

CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO LODO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE PAPEL RECICLADO

Luana Bussatto[1]
Fernando Souza[1]
João Paulo Gonçalves Porfirio[2]
Lyvia da Silva Neves[2]
Adriano da Silva Marques[1]
Silvia Layara Floriani Andersen[1]

[1]Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil
[2]Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB,Brasil

luana.bussatto@cear.ufpb.br
fernando.souza@cear.ufpb.br
joaopaulo.porfirio@estudante.cear.ufpb.br
lyvia.neves@estudante.cear.ufpb.br
adriano@cear.ufpb.br
silvia@cear.ufpb.br

Resumo: O setor de papel e celulose é crucial para a economia do Brasil, mas enfrenta desafios na destinação do lodo gerado durante o tratamento de efluentes que é frequentemente descartado em aterros sanitários. O objetivo deste estudo foi investigar o potencial energético do lodo de tratamento de efluentes de uma indústria de reciclagem de papel, visando contribuir para a sustentabilidade industrial. A metodologia incluiu a coleta de amostras de uma estação de tratamento de efluentes em Pernambuco, Brasil, e a realização de ensaios laboratoriais para determinar o poder calorífico superior (PCS), análise imediata, análise termogravimétrica e quantificação de matéria orgânica e inorgânica da amostra. Os resultados mostraram que o lodo possui um PCS de 5,3 $MJ.kg^{-1}$, indicando que existe um potencial energético, apesar do alto teor de cinzas com 66,64%. A análise de contaminantes revelou teores abaixo dos limites permitidos, minimizando riscos ambientais. Os resultados destacam a viabilidade do lodo como uma alternativa sustentável para geração de energia, promovendo a economia circular e reduzindo a dependência de fontes fósseis.

Palavras-chave: Lodo, Sustentabilidade, Biomassa.

1. Introdução

O setor de papel e celulose tem grande relevância na economia do Brasil e no mundo. Leva-se em conta neste aspecto as receitas geradas, investimentos elevados e os impactos que este setor tem sobre os outros diversos setores econômicos, tanto para os que se encontram antes como após sua cadeia produtiva, assim como possui influência na geração e consumo de energia e ao impacto social e ambiental positivos (EPE, 2022).

Entretanto, do ponto de vista da reciclagem de papel, constata-se que é um ponto vital na busca pela sustentabilidade, pois contribui para a conservação de recursos naturais, a redução de resíduos e a mitigação dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado e pelo consumo excessivo de matéria-prima. A implementação de políticas públicas eficazes e o alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 12, que busca garantir padrões de consumo e produção sustentáveis, são fundamentais para fortalecer essa tendência. A gestão adequada de resíduos sólidos é essencial para minimizar os impactos ambientais, e o papel da indústria de papel e celulose nesse contexto é crucial (Martins et al., 2021).

O processo de produção de papel reciclado, quando comparado à produção de papel de fibra virgem, traz por si uma vantagem ambiental e energética. As fibras recicladas são obtidas a partir de resíduos de papel que já foram utilizados e descartados, enquanto as fibras naturais são extraídas de recursos primários, como a madeira proveniente das árvores. O processo de reciclagem aproveita materiais que já estão em circulação, reduzindo a necessidade de explorar novas fontes de matéria-prima para a produção de pasta de papel. Isso não apenas diminui a demanda por recursos naturais, mas também contribui para a redução do volume de resíduos que seriam destinados a aterros sanitários. Dessa forma, a reciclagem desempenha um papel fundamental na conservação ambiental, ao reutilizar materiais existentes e minimizar os impactos associados ao desmatamento e à extração de novos insumos. Calcula-se que a economia na produção do papel reciclado em relação ao papel de fibra virgem seja de aproximadamente 33% em energia e 49% em água. Isso é relevante do ponto de vista ambiental, já que as fases finais do ciclo de vida do papel, que incluem o descarte em aterros ou incineração, têm um impacto significativo no aquecimento global (Ecotsy, 2021).

O setor de papel e celulose, embora fundamental para a economia, enfrenta desafios no que diz respeito à destinação de resíduos gerados durante os processos produtivos. Dentre esses resíduos, destaca-se o lodo, subproduto do tratamento de efluentes nas fábricas de papel e celulose. A questão central que emerge é a dificuldade em destinar adequadamente esse lodo (Abushammala *et al*, 2023).

Diante da problemática de destinação ambientalmente adequada desse subproduto, surge a necessidade de avaliar sua composição e verificar sua viabilidade como biomassa. Estudos recentes indicam que o lodo pode apresentar propriedades vantajosas para tal uso,

principalmente por conter uma fração de material orgânico com poder calorífico (Wang *et al*, 2017), podendo então ser utilizado em caldeiras para geração térmica ou elétrica, se tornando uma fonte alternativa e renovável de energia.

O objetivo principal deste estudo é caracterizar o lodo proveniente do processo produtivo de papel reciclado, analisando sua composição química e físico-química, com a finalidade de verificar seu potencial para ser utilizado como biomassa e analisar as características energéticas a fim de identificar potenciais aplicações energéticas.

2. Fundamentação teórica

O processo de fabricação do papel pode ser dividido em duas etapas: o preparo de massa e a formação da folha na máquina. A etapa de preparação envolve a moagem de matérias-primas em partículas e filamentos finos, seguida por uma triagem para eliminar as impurezas. Isso resulta em uma massa que é uniformemente misturada e extrudada através de rolos para formar um objeto semelhante a um tecido (Rencheng, 2020). Na segunda etapa, a formação da folha ocorre dentro de uma máquina de fabricação de papel. Isso envolve o uso de tanques de sucção de água e bombas de vácuo para desidratar a teia fibrosa, aumentando a eficiência da formação da folha (Xiaochun *et al,* 2020). A teia é então seca e cortada em folhas, com métodos avançados, como corte por jato de água, empregados para garantir a precisão (Scott, 2018).

Nas fábricas de reciclagem de papel, o processo produtivo começa com a divisão das aparas de papel, realizada em um equipamento chamado *hidrapulper*. Esse dispositivo, que possui o formato de um tanque cilíndrico com um rotor giratório na parte inferior, é responsável por misturar os resíduos de papel com água, desfazendo as fibras e transformando o material em uma pasta homogênea. O movimento do rotor facilita a separação das fibras individuais, permitindo a remoção inicial de contaminantes e preparando a polpa para a etapa de depuração, onde impurezas serão eliminadas.

Após o processo de desagregação, se inicia a fase de depuração que envolve a remoção de impurezas como plásticos, areia e lascas de papel não individualizadas. Técnicas como separação centrífuga e métodos baseados em densidade são comumente empregadas para conseguir o material final desejável. A depuração pode ocorrer por separação através de força centrífuga, diferença de densidade. Na sequência tem-se o processo de refinação, que tem por objetivo promover área para melhor ligação das fibras na formação da folha. No processo de depuração e desagregação, tem-se purgas no processo para remoção das impurezas. Estas purgas seguem para a estação de tratamento de efluentes (Manfredi, 2023).

Na segunda etapa, inicia-se o processo de formação da folha, onde é reduzida a consistência da polpa para valores abaixo de 1% da mistura composta por fibras sólidas, e aplicada em um equipamento denominado caixa de entrada, que fará a distribuição uniforme da fibra sobre a tela formadora. Esta irá conduzir as fibras em formação passando por caixas que farão o desaguamento da polpa por gravidade e por ação de vácuo. Uma parcela da água extraída nesta etapa do processo é reaproveitada e a outra parcela segue para a estação de tratamento de efluentes, conforme o processo anterior (Gonçalves et al., 2019).

Na estação de tratamento de efluentes, uma parte da água e das fibras é recuperada e redirecionada para o processo de fabricação de papel, contribuindo para a economia de

recursos hídricos e matérias-primas. A fração restante segue para o tratamento secundário de efluentes, onde é submetida a processos de tratamento (anaeróbio e aeróbio) antes de seu descarte final (Silva & Costa, 2020).

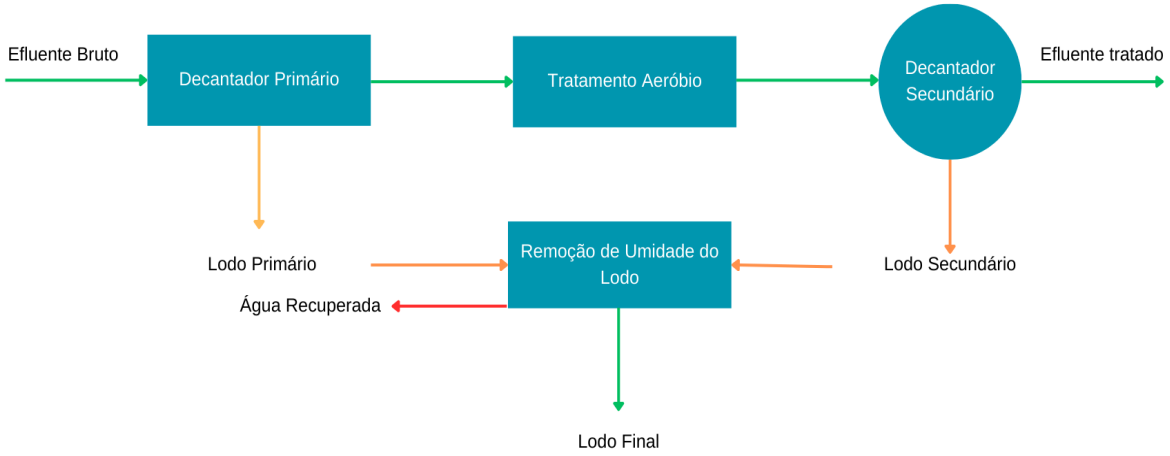
Atualmente, os processos de tratamento aeróbios são amplamente utilizados para o tratamento de efluentes industriais. A maior parte das águas residuais resultantes das etapas de produção de papel é tratada por meio de métodos aeróbios, como lagoas aeradas e lodos ativados (Kumar et al., 2023).

Lodos ativados são os flocos (material residual suspenso) produzidos em um decantador pelo crescimento de bactérias ou outro organismos, na presença de oxigênio dissolvido e, ou acumulado em concentrações. Material formado principalmente de bactérias, algas, fungos e protozoários, sendo bactérias os microorganismos responsáveis pela deterioração da matéria orgânica. O processo de tratamento por lodo ativado é estritamente biológico e aeróbio, no qual o efluente e o lodo ativado são misturados, na maioria dos casos em lagoas ou tanques, agitados e aerados. Após este procedimento, o lodo formado é enviado para o decantador secundário, onde a parte sólida é separada da água tratada, sendo este último descartado.

O lodo gerado na indústria de papel é composto principalmente por materiais fibrosos orgânicos e materiais argilosos inorgânicos. O lodo contém fibras curtas de celulose úmidas que são perdidas durante o processo de fabricação do papel, constituindo 70% do volume do lodo total. Essas fibras podem ser recicladas e valorizadas para aplicações de alto valor, como a produção de filmes de acetato de celulose para embalagem (Quintana et al., 2024).

Após a etapa biológica, os sistemas de tratamento de efluentes de indústria de papel apresentam um segundo clarificador, a fim de retirar os sólidos através de separação física (Imai,2010). O fluxograma dos sistemas de tratamento de efluentes da indústrias de papel é apresentado na Figura 1, a seguir:

Figura 1 - Fluxograma dos Sistema de Tratamento de Efluentes da Indústria de Papel



Fonte: Imai,2010

Os estudos de Sperling (2001) relacionados aos processos de tratamento de efluentes industriais, deixa claro como ocorre a produção de lodo, associada aos sólidos presentes no efluente bruto e como a biomassa vai se desenvolver na etapa anaeróbia. Segundo Kawatoko (2019) o lodo do processo de reciclagem de fibras celulósicas com características de uma massa fibrosa na cor cinza, representa a maior parte dos resíduos gerados e é classificada como um resíduo classe IIA apresentando propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

O Brasil, um dos principais produtores do segmento de papel e celulose no mundo, referência mundial em sustentabilidade, está à frente no tema de reaproveitamento de resíduos e práticas sustentáveis.

A alternativa mais empregada para disposição final de lodo no Brasil é o aterro industrial. Embora não seja uma forma incorreta ou ilegal de tratamento, está longe de ser a mais adequada. Durante a disposição dos resíduos em aterro ocorre a liberação de alguns gases poluentes como o metano e dióxido de carbono, esses gases são o resultado da decomposição do lixo em condições de ausência de oxigênio. O metano possui um impacto ambiental maior que o dióxido de carbono (CO_2) no efeito estufa, sendo ele 21 vezes superior (Balestieri, 2001).

De acordo com Ackermannet et al (2000) os resíduos orgânicos dispostos em aterros sanitários, tem como solução a compostagem ou incineração como forma de recuperação de energia, e as cinzas que são formadas podem ser aplicados em diversas áreas como condicionador de solo.

O lodo do papel, que possui uma alta concentração de fibras de celulose, apresenta potencial para ser convertido em biocombustíveis por meio de processos termoquímicos, como a pirólise rápida (Zang et al., 2023). A incineração do lodo, além de possibilitar a recuperação de energia térmica, gera uma quantidade menor de resíduos sólidos em comparação com o volume de lodo que seria enviado para aterros sanitários. Essa prática tem sido adotada por algumas empresas para mitigar a escassez de espaço em aterros. Contudo, uma parte do lodo, aproximadamente 30%, não é combustível e acaba se transformando em cinzas, que posteriormente são descartadas em aterros.

O monitoramento das emissões geradas durante a incineração é essencial, visto que as cinzas podem conter metais pesados com potencial para causar impactos ambientais graves. Para mitigar esses riscos, é necessário aplicar técnicas de tratamento adequadas que reduzam a liberação de substâncias tóxicas na atmosfera (Sun et al., 2024). As emissões atmosféricas resultantes da incineração variam em termos de poluentes, incluindo particulados sólidos, dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e metano, sendo todos eles relevantes para a qualidade do ar e a saúde ambiental (Ackermann et al., 2000).

3. Metodologia

A metodologia deste estudo foi estruturada em várias etapas para garantir uma análise abrangente do lodo gerado na estação de tratamento de efluentes. A fábrica em que o lodo foi coletado, gera em torno de 54,2 m^3/h de efluente, sendo que o lodo biológico gerado é proveniente de um sistema de tratamento anaeróbio e aeróbio. Este lodo, denominado neste

estudo pela sigla LMARROM é produzido diariamente, com uma média de 30 t/dia. Todo o lodo gerado é enviado para aterro externo ou coprocessamento (utilização como matéria prima em cimenteiras). As etapas metodológicas incluíram:

- **Coleta de Amostras:** Amostras de lodo foram coletadas diretamente da estação de tratamento de efluentes da fábrica localizada em Pernambuco, Brasil. As amostras foram armazenadas em recipientes adequados para evitar contaminação e degradação.
- **Análise Físico-Química:** As amostras foram submetidas a uma série de análises físico-químicas, seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As principais normas utilizadas foram:

  NBR 10.004: Classificação de Resíduos Sólidos e Análise de metais pesados e contaminantes.

Tabela 1 - Métodos para classificação do resíduo

Determinação	Métodos
Ânions	EPA 300.0: 1993, POP PA 032
Cianeto Solubilizado	ISO 14403-2: 2012
Cianeto	EPA ISO 14403-2: 2012 / Preparo: EPA 9010 C: 2004
Fluoreto	SMWW, 24ª Edição, 2023 - Método 4500 F C
Índice de Fenóis	ISO 14402: 1999
Lixiviação	ABNT NBR 10005: 2004, SMWW, 23ª Edição, 2017 - Método 4500H+ B
Mercúrio	EPA 245.7: 2005
Metais Totais (ICP-OES)	EPA 6010 D: 2018 / Prep.: EPA 3010 A: 1992
pH	EPA 9045 D: 2004
Porcentagem de Sólidos e Cinzas	SMWW, 24ª Edição, 2023 - Método 2540 G
Solubilização	ABNT NBR 10006: 2004, SMWW, 23ª Edição, 2017 - Método 4500H+ B
Sulfeto	EPA 9034: 1996 / Preparo: EPA 9030 B: 1996
Surfactantes	ISO 16265:2019
SVOC	EPA 8270 E:2018 / Preparo: EPA 3510 C:1996
Toxafeno	EPA 8081 B: 2007
VOC	EPA 8260 D: 2018 / Preparo: EPA 5021A: 2014

Fonte: Os autores, 2024.

- **Análise termogravimétrica (TG):** A análise de TG foi realizada para avaliar a perda de massa do lodo em função da temperatura. Este teste foi conduzido no equipamento SDT650, TA Instruments, no qual a amostra foi aquecida a uma taxa de 10 °C/min, da temperatura ambiente até 1000 °C. A massa de amostra foi de aproximadamente 10 mg em cadinhos de alumina. Os experimentos foram realizados em duas atmosferas distintas: uma atmosfera inerte (nitrogênio, pureza de 99,99%) para a pirólise, e uma atmosfera oxidante (ar sintético, 20% O_2) para a combustão.

- **Análise de Lixiviado:** O lixiviado do lodo foi analisado para verificar a presença de contaminantes, utilizando métodos de extração e análise química, conforme as diretrizes da NBR 10.004. As determinações sobre os extratos do Solubilizado e Lixiviado foram realizadas com base nos seguintes métodos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2017) na Tabela 1.
- **A análise imediata e de poder calorífico superior (PCS):** A amostra passou por um tratamento prévio de secagem com estufa de circulação de ar da marca Marconi modelo MA 035 a 105 ºC, foi moída e peneirada (malha 100 mesh tyler), após isso foi realizada, utilizando forno mufla, a análise imediata (teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo), seguindo as normas ASTM E872-82R19 e ASTM E1755-01R20, e o Poder Calorífico Superior foi obtido utilizando uma bomba calorimétrica IKA C200 seguindo a norma ASTM D5865.

Os dados obtidos foram analisados e comparados com os limites estabelecidos para classificação do resíduo pelas normas técnicas NBR 10.004 e NBR 10.005 e diretrizes ambientais.

4. Resultados

Na Tabela 2, os parâmetros analisados para a LMARROM indicam que todos os resultados estão dentro dos limites permitidos. Por exemplo, o pH do lodo é 7,81, dentro do intervalo aceitável (2,0 a 13), e os níveis de sulfeto (23,8 mg/kg) estão muito abaixo do limite máximo permitido de 500 mg/kg. Além disso, a análise de cianeto revelou uma concentração inferior ao limite de quantificação (0,99 mg/kg), o que é consideravelmente menor que o valor máximo permitido de 250 mg/kg. Esses resultados demonstram que o lodo não apresenta componentes que possam classificá-lo como resíduo perigoso.

Tabela 2 - NBR 10004:2004 - LMARROM

Parâmetros	Unidade	(LQ) Limite de Quantificação	Resultados analíticos	(VMP) Valor Máximo Permitido - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)	-	2 a 13	7,81	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H^2S)	mg/kg	20	23,8	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	11,2	-
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,99	< 0,99	250 (c)
(b) = Avaliação da Corrosividade - Item "a" do tópico 4.2.1.2 da NBR 10004:2004 (c) = Avaliação da reatividade - Item "e" do tópico 4.2.1.3 da NBR 10004:2004.				

Fonte: Os autores, 2024.

Na Tabela 3, os resultados de presença de metais e compostos inorgânicos no lixiviado confirmam que seus teores estão abaixo dos limites especificados pela norma ABNT NBR

10004, o máximo permitido para arsênio é 1,0 mg/L e para cádmio é 0,5 mg/L. Por exemplo, o arsênio (<0,01 mg/L) está em concentração abaixo do valor máximo permitido (1,0 mg/L), e o cádmio (<0,001 mg/L) também está presente em concentrações abaixo do limite de (0,5 mg/L), esses valores visam proteger a qualidade do solo e das águas subterrâneas contra contaminação por substâncias tóxicas. Isso indica que o lixiviado não apresenta risco de contaminação do meio ambiente por metais pesados

Tabela 3 - NBR 10004:2004 - Lixiviado - Inorgânicos

Parâmetros	Unidade	(LQ) Limite de Quantificação	Resultados analíticos	(VMP) Valor Máximo Permitido - NBR 10004:2004
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,01	0,266	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	<0,001	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	<0,01	1,0
Cromo	mg/L	0,01	<0,01	5,0
Cromo	mg/L	0,01	<0,01	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	<0,1	150,0
Mercúrio	mg/L	0,000075	<0,000075	0,1
Prata	mg/L	0,01	<0,01	5,0
Selênio	mg/L	0,005	<0,005	1,0

Fonte: Os autores, 2024.

De todos os compostos orgânicos exigidos pela norma NBR 10005:2004 - Lixiviado - Orgânicos, somente o clorofórmio apresentou concentração acima do limite de quantificação (0,0215 mg/L); porém, ainda assim, o valor está bem abaixo do limite permitido de 6,0 mg/L. Esse resultado indica que, embora o clorofórmio tenha sido detectado, a concentração não representa um risco significativo para o meio ambiente ou para a saúde humana, de acordo com os critérios estabelecidos pela norma. Além disso, a detecção de concentrações tão baixas reforça a eficácia dos processos de tratamento aplicados ao lixiviado, mostrando que eles são capazes de manter os níveis de poluentes sob controle. No entanto, é essencial que o monitoramento contínuo seja realizado para garantir a conformidade contínua e prevenir eventuais aumentos nas concentrações ao longo do tempo.

A Tabela 4 mostra os dados obtidos pela análise imediata realizada em forno mufla e os valores de material volátil (MV) com 38,54% e cinzas (Z) com 66,64% obtidos, pela curvas de TG e DTG. É possível notar que os valores na análise imediata pelo forno mufla apresentou uma grande quantidade de cinzas. A soma de Z% e MV% maior 100% mostra que é possível que em temperaturas elevadas haja componentes inorgânicos que volatilizam

fazendo com que a soma dê um resultado acima de 100%. Sendo assim, a partir da análise de TG é possível estimar esses valores.

Esses materiais inorgânicos passam por transformações físico-química, resultando em um subproduto.A volatilização é especialmente significativa em temperaturas elevadas, onde a formação de partículas finas e cinzas é observada no estudo de Moradian (2009). É necessário fazer uma análise da composição química das cinzas para averiguar se existe possibilidade de fusão das mesmas em processos termoquímicos.

Tabela 4 - Análise Imediata e PCS do LMARROM

Amostra	LMARROM	LMARROM[d]
U(%)	74,45 ±0,21	-
MV(%)[a]	38,54 ±2,44	35
Z(%)[b]	66,64 ±1,26	49
CF(%)[c]	0	-
PCS(MJ.kg^{-1})	5,3 ±0,28	-
a, b e c = Base seca d = Análise imediata por termogravimetria		

Fonte: Os autores, 2024.

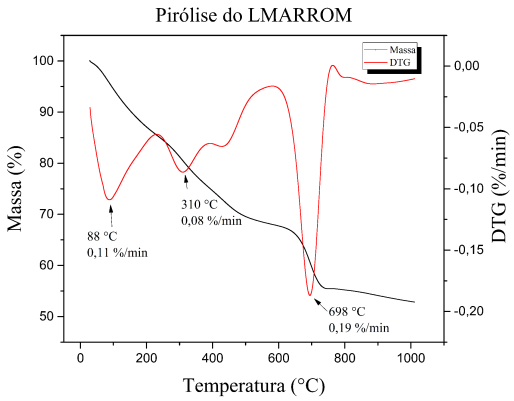
Comparado a outros estudos sobre lodos de papel e celulose, o lodo LMARROM mostra-se competitivo em termos de PCS, por exemplo os dados obtidos por Rui Mal et al., 2022 obteve o PCS de 3,18 MJ.kg^{-1}, demonstrando que o lodo do estudo foi superior ao encontrado na literatura com pré-tratamentos semelhantes. Na Figura 2 é apresentada a curva termogravimétrica, e a derivada da curva (DTG) para a pirólise do LMARROM. É possível observar que sua primeira inclinação da DTG em 88 °C representa a perda de umidade constituinte do material, enquanto no segundo pico em 310 °C ocorre a liberação de material volátil de menor peso molecular presente na biomassa. Em 698 °C ocorre a liberação de material volátil de maior peso molecular.

Conforme observado na análise imediata, existe ausência ou baixa concentração de carbono fixo e isso se confirma com a análise de TG em atmosfera oxidante (Figura 3) mostrando o mesmo padrão da curva em atmosfera inerte. A Figura 3 mostra as curvas obtidas na combustão do resíduo em uma atmosfera oxidante (ar sintético). A primeira perda de massa ocorre semelhante ao processo de pirólise, a umidade constituinte do material ocorre na temperatura de 86 °C, acompanhando uma perda de 0,12%/min, enquanto o segundo pico tem uma perda de massa de 0,14%/min e com 332 °C de temperatura, e o último pico ocorre em 695 °C quando o material alcança estabilidade térmica e com 0,21 %/min de perda de massa.

É possível notar que em ambas as atmosferas o material gerou curvas muito semelhantes, assim é destacada a ausência de carbono fixo. De acordo com os dados coletados de Periyavaram et al,. (2023) de um lixiviado de uma empresa do ramo alimentício com tratamento semelhantes ao do estudo, as curvas de TG e DTG em diferentes fluxos de gás e

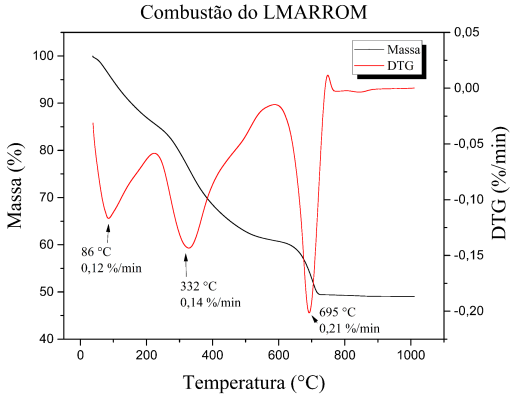
com a mesma taxa de aquecimento de 10 °C/min apresentaram a mesma semelhança nas duas atmosferas, evidenciando a ausência de carbono fixo.

Figura 2 - TG/DTG da Pirólise



Fonte: Os autores, 2024

Figura 3 - TG/DTG da Combustão



Fonte: Os autores, 2024

Sendo assim, o lodo produzindo nesse tipo de fábrica é um material viável para os processos de combustão nas caldeiras para recuperação energética, mesmo sendo um resíduo inferior a outros como biomassas lenhosas, porém a elevada quantidade de cinzas representa uma redução de 33,36% na disposição final, resultando em dedução de gastos para a empresa na disposição e do combustível. Sugere-se uma análise de composição química dos elementos presentes nas cinzas para constatar a possibilidade de ocorrer fusão das mesmas no processo de queima nas caldeiras acarretando em problemas operacionais de incrustamento nas paredes dos equipamentos.

5. Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste estudo, é possível concluir que:

- O lodo LMARROM apresentou um poder calorífico superior (PCS) de 5,3 $MJ.kg^{-1}$, enquadrando-se na faixa comum para materiais com teores de matéria volátil similares (38,54%);
- O alto teor de umidade (74,45%) pode ser superado com pré-tratamentos, como a secagem do lodo, para melhorar a eficiência energética;
- A análise química do lodo revelou um teor elevado de cinzas (66,64%), o que pode dificultar o processo de combustão por conta da possível fusão das cinzas dentro dos reservatórios das caldeiras;
- A utilização do lodo em sistemas de co-combustão em caldeiras apropriadas é viável, mas recomenda-se avaliar a composição das cinzas para prevenir problemas de fusão nos processos termoquímicos;
- O volume gerado, somado aos custos elevados de disposição e os impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa, reforçam a necessidade de explorar alternativas mais sustentáveis;
- Os resultados indicam que o lodo LMARROM possui características físico-químicas favoráveis para uso como biomassa, sendo uma opção para o aproveitamento energético. O aproveitamento do lodo como biomassa não apenas oferece uma destinação mais eficiente e ambientalmente correta, mas também contribui diretamente para a economia circular dentro do setor.

6. Referências bibliográficas

ABNT NBR 10004: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT NBR 10005: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASTM E872-82 (2019): ASTM International. ASTM E872-82(2019) - Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM E1755-01 (2020): ASTM International. ASTM E1755-01(2020) - Standard Test Method for Ash in Biomass. West Conshohocken, PA, 2020.

ASTM D5865: ASTM International. ASTM D5865-19 - Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken, PA, 2019.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

ABUSHAMMALA, H.; MASOOD, M. A.; GULAM, S. T.; MAO, J. On the conversion of paper waste and rejects into high-value materials and energy. Sustainability, v. 15, n. 8, p. 6915, 2023.

ACKERMANN, A. et al. Air Pollution Control in Waste Management: Strategies and Technologies. Waste Management, v. 20, n. 10, p. 757-767, 2000.

BALESTIERI, J. A. Environmental Impacts of Landfill Gas Emissions. Journal of Environmental Quality, v. 30, n. 4, p. 1474-1480, 2001.

ECOTSY. Virgin pulp vs recycled pulp: the environmental impact and benefits. Ecotsy, 2024.

EPE. Balanço Energético Nacional 2022. 2022.

GÓMEZ, Carla et al. Aproveitamento de lodo de papel e celulose como biomassa: desafios e oportunidades. 2018.

GONÇALVES, J. et al. Water management in the paper industry: Recycling and reuse practices. Water Resources Management, v. 33, n. 8, p. 2619-2635, 2019.

IBA. Relatório Anual 2021. 2021.

ICFPA. World Forest Industry Review 2021. 2021.

KAWATOKO, T. Sustainable Management of Waste in the Pulp and Paper Industry. Environmental Management, v. 42, n. 3, p. 556-567, 2009.

KUMAR, A. et al. Biological treatment of paper industry wastewater. Environmental Engineering Science, v. 40, n. 2, p. 179-187, 2023.

MARTINS, Ana; OLIVEIRA, Lucas. O impacto da economia circular no setor de papel e celulose. 2021.

MANFREDI, L. Efficiency improvements in the paper recycling process. Waste Management, v. 90, p. 123-132, 2023.

PERIYAVARAM, S. R. et al. Thermal behaviour of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of food waste using leachate as moisture source: Kinetic and thermodynamic analysis. Bioresource Technology, v. 373, 1 abr. 2023.

QUINTANA, M. et al. Valorization of paper sludge: Opportunities and challenges. Waste Management & Research, v. 42, n. 6, p. 394-402, 2024.

RENCHENG, Wang. Papermaking: principles and practice. 2020.

SCOTT, William. The Paper Machine: A Practical Guide to the Operation of a Paper Machine. 2018.

SILVA, J. F.; COSTA, T. M. Sustainable practices in wastewater treatment in the paper industry. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 37, n. 4, p. 1537-1551, 2020.

SPERLING, M. Effluent Treatment in the Pulp and Paper Industry: Issues and Solutions. 2001.

XIAOCHUN, S.; NILSSON, L.; BARBIER, C.; ULLSTEN, H. Numerical model of water removal and air penetration during vacuum dewatering. Drying Technology, v. 39, n. 10, p. 1349-1358, 2020. DOI: 10.1080/07373937.2020.1777040.

WANG, H.; YOSHITERU, H. Process of recycled paper manufacturing: A review. Journal of Clean Production, v. 140, p. 112-121, 2017.

ZANG, L. et al. Conversion of Paper Sludge into Biochemical Resources: A Comprehensive Review. Renewable Energy, v. 189, p. 642-654, 2023.

WERTHER, J.; OGADA, T. Combustion of Waste and Sewage Sludge. Progress in Energy and Combustion Science, v. 25, n. 1, p. 55-116, 1999.

SUN, Keke; ALI, Hafiz Asad; CAI, Yamei; XUAN, Dongxing; POON, Chi Sun. Recycling of incinerated sewage sludge ash and waste glass powder in alkali-activated slag/glass powders for sewer rehabilitation. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2024.

MORADIAN, Farzad. Effects of reduced-bed temperature on volatilization of inorganic components during combustion of municipal solid wastes in fluidized bed boilers. Department of Energy and Biotechnology, University of Borås, Borås, Sweden, 2009.



SCOTT, G. M. et al. Sludge characteristic and disposal alternatives for recycled fiber plants. In: 3° TAPPI RECYCLING SYMPOSIUM. Recycling Symposium Proceedings. Nova Orleans: 1995. p. 239-249.

IMAI ,M. H. Aproveitamento energético do lodo de ETEI de indústria de papel no município de Correia Pinto/sc. UFSC, 20210.