

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* OURO BRANCO
BACHARELADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

Edinalva Natalia da Silva Mendonça

**PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL E
FINOS DE MINÉRIO DE FERRO**

Ouro Branco

2025

EDINALVA NATALIA DA SILVA MENDONÇA

**PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL E
FINOS DE MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Ouro Branco para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: MSc. David Hebert Vieira

Ouro Branco

2025

M539p Mendonça, Edinalva Natalia da Silva.

Produção de briquetes a partir de finos de carvão vegetal e finos de minério de ferro / Edinalva Natalia da Silva Mendonça. – 2024.

37f.: il.col.

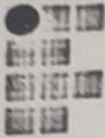
Orientador: David Hebert Vieira.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco, 2024.

1. Finos de minério de ferro. 2. Finos de carvão vegetal. 3. Briquetagem. 4. Aglomeração. I Mendonça, Edinalva Natalia da Silva. II. Vieira, David Hebert. III. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco. IV. Título.

CDU: 669.1

Catálogo: Márcia Margarida Vilaça - CRB-6/2235



DOCUMENTO ÚNICO DE DEFESA DE TCC (ANEXO IV)

ATA DA DEFESA DE TCC

No dia 12/02/2025, às 17:10 horas, o aluno Edinalva Nataliz de Silva do curso de _____ turma _____ do IFMG – Campus Ouro Branco defendeu o () TCC I TCC II e foi Aprovado (aprovado/reprovado) com a nota 8,0, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC. Caso seja aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 26/02/2025.

O aluno está ciente de que, caso não cumpra os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua nota será considerada zero e a sua defesa será anulada. Também está ciente de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela Instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes da defesa:

DECLARAÇÃO ANTI-PLÁGIO

Eu, Edinalva Nataliz de Silva, estudante do curso Eng. Metalúrgica do IFMG – Campus Ouro Branco, declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto ao IFMG – Campus Ouro Branco, que, **sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro**, que é de minha criação o trabalho de conclusão de curso que ora apresento.

Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de Falsidade Ideológica:

"Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante: Pena — reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalecendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte." Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Assinatura do aluno: Edinalva N. Silva

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO ORIENTADO

Orientador(a): Nome: <u>David Hebert Vieira</u>	Assinatura: <u>[Assinatura]</u>
Membro 2: Nome: <u>Carlos Roberto Ferreira</u>	Assinatura: <u>[Assinatura]</u>
Membro 3: Nome: <u>Leticia Maria de Melo S. Cheloni</u>	Assinatura: <u>[Assinatura]</u>
Membro 4: Nome: <u>Onídio Teixeira Pinto Júnior</u>	Assinatura: <u>[Assinatura]</u>
Membro 5: Nome: _____	Assinatura: _____
Aluno: Nome: <u>Edinalva Nataliz de Silva</u>	Assinatura: <u>Edinalva S.</u>

AGRADECIMENTOS

À Deus primeiramente pelo dom da vida;

À toda a minha família que sempre me apoiaram em meus estudos, me incentivando sempre a continuar.

A todos os meus amigos presentes em minha vida.

À Fundação Gorceix pelo apoio prestado no desenvolvimento do meu projeto.

Ao meu orientador David Hebert;

E a todos os grandes mestres do IFMG responsáveis por todo conhecimento compartilhado, contribuindo para geração de excelentes profissionais.

RESUMO

Em virtude da necessidade em ser preciso misturar carvões de diferentes teores para adequar a necessidade do processo, e considerando que combustíveis fósseis são altamente poluentes, vê-se a necessidade de rotas alternativas que possam minimizar esses impactos no meio ambiente. O uso do carvão vegetal na siderurgia surgiu como uma alternativa ao carvão mineral considerando o balanço positivo de carbono gerado ao longo de sua cadeia e também economicamente, porém, o carvão vegetal não consegue substituir o carvão mineral em sua totalidade no processo devido a algumas restrições que ele possui com relação à resistência e grandes volumes de produção. Considerando também que o minério de ferro está ficando cada vez mais pobre, necessitando de mais etapas de beneficiamento, de modo a ocasionar uma maior geração de finos no processo, vê-se a necessidade de uma melhor destinação a esses materiais. Os finos não podem ser utilizados no alto-forno porque afetam a permeabilidade do leito de fusão, de modo a dificultar as etapas de redução, reduzindo a eficiência do processo. Através desses problemas, a briquetagem surge como alternativa para que se possa retornar com esses finos no processo e concentrar a energia presente, de modo a aumentar sua resistência mecânica. Neste trabalho foram fabricados briquetes com finos de minério de ferro e finos de carvão vegetal, feita a caracterização química dos materiais e o ensaio de RDI (Índice de degradação sob redução) do briquete gerado. Foram propostas duas temperaturas de cura para realizar o RDI: na temperatura de 100°C o briquete apresentou um RDI = 74,70% e na temperatura de 500°C não foi possível realizar o ensaio porque os briquetes se desintegraram com facilidade. O briquete proposto nesse trabalho não atingiu a resistência mecânica suficiente para que se possa utilizá-lo no processo. Na realização do ensaio, observou uma forte combustão do carvão vegetal, sugerindo alta reatividade. Para trabalhos futuros, sugere-se realizar mais testes com porcentagens menores de carvão vegetal e reduzir a temperatura de cura do briquete.

Palavras-chave: Finos de minério de ferro, finos de carvão vegetal, briquetagem, aglomeração.

ABSTRACT

Due to the need to mix coals of different levels to suit the needs of the process, and considering that fossil fuels are highly polluting, there is a need for alternative routes that can minimize these impacts on the environment. The use of charcoal in steelmaking emerged as an alternative to mineral coal considering the positive carbon balance generated throughout its chain and also economically, however, charcoal cannot replace mineral coal in its entirety in the process due to some restrictions it has in relation to resistance and large production volumes. Also considering that iron ore is becoming increasingly poor, requiring more processing steps, in order to cause a greater generation of fines in the process, there is a need for a better destination for these materials. Fines cannot be used in the blast furnace because they affect the permeability of the melting bed, making the reduction steps difficult, reducing the efficiency of the process. Due to these problems, briquetting appears as an alternative so that these fines can be returned to the process and concentrate the energy present, in order to increase its mechanical resistance. In this work, briquettes were manufactured with iron ore fines and charcoal fines, chemical characterization of the materials and the RDI (Reduction Degradation Index) test of the generated briquette were carried out. Two curing temperatures were proposed to perform the RDI: at a temperature of 100°C the briquette presented an RDI = 74,70% and at a temperature of 500°C it was not possible to carry out the test because the briquettes disintegrated easily. The briquette proposed in this work did not reach sufficient mechanical resistance to be used in the process. When carrying out the test, a strong combustion of charcoal was observed, suggesting high reactivity. For future work, it is suggested to carry out more tests with lower percentages of charcoal and reduce the curing temperature of the briquette.

Keywords: Iron ore fines, charcoal fines, briquetting, agglomeration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Princípio de funcionamento de contra corrente do alto-forno.....	13
Figura 2 - Eucalipto.....	14
Figura 3 – Carvão vegetal.....	14
Figura 4 - Princípio da compressão em prensas de rolos	21
Figura 5 - Briquetadeira extrusora.....	21
Figura 6 – Briquetadeira em prensas hidráulicas.....	22
Figura 7 – Fluxograma do processo.....	25
Figura 8 – Mistura manual dos materiais.....	26
Figura 9 – Briquetadeira de rolos.....	26
Figura 10 – Carregamento dos materiais.....	26
Figura 11 – Briquetes sendo produzidos.....	27
Figura 12 – Briquetes produzidos.....	27
Figura 13 – Briquetes preparados para cura.....	28
Figura 14 – Equipamento utilizado para o ensaio de RDI.....	29
Figura 15 – Distribuição granulométrica do minério.....	30
Figura 16 – Amostra após ensaio de RDI.....	32
Figura 17 – Equipamento em funcionamento para teste de RDI.....	32
Figura 18 – Briquetes após endurecimento a 500°C.....	33
Figura 19 – Briquetes se desintegrando com facilidade.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de rejeitos de mineração gerados referentes ao ferro (em 1 mil t).....	10
Tabela 2 - Reservas nacionais de carvão mineral, em milhões de t – 1995 a 2007.....	15
Tabela 3 - Insumos e componentes obtidos em 1 tonelada de carvão.....	15
Tabela 4 - Reservas brasileiras de minério de ferro (medidas e indicadas).....	16
Tabela 5 - Principais minerais de ferro.....	16
Tabela 6 - Variáveis de processo para cada etapa de produção de briquete.....	17
Tabela 7 - Exemplos de tipos diferentes de aglomerantes.....	19
Tabela 8 - Alguns aglomerantes utilizados na briquetagem de partículas finas.....	20
Tabela 9 - % de constituintes do briquete.....	24
Tabela 10 - Análise química do minério de ferro.....	30
Tabela 11 – Análise imediata da moinha de carvão vegetal.....	31
Tabela 12 – Análise granulométrica da moinha do carvão vegetal.....	31

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

C – Carbono

Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

DEPAI – Departamento de Análises e Inovações

DEPEC – Departamento de Pesquisa e Engenharia Continuada

DETEMM – Departamento de Tecnologia em Mineração e Metalurgia

E. – Eucalyptus

Fe – Ferro

IA – Índice de Abrasão

Kg – Quilograma

N₂ – Gás Nitrogênio

NaOH – Hidróxido de Sódio

Nm³ – Normal Metro Cúbico

°C – Graus Celsius

PR – Paraná

RDI – Índice de Redução-Desintegração

RI – Índice de Redutibilidade

RS – Rio Grande do Sul

SC – Santa Catarina

SP – São Paulo

t – Tonelada

TI – Índice de Tamboramento

UF – Unidade Federativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Alto-forno	13
3.2	Matérias-primas utilizadas no alto-forno.....	14
3.2.1	Carvão vegetal	14
3.2.2	Carvão mineral.....	14
3.2.3	Minério de ferro	15
3.3	Briquetagem.....	17
3.3.1	Aglomerantes	19
3.3.2	Tipos de briquetadeiras	20
3.4	Economia circular	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Materiais	24
4.2	Métodos	25
4.2.1	Fluxograma do processo	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1	Caracterização das matérias-primas.....	30
5.1.1	Finos de minério de ferro.....	30
5.1.2	Moinha carvão vegetal.....	31
5.2	Ensaio de RDI dos briquetes.....	31
6	CONCLUSÃO	34

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
-----------------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o conseqüente crescimento econômico têm colocado o planeta em desvantagem quanto ao impacto das atividades produtivas no meio ambiente, local que as fábricas vêm para obtenção de matéria-prima e descarte de resíduos (BAPTISTA, 2013).

A causa dos problemas ocorridos no meio ambiente, considerando em parte, se deve ao quanto são complexos os processos industriais realizados pelo homem. Não importa que tipo de material ou a finalidade para que se destina, qualquer produto provocará impacto no meio ambiente, independente de ser no seu processo de produção, nas matérias primas que são utilizadas ou também na disposição final do produto (BAPTISTA, 2013).

Através disso, as indústrias veem uma necessidade cada vez mais crescente de reaproveitamento de seus resíduos, tanto pelo lado econômico, como também considerando toda a questão ambiental.

As empresas do setor mineral, devido a seu grande volume de rejeitos produzidos, enquadram-se nesse quesito devido à necessidade de buscar meios que viabilizem o reaproveitamento dos rejeitos e também, melhor uso da matéria-prima. Com a redução de teor nas jazidas, há uma necessidade de beneficiar cada vez mais os materiais, resultando no crescente aumento de finos gerados. O Brasil possui uma estimativa de 500 milhões m³/ano na geração de rejeitos provenientes da mineração (CONEXÃO MINERAL).

A tabela 1 apresenta a quantidade de rejeitos provenientes da mineração.

Tabela 1: Quantidade de rejeitos de mineração gerados referentes ao ferro (em 1 mil t).

Ano	Ferro
1996	86.288
1997	72.954
1998	57.986
1999	67.432
2000	61.619
2001	66.335
2002	71.425
2003	81.760
2004	104.536
2005	95.641
Total	765.977

Fonte: IPEA, 2012 – Adaptado.

O problema da geração de finos é que eles afetam a permeabilidade do leito de fusão no alto-forno, de modo a dificultar as etapas de redução, reduzindo a eficiência do processo (BARBOSA, 2018).

Além dos problemas ambientais gerados pela disposição dos rejeitos, pode-se incluir também a dificuldade de áreas disponíveis e prazos amplos para fazer o licenciamento de atividades resultantes do processo minerário como: cavas, empilhamento para dispor os estéreis e barragens para rejeitos. A escassez do minério de ferro que possui alto teor também é uma questão importante para buscar tecnologias que viabilizem trabalhar com minérios que possuem teor menos elevado, como é o caso de minérios itabiríticos (CARVALHO, 2012).

Neste cenário, este trabalho visa fabricar briquetes a partir de finos de minério de ferro e finos de carvão vegetal, que serão formados a partir de matérias primas provenientes do setor mineiro-metalúrgico, agregando-lhe uso para seu possível retorno ao processo. Para isso será avaliado o índice de degradação sob redução (RDI) do briquete gerado.

A fabricação de briquetes será feita através de um tipo de processo de aglomeração denominado briquetagem, onde as partículas finas de resíduos serão aglomeradas através de pressão aplicada gerando um corpo compacto com as dimensões definidas, sendo chamado de briquete, podendo ser necessário ou não o uso de aglutinantes na mistura (BUZIN, 2009).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar a qualidade de briquetes produzidos com finos de minério de ferro e de carvão vegetal para uso na siderurgia.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a análise química e caracterização granulométrica dos finos de minério de ferro e finos de carvão vegetal;
- Avaliar a qualidade metalúrgica dos briquetes quanto à resistência mecânica gerada através do ensaio de Desintegração sob Redução (RDI).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alto-forno

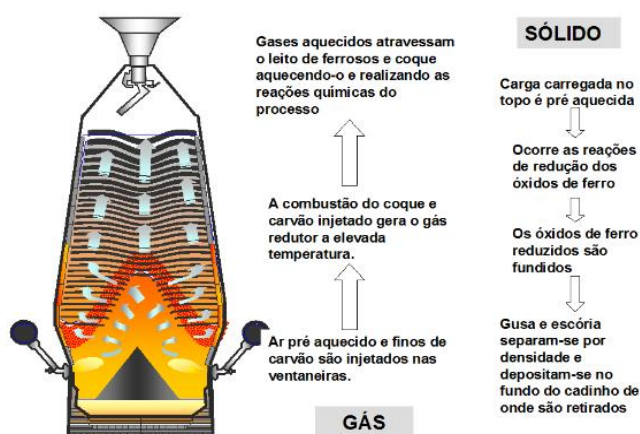
O alto-forno é um reator metalúrgico onde ocorre a produção de ferro-gusa (que contém 4 a 4,5% de carbono, 0,2 a 1% de silício, dentre outros elementos como o manganês, fósforo e enxofre), utilizando carbono proveniente do coque ou carvão vegetal, com o objetivo de reduzir e fundir os óxidos de ferro que estão presentes em sua carga. A partir da obtenção do ferro-gusa, este segue para a aciaria a oxigênio onde ocorrerá a fabricação do aço (VIEIRA, 2012).

O alto-forno possui formato de cuba operando em regime de contracorrente, ou seja, a carga sólida que é abastecida no topo do forno descende até a região denominada cadinho, e em sentido ascendente tem-se os gases que irão percolar a carga sólida até a região denominada goela do alto-forno (VIEIRA, 2012). Pelas ventaneiras será soprado ar que irá reagir com o carvão e com o coque de modo a produzir gás CO, que é um gás redutor, e calor. Através dessas reações, os gases começarão a fundir a carga metálica e a escória no inferior do alto-forno, apresentando-se em temperaturas superiores a 2000°C. O gás CO promoverá a redução dos óxidos pelo contato com a carga metálica. (SPENCE et al., 1997apud GASPARINI, 2016).

A matéria-prima utilizada no alto-forno deve ter resistência suficiente para ser carregada considerando uma coluna de carga de 25 a 30 metros para uso em alto-forno a coque, e 15 a 18 metros para uso em forno a carvão vegetal (MACHADO, 2020).

A figura 1 ilustra o princípio de funcionamento de contracorrente do alto-forno.

Figura 1 - Princípio de funcionamento de contracorrente do alto-forno.



Fonte: (GUIMARARÃES, 2003)

3.2 Matérias-primas utilizadas no alto-forno

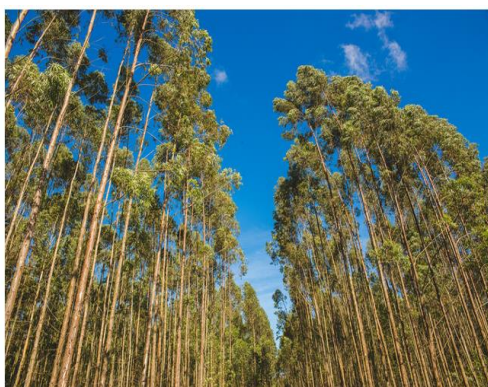
3.2.1 Carvão vegetal

Consideram-se as florestas nativas e as florestas plantadas como as origens para a geração de carvão vegetal. Em relação às florestas plantadas no Brasil, tem-se o gênero *Eucalyptus* presente em maior quantidade. A madeira de floresta nativa era mais utilizada no início da siderurgia, colaborando para grandes áreas de desmatamento (BRITO E BARRICHELLO, 2006 apud SANTOS, 2010).

Com um rápido crescimento e também densidade que são características consideráveis, o *Eucalyptus* é a espécie mais utilizada para produzir carvão vegetal. Possui capacidade de se renovar de maneira fácil e gera um produto com boa qualidade. No Brasil, as plantações de espécies de *Eucalyptus* mais utilizadas são *E. Grandis*, *E. Saligna*, *Corymbia Citriodora*, *E. Camadulensis* e também a *E. Urophylla* (SANTOS, 2010).

A figura 2 representa uma plantação de Eucalipto e a figura 3 representa o carvão vegetal produzido através das florestas.

Figura 2 - Eucalipto



Fonte: Potencial Florestal

Figura 3 - Carvão vegetal



Fonte: APERAM

3.2.2 Carvão mineral

O carvão mineral é uma massa compacta formada por matéria vegetal estratificada cujo processo de decomposição é interrompido pela ação geológica. Mudanças nas propriedades da matéria vegetal envolvem profundas mudanças em sua composição estrutural, incluindo a evolução da umidade, dióxido de carbono e metano (ARAUJO, 2005).

No Brasil, tem-se 32 bilhões de toneladas em reservas de carvão mineral, representando 0,3% das reservas mundiais. Sendo que, os estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul são onde concentram as reservas economicamente exploráveis, dentre essas regiões, somente Santa Catarina possui carvão coqueificável,

podendo também ter a região de Candiota, em Rio Grande do Sul, como provedora de carvão mineral futuramente (ARAUJO, 2005). A Tabela 2 mostra as principais reservas nacionais de carvão mineral entre os anos de 1995 a 1997.

TABELA 2: Reservas nacionais de carvão mineral, em milhões de toneladas – 1995 a 2007

UF	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
PR	71	70	70	64	64	64	2	2	5	5	4	4	4
RS	4502	5177	5065	5763	5763	5717	5086	5124	5121	5281	5256	5252	5247
SC	1899	1551	1556	1550	1525	1576	1417	1379	1396	1425	1418	1391	1382
SP	19	19	19	19	19	19	3	3	3	3	2	2	2
Total	6491	6817	6711	7397	7371	7377	6508	6508	6525	6713	6680	6648	6635

Fonte: ANM-DNPM/DIDEM – Adaptado

Para uso nas siderúrgicas, o carvão mineral tem que apresentar determinadas propriedades e, com o esgotamento dos depósitos de carvão de médio teor de voláteis, fez-se necessário a mistura de carvões de diferentes teores de voláteis, a fim de combinar suas propriedades, para atingir valores que atendam exigências como um carvão de médio teor (ARAUJO, 2005).

Na Tabela 3 está representada a quantidade aproximada de insumos e componentes obtidos em 1 tonelada de carvão.

TABELA 3: Insumos e componentes obtidos em 1 tonelada de carvão mineral coqueificável.

Coque de alto forno (kg)	Coque Fino (kg)	Moinha (kg)	Alcatrão (kg)	Sulfato de amônio (kg)	Óleos leves (l)	Gás (nm ³)
600 -650	50-100	40-75	30-45	10-14	78-125	310-360

Fonte: ARAUJO, 2005 - Adaptado

3.2.3 Minério de ferro

Dentre os elementos mais abundantes da crosta terrestre, o ferro ocupa a quarta posição com aproximadamente 5%. Considera-se que em mais de 400 minerais com fe em sua composição, possuem teores aproximadamente entre 1% a 70% (JR, 2004).

Das reservas mundiais de minério de ferro, o Brasil possui 7,2% contabilizando cerca de 28,9 bilhões de toneladas. Dentre as regiões do Brasil tem-se Minas Gerais com 67%, Pará com 16% Mato Grosso do Sul com 15,5% e outros estados como, Alagoas, Amazonas, Bahia, Ceará, Goiás, Pernambuco, Rio Grande do Norte e São Paulo, possuindo 1,5% (ANM). A Tabela 4 apresenta as reservas de minério de ferro (medidas e indicadas) presentes no país juntamente o percentual de cada Estado.

TABELA 4: Reservas brasileiras de minério de ferro (medidas e indicadas)

Unidade: tonelada – Ano-base: 2007

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESERVAS	(%)
Alagoas	209.005	0,001
Amazonas	71.933.809	0,249
Bahia	2.046.658	0,007
Ceará	25.677.321	0,089
Distrito Federal	1.191.610	0,004
Goiás	4.269.208	0,015
Minas Gerais	19.359.905.311	66,968
Mato Grosso do Sul	4.472.348.567	15,470
Pará	4.616.877.438	15,97
Pernambuco	8.942.804	0,031
Rio Grande do Norte	1.086.925	0,004
São Paulo	344.577.533	1,192
TOTAL	28.909.066.189	100,00

ANM- DNPM/DIDEM – Adaptado.

Mesmo sendo bem distribuídas, poucas classes de minerais de ferro são economicamente viáveis para exploração devido não possuir quantidade ou concentração de ferro suficiente nos corpos de minérios (JR, 2004).

Em função da sua composição química, os minérios de ferro, cuja exploração é economicamente viável, são classificados em óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos (silicatos possuem menos valor econômico) (JR, 2004). Na Tabela 5 encontram-se representados os minerais de ferro economicamente exploráveis. Dessas classes, apenas os óxidos são explorados de forma econômica no Brasil.

Tabela 5 Principais minerais de ferro

Classe	Mineral	Composição química	Teor de Fe (%)
Óxido	Magnetita	Fe ₃ O ₄ (Óxido de Ferro)	72,36
	Hematita	Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	69,96
	Ilmenita	FeTiO ₃ (Óxido de Titânio e Ferro)	36,80
	Limonita (Goethita)	2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O (HFeO ₂)	62,85
Carbonato	Siderita	FeCO ₃	48,2
Sulfeto	Pirita	FeS ₂	46,55
	Marcassita	FeS ₂	46,55
	Pirrotita	HFe _{1-α}	60,45

Fonte: (ARAUJO, 2005) – Adaptado.

3.3 Briquetagem

A briquetagem é um processo de aglomeração de partículas finas através da pressão, podendo ou não ser utilizado um aglutinante no processo, resultando em um produto que, além de estar compactado, estará de acordo com as especificações para a finalidade a que será destinado. Com esse processo de aglomeração de partículas finas, observa-se a redução do volume deste material, viabilizando economicamente o transporte e armazenamento do mesmo (DEMIRBA, 1998 apud CARVALHO et al., 2010).

A tabela 6 apresenta as principais variáveis que impactam no processo de briquetagem.

Tabela 6: Variáveis de processo para cada etapa de produção de briquete.

Etapa	Variáveis de processo
Condicionamento e mistura	Umidade Densidade Porosidade Granulometria Proporção das matérias-primas Uso de aglomerantes (tipo e quantidade)
Briquetagem	Teor de umidade Distribuição granulométrica Existência de pré-adensamento Taxa de alimentação Pressão de compactação Taxa de deformação Rotação dos rolos de briquetagem Tamanho e formato dos briquetes
Tratamento Térmico	Patamar de temperatura Tempo de exposição à temperatura máxima Taxa de aquecimento

Fonte: (LEÃO, 2021) - Adaptado

A umidade da mistura é um parâmetro considerado um dos mais importantes para a fabricação de briquetes. Somente quando o material já se apresenta com uma forma com solução aquosa que não é necessário acrescentar água no material (CARVALHO et al., 2010).

Existem níveis ideais de umidade para a briquetagem, fora desses intervalos, a resistência mecânica dos briquetes diminui. O nível ideal de umidade varia conforme o material e o aglomerante, influenciando na pressão aplicada e na compatibilidade das

misturas. Com relação aos formatos e tamanhos, os briquetes podem ser: retangular, cilíndrico, elipsoide, dentre outros (LEÃO, 2021).

Os briquetes podem ser endurecidos a temperatura ambiente, em estufas e secadores com temperaturas de 400°C ou também em fornos podendo ser acima de 1000°C, com a finalidade de adequar a resistência mecânica aos valores desejados para empregá-lo ao processo. Ao serem submetidos a altas temperaturas, os briquetes que tiveram o processo de endurecimento realizado à temperatura ambiente, apresentam baixa resistência mecânica. Nessas condições, esse tipo de briquete é mais utilizado em processos de baixa pressão (CARVALHO et al., 2010).

Após a formação dos briquetes, estes devem ser aquecidos e após, resfriados de forma lenta para prevenir a ocorrência de fratura proveniente de choques térmicos (CARVALHO et al., 2010).

Alguns fatores são importantes considerar no processo de geração de briquetes para que se possa gerar um produto de qualidade, dentre eles tem-se (CARVALHO et al., 2010):

- (i) Trabalhabilidade, ou seja, avaliar as características físicas e químicas do material aglomerado e também das condições técnicas necessárias para a briquetagem (à quente, à frio, sem aglutinante, com aglutinante, composição e umidade da mistura, forma e tamanho dos briquetes).
- (ii) Condições operacionais necessárias para aglomeração do material, ou seja, a pressão e a velocidade de trabalho, além do ajuste dos teores de umidade da mistura para obtenção de briquetes com a resistência mecânica necessária à aplicação desejada.
- (iii) Operações complementares necessárias para melhorar a qualidade do briquete, tais como a secagem ou ajuste da temperatura dos finos antes de serem aglomerados, classificação por tamanho dos diferentes componentes da mistura, a pré-mistura, a pré-prensagem, cura a frio ou a quente do produto obtido, as suas condições de embalagem/estocagem, etc.

A briquetagem pode ser realizada tanto à frio como à quente. Um exemplo de briquetagem à quente seria realizar o processo em resíduos siderúrgicos com alto teor de ferro metálico e também em produtos aglomerados com alta resistência mecânica. Pode-se citar a produção de briquetes de ferro esponja à quente (HBI) no qual o calor contido no ferro esponja na saída de seus reatores de produção será aproveitado para a briquetagem à quente do material. Esse processo de briquetagem à quente tem como finalidade obter um material mais compacto e aglomerar os finos, afim de diminuir a reoxidação do mesmo devido a redução da superfície que será exposta exposição à atmosfera (BUZIN, 2009).

Na briquetagem, comparada a pelotização, tem-se a vantagem em relação a resistência mecânica e em poder controlar as dimensões do briquete a ser gerado. Apesar dessas vantagens, vê-se um grande desgaste no maquinário em relação a abrasão sofrida (NARITA, 2015).

Em relação à briquetagem do carvão vegetal, poderá usar-se um ligante de modo que será mais econômico para o processo ao qual, seu uso, exigirá conhecimento sobre determinados assuntos (forças coesivas entre as partículas, propriedade de adesão do elemento ligante, como a partícula e o ligante se comportarão quando submetidos a compactação, e todas as mudanças que ocorrem ao longo do processo tanto físicas quanto químicas) para que obtenha as características necessárias para que o material se adeque as necessidades do ambiente a ser utilizado (LUCENA et al., 2008).

Importante considerar que o processo de carbonização irá influenciar na porosidade, solidez e resistência do carvão vegetal justificando estudos relacionados aos tratamentos térmicos submetidos pelos briquetes no processo de secagem (LUCENA et al., 2008).

3.3.1 Aglomerantes

Considera-se aglomeração como um termo geral que é utilizado para indicar operações às quais aplicam-se em materiais cuja granulometria é fina, com a finalidade de transformar esses materiais em corpos onde suas partículas estejam consolidadas, através de mecanismos que podem ser físicos e também químicos, aos quais vão dar forma e tamanho adequado para que seja empregado ao processo (CARVALHO et al., 2010).

Devido alguns materiais ao serem compactados não possuem resistência à compressão e também ao impacto, utiliza-se aglomerantes aos quais vão permitir maior aderência das partículas. De acordo com a Tabela 7, vê-se que os aglomerantes estão divididos em: matriz, filme ou aglomerantes químicos (CARVALHO et al., 2010).

Tabela 7: Exemplos de tipos diferentes de aglomerantes.

Tipo Matriz	Tipo Filme	Aglomerantes Químicos
Alcatrão	Água	Ca(OH) ₂ + molasses
Asfalto de Petróleo	Silicato de sódio	Silicato de Sódio + CO ₂
Cimento Portland	Lignosulfonatos	Epóxies

Fonte: (CARVALHO et al., 2010) - Adaptado

Aglomerantes do tipo matriz engastam as partículas em uma fase substancialmente contínua. Logo, as propriedades desses aglomerantes, em grande parte, determinam as propriedades dos briquetes. Os do tipo filme dependem da evaporação de algum tipo de solvente para desenvolver a sua resistência, podem ser utilizados para processos que utilizem baixas pressões e para fabricar briquetes com estrutura mais porosa (LUZ et al., 2010).

Os aglomerantes também podem ser divididos em líquidos, sólidos, solúveis e insolúveis em relação a água. Estão representados na Tabela 8, exemplos de aglomerantes que são utilizados no processo de briquetagem com partículas finas (CARVALHO et al., 2010).

Tabela 8: Alguns aglomerantes utilizados na briquetagem de partículas finas

Material	Aglomerantes
Minério de ferro	Cal e melão
Cromita	Cal e melão
Fluorita	Cal, melão ou silicato de sódio
Bauxita	Cimento Portland
Carvão	Melão
Cobre	Lignosulfonatos
Magnesita	Lignosulfonatos
Areia de quartzo	Água e NaOH
Barita	Melão e <i>black-ash</i>

Fonte: (CARVALHO et al., 2010)- Adaptado

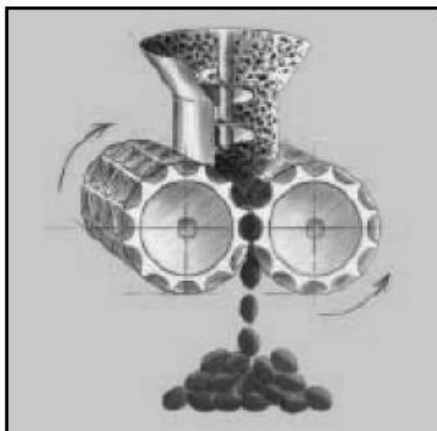
Para a produção de briquetes com resistência mecânica adequada, a quantidade de aglomerante utilizado irá depender de alguns fatores, dentre eles, tem-se: a qualidade do material que irá ser briquetado, o tipo de aglomerante a ser utilizado, a porcentagem de partículas presentes na mistura (podendo ser finas ou grossas) e a superfície específica que apresenta o material. Em relação a partículas finas, quanto menor for sua porcentagem menos aglomerante será necessário para que seja gerado um briquete com boa qualidade (CARVALHO et al., 2010).

3.3.2 Tipos de briquetadeiras

O processo de aglomeração de partículas finas poder realizado com auxílio de briquetadeiras de diferentes tipos:

I. Briquetagem em prensas de rolos (Figura 4) que possui dois rolos paralelos de modo que o material fluirá em fluxo contínuo. Esses rolos paralelos com cavidades ou moldes presentes na sua superfície, girando em sentido contrário, possuindo a mesma velocidade e estando ligados um ao outro (CARVALHO et al., 2010). Nesse processo o material será introduzido entre os rolos gerando o briquete através dos vãos do equipamento. Através do escoamento de materiais sob pressão é gerado briquetes que possuem baixa porosidade. Para ter-se como resultado uma maior densidade aparente, os materiais devem ter o potencial de aglomerar sob pressão, e possuírem os tamanhos adequados.

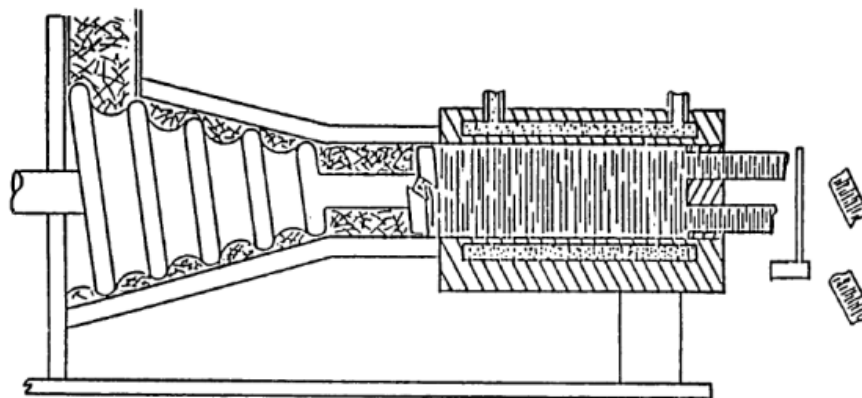
Figura 4 – Princípio da compressão em prensas de rolos



Fonte: (KOPERN apud CARVALHO et al., 2010)

II. Briquetagem por extrusão contínua em máquinas do tipo maromba; nesse equipamento, a carga sairá com os briquetes cortados de acordo com as dimensões adequadas. Esse processo é feito por extrusão após a compactação da carga (NARITA, 2015). A figura 5 ilustra uma briquetadeira extrusora.

Figura 5 - Briquetadeira extrusora.



Fonte: (COSGROVE – DAVIS, 1985 apud NARITA, 2015)

III. Briquetagem em prensas hidráulicas: processo onde os moldes não são preenchidos de forma contínua. A figura 6 demonstra esse modelo de briquetadeira.

Figura 6 – Briquetadeira em prensas hidráulica



Fonte: (METSO)

3.4 Economia circular

Na economia circular, a economia e o meio ambiente não são vistos por interligações lineares, mas por uma relação circular, tendo como característica evitar ou minimizar a deterioração ambiental e conservar recursos naturais por mais tempo por meio de um gerenciamento de resíduos eficiente (SU, 2013).

Comparando a atividade humana de 1750 até a era industrial com os últimos 650 mil anos de documentação geológica, vê-se que a mesma tem provocado mais aumento na atmosfera das concentrações de dióxidos de carbono, metano e óxidos de nitrogênio. (GENTIL, 2008)

O desenvolvimento da economia circular no setor mineral tem grande potencial para solucionar problemas como: resolver os desafios de escassez de recursos minerais, minimizar o desperdício de recursos e poluição ambiental, aumentando a taxa de utilização e o desenvolvimento sustentável (ZHAO,2012).

De acordo com Gentil (2008): “As temperaturas mundiais podem aumentar entre 1,1°C e 6,4°C durante o século 21” e segundo Somavilla (2013): “Frente à crescente necessidade de encaminhar adequadamente os rejeitos gerados pela indústria, a busca por tecnologias apropriadas e viáveis do ponto de vista econômico é de fundamental importância para a escolha do tipo de tratamento que será efetuado”.

Utilizar a abordagem de transformação de resíduos em coprodutos atende aos princípios da Economia Circular de preservar e aumentar o capital natural, fomentar a eficácia do sistema e otimizar a produção de recursos, resultando na mitigação de passivos ambientais e benefícios econômicos e sociais a sociedade (VILAÇA, 2020). Na briquetagem, a utilização de finos de minério de ferro contribui para a Economia Circular, visto que, um material que antes era descartado devido a sua baixa granulometria acabou se tornando matéria-prima para um processo que cada vez mais está se inovando, crescendo e atraindo a atenção de muitas empresas, pesquisadores e já vem sendo aplicados em algumas indústrias como por exemplo a VALE.

A VALE com quase duas décadas de pesquisa, acionou em 2023, de forma simbólica, o funcionamento da primeira planta de briquete de minério de ferro do mundo. Sendo prevista a segunda planta em 2024. As duas plantas estão localizadas em Vitória-ES, na unidade de Tubarão, com capacidade de produzir 6 milhões de toneladas por ano. O briquete produzido pode reduzir em até 10% as emissões de GEE (gases de efeito estufa) no alto-forno (VALE, 2023).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para elaboração deste trabalho foram utilizadas as matérias-primas conforme demonstrado na tabela 9.

Tabela 9: % de constituintes do briquete

Matérias-primas	Proporção
Finos de minério de ferro	80
Finos de carvão vegetal	10
Melaço da Cana de Açúcar	5
CaO	5

Fonte: Próprio Autor

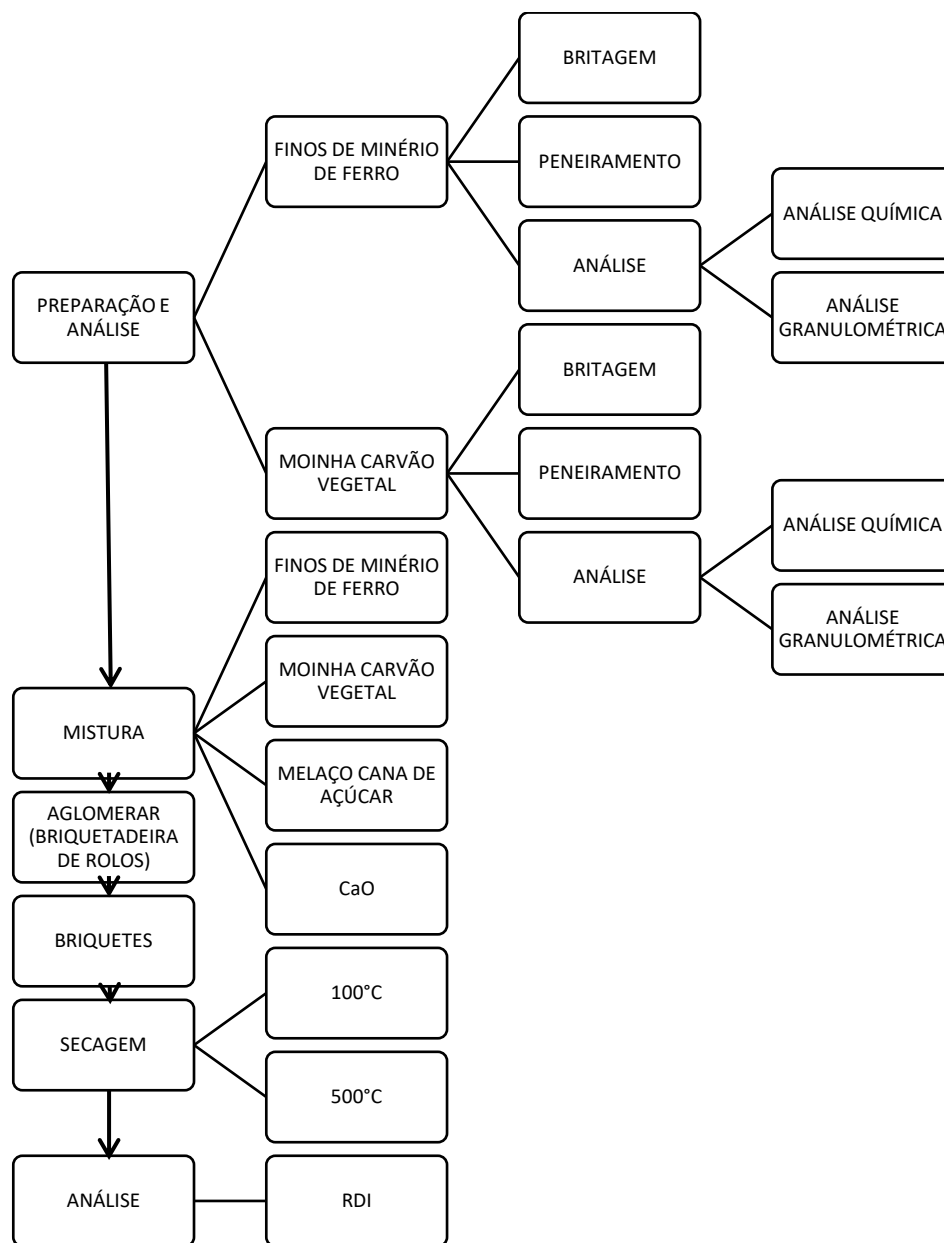
As matérias-primas secas aplicadas nesse trabalho foram fornecidas pela Fundação Gorceix. O melaço da cana de açúcar foi fornecido por produtores locais. Todo o processo de produção e ensaios realizados foram realizados nas dependências da Fundação Gorceix, nos laboratórios do Departamento de Pesquisa e Engenharia Continuada – DEPEC, Departamento de Análises e Inovações – DEPAI e no Departamento de Tecnologia em Mineração e Metalurgia – DETEMM.

4.2 Métodos

4.2.1 Fluxograma do processo

A figura 7 demonstra a metodologia utilizada no processo de briquetagem.

Figura 7: Fluxograma do processo



Fonte: Próprio Autor

Na etapa de Preparação e Análise, para a utilização do fino de minério de ferro e moinha de carvão vegetal, foi necessária uma adequação granulométrica para atingir a granulometria desejada, feito com o auxílio de um britador de mandíbulas e peneiramento a úmido. Foi utilizada peneira de abertura 3mm para o minério de ferro, e 2mm para a moinha do carvão vegetal. As análises químicas dos materiais foram realizadas por meio da técnica de fluorescência de raios X utilizando um espectrômetro

de marca *Panalytical Zetium* em conjunto com o *software SuperQ* fornecido pelo DEPAI - Departamento de Análises e Inovações (Fundação Gorceix).

Após essa adequação granulométrica e análise química, as matérias-primas foram conduzidas para a etapa de mistura do material. Esse processo consiste na mistura dos materiais utilizados para a fabricação do briquete, de modo a obter um material homogeneizado, com as proporções de materiais bem distribuídas. Como se trata de um teste em bancada e em pequena escala, a mistura foi realizada manualmente, conforme ilustrado na figura 8. A umidade da mistura ficou em torno de 8%.

Figura 8: Mistura manual dos materiais



Fonte: Próprio Autor

Após a etapa de mistura, o material foi conduzido para a briquetadeira de rolos, conforme demonstrado na figura 9, para aglomerar as partículas, gerando os briquetes. A briquetadeira é alimentada na parte superior, demonstrado na figura 10, onde, através dos rolos existentes, que giram em sentidos contrários, é feita uma compactação das partículas. A pressão de compactação utilizada foi na faixa de 10Mpa. Na figura 11 está demonstrando os briquetes sendo produzidos.

Figura 9: Briquetadeira de rolos



Fonte: Próprio Autor

Figura 10: Carregamento dos materiais



Fonte: Próprio Autor

Figura 11: Briquetes sendo produzidos



Fonte: Próprio Autor

Após a briquetadeira compactar a mistura, é gerado o briquete, demonstrado na figura 12, ao qual foi exercida uma pressão manual sobre eles para definirem se estavam com uma resistência mecânica suportável para dar continuidade aos testes de RDI.

Figura 12: Briquetes produzidos



Fonte: Próprio Autor

Em seguida, os briquetes foram conduzidos ao processo de cura onde foram submetidos a um processo de endurecimento nas temperaturas de 100°C e 500°C com o objetivo de aumentar sua resistência mecânica. A figura 13 demonstra os briquetes preparados para o processo de cura.

Figura 13: Briquetes preparados para cura

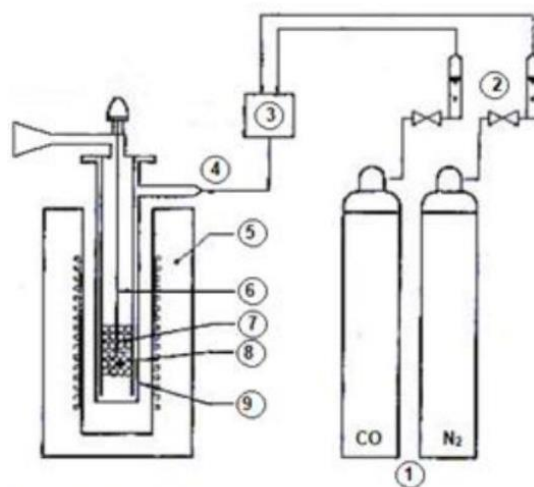


Fonte: Próprio Autor

Após a etapa cura, os briquetes foram submetidos ao ensaio de RDI para determinar o índice de degradação do material e definir se o briquete será viável para utilização.

O ensaio foi realizado seguindo a norma ISO 4696-2. Esse ensaio consiste em reduzir a amostra com uma massa aproximada de 500g isotermicamente a temperatura de 550°C, por um gás redutor constituído de 30% de CO e 70% de N₂ por 30 minutos. Após essa etapa, a amostra reduzida será colocada em um tambor que passará por 900 rotações. Posteriormente foi realizado o peneiramento com uma peneira de abertura de 2,8 mm. Com a fração da amostra menor que 2,8 mm se determina o índice de redução-desintegração (RDI). A figura 14 ilustra o equipamento utilizado para realização dos ensaios de RDI.

Figura 14 -Equipamento utilizado para os ensaios de RDI.



1. Cilindros de gás com manômetro e válvula de redução; 2. Medidores de vazão de gás;
3. Misturador de gases; 4. Entrada de gases; 5. Forno aquecido eletricamente; 6. Termopar
7. Amostra; 8. Camada de pelotas refratárias; 9. Retorta de parede dupla com placa perfurada como porta-amostra

Fonte: (FIGUEIREDO, 2018).

O RDI, expresso na forma de porcentagem em massa, pode ser calculado a partir da equação 4.2

$$RDI - 2_{2,8} = 100 - \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (4.2)$$

Em que:

m_0 = massa, em gramas, da amostra após a redução e antes do tamboramento.

m_1 = massa, em gramas, da fração da amostra maior que 2,8mm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização das matérias-primas

5.1.1 Finos de minério de ferro

5.1.1.1 Análise química

A Tabela 10 apresenta o resultado da análise química do fino de minério de ferro. Observa-se que o teor de ferro é de aproximadamente 59,83%, o teor de sílica é de 10,08% e baixo teor de fósforo, com apenas 0,07%.

Tabela 10: Análise química do minério de ferro

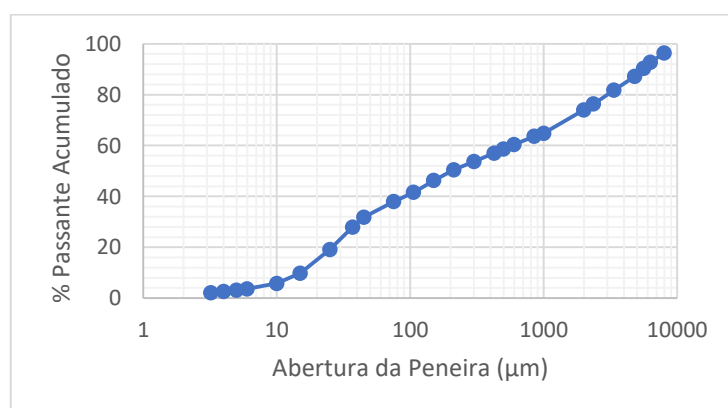
AMOSTRA	MINÉRIO DE FERRO (%)
Fe	59,83
SiO ₂	10,08
Al ₂ O ₃	0,33
Mn	0,80
P	0,070
CaO	0,04
MgO	0,01
TiO ₂	0,08
Na ₂ O	<0,01
K ₂ O	0,01
Cr ₂ O ₃	0,06
PPC	1,97
SUM	99,32

Fonte: Próprio Autor

5.1.1.2 Análise granulométrica

A figura 15 mostra a distribuição granulométrica do fino de minério de ferro utilizada na fabricação dos briquetes. Pela curva de análise granulométrica, pode-se inferir que o d80 da amostra é de aproximadamente 3,35 mm, ou seja, 80% da amostra é menor que 3,35mm.

Figura 15: distribuição granulométrica do minério



Fonte: Próprio Autor

5.1.2 Moinha carvão vegetal

5.1.2.1 Análise química

A tabela 11 representa a análise imediata da moinha de carvão vegetal.

Tabela 11: Análise imediata da moinha de carvão vegetal

AMOSTRA	CARVÃO VEGETAL (%)
CFIXO	62,57
CZ	1,71
MV	35,72

Fonte: Próprio Autor

5.1.2.2 Análise granulométrica

A tabela 12 representa a análise granulométrica da moinha do carvão vegetal, observando que 63,36% está acima de 0,15mm.

Tabela 12: Análise granulométrica da moinha do carvão vegetal

Malha (mm)	Massa (g)	Retido simples %	Retido Acumulado %
2,380	0	0,00	0,00
1,180	4,04	7,18	7,18
0,500	8,14	14,46	21,63
0,150	23,49	41,72	63,36
<0,150	20,63	36,64	100,00
SUM	56,30	100,00	

Fonte: Próprio Autor

5.2 Ensaio de RDI dos briquetes

O ensaio de RDI dos briquetes foi realizado após o processo de cura do material. Esse processo foi realizado nas temperaturas de 100°C, durante 24 horas, e na temperatura de 500°C, durante um período de 30 minutos.

Nos briquetes, cujo processo de cura foi realizado a 100°C, obteve-se um resultado de RDI de 74,70%, ou seja, 74,70% da amostra ficou com a granulometria menor que 2,8mm após o ensaio, conforme demonstra a figura 16. Durante o ensaio, ao observar os gases gerados (figura 17), sugere-se que o carvão utilizado no briquete demonstrou ser reativo, com alta combustão.

De acordo com a patente BR 102019023195-5 B1, a empresa VALE alcançou um valor médio de RDI < 25% em seu projeto. Em comparação a esse valor, observa-se que o RDI obtido nos ensaios do briquete produzido neste estudo é significativamente superior (74,70%).

Figura 16: Amostra após ensaio de RDI



Fonte: Próprio Autor

Figura 17: Equipamento em funcionamento para teste de RDI



Fonte: Próprio Autor

Após o processo de cura realizado a temperatura de 500°C, foi observado, conforme demonstra as figuras 18 e 19, que os briquetes estavam com baixa resistência mecânica, apresentando trincas e se desintegrando com facilidade, não sendo viável a realização do ensaio de RDI para essa situação.

Figura 18: Briquetes após endurecimento a 500°C



Fonte: Próprio Autor

Figura 19: Briquetes se desintegrando com facilidade



Fonte: Próprio Autor

6 CONCLUSÃO

A briquetagem é um importante meio para reaproveitamento de resíduos, impactando diretamente na economia da empresa e no meio ambiente. Materiais de granulometria fina que antes eram descartados, hoje tem-se a possibilidade de retorná-los ao processo. Com a briquetagem a empresa pode reduzir seu consumo de energia, diminuir as emissões de gases poluentes, reduzir a área de disposição de rejeitos, podendo reduzir de maneira expressiva o impacto ambiental que atualmente é gerado pelas empresas.

Através dos estudos realizados, pode-se ver a importância que o briquete tem na economia circular, sendo necessários pesquisas e testes para desenvolver um produto cujas especificações possam atender as demandas das empresas.

Para este trabalho, os briquetes gerados obtiveram como resultado baixa resistência mecânica. Na temperatura de 100°C os briquetes apresentaram melhor resultado comparado à temperatura de 500°C, mas ainda assim não apresentou resultado satisfatório. Pelo teste de RDI gerado, após endurecimento a 100°C, pode-se observar que o carvão presente na amostra ficou muito reativo, sugerindo estar em uma porcentagem mais alta na amostra.

Para trabalhos futuros, pode-se considerar diminuir a porcentagem de carvão na amostra para que o briquete fique menos reativo quando submetido ao teste de RDI.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Luiz Antônio de, **Manual da siderurgia. 2.ed 2005**. Editora Arte e Ciência, São Paulo, 2005.

ANM. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/2-2-carvao/>. Acesso em: 11 ago.2022.

ANM. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/3-1-2013-minerio-de-ferro-e-aco>. Acesso em: 11 ago.2022.

APERAM. Disponível em: <https://aperambioenergia.com.br/institucional/produto-2/produto/>. Acesso em: 11 ago.2022.

BAPTISTA, André Luiz de Brito; GONÇALVES, Isabeliana da Silva. **A Logística Como Ferramenta Estratégica e de Vantagem Competitiva Para Fabricação de Produtos Ecologicamente corretos e Sustentáveis “Verdes”: O Caso da Produção de Tubos de Aço Empregados na Indústria de Óleo e Gás**. 2013. Dissertação (MBA em Logística Empresarial) – Faculdade Sul Fluminense, Volta Redonda, 2013.

BARBOSA, Felipe. **Degradação Mecânica de Coque Metalúrgico e Sínter**. 2018. Dissertação (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

BRITO, J.O.; BARRICHELLO, L.E.G. **Comportamentos isolados da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização**. Piracicaba: ESALQ, 2006. 4 p. (Circular Técnica, 28).

BUZIN, Pedro Jorge Walburga Keglevich de. **Desenvolvimento de Briquetes Autorredutores a Partir de Carepas de Processamento Siderúrgico para Utilização em Forno Elétrico a Arco**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2009.

CARVALHO, Bruno César Lage de. **Aproveitamento de Minérios de Ferro de Baixo Teor: Tendências, Tecnologias Utilizadas e Influências no Sequenciamento de Lavra**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

CARVALHO, Eduardo Augusto de; BRINCK, Valter; CAMPOS, Antônio Rodrigues de; FONSECA, Vinícius Oliveira. In: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed., CETEM/MCT, 2010, p. 683-750.

CONEXÃO MINERAL. Disponível em: <https://www.conexaomineral.com.br/noticia/3801/nao-existe-minerio-pobre-existe-minerio-mal-beneficiado.html>. Acesso em: 20 fev.2025.

COSGROVE DAVIS M., Understanding Briquetting. In Technologies for Development; The VITA “Understanding Technology” Series. Arlington: Volunteers in Technical Assistance (VITA); 1985.

DUTRA, Flávio De Castro; RESENDE, Valdirene Gonzaga de; PEREIRA, Fabrício Vilela. **Processo De Produção De Aglomerado De Finos De Minério De Ferro e o Produto Aglomerado**. Titular: VALE. BR 102019023195-5 B1. Depósito: 05 nov. 2019. Concessão: 19 jan. 2021. Int. CI. C22B 1/243.

GASPARINI, Vitor Maggioni. **Desenvolvimento de um Modelo de Controle de Processo para Altos-Fornos a Coque Aplicado a Altos-Fornos Industriais**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

GENTIL, Luiz Vicente Bocorny. **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. 2008. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

GUIMARÃES, V.A.; Princípios Básicos de Fabricação de Gusa em Altos-Fornos, 81p. (Apostila), 2003.

IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília: 2012, 46 p. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf. Acesso 18 fev. 2025.

JR, Farid Chemale. **Caracterização geometalúrgica dos Principais minérios de Ferro Brasileiros – Fração Sinter Feed**. 2004. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LEÃO, Paula Maria Gomes Cunha. **Tecnologia da briquetagem de minério de ferro e carvão para uso como carga em altos-fornos e da utilização de rejeitos da mineração de ferro como matéria-prima**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

LUCENA, Daniel Avelar; MEDEIROS, Raphael Dias de; FONSECA, Urano Troseski; ASSIS, Paulo Santos. Aglomeração de moinha de carvão vegetal e sua possível aplicação em alto-forno e geração de energia. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração - TMM**, v. 4, n. 4, p. 1-6, 2008.

LUZ, Adão Benvido da.; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves, **Tratamento de Minérios. 5.ed 2010**. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2010.

MACHADO, Cyntia Esposti Veloso; BAPTISTA, André Luís de Brito; LANDIM, Julia Cardoso; COUTINHO, Ingrid Ferreira; MAGNAGO, Roberto de Oliveira. Desenvolvimento de produto ecológico na área de metalurgia extrativa como componente da carga de alto-forno. **Revista Univap**, v. 26, n. 51, p. 145-154, 2020.

METSO. Disponível em <https://recycling.metso.com/br/produtos/prensa-briquetadeira2/prensa-briquetadeira-metso-etabriq/>. Acessado em: 11 ago.2022.

NARITA, César Yuri. **Estudo da Obtenção de Briquetes Autorredutores de Minério de Ferro e Carvão Fóssil Endurecidos por Tratamento Térmico**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Potencial Florestal. 2019. Disponível em: <https://potencialflorestal.com.br/caracteristicas-eucalipto/>. Acesso em: 11 ago.2022.

SANTOS, Rosimeire Cavalcante dos. **Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão Vegetal de Clones de Eucalipto**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SOMAVILLA, Diego. **Proposta de Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos e Produção Mais Limpa Para Uma Indústria Metalúrgica do Município de Carazinho – RS**. 2013. Dissertação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013.

SPENCE, A.; PRITCHARD, W.; **Development of Expert Systems for Blast Furnace Operation and Control**; European Commission. Technical Steel Research. In: Luxemburgo; 1997, 117p.

VALE. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-testa-com-sucesso-novo-briquete-para-reducao-direta-que-torna-a-producao-de-aco-mais-limpa>. Acesso em: 03 fev.2025.

VIEIRA, David Hebert. **Avaliação de Parâmetros Operacionais que Influenciam a taxa de Injeção de carvão pulverizado em altos-fornos a carvão vegetal**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012

SU, Biwei et al. **A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation**. *Journal of cleaner production*, China, v. 42, p. 215-227, 2013.

ZHAO, Yiqing et al. **Discussion on the model of mining circular economy**. *Energy Procedia*, China, v. 16, p. 438-443, 2012.

VILAÇA, André Sales Issa. **Valorização de Resíduos da Mineração de Ferro do Quadrilátero Ferrífero: Métricas de Avaliação na Perspectiva da Economia Circular**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.