

PELETIZAÇÃO DE REJEITOS FINOS DE CARVÃO MINERAL E LODO DE ESGOTO SANITÁRIO PARA USO ENERGÉTICO

Fabício do Canto de Souza¹

Thiago Fernandes de Aquino²

Resumo: Os aterros sanitários e barragens recebem diversos tipos de rejeitos e resíduos, dentre eles o lodo de esgoto sanitário e os rejeitos finos de carvão mineral, são dois dos maiores problemas do ponto de vista ambiental e financeiro das empresas de saneamento e carboníferas. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo principal avaliar a potencialidade da produção de *pellets* de lodo de esgoto sanitário e rejeitos finos de carvão mineral para o uso combustível, em fornos de combustão de caldeiras ou termoelétricas, bem como realizar sua caracterização física e química. Deste modo, com o interesse de conhecer as características combustíveis e mecânicas, algumas propriedades foram analisadas, como: resistência mecânica, densidade de bulk, poder calorífico, teor de cinzas, materiais voláteis, umidade, análise elementar (CNHS) e composição química. Os testes foram organizados por meio do planejamento experimental fatorial de Box- Behnken com duplicata no ponto central, para produção *pellets*. Por conseguinte, a análise econômica simplificada, demonstrou as principais características e necessidades para aplicação do projeto de modo industrial. Os resultados indicaram que uma das melhores relações, considerando a disponibilidade do material, é visto na proporção de 60% finos, 40% lodo e 40% de umidade, com poder calorífico superior de 3106,60 kcal/kg e resistência mecânica à compressão de 5,29 MPa, a qual demonstrou-se dependente e correlacionada à quantidade de lodo/finos, umidade e densidade. Desta forma, é evidenciado o potencial do uso dos *pellets* formados por finos de carvão mineral e lodo de esgoto sanitário para produção de energia térmica.

Palavras-Chave: Rejeitos finos de carvão mineral, lodo de esgoto sanitário, peletização de rejeitos, uso combustível de rejeitos, sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a quantidade de rejeitos e resíduos gerados cresce constantemente por parte das indústrias e da sociedade, o que tem fomentado grandes discussões na comunidade acadêmica e política. Essas argumentações buscam minimizar riscos ambientais causados pelos resíduos. Logo, com intenção de

¹ Graduando em Engenharia Química. Ano 2021-2 E-mail: fabriciodocantodesouza@gmail.com.

² Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: thiago.aquino@satc.edu.br.

proteger o ecossistema natural, as políticas e normas regulatórias tornam-se mais rígidas, e promovem um desenvolvimento sustentável.

A exemplo disso, vários estudos podem ser desenvolvidos com o foco na utilização de resíduos como matérias-primas para novos processos. Considerando o cenário regional do sul do Brasil, estudos voltados à utilização ou recuperação de resíduos da indústria carbonífera são de suma importância.

No cenário mundial, os recursos de carvão mineral inteiramente recuperáveis, presentes em reservas, totalizaram cerca de 949,75 bilhões de toneladas. O Brasil conta com uma extensa reserva de carvão mineral que está presente em sua maioria, na região sul do país, representando 3,7 bilhões de toneladas de carvão lavável, sendo 0,4% da reserva mundial (ANM, 2019).

Ainda neste contexto, o carvão mineral constitui a principal fonte de geração de energia elétrica em âmbito mundial, sendo responsável por cerca de 40% da geração de energia global (IEA, 2020). Assim, alternativas sustentáveis vêm sendo mais exploradas para produção de energia utilizando carvão.

Na região carbonífera catarinense, a extração de carvão é realizada predominantemente por mineração subterrânea. Devido às suas características geológicas, o carvão *Run of Mine* (ROM) precisa ser beneficiado para atingir os padrões de combustão em termoelétricas. Segundo Weiler, Amaral Filho e Schneider (2016), após o processamento mineral, aproximadamente, 60% do material é descartado e disposto em módulos de rejeitos ou retornados à mina.

Um dos materiais rejeitados com potencial térmico para queima trata-se dos finos de carvão, contudo este não é utilizado devido à baixa granulometria e a sua dificuldade de transporte. Segundo Sampaio, Luz e Lins (2001) 6% da massa de carvão da usina de beneficiamento transforma-se em rejeitos finos.

Outro setor que busca alternativas para seus resíduos é o de tratamento de esgoto; segundo a ANA (2020) entre 2013 e 2019, houve a identificação de 900 novas unidades de tratamento, aumentando consideravelmente o volume de resíduos proveniente do tratamento de esgotos. A disposição final do lodo vem se caracterizando como um desafio, correlacionando ainda, ao aumento do número de estações de tratamento de esgoto e o consequente incremento da produção de lodos de esgoto, tornam imperiosa a abordagem do problema.

Estudos sobre o lodo de esgoto sanitário revelam que esse é um resíduo complexo, abundante em matéria orgânica e com grande potencial poluidor (BIANCHINI et al., 2015). Estima-se que a quantidade gerada de lodo no Brasil está entre 150 e 220 mil toneladas de matéria seca por ano (PEDROZA, 2010).

Segundo Li e Liu (2000), os resíduos sólidos urbanos (RSU) geralmente possuem grande heterogeneidade, valores elevados de umidade, forma e granulometria irregular e baixa densidade a granel, o que por sua vez levam a dificuldades de manuseio, transporte, estocagem e utilização na sua forma original.

Desta forma, a partir da necessidade de agrupamento dos finos de carvão mineral, o qual apresenta potencial térmico para sua utilização, e identificando características preliminares de aglomeração por parte do lodo de esgoto sanitário, é possível por meio do processo de peletização agrupar desses dois rejeitos.

Este processo transforma os resíduos em um produto com maior densidade energética, forma e granulometria regular, além de agregar maior valor econômico e minimizar os impactos ambientais gerados pela sua disposição inadequada. Segundo Rocha (2011), os combustíveis densificados podem ser facilmente utilizados em mecanismos de combustão direta e co-combustão. Estes aumentam a eficiência energética e diminuem a umidade, melhorando o poder calorífico.

Portanto, a produção de *pellets* a partir de finos de carvão e lodo derivado do tratamento de esgoto apresenta grande potencial econômico e ambiental, pois, além de ser mais uma opção de um combustível energético, pode promover o desenvolvimento sustentável nas indústrias de mineração e de saneamento básico a partir do reaproveitando dos rejeitos.

Desta forma, o objetivo desta pesquisa científica foi desenvolver, caracterizar e analisar *pellets* formados a partir de finos de carvão e lodo de ETE para uso energético.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção deste trabalho tem como objetivo apresentar a revisão da literatura que sustentará o estudo de peletização dos rejeitos finos de carvão mineral associado com o lodo de esgoto sanitário e sua utilização como um combustível alternativo para geração energética.

2.1 FONTES DE ENERGIA

De acordo com o balanço energético nacional, desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (2020), a repartição da oferta interna de energia (térmica e elétrica) para o ano base de 2019 foi igual a 46,1% para energia renovável e 53,9% para energia não renovável, distribuídas da seguinte forma:

- Renovável: 18,0% biomassa da cana de açúcar, 12,4% hidráulica, 8,7% lenha e carvão vegetal e 7,0% outras.
- Não renovável: 34,4% petróleo e derivados, 12,2% gás natural, 5,3% carvão mineral, 1,4% urânio e 0,6% outras.

A perspectiva energética aponta na direção das fontes de energias alternativas. As quais a taxa de utilização é inferior à sua taxa de renovação (SIQUEIRA, 2018). As energias renováveis são, em sua maior parte, consumidas no local onde são geradas. Nessa perspectiva, é possível que países possam ficar menos dependentes dos fornecimentos externos e contribuir ainda para a criação de postos de trabalho em zonas mais deficitárias (NASCIMENTO; ALVES, 2017).

2.2 CARVÃO MINERAL

O carvão mineral é uma rocha sedimentar (Tab. 1), combustível, formada a partir da fossilização de uma complexa e variada mistura de matéria orgânica vegetal que sofreu soterramento e compactou-se em bacias profundas (COSMO et al., 2020).

De acordo com a Associação Brasileira de Carvão Mineral (2020), foram produzidas no Brasil em 2020, 4.722.024 toneladas de carvão energético, e 1.348 toneladas de finos energéticos.

Tabela 1: Composição dos tipos de carvão mineral. *Não é classe de carvão.

Estágio	% de Umidade	% de Carbono	% de Matéria Volátil
Madeira*	20	< 55	65
Turfa	90	55 - 65	45 - 55
Linhito	20 - 40	65 - 75	30 - 40
Hulha	5 - 10	75 - 93	< 10
Antracito	< 5	> 93	< 4

Fonte: Adaptado Schumann (1985) & Cosmo et al. (2020)

2.2.1 Carvão em Santa Catarina

O carvão da região ocorre em sedimentos da bacia do Paraná, pertencentes ao grupo Tubarão. Esse grupo subdivide-se nas formações rio bonito, na base e palermo, no topo. Os principais depósitos, jazidas e minas ocorrem na formação rio bonito. Essa é constituída de arenitos, siltitos, folhetos e camadas de carvão (SAMPAIO; LUZ; LINS, 2001).

As camadas mais relevantes são: barro branco, irapuã e bonito, das quais, pela importância econômica, a principal é a camada barro branco (tanto pelo porte das reservas quanto pela qualidade superior do carvão), seguida pela camada bonito, de alto potencial para fornecimento de carvão energético em projetos integrados de minas e termoeletricas. Atualmente por ainda possuir reservas mineráveis e, conseqüentemente, apresentar maior potencial futuro, a camada bonito, possui predominância, sendo que as demais camadas estão quase totalmente exauridas (SAMPAIO; LUZ; LINS, 2001 & CASTILHOS; FERNANDES, 2011).

2.2.2 Beneficiamento

Em virtude da baixa qualidade do carvão brasileiro, o carvão *Run of Mine* (ROM) passa por um processo de beneficiamento, que visa reduzir ou remover os contaminantes presentes e gera maior valor agregado.

Para tal, processos gravimétricos, físico-químicos ou químicos de concentração são fundamentais (LEONARD, 1991 & COSMO et al., 2020). Segundo Sampaio, Luz e Lins (2001), no processo de beneficiamento, ocorre a geração de quatro tipos de rejeitos, sendo eles: piritoso, argiloso, xistoso e finos.

2.2.3 Resíduos

A geração de resíduos em um processo de beneficiamento, é uma consequência inevitável. Esses resíduos devem ser controlados, de maneira a não ocasionar danos ao meio ambiente. As atuais normas e regulamentações - como a Lei 12.305/2010, NBR 13028, NBR 13029, entre outras - garantem que a deposição desses rejeitos seja feita de maneira adequada e minimizando os impactos.

A partir do processo de beneficiamento de finos, obtêm-se como produto o carvão energético fino, e como subproduto, rejeitos finos (Tab. 2). De maneira, a contornar os impactos ambientais, as carboníferas vêm utilizando a tecnologia de *backfilling*, a qual tem como característica o retorno dos rejeitos, em especial os finos, para a mina subterrânea, em formação de pilares (COSMO et al., 2020).

Tabela 2: Balanço de massa da usina de beneficiamento Mina Esperança.

Produtos	Peso (%)
Carvão energético grosso (32 ±0,6 mm)	30
Carvão energético fino	5
Rejeito de escolha manual	5
Rejeito piritoso	27
Rejeito argiloso	19
Rejeito xistoso	8
Rejeitos finos	6

Fonte: Sampaio, Luz e Lins (2001)

De acordo com Sampaio, Luz e Lins (2001), 6% do balanço de massa da mina esperança, transforma-se em rejeitos finos. Estes são descartados com alto teor de carbono e grande potencial energético.

2.2.4 Características dos resíduos finos

A análise elementar do carvão determina o potencial energético do uso na combustão, indicando a qualidade dele como combustível. A composição química, o poder calorífico, o teor de cinzas e matéria volátil influenciam na utilização ou não do carvão em um determinado processo industrial.

A análise apresentada pela carbonífera Metropolitana S.A. (2021), demonstraram que entre 70% e 90% do peso está abaixo da granulometria de 270 mesh, sabendo disso pode-se considerar como tendo potencial para sua aglutinação.

O poder calorífico é provavelmente a característica mais importante do carvão como combustível, já que reflete seu teor energético e pode ser definido pela quantidade de calor liberado pela combustão de uma unidade de massa em uma bomba calorimétrica, com oxigênio a volume constante (LEONARD, 1991 & WEILER; AMARAL FILHO; SCHNEIDER, 2016).

2.3 LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

O lodo é um resíduo complexo que contém inúmeros compostos químicos, podendo apresentar-se na forma sólida, semissólida ou líquida, abundante em matéria orgânica e em nutrientes, com grande potencial poluidor (PEDROZA, 2010 & BIANCHINI et al., 2015).

As características físicas e químicas do lodo de esgoto podem variar de acordo com o local de origem (área residencial ou industrial), a época do ano e os procedimentos adotados na estação de tratamento de esgoto.

2.3.1 Classificação do lodo

Os esgotos são classificados em dois grupos, os sanitários e os industriais. Os esgotos sanitários são constituídos basicamente de despejos domésticos, uma parcela de águas pluviais, água de infiltração, e eventualmente uma parcela não significativa de despejos industriais.

Normalmente, o esgoto doméstico (residencial ou industrial) é composto por 0,1% de sólidos e 99,9% de água, sendo que do total de sólidos, 70% são orgânicos e 30% são inorgânicos (FERNANDES, 2000). Por conta das suas características o lodo precisa ser depositado em ambientes controlados, sendo mais comum o seu descarte em aterros sanitários e a incineração (VIEIRA et al., 2011).

2.3.2 Características do lodo de esgoto sanitário

O processo de tratamento, resulta na sedimentação de sólidos em suspensão do esgoto, areia e microrganismos, ocorrendo a formação do lodo. Este é constituído pela fração sólida de contaminantes concentrados removidos do esgoto, composta por uma mistura de matéria orgânica e inorgânica, que durante o processo de tratamento do esgoto permanece acumulada no sistema (LOPES, 2015).

Em virtude disso, o uso da matéria orgânica residual, pode gerar um potencial poder calorífico em sua queima. Segundo Zanelato; Bianchi (2020), a principal dificuldade, do uso do lodo, está na sua elevada porcentagem e umidade,

desta forma, a secagem reduz significativamente a umidade do lodo, aumentando assim o poder calorífico.

2.4 PELETIZAÇÃO

Em processos de peletização, a matéria-prima é atritada por pressão, provocando aquecimento, e forçada para fora do molde. O produto extrusado é denominado de *pellet*, devido ao pequeno diâmetro (BARROS, 2014).

Entre alguns benefícios da compactação em *pellets*, temos: as vantagens no aumento do conteúdo calorífico do material por unidade de volume e a maior facilidade dos processos de transporte e estocagem. Uma grande quantidade de variáveis influencia na qualidade dos *pellets*, desde as propriedades do material como a umidade relativa, efeito da densidade, efeito da compactação e resistência à compressão.

2.4.1 Umidade e composição da matéria prima

Para cada tipo de matéria-prima existe uma faixa de teor de umidade, na qual o material pode ser compactado com maior eficiência, podendo variar de acordo com o processo de compactação. Além disso, a umidade é um fator importante, pois influencia sobre a queima de materiais combustíveis (JIANG et al., 2014).

Todo material exibe uma característica particular quando submetido a queima devido à proporção dos componentes que o constitui. Esta composição química da matéria determina as propriedades físicas e energéticas, além de influenciar na resistência mecânica, que vai depender do grau de compactação ou aglutinação do material e o poder calorífico da energia envolvida na queima (BARROS, 2014).

2.4.2 Densidade

De acordo com Jiang et al. (2014), a densidade representa a quantidade de massa contida num determinado volume de material. Este parâmetro poderá alterar

o poder calorífico de um material na medida em que, o calor gerado pela combustão está relacionado com a quantidade de massa.

Desta forma, derivados mais densos, apresentarão maior poder calorífico por unidade volumétrica. A peletização aumenta a densidade dos resíduos tornando o produto com alto potencial energético (PINHEIRO; RENDEIRO; PINHO, 2005).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

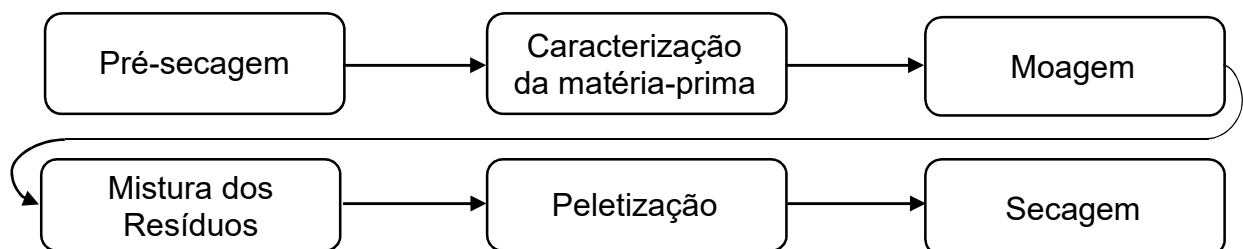
Para verificar a viabilidade da utilização dos resíduos na geração de energia, algumas de suas propriedades, foram analisadas. Inicialmente, foram feitos testes, para avaliar seu possível comportamento no processo de peletização. Por meio de um planejamento experimental fatorial Box-Behnken, pode-se analisar os efeitos de variáveis, como a umidade.

No desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os seguintes resíduos: lodo de esgoto, fornecido pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN, coletado em uma das estações de tratamento de efluentes do município de Criciúma/SC; e os finos de carvão mineral fornecidos pela Carbonífera Metropolitana S.A., coletado na mina situada no município de Treviso/SC.

3.1 PREPARO DA MATÉRIA PRIMA PARA A PRODUÇÃO DOS *PELLETS*

A produção dos *pellets* foi realizada em escala laboratorial seguindo as etapas, pós coleta, demonstradas na Fig. 1 (para execução de testes),

Figura 1: Fluxograma do processo de preparação e produção dos *pellets*.



Fonte: Autor (2021)

O lodo de esgoto sanitário e os finos de carvão foram submetidos a uma pré-secagem em estufa a 105 °C até a massa constante para facilitar o processo de moagem.

Desta forma, para a redução de tamanho das partículas sólidas, foi utilizado pistilo e almofariz, pois o processo foi feito em escala laboratorial.

A partir do material seco e moído foram determinadas as quantidades de água necessária para atingir a umidade desejada na peletização.

A mistura das matérias-primas (resíduos) e umidificação foi feita com o misturador marca Caleva modelo Mult Lab, sob rotação de 100 rpm por 2,5 minutos. A extrusão, para produção dos *pellets*, também foi feita utilizando o extrusor marca Caleva modelo Mult Lab, sob rotação de 60 rpm.

3.1.1 Planejamento experimental Box-Behnken

Buscando analisar estatisticamente, a produção dos *pellets*, seguiu-se um planejamento experimental fatorial, com 2 fatores e 3 níveis, sendo composto de 1 bloco, 9 corridas, com 2 repetições no ponto central. Avaliando assim, o efeito da aglomeração das frações de resíduos finos de carvão, com o lodo de ETE, nas seguintes proporções: 50% finos, 50% lodo; 60% finos, 40% lodo (ponto central); e 70% finos, 30% lodo. Ligados ao teor de umidade presente na produção dos *pellets*, com as proporções de 30, 40 e 50%.

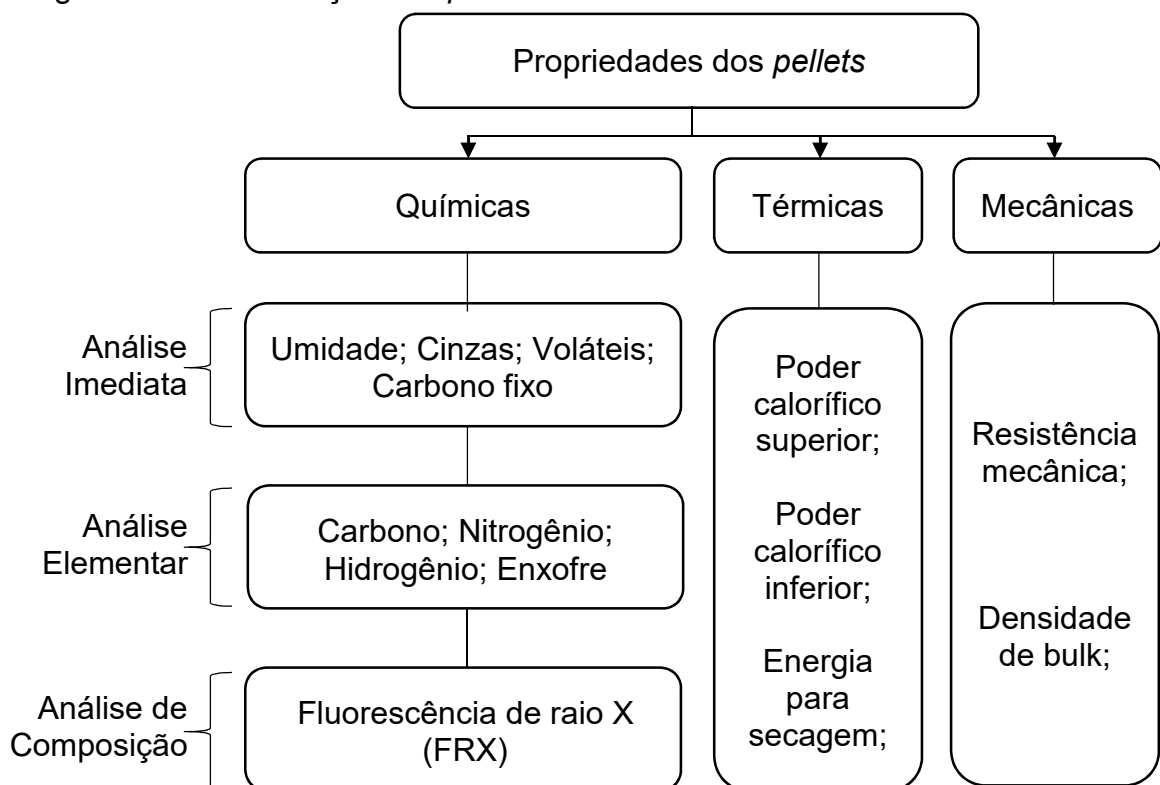
Realizada a análise de variância os *pellets* que apresentaram melhor resistência mecânica, foram considerados como satisfatórios, seguindo para etapa de identificação do poder calorífico. Isso sugere que, os *pellets* que apresentarem melhor resistência mecânica, com poder calorífico, suficiente para queima em uma caldeira, poderão ser comercializados, isto é, são passíveis de serem efetivamente fabricados em grande escala, transportados e armazenados.

A partir do planejamento experimental, foi possível obter outras relações com as propriedades dos *pellets* e da matéria prima, somado a isso analisou-se os balanços de massa para as proporções de rejeitos finos de carvão mineral e lodo de esgoto sanitário.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS *PELLETS*

A partir da produção dos *pellets*, foram realizadas as análises de caracterização, com a finalidade de garantir sua eficiência energética. Os ensaios e análises foram divididos em três grupos de propriedades: químicas (análise elementar, imediata e composição), térmicas e físicas (mecânicas), como demonstrado na Fig. 2.

Figura 2: Caracterização dos *pellets*.



Fonte: Autor (2021)

3.2.1 Propriedades químicas

O teor de umidade das amostras de *pellets* de lodo e carvão foi determinado segundo a norma ASTM D3173M-17a, em estufa marca Quimis, modelo Q317M.

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM D3174-12, em mufla marca Jung e modelo LF4213.

A quantidade de material volátil foi determinada segundo a norma ASTM D3175-20, em mufla marca Jung e modelo LF4213.

O teor de carbono fixo é uma medida indireta, sendo determinado pela diferença entre os constituintes dos materiais, seguindo a norma ASTM D3172-13.

A análise elementar do carvão envolve a determinação do percentual em massa do carbono bem como nitrogênio, hidrogênio e enxofre, sendo que o oxigênio é usualmente estimado por diferença. A análise foi realizada, utilizando analisador elementar marca Leco e modelo 628 Series Sulfur, seguindo as normas ASTM D5373-21 e ASTM D4239-18.

A composição química das cinzas foi determinada por meio da análise de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), utilizando equipamento marca Shimadzu e modelo EDX-7000, seguindo a norma ASTM D4326-21.

3.2.2 Propriedades térmicas

O poder calorífico superior dos *pellets* e suas matérias primas foi determinado em bomba calorimétrica marca Leco, modelo AC-500. A combustão foi efetuada em excesso de O₂ e pressão de 30 atm com utilização da norma ASTM D5865M-19. O poder calorífico inferior dos *pellets* foi estimado seguindo Eq. 1 (MORAN et al., 2018).

$$PCI = PCS - 583,174 * (UH + 9 * H) \quad (1)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg);

PCS = poder calorífico superior (cal/g);

H = teor de hidrogênio (%);

UH = Umidade hidrocópica (%).

A energia térmica necessária para a transferência de massa envolvendo a remoção de umidade da matéria prima foi determinada pelo balanço global de energia, através da Eq. 2.

$$E = (m_{ui} - m_{uf}) * H_{vap} \quad (2)$$

Onde:

E = Energia necessária para secagem (kcal);

m_{ui} = massa umida inicial (kg);

m_{uf} = massa umida final (kg);

H_{vap} = Entalpia de vaporização da água, valor 639,36 (kcal/kg).

3.2.3 Propriedades mecânicas

A densidade de bulk foi determinada, utilizando a metodologia da norma ABNT NBR ISO 9136-1/13. A densidade foi calculada a partir da razão entre a massa dos materiais granulados e o volume.

O valor da resistência mecânica foi determinado por meio da relação entre a área dos *pellets* e sua resistência. O equipamento aplica uma força perpendicular ao comprimento por meio de um pistão, com velocidade de ensaio pré-estabelecida, entre 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s e determina a força da resistência desse material até a sua ruptura gerada por uma carga de tensão. O procedimento de análise foi realizado de acordo com a adaptação da metodologia ABNT NBR 5739/18.

Com o intuito de verificar as dimensões, e a possibilidade do transporte, realizou-se o cálculo para saber a altura máxima que os *pellets* mais abaixo resistiram ao transporte. Os cálculos foram realizados seguindo a Eq. 3 (HIBBELER, 2012):

$$h = \frac{Rm * 10^6}{db * g * \tau} \quad (3)$$

Onde:

h = altura da coluna de *pellets* (m);

R_m = resistência mecânica de compressão do *pellet* (MPa);

d_b = densidade de bulk (kg/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s²)

τ = fator de compressão admissível (adimensional);

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos nos itens subsequentes.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO FINO DE CARVÃO MINERAL

As características, das análises imediata e elementar do rejeito fino de carvão é apresentada na Tab. 3. Conforme verificado na literatura, as altas frações de cinzas e umidade, tendem a diminuir o poder calorífico, no entanto a análise apresenta um valor suficiente para queima industrial. Somado a isso, pode-se considerar o rejeito com baixo conteúdo volátil; e fração, considerada normal de enxofre, sendo que este pode causar corrosão em altas concentrações, devido a formação de óxido de enxofre (CORAZZA, 2015).

Considerando um percentual de perda calorífica em umidades mais elevadas, justifica-se a necessidade da secagem do material, na tentativa de manter um alto poder de queima.

Tabela 3: Características do rejeito fino de carvão mineral.

Características	Finos
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	2351,00
Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	2238,97
Umidade hidrocópica (%)	1,75
Umidade (%)	29,56
Carbono (%)	23,52
Carbono fixo (%)	16,71
Hidrogênio (%)	1,94
Nitrogênio (%)	0,48
Oxigênio (%)	1,99
Cinzas (%)	69,55
Enxofre (%)	2,52
Materiais voláteis (%)	13,74

Fonte: Autor (2021)

A partir da análise elementar e imediata é possível verificar altos valores de carbono fixo e carbono, sendo estes os responsáveis pelo poder calorífico gerado, isto porque o teor de hidrogênio é baixo, não causando um poder de queima significativo para o material (CORAZZA, 2015).

O resultado da composição química das cinzas, da amostra de rejeito fino de carvão mineral, analisado por fluorescência de raios X (FRX), é demonstrado na Tab. 4. Em sua composição é possível observar a maior concentração de dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de enxofre (SO_3), óxido de cálcio (CaO), e óxido de potássio (K_2O).

Tabela 4: Composição química das cinzas de rejeito fino de carvão mineral.

Elementos	Resultado (%)
SiO_2	36,327
Al_2O_3	13,966
Fe_2O_3	4,645
SO_3	3,786
CaO	3,743
K_2O	2,785
MgO	1,560
TiO_2	0,830
MnO	0,082
SrO	0,035
ZnO	0,020
Perda ao fogo	32,220

Fonte: Autor (2021)

Estes óxidos juntos representam 96,27% da composição das cinzas do rejeito fino (não considerando a perda ao fogo), desta forma ditando as principais característica da matéria, como resistência a compressão (SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3), também podendo promover a fusão das matérias, formando compostos inorgânicos como $\text{KAlSi}_2\text{O}_6(\text{S}_2)$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_{12}(\text{S})$, em diferentes faixas de temperatura (RIZVI et al., 2015).

A composição do rejeito fino irá depender de alguns fatores, como a composição do carvão mineral bruto extraído e o processo de beneficiamento, desta forma cada nova matéria prima deve passar por um processo de avaliação, verificando a possibilidade de seu uso para formação dos *pellets*.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO SANITÁRIO

O resultado da análise elementar e imediata referente ao resíduo de esgoto sanitário é apresentado na Tab. 5. No qual, nota-se altos teores de umidade e oxigênio, responsáveis por reduzir o poder calorífico; desta forma, ocorre a necessidade da secagem do material combustível. Ainda em relação a sua composição, é possível identificar uma alta concentração de matéria volátil, sendo que esta acarreta uma redução do carbono fixo presente no material, assim reduzindo o poder de queima.

Tabela 5: Características do Lodo.

Características	Resultados
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	4240,00
Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	3889,98
Umidade hidros cópica (%)	6,29
Umidade (%)	73,72
Carbono (%)	36,49
Carbono fixo (%)	7,91
Hidrogênio (%)	5,97
Nitrogênio (%)	5,38
Oxigênio (%)	24,80
Cinzas (%)	25,00
Enxofre (%)	2,36
Materiais voláteis (%)	67,09

Fonte: Autor (2021)

Nos testes foram identificados níveis aceitáveis de cinzas e enxofre, bem como altas concentrações de carbono e hidrogênio. Desta maneira, é possível identificar um alto poder calorífico presente na amostra de lodo de esgoto.

O resultado da composição química das cinzas de lodo de esgoto sanitário, analisado por fluorescência de raio X (FRX), é demonstrado na Tab. 6. Em sua composição é possível observar a maior concentração de óxido de ferro (Fe_2O_3), dióxido de silício (SiO_2), óxido de fósforo (P_2O_5), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de potássio (K_2O). Segundo Fuentes et al. (2004), estes são

os principais metais e elementos presentes na alimentação humana, baseada em uma dieta de proteínas, vegetais e cereais.

Estes óxidos juntos representam 95,21% da composição lodo (não considerando a perda ao fogo), desta forma ditando as principais características da matéria, como alta resistência a compressão (SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3), assim como o lodo pode promover a fusão das matérias, formando compostos inorgânicos (RIZVI et al., 2015).

Tabela 6: Composição química das cinzas do lodo de esgoto sanitário.

Elementos	Resultado (%)
Fe_2O_3	9,996
SiO_2	8,331
P_2O_5	4,652
CaO	3,058
Al_2O_3	2,895
K_2O	0,790
MgO	0,508
TiO_2	0,477
ZnO	0,206
SO_3	0,174
MnO	0,037
CuO	0,032
SrO	0,027
ZrO_2	0,015
Cr_2O_3	0,012
Y_2O_3	0,005
PbO	0,004
Perda ao fogo	68,780

Fonte: Autor (2021)

A composição apresentada pode proporcionar características únicas a mistura, no entanto a quantidade e composição de metais e óxidos presente nesses resíduos depende do tipo de tratamento aplicado ao efluente que produz o lodo, desta forma cada estação de tratamento produzirá um lodo com características diferentes (FUENTES et al., 2004), devendo então ser submetido cada estação que se deseja trabalhar a um processo avaliatório, comprovando seu possível uso.

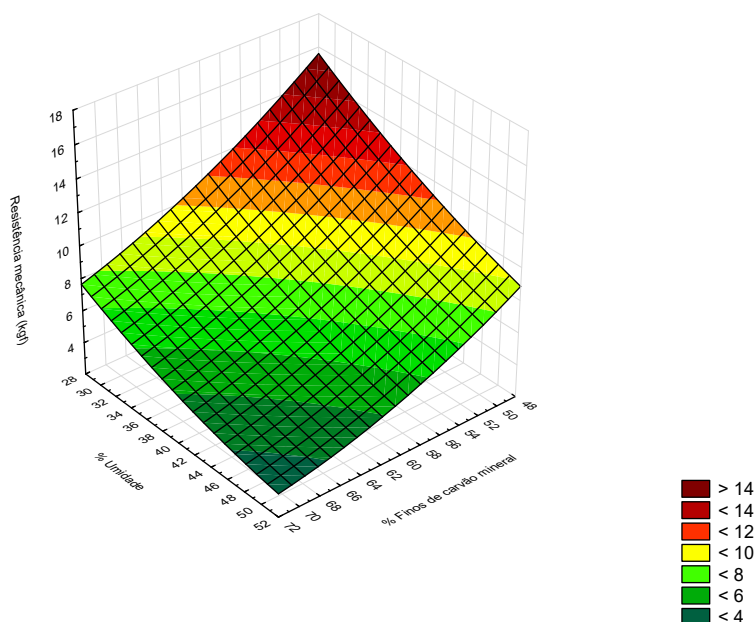
4.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Através da relação quadrática – de umidade, finos/lodo e resistência mecânica - dos valores obtidos experimentalmente, foi elaborado o gráfico de superfície apresentado na Fig. 3.

Para execução dos procedimentos, foram definidas as frações de lodo de esgoto sanitário e finos de carvão mineral, levando em conta a disponibilidade da matéria prima, por isso, preferiu-se utilizar uma maior fração de finos, devido sua maior disponibilidade.

Fazendo a leitura da figura, é possível notar que a maior concentração de lodo de esgoto acarreta em uma maior resistência mecânica, da mesma forma identifica-se que a menor quantidade de umidade no momento da extrusão provoca um aumento de resistência mecânica ao *pellet* formado.

Figura 3: Gráfico de umidade x finos de carvão x resistência mecânica.



Fonte: Autor (2021)

Em comparação com Zanelato; Bianchi (2020), no qual expõe que os *pellets* formados por somente lodo de esgoto produzem uma média de 9,25 MPa de resistência mecânica, e em alguns testes até 11 MPa, confirmando a relação expressa na figura, bem como os dados experimentais obtidos.

A confiabilidade dos resultados, são dados pelos erros obtidos expressos na Tab. 7, onde é possível observar que o erro amostral médio de 4,45% e um desvio padrão médio de 0,118, sendo considerado valores aceitáveis, devido ao processo ser executado de maneira manual.

Tabela 7: Erro percentual experimental.

% Finos	% Umidade	Resistência Mecânica (MPa)	Desvio Padrão	Erro (%)
70	30	5,32	0,132	5,01
70	40	4,11	0,103	3,90
70	50	2,68	0,140	5,30
60	30	7,94	0,122	4,61
60	40	5,29	0,080	3,04
60	50	4,53	0,130	4,92
50	30	9,82	0,098	3,74
50	40	8,57	0,104	3,95
50	50	5,90	0,124	4,71
60	40	5,06	0,143	5,44
60	40	5,17	0,114	4,34

Fonte: Autor (2021)

A fim de obter uma melhor explicação para as diferentes resistências identificadas em cada mistura produzida, analisou-se a composição das misturas, através da proporção, sendo estes valores apresentados na Tab. 8.

Tabela 8: Relação da composição com as frações de finos e lodo.

Características	Finos	Lodo	70 finos/30 lodo	60 finos/40 lodo	50 finos/50 lodo
Carbono (%)	23,52	36,49	27,411	28,708	30,005
Carbono fixo (%)	16,71	7,91	14,07	13,19	12,31
Hidrogênio (%)	1,94	5,97	3,149	3,552	3,955
Nitrogênio (%)	0,48	5,38	1,95	2,44	2,93
Oxigênio (%)	1,99	24,8	8,833	11,114	13,395
Cinzas (%)	69,55	25	56,185	51,73	47,275
Enxofre (%)	2,52	2,36	2,472	2,456	2,44
Materiais voláteis (%)	13,74	67,09	29,745	35,08	40,415

Fonte: Autor (2021)

Segundo Zolin (2011), a concentração de carbono influencia diretamente na resistência mecânica do material, sendo assim, materiais com maior teor de carbono promovem uma maior resistência mecânica.

4.4 DENSIDADE DE BULK E CARACTERÍSTICA DE TRANSPORTE

Com a intenção de obter uma correlação entre a massa e volume, de preenchimento e ocupação, dos *pellets* no transporte e armazenamento, a densidade de bulk foi medida para as respectivas amostras. A Tab. 9 apresenta a correlação entre os finos de carvão mineral, lodo de esgoto sanitário, umidade, resistência mecânica de compressão e densidade de bulk.

Tabela 9: Correlação de parâmetros com a densidade de bulk.

nº	% Finos	% Lodo	% Umidade	Resistência mecânica (MPa)	Densidade de bulk (kg/m³)	Altura (m)
1	70	30	30	5,317	596,00	90,96
2	70	30	40	4,112	570,00	73,57
3	70	30	50	2,680	557,50	49,01
4	60	40	30	7,935	478,75	169,01
5	60	40	40	5,293	480,00	112,45
6	60	40	50	4,531	471,25	98,04
7	50	50	30	9,824	469,52	213,36
8	50	50	40	8,565	467,22	186,93
9	50	50	50	5,900	450,91	133,41
10	60	40	40	5,056	447,06	115,32
11	60	40	40	5,172	467,60	112,79

Fonte: Autor (2021)

Percebe-se que os finos apresentam uma maior densidade de bulk, quando comparado ao lodo, desta forma quanto maior a quantidade de finos na mistura do *pellet* maior a densidade de bulk obtida.

Outra ligação possível, é a comparação entre densidade de bulk e umidade, onde quanto menor a porcentagem de umidade na mistura para peletização, maior a densidade de bulk, ou seja, maior a compactação. Desta forma, esse grau de compactação proporciona uma maior resistência mecânica ao *pellet*.

A partir da correlação entre resistência mecânica de compressão do *pellet* e a densidade de bulk, foi possível obter a altura máxima para o transporte dos *pellets*, sem que ocorra danos físicos, expressos na Tab. 9.

Analisando os dados observa-se que os *pellets* apresentam resistência mecânica suficiente para suportar uma grande coluna de material sobre si mesmo, o que mostra que o transporte mantém a sua integridade.

4.5 ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO

A quantidade de energia que os *pellets* irão desprender com a queima é dada pela relação de poder calorífico das matérias primas nas proporções estudadas de finos de carvão mineral e lodo de esgoto sanitário. Estes valores estão expressos na Tab. 10.

Tabela 10: Poder calorífico (base seca).

% Finos	% Lodo	Cinzas (%)	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
100	0	69,55	2351,00	2238,97
0	100	25,00	4240,00	3889,98
50	50	47,28	3295,50	3064,48
60	40	51,73	3106,60	2899,37
70	30	56,19	2917,70	2734,27

Fonte: Autor (2021)

Analisando os dados é possível notar que o lodo apresenta um maior poder de queima, ou seja, quanto maior a fração de lodo na amostra maior será o poder calorífico, obtendo correlação indireta com o teor de cinzas presente no produto combustível (MORAN et al., 2018). Identifica-se também que o poder calorífico superior dos *pellets* fica próximo de 3000 kcal/kg e seu poder calorífico inferior em torno de 2800 kcal/kg, demonstrando que é possível sua utilização para necessidades de até 3000 kcal/kg de poder calorífico inferior.

4.6 ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLIFICADA

Durante a crise econômica gerada pela pandemia do COVID-19, o carvão mineral foi uma das commodities, em que teve uma alta crescente em seu valor de mercado, desta forma este cenário proporciona a entrada de combustíveis alternativos ao mercado.

Desta forma, relacionando as características econômicas, para um provável uso do combustível de lodo de esgoto e finos de carvão; foi realizado um

estudo preliminar, levando como base Torres (2006), apresentado na Tab. 11, considerando as necessidades encontradas e estudadas para produção industrial. Os valores empregaram 60% de finos de carvão mineral, 40% de lodo de esgoto sanitário e 40% de umidade.

Tabela 11: Análise econômica simplificada.

I. CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	
1. Dias úteis (300 dias/ano)	25 dias/mês
2. turnos (/dia)	3 turnos
3. Horas trabalhadas/dia	24 horas
4. Capacidade produtiva	1,5 t/h
5. Produção mensal média	900 t/mês
6. Depreciação dos equipamentos	10 anos
7. Valor Residual (15% dos equipamentos)	R\$ 183.150,00
II. CAPITAL DE INVESTIMENTO	
1. Custos dos equipamentos: extrusora, silos, alimentadores, misturadores, etc (Tab. 12).	R\$ 1.221.000,00
2. Instalação: montagem dos equipamentos, fundações, estruturas, fundações, estruturas, etc. - 43 % do custo dos equipamentos.	R\$ 525.030,00
TOTAL DOS EQUIPAMENTOS R\$ 1.746.030,00	
3. Obras civis: edifícios, pátios, vias de acesso, etc. -35 % do total dos equipamentos.	R\$ 611.110,50
4. Prédios auxiliares: tanques, depósitos, imprevistos, etc. -10 % do total	R\$ 174.603,00
SUBTOTAL: INVESTIMENTOS FIXOS R\$ 2.531.743,50	
5. Capital de giro. - 15% do investimento fixo	R\$ 379.761,53
CAPITAL DE INVESTIMENTO TOTAL R\$ 2.911.505,03	
III. PREÇO DOS INSUMOS BÁSICOS	
1. Água industrial (m ³) (CASAN, 2021)	R\$ 4,45
2. Energia elétrica (kWh) (CELESC 2021)	R\$ 0,49
3. Ligantes: (se tiver)	-
4. Finos de carvão mineral (custo evitado) (t) (PULINO,2010)	-R\$ 5,35
5. Lodo de esgoto sanitário (custo evitado) (t) (SAMAE,2021)	-R\$ 236,00
6. Mão de obra (funcionário/mês)	R\$ 2.581,56
IV. CONSUMO DOS INSUMOS	
1. Água (m ³ /t) (**)	500
2. Rejeito fino de carvão mineral (t/mês)	540,00
3. Lodo de esgoto sanitário (t/mês)	360
4. Energia elétrica (kWh/t)	15,50
5. Energia para secagem (MJ/t)	189,18
6. Operários (/mês)	7
V. COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS	

1. Mão de obra (+43% % de encargos sociais (SINAPI,2020)) (t)	R\$ 20,08	8,50%
2. Energia elétrica (t)	R\$ 15,50	6,56%
3. Secagem (eficiência de 80 %) (**) (t)	R\$ 137,25	58,09%
4. Água (**) (t)	-	-
5. Resíduos finos (t)	-R\$ 3,21	-1,36%
6. Lodo de ETE (t)	-R\$ 94,40	-39,95%
7. Transporte (***) (t)	R\$ 69,68	29,49%
8. Manutenção (3 % do investimento amortizado) (t)	R\$ 8,09	3,42%
9. Amortização e depreciação do investimento (*) (t)	R\$ 27,22	11,52%
SUBTOTAL (t)	R\$ 180,21	76,27%
10. Custo administrativos (+10% da mão de obra) e (t)	R\$ 2,01	0,85%
11. Lucro Bruto (30 % do custo operacional) (t)	R\$ 54,06	22,88%
12. Lucro líquido (35 % do IR) (t)	R\$ 35,14	-
TOTAL (t)	R\$ 236,28	100,00%

Fonte: Autor (2021)

* Taxa SELIC atual 7,75%, conforme reunião do COPOM, datada de 28 de outubro de 2021.

** O uso de água não necessário, se a secagem for controlada na porcentagem desejada de mistura e extrusão.

*** Custo de transporte para distância de no máximo 50 km, conforme INCT-L de out. 2021.

Tabela 12: Custo para aquisição dos equipamentos.

Equipamentos	Valor
1. Extrusora para granulação ATE65, marca Aceretech	R\$ 400.000,00
2. Silo cônico, marca GSI 1200 kg de capacidade, 2 un.	R\$ 240.000,00
3. Misturador de pás DNI Series, volume 4,5 m ³ , marca CIFA	R\$ 240.000,00
4. Fornalha, marca RCA Máquinas	R\$ 230.000,00
5. 10% - Equipamentos de transporte	R\$ 111.000,00
Total	R\$ 1.221.000,00

Fonte: Autor (2021)

A partir do apresentado, é possível notar que as maiores dificuldades, para tornar o processo viável, está nos custos de instalação (custo dos equipamentos) e operação, dentre eles se destacam o custo de secagem, atingindo um valor de 137,25 reais por tonelada, representando 58,09% do custo do produto e o custo de transporte, no valor de 69,68 reais por tonelada, equivalendo a 29,49% do custo do produto.

A fim de reduzir este custo, pode-se executar um estudo para secagem das matérias ao ambiente, aproveitando a energia solar para redução da umidade, principalmente do lodo de esgoto sanitário, que apresenta 73,72% de umidade.

A Tab. 13, apresenta a correlação entre o preço dos combustíveis disponível no mercado e os *pellets* produzidos.

Tabela 13: Correlação de preço dos combustíveis.

	CE4500	Biomassa de eucalipto	Pellets
Preço (R\$/t)	337,82 (CCEE,2021)	297,27 (RAÍZEN, 2021)	236,28
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	4500	3924	3106,60
Custo (R\$/(kcal/kg))	0,075	0,076	0,076

Fonte: Autor (2021)

Os dados demonstram que os *pellets* produzidos de lodo de esgoto e rejeito fino de carvão mineral apresenta um valor competitivo de mercado quando comparado ao custo de aquisição do carvão mineral e da biomassa.

5 CONCLUSÕES

A obtenção de *pellets* formados a partir de lodo de esgoto sanitário e rejeitos finos de carvão mineral apresentou resultados de propriedades mecânicas aceitáveis, para fins de transporte. A queima do material proporcionou alto poder calorífico, podendo ser usados por diversas indústrias.

Relações entre a resistência mecânica, umidade de produção e mistura de finos com lodo puderam ser estabelecidas, identificando o *pellet* que proporciona as melhores características, nas proporções de 60% de finos, 40% de lodo e 40% de umidade. A composição química obtida com os *pellets* refletiu na melhoria das propriedades mecânicas, proporcionando uma resistência de 5,29 MPa, além de prover um poder calorífico superior de 3106,60 kcal/kg.

Os fatores que afetam o custo do produto produzido são pontuais e sugere-se um estudo para sua redução, situa-se os custos com secagem, transporte e investimento inicial. Estes fatores, em principal o custo de secagem, podem inviabilizar o produto, desta forma novos estudos devem ser feitos a fim de reduzir o custo, como por exemplo, reduzir o custo de secagem, promovendo a secagem utilizando o calor solar. Todavia, os resultados das análises demonstraram que os *pellets* formados pelo rejeito fino de carvão mineral e o lodo de esgoto sanitário, apresentam um potencial do seu uso para produção de energia térmica, e valor competitivo com o mercado.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (Brasil). **Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil / Agência Nacional de Águas.** Brasília: ANA, 2020. 44 p. Disponível em: <<http://atlasesgotos.ana.gov.br/>>. Acesso em: 29 de abr. de 2021.

Agência Nacional de Mineração (Brasil). **Sumário Mineral 2017/ Agência Nacional de Águas.** Brasília: ANM, 2019. 201 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral>>. Acesso em: 29 de abr. de 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3173M-17a:** standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke. West Conshohocken, PA: ASTM, 2017. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3174-12:** standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. West Conshohocken, PA: ASTM, 2018, 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3175-20:** test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke. West Conshohocken, PA: ASTM, 2020. 14p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4239-18:** Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion. West Conshohocken, PA: ASTM, 2018. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4326-21:** Standard Test Method for Major and Minor Elements in Coal Ash by X-Ray Fluorescence. West Conshohocken, PA: ASTM, 2021. 9p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5373-21:** standard test methods for determination of carbon, hydrogen and nitrogen in analysis samples of coal and carbon in analysis samples of coal and coke. West Conshohocken, PA: ASTM, 2021. 11p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5865M-19:** standard test method for gross calorific value of coal and coke. West Conshohocken, PA: ASTM, 2019. 19p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739/18:** ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9136-1/13:** determinação da densidade solta (bulk). Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL. **Carvão Mineral – Dados Estatísticos – Ano: 2:2020**. Criciúma: ABCM, 2020. 9 p. Disponível em: <https://www.carvaomineral.com.br/conteudo/gm_estatisticas/estatisticas_2020.pdf>. Acesso em: 01 de maio de 2021.

BARROS, João Lúcio. **Blendas de carvão vegetal e carvão mineral para a produção de briquetes**. 2014 125f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/8254>>. Acesso em: 28 de mar. de 2021.

BIANCHINI, Augusto; BONFIGLIOLI, Luca; PELLEGRINI, Marco; SACCANI, Cesare. Sewage sludge drying process integration with a waste-to-energy power plant. **Waste Management**, [S.L.], v. 42, p. 159-165, ago. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.020>>. Acesso em: 28 de mar. de 2021.

Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Memória de cálculo de reembolso de carvão mineral. São Paulo: CCEE, 2021. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/web/guest/busca-ccee?q=diamante&dtIni=&dtFim=&structure=>>>. Acesso em: 16 de nov. de 2021.

Carbonífera Metropolitana S.A. **Boletim de análises e ensaios**. Treviso: METROPOLITANA S.A., 2021.

CASTILHOS, Zuleica Carmen.; FERNANDES, Francisco Rego Chaves. **A bacia carbonífera sul catarinense e os impactos e passivos da atividade da indústria extrativa mineral de carvão na territorialidade**. In: Recursos minerais & sustentabilidade territorial. Grandes minas. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2011. v.1. p.361-386. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1174>>. Acesso em: 13 de mar. de 2021.

Centrais Elétricas de Santa Catarina. **Tarifas e taxas de energia**. Florianópolis: CELESC, 2021. Disponível em: < <https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia#tarifas-vigentes>>. Acesso em: 16 de nov. de 2021.

Companhia Catarinense de Águas e Saneamento. **Tarifa industrial**. Florianópolis: CASAN, 2021. Disponível em: < <https://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/industrial#0>>. Acesso em: 16 de nov. de 2021.

CORAZZA, Gabriela. **Decomposição de carvão com elevado teor de cinzas para determinação simultânea de As, Cd, Hg, Pb e S por ICP-OES**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em: < <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/10606?show=full>>. Acesso em: 07 de out. de 2021.

COSMO, Bruno Marcos Nunes; GALERIANI, Tatiani Mayara; NOVAKOSKI, Fabiula Patricia; RICINI, Bruna Martins. Carvão mineral. **Revista Agronomia Brasileira**, [S.L.], v. 4, n. 1, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.29372/rab202001>>. Acesso em: 19 abr. 2021.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balço Energético Nacional 2020: Ano Base 2019**. Ministério de Minas e Energia – MME. Mai. 2020. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Acesso em: 3 de abr. de 2021.

FERNANDES, S. **Estabilização e higienização de biossólidos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. cap. 3. p. 45-67.

FUENTES, Ana; LLORENS, Mercedes; SAEZ, José; AGUILAR, Maria Isabel; ORTUNO, Juan F.; MESEGUER, Victor F. **Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludge**. *Journal of Hazardous Materials*. Murcia, 2004. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15120869/>>. Acesso em: 29 de mar. de 2021.

HIBBELER, Russel C.. Resistência dos materiais. 7ª edição. Rio de Janeiro: Person, 2012.

International Energy Agency. **Data and statistics: electricity generation by source, world 1990-2018**. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>>. Acesso em: 29 de mar. de 2021.

JIANG, Longbo; LIANG, Jie; YUAN, Xingzhong; LI, Hui; LI, Changzhu; XIAO, Zhihua; HUANG, Huajun; WANG, Hou; ZENG, Guangming. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: the density and hardness of pellet. *Bioresource Technology*, [S.L.], v. 166, p. 435-443, ago. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.077>>. Acesso em: 22 de mar. de 2021.

LEONARD, Joseph W.. **Coal Preparation**. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, Fifth Edition. Baltimore, Maryland, 1991.

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 e Materiais*, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 1-6, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00404001>>. Acesso em: 21 de mar. de 2021.

LI, Yadong; LIU, Henry. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, v. 19, n. 3, p. 177-186, set. 2000. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0961-9534\(00\)00026-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0961-9534(00)00026-x)>. Acesso em: 21 de mar. de 2021.

LOPES, Thiara Reis. **Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbio e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes**. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1285>>. Acesso em: 26 de mar. de 2021.

MORAN, Michel J.; SHAPIRO, Howard N.; MUNSON, Bruce R.; DEWITT, David P. **Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor**. 1ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

NASCIMENTO, Raphael Santos do; ALVES, Geziele Mucio. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: métodos e benefícios ambientais. **Revista Univap**, [S.L.], v. 22, n. 40, p. 274, 11 jan. 2017. UNIVAP Universidade de Vale do Paraíba. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18066/revistaunivap.v22i40.713>>. Acesso em: 22 de mar. de 2021.

TORRES, Oswaldo Fadigas Fontes. **Fundamentos da engenharia econômica e da análise econômica de projetos**. 1ª edição. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

PEDROZA, Marcelo Mendes; VIEIRA, Gláucia Eliza Gama; SOUSA, João Fernandes de; PICKLER, Arilza de Castilho; LEAL, Edina Ruth Mendes; MILHOMEN, Cleide da Cruz. Produção e tratamento de lodo – uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n.16, p. 89-XX, jul./dez. 2010. Disponível em: <http://revista.liberato.com.br/ojs_lib/index.php/revista/article/view/160>. Acesso em: 29 de mar. de 2021.

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos vegetais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 2, n. 2, p.113-123, 2005.

PULINO, Alexandre Masocatto. **Índices de estimativa de custos de fechamento de pilhas de estéril e barragens de rejeitos**. Dissertação (Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <<https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/836M.PDF>>. Acesso em: 16 de nov. de 2021.

Raízen. Biomassa e Energia. São Paulo: RAÍZEN, 2021. Disponível em: <https://pages.cnpem.br/wectbe/wp-content/uploads/sites/83/2021/01/Antonio_Stuchi_Apresentac%CC%A7a%CC%83o-Biomassa-e-Energia-Rai%CC%81zen-V1.pdf>. Acesso em: 01 de dez. de 2021.

ROCHA, Quéssia de Noronha. **Gestão de energia de resíduos de biomassa: otimização da distribuição geográfica das unidades industriais de geração de energia**. Projeto de Graduação (Departamento de Engenharia Mecânica) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/3427/1/2011_QuessiadeNoronhaRocha.pdf>. Acesso em: 29 de mar. de 2021.

SAMPAIO, João Alves; LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antônio Freitas. **Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil**. 2. ed. rev. e Ampliada, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2037>>. Acesso em: 20 de abr. de 2021.

Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto. **Pregão presencial nº 06/2021**. Araranguá: SAMAE, 2021. Disponível em:

<http://www.samaeararangua.com.br/fotos/arq_licitacao_2021_03_12__13_27_40_.pdf>. Acesso em: 16 de nov. de 2021.

SCHUMANN, Walter. **Rochas e Minerais**. 1 ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1985. 223 p. ISBN: 85-215-0209-5.

SIMÃO, Gustavo. **O Carvão da camada bonito, jazida sul catarinense: uma contribuição para a caracterização petrográfica, química e tecnológica**.

Monografia - Curso de Graduação em Geologia. Instituto de Geociências, Porto Alegre, 2012. Disponível em:

<<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/66077/000870932.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 22 de abr. de 2021.

SIQUEIRA, Luiz Savio de Campos. **Análise da competitividade de fontes renováveis de energia elétrica ao acesso a capital de bancos de desenvolvimento: o papel dos padrões de sustentabilidade**. 2018. Dissertação (MPGC) - Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10438/24441>>. Acesso em: 22 de abr. de 2021.

Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices. **Composição de encargos sociais**. Rio de Janeiro: SINAPI, 2020. Disponível em:

<file:///C:/Users/fabri/Downloads/ENCARGOS_SOCIAIS_JANEIRO_2020.pdf>. Acesso em: 16 de nov. de 2021.

VIEIRA, Gláucia Eliza Gama; PEDROZA, Marcelo Mendes; SOUSA, João Fernandes de; PEDROZA, Camilla Mendes. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão.

Revista Liberato, [S.L.], v. 12, n. 17, p. 81-96, 2011. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.31514/rliberato.2011v12n17.p81>>. Acesso em: 24 de mar. de 2021.

WEILER, Jéssica; AMARAL FILHO, Juarez Ramos do; SCHNEIDER, Ivo André Homrich. Processamento de rejeito de carvão visando a redução de custos no tratamento da drenagem ácida de minas - estudo de caso na Região Carbonífera de Santa Catarina. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 337-345, jun. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016116411>>. Acesso em: 29 de mar. de 2021.

ZANELATO, Vitória Genoveva; BIANCHI, Flavio Michels. **Estudo da utilização de combustível não convencional a partir do uso do lodo de ETE's e Carvão Mineral**. 2020, 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Faculdade SATC, Criciúma, 2020.

ZOLIN, Ivan. **Materiais de Construção Mecânica**. 3ª ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2011. 76 p.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar o dom da vida e me ajudar a escolher o caminho a ser seguido. Aos meus estimados pais Everaldo José de Souza e Cleidemar do Canto de Souza, por todo sacrifício amor e dedicação doados para que eu pudesse seguir minhas próprias escolhas. Ao meu orientador, Thiago Fernandes de Aquino, pelo incentivo, dedicação e conhecimento a mim transmitidos.

A Raiane da Cruz e aos colaboradores do CTSATC pelo auxílio e abertura do espaço para o desenvolvimento deste estudo. A CASAN pelo fornecimento do lodo de esgoto sanitário. A Metropolitana S.A. e ao Luiz Antônio Zim Alexandre, por abrir as portas e mostrar o processo de beneficiamento e fornecer o rejeito fino de carvão mineral.

Por último, mas não menos importante aos meus amigos e familiares pelo apoio nesta jornada desde o princípio.