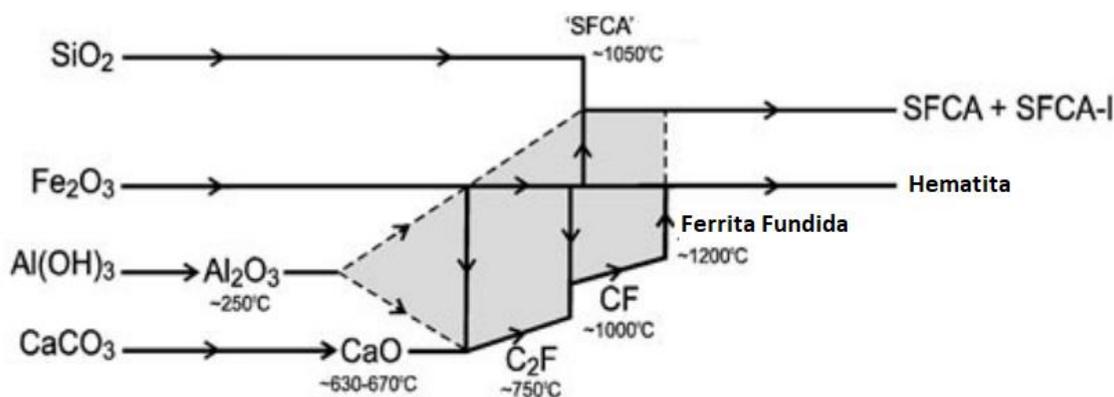


Figura 3.9 – Evolução na formação das diferentes fases durante a sinterização (adaptado de Scarlett *et. al.*, 2003).

3.1.4 Aglomeração a frio da mistura

A grande variação de propriedades físicas das matérias-primas utilizadas na sinterização (sendo a distribuição granulométrica a mais relevante) torna necessária a realização de pré-tratamento deste material visando adequada permeabilidade do leito de sinterização que, conseqüentemente, afeta o fluxo de ar succionado e a velocidade da frente de queima (Zhou *et. al.*, 2016).

Esta etapa de pré-tratamento da mistura é usualmente denominada de aglomeração a frio. Ela tem como principal objetivo obter uma mistura final aglomerada com tamanho médio de partícula superior ao da mistura inicial a partir da diminuição da fração menor que 0,25mm (d'Avila, 2015).

Segundo Khosa (2007) estudos iniciais relacionados aos mecanismos de aglomeração (não aplicados necessariamente a minério de ferro) foram realizados há décadas e tem-se bom conhecimento na área. Seguindo os resultados obtidos, foram realizados diversos experimentos aplicados diretamente no contexto de aglomeração a frio de minério de ferro (sinterização e pelletização).

Lister (2003) afirma que a antiga visão compartilhada entre a comunidade industrial e acadêmica no início da década de 90 sobre a aglomeração é equivocada: a aglomeração não é um processo meramente empírico, possuindo aspectos científicos extremamente relevantes que foram sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos. Segundo o autor, há dois fatores principais que contribuem a uma interpretação científica e quantitativa deste processo. O primeiro é o reconhecimento da granulação como *design* de partículas, requerendo bom entendimento do comportamento do particulado. O segundo fator é a necessidade de avaliação do processo em diferentes níveis de detalhes: da avaliação das interações partícula-partícula em um grânulo até o entendimento da granulação ocorrendo em todo o volume do equipamento (como movimentação global das partículas e tempo de aglomeração).

Lister (2003) ainda afirma que, considerando a formação de um grânulo dentro do granulador, três tipos de processos controlam a densidade e distribuição de tamanhos do produto formado: umidade e nucleação, crescimento e consolidação e atrito/quebra. Estes três processos estão esquematizados na figura 3.10.

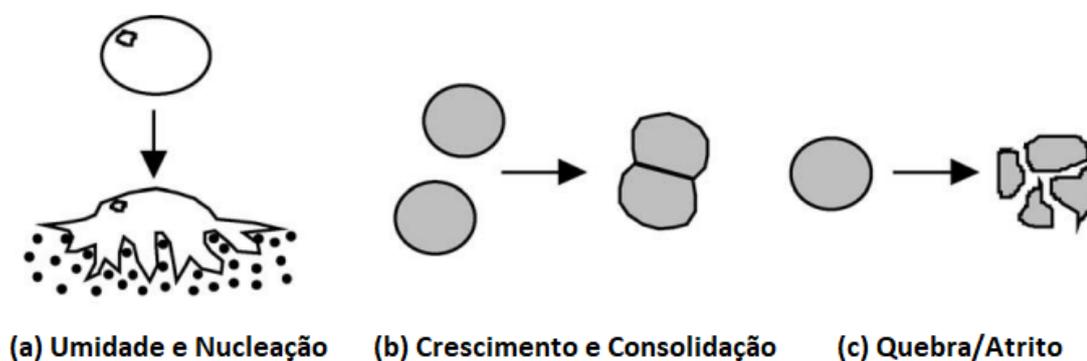


Figura 3. 10 – Os processos que controlam a granulação (adaptado de Lister, 2003).

O passo inicial é a distribuição da umidade pelo particulado. A passagem deste particulado pelos sprays de água promove a penetração da umidade no material fino pela ação da capilaridade formando núcleos. Após o controle da nucleação a consolidação e coalescimento dos grânulos afetará a densidade e tamanho médio final (Lister, 2003).

No contexto de preparação da mistura no processo de sinterização a granulação consiste em homogeneizar uma mistura de minérios, combustível, finos de retorno e fundentes em um tambor rotativo com aproximadamente 8% de água por alguns minutos (o tempo de granulação pode variar entre 30 minutos a 1 hora, considerando a movimentação da matéria-prima por todas as etapas) (Fernández-González *et. al.*, 2017).

Ao examinarem a estrutura dos grânulos formados pela aglomeração da mistura de sinterização, Hida *et. al.* (1982, citado por Nobu *et. al.*, 2013) classificaram as partículas de aglomerado em três tipos distintos: “C”, “P” e “S”. Grânulos do tipo “C” são constituídos de um núcleo com partícula maior que 1mm e partículas finas aderentes com tamanho menor do que 0,5mm aderidas à esse. O tipo “S” corresponde às partículas não aglomeradas com tamanho entre 0,5mm e 1mm. O tipo “P” refere-se aos grânulos formados pela aglomeração de partículas finas apenas, sem a presença de núcleos.

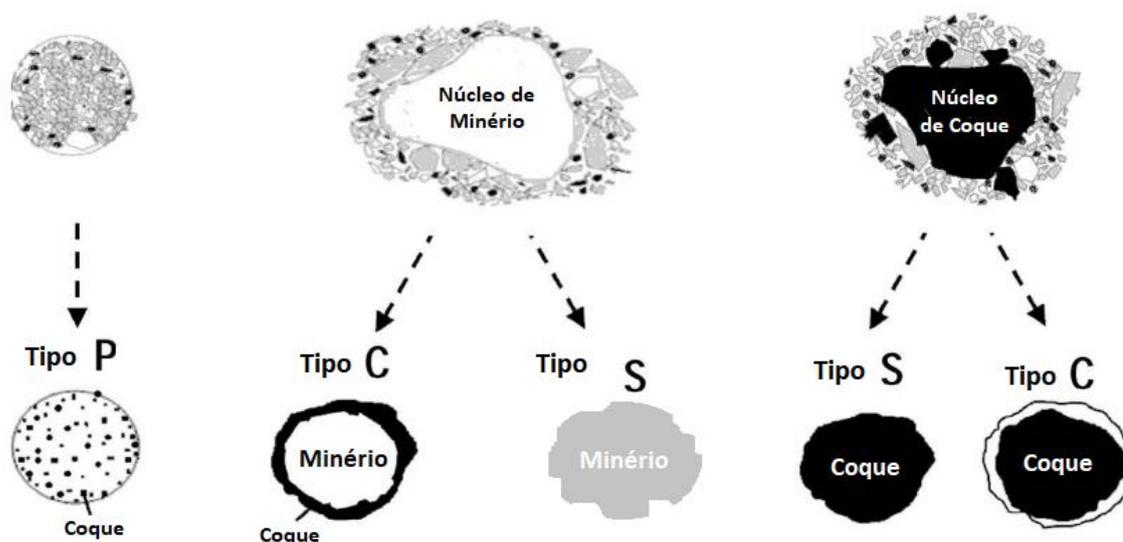


Figura 3. 11 – Diferentes tipos de aglomerados formados (Adaptada de Nobu *et. al.*, 2013).

Segundo Maeda *et. al.* (2005) a umidade exerce papel fundamental no processo de microaglomeração, influenciando a estrutura e resistência mecânica do aglomerado. Para o desenvolvimento da granulação, é necessário que certa quantidade de umidade esteja presente na superfície das partículas para funcionar como ponte de interação. A quantidade de umidade necessária para se garantir recobrimento adequado das partículas varia de acordo com características físicas das matérias-primas. Isto significa que, de

acordo com a quantidade de água adicionada à mistura, diferentes efeitos são produzidos. A capacidade de absorção de umidade é uma característica da mistura que indica a quantidade de água de saturação, ou seja, o máximo de umidade que a mistura absorve preenchendo todos os poros e gerando uma fina camada de água recobrendo as partículas (Matsumura *et. al.*, 2009). Isto pode ser visto na figura 3.12 (adaptada de Matsumura *et. al.*, 2009).

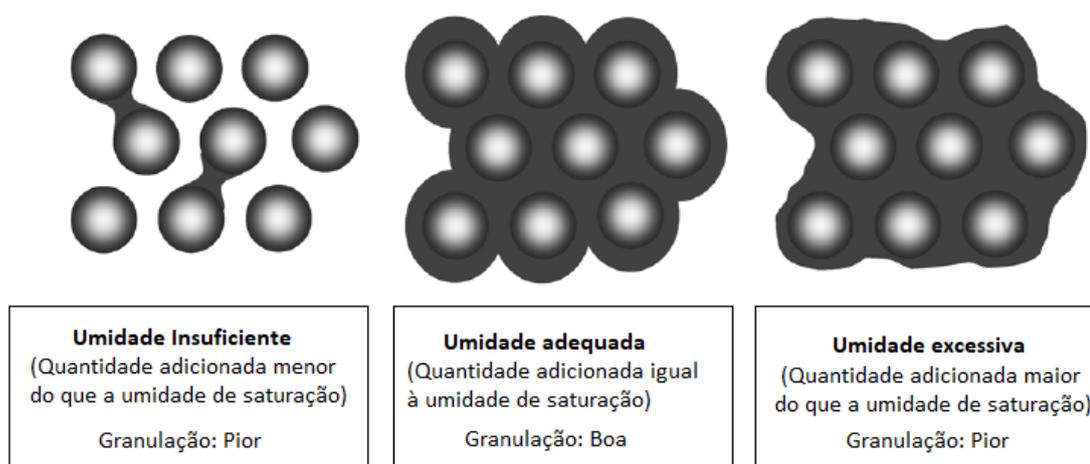


Figura 3. 12 – Efeito de diferentes quantidades de umidade adicionada à mistura (adaptada de Matsumura *et. al.*, 2009).

Quando a adição de umidade é menor do que o volume de saturação da mistura, boa parte é absorvida pelos poros do minério e existe pouca água para recobrir a superfície das partículas, prejudicando o mecanismo de aglomeração. De maneira contrária, quantidades excessivas de umidade provocam a formação de uma “lama” onde a água não absorvida preenche os vazios entre as partículas, o que também prejudica a microaglomeração (Matsumura *et. al.*, 2009). Assim existe, para cada tipo de mistura, um valor ótimo de umidade que se ajusta ao volume máximo de saturação. Esta umidade ótima otimiza o processo de microaglomeração. Este efeito pode ser visto na figura 3.13 (Honorato *et. al.*, 1993, citado por d’Avila, 2015) que mostra a relação direta entre umidade adicionada e permeabilidade do leito: a melhoria no processo de granulação produz uma distribuição granulométrica mais grosseira, influenciando positivamente na produtividade da sinterização.

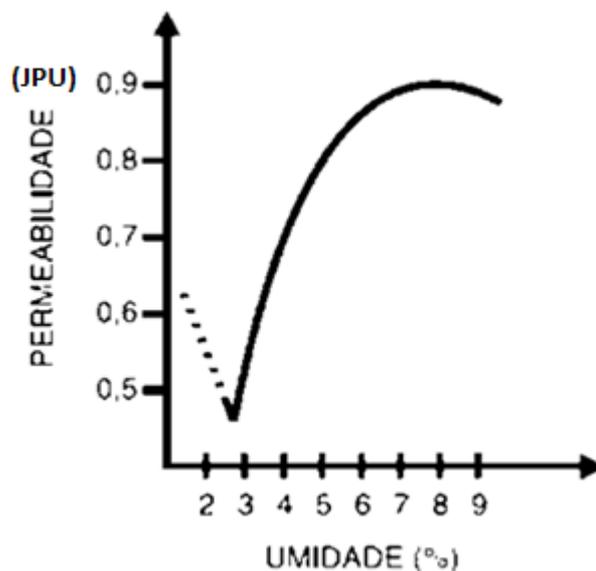


Figura 3.13 – Efeito da umidade sobre a permeabilidade do leito (adaptada de Honorato et. al., 1993, citado por d’Avila, 2015).

No que tange à formação do microaglomerado dentro dos tambores rotativos, a relação entre velocidade de rotação e o fator de ocupação (volume da mistura dividido pelo volume interno no tambor) possui grande importância no desenvolvimento do regime de movimentação das partículas (Honorato, 2005).

O regime de Catarata é caracterizado por alta rotação e grande fator de ocupação. Nesta configuração de movimento ocorre a inicial formação do aglomerado com subsequente destruição dos mesmos. O movimento de Escorregamento, caracterizado por baixo fator de ocupação, não produz contato suficiente entre as partículas para a formação de uma adequada aglomeração. O melhor regime de operação é o de Cascata, possuindo adequadas relações entre fator de ocupação e velocidade de rotação do tambor. Esta relação está descrita na figura 3.14 (Najar *et. al.*, 1981, citado por Honorato, 2005).

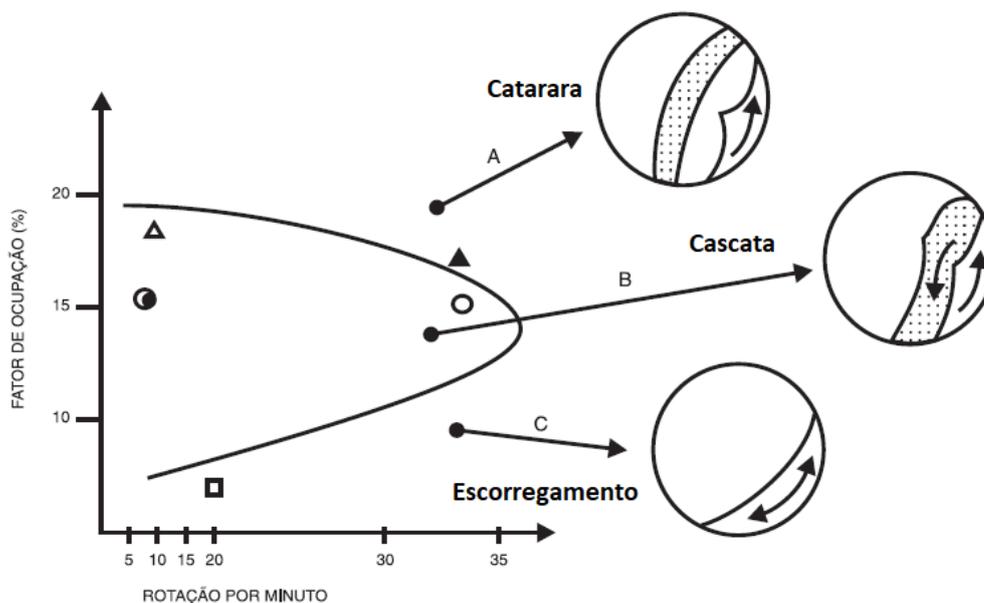


Figura 3. 14 – Regime de operação do tambor misturador (adaptado de Najar et. al., 1981, citado por Honorato, 2005)

3.1.5 Qualidade do sinter

A qualidade do sinter representa uma das principais preocupações da sinterização. Com posterior utilização nos altos-fornos, sua produção é realizada visando a obtenção de características químicas, físicas e metalúrgicas bastante específicas. Estas especificações podem variar bastante dependendo da usina, da carga utilizada no alto-forno e das matérias-primas empregadas. Isto se deve ao fato do sinter não ser um material comercial, adaptando-se às práticas de cada empresa (Pereira, 2004).

O sinter, assim como as demais cargas do alto-forno, será submetido a grandes variações de temperatura, aumento de pressão devido ao peso da carga, grande abrasão entre as partículas e a parede do reator e a fenômenos de mudança de fase, degradação sob redução e reações químicas. Assim, o sinter produzido é avaliado a partir de uma série de ensaios químicos, físicos e metalúrgicos (d'Ávila, 2015).

Os principais ensaios e parâmetros utilizados na avaliação da qualidade do sinter, segundo d'Ávila (2015), são mostrados na figura 3.15.

Tabela 3.1 – Principais ensaios e parâmetros de avaliação da qualidade do sinter produzido, segundo d'Avila (2015)

QUALIDADE DO SÍNTER

QUÍMICA	FÍSICA	METALÚRGICA
FeT: Ferro Total CaO: Óxido de cálcio SiO ₂ : Sílica Al ₂ O ₃ : Alumina Mgo: Óxido de magnésio MnT: Manganês Total P: Fósforo S: Enxofre TiO ₂ : Óxido de Titânio FeO: Óxido de ferro	Teste de tamboramento (Tumbler Test) Teste de Queda (Shatter Test) Análise Granulométrica	Índice de Degradação Sob Redução (RDI) Índice de Redutibilidade (RI)

Harano (2013) especifica alguns parâmetros importantes na qualidade do sinter. Segundo o autor, alguns parâmetros a serem visados:

- Sinter com sílica menor do que 5,50%
- Sinter com alumina menor do que 1,40%
- Sinter com fósforo menor do que 0,050%
- Índice de degradação sob redução (RDI) menor do que 32%
- Índice de Redutibilidade (RI) maior do que 65%

3.2 UTILIZAÇÃO DE *PELLET FEED* NA SINTERIZAÇÃO

3.2.1 Motivações

Segundo Silva (2014) minérios com maiores teores de sílica ganham espaço no cenário brasileiro e mundial devido a redução dos principais corpos de hematita. Para a manutenção da qualidade química do sinter, é necessária a utilização de minérios cada vez mais finos, oriundos de processos de cominuição e concentração.

Harano (2013) mostra que existe uma previsão de constante crescimento na produção mundial de ultrafinos e que sua participação no mercado oceânico será mais de 40%. O autor mostra, a partir de dados de sete diferentes empresas do setor siderúrgico que produzem sínter, que a produtividade média das sinterizações diminuiu (figura 3.15) e continua a decrescer, enquanto o teor de sílica do sínter produzido vem aumentando cada vez mais (figura 3.16). Isto produziu um aumento da quantidade de escória gerada nos altos-fornos.

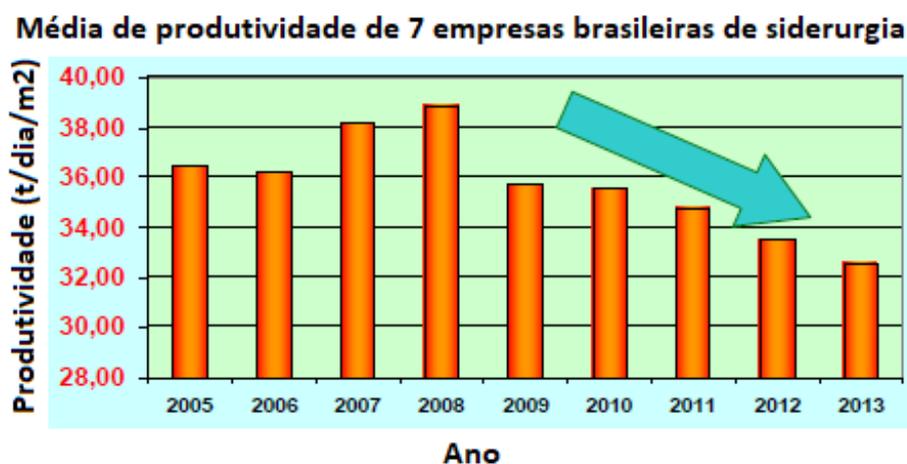


Figura 3. 15 – Média de produtividade de planta de sinterização de 7 empresas brasileiras (Harano, 2013)



Figura 3. 16 - Média do teor de sílica no sínter produzido em plantas de sinterização de 7 empresas brasileiras (Harano, 2013)

Como medida de mitigação dos efeitos deletérios produzidos pela menor qualidade dos minérios, a utilização de ultrafinos (podendo ser ou não concentrados) vem surgindo como opção viável de correção de qualidade química do sínter produzido.

Contudo, não é apenas a manutenção da qualidade química do sinter que impulsiona a utilização de *pellet feed* nas sinterizações. Questões estratégicas também são de extrema importância. A maior necessidade de cominuição para garantir grau de liberação adequado do minério impacta na maior produção destes ultrafinos que necessitam de escoamento, seja ele como produto a ser vendido externamente, seja para consumo interno. Investimentos em plantas de pelotização são bastante altos e, normalmente, superiores aos necessários às plantas de sinterização. Usinas integradas que já possuem instalações para a produção de sinter não possuem interesse na produção de pelotas: investimentos altíssimos seriam necessários sem que haja um grande retorno. Opção mais adequada é a utilização do *pellet feed* produzido no próprio processo de sinterização.

3.2.3 Avanços tecnológicos na utilização de ultrafinos no processo de sinterização

Tendo em vista a necessidade de utilização de participações cada vez maiores de ultrafinos na sinterização, diferentes tecnologias foram sendo desenvolvidas de modo a permitir a adição de ultrafinos no processo sem o efeito deletério sobre o processo de microaglomeração a frio e, conseqüentemente, redução da permeabilidade do leito.

I. Processo HPS

Pesquisadores japoneses (Niwa *et. al*, 1993), visando a possibilidade de uma utilização mais agressiva de *pellet feed* na sinterização para reduzir o teor de sílica do sinter produzido, desenvolveram um processo híbrido de microaglomeração mesclando pelotização e microaglomeração em tambor. Este processo ficou conhecido como HPS (Hybrid Pelletized Sinter). Segundo os autores, alguns dos requisitos para sua concepção foram: a já existência da sinterização convencional (esteira de sinterização), a necessidade de utilização de ultrafinos e a possibilidade de redução de consumo de combustível no processo de aglomeração a quente e no próprio alto-forno, a partir do aumento da redutibilidade do sinter produzido.

O processo consiste em, após a inicial mistura e microaglomeração em tambor rotativo, realizar uma etapa adicional de micropelotização da mistura em discos pelotizadores. A etapa final, anterior à adição no leito de sinterização, seria o recobrimento com finos de coque sobre as partículas aglomeradas (Niwa *et. al*, 1993). A figura 3.17 (adaptado de

Lu e Ishiyama, 2016) mostra um fluxograma do processo HPS utilizado na NKK Fukuyama Works.

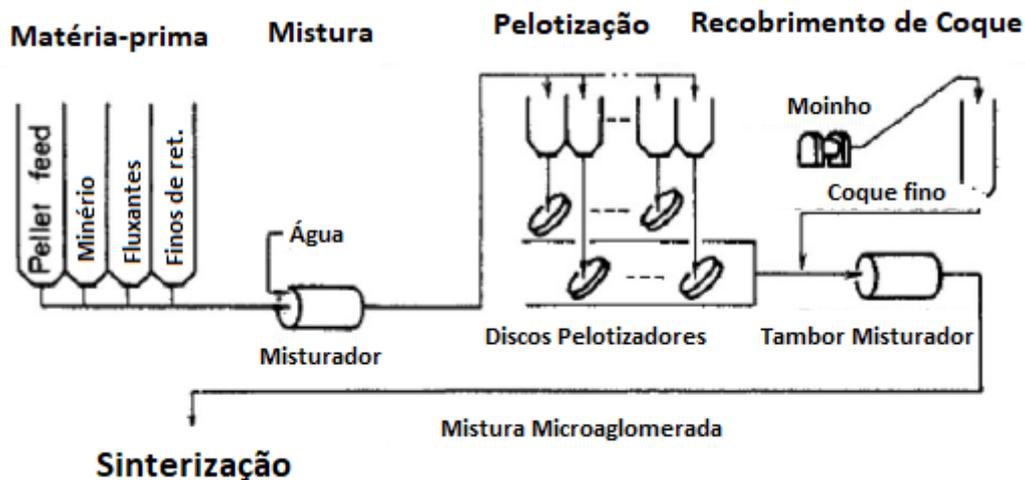


Figura 3. 17 – Fluxograma do processo HPS na NKK (adaptado de Lu e Ishiyama, 2016)

A aplicação industrial do processo HPS na planta da antiga NKK Fukuyama Works mostrou que o novo processo provou a capacidade de utilização de grandes quantidades de ultrafinos (60%) produzindo sinter com menor teor de sílica (4,7%) com RI e RDI adequados (>70% e <40% respectivamente). A produtividade obtida foi elevada (1.65t/m²/h) (Niwa *et. al*, 1993). A partir do desenvolvimento deste processo, algumas plantas industriais passaram a utilizar o HPS em suas linhas de produção.

Segundo Pereira (2004) a principal diferença entre o processo de sinterização tradicional e o HPS é o formato dos grânulos formados. O HPS produz aglomerados mais esféricos do que o processo convencional. O recobrimento por finos de carvão nas micropelotas faz com que elas não fiquem aderidas umas às outras, melhorando sua distribuição na esteira e no leito.

II. Granulação Seletiva

A granulação seletiva foi desenvolvida pela Nippon Steel Corporation visando a utilização de minério de ferro limonítico de baixo teor de ferro e de ultrafinos. Neste processo os finos são inicialmente peneirados e separados do restante das matérias-primas. Estes finos são pelletizados em discos pelletizadores e, posteriormente, adicionado à mistura restante. As micropelotas previamente produzidas funcionam como novas partículas nucleantes. Este processo permite uma boa aglomeração e a concentração da alumina nas pelotas formadas previamente, o que permite a adequada formação da fusão incipiente durante o processo de aglomeração a frio. Isto leva a uma formação de sinter com maior quantidade de poros abertos e, estes, de maiores tamanhos. Isto leva à redução do consumo de combustível sólido, melhora na permeabilidade do leito e na redutibilidade do sinter produzido (Lu e Ishiyama, 2016). Um esquema mostrando o efeito da granulação seletiva pode ser visto na figura 3.18 (Lu e Ishiyama, 2016).

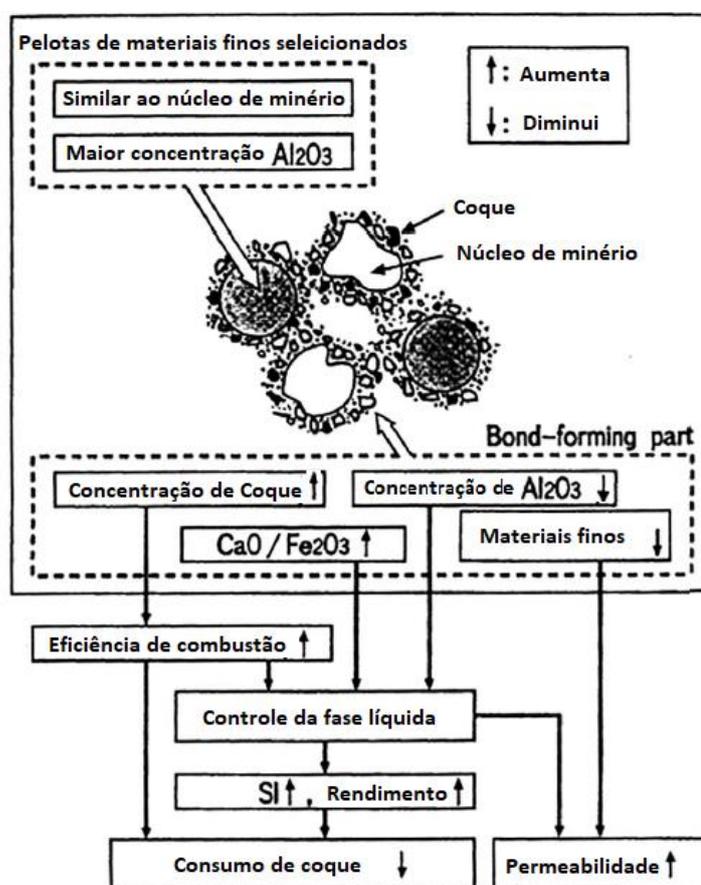


Figura 3. 18 -- Granulação seletiva e seus efeitos sobre a sinterização (adaptado de Lu e Ishiyama, 2016)

III. Misturador Intensivo

Seguindo a tendência da atuação dos projetos de melhoria focados no processo de produção do microaglomerado, tem-se a utilização de misturadores intensivos.

Testes de aglomeração a frio comparando o processo convencional e utilização de misturador agitador de alta velocidade conectado a um tambor foram realizados por Hseleh (2011, citado por Pereira 2016). Estes testes mostraram uma melhora na granulação da matéria-prima e maior flexibilidade para utilização de ultrafinos na mistura.

No misturador intensivo, segundo Burchart-Korol (2012), cerca de 90 por cento da energia fornecida é utilizada para a agitação e mistura do material pelas pás de alta rotação, que rotacionam em direção oposta ao tambor que contém a mistura. Neste equipamento a homogeneização ocorre de forma otimizada e os grânulos formados possuem alta densidade e resistência mecânica. No caso da utilização de ultrafinos o processo de mistura e homogeneização é de extrema importância, definindo a qualidade do microaglomerado produzido.

Investigações realizadas por Reidetschaeger (2013) mostraram que a utilização de misturador intensivo produziu melhor homogeneização da mistura a sinterizar e maior tamanho médio dos grânulos produzidos na etapa de granulação, permitindo a utilização de grande quantidade de ultrafinos na mistura.

Pereira *et. al.* (2016) mostram que a utilização de 20% de *pellet feed* no processo de sinterização convencional reduz significativamente a produtividade do processo. A utilização do misturador intensivo, em contrapartida, permitiu a substituição de até 40% da mistura de minérios por *pellet feed* sem nenhum efeito deletério sobre a produtividade na sinterização.

3.3 AGENTES AGLOMERANTES (LIGANTES) NA SINTERIZAÇÃO E NA PELOTIZAÇÃO

A promoção da aglomeração das matérias-primas no processo de sinterização é feita pela fusão incipiente e subsequente recristalização das fases mineralógicas. Isto significa que não é necessária a adição de agentes aglomerantes neste processo (Eisele e Kawatra, 2003).

A pelotização, por outro lado, é um processo de aglomeração a quente de partículas ultrafinas (menores do que 0,1mm) que, como etapa inicial, produz pelotas cruas através de discos pelotizadores. Estas pelotas cruas são, então, submetidas ao processo de queima, visando seu endurecimento e adequação às propriedades físicas e mecânicas necessárias. A utilização de ligantes na pelotização tem como principal objetivo permitir a integridade estrutural de cada uma das pelotas cruas durante o transporte e garantir a resistência destas durante o processo de secagem e subsequente queima, até que a aglomeração a quente tenha se concretizado (Eisele e Kawatra, 2003). A bentonita é o ligante mais comumente utilizado na pelotização de minério de ferro, controlando a umidade e melhorando consideravelmente as propriedades físicas da pelota (Qiu *et. al.*, 2002).

A necessidade de maior utilização de ultrafinos na sinterização levou ao desenvolvimento de diferentes tecnologias que visaram a manutenção da produtividade do processo e a qualidade do sinter. A grande maioria dos esforços, atualmente, está concentrada no preparo da mistura, com foco no processo de aglomeração a frio.

A utilização de cal fina na aglomeração a frio visa a melhorar o processo de formação das micropelotas, garantindo produtividade adequada na máquina de sinterização. Segundo Honorato *et. al.* (1993, citado por d'Ávila, 2015) a cal fina é um dos agentes aglomerantes que produz melhor resultado em termos de índice de granulação, além de ser o mais comumente utilizado no processo de aglomeração a frio. Ela promove, juntamente com a umidade, a formação de partículas de tamanho médio maior e mecanicamente mais resistentes quando comparadas às pelotas produzidas sem o ligante. A figura 3.19 mostra o efeito da adição de cal sobre a produtividade e tempo de sinterização (Azevedo *et. al.*, 2013, citado por d'Ávila, 2015).

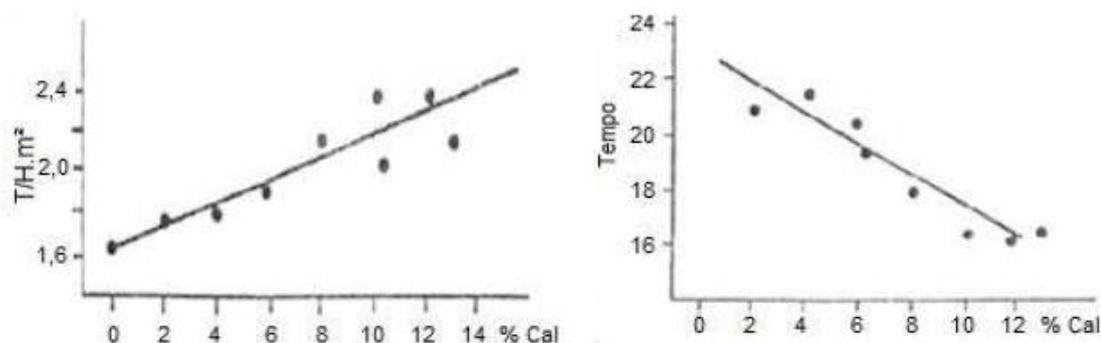


Figura 3. 19 – Influência da adição da cal fina sobre a produtividade e o tempo de sinterização (Azevedo et. al., 2013, citado por d'Ávila, 2015)

Zhou *et. al.* (2016) pesquisaram o efeito da adição da cal hidratada sobre a formação dos grânulos e concluíram que, para um mesmo valor de umidade de mistura, a adição de maior quantidade de cal hidratada melhora a eficiência de granulação devido a formação de uma camada inicial mais coesiva na superfície das partículas nucleantes, o que promove maior aglomeração durante a granulação.

3.3.1 Definição e classificação

Segundo Eisele e Kawatra (2003), um ligante é, em geral, qualquer substância ou composto que possa ser utilizado para causar aderência entre partículas. Existem diferentes formas que estes podem atuar, sendo importante, portanto, categorizar os diferentes ligantes de modo sistemático. Holley (1982, citado por Eisele e Kawatra, 2003) divide os agentes aglomerantes em cinco diferentes grupos:

- I. Filme inativo: o ligante forma uma camada adesiva nas partículas, que as aglomera. O filme pode promover a ligação por forças capilares ou por forças coesivas. Normalmente a aglomeração é reversível.
- II. Filme químico: o ligante forma um filme na superfície das partículas que sofre reação química e endurece. A aglomeração é tipicamente irreversível.
- III. Matriz inativa: o ligante forma uma matriz aproximadamente contínua na qual as partículas estão inseridas. O ligante é usualmente um material como alcatrão, piche ou cera que é aquecido ou emulsificado para torná-lo fluido e subsequentemente

resfriado (ou seco) para o processo de endurecimento. Ligantes deste tipo normalmente requerem grande dosagem e a ligação formada pode ser reversível sob aquecimento.

- IV. Matriz química: o ligante forma uma matriz aproximadamente contínua que sofre reação química, provocando o endurecimento. A ligação formada é normalmente irreversível.
- V. Reação química: o ligante em si sofre reação química com o material (partículas) a ser aglomerado, resultando em interações bastante fortes. Este tipo é particular a alguns sistemas e não existem ainda para minérios de ferro.

Ainda segundo esses autores, é importante frisar que um ligante pode ser classificado de diferentes formas, dependendo da sua dosagem e aplicação. Na pelotização de minérios de ferro normalmente utilizam-se ligantes do tipo “filme inativo”, pois são efetivos com pequenas adições, promovem a aglomeração de forma rápida e não necessitam de processo subsequente de compactação.

Tabela 3.1 – Exemplos de vários sistemas de ligantes (adaptado de Eisele e Kawatra, 2003)

Filme Inativo	Filme Químico	Matriz Inativa	Matrix Química	Reação química
Água	Silicato de sódio + CO ₂	Asfalto de petróleo	Cal virgem + água	Ácido sulfúrico diluído
Álcool	Silicato de sódio + cal virgem	Cera de carnaúba	Cal hidratada + CO ₂	Cloreto de magnésio + água
Óleos		Parafina	Cal + Melaço	
Bentonita		Ceras	Cimento Portland + Água	
Silicato de sódio		Alcatrão de madeira		
Silicato de potássio		Resinas		
Melaço		Bentonita		
Amido de milho		Sílica coloidal		
Farinha de trigo				
Amido de batata				
Caseína				
Glucose				
Dextrina				
Colas				
Goma arábica				

Centenas de materiais são classificados e utilizados como ligantes em pelotização de minério de ferro. A busca pelo melhor ligante leva em consideração diversos fatores, como o menor custo, menor introdução de contaminante e menor interferência no processo.

Eisele e Kawatra (2003) classificaram e realizaram uma detalhada descrição dos diferentes tipos de ligantes, cada qual com vantagens e desvantagens intrínsecas. Segundo os pesquisadores, cinco são os principais grupos de ligantes:

- Argilas e minerais coloidais
- Polímeros orgânicos e fibras
- Cimentos
- Sais e precipitados
- Polímeros inorgânicos

Uma breve descrição de cada um destes grupos será realizada baseando-se no trabalho de Eisele e Kawatra (2003).

I. Argilas e minerais coloidais

As argilas são membros de uma classe de minerais conhecidos como filossilicatos. São constituídos de “placas” de SiO_4 tetraédrico, arranjados em diferentes maneiras com uma variedade de íons que neutralizam o excesso de carga e aderem as placas em camadas, que possuem fraca interação entre si. Quando submetidas à umidade são facilmente separadas, resultando na sua dispersão. Ao secarem, as placas podem aderir mecanicamente ou eletrostaticamente às superfícies do minério, agindo como ligantes. Duas características importantes para as argilas serem caracterizadas como agentes aglomerantes: alto grau de dispersão e grande capacidade de absorção de umidade.

A bentonita possui estas características e é o ligante mais utilizado no processo de pelotização. Ela controla a umidade no concentrado de ferro e melhora significativamente as propriedades físicas das pelotas, tanto cruas quanto queimadas. No entanto, existem pontos negativos na utilização da bentonita. A principal limitação em seu uso reside na sua composição química. A alta quantidade de sílica (pode chegar

a 50% de toda a bentonita) reduz do teor de ferro das pelotas. Adição de 1% do ligante resulta em diminuição do teor de ferro em 0,6% (Qiu *et. al.*, 2003).

II. Ligantes Orgânicos

A utilização da bentonita, apesar de produzir pelotas com adequadas propriedades físicas, incorpora elementos de ganga no produto final, o que é contraprodutivo. Este fato levou ao interesse de desenvolverem-se ligantes que não possuíssem sílica em sua composição química. Atenção particular foi dada aos ligantes orgânicos, que incluem uma variedade de compostos fibrosos e poliméricos.

Existem diversos ligantes orgânicos, com diferentes grupos funcionais e características. Pode-se citar: celuloses, gomas naturais, sulfonatos de lignina, amidos, resinas, poliácridamidas, etc. Eles podem ser do tipo natural ou artificial (produzidos industrialmente). Os artificiais geralmente são altamente efetivos e podem ser especialmente desenvolvidos para aglomerar tipos específicos de partículas. As principais desvantagens da maioria dos ligantes orgânicos são o alto custo (comparado ao custo da bentonita) e as propriedades físicas inferiores das pelotas queimadas (também comparado às da bentonita).

Segundo Eisele e Kawatra (2003) podem-se dividir os ligantes orgânicos em:

i. Derivados de celulose

Sua estrutura básica é baseada na celulose e na carboximetilcelulose (CMC), podendo conter grande quantidade de sódio para aumentar a solubilidade do composto em água. Estes ligantes podem ser adicionados na mistura como pó seco ou em pasta. Sua estrutura pode ser vista na figura 3.20 (Eisele e Kawatra, 2003).

Comercialmente, o Peridur (derivado de carboximetilcelulose de sódio), produzido pela Akzo Nobel, tem sido estudado extensivamente para a utilização na pelletização de minérios de ferro. Ele é produzido a partir da substituição de alguns grupos OH da celulose por grupos polares, tornando o composto solúvel em água. Dosagens bem menores deste ligante são necessárias para obtenção do mesmo efeito da bentonita sobre as propriedades mecânicas da pelota crua e seca (aproximadamente 10% da quantidade de bentonita).

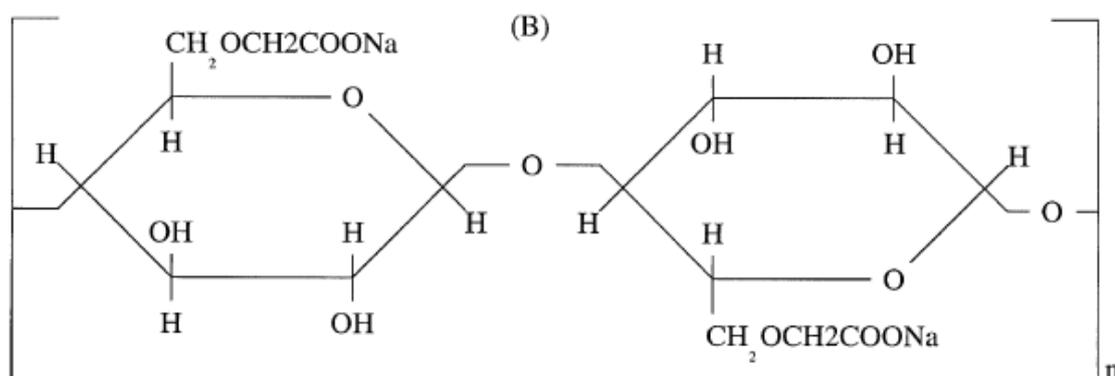


Figura 3. 20 – Estrutura idealizada do monômero do carboximetilcelulose, composto básico do Peridur (adaptado de Eisele e Kawatra, 2003).

ii. Derivados do amido

A celulose e o amido são isômeros, e espera-se que possuam propriedades similares, mas não idênticas. São geralmente menos caros do que derivados da celulose e podem ser utilizados secos ou em forma de gel (após serem cozidos em água). São produzidos de matéria vegetal. Amidos com baixo poder de absorção de água produzem pelotas cruas com baixa resistência mecânica (Haas *et. al.*, 1989). Já os com maior poder de absorção de água produziram pelotas com resistência a queda aceitáveis.

iii. Polímeros sintéticos

Um dos polímeros sintéticos mais utilizados como ligante é a poliacrilamida de sódio, com o Alcotac como exemplo de ligante comercial. Produzido pela Basf, o Alcotac é um exemplo de polímero sintético orgânico utilizado como ligante no processo de pelotização de minério de ferro. Segundo resultados de testes de pelotização e avaliação de propriedades mecânicas das pelotas realizado por Srivastava *et. al.* (2013), este ligante produz pelotas cruas e secas com boas propriedades mecânicas. Como a maioria dos ligantes orgânicos, as propriedades físicas da pelota queimada não foram adequadas.

iv. Derivados da madeira

São subprodutos do processamento da madeira (hemicelulose, sulfonato de lignina e leonardita cáustica), sendo menos caros do que os ligantes produzidos industrialmente. Haas *et. al*, 1989 verificaram que, para a hemicelulose, a dosagem deve ser maior do que 0.1% para produzir pelotas adequadas. Dosagens maiores produzem propriedades cada vez melhores. O sulfonato de lignina, neste mesmo estudo, se mostrou adequado em dosagem de 0,1% para pelotas secas, mas não produziu pelota úmida de qualidade física adequada.

v. Ligantes orgânicos naturais (resíduos)

Segundo Eisele e Kawatra (2003), grande variedade de gomas, alcatrão e materiais similares podem ser produzidos a partir de fontes naturais. Seria de se esperar um menor custo destes ligantes em comparação aos sintéticos, pois não necessitam de tanto processamento. No entanto, segundo os autores, na prática alguns destes materiais são comparativamente caros devido à limitação de oferta, competição com outros mercados e custos de logística. Alcatrão e betume são mais utilizados como ligantes para briquetagem, pois não possuem características adequadas para formar pelotas nos discos e tambores.

Alguns resíduos orgânicos podem funcionar como ligantes. Lactose, lodo de usinas produtoras de papel, etc. são exemplos. As principais desvantagens são a falta de controle e constância da qualidade química destes produtos e sua facilidade de decomposição após o recebimento.

Mistura de turfa e hidróxido de sódio produziu pelotas com alta qualidade, segundo experimentos de Vincze (1968, citado por Eisele e Kawatra, 2003). Zhou e Kawatra (2017) realizaram experimentos utilizando mistura de linhito e hidróxido de sódio como ligante e obtiveram excelentes resultados relacionados às propriedades da pelota crua e seca. Qiu *et. al*. (2003) comentam a utilização da Funa, um ligante para pelletização de minério de ferro desenvolvido na Central South University, na China. Segundo os autores, é um ligante polimérico natural com humatos como principal constituinte. O ligante é produzido pela extração do humato do carvão mineral utilizando solução de hidróxido de sódio.

O lodo de usinas produtoras de papel pode ser utilizado como ligante, resultando em adequadas propriedades mecânicas às pelotas. Os principais problemas associados à sua utilização são a alta dosagem necessária, normalmente o dobro da utilizada para a bentonita e a necessidade de seu pré-tratamento antes de ser empregado no processo.

III. Cimentos

Diferentemente das argilas e a maioria dos ligantes orgânicos, os cimentos reagem quimicamente e de maneira irreversível com a água, formando um composto resistente. Cimento portland e cal virgem são exemplos deste grupo de aglomerantes. O principal problema associado à sua utilização é a grande quantidade de tempo necessária para produzir os efeitos de aumento da resistência mecânica do aglomerado, além de usualmente contribuir com certa quantidade de sílica no processo (no caso de cimento portland). Cimento portland se mostrou inadequado à formação de pelotas de maior tamanho médio. Já a cal virgem não contribui com sílica na mistura, além de agir como fluxante. Quando adicionada à mistura e exposta à umidade, a cal funciona como um bom agente aglomerante, proporcionando as propriedades mecânicas mínimas necessárias às pelotas (Eisele e Kawatra, 2003).

IV. Sais

O sal dissolvido na água contida na mistura irá cristalizar quando ocorrer o processo de secagem, agregando os grãos minerais. Normalmente, com a utilização de apenas sais como ligantes, boa resistência à abrasão das pelotas é obtida, porém a resistência à compressão e à queda ficam abaixo do requerido. Testes realizados com sulfato de ferro mostraram que este é inferior, como agente aglomerante, comparado à bentonita.

V. Polímeros inorgânicos

Estes compostos são moléculas complexas que formam cadeias e redes que agem como ligantes. Silicato de sódio é o exemplo mais comum. Sua ação como ligante se deve à habilidade de formar interações a partir de sílica gel precipitada e o silicato de sódio. Este processo é realizado a partir da exposição do material a altas temperaturas e atmosfera rica em dióxido de carbono. O ácido poli silícico formado funciona como o ligante (Eisele e Kawatra, 2003).

3.3.2 Ligantes para a sinterização e sua capacidade de aglomeração a frio

Pouco há na literatura estudos investigando a utilização de diferentes tipos de ligantes no processo de aglomeração a frio da mistura a sinterizar. Isto se deve, provavelmente, às diferentes condições do processo de aglomeração a frio da sinterização e da pelotização. Nesta utiliza-se unicamente o *pellet feed* como carga ferrífera, sendo todas as partículas ultrafinas, exigindo maior busca de eficiência do processo. As pelotas produzidas possuem tamanhos homogêneos e passam por um processo de cura, que difere bastante do processo de sinterização. Isto é evidenciado pelos testes mais comuns realizados para avaliação da qualidade das pelotas produzidas: teste de queda das pelotas cruas e testes de compressão das pelotas cruas, secas e curadas.

A sinterização utiliza uma grande variedade de matérias-primas, cada qual com uma ampla distribuição granulométrica (especialmente os minérios). Isto significa que as micropelotas formadas diferem não apenas em estrutura (na sinterização são formadas quase partículas, constituídas de partículas nucleantes e aderentes), mas também exibem uma distribuição granulométrica bem mais ampla do que as pelotas. O aglomerado formado não irá passar por um processo de cura, mas sim de sinterização, onde parte da mistura irá fundir e reagir para, assim, formar o sinter final. Além da cal virgem normalmente não se utiliza nenhum outro ligante na aglomeração a frio da sinterização.

Com a tendência de maior utilização de ultrafinos na mistura a sinterizar, atenção especial vem sendo dada ao preparo da mistura (Harano, 2013). Dentro dos esforços visando o aumento de sua utilização o emprego de novos ligantes pode ser uma das alternativas utilizadas para garantir a produtividade e qualidade do sinter final.

Como se trata de aglomeração de minério de ferro, assim como na pelotização, os ligantes estudados e utilizados neste processo possuem potencial de uso na aglomeração a frio da mistura da sinterização. É de se esperar efeitos semelhantes dos ligantes nos dois processos, porém, devido às diferenças no processo de formação dos grânulos e da composição da mistura, espera-se, também, diferentes mecanismos de atuação dos ligantes sobre a formação das quase partículas. Deste modo, como critério inicial de escolha de agentes aglomerantes para a mistura de sinterização, é preciso utilizar os

resultados prévios obtidos para a pelotização para a decisão sobre possível teste ou emprego do composto no processo.

Srivastava *et. al.* (2013) investigaram o efeito de diversos ligantes orgânicos e inorgânicos sobre a produção de pelotas de minério de ferro, avaliando a qualidade das pelotas cruas, secas e curadas. O interesse do estudo foi obter uma alternativa à utilização da bentonita como agente aglomerante, que agrega grande quantidade de ganga ao aglomerado. Os pesquisadores verificaram que alguns ligantes orgânicos permitiram a produção de pelotas cruas e secas com qualidade mecânica adequada e, algumas vezes, até melhores do que as produzidas com a utilização da bentonita. Os ligantes orgânicos que produziram melhores resultados às pelotas cruas e secas foram o Peridur, farinha de batata, hemicelulose, lactose monohidratada, Alcotac FE8 e o lodo de papel. Contudo, os melhores ligantes para obtenção de propriedades mecânicas adequadas às pelotas curadas foram os ligantes inorgânicos. A figura 3.21 (adaptado de Srivastava *et. al.*,2013) mostra os resultados obtidos para o número de quedas das pelotas verdes.

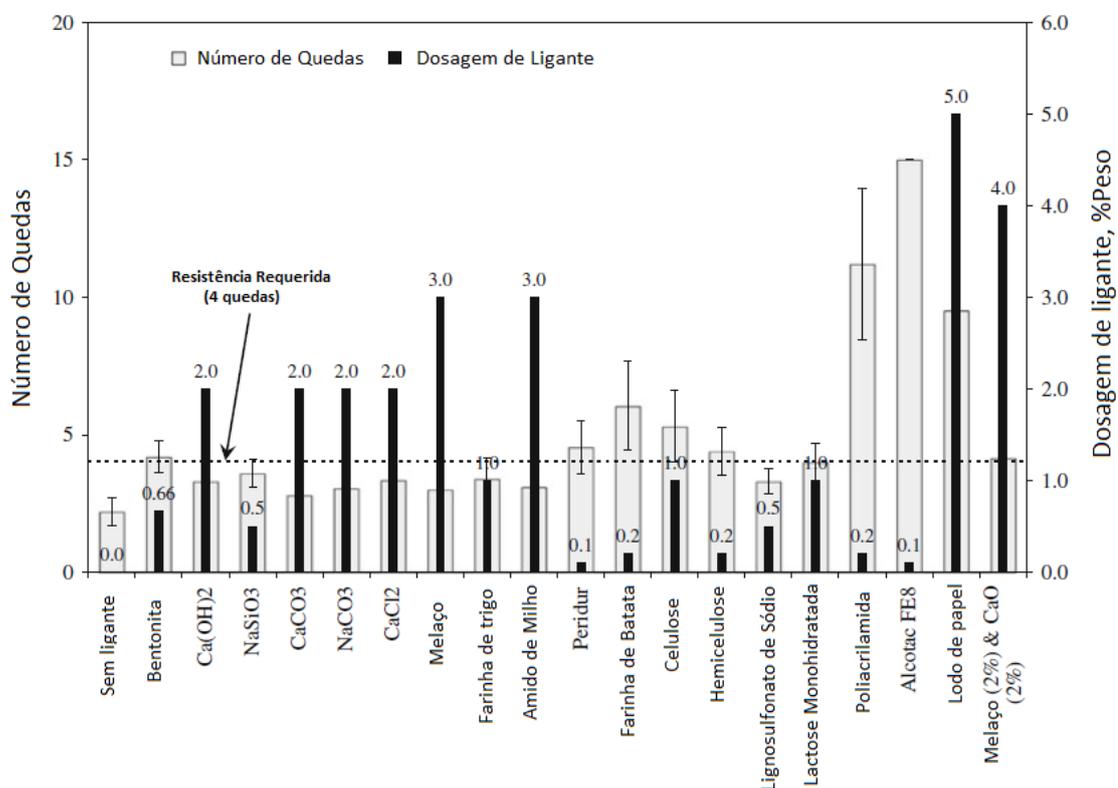


Figura 3. 21 – Teste de queda de pelotas cruas para diferentes ligantes utilizados (adaptado de Srivastava *et. al.*,2013)

Os ligantes orgânicos produziram, em geral, melhores propriedades das pelotas cruas enquanto os inorgânicos mal conseguiram atingir o valor mínimo estipulado. Quanto às propriedades do aglomerado úmido e seco, espera-se, a partir destes resultados, que os aglomerantes orgânicos forneçam melhores resultados. A utilização do lodo de papel e do melaço torna-se limitado, pois as dosagens destes ligantes são bastante altas (5% e 4%, respectivamente) reduzindo a produtividade da sinterização. Assim, dos ligantes orgânicos testados, o Peridur, o Alcotac FE8 e a hemicelulose fornecem bons resultados de aglomeração utilizando-se poucas dosagens. Um dos principais problemas destes ligantes orgânicos é o elevado custo, principalmente os produzidos industrialmente (como o Alcotac e o Peridur).

Zhang *et. al.* (2011) comentam que ligantes baseados em substâncias húmicas (ácidos húmicos e fúlvicos) são bastante promissores para utilização em aglomeração de minério de ferro. Segundo os autores estes ligantes são produzidos a partir da extração destes ácidos do linhito utilizando solução de hidróxido de sódio.

Qiu *et. at.* (2004) compararam a utilização de um ligante baseado em ácidos húmicos e fúlvicos (Funa) com a bentonita na pelletização de concentrado de magnetita e concluíram que melhores propriedades mecânicas das pelotas cruas e secas foram obtidas com esse ligante. A estrutura molecular dos humatos é mostrada na figura 3.22 (Schnitzer, 1972, citado por Qiu *et. al.* 2003).

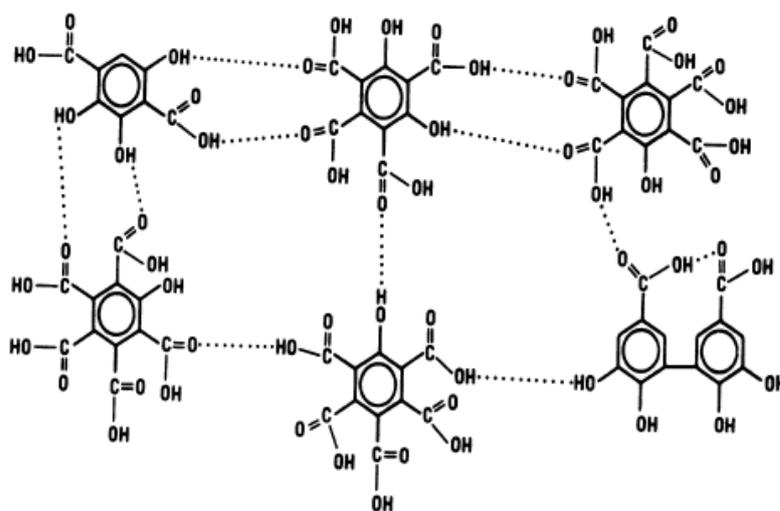


Figura 3. 22 – Estrutura molecular dos humatos proposta por Shnitzer (Schnitzer, 1972, citado por Qiu *et. al.* 2003)

Zhou e Kawatra (2017) pesquisaram a utilização do linhito diretamente como aglomerante no processo de produção de pelotas úmidas, secas e curadas, sem o processo prévio de extração e isolamento dos ácidos húmicos e fúlvicos. Nos testes eles compararam a adição do linhito misturado ao hidróxido de sódio com a bentonita. A adição de linhito mais hidróxido de sódio possibilitou a produção de pelotas com adequada resistência a queda e a compressão, com valores comparáveis e, algumas vezes, até melhores do que a bentonita. A melhor dosagem do ligante foi de 0,75% e adição de hidróxido de sódio na proporção de 10:1. O linhito utilizado nos testes possui teor médio de substâncias húmicas (soma de ácidos húmicos e fúlvicos) de 38%.

Souza *et. al.*(2014) pesquisaram o teor de ácidos húmicos de três diferentes carvões do sul do Brasil. Chegaram à conclusão de que o carvão da jazida de Candiota possui o maior teor de ácidos húmicos, com aproximadamente 1,4%. Clasen *et. al.* (1998), estudaram o teor de ácidos úmicos e fúlvicos do carvão da jazida de candiota, localizada no Rio Grande do Sul, com diferentes graus de intemperismo. O teor médio encontrado foi de 1,33% para o ácido húmico e 0,3% para o ácido fúlvico.

É possível perceber que os carvões brasileiros não possuem altos teores de substâncias húmicas, o que indica menor possibilidade de sua utilização como ligante no processo de pelletização. Para sua utilização seria necessário teor bastante elevado do carvão ou menor necessidade de aglomeração, o que ocorre quando a quantidade de ultrafinos é pequena.

3.3.3 Mecanismos e estruturas moleculares relacionadas aos agentes aglomerantes orgânicos para minério de ferro

Qiu *et. al.* (2003) descrevem as estruturas moleculares ideais que um ligante orgânico deve possuir em aglomeração de minérios de ferro, além de mostrarem alguns dos principais mecanismos e forças envolvidas na interação minério-ligante.

Segundo os autores a experiência prática da pelletização nas últimas décadas permitiu a criação de critérios os quais os ligantes devem satisfazer:

- Um bom ligante deve produzir propriedades mecânicas adequadas às pelotas verdes, secas e curadas (resistência à queda, à compressão, impacto, etc);

- O ligante não deve contaminar a mistura com elementos deletérios à natureza ou aos processos subsequentes (alto-forno);
- A manutenção de boas propriedades metalúrgicas, como redutibilidade por exemplo, deve ser atingida com o uso do ligante;
- A adição, mistura, processamento e dispersão do ligante não deve ser complicada ou requerer grandes mudanças ou investimentos em instalações.

Em um modelo simples de duas partículas de minério sendo aglomeradas por uma camada de ligante, é possível identificar duas fases (partícula e ligante) e uma interface (partícula-ligante). Segundo Qiu *et. al.* (2003) existem quatro tipos de forças de interação neste sistema.

- 1) Força de coesão do ligante, que representa a soma das forças de interação entre as moléculas dentro do ligante, representando as propriedades do ligante;
- 2) Força coesiva do minério, representando as propriedades mecânicas da partícula de minério;
- 3) Força adesiva na interface minério-ligante, que é a soma das interações de van der Waals, eletrostática, magnética e viscosa entre o minério e o ligante;
- 4) Força de interação entre as partículas de minério, que representa a soma das interações de van der Waals, eletrostática, magnética, capilaridade e bloqueio mecânico entre essas partículas.

As falhas de aglomeração ocorrem quando uma força exterior é superior às forças de coesão do ligante e do minério e à força adesiva da interface minério-ligante. Em cada um destes casos pode ocorrer uma quebra da partícula do minério, desagregação do ligante ou descolamento da interação ligante-partícula, sendo que estes três fenômenos podem ou não ocorrer simultaneamente. Segundo Qiu *et. al.* (2003), as falhas geralmente ocorrem dentro da camada de ligante ou na interface ligante-partícula. Portanto as forças de coesão do ligante e as forças adesivas são decisivas para o processo de aglomeração. A figura 3.23 (Qiu *et. al.*, 2003) mostra um esquema de interação no sistema minério-ligante-minério.

Os pesquisadores descrevem a estrutura ideal que ligantes orgânicos devem possuir para sua utilização na aglomeração de minério de ferro:

- Grupos hidrofílicos reforçando a molhabilidade da superfície do minério;
- Grupos polares para maior interação com a superfície das partículas de minério;
- Cadeia orgânica forte e com alta resistência térmica.

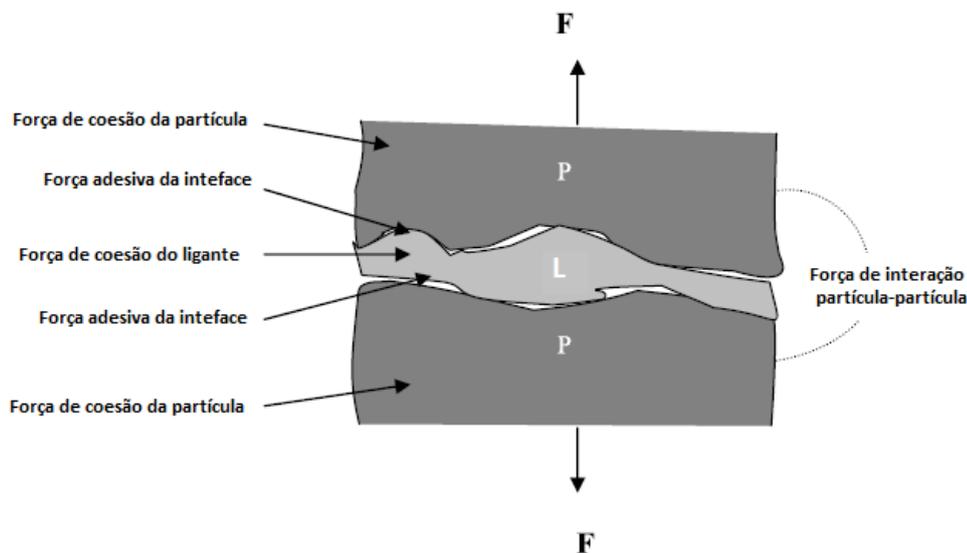


Figura 3. 23 – Tipos de forças atuantes no sistema minério-ligante-minério (adaptada de Qiu et. al., 2003)

Uma boa adesão do ligante à superfície do minério é dependente da existência de grupos funcionais suficientemente polares. No minério de ferro os íons superficiais principais são o Fe^{3+} e o Fe^{2+} . Os grupos polares que irão interagir com estes íons incluem: COO^- , $-\text{OH}$, $-\text{CONH}_2$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NO}_2$, $-\text{PO}_3\text{H}$, etc, sendo o primeiro um excelente candidato a grupo polar do ligante devido a facilidade de reação com os íons de ferro.

O tipo de grupo hidrofílico influencia a capacidade de interação entre o grupo polar e a superfície do minério, além de possibilitar maior interação com a água. É importante que este grupo não seja “captador de elétrons” (alta eletronegatividade), pois isto reduziria a capacidade de interação grupo polar-minério. Grupos doadores de elétrons, por outro lado, favorecem esta interação. Portanto, os grupos $-\text{OH}$ e $-\text{NH}_2$ devem ser preferencialmente escolhidos como grupos hidrofílicos. Além disso, o grau de polimerização influencia no peso molecular, que, por sua vez, controla a absorção de tensões aplicadas no aglomerado. Maior peso molecular é desejado, de forma a aumentar a resistência a tensões externas.

4. METODOLOGIA

Neste trabalho foram realizados ensaios de laboratório para a avaliação da utilização de ligantes orgânicos a fim de aumentar a proporção de ultrafinos (*pellet feed*) na mistura de sinterização. Os efeitos dos agentes aglomerantes sobre o microaglomerado serão avaliados em termos da qualidade física e microestrutural destes produtos.

4.1. MATERIAIS

A avaliação da aglomeração a frio será realizada utilizando as mesmas matérias-primas e proporções utilizadas pela Gerdau usina Ouro Branco. Serão utilizados, também, três diferentes ligantes escolhidos através de intensa pesquisa na literatura: Alcotac CS, Peridur e Carvão mineral da jazida de Candiota + NaOH. A proporção de cada insumo utilizado na Gerdau é mostrada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Proporção de cada matéria-prima utilizada como teste padrão

Matéria-Prima	%
Sínter Feed (Blendado)	61,5
Cal virgem	3,5
Finos de Coque	3,5
Sínter de Ret.	26
Calcário	2,8
Dolomita	2,7

As matérias-primas foram recebidas e amostradas em laboratório de forma a se garantir que as massas menores separadas fossem homogêneas e representativas da amostra original. Como pode ser visto na tabela 4.2, que mostra a massa total recebida de cada material, foi necessário subdividir cada um dos insumos recebidos em partes menores, o que exigiu a correta preservação das amostras, evitando ganho/perda de umidade e possíveis contaminações. O procedimento de amostragem foi realizado de acordo com a norma ISO 10836.

Tabela 4.2 – Massa de material recebida

Matéria-Prima	Massa Recebida (kg)
Sínter Feed	434.00
Pellet Feed	150.00
Sínter de Ret.	100.00
Calcário	60.00
Dolomita	55.00
Finos de Coque	27.00
Antracito	27.00
Cal Virgem	10.00

Como parte do procedimento de amostragem, foram realizados quarteamentos através de divisores rifles de diferentes dimensões.

As amostras foram armazenadas em sacos plásticos vedados, a fim de não haver nenhuma contaminação ou variação de umidade. Este procedimento foi realizado para todas as matérias-primas recebidas.

As análises químicas e granulométricas das matérias-primas recebidas são mostradas nas tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente.

Tabela 4.3 – Granulometria das matérias-primas recebidas

Matérias-Primas	Acumulado (%)			
	>6,35 mm	>1,00 mm	>0,149 e <1,00 mm	<0,149 mm
Sínter Feed	3,64	35,20	13,42	47,74
Pellet Feed	0,00	0,00	8,91	91,09
Sínter de Retorno	1,61	67,78	24,60	7,64
Coque Fino	0,00	20,08	59,85	20,07
Antracito	4,62	40,39	25,34	34,28
Dolomita	0,18	32,29	21,67	46,03
Calcário	1,28	49,94	17,56	32,50
Cal Virgem Calcítica	0,00	2,13	25,54	72,35

Tabela 4.4 – Análise química das matérias-primas recebidas

Matérias-Primas	Análise Química (%)								
	FeT	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnT	P	FeO	Cinzas
Sínter Feed	63,5	-	5,05	1,03	-	1,15	0,0031	-	-
Pellet Feed	64,31	-	5,01	0,75	-	0,74	0,015	-	-
Sínter de Retorno	55,7	10,22	6,17	1,36	1,5	0,64	0,034	6,49	-
Coque fino	-	2,89	51,76	22	1,1	0,16	-	-	13,46
Antracito	-	2,44	50,97	24,48	1,52	0,37	0,23	-	4,35
Dolomita	4,22	25,45	8,77	0,87	15,46	0,79	-	-	-
Calcário	0,21	54,71	1,95	0,39	0,34	0,02	0,036	-	-
Cal Virgem Calcítica	0,23	89,04	1,41	0,13	0,64	0,03	0,086	-	-

4.1.2 Caracterização dos ligantes

As análises químicas fornecidas pelas empresas que produzem os ligantes comerciais (Alcotac CS – BASF e Peridur 330 – AkzoNobel) foram fornecidas de acordo com os intervalos apresentados na tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Composição química aproximada dos ligantes fornecidos

	Faixas de concentração	
	Carbonato de Sódio	Cloreto de Sódio
Alcotac Cs	Entre 50% e 75%	0
Peridur	Entre 30% e 50%	Entre 10% e 20%

A fim de verificar a análise química elementar dos três ligantes e a presença dos componentes inorgânicos nos ligantes comerciais, foram realizadas as seguintes caracterizações:

- Difração de Raios-X (Philips-PANalytical PW 1710): Alcotac CS e Peridur 330.
- Análise Elementar CHN (Series II - CHNS/O Analyzer 2400): para os três ligantes.

4.2 AGLOMERAÇÃO A FRIO

Os testes de aglomeração a frio foram realizados de forma a simular o processo HPS utilizado na usina. Neste trabalho, foram realizados inicialmente testes de capacidade de umidade máxima das misturas a fim de verificar a influência dos ligantes sobre este parâmetro e garantir a utilização da quantidade adequada de água nos testes de aglomeração. Esses testes foram seguidos pelos ensaios de microaglomeração a frio no tambor e em disco. A seguir será feita a descrição dos ensaios.

4.2.1 Teste de umidade máxima da mistura e determinação da umidade ótima

O objetivo deste teste é avaliar a diferença de absorção de água nas diferentes misturas da aglomeração a frio que serão testadas, com variação de quantidade de *pellet feed* e de ligantes. A partir desta informação será decidido se haverá a necessidade de utilizar diferentes percentuais de umidade para as diferentes misturas nos testes de aglomeração a frio.

O teste será realizado da seguinte maneira: 100 gramas da mistura são transferidos para um tubo acrílico de 36 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento. Este tubo é mantido suspenso através de um suporte e com o fundo sutilmente em contato com a água contida em um béquer. O béquer é colocado acima de uma balança digital com água (béquer com elevado diâmetro, de forma que o nível superficial da água não decresça muito rapidamente). A massa de água é anotada. Posiciona-se, então, a superfície inferior do tubo acrílico na superfície da água e espera-se a massa estabilizar. Após estabilização da massa, registra-se a massa restante de água no béquer. Por diferença, sabe-se a massa de água adsorvida. A figura 5 mostra o aparato utilizado para a realização do teste. Com o cálculo abaixo, sabe-se a quantidade de umidade absorvida:

$$U = \frac{(MAI - MAF)}{((MAI - MAF) + MM)} \quad (1)$$

Onde: M AI = Massa de água inicial no béquer MAF = Massa de água final no béquer

MM = Massa da mistura seca

A figura 4.3 mostra o aparato montado para o teste.

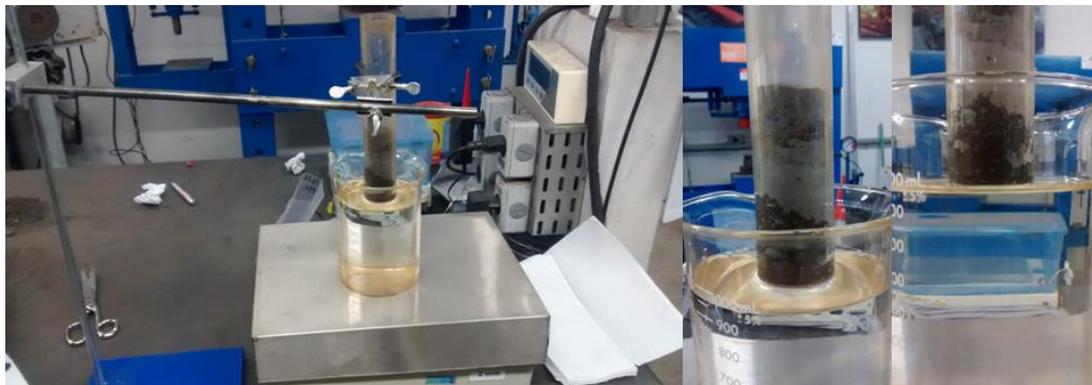


Figura 4.1 – Aparato experimental utilizado para o teste de umidade máxima

Foram realizados quatro testes de umidade máxima, cada um utilizando uma mistura específica, todos em triplicata. A fim de se evitar grandes variações de resultado, optou-se por não utilizar a Cal Virgem nos testes de umidade máxima. A Cal Virgem possui um longo tempo de hidratação o que implicaria em uma interrupção do ensaio antes da completude da reação da Cal, produzindo grande variabilidade nos resultados (de acordo com o grau de hidratação da cal para cada teste, o que depende de distribuição da Cal, granulometria, interação com as outras partículas, etc.). Os ensaios realizados foram:

- Teste Base: mesma proporção de materiais mostrado na tabela 4.1, tido como o padrão utilizado na usina atualmente;
- Teste Base com acréscimo de 6% de Pellet Feed: mesmas proporções de materiais mostrado na tabela 4.1, substituindo 6% de Sínter Feed por 6% de Pellet Feed (acrécimo de ultrafinos);
- Teste Base com acréscimo de 12% de Pellet Feed: mesmas proporções de materiais mostrado na tabela 4.1, substituindo 12% de Sínter Feed por 12% de Pellet Feed (acrécimo de ultrafinos);
- Teste Base com acréscimo de 18% de Pellet Feed: mesmas proporções de materiais mostrado na tabela 4.1, substituindo 18% de Sínter Feed por 18% de Pellet Feed (acrécimo de ultrafinos).

A determinação do valor de umidade a ser utilizada nos ensaios de aglomeração a frio (umidade ótima) foi baseada em resultados encontrados pela literatura e ensaios físicos.

Testes realizados por LV *et. al.* (2010) mostraram que é possível encontrar uma relação entre a umidade máxima da mistura e a umidade ótima a ser utilizada (umidade na qual a aglomeração a frio tem seu melhor resultado, avaliando a permeabilidade do leito de sinterização). Evidentemente, este valor depende de uma série de variáveis, como o tipo de minério utilizado, a granulometria das matérias-primas, a proporção de cada uma das matérias-primas, etc. Portanto, o resultado obtido por estes autores é, de certa forma, limitado às condições experimentais utilizadas.

A mistura para aglomeração a frio utilizada no trabalho destes autores se assemelha bastante à utilizada neste trabalho, o que levou à utilização da correlação encontrada por eles como parâmetro inicial para os testes de verificação. A correlação entre a umidade máxima e a umidade ótima é mostrada abaixo.

$$U_{\text{ótima}} = 6,94 + 0,12U_{\text{máxima}}$$

A fim de verificar a possibilidade de utilização desta relação, foram realizados três testes da mistura base (sem adição de pellet feed) com três diferentes valores de umidade: 90% do valor da umidade máxima encontrada, 75% do valor da umidade máxima e 65% do valor da umidade máxima (este valor é o equivalente à utilização da fórmula empírica mostrada acima). Além destas variáveis, os testes foram feitos de duas formas diferentes: com todas as matérias-primas previamente secas em estufa e, posteriormente, com estes mesmos materiais úmidos (umidade natural).

4.2.2 Teste de micropelotização da mistura

Como etapa inicial, toda a matéria-prima a ser utilizada nos testes foi inicialmente seca em estufa a 105°C por 24 horas, pesada e separada em sacos plásticos selados.

O processo de microaglomeração foi realizado nas seguintes etapas:

A. Inicial homogeneização e adição de água na mistura a sinterizar em um tambor rotativo.

Esta é a primeira etapa do processo de aglomeração a frio. Cada matéria-prima é adicionada dentro do tambor rotativo de 0,45 m de comprimento e 0,45 m de diâmetro. O tambor é colocado para rotacionar com velocidade angular fixa. 50% da água total necessária foi adicionada, com taxa de adição constante. O tempo total desta etapa foi de 4 minutos. Nesta etapa ocorrem a mistura da matéria prima e início do processo de micropelotização.

B. Aglomeração em um disco pelletizador, com correção de umidade final.

O material de saída do tambor rotativo (após o tempo total de processo de mistura) foi alimentado em um disco pelletizador de 0,6 metro de diâmetro. A inclinação foi colocada a 45° e a rotação em 20rpm e, então, foi dada continuação ao processo de micropelotização. Neste processo, o disco rotaciona com velocidade angular constante e o restante da água total necessária é adicionada, também com taxa de adição constante. Nesta etapa final ocorre a maior parte do processo de formação das micropelotas. A figura 4.4 mostra o disco, o tambor e o sistema de controle de rotação e inclinação utilizados.



Figura 4.2 – Tambor, disco e sistema de controle de parâmetros dos equipamentos a serem utilizados na aglomeração a frio

A água foi adicionada através de um bico aspersor conectado a uma mangueira e o fluxo de água é controlado por um controlador de fluxo. Para garantir que o fluxo medido seja o real, antes de cada teste foi realizada a verificação do medidor.

Foi fixada uma massa de 5 kg de mistura a se utilizar para os testes de aglomeração a frio. Os testes foram realizados utilizando as proporções fixas de *Sínter Feed*, Finos de Coque, Antracito, dolomita, calário e sínter de retorno. Os teores de *pellet feed* utilizados serão: 6%, 12% e 18%, que correspondem a uma substituição de 10%, 20% e 30% do *sínter feed*, respectivamente. No total serão realizados 36 testes de aglomeração a frio: 33 testes (duplicata) variando as quantidades e tipos de ligante e *pellet feed* e 3 testes base (triplicata) representando a mistura sem adição de ligante e *pellet feed*. A tabela 4.6 resume os ensaios realizados.

Tabela 4.6: Proporções das matérias-primas utilizadas nos ensaios de aglomeração a frio.

Experimento	S.Feed	P. Feed	Finos Ret.	Coque fino	Antracito	Dolomita	Calcario	Cal	Alcotac CS	Peridur 330	Carv. Min.
n1	61,5	0	26,00	1,75	1,75	2,8	2,7	3,5	0	0	0
n2	55,5	6	26,00	1,75	1,75	2,8	2,7	3,5	0	0	0
n3	49,5	12	26,00	1,75	1,75	2,8	2,7	3,5	0	0	0
n4	43,5	18	26,00	1,75	1,75	2,8	2,7	3,5	0	0	0
n5									0,01 to 0,1*	0	0
n6	55,5	6	26,00	1,75	1,75	2,8	2,7	3,5	0	0,01 to 0,1*	0
n7									0	0	0,4 to 1*
n8									0,01 to 0,1*		0
n9	49,5	12	26,00	1,75	1,75	2,8	2,7	3,5	0	0,01 to 0,1*	0
n10									0	0	0,4 to 1*
n11									0,01 to 0,1*	0	0
n12	43,5	18	26,00	1,75	1,75	2,8	2,7	3,5	0	0,01 to 0,1*	0
n13									0	0	0,4 to 1*

A tabela 4.7 mostra os ligantes utilizados, sua composição básica (responsável pelo poder aglomerante) e os teores a serem utilizados nos testes.

Tabela 4.7: Proporção dos aglomerantes a serem utilizados

Ligante	Composição base	Teores para teste (%)
Alcotac CS	Poliacrilamida	0,01 - 0,05 - 0,1
Peridur	Carboximetil Celulose de Sódio	0,01 - 0,05 - 0,1
Funa	Humato de sódio	0,4 - 0,75 - 1
Cal virgem	CaO	3,5

Os experimentos foram realizados no laboratório de Processos Metalúrgicos, no Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG.

4.2.2.1 Caracterização física das micropelotas produzidas

A análise granulométrica foi realizada pelo método SAFE modificado (Safe Analysis on Frozen Elements) descrito por Fernández-González (2016). Neste teste, as micropelotas amostradas são congeladas em um freezer por 90 minutos e são, então, peneiradas. Com este método é possível verificar a distribuição de tamanho das partículas evitando sua degradação.

Após a etapa de aglomeração a frio foi obtido, para todos os testes, o Índice de Granulação (IG) e o tamanho médio das pelotas para verificar a eficiência desta aglomeração. O Índice de Granulação é obtido a partir da análise granulométrica do material de saída do disco pelletizador. Ele é dado pela seguinte equação:

$$IG = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

Onde: A = % em massa da fração menor do que 0,5 mm antes da aglomeração

B = % em massa da fração menor do que 0,5 mm após a aglomeração

O tamanho médio das pelotas foi calculado de diferentes formas, de modo a comparar os valores obtidos e os métodos utilizados:

- d_{50} pelo método gráfico: determinação do diâmetro no qual 50% das partículas (em massa) se situam acima (ou abaixo) deste valor. A figura 4.5 exemplifica o método de determinação deste valor.

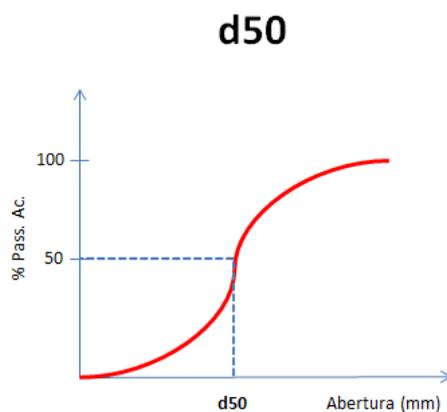


Figura 4.3 - Determinação do d_{50}

- Diâmetro médio de Sauter, descrito por Zhou *et. al.* (2016): método analítico calculado pela equação abaixo:

$$d_p = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_i}}$$

Onde: X_i = Fração mássica retida em cada peneira

D_i = Tamanho médio entre duas peneiras

- Função Cumulativa/Aumentativa de distribuição (FCAD), descrito por Jordan *et. al.* (2016): determinação da interseção das curvas de fração peneirada e fração retida, obtendo, no eixo das abscissas o diâmetro médio. O comportamento do diâmetro médio obtido deve ser semelhante ao do d_{50} , porém com valores absolutos distintos. A figura 4.6 exemplifica a determinação deste parâmetro.

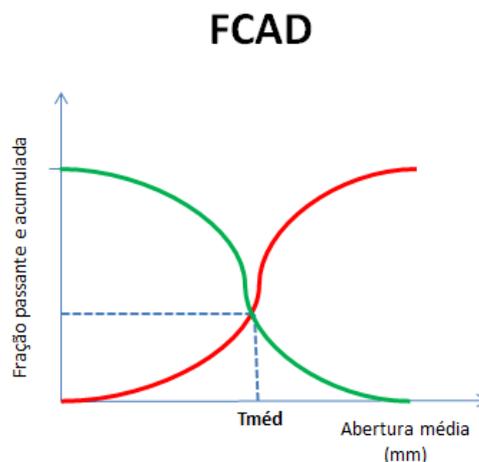


Figura 4. 4 - Determinação do tamanho médio pela FCAD

Para as misturas que obtiveram os melhores resultados de IG e tamanho médio, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise por lupa binocular, de modo a avaliar os diferentes mecanismos de aglomeração predominantes para cada mistura. Para tal, após os testes de aglomeração a frio, foi realizado um processo de amostragem das micropelotas. Nessa amostragem uma massa fixa de material foi representativamente coletada (massa a ser definida) e embutida em resina Poliéster. Este processo garante a integridade física e umidade do material para posterior análise. A figura 4.5 mostra um esquema simplificado das etapas a serem realizadas.



Figura 4. 5 – Esquema simplificado dos testes de aglomeração a frio

4.2.3 Teste de degradação das micropelotas

O ligante que apresentou melhor resultado nos ensaios de aglomeração a frio foi escolhido para realizar novos ensaios de aglomeração, acrescidos de uma etapa de degradação para a verificação da influência do ligante utilizado e do teor de *pellet feed* na resistência mecânica das pelotas cruas. Foram reproduzidos, novamente, os testes bases com e sem adição de ligante e *pellet feed*, além de acrescentar mais dois teores de *pellet feed*. Os ensaios de aglomeração a frio foram realizados utilizando os mesmos parâmetros operacionais descritos no item 4.2.2. Parte das pelotas produzidas foram submetidas à degradação utilizando a seguinte metodologia: aproximadamente 1kg de pelotas cruas foram colocadas sobre uma plataforma de aço a uma altura de 1 metro da superfície (placa de aço). A plataforma é removida, promovendo uma queda de 1 metro das pelotas. Foram realizadas duas quedas para cada amostra de pelotas. Para cada teste, foram utilizadas duas amostras de pelotas. A figura 4.6 mostra um esquema simplificado destes ensaios.

Ao todo foram realizados 9 testes:

- Teste Base: teste padrão, sem adição de *pellet feed* adicional nem ligante (apenas Cal Virgem);
- Teste Base com pellet feed: três ensaios, com adições de 6%, 12% e 18% de pellet feed, porém sem ligante (apenas Cal Virgem);
- Teste com ligante: cinco testes utilizando um teor específico do melhor ligante (a partir dos resultados obtidos pelos testes descritos em 4.2.2), com adições de 6%, 12%, 18%, 24% e 30% de *pellet feed*.

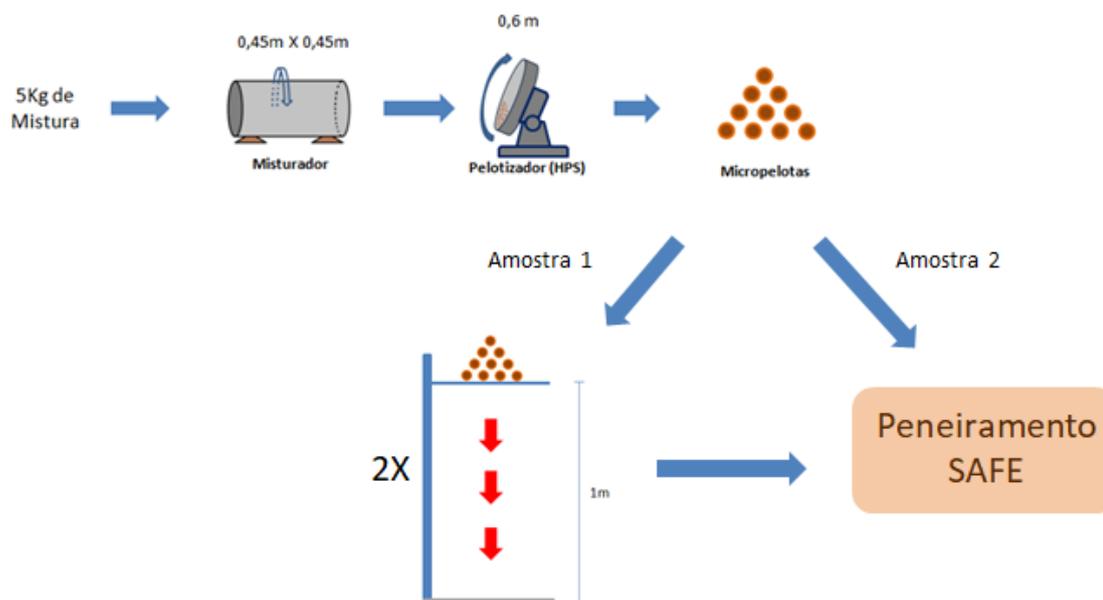


Figura 4.6 – Esquema simplificado dos testes de aglomeração a frio com etapa de degradação

Após cada um destes testes, foram recolhidas amostras para embutimento em resina poliéster isofitálica para análises em Lupa Binocular e MEV.

4.2.3.1 Caracterização física e microestrutural das micropelotas produzidas

As pelotas cruas produzidas, inclusive as que passaram pelo processo de degradação, foram peneiradas pelo método SAFE, a fim de obter informações sobre a variação do tamanho médio (foi utilizado o valor de d_{50}).

Para cada teste realizado, foram amostradas algumas pelotas, divididas por faixas granulométricas, e embutidas em resina poliéster. Após a cura da resina, foi feito o lixamento das pelotas até a exposição de seu centro, podendo identificar o núcleo e a camada aderente.

Foram obtidas imagens de Lupa Binocular (Marca) das pelotas embutidas e, através de um software de imagens (Image J), foi possível analisar a espessura da camada aderente e avaliar como este parâmetro varia de acordo com as variáveis dos testes (teor de pellet feed e ligante).

A espessura média da camada aderente foi calculada da seguinte forma: divide-se cada pelota em quatro quadrantes diferentes (a partir do centro da pelota) e, para cada quadrante, realizam-se duas medições, em partes diferentes, da espessura da camada aderente. Foi calculada a média aritmética destes valores para obter a espessura média. Esta metodologia foi utilizada para mitigar o erro relativo à variação de esfericidade das pelotas. Para cada teste, foram utilizadas quatro pelotas para o cálculo. A figura 4.9 mostra como foi realizado o cálculo do tamanho médio.

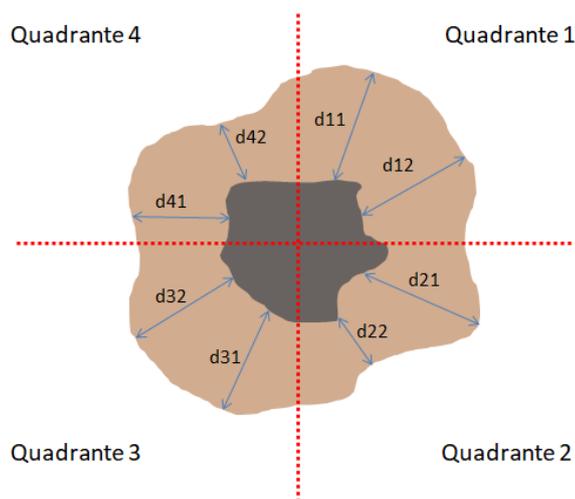


Figura 4. 7 – Metodologia para cálculo da espessura da camada aderente

Foram realizadas, para as mesmas pelotas embutidas e lixadas, análises de MEV-EDS para melhor visualização da interface núcleo-camada aderente. As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica, no Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG (Microscópio Eletrônico de Varredura marca JEOL, modelo 6360LV).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES

O resultado da análise elementar dos três ligantes, realizado em duplicata, é mostrado na tabela 5.1 abaixo:

Tabela 5.1: Resultado da análise elementar média dos três ligantes utilizados (% em massa)

Ligante	Média % C	Média % H	Média % N
Carvão	25,81	2,00	0,62
Peridur 330	21,78	3,38	0,13
Alcotac CS	19,32	2,53	3,12

Esse resultado confirma as características esperadas de cada um dos ligantes utilizados. O Carvão da Mina de Candiota (RS) possui, sabidamente, alto teor de cinzas (e, conseqüentemente baixo teor de carbono fixo), como observado por SOUZA et. al., (2014). O hidrogênio e nitrogênio identificados fazem parte da matéria volátil presente no mineral e estão diretamente ligados aos teores de ácidos húmicos e fúlvicos, principais responsáveis pelo poder aglomerante deste material.

O Peridur 330 é um ligante composto de uma mistura de carboximetilcelulose de sódio e alguns compostos inorgânicos. A estrutura orgânica (baseada na celulose) mostrada na figura 3.20 evidencia a ausência de grupos contendo nitrogênio. Isto também é evidenciado pela análise elementar, que acusou 0,13% de Nitrogênio (em massa), provavelmente proveniente de alguma fonte externa.

O Alcotac CS, por sua vez, é um ligante que possui como estrutura orgânica base, poliacrilamida de sódio (acrescida de outros compostos inorgânicos). O alto teor de nitrogênio obtido pela análise elementar foi de 3,12%, o que é explicado pela presença do grupo amida no polímero orgânico.

Os resultados da Difração de Raios-X (para os ligantes Peridur 330 e Alcotac CS), contendo os difratogramas analisados pelo Software Match!®, são mostrados nas figuras 5.1 e 5.2.

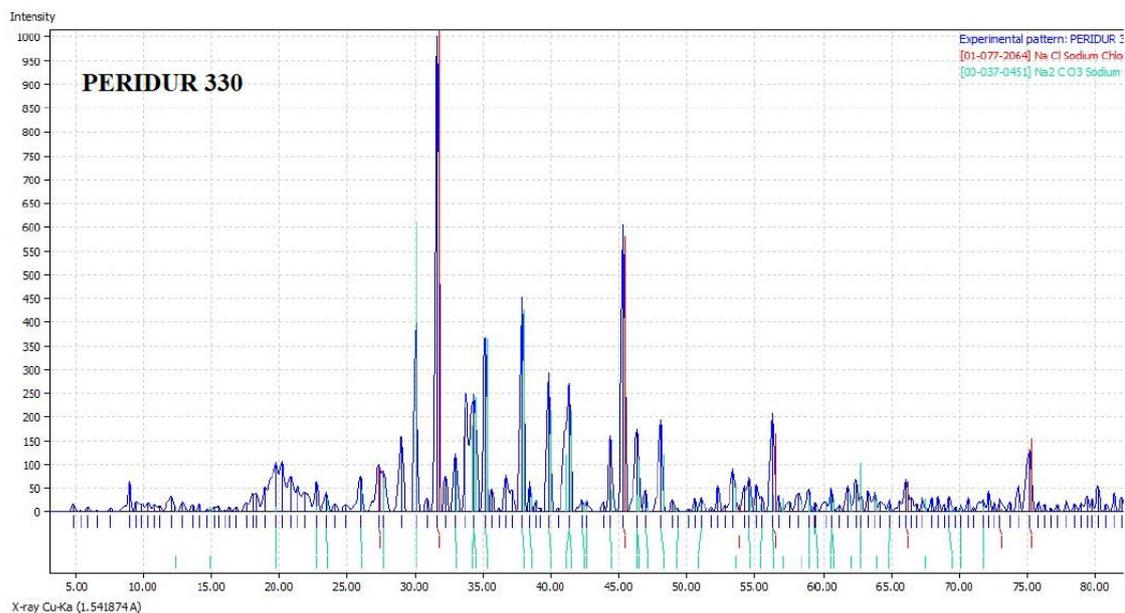


Figura 5.1 - Difratoograma contendo as identificações dos picos para o Peridur 330.

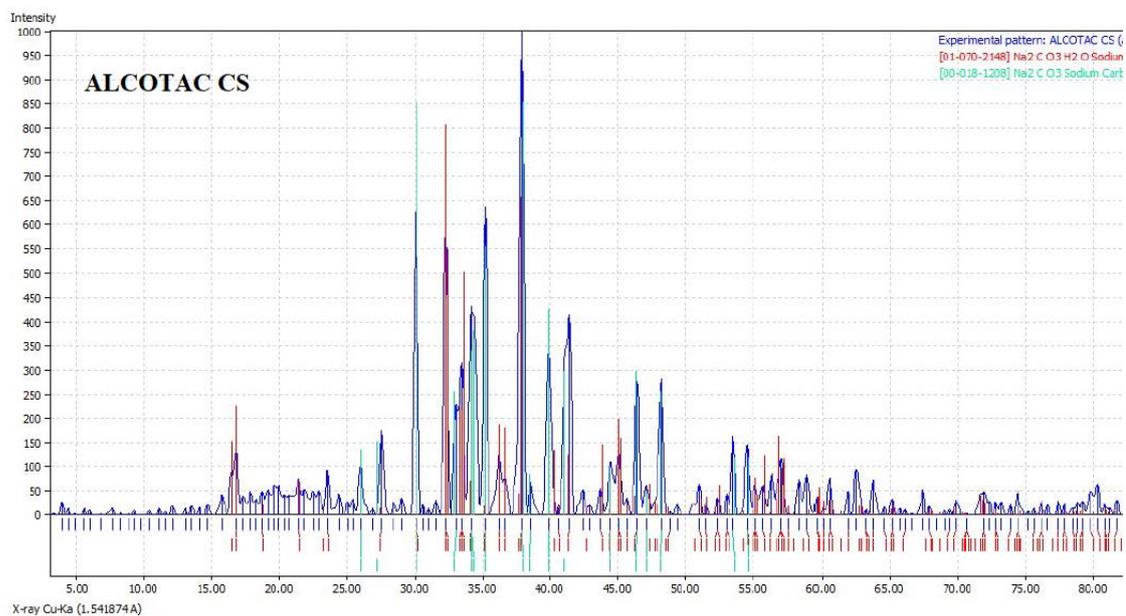


Figura 5.2 - Difratoograma contendo as identificações dos picos para o Alcotac CS.

Assim como a informação dada pelas empresas que forneceram os ligantes, os difratogramas analisados mostraram a presença de compostos inorgânicos nas amostras. O Peridur 330, além de possuir um derivado da celulose, é composto também por NaCl (Cloreto de sódio) e Na_2CO_3 (Carbonato de sódio). A análise da amostra de Alcotac, por sua vez, acusou apenas a presença de Carbonato de sódio. Ambas as análises conferem com os dados fornecidos.

5.2 UMIDADE MÁXIMA DAS MISTURAS E UMIDADE ÓTIMA

Segundo LV et. al. (2013), a capacidade máxima de umidade aumenta com o decréscimo do tamanho médio do particulado que compõe a mistura. Como os testes realizados visam verificar o comportamento da capacidade máxima de umidade com aumento de ultrafinos, esperava-se a necessidade de corrigir (para mais) a quantidade de água adicionada aos testes, já que as misturas que continham *pellet feed* adicional teriam menores tamanhos médios de partícula, como mostrado na figura 5.3.

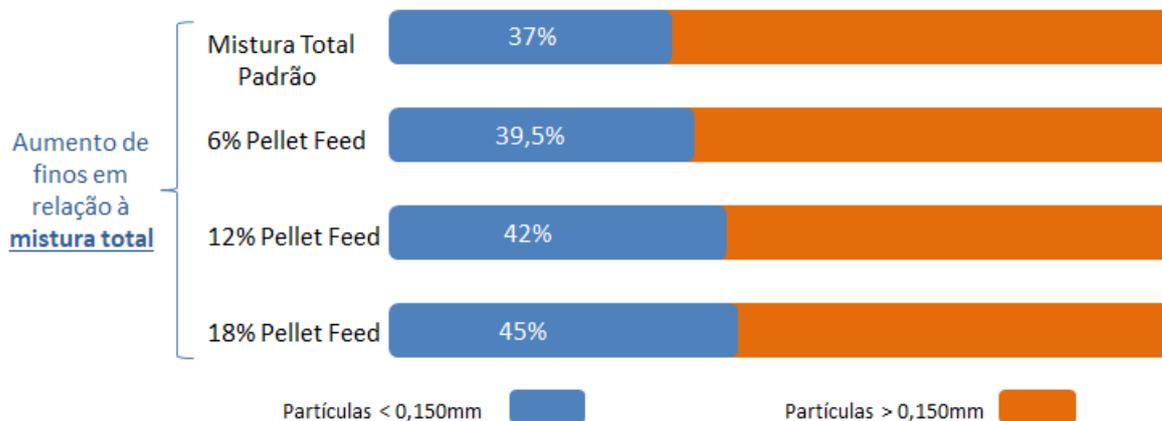


Figura 5. 3 - Proporção de partículas menores do que 0,150mm nos testes de umidade máxima.

O observado, no entanto, foi uma indiferença no valor de umidade máxima quando se variou o teor de *pellet feed* até um valor de 18%. A umidade máxima obtida para a mistura base foi de 12,6%. Acréscimo de 6%, 12% e 18% de *pellet feed* à mistura base resultaram em umidades máximas de, respectivamente, 12,3%, 12% e 12,5%. Considerando os valores de desvio padrão obtidos, conclui-se que não é necessário

utilizar diferentes teores de umidade para diferentes misturas (pelo menos para os valores utilizados neste trabalho). Estes resultados são mostrados na figura 5.4.

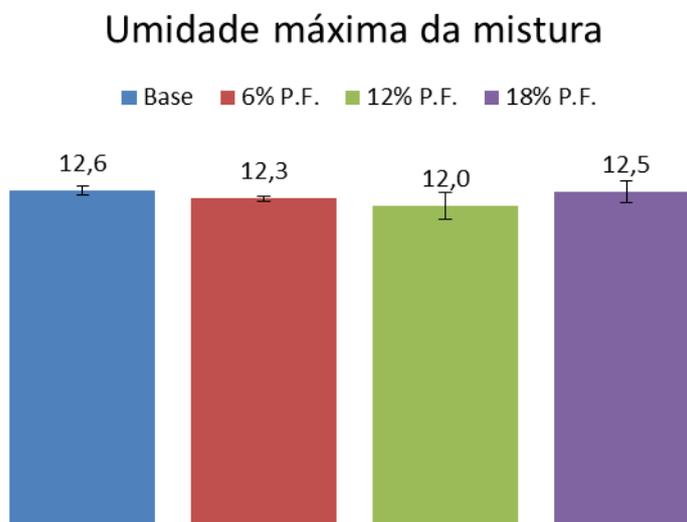


Figura 5. 4 - Resultado do teste de umidade máxima.

Ainda segundo LV *et. al.* (2013), a capacidade máxima de umidade da mistura possui correlação positiva com o teor de alumina. O *pellet feed* adicionado nos testes possui menor teor de alumina do que o *sinter feed* utilizado (diferença aproximada de 25%). Este pode ser um dos fatores que ajudam a explicar o porquê da pequena (praticamente nenhuma) diferença da capacidade máxima de umidade encontrada nos testes. Por um lado tem-se o efeito do aumento da quantidade de umidade necessária relacionado à progressiva redução do tamanho médio das partículas (provocada pelas sucessivas adições de *pellet feed*) e, em contrapartida, o efeito contrário pelo menor teor de Al_2O_3 encontrado nos ultrafinos adicionados.

Os ensaios físicos realizados para determinação do valor de umidade ótima (e conferência com a fórmula empírica encontrada na literatura) mostraram que a utilização de aproximadamente 60% do valor de umidade máxima foi o ideal para a produção de micropelotas adequadas para manuseio e subsequente etapa de peneiramento (método SAFE). Ao utilizar 90% do valor da umidade máxima a mistura torna-se lama, impedindo a produção de pelotas. Com 75% do valor da umidade máxima foi possível produzir micropelotas no disco pelletizador, porém a etapa de

peneiramento ficou prejudicada, já que o excesso de umidade, ao congelar, tornou o processo de classificação mecânica bastante difícil.

Os testes também apontaram melhor desempenho ao utilizar a mistura previamente seca. O tamanho médio final das micropelotas aumentou, além de facilitar o controle de umidade final da mistura. Ficou decidido, então, utilizar o valor de 7,5% (+- 0,3) de umidade no processo de aglomeração a frio e secar previamente em estufa a matéria prima a ser utilizada. A figura 5.5 mostra uma síntese dos resultados obtidos dos ensaios físicos.

% da Umidade Máxima	Material Seco	Material Úmido
90	Formação de lama ao final da pelletização. Umidade excessiva.	
75	Formação de micropelotas e eliminação de grande quantidade de finos. Umidade excessiva , impedindo a análise SAFE.	
65	Boa formação de micropelotas e eliminação da maioria dos finos <0,5mm. Umidade adequada para análise granulométrica.	



Figura 5.5 - Resultados obtidos nos testes de aglomeração a frio com diferentes porcentagens da umidade máxima.

5.3 AGLOMERAÇÃO A FRIO

O primeiro parâmetro calculado, após a realização dos ensaios de aglomeração a frio, foi o IG de cada teste. A figura 5.6 mostra um gráfico com o resumo dos valores de I.G. obtidos. A linha pontilhada azul mostra o valor de “referência”, tida como o valor de I.G. obtido para o teste base, sem nenhuma adição de *pellet feed* nem ligante. Os testes que resultaram em valores de I.G. acima da referência são tidos como adequados, pois produziram uma mistura aglomerada final com menor quantidade de finos o que, conseqüentemente, indica um melhor desempenho da etapa de aglomeração a frio. Os

ensaios que resultaram em valores de I.G. inferiores à referência, por outro lado, indicam desempenho inferior ao mínimo esperado.

A importância de se utilizar um valor de referência neste trabalho se dá pelo fato de ser necessário comparar o desempenho da aglomeração variando-se diferentes parâmetros (quantidade de ultrafinos, tipo e teor de ligantes) e, em última análise, avaliar se a variação destes parâmetros (e, mais especificamente, determinar quais os melhores parâmetros) produz um produto de qualidade física adequada (pelo menos tão adequada quanto o que já é produzido). Deste modo, os resultados do teste base ficaram tidos como a referência e base de comparação.

A figura 5.6 contém todos os resultados de I.G. realizados, para diferentes teores de *pellet feed*, tipos de ligantes e teores de ligantes descritos nas legendas.

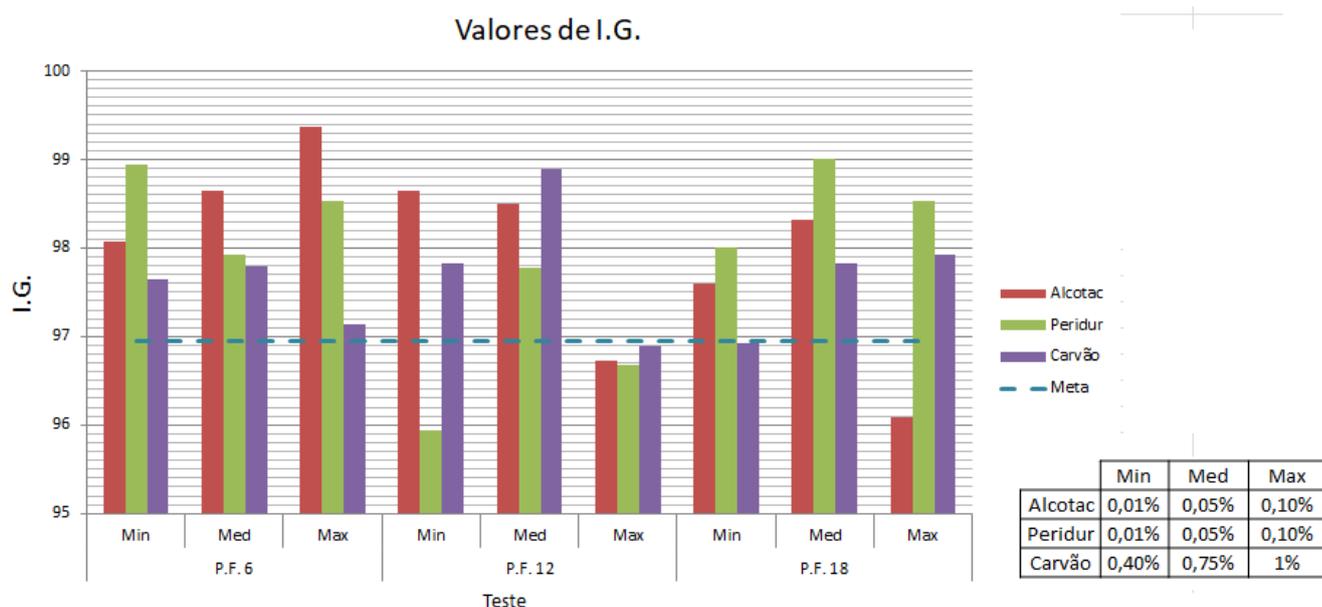


Figura 5. 6 - Valores de I.G. obtidos para todos os testes realizados.

É possível verificar que não existe um padrão ou comportamento específico de algum ligante ou teor de pellet feed relacionado ao valor de I.G. obtido. Isto pode ser explicado, primeiramente, pela própria definição de I.G. utilizada neste trabalho. Este parâmetro avalia a diferença na quantidade de partículas (porcentagem em massa) abaixo de 0,5mm entre o início do processo de aglomeração e o final. Espera-se que,

evidentemente, maiores valores de I.G. sejam obtidos em testes no qual a aglomeração seja mais efetiva. Porém, ao realizar o peneiramento, as frações passantes abaixo de 0,5mm foram muito pequenas. Em valores percentuais, a média desta fração ficou aproximadamente em 1% e o desvio padrão em 0,6. Como a quantidade de partículas abaixo de 0,5mm antes da aglomeração é elevada (média de 48%), pequenas variações (entre cada teste) da porcentagem abaixo de 0,5mm após a aglomeração produzem pequenas variações nos valores de I.G. finais.

Os valores de I.G., para praticamente todos os testes, foram bastante elevados. Isto pode significar duas coisas: a primeira interpretação leva a entender que todos os testes se mostraram adequados no processo de remoção de partículas finas, o que é desejável na aglomeração a frio; a segunda interpretação é que o peneiramento a frio (SAFE) interfere no processo de classificação das partículas abaixo de 0,5mm caso o sistema de peneiramento não esteja isolado ou mantido a temperaturas baixas todo o tempo. Caso haja algum contato com o ar (o que, evidentemente, ocorreu) a água na forma de vapor pode condensar na superfície das micropelotas, provocando um processo de aderência das partículas mais finas (neste caso, abaixo de 0,5mm) às pelotas maiores, mascarando o resultado final. Devido à estes fatores (pequena variação nos valores de I.G. e resultados inconclusivos) foi observado que o I.G. não é um bom parâmetro para avaliar o desempenho da aglomeração a frio para os testes realizados, não mostrando as diferenças de utilização de ligantes diferentes e teores e *pellet feed* diferentes.

Como mostrado na metodologia (item 4.2.2.1), foram calculados, então, diferentes parâmetros relacionados ao tamanho médio do aglomerado produzido para avaliação do desempenho dos testes realizados.

As figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram os resultados do cálculo do d_{50} para, respectivamente, os testes realizados com teores mínimo, médio e máximo de ligantes. É possível perceber que, diferentemente do I.G., existe um padrão a ser verificado, além dos valores absolutos de d_{50} variarem consideravelmente, o que indica que este parâmetro pode ser utilizado para a avaliação do desempenho dos ligantes em cada teste.

Avaliando-se os tipos de ligantes utilizados, o Peridur 330 foi o único capaz de produzir valores de d_{50} , em todos os testes, que atingisse o valor de referência (teste base). Para praticamente todos os testes com Peridur, com exceção de um deles, os valores obtidos foram bem acima da referência, indicando bom desempenho na aglomeração a frio. Tanto para o Alcotac CS quanto para o carvão, apenas três testes apresentaram valores de d_{50} minimamente aceitáveis (em relação a referência) e não foi possível ver um padrão específico para avaliar qual dos dois produziu melhor efeito.

A adição de *pellet feed* até o teor de 18% não mostrou ser um problema no que tange à aglomeração a frio (considerando-se, ainda, o valor de d_{50}) quando se utiliza o Peridur 330 como ligante. Quanto se utiliza os outros ligantes, não é possível verificar uma tendência específica de aumento ou redução no tamanho médio das partículas, ficando claro, no entanto, que eles não foram efetivos na produção de micropelotas com tamanho médio adequado.

No que tange ao teor de ligante a ser utilizado, é possível perceber, para o Peridur 330, que entre os teores médio e máximo não existe diferença significativa, sugerindo que o teor médio (0,05%) seja o melhor a ser utilizado (menor adição de sódio no sistema e menor custo). O Carvão se mostrou minimamente efetivo somente para o teor mínimo e para adições de *pellet feed* de 12% e 18%. Não é possível concluir, com adequado grau de confiança, se o bom resultado do Carvão se dá pela própria adição de carvão ou pelo aumento no teor de *pellet feed*. O Alcotac CS não se mostrou efetivo em nenhum teor utilizado.

É importante frisar aqui uma característica observada nos testes quando se utilizou o Alcotac CS como ligante: após a aglomeração a frio foi possível verificar alguns aglomerados de particulados com uma substância viscosa. Estes aglomerados estavam heterogeneamente distribuídos e não eram constituídos de quase partículas, mas simplesmente de um agregado de partículas unidas por um fluido viscoso. Esta característica sugere que o Alcotac CS não conseguiu se dispersar e dissolver por toda a mistura a aglomerar, agregando-se em regiões específicas, concentrando seu poder aglomerante para apenas uma pequena parcela do material.

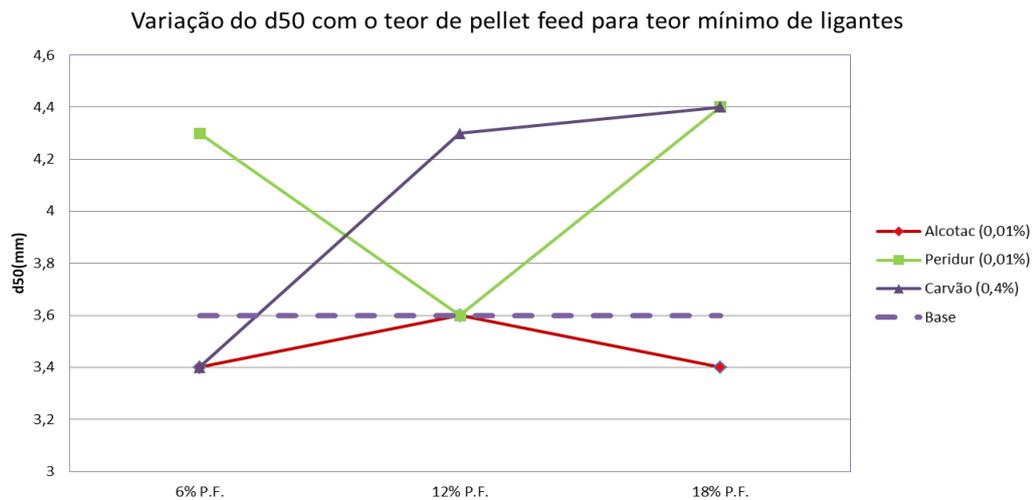


Figura 5. 7 Resultados de d50 para teor mínimo de ligantes.

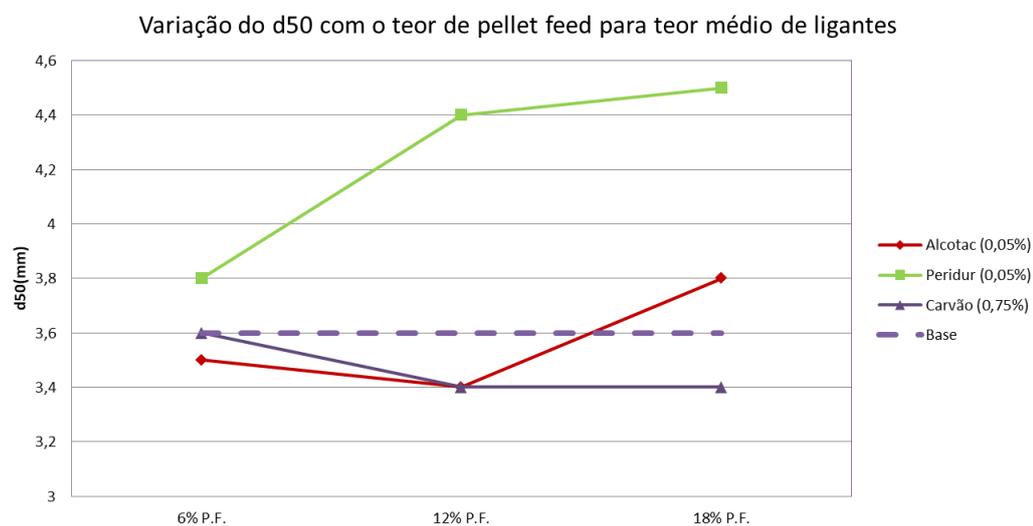


Figura 5. 8 - Resultados de d50 para teor médio de ligantes.

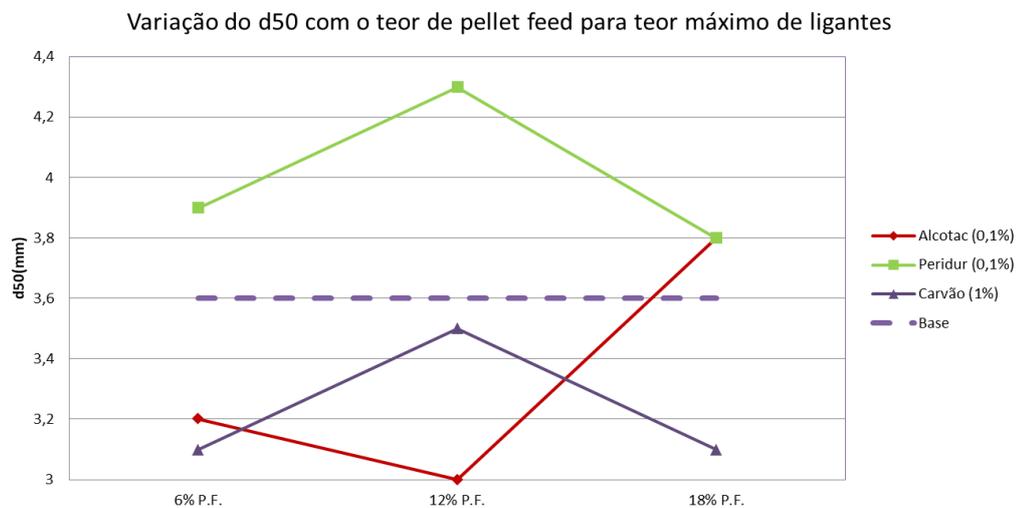


Figura 5. 9 - Resultados de d50 para teor máximo de ligantes.

Os valores de diâmetro médio de Sauter e tamanho médio de partícula a partir das curvas de FCAD também foram calculados e são mostrados nas figuras 5.11 e 5.12, juntamente com um resumo dos resultados obtidos nos testes para o valor de d_{50} (já comentados) mostrado na figura 5.10.

É possível verificar tendências semelhantes nos valores de diâmetro médio de Sauter e tamanho médio obtido pelas FCAD e que vão de encontro com o que já foi observado no comportamento dos ligantes para o valor de d_{50} . Para todos estes parâmetros o Peridur 330 foi o ligante que produziu melhores resultados na aglomeração a frio, quando se avalia a manutenção ou aumento no tamanho médio das partículas. O comportamento dos valores de d_{50} e FCAD é praticamente idêntico (variando-se apenas os valores absolutos), o que já era de se esperar, já que o FCAD utiliza o ponto de interseção entre as curvas de fração passante e fração acumulada, ponto este semelhante ao d_{50} . O valor absoluto é diferente, pois nas curvas FCAD o tamanho médio é calculado como uma média entre as aberturas da peneira, enquanto o d_{50} utiliza o valor absoluto da abertura de uma determinada peneira.

O comportamento geral (assim como os valores absolutos) dos diâmetros médio de Sauter difere um pouco dos outros obtidos, mas levam à mesma conclusão: o Peridur é o ligante mais efetivo para aglomeração a frio, quando se leva em consideração o aumento do tamanho médio das partículas. Para este parâmetro (TM_{Sauter}) apenas um teste não produziu partículas com tamanho médio mínimo aceitável (referência do teste base). O Alcotac CS e o Carvão foram um pouco mais efetivos quanto se avalia o TM_{Sauter} em comparação ao d_{50} e o FCAD porém, ainda assim, os valores absolutos foram, na maioria dos testes, inferiores aos obtidos quando se utiliza o Peridur.

Avaliando os valores de TM_{Sauter} e FCAD para o Peridur, fica claro que o teor médio (0,05%) é suficiente, e até mesmo mais efetivo, para o processo de aglomeração a frio, mesma conclusão chegada ao analisar os valores de d_{50} .

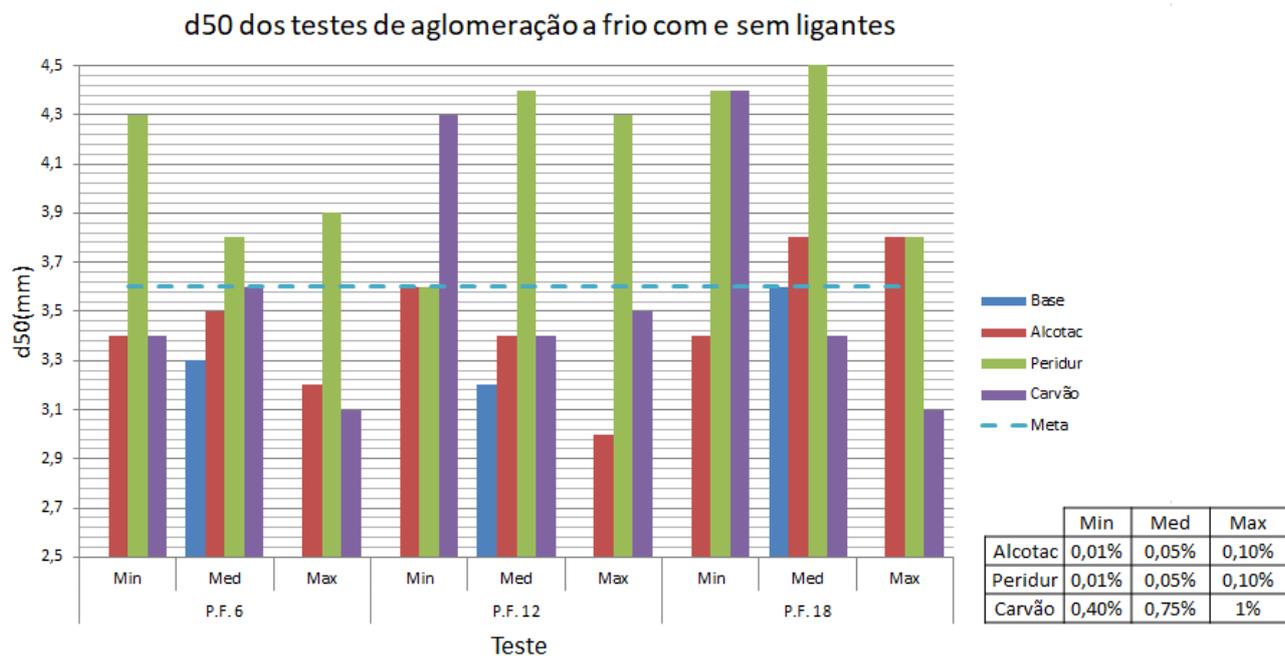


Figura 5. 10 - Resultados de d50 para todos os testes.

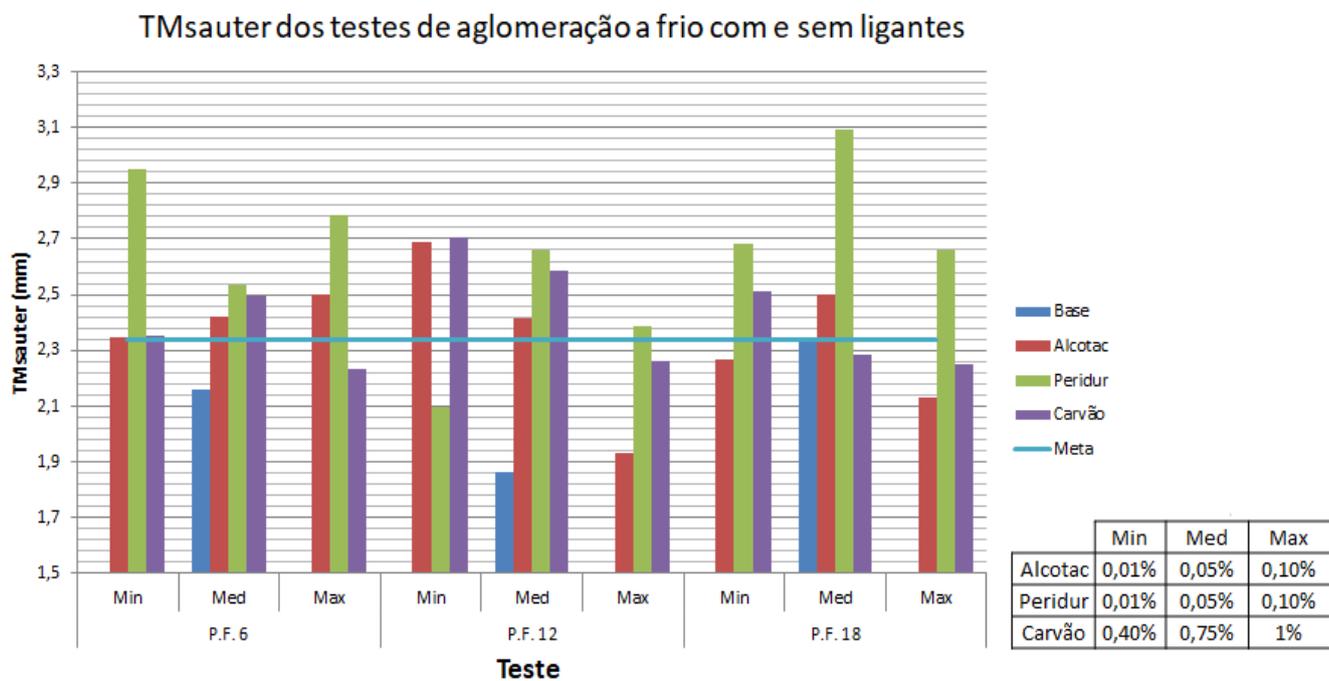


Figura 5. 11 - Resultados de TMsauter para todos os testes.

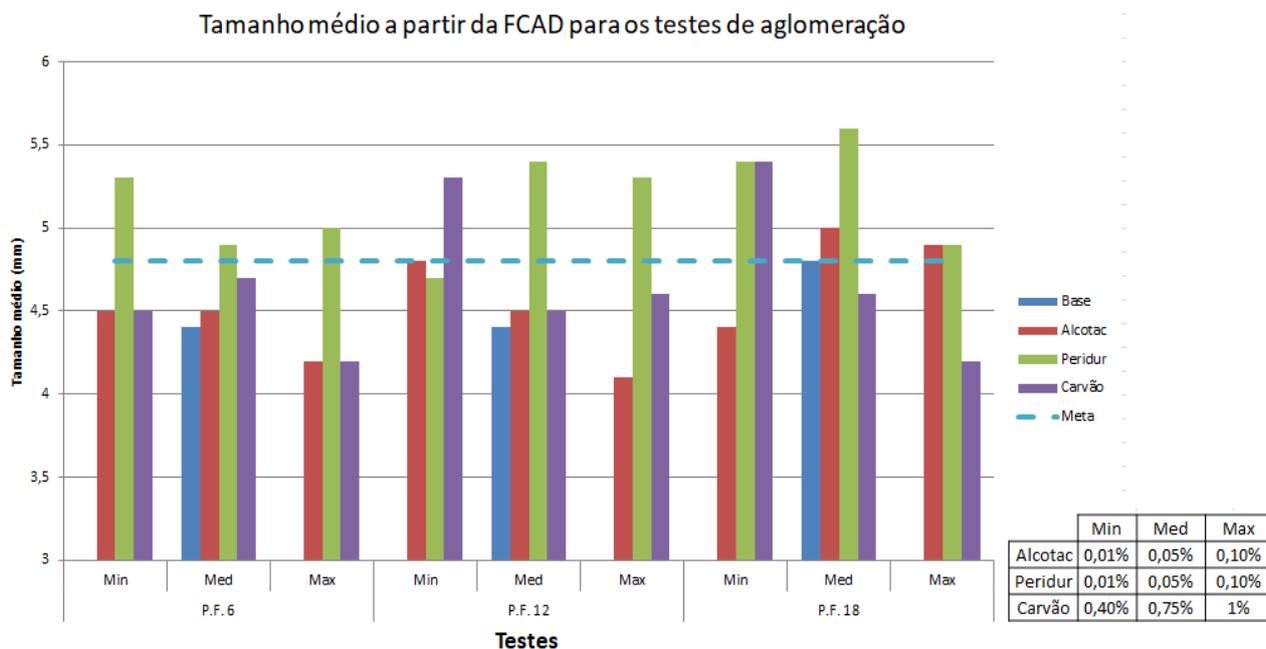


Figura 5. 12 - Resultados de FCAD para todos os testes.

5.4 TESTES DE DEGRADAÇÃO DAS MICROPELOTAS

A partir dos resultados obtidos pelos ensaios de aglomeração a frio, foi possível verificar a eficácia de cada um dos ligantes e determinar qual o melhor teor a ser utilizado. O Peridur 330, no teor de 0,05%, foi o escolhido como mais adequado para o processo (entre todos os testados).

Novos testes de aglomeração a frio foram realizados, utilizando agora apenas o Peridur 0,05%, e as micropelotas produzidas foram caracterizadas fisicamente em termos de tamanho médio (d_{50}) e resistência mecânica (indiretamente avaliada pela variação do d_{50} antes e após o teste de degradação). As figuras 5.13 e 5.14 mostram, respectivamente, os valores de d_{50} obtidos para os novos testes e a variação do d_{50} produzido pelo teste de degradação das micropelotas.

É possível confirmar, pela figura 5.13, que o Peridur 330 é eficaz na aglomeração a frio, produzindo um aglomerado com d_{50} igual ou maior a referência

(com excessão de um teste, mas ainda próximo ao valor de referência). O aumento dos teores de *pellet feed* para 24% e 30% não reduziu a eficácia deste ligante no que tange o aumento do tamanho médio das partículas. Isto significa que, até 30% de utilização de *pellet feed*, é possível produzir uma mistura a sinterizar com característica granulométrica adequada para utilização no leito de sinterização.

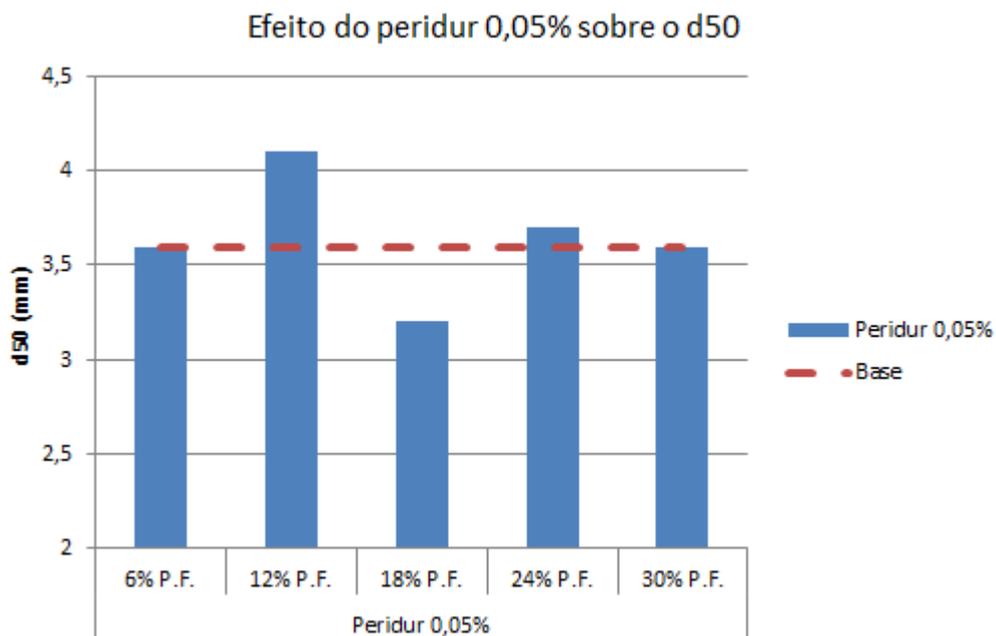


Figura 5. 13 - Efeito do peridur 0,05% sobre o d50.

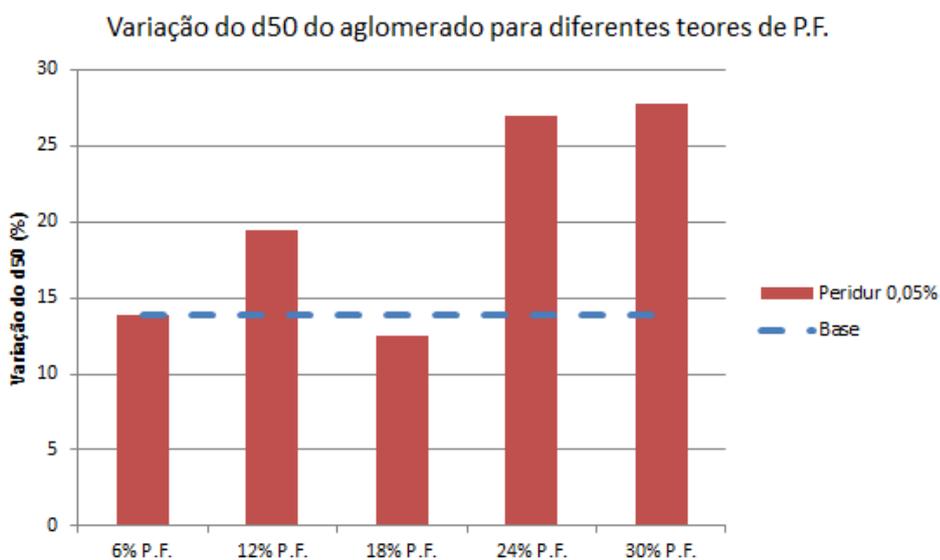


Figura 5. 14 - Efeito do peridur 0,05% sobre o teste de degradação das micropelotas.

A figura 5.14 mostra a variação do d_{50} comparando-se o aglomerado antes e após a degradação. Maiores valores de variação do d_{50} significa uma menor resistência mecânica do aglomerado produzido. É possível perceber que, para teores de *pellet feed* até 18%, essa resistência mecânica das micropelotas é aproximadamente igual às produzidas pelo teste referência (teste base), com exceção de um teste (12% de P.F., o que deve ser interpretado mais como um desvio do teste do que indicativo de produção de pelotas pouco resistentes). A utilização de 24% ou 30% de *pellet feed* se mostrou inadequada, já que a variação do d_{50} foi bastante elevada, chegando a aproximadamente 27%.

5.4.1 Caracterização microestrutural do aglomerado

As pelotas produzidas para os ensaios do item 5.4 (antes da degradação) foram homogeneizadas, e peneiradas em diferentes frações granulométricas. Foram amostradas, aleatoriamente, algumas micropelotas retidas na abertura de 3,36mm e embutidas em resina poliéster isofitálica. Foi feito o lixamento até a exposição de metade das micropelotas.

A figura 5.15 mostra as imagens obtidas por lupa binocular para as micropelotas embutidas e lixadas até a seção transversal. É possível identificar diferentes tipos de partículas nucleantes: *sínter feed*, calcário, dolomita, coque, etc. Isto é explicado pela grande heterogeneidade granulométrica das matérias primas recebidas. Dessa forma, as partículas acima de 1 mm de cada um desses materiais pode funcionar como núcleo para formação de pelotas. É evidente que a eficácia de cada um desses núcleos é influenciada por diferentes características, como rugosidade, área superficial, porosidade, composição química, hidrofobicidade, presença ou ausência de grupos polares, entre outros. Outra característica que pode ser observada é a predominância de núcleos constituídos por o que parece ser *sínter de retorno*. Isto está de acordo com o esperado, já que *sínter de retorno* é a segunda matéria prima com maior participação na mistura total e que possui maior tamanho médio de partículas, contribuindo com maior número de núcleos.

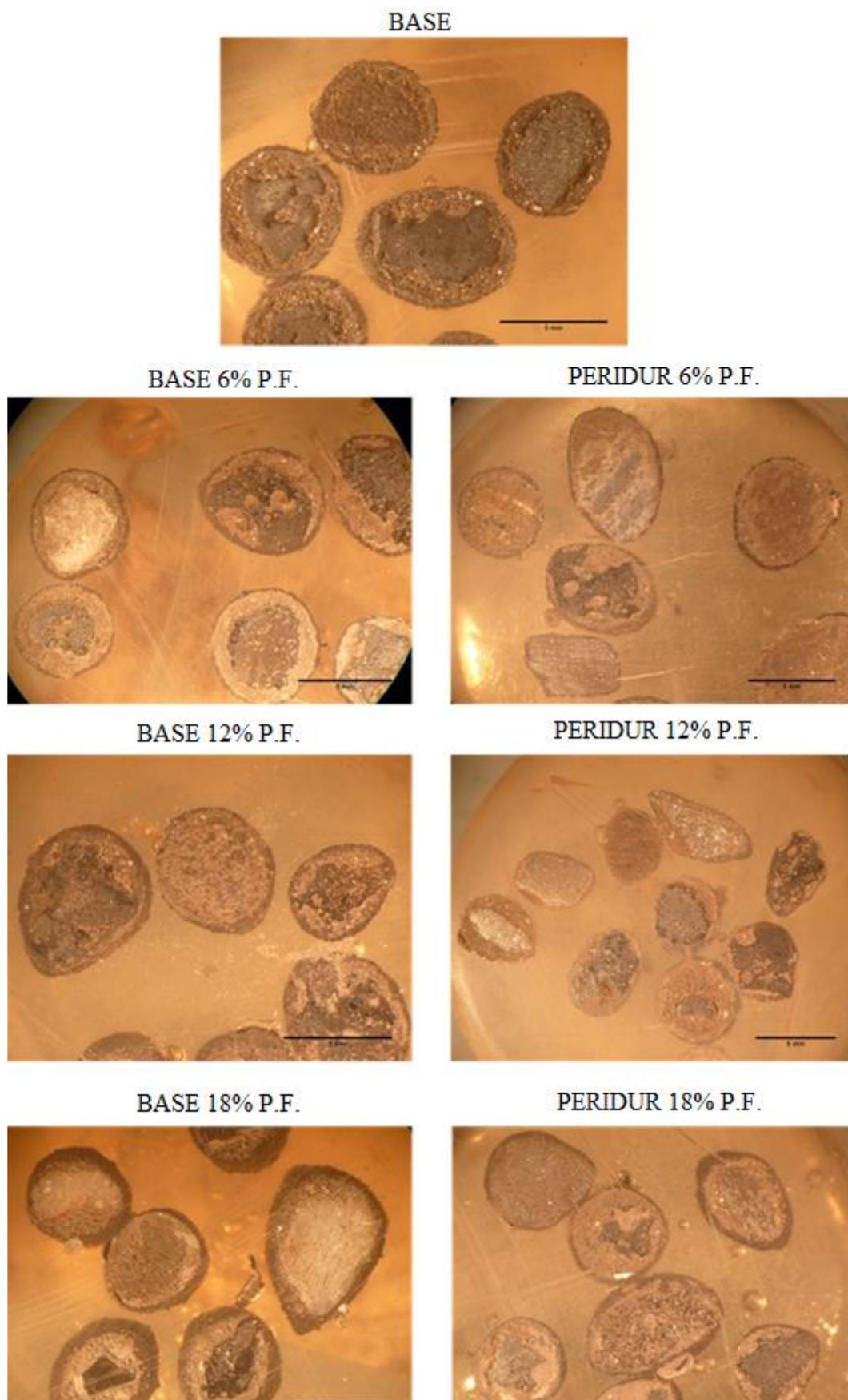


Figura 5. 15 - Imagens da seção lixada obtidas com lupa binocular.

A figura 5.16 mostra os resultados dos cálculos do tamanho médio das camadas aderentes para cada um dos testes realizados. É possível perceber que as micropelotas produzidas utilizando o Peridur possuem camadas aderentes com espessuras maiores do que o teste base de referência (com exceção de um teste, que o valor ficou praticamente igual à referência). Isto evidencia que o peridur é eficaz não somente no aumento do tamanho médio e manutenção da resistência mecânica das partículas, mas também na capacidade de aglomerar os ultrafinos. Maiores espessuras de camada aderente, para uma mesma faixa granulométrica de micropelotas, significa maior quantidade de ultrafinos presentes no aglomerado, indicando maior eficiência de aglomeração. É possível verificar, ainda, que maiores teores de *pellet feed* produzem um aumento na camada aderente, o que também já era de se esperar, pois a disponibilidade de ultrafinos na mistura aumenta. O Peridur se mostrou um ligante capaz de aproveitar todo (ou a maioria) do *pellet feed* disponível, alocando-o na camada aderente.

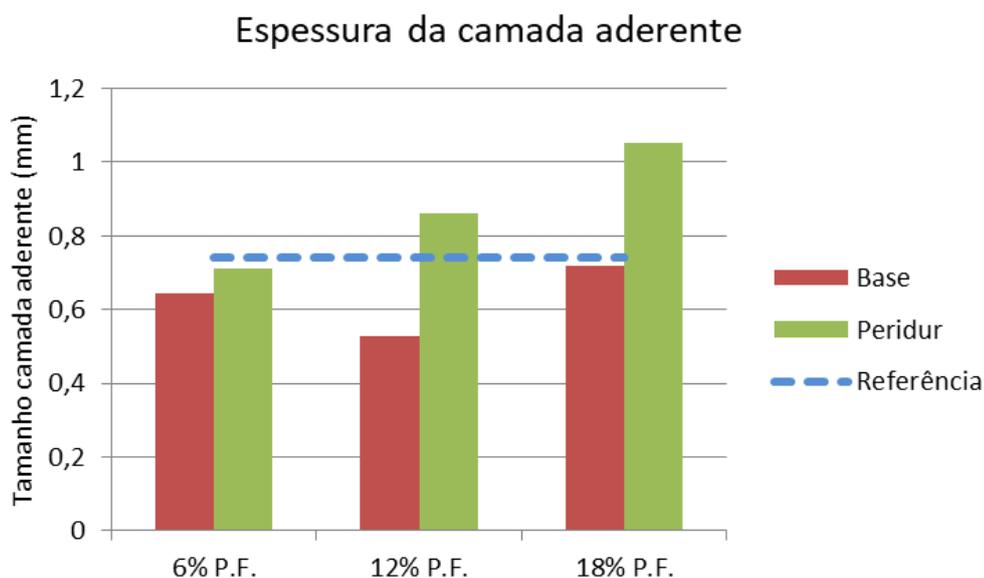


Figura 5. 16 - Valores de espessura de camada aderente para os testes realizados com o Peridur.

A partir das imagens de MEV obtidas, é possível perceber uma característica importante das micropelotas: a região da interface entre o núcleo e a camada aderente é uma região crítica que determina a estabilidade mecânica do microaglomerado produzido.

Isto pode ser observado pela figura 5.17 em todas as imagens de MEV mostradas. Existe, evidentemente, uma descontinuidade na interface e, quanto menor for a força de atração entre a camada e o núcleo, menos resistente a pelota.

O Peridur, por possuir em sua estrutura molecular regiões hidrofílicas e regiões polares (iônica), auxilia no processo de agregação da camada aderente entre as partículas ultrafinas e também na estabilidade da camada aderente com o núcleo. Na figura 5.17 foram comparados os testes Base, Base com 18% de *pellet feed* e Base com 18% de *pellet feed* e Peridur.

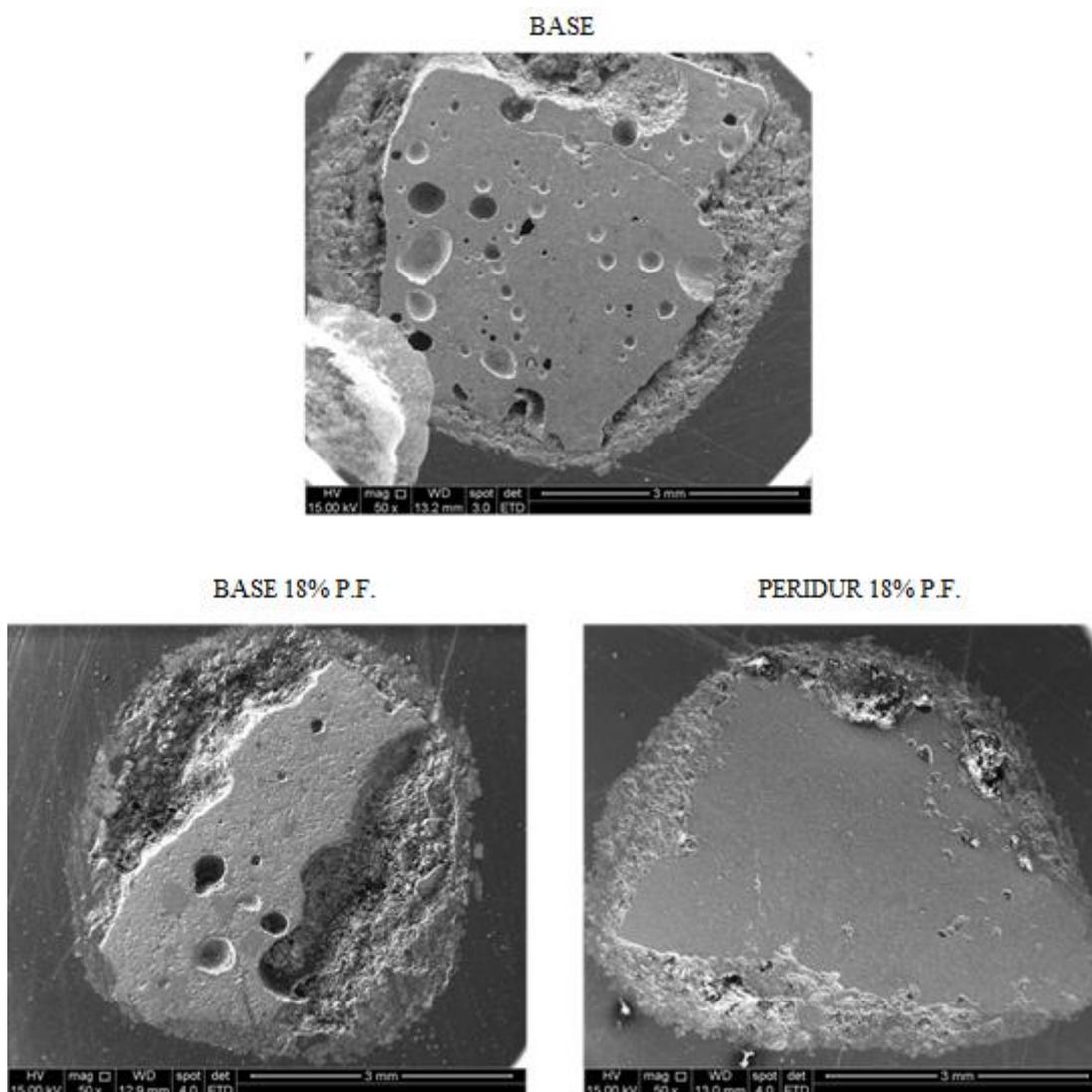


Figura 5. 17 - Imagens de MEV obtidas para três pelotas de testes diferentes. Aumento de 50 vezes.

Foi tomado o cuidado para que a partícula nucleante fosse a mesma para as três pelotas, evitando assim uma variável a mais no sistema (pois variando o tipo de núcleo, varia-se a composição química da interface do núcleo, interferindo nas interações núcleo-aderente), o que dificultaria a análise da estabilidade da interface. No caso da imagem 5.17, o núcleo das micropelotas é constituído de sínter de retorno (o que foi confirmado por análise de EDS em todas as pelotas). A figura 5.18 mostra, em detalhe com maior ampliação, a interface entre o núcleo (de sínter de retorno) e a camada aderente para os três testes. É perceptível uma maior continuidade entre o núcleo e a camada de finos para a pelota produzida com o Peridur.

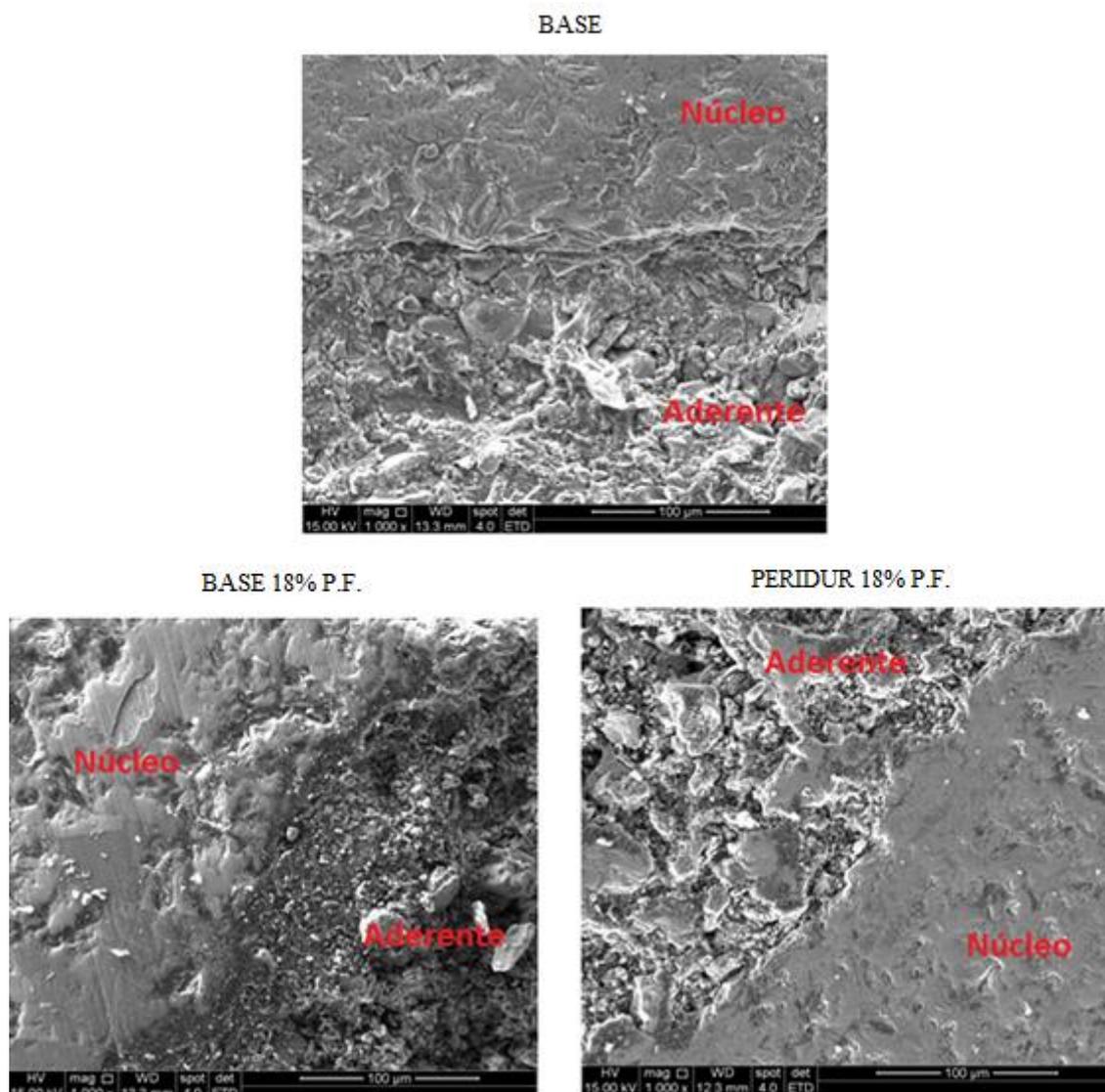


Figura 5. 18 - Imagens de MEV obtidas para três pelotas de testes diferentes. Aumento de 1000 vezes.

6. CONCLUSÕES

Os ensaios de aglomeração a frio mostraram que o aumento da proporção de pellet feed na mistura total, sem a adição de aglomerante, produz um aglomerado com distribuição granulométrica mais fina, indicando uma provável redução na permeabilidade do leito com consequente perda de produtividade.

De todos os três ligantes testados, o Peridur 330 foi o que produziu os melhores resultados, quando se avaliou o tamanho médio de partícula pelo d_{50} e pelo diâmetro médio de Sauter, em comparação ao teste base (sem adição de pellet feed e ligantes). Em praticamente todas as concentrações de Peridur 330 e teores de pellet feed (exceto de um teste) este ligante foi capaz de produzir um aglomerado com tamanho médio de partículas igual ou superior ao teste base.

Tanto o Alcotac CS quanto o Carvão Mineral, na maioria dos experimentos, não foram bem sucedidos na aglomeração a frio. Para ambos, não houve uma tendência clara sobre o efeito da adição e do teor de cada ligante sobre a eficácia de aglomeração dos finos.

Quando se avaliou a resistência mecânica das micro pelotas produzidas com Peridur 330, este provou-se adequado à produção de aglomerado com resistência mecânica igual ou superior ao teste base para teores de pellet feed de até 18%. As micro pelotas produzidas com adição de Peridur 330 e teores de pellet feed de 24% e 30% não atingiram resistência mecânica igual ou superior ao teste base.

A análise microestrutural mostrou que a utilização de Peridur 330 e pellet feed foi responsável pela produção de micro pelotas com camadas aderentes mais espessas, quando comparadas às produzidas apenas com adição de pellet feed, indicativo de maior eficiência de aglomeração dos finos presentes na mistura total quando há presença do ligante.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros serão realizados testes de sinterização em escala piloto para avaliar o efeito da utilização do Peridur 330 com adições de pellet feed sobre a produtividade da sinterização, permeabilidade do leito e propriedades físicas, químicas e metalúrgicas do sínter produzido.

Avaliando-se o potencial de utilização do ligante em escala industrial e a importância da otimização de seu uso para melhor produtividade e menor custo, uma sugestão para trabalho futuro é avaliar qual a melhor forma de adição dos ligantes utilizados: qual melhor etapa de adição (no tambor rotativo ou no disco pelletizador), qual a melhor forma de adição (em pó ou diluído).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A CUNDALL, P; STRACK, O D L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Géotechnique**, Londres, v. 29, n. 1, p.47-65, jun. 1979.

BALL, Derrick Frank. **Agglomeration of iron ores**. Estados Unidos: American Elsevier Pub. Co, 1973

BINELO, Manuel Osório et al. Método dos Elementos Discretos e Desafios de Desempenho Computacional. In: 17ª ESCOLA REGIONAL DE ALTO DESEMPENHO, 17., 2017, Rio Grande do Sul. **Minicurso**. Rio Grande do Sul: Erad, 2017. p. 43 - 62.

BURCHART-KOROL, D.; KOROL, J.; FRANCIK, P.. Application of the new mixing and granulation technology of raw materials for iron ore sintering process. **Metalurgija**, Croacia, v. 51, n. 2, p.187-190, set. 2012.

CLASEN, Henrique A. C. et al. ÁCIDOS HÚMICOS E FÚLVICOS DO CARVÃO DA JAZIDA DE CANDIOTA. **Rev. Bras. de Agrociência**, Pelotas, v. 4, n. 1, p.35-40, jan. 1998.

CORES, Alejandro et al. IRON ORE SINTERING PART 1. THEORY AND PRACTICE OF THE SINTERING PROCESS. **Dyna**, Mendelin, n. 180, p.153-171, ago. 2013.

DAVILA, Lindaura de Souza Cândido . **Influência das Características do Itabirito Concentrado No Desempenho do Processo de Sinterização**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

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.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, D. et al. Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation. **Mineral Processing And Extractive Metallurgy Review**, [s.l.], v. 38, n. 1, p.36-46, 28 out. 2016.

GAN, M. et al. Optimising method for improving granulation effectiveness of iron ore sintering mixture. **Ironmaking & Steelmaking**, [s.l.], v. 42, n. 5, p.351-357, 26 set. 2014.

HAAS, Larry A.; ALDINGER, Jeffrey A.; ZAHL, Robert K.. Effectiveness of Organic Binders for Iron Ore Pelletization. **Bureau Of Mines**. Estados Unidos, p. 1-26. abr. 1989

HARANO, Edson Luiz M.. Brazilian Iron Ores Sintering: Present Status and the Challenges for the Future. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 1., 2013, Belo Horizonte. **Simpósio**. São Paulo: Amb, 2013. p. 1 - 28.

HONORATO, Edilson Pinto. **Adequação Granulométrica das Matérias-Primas e do Sistema de Segregação Contínua (I.S.F), para Melhorias na Produtividade e Qualidade do Sínter para os Altos-Fornos**. 2005. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

ISHIHARA, Shingo et al. DEM Simulation of Collapse Phenomena of Packed Bed of Raw Materials for Iron Ore Sinter during Charging. **Isij International**, [s.l.], v. 53, n. 9, p.1555-1560, 2013. Iron and Steel Institute of Japan.

JANUZZI, Aercio. **Análise da aglomeração a frio no processo HPS (Hybrid Pelletized Sínter) com ênfase nas matérias-primas envolvidas**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LISTER, J D. Scaleup of wet granulation processes: Science not art. **Powder Technology**, Albi, v. 130, n. 3, p.34-40, maio 2003.

LOO, Chin Eng et al. Structural Transformation of Beds during Iron Ore Sintering. **Isij International**, [s.l.], v. 52, n. 12, p.2158-2167, 2012. Iron and Steel Institute of Japan.

LOVEL, Roy R. et al. The Influence of Fuel Reactivity on Iron Ore Sintering. **Isij International**, [s.l.], v. 49, n. 2, p.195-202, 2009. Iron and Steel Institute of Japan

LU, L.; ISHIYAMA, O.. Recent advances in iron ore sintering. **Mineral Processing And Extractive Metallurgy**, [s.l.], v. 125, n. 3, p.132-139, 2 jul. 2016. Informa UK Limited.

LU, Liming. **Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015.

MAEDA, Takayuki et al. Effect of Adding Moisture and Wettability on Granulation of Iron Ore. **Tetsu-to-hagane**, [s.l.], v. 92, n. 12, p.721-727, 2006. Iron and Steel Institute of Japan.

MATSUMURA, Toshihide et al. Effect of Moisture Absorption Behavior on Optimal Granulation Moisture Value of Sinter Raw Material. **Isij International**, [s.l.], v. 49, n. 5, p.618-624, 2009. Iron and Steel Institute of Japan.

MOUSA, Elsayed A.; BABICH, Alexander; SENK, Dieter. A Novel Approach for Utilization of Ultra-Fines Iron Ore in Sintering Process. **Steel Research International**, [s.l.], v. 86, n. 11, p.1350-1360, 30 jan. 2015. Wiley-Blackwell

NAKANO, Masanori et al. DEM Analysis on Size Segregation in Feed Bed of Sintering Machine. **Isij International**, [s.l.], v. 52, n. 9, p.1559-1564, 2012. Iron and Steel Institute of Japan.

NIWA, Yasuo et al. Commercial Production of Iron Ore Agglomerates Using Sinter Feeds Containing a Large Amount of Fine Ores. **Isij International**, [s.l.], v. 33, n. 4, p.454-461, 1993. Iron and Steel Institute of Japan.

OHNO, Ko-ichiro et al. Combustion Rate of Coke in Quasi-particle at Iron Ore Sintering Process. **Isij International**, [s.l.], v. 53, n. 9, p.1588-1593, 2013. Iron and Steel Institute of Japan

PEREIRA, Helio Cardoso et al. THE EFFECT OF HIGH GRADE PELLET FEED ON SINTERING PERFORMANCE. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, [s.l.], v. 13, n. 4, p.340-345, 2016. Editora Cubo Multimidia.

PEREIRA, Helio Cardoso. **Avaliação em escala piloto do comportamento dos produtos pellet feed, pellet screenings e micro pellet em substituição ao sinter feed em uma mistura de sinterização**. 2004. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

PONGHIS, N; A POOS,. INVESTIGATIONS ON THE MECHANISMS GOVERNING IRON ORE SINTERING. **C.R.M.**. Liege, p. 91-105. set. 1977.

QIU, Guanzhou et al. Functions and molecular structure of organic binders for iron ore pelletization. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s.l.], v. 224, n. 1-3, p.11-22, ago. 2003. Elsevier BV

SODA, Rikio et al. Analysis of Granules Behavior in Continuous Drum Mixer by DEM. **Isij International**, [s.l.], v. 49, n. 5, p.645-649, 2009. Iron and Steel Institute of Japan

SOUZA, F. de et al. EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ÁCIDOS HÚMICOS DE TRÊS CARVÕES DO SUL DO BRASIL. **Anais do Xx Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, [s.l.], p.1-8, fev. 2015. Editora Edgard Blücher.

SRIVASTAVA, Urvashi; KAWATRA, S. Komar; EISELE, Timothy C.. Study of Organic and Inorganic Binders on Strength of Iron Oxide Pellets. **Metallurgical And Materials Transactions B**, [s.l.], v. 44, n. 4, p.1000-1009, 11 abr. 2013. Springer Nature

TOBU, Yasuhiro et al. Effect of Granule Structure on the Combustion Behavior of Coke Breeze for Iron Ore Sintering. **Isij International**, [s.l.], v. 53, n. 9, p.1594-1598, 2013. Iron and Steel Institute of Japan

UMADEVI, Tekkalakote et al. Influence of Iron Ore Fines Feed Size on Microstructure, Productivity and Quality of Iron Ore Sinter. **Isij International**, [s.l.], v. 51, n. 6, p.922-929, 2011. Iron and Steel Institute of Japan

WORLDSTEEL ASSOCIATION (Bélgica) (Org.). **Steel Statistical Yearbook**. 2017. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook-.html>>. Acesso em: 10 jan. 2018

ZHANG, Yuan-bo et al. Structure characteristics and adhesive property of humic substances extracted with different methods. **Journal Of Central South University Of Technology**, [s.l.], v. 18, n. 4, p.1041-1046, 10 jul. 2011. Springer Nature

ZHOU, Hao et al. Influence of Binder Dosage on Granule Structure and Packed Bed Properties in Iron Ore Sintering Process. **Isij International**, [s.l.], v. 56, n. 11, p.1920-1928, 2016. Iron and Steel Institute of Japan.

ZHU, H.p. et al. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings. **Chemical Engineering Science**, [s.l.], v. 63, n. 23, p.5728-5770, dez. 2008. Elsevier BV