

ANTONIO FRANCISCO MAYKEL DE SOUSA SAMPAIO

ESTUDO DO ESTADO DA ARTE DA INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE
AGLOMERANTES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AGLOMERADOS
SIDERÚRGICOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Metalúrgica do Departamento de
Engenharia metalúrgica e de Materiais da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientadora: Prof. Dra. Janaina Goncalves
Maria da Silva Machado

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S181e Sampaio, Antonio Francisco Maykel de Sousa.
Estudo do Estado da Arte da Influência dos Tipos de Aglomerantes nas Propriedades Mecânicas de Aglomerados Siderúrgicos / Antonio Francisco Maykel de Sousa Sampaio. – 2021.
48 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Janaina Goncalves Maria da Silva Machado.
1. Aglomerante. 2. Aglomeração. 3. Resistência a compressão. 4. Propriedades mecânicas. I. Título.

CDD 689

ANTONIO FRANCISCO MAYKEL DE SOUSA SAMPAIO

ESTUDO DO ESTADO DA ARTE DA INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE
AGLOMERANTES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AGLOMERADOS
SIDERÚRGICOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Metalúrgica do Departamento de
Engenharia metalúrgica e de Materiais da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientadora: Prof. Dra. Janaina Goncalves
Maria da Silva Machado

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Janaina Goncalves Maria da Silva Machado (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Antonio Mardonio Alves Sampaio e Antonia Germana de Sousa Sampaio, por todo o carinho no qual me foi direcionado, pelo apoio as minhas escolhas as quais que me levaram até onde estou e pela vida que fui capaz de gozar.

A Prof. Dra. Janaina Goncalves Maria da Silva Machado, por toda a orientação.

Ao Secretário do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Antonio Bandeira, por todo o auxílio com dúvidas referentes ao curso em meus anos de graduando.

Ao Centro Acadêmico de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, CA Metal, pela experiência acadêmica que me propiciou.

A Empresa Jr., Metal Soluções Jr., pela experiência profissional que me propiciou e pela visão crítica que obtive.

A meus bons colegas e amigos, em especial, Francisco Marcellus Carmo do Nascimento, Marcos Rinaldo Carvalho Cunha Junior e Italo Maciel Melo, que foram um grande apoio emocional em meio a momentos difíceis de minha graduação além das reflexões, críticas e sugestões recebidas.

RESUMO

Apesar de o ferro ser um dos elementos de maior abundância na crosta terrestre, este se apresenta majoritariamente na forma de óxidos, normalmente encontrado em reservas minerais. Com o tempo, as reservas com maiores teores estão ficando escassas e minérios com maiores graus de impurezas estão sendo explorados. Um maior beneficiamento visando a diminuição das impurezas traz como consequência a geração de minérios mais finos. Com a necessidade de dar a esse minério concentrado finos dimensões adequadas, a utilização dos processos de aglomeração tem se tornado cada vez mais frequente, conforme a demanda mundial por aço tem aumentado. Tendo em vista que esses aglomerados devem possuir resistência mecânica ao manuseio, estocagem e à altas temperaturas, foi estudado no presente trabalho, um dos aspectos mais importantes relativos a esses materiais, que são os aglomerantes. O estudo foi realizado por meio de análises da literatura referentes as propriedades mecânicas de aglomerados que fizeram uso de diferentes aglomerantes. Os dados coletados foram analisados e apresentados neste trabalho em nove capítulos, com três deles sendo destinados para aglomerados de minérios, para aglomerados autorredutores e para aglomerados combustíveis.

Palavras-chave: Aglomerante. Aglomeração. Resistência a compressão. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Although iron is one of the most abundant elements in the earth's crust, it is mostly in the form of oxides, normally found in mineral reserves. Over time, reserves with higher grades are becoming scarce and ores with higher degrees of impurities are being explored. Greater processing aimed at reducing impurities results in the generation of finer ores. With the need to give this fine concentrate ore adequate dimensions, the use of agglomeration processes has become more and more frequent as the world demand for steel has increased. Considering that these agglomerates must have mechanical resistance to handling, storage and high temperatures, one of the most important aspects related to these materials, which are binders, was studied in the present work. The study was carried out through literature analysis regarding the mechanical properties of agglomerates that made use of different binders. The collected data were analyzed and presented in this work in nine chapters, with three of them being destined to ore agglomerates, to self-reducing agglomerates and to combustible agglomerates.

Keywords: Binder. Agglomeration. Compressive strength. Mechanical behavior.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	OBJETIVOS	11
2.1.	Objetivos específicos.....	11
3.	JUSTIFICATIVA	11
4.	METODOLGIA	12
5.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
5.1.	Sinterização	14
5.2.	Pelotização	14
5.3.	Briquetagem	15
5.4.	Propriedades físicas dos aglomerados.....	16
5.5.	Aglomerantes.....	17
5.5.1.	Aglomerantes orgânicos e inorgânicos	22
5.5.2.	Tipos de aglomerantes quanto a seu mecanismo de endurecimento	23
6.	AGLOMERADOS MINERAIS.....	27
6.1.	Resistência a compressão.....	27
6.2.	Resistência ao impacto.....	31
6.3.	Conclusão.....	33
7.	AGLOMERADOS AUTORREDUTORES	35
7.1.	Resistência a compressão.....	35
7.2.	Resistência ao impacto.....	39
7.3.	Conclusão.....	40
8.	AGLOMERADOS COMBUSTÍVEL.....	41
8.1.	Resistência a compressão.....	41
8.2.	Resistência a penetração de água	42

8.3. Densidade	42
8.4. Conclusão.....	45
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

Na siderurgia, a principal matéria prima que utilizada é o minério de ferro, responsável pela alimentação de reatores de redução como o alto-forno e processado nessas instalações, produzindo assim o ferro primário que deve ser tratado nas aciarias para sua conversão em aço. Vale salientar que a sucata de ferro e aço tem sua parcela de participação nesse processo, tendo em vista, principalmente, sua utilização como carga direta dos fornos elétricos a arco. Entretanto, sua atuação responde por um valor entre 25 e 30% do suprimento do processo siderúrgico (MOURÃO, 2017).

Apesar de o ferro ser o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre (FOGAÇA, 2021), este se apresenta majoritariamente na forma de óxidos, normalmente encontrado em reservas minerais. Essas reservas, entretanto, normalmente se apresentam escassos em minério de ferro de alto teor, havendo a necessidade de sujeitá-los a processos de beneficiamento que acabam por produzir minérios sob granulometria inviáveis para seu manuseio direto na siderurgia.

O processo de aglomeração foi desenvolvido para o aproveitamento de materiais cujas pequenas dimensões os tornem impróprios para seu uso direto, tendo ênfase no setor siderúrgico com a produção de ferro primário, seja de redução direta ou indireta.

Inerente à atividade de extração de minério de ferro, ainda, ocorre geração de enorme quantidade de rejeitos, cerca de 65 milhões de toneladas por ano, e deste valor, um percentual de mais de 20% é constituído principalmente por particulados (JONES e BOGER, 2012). Os rejeitos inerentes aos processos de beneficiamento dos minérios não apresentam valor econômico agregado, muito embora, às vezes, apresentem um teor considerável do mineral de interesse (WOLFF, 2009).

De acordo com Junca (et al., 2011), esses aglomerados devem possuir resistência mecânica ao manuseio, estocagem e à utilização em determinados reatores metalúrgicos, tais como: fornos elétricos a arco, convertedores LD e altos-fornos. Flores (et al., 2014) relatam que para o processo de briquetagem os mecanismos de aglomeração, a força de compactação da mistura a ser aglomerada, teor dos ligantes e sua qualidade, temperatura, umidade, tipo de máquina de briquetagem e tempo de

cura são importantes para conceder adequada resistência mecânica aos aglomerados, de acordo com sua finalidade.

Sendo este um processo com impacto direto na linha produtiva é de suma importância o estudo das propriedades físicas de aglomerados a serem utilizados, a fim de identificar o atendimento as propriedades requeridas no processo de produção ao qual fará parte, logo, a escolha do aglomerante a ser utilizado é uma das etapas mais importantes do processo na determinação de um produto final com boas propriedades, visto que, aglomerados que não fazem uso de aglomerantes dificilmente apresentem adequadas propriedades mecânicas para seu manuseio.

2. OBJETIVOS

Estudar, revisar e analisar a literatura em busca de apurar dados relativos às propriedades mecânicas concedidas a aglomerados siderúrgicos, sejam eles os convencionais aglomerados de minérios, aglomerados autorredutores ou aglomerados combustíveis, em função do uso de diferentes tipos de agente aglomerante.

2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar as propriedades influenciadas dos aglomerados em função do uso de determinados aglomerantes;
- Identificar os aglomerantes mais eficientes para a aplicação no processo de aglomeração;
- Apresentar os diversos agentes aglomerantes possíveis para o processo de aglomeração.

3. JUSTIFICATIVA

Com a necessidade de um método de que fossem utilizadas a grande quantidade de minério sob baixa granulometria gerados nos processos de beneficiamento, além da crescente necessidade do aproveitamento de resíduos siderúrgicos e de rejeitos de processos extrativos, devido ao progresso industrial, a utilização de técnicas de aglomeração se tornou uma prática cada vez mais comum na siderurgia, a fim de se reaproveitar resíduos ou subprodutos de seus processos com certos teores de óxidos de ferro. Para o uso destes, há a necessidade de lhe dar dimensões adequadas, assim como propriedades mecânicas adequadas para sua manuseabilidade, sendo o aglomerante usado no processo de aglomeração um dos fatores mais importantes para a concessão destas propriedades.

4. METODOLGIA

Este trabalho tem como base o estudo exploratório da literatura em teses, livros, dissertações, artigos e livros que apresentem conteúdo relevante ao tema de estudo, seguindo ordenadamente os seguintes passos em sua construção: seleção das fontes de dados, coleta de dados e análise, interpretação dos resultados.

O método utilizado para a seleção das fontes seguiu duas das fases de leitura informativa descritas por Marconi e Lakatos (2003), sendo elas:

Leitura de reconhecimento; que consistiu na leitura rápida da literatura, explorando o sumário, verificando os títulos dos capítulos e suas subdivisões,

Leitura exploratória: leitura do material selecionado de forma rápida e objetiva visando verificar a aplicabilidade da obra no presente trabalho

Identificado material com conteúdo potencialmente relevante ao presente estudo por meio da leitura de reconhecimento, este passa a ser explorado por meio de leitura exploratória para melhor triar a informação para a coleta de dados. Os dados coletados foram analisados e discutidos conforme explorados, e após toda a informação ter sido compilada, esta foi comparada e estruturada neste trabalho em nove capítulos, sendo eles: introdução, objetivos, justificativa, metodologia, revisão bibliográfica, aglomerados minerais, aglomerados carbonáceos, aglomerados autorredutores e a conclusão do trabalho.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aglomeração o nome que se dá os processos aplicados a materiais de pequenas dimensões que buscam transformar estes em corpos ou fragmentos coesos, por meio de mecanismos físicos e/ou químicos, conferindo-lhes tamanho e forma adequados ao uso, sendo a briquetagem um dos métodos mais utilizados na indústria mineral. (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018)

Segundo Carvalho, Brinck e Campos (2018), as aplicações mais frequentes dos processos de aglomeração são para o aproveitamento de:

- Minérios ou concentrados de baixa granulometria, permitindo seu uso sem causar prejuízos à permeabilidade da carga e às condições de reação gás-sólido nos fornos metalúrgicos, especialmente nos fornos verticais;
- Resíduos, ou subprodutos que se apresentam em pequenas dimensões de processos metalúrgicos ou de extração mineral, para sua reutilização, ou reciclagem de forma adequada;
- Resíduos metálicos e outros materiais para transporte e/ou reciclagem.

Partindo desse princípio, o presente estudo classificou os aglomerados em três tipos:

- Aglomerados minerais: aglomerados que fazem uso de apenas minérios e aglomerante em sua composição;
- Aglomerados autorredutores: aglomerados que fazem uso de agente oxidante, sendo ele minérios e resíduos ou subprodutos metálicos, juntamente com um agente redutor e aglomerante em sua composição;
- Aglomerados combustíveis: aglomerados que fazem uso de apenas material carbonáceo para fins de produção de energia ou fonte de gás redutor por meio de sua combustão.

5.1. Sinterização

Segundo Mourão et al. (2007), o processo de sinterização na siderurgia pode ser definido pela aglomeração, por fusão incipiente, de uma mistura de minérios, com granulometria entre 0,1 e 9,5mm, de finos de coque ou carvão vegetal, de fundentes, sínter de retorno e água. Podem ainda os resíduos contendo ferro, carbono ou cal participar da mistura, sendo estes materiais então misturados por meio de misturadores intensivos ou cilíndricos horizontais e a mistura resultante é carregada na esteira ou pote de sinterização.

O calor necessário é fornecido pela combustão de coque ou de carvão vegetal contido na carga com o oxigênio do ar, sendo este ar sugado pela parte de baixo da carga e, uma vez iniciada a ignição, dada pelo forno de ignição no início do leito de sinterização, a combustão prossegue à medida que o ar entra em contato com as partículas de coque ou carvão vegetal formando uma "frente de combustão", assim, o ar frio que é sugado resfria o sínter já produzido e se pré-aquece antes da queima dos combustíveis. A combustão localizada provoca uma fusão parcial da carga na região mais quente e o gás quente de combustão constituído principalmente de CO₂, N₂ e O₂ vai pré-aquecendo a carga logo abaixo (MOURÃO et al.,2007).

5.2. Pelotização

Segundo Fonseca e Campos (2018), o processo de pelotização corresponde na aglomeração de uma mistura de minério, sob uma baixa granulometria, com uma certa quantidade de aglomerante, óxidos básicos, e energéticos, por meio do rolamento desta em disco ou tambor, que pela ação da tensão superficial de capilaridade, promove a formação de um aglomerado esférico com dimensões entre 8 e 18 mm, posteriormente passando por um tratamento térmico para a concessão de elevada resistência mecânica. De uma maneira geral, são três as principais etapas do processo de pelotização, nesta sequência:

- Preparação da matéria prima: o pellet feed, matéria prima principal para este processo, constituído de minério de ferro com certo teor de umidade, é previamente moído até adquirir as características requeridas de granulometria e superfície específica, que deve receber a adição de insumos essenciais, para garantir a qualidade das pelotas produzidas, em termos das suas características físicas, químicas e metalúrgicas, necessárias à sua utilização nos processos subsequentes
- Formação das pelotas cruas ou pelotamento: pellet feed é alimentado em discos de pelotamento, onde se inicia a formação das pelotas cruas
- Processamento térmico ou queima: as pelotas cruas passam por seis etapas sendo elas a de alimentação da grelha, secagem, pré-queima, queima, resfriamento e descarga

Os efeitos de capilaridade têm grande importância no mecanismo de formação das pelotas cruas, com a água preenchendo os vazios intersticiais entre as partículas sólidas, formando um sistema capilar com múltiplas ramificações (FONSECA, 2003 apud FONSECA e CAMPOS 2018).

Dentre as propriedades das pelotas de minério de ferro, a resistência mecânica é uma das mais importantes para que estas resistam mais às solicitações de natureza física relacionadas às etapas de manuseio e transporte, além de serem menos susceptíveis aos efeitos de degradação a baixas temperaturas de redução, decorrente do inchamento das pelotas devido a transformação da hematita em magnetita, durante a redução das pelotas nos altos-fornos e reatores de redução direta (FONSECA, 2003 apud FONSECA e CAMPOS 2018).

5.3. Briquetagem

Segundo Carvalho, Brinck e Campos (2018), o processo de briquetagem corresponde a aglomeração pelo uso de pressão, adjunto ou não do uso de aglomerantes, tendo como produto um corpo compactado com forma, tamanho e parâmetros mecânicos bem definidos, o que torna este um processo tão benquisto na indústria.

De forma mais detalhada, o material a ser briquetado é misturado com um aglomerante e água, em seguida é prensada em temperatura ambiente ou em temperaturas superiores, dependendo da resistência que o material apresenta durante a prensagem, pois se a mistura apresentar composição muito rígida, faz-se necessário colocar o material em regime plástico submetendo a maiores temperaturas. Caso os briquetes resultantes ainda não apresentem resistência adequada, um procedimento posterior deve ser utilizado, sendo ele o tratamento de endurecimento (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018).

As forças moleculares de Wan der Waals tem grande importância no processo de aglomeração de finos devido a influência na união de partículas, mas somente se mostrará relevante quando a distância do particulado for bem pequena, havendo necessidade da aplicação de elevadas forças (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018).

Um dos benefícios atrelados ao processo de briquetagem é a redução do volume do material, o que acarreta num uso menor de espaço para a estocagem do material, além de atribuir ao material alto poder calorífico, maior temperatura de chama, facilidade de manuseio, menor índice de poluição e é ecologicamente correto (FLORES et al., 2009).

Quando o briquete resultante da compactação não demonstra resistência a compressão e ao impacto, é comum fazer uso de aglomerantes para sanar esta limitação, sendo os mais usados com resíduos siderúrgicos aglomerantes compostos de cal e melado de cana. A produção desses briquetes juntamente a aglomerantes, a fim de evitar que ocorra o despedaçamento dos materiais da mistura, é comumente realizado sob baixas pressões (BUZIN, 2009).

5.4. Propriedades físicas dos aglomerados

Para que possa ser determinada a qualidade dos aglomerados quanto a suas propriedades físicas, existem padronizados, sendo os mais utilizados, segundo Carvalho, Brinck e Campos (2018):

- Resistência a compressão: determina a resistência a compressão normalmente atrelada a estocagem do aglomerado e o ensaio ocorre submetendo este a pressão

contínua e progressiva até que o corpo fracture. Um briquete que apresente resistência de 3,57 kg/cm², por exemplo, é considerada como de ótima qualidade (THOMS et al., 2009).

- Resistência ao impacto: determina a resistência apresentado por um briquete a ser submetido a repetidas quedas sem se fragmentar. A resistência é determinada pelo número de quedas que este suporta.
- Resistência a abrasão: determina o grau de resistência a degradação decorrente do transporte de um aglomerado e seu ensaio consiste na quantificação da massa perdida de particulados inferiores a 3,3 mm ao peneirar o aglomerado em um peneirador vibratório por 15 minutos, sendo considerados de ótima qualidade aqueles que apresentam uma perda inferior a 5% de massa com a passagem dos finos pela malha do peneirador.
- Resistência a penetração de água: determina a resistência de absorção de água do aglomerado, que ocorre ao expor este a um ambiente externo. Seu ensaio consiste na imersão do aglomerado em um recipiente com água, sendo avaliada a variação do peso ao longo do tempo.
- Densidade: é a razão entre o peso e o volume, volume este determinado a partir de suas dimensões ou a partir do deslocamento de um líquido, ao submergir o aglomerado nesse.

5.5. Aglomerantes

Habitualmente, a aglomeração a frio é realizada com a incorporação das partículas com determinada quantidade de água que gera uma tensão que mantém os grãos minerais coesos, permitindo assim, seu manuseio, porém, quando se trabalha com algo tão denso quanto o minério de ferro essa tensão somente não seria suficiente, ademais, com o aquecimento do corpo aglomerado ocorrerá a liberação do vapor de água, que resultará na sua possível fratura. Tal implicação pode ser evitada com o uso de reagentes visando a concessão: de um aumento da resistência a verde, que é a resistência anterior ao tratamento térmico do briquete; manuseabilidade para o

transporte e estocagem; capacidade de evitar o colapso dos aglomerados nas etapas iniciais do aquecimento, quando o grande volume de gases gerado pela vaporização da água, tende a destruir o mesmo (LIMA, 1994).

Tendo em vista que algumas partículas sólidas, principalmente aquelas que são de granulometria grosseiras, não exibem tendências aglomerantes inerentes, um aglomerante deve ser incorporado para garantir a adesão destas partículas. Os métodos de ligação para tais casos são: pontes de ligação de meios altamente viscosos e a pressão capilar negativa em pontes líquidas formadas pela tensão superficial de líquidos que molham os sólidos. Os processos que utilizam aglomerantes viscosos e líquidos empregam para a aglomeração baixa a médias pressões (PIETSCH, 2008). A tabela 1 apresenta alguns aglomerantes utilizados na briquetagem de partículas finas.

Tabela 1: Exemplos de aglomerantes utilizados na briquetagem de partículas finas.

Material	Aglomerante
Minério de Ferro	Cal e melação
Cromita	Cal e melação
Fluorita	Cal, melação ou silicato de sódio
Bauxita	Cimento Portland
Carvão	Melação
Cobre	Lignosulfonatos
Magnesita	Lignosulfonatos
Areia de Quartzo	Água e NaOH
Barita	Melação e black-ash

Fonte: Adaptado de Carvalho (2004).

Os aglomerantes têm a função de auxiliar na adesão dos materiais, concedendo ao produto final propriedades mecânicas mais adequadas ao processo, de modo que não seriam obtidas sem o uso ou que se faria necessário um esforço maior, o que pode não ser economicamente viável, um importante ponto a ser avaliado devido aos grandes volumes a que se referem o uso industrial. Não são apenas os aspectos econômicos a serem considerados na escolha de um aglomerante, de grau semelhante se deve avaliar os impactos ambientais que o uso deste irá acarretar, assim como também deve se observar o quão abundante pode ser obtido da natureza.

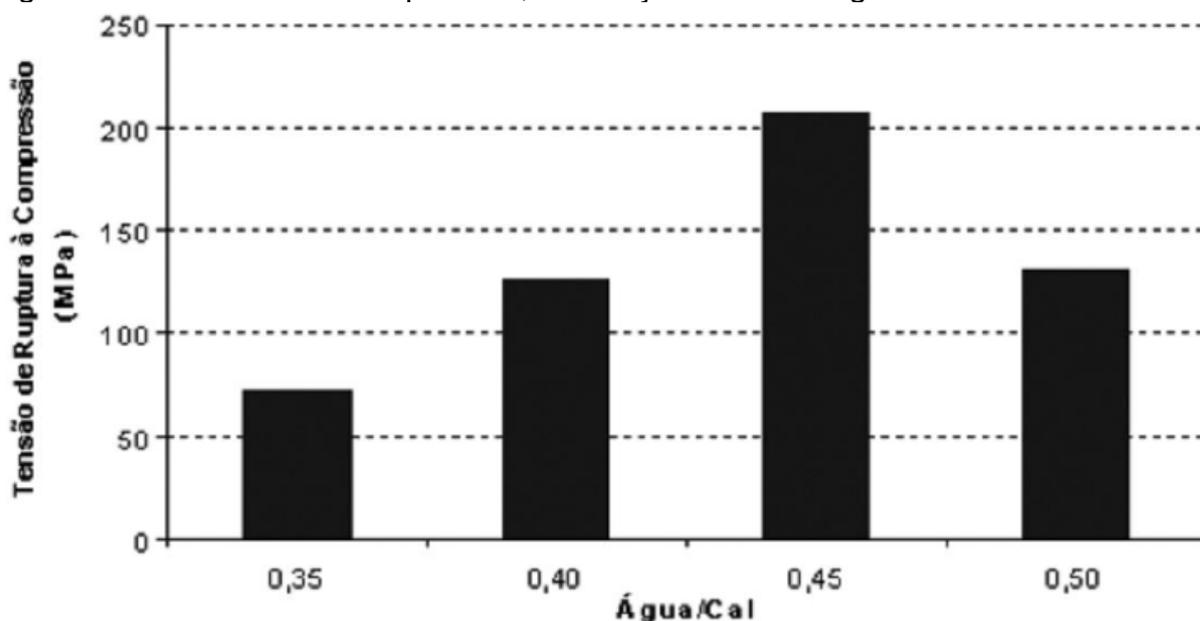
Ainda voltado para a questão de seu impacto ambiental, é importante que seja considerado na escolha de um aglomerante a sua emissão de fumaça e o desprendimento de gases poluentes durante sua queima, deste modo, é fundamental a análise detalhada do aglomerante para sua consequente utilização no processo de briquetagem. Outro dos pontos a ser avaliado em sua seleção é que este não deve ser maléfico para as características energéticas do carvão, diminuindo o rendimento calorífico, nem aumentando o teor de voláteis e cinzas, o que teriam um impacto não apenas do ponto de vista ambiental como econômico (FONTES et al. 1989).

Um aglomerante normalmente utilizado é a bentonita, uma argila de baixo custo, capaz de conferir uma boa moldabilidade, além de uma boa resistência a verde, resistência que se mantém certa estabilidade mesmo sob elevada temperatura, em contrapartida, é um aglomerante com um impacto significativo no valor atrelado a produção do aço, devido ao resíduo característico de argilas: sílica e alumínio; havendo necessidade de serem escorificados, consequentemente diminuindo o volume útil do forno e diminuindo sua produtividade. Sua extração é nociva ao meio ambiente e quando necessário beneficiamento ou exportação seu custo pode se tornar bem elevado (MOURÃO, 2017).

Também é habitualmente é usado como aglomerante a cal, em até 2,5% em massa na mistura, dolomita e/ou calcário, em quantidades de 1,5 a 1,7% em massa na mistura (NONATO, 2007, apud BAPTÍSTA, 2016).

Com relação ao uso de cal como aglomerante, D'Abreu (et al., 2004) mostra que existe um valor ótimo para a quantidade de cal e água utilizados na fabricação de um briquete, para sua resistência a frio, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Resistência a compressão para briquetes com cal hidratada como aglomerante moldados sem pressão, em função da razão água/cal.



Fonte: D'Abreu et al., 2004

Líquido em temperatura ambiente, higroscópico, com viscosidade moderada e um composto orgânico do grupo dos álcoois, a glicerina pode, em conjunto do amido de milho ser usado como um aglomerante para briquetes de finos de carvão vegetal, sendo o próprio de uma fonte renovável, o seu baixo custo e propriedades físico-químicas propícias tornam este uma alternativa viável na escolha de um aglomerante para o processo de briquetagem em uma escala industrial (HENARD, 2007, apud BRUGNERA, 2016).

As propriedades de maior destaque ao se estudar um aglomerante é, de acordo com Silva (2013), é sua adesividade, assim como a viscosidade, devido a esta propriedade determinar o quão bem distribuído o aglomerante será entre as partículas, e sua capacidade de proporcionar aos briquetes boas características de resistência. Os aglomerantes podem ser separados de acordo com sua função na mistura, sendo ele de três tipos:

- Matriz: geram uma fase contínua na qual as partículas são embutidas e que é responsável pela resistência, motivo ao qual o produto final não apresenta um alto grau de resistência mecânica;

- Filme: utilizado na forma de solução na mistura, havendo a necessidade de passar por um processo de secagem na qual a resistência mecânica do briquete apresenta um considerável aumento;
- Aglutinante químico: faz uso da reação química entre o aglomerante e os componentes a serem aglomerados ou da reação entre os próprios constituintes. Dependendo do produto das reações químicas pode ser classificado como tipo matriz ou filme.

Tabela 2: Exemplos de aglomerantes quanto à sua função na mistura.

Matriz	Filme	Aglutinante Químico
Alcatrão	Água	Ca(OH) ₂ + molasses
Asfalto de petróleo	Silicato de sódio	Silicato de sódio + CO ₂
Cimento Portland	Lignosulfonatos	Epóxies

Fonte: Adaptado de Carvalho (2004).

Diferentes tipos de aglomerantes podem ser usados conjuntamente obtendo-se resultados adicionais desejados. Aglomerantes podem ainda ser classificados de acordo com diversas de suas características, como pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3: Classificações para aglomerantes quanto a suas características.

Característica	Tipos Genéricos
Origem	Orgânico Inorgânico
Forma de Endurecimento	Secagem simples Secagem e reações químicas
Ambiente de Endurecimento	Ar Água
Tempo de Endurecimento	Pega ou cura lenta Pega ou cura rápida
Fabricação	Simples Composto Com adições

Fonte: adaptado de Zakon e Fonseca (1985).

5.5.1. Aglomerantes orgânicos e inorgânicos

Quanto a origem do aglomerante, Zacon e Fonseca (1985) os classificam da seguinte forma:

- Aglomerantes orgânicos: aglomerantes de origem animal, vegetal ou industrial, como, por exemplo, epóxios, látex, monômeros polimerizáveis solúveis em água, betume ou asfalto, caseína e preparações oleaginosas;
- Aglomerantes inorgânicos: aglomerantes que se apresentam, normalmente, de forma pulverulenta e quando misturados com água formam pastas adesivas capazes de endurecer por simples secagem ou por meio do desenvolvimento de reações químicas e incluem argilas, cal, gessos e cimentos.

Os aglomerantes orgânicos apresentam algumas desvantagens quanto a seu uso em processos siderúrgicos devido a maioria deles se decompor, volatilizar ou queimar em altas temperaturas, acima de 300 °C, além de ser necessário também a utilização de dispersantes e cuidado no processo de adição para se ter uma mistura homogênea, apesar disso, esses não contribuem para formação de escórias, são eficientes com pequenas adições, alguns menores que 0,1% e são bons para melhorar as resistências à compressão de aglomerados verdes e secos. (TAKANO, 2016)

Existem exceções no uso de aglomerantes orgânicos quanto a suas desvantagens, sobretudo quando considerado o aproveitamento do efeito sinérgico entre os mesmos e com os materiais inorgânicos. Industrialmente alguns aglomerantes orgânicos, com ou sem sinérgico com inorgânicos, são utilizados para aglomerados convencionais, não autorredutores. São principalmente os poliácridamida e amido de milho juntamente com bentonita (TAKANO, 2016).

Um dos aglomerantes utilizados para aglomeração convencional, dentre os inorgânicos, é a bentonita sódica, sendo ela uma classe de argila, sua estrutura de ordenamento permite uma alta absorção de água, de dez vezes o seu volume inicialmente seco, formando um coloide com dispersão viscosas de plaquetas e após a secagem, essas plaquetas se aderem à superfície das partículas de minério e atuam como pontes. (TAKANO, 2016).

Embora não haja muitas pesquisas sobre, ainda em consideração a aglomerantes inorgânicos, merecem visibilidade são aqueles contendo sódio, potássio e boro, os quais transformam em fases oxidadas de baixo ponto de fusão esua formação, mesmo localizada e incipiente, da fase líquida, procede com dissolução parcial dos componentes do minério e ela age como mecanismo de endurecimento por sinterização com formação da fase líquida, o que pode melhorar a resistência dos aglomerados a temperaturas a partir de 500 °C (TAKANO, 2016).

A aplicação de aglomerantes inorgânicos acaba por tornar a produção menos onerosa. Um dos aglomerantes orgânicos mais baratos é o licor negro oriundo da indústria de papel (QUIRINO, 1991). A tabela 4 mostra alguns dos aglomerantes orgânicos e inorgânicos.

Tabela 4: Exemplos de aglomerantes orgânicos e inorgânicos.

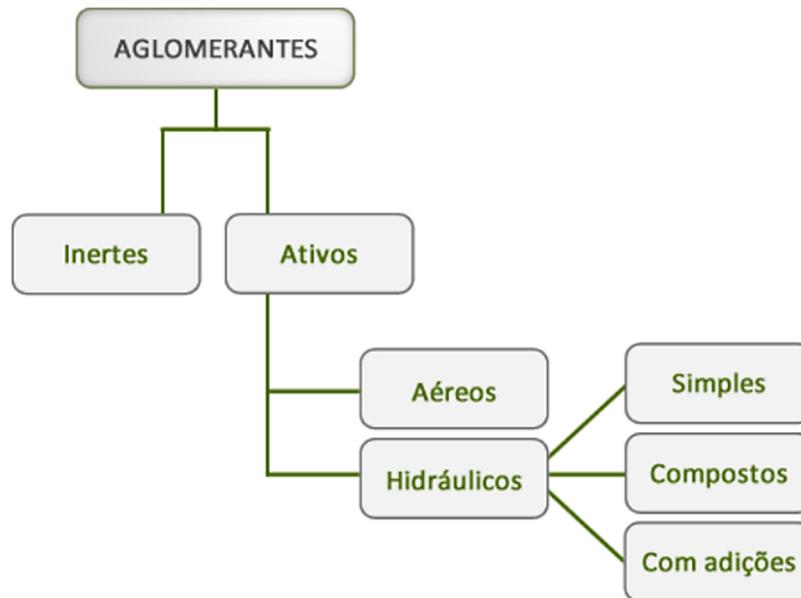
Aglomerantes Orgânicos	Aglomerantes Inorgânicos
Epóxis	
Látex	Cal: metalúrgica, hidráulica, pozolânica
Monômeros polimerizáveis solúveis em água	Argilas
Betume ou asfalto	Gesso: CaSO ₄
Caseína	Cimentos: comum, com aditivos, pozolânico
Preparações oleaginosas	

Fonte: adaptado de Zacon e Fonseca (1985).

5.5.2. Tipos de aglomerantes quanto a seu mecanismo de endurecimento

Segundo Petrucci (1975, apud HAGEMANN, 2011) os aglomerantes podem ainda separados quanto aos seus mecanismos de endurecimento e composição que apresentam, a Figura 3 divide bem essas classificações.

Figura 2: Classificação dos aglomerantes por seu mecanismo de endurecimento e composição.



Fonte: Petrucci, 1975, apud Hagemann, 2011.

Aglomerantes quimicamente inertes são aqueles que endurecem em função da secagem natural do material, sendo a argila um exemplo de aglomerante inerte, conseqüentemente, os aglomerantes quimicamente ativos são aqueles que endurecem devido a reações químicas, como por exemplo: cal e o cimento (HAGEMANN, 2011). De acordo com Effting (2014), para aglomerantes quimicamente ativos, são dois os grupos aos quais são divididos:

- Aéreos: aglomerantes que endurecem pela ação química do CO₂ do ar;
- Hidráulicos: aglomerantes que endurecem pela ação exclusiva da água.

Tabela 5: Meio e tempo de endurecimento para alguns aglomerantes.

Aglomerante	Meio de Endurecimento	Tempo de Endurecimento
Cal aérea	Ar	> 30 dias
Cal fracamente hidráulica	Ar e água	15 - 30 dias
Cal medianamente hidráulica	Ar e água	10 - 15 dias
Cal hidráulica	Água	5 - 10 dias
Cimento natura de pega lenta	Água	6 - 24 horas
Cimento natura de pega rápida	Água	6 horas

Fonte: Adaptado de Bauer (1979).

Quanto a composição do subgrupo de aglomerantes ativos hidráulicos, Hagemann (2011) os classifica em:

- Aglomerantes simples: formados por um único produto com pequenas adições de outros componentes, que normalmente não ultrapassam 5% do material em peso, adições essas com o objetivo de melhorar algumas características do produto final. Exemplo: cimento Portland comum;
- Aglomerantes com adição: formados por um aglomerante simples adicionado de outros componentes em porções superiores a 5% do material em peso, com o objetivo de conferir propriedades especiais ao aglomerante, como menor permeabilidade, menor calor de hidratação, menor retração, entre outras;
- Aglomerantes compostos: formados pela mistura de aglomerante simples com subprodutos industriais denominados hidraulite, com o objetivo de formar um aglomerante de baixo custo e de propriedades específicas. Exemplo: cimento pozolânico, que é uma mistura do cimento Portland com uma adição chamada pozolana.

Os aglomerantes também podem ser caracterizados de acordo com o tempo que levam para que comecem o processo de endurecimento do aglomerado onde são empregados, no qual, o momento inicial da perda de plasticidade, conseqüentemente, da manuseabilidade é chamado, na engenharia civil, de pega. O início de pega é o período em que o aglomerado começa a endurecer, perdendo parte de sua plasticidade e fim de pega é o instante em que o aglomerado se solidifica completamente, perdendo toda sua plasticidade. Passado o tempo de pega é que se iniciam os ganhos significativos na resistência, apesar de no fim da pega o aglomerado já ter alguma resistência (HAGEMANN, 2011).

Tabela 6: Exemplos de aglomerantes compostos, com a informação do hidraulite e aglomerante simples usados para sua obtenção.

Aglomerante Simples	Hidraulite	Aglomerante Composto
Cal	Escória < 70%	Cal metalúrgica
Cal	Escória > 70%	Aglomerante de escória com cal
Cal	Pozolana	Cal pozolânica
Cimento Portland	Escória > 65%	Aglomerante de escória com cimento Portland
Cimento Portland	Escória 10 - 25%	Cimento metalúrgico - Ferro Portland
Cimento Portland	Escória 25 - 65%	Cimento metalúrgico - de Alto-Forno
Cimento Portland	Pozolana	Cimento pozolânico
Cimento Portland	Sulfato de cálcio e escória	Cimento metalúrgico sulfatado

Fonte: Adaptado de Bauer (1979)

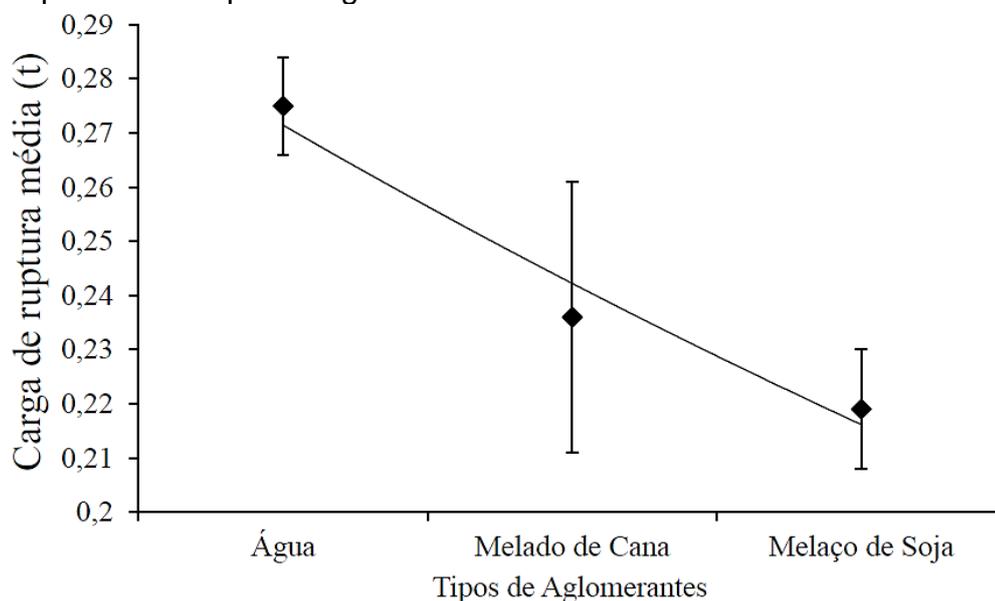
6. AGLOMERADOS MINERAIS

6.1. Resistência a compressão

Barros (2016) buscou caracterizar a influência de aglomerantes orgânicos e inorgânicos para briquetes de finos de calcário, sendo usados como aglomerantes orgânicos o melado de cana de açúcar e o melaço de soja e foram utilizados briquetes com água como aglomerante inorgânico para fins de comparação dos resultados obtidos.

A Figura 3 apresenta os valores médios obtidos para a resistência à compressão Uniaxial dos briquetes que fizeram uso de melado de cana-de-açúcar e melaço de soja com teor de 8,5% da composição e 7,5% de água

Figura 3: Valores médios de resistência a compressão uniaxial para briquetes que fizeram uso de aglomerantes orgânicos comparados com os que usaram apenas água.



Fonte: Barros, 2012.

A presença de líquido, durante a aglomeração, resulta em forças interfaciais e pressões capilares, aumentando a ligação entre as partículas. Segundo o autor (BARROS, 2012) existem estudos que afirmam que aglomerados orgânicos apresentam resistência a compressão inferiores aos de aglomerantes inorgânicos, o que pode ser constatado por seus resultados para o melado de cana-de-açúcar e

melaço de soja que apresentam valores inferiores aos da água cuja os resultados são provenientes devido as pressões capilares.

A tabela abaixo apresenta os resultados médios obtidos por Moraes e Kawatra (2011) em seu estudo que visou avaliar o uso da combinação de diferentes aglomerantes na pelotização de concentrado de magnetita, que foram obtidos com intervalos de confiança de 95%.

Tabela 7: Resultados da pelotização de concentrado de magnetita, sendo usadas diferentes combinações de aglomerante.

Dosagem de Aglomerante	Umidade (%)	N° quedas/ pelota (45 cm) \pm P95	Resistência a Compressão (N/pelota) \pm P95					
			Verde	Seca	300 °C	500 °C	700 °C	900 °C
Bentonita (0,66%)	9,5	3,2 \pm 0,2	19,0 \pm 1,0	38,3 \pm 2,0	19,9 \pm 3,3	43,0 \pm 12,8	101,9 \pm 17,3	119,9 \pm 22,8
Bentonita (0,40%) + NaOH(0,02%)	9	2,9 \pm 0,2	18,1 \pm 0,9	20,7 \pm 0,7	16,8 \pm 1,0	40,3 \pm 8,3	58,1 \pm 31,2	141,78 \pm 5,6
CMC (0,04%)	8,9	2,4 \pm 0,2	16,9 \pm 0,6	15,9 \pm 0,7	10,9 \pm 1,0	19,0 \pm 5,6	67,7 \pm 20,3	51,2 \pm 3,8
CMC (0,04%) + NaOH (0,02%)	9,6	2,4 \pm 0,2	14,8 \pm 0,8	19,1 \pm 1,0	10,7 \pm 1,9	22,9 \pm 5,9	123,4 \pm 22,4	54,3 \pm 4,5
CMC (0,04%) + TPP (0,02%)	9,1	2,9 \pm 0,2	19,6 \pm 0,7	21,5 \pm 1,3	14,7 \pm 2,4	26,7 \pm 8,5	89,8 \pm 15,1	89,3 \pm 11,5
Carbonato de sódio (1,5%)	8,5	2,8 \pm 0,2	19,7 \pm 1,4	44,3 \pm 2,4	33,2 \pm 10,7	36,5 \pm 8,8	167,6 \pm 30,5	180,8 \pm 21,9
Silicato de sódio (1,5%)	9	1,9 \pm 0,1	11,2 \pm 0,6	52,6 \pm 4,6	36,6 \pm 7,8	74,7 \pm 6,5	120,2 \pm 16,8	151,4 \pm 21,2
Carbonato de sódio (0,75%) + silicato de sódio (0,75%)	9,8	3,0 \pm 0,2	17,5 \pm 0,7	51,9 \pm 4,9	24,2 \pm 3,9	32,2 \pm 4,9	99,0 \pm 18,3	108,0 \pm 12,0

Fonte: Adaptado de Moraes e Kawatra, 2011.

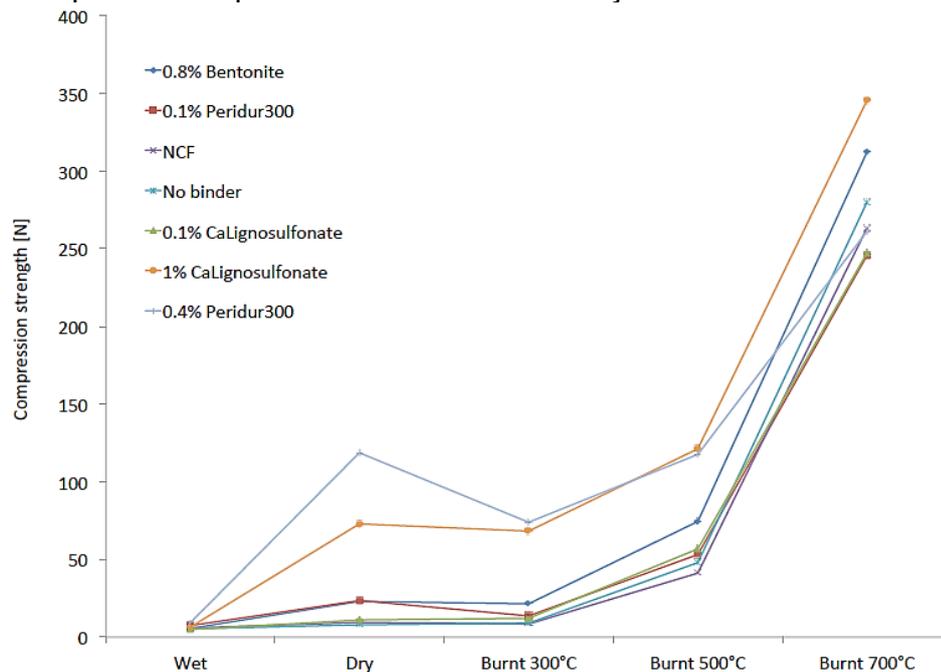
Pode ser observada uma variação da umidade das pelotas entre 8,5% e 9,8%, sendo o valor mais alto de umidade para o CMC + NaOH, e o menor valor no para o carbonato de sódio.

Os resultados de resistência à compressão a verde das pelotas se apresentam bem próximas umas das outras, variando entre 14,8 e 19,7 N/Pelota, valores esses correspondentes as pelotas confeccionadas, respectivamente, com CMC (0,04%) + NaOH (0,02%) e Carbonato de sódio (1,5%) como aglomerantes, entretanto, para as etapas posteriores dos experimentos realizados por Moraes e Kawatra (2011), estes

valores vão se distanciando, tendo os maiores valores quando estas submetidas a temperatura de 900 °C, variando entre 51,2 e 180,8 N/Pelota, valores esses correspondentes as pelotas confeccionadas, respectivamente, com CMC (0,04%) e Carbonato de sódio (1,5%) como aglomerantes.

O trabalho realizado por Sunde (2012), teve como objetivo avaliar aglomerantes orgânicos capazes de substituir a bentonita para a pelletização da ilmenita, um minério contendo ferro e titânio em sua composição, mas que fez uso de briquetes para avaliar a resistência a compressão da mistura com estes aglomerantes, devido as variações nas formas das pelotas que levam a um grande desvio padrão nos resultados. A imagem abaixo retrata os resultados obtidos em seus experimentos sob diferentes situações.

Figura 4: Comparação dos resultados da resistência a compressão média para os briquetes sob diferentes situações.



Fonte: Sunde, 2012.

Tabela 8: Valores de resistência a compressão média para os briquetes sob diferentes situações

Aglomerante	Molhada	Seca	Queimada à 300°C	Queimada à 500°C	Queimada à 700°C
Sem aglomerante	4.99 ±0.52	7.96 ±0.64	9.11 ±1.64	48.07 ±7.58	279.76 ±32.86
0.8% Bentonita	5.47±0.74	22.91±1.60	21.38±1.85	74.14±6.24	312.34±22.37
0.1% Peridur 300 (carboximetilcelulose de sódio)	7.09±0.40	23.56±3.40	13.30±1.80	53.094±6.26	245.708±21.27
0.4% Peridur 300 (carboximetilcelulose de sódio)	9.08±0.38	118.44±10.51	73.90±14.12	117.31±14.05	261.04±35.58
0.1% Ca-LS (lignossulfonato de cálcio)	4.75±0.57	10.69±1.79	11.917±2.02	56.60±4.86	247.25±32.90
1% Ca-LS (lignossulfonato de cálcio)	6.10±0.32	72.84±10.45	68.41±11.87	121.41±15.68	345.60±38.09
NFC (fibra de nano celulose)	5.78±1.13	9.14±1.11	8.43±1.17	40.86±7.25	263.16±41.89

Fonte: Sunde, 2012.

Ao se analisar os valores de resistência obtidos para os briquetes de ilmenita, é possível observar a drástica variação das resistências dos briquetes de quando ainda molhados, no qual os valores variam entre 4,77 e 9,08 N, para os valores quando os briquetes são submetidos a temperatura de 700 °C, cuja os valores variam entre 245,71 e 345,60 N, tendo aqueles que fazem uso de bentonita como aglomerante o segundo maior valor, de 312,34 N, sendo superado apenas para o que fez uso de lignossulfonato de cálcio com o teor de 1%.

É de interesse para este trabalho observar ainda os resultados obtidos por Sivrikaya (2013, apud TAKANO; NARITA; MOURÃO, 2016), em seu trabalho que buscou avaliar aglomerantes capazes de substituir a bentonita para a pelletização de minério de ferro. Para a resistência a compressão das pelotas, a tabela abaixo mostra os resultados obtidos com o uso da colemanita como aglomerante, para pelotas preaquecidas a 1000 °C e queimadas a 1300 °C.

Tabela 9: Resistência à compressão de pelotas de minério de ferro preaquecidas a 1000 °C e queimadas a 1300 °C (kg/pellet), utilizando diferentes ligantes, sob teores distintos e suas combinações.

Binders and dosages	Preheated strength at 1000°C	Fired strength at 1300°C
Bentonite 0.50% (reference pellets)	49.60 ±5.63	381.10 ±42.25
Calcined Colemanite 0.25% +	83.90 ±7.49	478.90 ±44.70
Calcined Colemanite 0.50% +	116.10 ±5.71	602.00 ±54.80
Calcined Colemanite 0.75% +	151.40 ±22.80	772.00 ±95.37
Calcined Colemanite 1.00% +	219.30 ±18.11	893.60 ±76.80
CMC 0.10% + Calcined Colemanite 0.50%	121.00 ±10.37	535.10 ±48.68
CMC 0.10% + Calcined Colemanite 1.00%	199.80 ±21.127	841.10 ±77.10
Corn starch 0.10% + Calcined Colemanite 0.50%	118.20 ±5.61	512.20 ±68.03
Corn starch 0.10% + Calcined Colemanite 1.00%	217.80 ±16.71	736.90 ±86.57
DPEP06-007 Polymer 0.10% + Calcined Colemanite 0.50%	127.50 ±11.98	457.70 ±51.86
DPEP06-007 Polymer 0.10% + Calcined Colemanite 1.00%	173.80 ±14.25	789.70 ±86.88

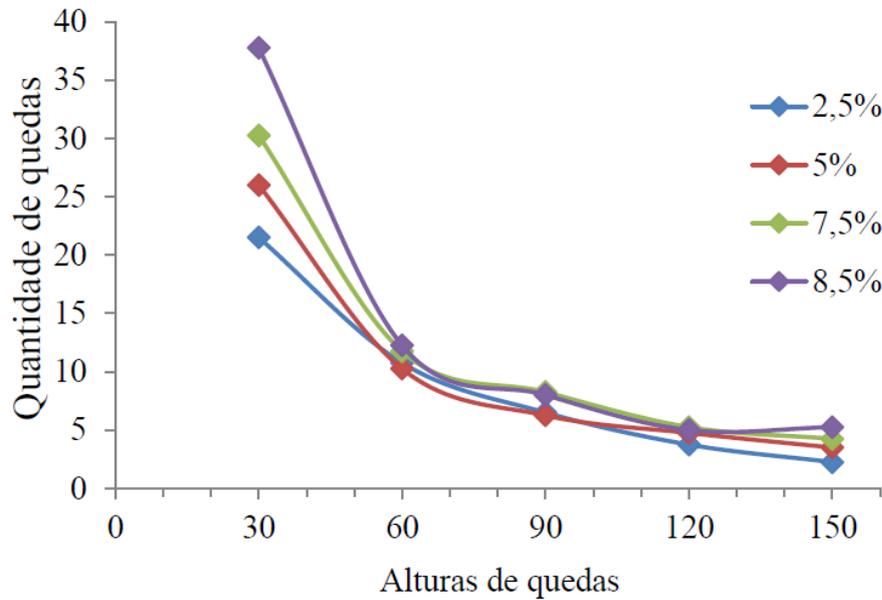
Fonte: Sivrikaya, 2013 apud Takano, Narita e Mourão, 2016.

Como pode ser observado, o uso da colemanita calcinada, mesmo em baixos teores ou combinada a outros aglomerantes, obteve valores superiores as que fizeram uso de 0,5% de bentonita, usadas como referência, tanto para as preaquecidas a 1000 °C como para as queimadas a 1300 °C, valores esses que se mostraram crescentes com o aumento do teor de colemanita calcinada utilizada.

6.2. Resistência ao impacto

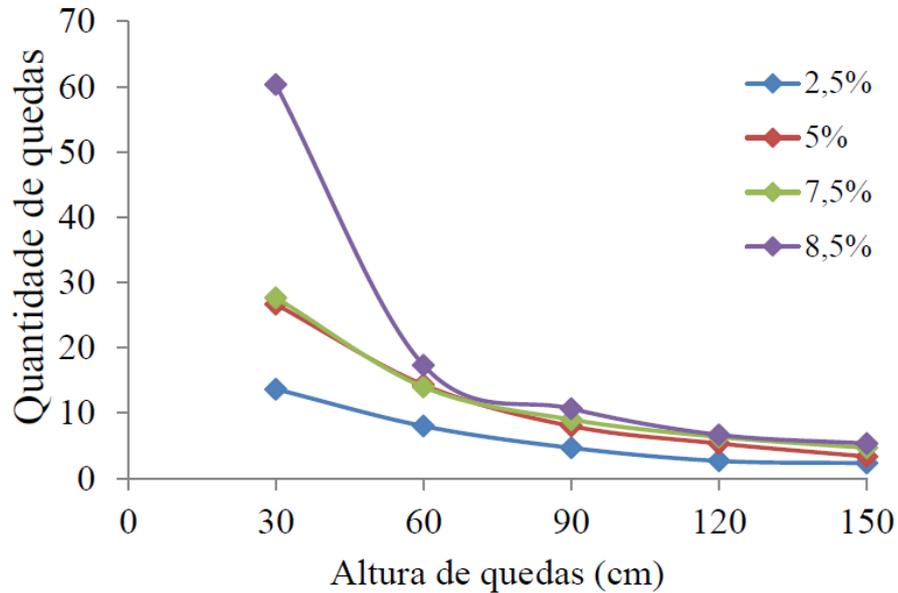
Ainda para os briquetes estudados por Barros (2012), foram avaliados quanto a sua resistência ao impacto para diferentes teores dos aglomerantes em suas composições.

Figura 5: Resistência ao impacto, para briquetes com diferentes teores de melaço de soja como aglomerante.



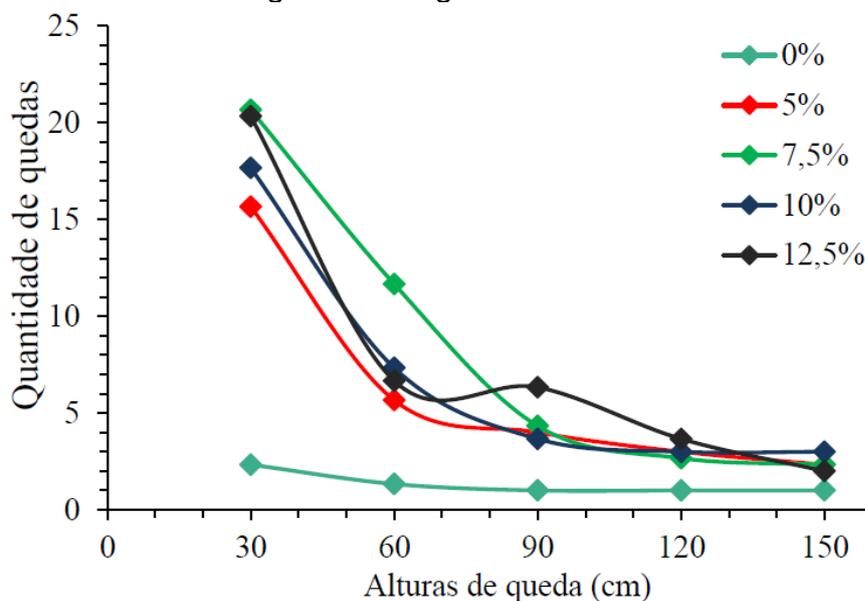
Fonte: Barros, 2012.

Figura 6: Resistência ao impacto, para briquetes com diferentes teores de melado de cana-de-açúcar como aglomerante



Fonte: Barros, 2012.

Figura 7: Resistência ao impacto, para briquetes com diferentes teores água como aglomerante.



Fonte: Barros, 2012.

Para os briquetes que usaram melação de soja, sujeito a quedas superiores a 60 cm, foi possível notar uma tendência para os valores obtidos, tornando irrelevante o aumento dos teores de aglomerantes, entretanto, foi possível obter um valor 40 quedas a uma altura de 30 cm para um teor de 8,5%, superior ao resultado para teores menores. Já para os briquetes com melado de cana-de-açúcar, os produzidos com 8,5% os melhores resultados, chegando a alcançar mais de 60 quedas sem uma perda de maçã superior a 5%. A Figura 6 apresenta a relação do aumento da resistência ao impacto de com o aumento de seus teores, resultados estes que se mostraram inferiores aos de briquetes com aglomerantes orgânicos.

6.3. Conclusão

Apesar do uso de ligantes orgânicos se mostrar bem restrito devido as, relativamente, pobres propriedades mecânicas quando se comparadas as de aglomerantes inorgânicos que são usualmente utilizados, existem aglomerantes orgânicos que propiciem propriedades mecânicas comparáveis aos de inorgânicos, alguns até mesmo maiores.

A existência de aglomerantes orgânicos com propriedades mecânicas comparáveis aos inorgânicos possibilita a utilização destes, sem impactar no processo com relação

as propriedades físicas, permitindo aproveitar a vantagem destes tipos de aglomerantes não contribuírem para a formação de escória.

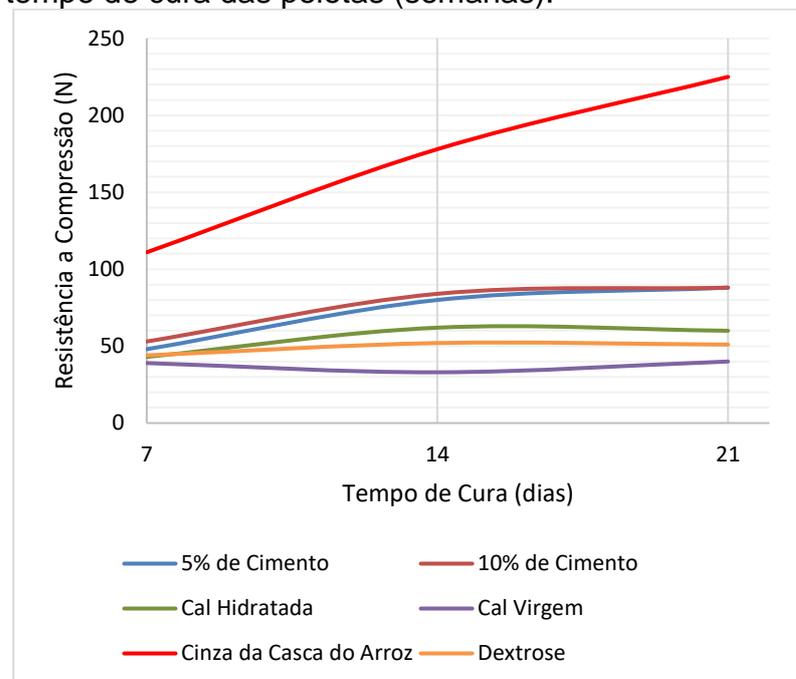
Para os aglomerantes com os resultados de suas propriedades mecânicas mais baixos, a combinação com outros tipos é uma alternativa viável. Isso permite o uso de menores quantidades de determinados aglomerantes, que possam se apresentar mais caros ou que prejudiquem o processo de alguma forma, sem grandes impactos nas propriedades físicas do aglomerado resultante.

7. AGLOMERADOS AUTORREDUTORES

7.1. Resistência a compressão

Agra et al. (2015), estudaram a influência de alguns ligantes em nas propriedades físicas de pelotas autorredutoras de pó de aciaria, sendo usados como aglomerantes: cimento, cal hidratada, cal virgem, cinza de casca de arroz com cal hidratada e dextrose. Os resultados de resistência a compressão das 6 amostras de pelotas produzidas são apresentados na Figura 4.

Figura 8: Resistência a compressão (N/Pelota) médio x tempo de cura das pelotas (semanas).



Fonte: Adaptado de Agra et al., 2015.

Na tabela 10 são apresentados valores médios da resistência a compressão de cada composição nas três semanas de teste.

Tabela 10: Valor médio da resistência a compressão para três diferentes tempos de cura.

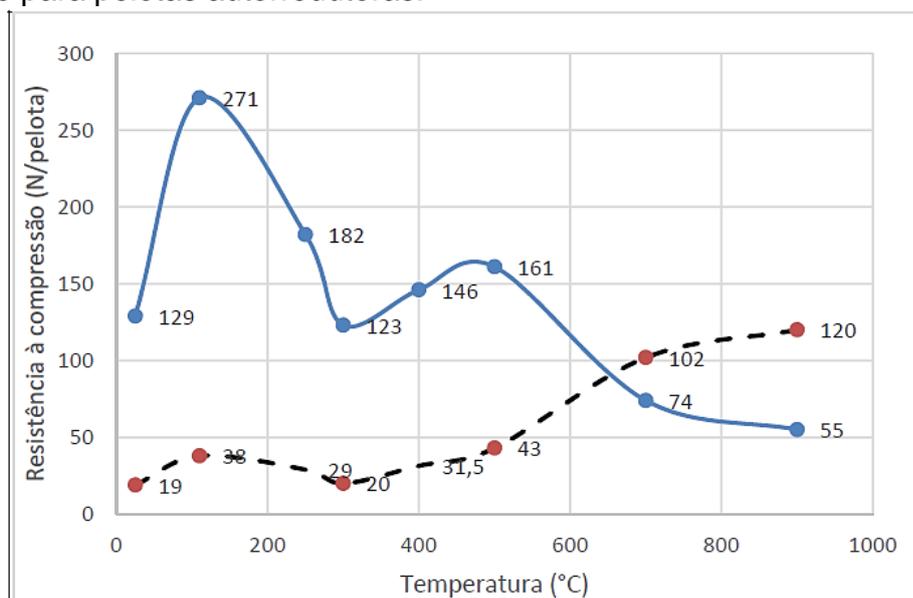
Aglomerante	Resistência a compressão média (N)		
	7	14	21
5% de Cimento	48	80	88
10% de Cimento	53	84	88
Cal Hidratada	43	62	60
Cal Virgem	39	33	40
Cinza da Casca do Arroz	111	178	225
Dextrose	44	52	51

Fonte: Adaptado de Agra et al., 2015.

Os valores obtidos variam entre 33 e 111 N para a primeira semana, e entre 51 e 225 N para a terceira semana, com os melhores resultados para as três semanas sendo para as pelotas que utilizaram as cinzas da casca de arroz com cal hidratada como aglomerante, que teve um aumento significativo da resistência de acordo com o aumento do tempo de cura.

Em uma verificação da literatura, Takano, Narita e Mourão (2016), analisaram a resistência a compressão média para pelotas autorredutoras de minério hematítico, contendo 9,4% de finos de coque de petróleo em sua composição, e sendo utilizado como aglomerantes 2% de bentonita, 2% de ácido bórico e 2% de licor negro (lignosulfonato de sódio) e adicionado de 0,05% de tripolifosfato, como dispersante. Os valores obtidos foram comparados com resultados obtidos por Moraes (2014, apud TAKANO; NARITA; MOURÃO, 2016), apresentados em linha tracejada no gráfico a seguir, para pelota convencional, não autorredutora, pelletizada com 0,67% de bentonita.

Figura 9: Resistência a compressão para a pelotas convencionais e para pelotas autorredutoras.



Fonte: Takano, Narita e Mourão, 2016.

Os valores obtidos pelas pelotas autorredutoras se apresentaram superiores as pelotas convencionais, que usaram 0,67% de bentonita, para temperaturas de até 600 °C, havendo uma superioridade dos valores para as pelotas convencionais com bentonita para temperaturas um pouco superiores.

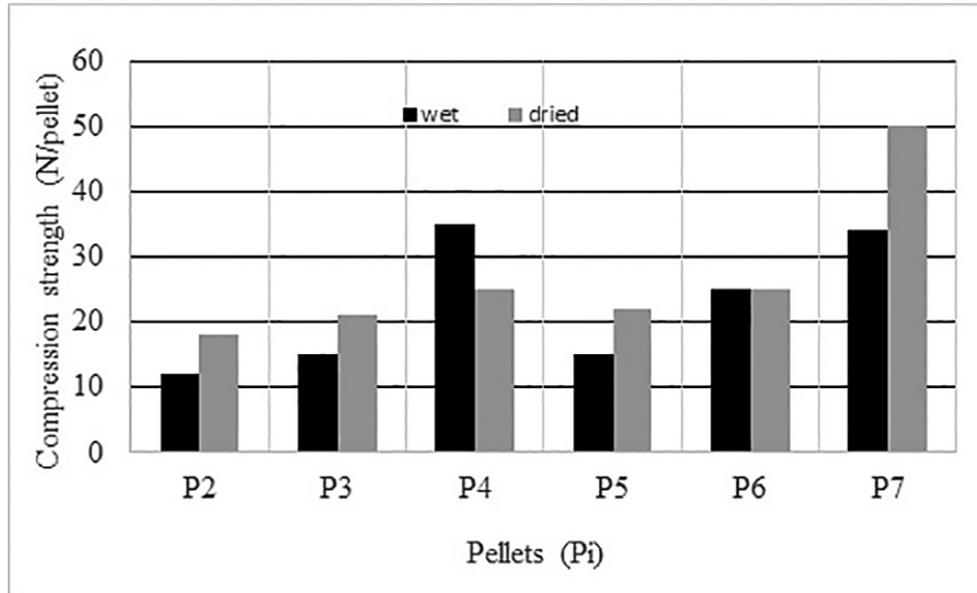
O comportamento mecânico de pelotas autorredutoras de cromita quando se faz uso de bentonita, silicato de sódio e carboximetilcelulose (CMC) sob diferentes percentuais em massa, como aglomerante, foi estudado por Zambrano et al. (2016), sendo avaliadas 7 diferentes composições dispostas na tabela abaixo.

Tabela 11: Composição das pelotas autorredutoras de cromita.

Componente	Cromita	Coque de Petróleo	Fe-75%Si	Silicato de Sódio	Bentonita	CMC
P1	80,1	17,9	2,0	-	0,0	0,0
P2	79,5	17,8	2,0	-	0,75	0,0
P3	79,3	17,7	2,0	-	1,0	0,0
P4	79,1	17,7	2,0	-	1,0	0,2
P5	79,3	17,7	2,0	1,0	-	-
P6	78,4	17,6	2,0	2,0	-	-
P7	76,8	17,2	2,0	4,0	-	-

Fonte: Zambrano et al., 2016.

Figura 10: Resistência a compressão das pelotas autorredutoras de cromita molhadas e secas.

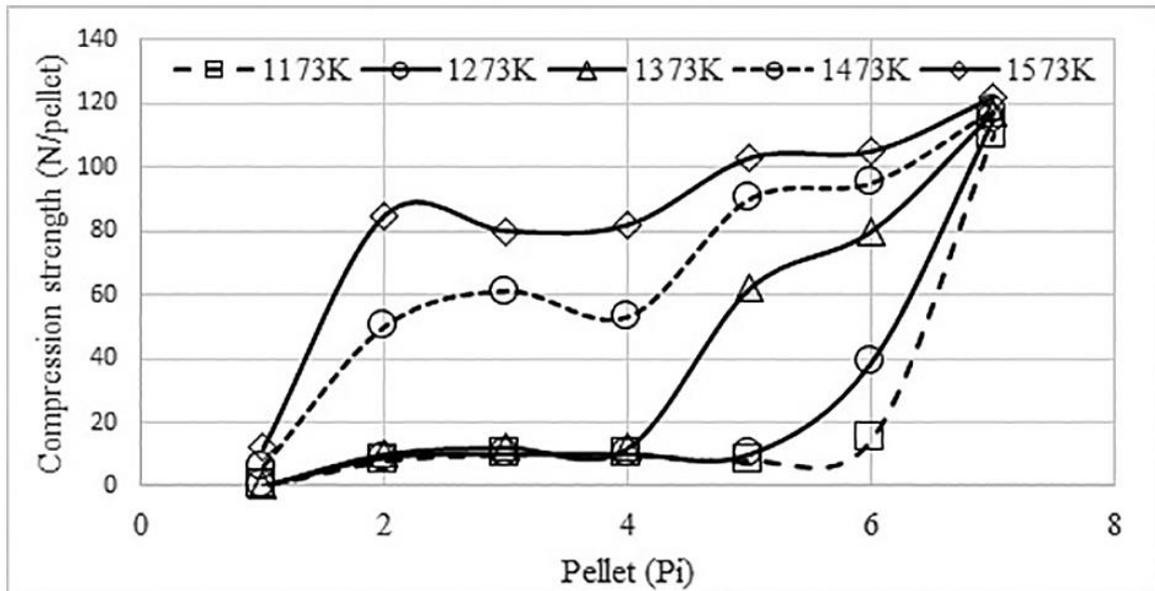


Fonte: Zambrano et al., 2016.

Pelos resultados obtidos é facilmente observável um aumento da resistência conforme se aumenta os teores para a bentonita e silicato de sódio, com os melhores resultados sendo obtidos para pelotas com 4% de silicato de sódio. Outro ponto observado é que os valores das pelotas com 0,75% de bentonita já apresentam valores muito próximos aos obtidos pelas pelotas com 1% de silicato de sódio, que é um teor maior que nas de bentonita, que quando se utiliza um teor igual, adicionado de 0,2% de CMC, os de silicato de sódio. Deve se dar importância ainda as pelotas de componente P4 que apresentam CMC em sua composição, devido aos valores superiores dentre as outras composições para a resistência das pelotas ainda molhadas.

Zambrano et, al. (2016) avaliam ainda a resistência a compressão das pelotas após submeter essas a um tratamento térmico por 30 minutos sob diferentes temperaturas abaixo da de redução, das quais com os maiores valores de silicato de sódio mais se destacam, havendo pouca variação da sua resistência independente da temperatura do tratamento térmico e, como já esperado, a que apresentou os piores resultados foram as que não utilizaram nenhum aglomerante.

Figura 11: Resistência a compressão das pelotas autorredutoras de cromita sob diferentes temperaturas.



Fonte: Zambrano et al., 2016.

As pelotas que fizeram uso de bentonita não apresentaram variações significativas entre as resistências com a variação de seus teores para cada uma das temperaturas usadas no tratamento térmico, diferente das pelotas que fizeram uso do silicato de sódio, que tiveram um aumento de suas resistências médias para cada uma das temperaturas com o aumento dos teores usado, além disso, estas apresentaram valores maiores que as com bentonita, independente do teor de aglomerante usado.

7.2. Resistência ao impacto

Os resultados obtidos por Agra et al. (2015) para as perdas percentuais em massa após três quedas consecutivas no teste de queda podem ser observados na Tabela 8, quanto maior a concentração dos fragmentos de pelotas nas peneiras de maiores aberturas, melhor o desempenho frente a este teste, visto que estes aglomerados se manteriam próximos a sua integridade necessária para as aplicações desejadas, como observado para as pelotas que fizeram uso da cinza da casca de arroz com cal hidratada como aglomerante.

Tabela 12: Valores percentuais de massa retidos nas peneiras após o teste de tamboramento.

Aglomerante	Tamanho dos fragmentos retidos nas peneiras (mm)				
	< 1,18	1,18 < X < 2,83	2,84 < X < 4,76	4,76 < X < 9,52	> 9,52
5% de Cimento	26,60%	4,66%	3,87%	31,62%	33,25%
10% de Cimento	48,48%	4,33%	4,90%	18,88%	23,44%
Cal Hidratada	56,79%	14,19%	13,93%	15,08%	0,00%
Cal Virgem	43,91%	6,33%	6,44%	32,27%	11,09%
Cinza da Casca do Arroz	12,05%	0,00%	0,00%	0,00%	87,98%
Dextrose	67,53%	10,66%	10,26%	11,57%	0,00%

Fonte: Adaptado de Agra et al., 2015

7.3. Conclusão

A utilização de aglomerados autorredutores tem se mostrado problemática de se fazer uso na siderurgia tendo em vista a baixa resistência mecânica que vem apresentando, que não permite suportar grandes carregamentos (MOURÃO, 2017), e devido as tecnologias que fazem uso de aglomerados autorredutores serem novas quando comparadas às tecnologias para aglomerados minerais, não são muitas as pesquisas que podem ser usadas para este trabalho.

Apesar do menor número de pesquisas de referentes as propriedades mecânicas para aglomerados autorredutores, pode ser observado nos resultados presentes neste estudo que merecem destaque, sendo eles para aglomerados que fizeram uso da cinza da casca de arroz com cal hidratada, devido a seus valores de resistência a compressão e resistência quanto a produção de finos quando submetido ao impacto se comparados a outros aglomerante, havendo a necessidade, entretanto, de estudos mais profundos para resultados mais conclusivos.

8. AGLOMERADOS COMBUSTÍVEL

8.1. Resistência a compressão

Aransiola et al. (2019), teve como parte do foco de seu trabalho o estudo da influência do tipo e concentração de aglomerante em briquetes produzidos a partir da espiga de milho carbonizada. Na Tabela 9 podem ser observados os resultados para a resistência a compressão para três tipos de ligantes, para três teores em massa, com os briquetes tendo sido compactados a 50, 100 e 150 kPa.

Tabela 13: Valores de resistência a compressão (em Mpa) para briquetes a base de espiga de milho carbonizada sob diferentes condições.

Pressão de Compactação (kPa)	Percentual em massa de aglomerante (%)	Aglomerantes		
		Amido de Mandioca	Amido de Milho	Gelatina
50	10	1,60	1,28	1,02
	20	3,23	2,22	1,88
	30	4,20	2,73	2,23
100	10	2,57	2,28	2,03
	20	4,32	3,63	2,97
	30	6,66	4,16	3,33
150	10	4,23	3,70	3,05
	20	6,76	4,88	4,24
	30	8,32	5,42	5,05

Fonte: Adaptado de Aransiola et al., 2019

Pode ser observada a influência dos teores utilizados para os três aglomerantes, havendo um aumento da resistência apresentada pelos briquetes com o aumento das concentrações, dos quais o amido de mandioca apresentou os valores mais altos dentre eles.

8.2. Resistência a penetração de água

Dos resultados obtidos dos experimentos de Aransiola et al. (2019), a Tabela 9 apresenta os valores o percentual da variação em massa dos briquetes devido a umidade absorvida.

Tabela 14: Valores médios do teor de umidade (%) dos briquetes a base de espiga de milho carbonizada sob diferentes condições.

		Valores médios do teor de umidade (%)		
Pressão de Compactação (kPa)	Percentual em massa de aglomerante (%)	Amido de Mandioca	Amido de Milho	Gelatina
50	10	5,23	6,30	5,78
	20	5,63	6,63	6,96
	30	6,06	7,09	7,62
100	10	4,82	5,03	5,69
	20	5,29	5,88	6,56
	30	5,72	6,52	7,53
150	10	4,43	4,68	5,64
	20	5,08	5,59	6,29
	30	5,34	6,17	7,13

Fonte: Adaptado de Aransiola et al., 2019.

É evidente o aumento dos teores médios de umidade apresentados, variando de 4,43% até 7,62%, cujos valores aumentam de acordo com que se utiliza maiores quantidades de aglomerante na mistura, com a gelatina apresentado os maiores valores, seguido pelo amido de milho e a mandioca apresentando os valores mais baixos.

8.3. Densidade

As tabelas 15 e 16 apresentam, respectivamente, os valores para as densidades médias comprimida e a relaxada para os briquetes produzidos por Aransiola et al. (2019), considerando como densidade comprimida aquela apresentada logo após a a

aplicação da pressão de compactação e a relaxada como aquela 30 dias após a aplicação da pressão de compactação

Tabela 15: Valores médios da densidade comprimida (kg/m³) dos briquetes a base de espiga de milho carbonizada sob diferentes condições.

		Valores médios para a densidade comprimida (kg/m ³)		
Pressão de Compactação (kPa)	Percentual em massa de aglomerante (%)	Amido de Mandioca	Amido de Milho	Gelatina
50	10	1159,94	1008,09	952,46
	20	1239,83	1090,24	1024,44
	30	1332,62	1172,63	1094,47
100	10	1202,00	1094,94	1035,96
	20	1306,28	1191,48	1098,61
	30	1393,22	1268,13	1182,52
150	10	1299,11	1155,54	1090,51
	20	1393,32	1240,34	1175,75
	30	1437,42	1308,75	1231,53

Fonte: Adaptado de Aransiola et al., 2019.

Tabela 16: Valores médios da densidade relaxada (kg/m³) dos briquetes a base de espiga de milho carbonizada sob diferentes condições.

		Valores médios para a densidade relaxada (kg/m ³)		
Pressão de Compactação (kPa)	Percentual em massa de aglomerante (%)	Amido de Mandioca	Amido de Milho	Gelatina
50	10	851.41	768.11	729.09
	20	896.42	812.97	772.88
	30	937.81	854.22	813.78
100	10	874.52	811.13	777.97
	20	925.84	863.66	812.16
	30	965.24	903.66	863.50
150	10	927.47	848.25	808.94
	20	962.77	892.78	855.90
	30	986.04	918.15	886.11

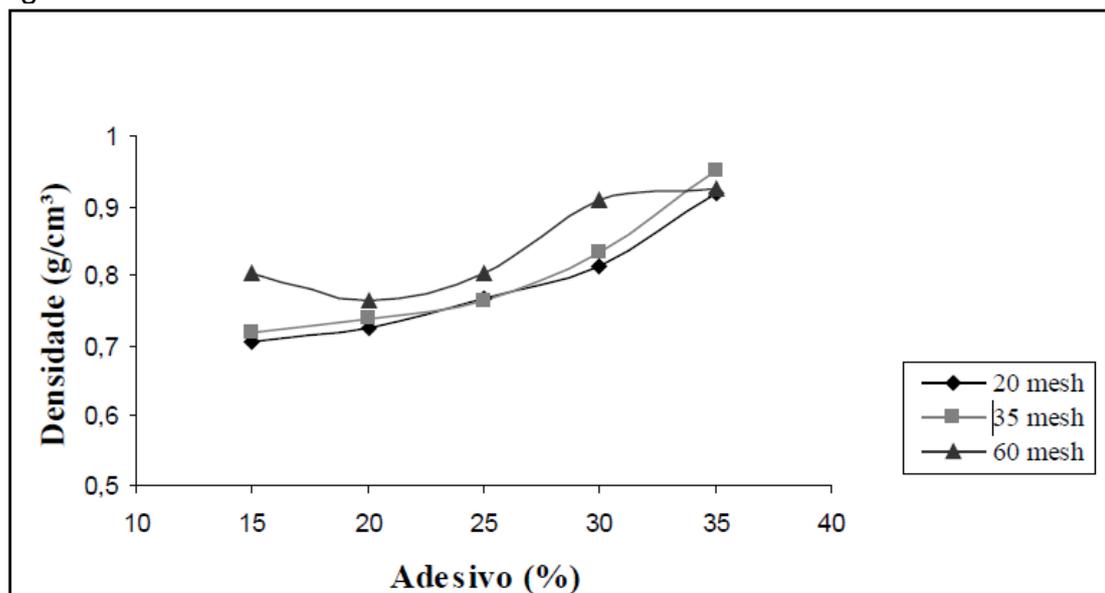
Fonte: Adaptado de Aransiola et al., 2019.

Os valores médios para a densidade comprimida média dos briquetes obtidos variaram de 952 a 1437 kg/m³, com um aumento da densidade com o aumento dos

teores de aglomerante, com a gelatina apresentando os menores valores e o amido de mandioca apresentando os maiores. A relação apresentada pelos aglomerantes e teores na densidade comprimida se repete para a densidade relaxada, cujos valores variam entre 729 e 986 kg/m³. Os menores valores para a densidade se devem do aumento do volume dos briquetes resultante da expansão em dimensões que ocorre após a remoção da máquina de briquetagem.

Por meio da análise dos resultados de Pereira et al. (2009), em seus experimentos que fazem uso de silicato de sódio como aglomerante para briquetes de carvão vegetal de eucalipto, é possível constatar um aumento da densidade aparente destes de acordo com o aumento dos teores do aglomerante.

Figura 12: Valores de densidade aparente para briquetes de carvão vegetal de eucalipto, para diferentes teores de aglomerante e granulometrias do aglomerado.



Fonte: Pereira et al., 2009.

O uso da quirela de milho como substituto ao amido de milho como aglomerante para briquetes de carvão é estudado por Cavalcante (2017), que avalia propriedades relevantes destes para teores de 30 e 40% em massa de aglomerante. Alguns de seus resultados podem ser observados na tabela abaixo.

Tabela 17: Valores médios de densidade e resistência a compressão para briquetes de carvão aglomerados com quirela e amido de milho.

		Propriedades físicas	
Aglomerante	Teores	Densidade (g/cm ³)	Resistência a Compressão (kgf)
Amido de Milho	30%	0,430	35,982
	40%	0,453	57,617
Quirela de Milho	30%	0,419	18,025
	40%	0,400	30,715

Fonte: Adaptado de Cavalcante, 2017.

Os resultados obtidos variaram entre 0,400 e 0,453 g/cm³ para a densidade e 18,025 e 57,617 kgf para a resistência a compressão, tendo os briquetes que fizeram uso de quirela de milho apresentando os menores valores para ambas as propriedades, e seus maiores valores, 0,419 g/cm³ e 30,715 kgf, respectivamente para a densidade e resistência, sendo inferiores aos menores para o amido de milho, 0,430 g/cm³ e 35,982 kgf.

É possível ainda relacionar o aumento da resistência com aumento da quantidade de aglomerante na composição do briquete, relação esta que se repete para a densidade daqueles que fizeram uso de amido de milho e sendo o inverso aos que fizeram uso de quirela.

8.4. Conclusão

Tendo em vista que a absorção de água para aglomerados combustíveis é um ponto de extrema importância, devido a sua aplicação voltada a produção de calor ao qual seria influenciada pela água presente, valores menores são mais adequados. Para as outras propriedades mecânicas apresentadas para esses aglomerados, maiores valores são o objetivo, já que maiores valores de densidade significam menores espaços usados como estoque e maiores valores de resistência a compressão permitem, não só uma melhor manuseabilidade como também uma menor geração de finos devido a poderem resistir a cargas maiores.

Pelos motivos apresentados, dentre os resultados apresentados no presente estudo, foram os referentes a aglomerados que fizeram uso de amido de mandioca como aglomerante que apresentaram os valores mais satisfatórios.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do número de resultados usados na comparação das propriedades mecânicas com o uso de diferentes tipos, teores e combinações de aglomerante, presentes nesse estudo, não foi possível apontar para essa variável a mais adequada para o processo de aglomeração. Isso ocorre devido a variabilidade existente nos processos usados por cada autor, o que não possibilitou uma comparação direta entre os resultados existentes, logo, os resultados aqui apresentados são mais adequados como referência em para futuros estudos que façam uso de temas similares ao deste trabalho.

Para uma análise que possa fazer comparação direta dos resultados de aglomerados que fazem uso de diferentes aglomerantes, é necessário que seja realizada a padronização do processo de aglomeração utilizado.

Não obstante, é necessário levar em conta não só os aspectos mecânicos apresentados pelo aglomerado, mas também os aspectos financeiros e ambientais, impactados pelo uso de cada aglomerante. Mesmo propriedades mecânicas inferiores a outras não inviabilizam seu uso, desde que atendam ao processo.

REFERÊNCIAS

- AGRA, A. A.; JÚNIOR, H. A. S.; RUCKERT, M. F.; OLIVEIRA, L. S.; FERREIRA, F. B.; FLORES, B. D.; VILELA, A. C. F. - Avaliação da utilização de diferentes aglomerantes Nas propriedades mecânicas de pelotas autorredutoras de pó de aciaria. Contribuição técnica ao 70º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 15º ENEMET – Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ARANSIOLA, E.F.; OYEWUSI, T.F.; OSUNBITAN, J.A.; OGUNJIMI, L.A.O. - Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette - Energy Reports v. 5, 2019, p. 909–918
- BAPTÍSTA, A. L. B. Desenvolvimento de um briquete auto-fundente, multiconstituído de rejeitos, resíduos e descartes recicláveis gerados na planta integrada de produção de aço, aplicado como componente da carga de fornos de redução de ferro. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Centro Universitário de Volta Redonda ,Volta Redonda, 2016.
- BARROS, M. R. - Caracterização e avaliação da utilização de aglomerantes orgânicos e inorgânicos na aglomeração de finos de calcário. Dissertação (Mestrado em Gestão Organizacional na linha de Pesquisa Inovação). Universidade Federal de Goiás. Catalão, 2016.
- BAUER, L.A.F. - Materiais de construção. Editora Globo, Porto Alegre, 1978
- BENÍCIO, E. L. Utilização de resíduo celulósico na composição de briquetes de finos de carvão vegetal. 67p. Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2011.
- BRUGNERA, A. B. Estudo da produção de briquetes com resíduos da indústria de carvão com aglutinantes. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2016.
- BUZIN, P. J. W. K. Desenvolvimento de briquetes autorredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em forno elétrico a arco. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.
- CARVALHO, E. A.; BRINCK, V.; CAMPOS, A. R. Aglomeração: Briquetagem. In: Tratamento de minérios. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.15.1, p.651-674.
- CAVALCANTE, A. K. L. - Quirela de milho: uma alternativa ao amido como aglutinante na produção de briquetes de carvão. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Brasília. Brasília, 2017.
- D'ABREU, J. C. e FILHO, R. N. R. – Contribuição ao estudo da aglomeração de finos utilizando cimento ari, cimento AL - 61 e cal hidratada. Revista Tecnologia em Materiais, São Paulo, v. 1, n. 2, p.5 – 9, out. – Dez. 2004.

EFFTING, C. - Aglomerantes. Materiais de Construção I - UDESC - Centro de Ciências Tecnológicas Departamento de Engenharia Civil, Joinville, 2014

FLORES, B. D.; GUERRERO, A.; BORREGO, A. G.; DÍEZ, M. A.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F. - Comportamento de carbonização de briquetes de ferrocoque. Contribuição técnica ao 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro da ABM, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

FLORES, W. P.; YAMAJI, F. M.; VENDRASCO, L.; COSTA, D. R. Redução do volume de biomassa no processo de briquetagem. Revista da Madeira. Curitiba. n.121, p. 32-34, 2009.

FOGAÇA, J. R. V. – Ferro. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/ferro.htm>. Acesso em 27 de agosto de 2021.

FONSECA, V. O.; CAMPOS, A. R. Aglomeração: Pelotização. In: Tratamento de minérios. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.15.2, p.677-724.

FONTES, P. J.; QUIRINO, W. F.; OKINO, E. Y. Aspectos técnicos da briquetagem de carvão vegetal no Brasil. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, Departamento de Pesquisas, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, 1989. p. 1-14.

HAGEMANN, S. E. - Apostila de Materiais de Construção Básicos. Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, 2011.

HENARD, M. C., “Bio-Fuels Impacts on Oilseed Industry following Biofuel Boom”, USDA Foreign Agricultural Service GAIN Report, 2-5 (2007).

JONES, H; BOGER, D. V. Sustainability and waste management in the resource industries. Ind. Eng. Chem. Res., 51 (2012), pp. 10057–10065.

JUNCA, E.; OLIVEIRA, J. R.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Briquetagem da granalha de aço recuperada do resíduo de rochas ornamentais. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 64(2), 175-179, abr. jun. | 2011

LIMA, J. R. B. – Estudo da carboxi-metil-celulose como aglomerante para pelotização de concentrados de minério de ferro. XXV Seminário de Redução, Matérias-Primas e Resíduos na Siderurgia da ABM. 28 de novembro a 02 de Dezembro de 1994. Volta Redonda, RJ.

MARCONI, M. A., LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica (5. ed.). São Paulo: Atlas, 2003.

MORAES, S. L.; KAWATRA, S. K. - Avaliação do uso de combinações de aglomerantes na pelotização de concentrado de magnetita pela tecnologia de aglomeração em tambor (balling drum). Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 8, n. 3, p. 168-173, jul.-set. 2011.

MOURÃO, J. M. – Aspectos conceituais relativos à pelletização de minérios de ferro. Vitória-ES, 2017. Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br/download/file/aspectos-conceituais-relativos-a-pelotizacao-de-minerio-de-ferro>. Acesso em: 27 de jul. 2021

MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; TAKANO, C. A. S. L. C.; QUITES, E. E. C.; GENTILE, E. F.; SILVA, G. F. B. L.; BOLOTA, J. R.; ÇONÇALVES, M. FACO, R. J. – Introdução a siderurgia. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, 2007.

PEREIRA, F. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; LÚCIA, R. M. D.; JÚNIOR, W. P.; BIANCHE, J. J. Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio. *Floresta e Ambiente*, v.16, n.1, p. 23 - 29, 2009.

QUIRINO, W. F. – Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1991.

SILVA, A. C. - Aglomeração mineral: Briquetagem. Curso de Especialização em Tratamento de Minérios, MG – 2013.

SUNDE, M. Organic binder as a substitute for bentonite in ilmenite pelletization. Norwegian University of Science and Technology, 2012.

TAKANO, C.; NARITA, C. Y.; MOURÃO, M. B. - Ligantes alternativos para aglomerados autorredutores: uma análise. 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 17º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week, realizada de 26 a 30 de setembro de 2016, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

THOMS, L.J.; SNAPE, C.E.; TAYLOR, D. – Physical characteristics of cold cured anthracite / coke breeze briquettes prepared from a coal tar acid resin – *Fuel*, v. 78, nov., 1999, p.1691-1695

WOLFF, Ana P. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale. Ouro Preto: UFOP, 2009. 90 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia de Mina) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

ZAKON, A.; FONSECA, M. C. – Noções sobre aglomerantes minerais. Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1985.

ZAMBRANO, A. P.; TAKANO, C.; MOURÃO, M. B.; TAGUSAGAWA, S. Y. - Binder behavior on chromite-carbon composite pellets. *Materials Research*. 2016; 19(6): 1344-1350.