

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

CATARINA ALEXANDRE BARBOSA
KAUANE FANUSE FIALHO

TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS TÊXTEIS:
ANÁLISE DA INCINERAÇÃO, GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE

São Carlos
2024

CATARINA ALEXANDRE BARBOSA
KAUANE FANUSE FIALHO

TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS TÊXTEIS:
ANÁLISE DA INCINERAÇÃO, GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Aparecido Corrêa

São Carlos
2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues
Fontes da EESC/USP

B238t Barbosa, Catarina Alexandre
 Tratamento térmico de resíduos sólidos têxteis : análise
da incineração, gaseificação e pirólise / Catarina
Alexandre Barbosa, Kauane Fanuse Fialho; orientador Nivaldo
Aparecido Corrêa. -- São Carlos, 2024.

 Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola
de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2022.

 1. Resíduo têxtil. 2. Incineração. 3. Gaseificação.
4. Pirólise. I. Fialho, Kauane Fanuse. II. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Catarina Alexandre Barbosa e Kauane Fanuse Fialho**

Data da Defesa: 01/10/2024

Comissão Julgadora:

Resultado:

Nivaldo Aparecido Corrêa (Orientador(a))

Aprovado

Valdir Schalch

APROVADO

Igor Matheus Benites

Aprovado

Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

DEDICATÓRIA

*Aos nossos familiares e amigos,
pelo apoio incondicional ao longo
desta jornada.*

AGRADECIMENTOS

Catarina Alexandre Barbosa

Em primeiro plano, agradeço a Deus por ter realizado a utopia tão distante da realidade de uma menina periférica que o sistema não permitia sonhar. Em conjunto, à minha família: Meus avós, Valtinho e Ieda, que com muita luta, caridade e humildade permitiram que a educação fosse um caminho. A minhas tias, Betânia e Zoraide, por serem fonte de inspiração e incentivo para seguir. A minhas primas, Lohanne e Evelin, pela amizade e constante motivação. Ao meu irmão, Anderson, pela admiração e companheirismo na infância. Aos meus sobrinhos, Jhonatan e Lucas, que com seus respectivos nascimentos, me deram razão para viver. Ao meu pai, por tanto cuidado, suporte e preocupação. A minha mãe, minha estrela guia, que não permitiu jamais que as condições precárias por vezes vividas definissem quem eu seria. Tudo o que tenho, sou e serei é fruto dos sacrifícios que fizeram por toda a vida por mim.

Àqueles que encontrei trilhando meu caminho e o destino permitiu criar laços: Minhas amigas da pré-adolescência, Larissa, Gabrielli e Beatriz, que diariamente me fizeram enxergar que eu era capaz e que, mesmo seguindo rumos distintos, em momento algum me deixaram. Minhas amigas do ensino médio, Brenda, Giovanna, Verônica e Rúbia, que me acolheram, entenderam e aceitaram com amor e admiração em um período tão desgastante como o vestibular. À minhas amigas e confidentes na graduação, Ana Flávia, Ana Luiza, Isabella, Kauane e Laura, por todo o suporte acadêmico e emocional. Ao irmão que a vida me deu, Kairon, pelas partilhas profundas e apoio incondicional. Não teria sido possível sem vocês.

Serei eternamente grata àquele que mesmo distante, integralmente se fez perto e teve papel fundamental para essa conclusão: Dado. Seu amor, cuidado e suporte infindáveis me fizeram hoje estar aqui e não ter desistido.

Por fim, agradeço nosso orientador, Prof. Dr. Nivaldo Corrêa, por permitir que a realização desse trabalho fosse possível mesmo diante de adversidades.

Kauane Fanuse Fialho

Aos meus pais, Consuelo e Eugenio, minha eterna gratidão por todo o incentivo ao longo da minha vida, por acreditarem em mim incondicionalmente e por me ensinarem que a educação é o bem mais valioso que podemos ter.

Ao meu irmão Hiago, agradeço pelo apoio constante, pelo amor e pela parceria em todos os momentos.

Agradeço também a todos os meus familiares, em especial ao meu tio Lilinho e às minhas avós Terezinha e Consuelo, por todo o amor, incentivo e suporte ao longo da minha trajetória.

Aos meus amigos Ana Flávia, Ana Luiza, Catarina, Erick, Érika, Isabella, Laura, Livia, Nely e Thais, sou grata por cada um de vocês. Sem a presença e o apoio de vocês, nada disso seria possível.

Ao professor Nivaldo, minha sincera gratidão por todo o apoio e incentivo ao longo dessa jornada.

EPÍGRAFE

“Eu sou a continuação de um sonho
Da minha mãe do meu pai
De todos que vieram antes de mim
Eu sou a continuação de um sonho
Da minha vó, do meu vô
Quem sangrou pra gente poder sorrir”
Abebe Bikila Costa Santos (2022).

RESUMO

BARBOSA, C. A., FIALHO, K. F. **Tratamento térmico de resíduos sólidos têxteis: análise da incineração, gaseificação e pirólise.** 2024. 49 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

O Brasil é um dos maiores destaques mundiais na produção têxtil, mas o crescimento desse setor também gera preocupações ambientais significativas, especialmente pela grande quantidade de resíduos têxteis, normalmente destinados a aterros sanitários, contribuindo para sua sobrecarga. Este trabalho tem como objetivo estudar técnicas de tratamento térmico desses resíduos, focando nos processos de incineração, gaseificação e pirólise. A pesquisa foi realizada por meio de revisão bibliográfica descritiva de publicações científicas sobre o tema. O tratamento térmico surge como uma alternativa à disposição de resíduos têxteis em aterros sanitários, englobando métodos como incineração, gaseificação e pirólise. A incineração utiliza altas temperaturas para promover a combustão dos resíduos, reduzindo-os a cinzas, apresentando vantagens como a diminuição da patogenicidade, a drástica redução de volume e o potencial de recuperação energética. Entretanto, essa técnica também está associada à significativa emissão de gases poluentes e materiais particulados. A gaseificação converte os resíduos por meio de reações com agentes gaseificantes, como dióxido de carbono, ar ou vapor, gerando gás de síntese composto principalmente por metano, hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono. Desse processo tem-se como positivo a redução do volume de resíduos aliado ao potencial de produção de gases de síntese que podem ser aplicados ao desenvolvimento de combustíveis e geração de energia elétrica; não obstante, esse ocorre em detrimento da ocorrência de material particulado, alcatrão e compostos de enxofre e nitrogênio. A pirólise, por sua vez, degrada o resíduo pela aplicação de calor em ausência parcial ou total de oxigênio e dentre seus múltiplos subprodutos gerados possui carvão vegetal, bio-óleo e gases que também podem ser direcionados a utilização como combustível. Contudo, as características de seus produtos dependem da composição do material utilizado na técnica, o que limita e pressupõe dúvidas quanto ao seu aproveitamento. Por fim, embora promissoras, as técnicas de tratamento térmico para a gestão de resíduos têxteis ainda requerem mais estudos e testes em escala, a fim de mapear adequadamente sua viabilidade e garantir uma implementação eficiente e ambientalmente responsável.

Palavras-chave: Resíduo têxtil. Incineração. Gaseificação. Pirólise. Processo térmico. Processo químico. Destinação final

ABSTRACT

BARBOSA, C. A., FIALHO, K. F. **Thermal treatment of textile solid waste:** analysis of incineration, gasification, and pyrolysis. 2024. 49 f. Monograph (Final Paper) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Brazil is one of the world's greatest highlights in textile production, but the growth of this sector also raises significant environmental concerns, especially due to the large amount of textile waste, normally intended for landfills, contributing to its overload. This monograph aims to study thermal treatment techniques for these wastes, focusing on incineration, gasification and pyrolysis processes. The research was conducted through descriptive bibliographic review of scientific publications on the subject. Thermal treatment arises as an alternative to disposing of textile waste in landfills, encompassing methods such as incineration, gasification, and pyrolysis. Incineration uses high temperatures to promote combustion of waste, reducing it to ashes, presenting advantages such as decreased pathogenicity, drastic volume reduction and the potential for energy recovery. However, this technique is also associated with significant emissions of pollutant gases and particulate matter. Gasification converts waste through reactions with gasifying agents such as carbon dioxide, air or steam, generating synthesis gas composed mainly of methane, hydrogen, monoxide and carbon dioxide. This process has the positive of reducing the volume of waste combined with the potential for the production of synthesis gases that can be applied to the development of fuels and generation of electrical energy; nevertheless, this occurs at the expense of the occurrence of particulate material, tar and sulfur and nitrogen compounds. Pyrolysis, in turn, degrades the residue by applying heat in partial or total absence of oxygen and among its multiple by-products generated has charcoal, bio-oil and gases that can also be directed to use as fuel. However, the characteristics of its products depend on the composition of the material used in the art, which limits and assumes doubts as to its use. Finally, while promising, thermal treatment techniques for the management of textile waste still require more studies and testing at scale in order to adequately map their feasibility and ensure an efficient and environmentally responsible implementation.

Keywords: Textile waste. Incineration. Gasification. Pyrolysis. Thermal process. Chemical process. Final destination

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reator de leito fixo utilizado no processo de incineração	32
Figura 2 - Reator de leito fluidizado utilizado no processo de gaseificação	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Contexto mundial do descarte e da minimização dos resíduos sólidos ..	18
Quadro 2 - Classificação dos resíduos sólidos segundo a NBR 10004/2004	19
Quadro 3 - Codificação do resíduo sólido têxtil segundo a NBR 10004/2004	20
Quadro 4 - Tipos de resíduos produzidos pela indústria têxtil	20
Quadro 5 - Vantagens e dificuldades técnicas da gaseificação com diferentes agentes de gaseificação	24
Quadro 6 - Presença de impurezas no gás produzido, problemas decorrentes e mecanismos de controle	26
Quadro 7 - Características das tecnologias de pirólise	28
Quadro 8 - Comparativo das técnicas de tratamento térmico analisadas	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS	17
3. REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1. Resíduos têxteis.....	18
3.2. Tratamento térmico de resíduos sólidos	21
3.2.1. Incineração	22
3.2.2. Gaseificação	23
3.2.3. Pirólise	27
4. METODOLOGIA.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.1. Incineração de resíduos têxteis.....	30
5.2. Gaseificação de resíduos têxteis	34
5.3. Pirólise de resíduos têxteis	36
5.4. Análise cinética e comparativa da pirólise e gaseificação	37
5.5. Comparativo das técnicas de tratamento térmico analisadas	38
6. CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

A relação direta entre o crescimento econômico e a geração de resíduos torna a gestão de resíduos sólidos urbanos um desafio para as cidades que aspiram à sustentabilidade. Em adição a isso, é visualizada uma problemática que envolve a alteração da composição dos mesmos, que é justificada pelas inovações tecnológicas desenvolvidas para produtos de uso comum, princípio que agrava a sua disposição indevida (Dias, 2012). Em decorrência desses fatores, uma das maiores questões enfrentadas em locais adensados é a disposição correta dos seus resíduos gerados (Gouveia, 1999).

Diante de um cenário com produção de confecção de aproximadamente 5 bilhões de peças no ano de 2023, como resultado do intenso processo de globalização, o consumo e fomento da indústria têxtil personificam um papel fundamental na economia através da constituição de riqueza e empregabilidade. Apesar disso, seu potencial nocivo sobre a geração de resíduos provoca impactos ambientais relevantes ao longo de toda a sua cadeia produtiva, tornando-se, assim, uma das maiores fontes originárias de resíduos sólidos do planeta (IEMI, 2024; Muthu, 2020).

Nesse sentido, alternativas de manejo para a eliminação total ou parcial desses resíduos passam a ser temáticas fundamentais a serem abordadas em pesquisas científicas e aplicadas a indústrias que buscam atrelar o seu desenvolvimento à sustentabilidade. Uma possibilidade para tal seria o tratamento térmico de resíduos têxteis que está relacionado com processos de gaseificação, pirólise e incineração, técnicas que são empregadas com objetivo de reduzir volume e gerar energia, mas que em detrimento desses benefícios, podem ocasionar a emissão de gases de efeito estufa caso não sejam administradas cautelosamente (Santos et al., 2018).

As repercussões negativas sobre o meio ambiente resultantes da aplicação de tecnologias térmicas para a supressão de resíduos devem ser avaliadas e justapostas levando em consideração seu custo-benefício, uma vez que embora possam possuir boa viabilidade econômica, a formação de gases tóxicos e material particulado promovem malefícios significativos à saúde pública e seu entorno (Martins, 2021).

Com base nas informações apresentadas, faz-se necessária uma análise crítica para distinguir as melhores práticas e estratégias para o gerenciamento de

resíduos têxteis por meio do tratamento térmico com seus pontos positivos e negativos, visando a minimização de impactos ambientais, tendo como fundamento uma revisão holística da literatura atual.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar e analisar as principais tecnologias de tratamento térmico aplicáveis aos resíduos têxteis.

Os objetivos Específicos, são:

- Descrever os métodos de incineração, gaseificação e pirólise no tratamento de resíduos têxteis;
- Analisar estudos que ilustram a aplicação da incineração, gaseificação e pirólise no tratamento de resíduos têxteis.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Resíduos têxteis

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2021), o Brasil chegou ao século XXI, com uma média populacional de mais 200 milhões de habitantes, e seguido a esse contingente de crescimento demográfico e expansão urbana acompanhou-se a necessidade de produção e consumo. Pela mesma razão, o IPEA correlaciona a esse consumismo a produção de resíduos sólidos que segundo o instituto de pesquisa coloca o país no patamar de maiores geradores do mundo, sendo necessário o estabelecimento de diretrizes e ações para a destinação ambientalmente adequada dos resíduos gerados (Szigethy e Antenor, 2021).

No cenário mundial, Marchi (2011) descreve em seu artigo uma visão geral das políticas de descarte de resíduos sólidos adotadas por diversos países, conforme ilustrado no Quadro 1 abaixo.

Quadro 1 - Contexto mundial do descarte e da minimização dos resíduos sólidos

Países/Continentes	Coleta	Descarte	Programa de ação
Continente Africano	Realizadas por catadores, carroças e caminhões	Em lixões	
EUA/Canadá	Programa 3R's como forma de redução gradual dos resíduos sólidos	Aterros sanitários /incineração	Educação ambiental, pesquisa, financeiro, normas regulamentadoras e avanço tecnológico
Colômbia	Coletores de reciclagem	Reciclagem de vidro	Parceria com fabricantes de vidro e escolas públicas.
Austrália, Hong Kong, Japão, Coréia do Sul, e Nova Zelândia	Separação na fonte / Reciclagem		Estimulados pela educação pública, por novas práticas e cobrança de taxa
China/ Vietnã	Reutilização/Reciclagem		Municipal com apoio do governo federal
Índia	Recuperação / reutilização / reciclagem de plásticos		Limitar ao uso de embalagens plásticas
União Europeia	Reuso / reciclagem		Práticas de políticas de conscientização ambiental já incorporados aos cidadãos

Fonte: Adaptado de Marchi (2011).

No Brasil, o gerenciamento dos resíduos sólidos é estabelecido pela Lei 12.305/2010 que implementou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) com o propósito de criar conjunto de realizações em torno das questões ambientais relevantes em que as políticas de gestão dos resíduos sólidos exigem mais engajamentos dos atores envolvidos no processo, tanto no campo econômico social, quanto ambiental e cultural (Marchi, 2018).

Conforme estabelecido pela Lei 12.305/2010, os resíduos sólidos englobam materiais e substâncias descartados por atividades humanas, como as domésticas, industriais e de saúde. Esses resíduos podem ser sólidos, semissólidos, gases ou líquidos, sendo que, no caso de líquidos, o descarte na rede de esgoto deve ser inviável. A lei também estabelece que o gerenciamento de resíduos deve abranger todas as etapas, desde a coleta até a destinação final, conforme previsto no plano municipal de gestão integrada ou no plano de gerenciamento de resíduos sólidos (Brasil, 2010).

Além disso, a lei supracitada estabelece uma ordem de prioridade para a gestão dos resíduos: "não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos" (Brasil, 2010, Art. 9º).

Complementando a PNRS, o Brasil conta com outros instrumentos normativos e regulatórios que disciplinam a temática dos resíduos sólidos, por exemplo, a NBR 10004/2004 que dispõe a respeito da classificação de resíduos quanto ao seu grau periculosidade e as classes são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos resíduos sólidos segundo a NBR 10004/2004

Resíduos classe I	Perigosos: danosos à saúde e ao meio ambiente
Resíduos classe II	Não perigosos
Resíduos classe II A	Não inertes: com aspectos de combustão, biodegradável ou solúvel, não se adequam à classe I
Resíduos classe II B	Inertes – não são nocivos à saúde

Fonte: ABNT (2004).

Quanto ao setor têxtil, Guimarães e Martins (2010) destacam que essa indústria é uma das principais em expansão no Brasil. Contudo, ela também é responsável por uma considerável produção de resíduos sólidos, o que, devido à classificação e descarte inadequados, pode acarretar impactos significativos ao meio ambiente. A

forma como esses resíduos são gerados e acumulados é uma questão complexa, que reforça a importância de sua correta classificação e descarte.

De acordo com a NBR 10004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os resíduos têxteis são classificados como não perigosos e pertencem à classe IIA - não inertes. No entanto, caso ocorra contaminação durante o processo de produção, a norma prevê sua reclassificação para a classe I (resíduos perigosos). Esses resíduos também são identificados pelo código A010, conforme apresentado no Quadro 3 (ABNT, 2004).

Quadro 3 - Codificação do resíduo sólido têxtil segundo a NBR 10004/2004

Código de identificação	Descrição do resíduo
A010	Resíduo de materiais têxteis

Fonte: ABNT (2004).

O Quadro 4 descreve os principais tipos de resíduos gerados pela indústria têxtil.

Quadro 4 - Tipos de resíduos produzidos pela indústria têxtil

Resíduos de fibra e tecido	Sobras de tecidos e fibras não utilizadas durante o processo de corte e confecção são descartados durante a produção
Resíduos químicos	Produtos químicos utilizados nos processos de tingimento, acabamento e tratamento de tecidos. Efluentes líquidos contaminados por substâncias químicas
Resíduos sólidos	Embalagens de materiais recebidos (papelão, plástico etc.) ou resultantes de processos de fabricação
Resíduos de equipamentos e manutenção	Peças descartadas de máquinas e equipamentos, e resíduos de manutenção como lubrificantes e filtros
Resíduos energéticos	Resíduos de combustíveis ou subprodutos de processos de geração de energia
Resíduos têxteis pós-consumo	Produtos têxteis descartados pelos consumidores, como roupas velhas e não utilizadas
Resíduos de embalagens	Embalagens de produtos acabados, etiquetas, caixas, entre outros
Resíduos biodegradáveis	Resíduos orgânicos provenientes de processos de tingimento e acabamento

Fonte: Gedanken (2024).

O descarte das sobras processadas pela indústria de confecção ainda exige uma análise mais profunda. Segundo Menegucci et al. (2015), isso se deve aos processos de reutilização e reciclagem desses resíduos, considerando que a

disposição final geralmente envolve aterros sanitários, lixões ou incineração. De acordo com Juanga-Labayen, Labayen e Yuan (2022), globalmente, cerca de 75% dos resíduos têxteis são descartados em aterros sanitários, 25% são reciclados ou reutilizados, e, dos resíduos reciclados, menos de 1% retorna como vestuário.

Além disso, como mencionado por Kuasne (2008), o tempo de degradação dos resíduos têxteis varia conforme suas origens e a presença de elementos químicos em suas composições. Esses resíduos podem ser de origem natural, provenientes do reino vegetal, animal ou mineral, ou ainda originados de materiais sintéticos.

Por fim, devido à predominância do descarte de resíduos têxteis em aterros sanitários, torna-se necessário o estudo de outras técnicas e alternativas, como os tratamentos térmicos, para reduzir o volume de resíduos destinados a esses locais, considerando a conhecida problemática da capacidade dos aterros sanitários diante do avanço dos processos de urbanização (Heleno; Silva, 2022).

3.2. Tratamento térmico de resíduos sólidos

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) em seu 18º Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, que apresenta dados de 2019, os resíduos sólidos gerados no Brasil são enviados predominantemente para aterros sanitários sem qualquer processamento prévio (Brasil, 2020).

A longo prazo, outras formas de destinação que não envolvem o aterramento de resíduos mostram-se vantajosas e promissoras, uma vez que contribuem para a redução do passivo ambiental associado à deposição em aterros sanitários, que possuem como uma das principais desvantagens o crescente acúmulo de volume de resíduos, agravando os problemas ambientais (Heleno; Silva, 2022).

Dentre as alternativas de destinação, tem-se diferentes formas de manejo de resíduos sólidos, como o tratamento mecânico e/ ou biológico e, também, o tratamento térmico de resíduos (Prates; Pimenta; Ribeiro, 2019).

O tratamento térmico é uma alternativa à disposição de resíduos em aterros sanitários e caracteriza-se pelo processo de tratamento e manejo dos resíduos a partir do emprego de altas temperaturas para reduzir, transformar e/ou destruir os materiais indesejados. E, dentre as técnicas de tratamento térmico destaca-se a incineração, pirólise e gaseificação (Machado, 2015).

Na legislação ambiental brasileira, o tratamento térmico de resíduos sólidos é regulamentado pela Resolução CONAMA 316/02, que define esse processo como qualquer técnica aplicada a temperaturas iguais ou superiores a 800 °C. Além de enfatizar a importância da aplicação, operação e manutenção adequada desses tratamentos, a resolução supracitada também alerta que, se não manejados corretamente, eles podem ser fontes de risco ambiental e emissões de poluentes perigosos, com potencial de causar danos à saúde humana e ao meio ambiente.

Em uma análise voltada para a sustentabilidade, Andrade et al. (2023) apontam o tratamento térmico de resíduos sólidos como uma técnica essencial, tanto para a redução dos impactos ambientais quanto para a implementação de soluções mais eficazes, desde que sejam conduzidas respeitando as legislações e normas vigentes.

3.2.1. Incineração

A incineração de resíduos sólidos é uma técnica de tratamento térmico amplamente utilizada para o descarte de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Esse processo ocorre em usinas de incineração, onde os resíduos são submetidos a temperaturas superiores a 900°C, garantindo uma combustão eficiente e a consequente redução significativa do volume de resíduos, restando cinzas (Oppelt, 1987; Gouveia; Prado, 2010).

Segundo Gripp (1998), os incineradores de RSU podem ser classificados de acordo com o processamento dos resíduos, dividindo-se em Incineradores de Queima Direta e Incineradores do tipo Combustível Derivado do Resíduo. Nos Incineradores de Queima Direta, os resíduos não passam por nenhum preparo prévio, sendo encaminhados diretamente para as usinas de incineração. Por outro lado, nos incineradores do tipo Combustível Derivado do Resíduo, os materiais a serem incinerados passam por um processo de preparo, que envolve separação, trituração, classificação por ar e remoção de metais, antes de serem destinados ao incinerador.

De acordo com Gouveia e Prado (2010), entre as vantagens da incineração, destaca-se a eliminação de patógenos devido às altas temperaturas presentes no processo, o que torna esse método especialmente eficaz para o tratamento de resíduos perigosos e de saúde. Além de diminuir o volume de resíduos que seriam destinados aos aterros sanitários, a incineração também possibilita a recuperação de

energia, uma vez que a combustão gera vapor d'água capaz de mover turbinas para a produção de eletricidade (Cardozo; Mannarino; Ferreira, 2021).

Apesar dos benefícios supracitados, a incineração apresenta riscos significativos, principalmente relacionados à emissão de substâncias tóxicas ao meio ambiente, como materiais particulados, gases poluentes, além de metais pesados e compostos orgânicos, incluindo dioxinas e furanos (Rushton, 2003).

Embora os incineradores possam operar de forma ambientalmente segura quando as emissões estão dentro dos limites estabelecidos pela legislação, qualquer falha no controle dessas emissões pode transformar esse método em uma ameaça à saúde pública, uma vez que a exposição contínua a essas substâncias pode aumentar o risco de desenvolver diversos tipos de câncer (Elliott et al., 1996; Cardozo; Mannarino; Ferreira, 2021).

No Brasil, a incineração não é comumente adotada como método de tratamento de resíduos sólidos, embora nos últimos anos tenham surgido diversos projetos visando à sua implantação e licenciamento. Apesar desse interesse crescente, os desafios regulatórios e ambientais permanecem significativos (Mannarino; Ferreira; Gandolla, 2016).

A legislação brasileira, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 316/02, apresenta padrões de emissão atmosférica considerados muito permissivos para incineradores, além de lacunas na regulamentação sobre a implementação e operação das usinas de incineração. Isso contrasta com as normas europeias, onde os limites seguros de emissão são mais restritivos, e os incineradores estão sujeitos a manutenções e melhorias constantes para atender a esses padrões (Cardozo; Mannarino; Ferreira, 2021).

3.2.2. Gaseificação

A gaseificação refere-se a um processo de conversão termoquímico de combustíveis carbonáceos, que ocorre por meio de uma reação de oxidação térmica parcial capaz de gerar um gás de síntese. Esse é essencialmente constituído por monóxido de carbono e hidrogênio de baixo a médio poder calorífico, porém com um valor de aquecimento que através de uma queima direta pode ser destinado a geração de energia, utilizado como matéria-prima para fabricação de amônia e combustíveis líquidos (Balat; Kirtay, 2010).

Essa via de tratamento térmico utiliza agentes de gaseificação como o ar, vapor de água e oxigênio. Além disso, é desenvolvida sob a faixa de temperatura de 800 a 1.100 °C e pode ocorrer sob pressão atmosférica ou até 33 bar (Lora et al., 2012). Conforme menciona Warnecke (2000), a gaseificação, como processo termoquímico, está no meio do caminho entre a combustão e a pirólise, visto que ao contrário da combustão, não admite a oxidação completa do carbono e do hidrogênio constituintes do CO_2 e H_2O que originarão os compostos combustíveis CO , H_2 e CH_4 . Em adição aos gases produzidos, também há a presença de mais produtos característicos da combustão, como CO_2 , H_2O , O_2 e N_2 .

O Quadro 5 descreve as vantagens e dificuldades técnicas do processo de gaseificação de acordo com os agentes de gaseificação empregados.

Quadro 5 - Vantagens e dificuldades técnicas da gaseificação com diferentes agentes de gaseificação

Agentes de Gaseificação	Vantagens	Dificuldades técnicas
Ar	- Baixo custo, é o mais barato - Combustão parcial da biomassa para fornecimento de energia necessária ao processo - Teor de partículas e alcatrão moderados dependentes do tipo de gaseificador	- Baixo poder calorífico do gás
Vapor	- Alto poder calorífico do gás - Alto teor de H_2 no gás	- Requer fornecimento de calor externo (gerador de vapor) - Crescimento do teor de alcatrão no gás produzido e necessidade de limpeza catalítica
Oxigênio	- O gás de síntese não é diluído por nitrogênio - Ausência do alcatrão no gás produzido como consequência das altas temperaturas de operação - Permite a gaseificação de biomassa em estado líquido	- Necessidade de planta de separação de ar - Altas temperaturas de gaseificação (a mistura com vapor pode-se usar para controlar o valor dela no processo) - Geralmente o uso de oxigênio puro é considerado apenas em gaseificadores de leito arrastado
Dióxido de carbono	- Altos valores do poder calorífico do gás - Altos valores de H_2 e CO no gás	- Requer aquecimento indireto - Requer limpeza catalítica do gás - Requer altas temperaturas para que o CO_2 possa ter reatividade
Água supercrítica	- Limpeza do gás in situ. A maior parte do CO_2 e de outros poluentes como H_2S, NH_3 e HCl ficam retidos na fase líquida - Alto teor de hidrogênio no gás (> 50%) - Permite a gaseificação da biomassa em estado líquido	- Tecnologia recente, ainda precisa de muito esforço de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D)

Fonte: Wang et al., (2008) e Tijmensen (2000).

Os coeficientes que podem alterar a performance da técnica são o tipo de agente de gaseificação, o fator de ar, características físico-químicas e energéticas do material tratado, a não utilização de catalisadores e o tempo de residência. No entanto, o processo é determinado pela quantidade de ar e combustível que são introduzidos no reator. Nesse sentido, a sua eficiência é medida como um parâmetro que pode ser calculado a quente e a frio: a quente, leva-se em consideração o quociente do somatório entre a energia sensível e química do gás produzido e o poder calorífico do combustível resultante; já a frio, é analisado o quociente entre a energia química do gás e a do combustível. Para fins comparativos, convencionou-se que a eficiência medida a frio possui resultados mais assertivos, pois não é influenciada pelo valor do calor sensível do gás (Lora et al., 2012).

No que diz respeito às características do combustível gerado, a granulometria e a umidade são variáveis relevantes nesse sistema, em virtude do fato de que a umidade, por exemplo, pode alterar significativamente a composição do gás combustível em função da diminuição da temperatura interna do reator devido a energia necessária para a vaporização da água contida nesse composto. Por conseguinte, alcançar um teor de umidade no combustível menor que 20%, pode gerar um efeito benéfico sobre a gaseificação pelo potencial de intensificar a reação entre gás e água. Outro aspecto importante a ser levantado, é que a queda da temperatura decorrente da evaporação da umidade do combustível, reduz a velocidade da reação e, conseqüentemente, a eficiência do processo (Jayah et al., 2003). Dessa forma, é relatado ser mais interessante a umidade ser inferior a 25% (Midilli et al., 2001; Dogru et al., 2002).

Dentre as tecnologias disponíveis no campo dos gaseificadores, destacam-se os de leito fixo contracorrente, leito fixo concorrente, leito fixo tipo fluxo cruzado, leito fluidizado borbulhante (LFB), leito fluidizado circulante (LFC) e de leito arrastado. Suas terminologias são definidas a partir da direção relativa do fluxo do material, do agente de gaseificação e da fonte de calor. Os gaseificadores de leito fixo operam em modo contínuo onde o combustível é alimentado e as cinzas são retiradas através da movimentação do leito da região superior até a porção inferior do reator, podendo o seu fluxo gasoso estar em corrente ascendente, referida como *updraft* ou descendente, *downdraft*; nestes, os processos de pirólise, combustão e a gaseificação propriamente dita desenvolvem-se no interior de um só reator (Lora et al., 2012). Por outro lado, os gaseificadores de leito fluidizado operam em modo isotérmico por meio

de uma câmara de reação repleta de partículas inertes sobre uma placa distribuidora que é mantida em suspensão por um fluido em direção ascendente (Ramirez e Martinez, 2007). Por fim, os gaseificadores de leito arrastado que exigem partículas muito pequenas para seu processamento operam com o resíduo e agente oxidante seguindo o mesmo fluxo, onde este material é transportado pelo gás (Higman; Der Burgt, 2008).

No que concerne aos tratamentos térmicos de resíduos têxteis, a gaseificação é tida como uma técnica promissora, especialmente dentro do conceito de bioeconomia circular, devido ao seu potencial de transformação de a partir de um resíduo produzido em grande montante gerar gases combustíveis que podem ser aplicados ao fomento de energias alternativas (Muhammad, 2022). No entanto, é importante ressaltar que, a depender da composição do resíduo tratado, existe a possibilidade de ao longo do processo serem gerados subprodutos potencialmente tóxicos ao meio ambiente que requerem um manejo e mecanismo de ação adequados para gerenciá-los, como é possível visualizar na tabela abaixo (Lora et al, 2012).

O Quadro 6 menciona quais são as possíveis impurezas que podem estar presentes no gás de síntese produzido.

Quadro 6 - Presença de impurezas no gás produzido, problemas decorrentes e mecanismos de controle

Impurezas	Fonte	Possíveis problemas	Mecanismos de controle e/ou mitigação
Particulados	Cinza, carbono, material do leito	Erosão, aglomerações e incrustações, e poluição ambiental	Filtragem, lavagem do gás
Metais alcalinos (sódio e/ou potássio nas cinzas)	Cinzas	Corrosão	Resfriamento, condensação, filtragem, adsorção
Compostos nitrogenados (NO_x , NH_3 , HCN)	Reação do nitrogênio do ar e do combustível	Corrosão, poluição ambiental	Tratamento com substâncias de caráter básico, utilização de oxigênio puro no processo
Compostos de enxofre e cloro (HCl , H_2S)	Reação do enxofre e do cloro presente no combustível		Lavagem, captura com $CaCO_3$, $MgCO_3$
Alcatrão (mistura complexa de hidrocarbonetos)	Baixa temperatura no processo, quantidade considerável de voláteis no combustível	Corrosão, aglomerações e incrustações, efeitos sobre a saúde	Remoção, craqueamento

Fonte: Lora et al., (2012).

3.2.3. Pirólise

A pirólise é caracterizada como um processo endotérmico que diz respeito à degradação térmica de um material quando este é exposto a uma fonte de calor externa na ausência parcial ou completa de oxigênio, em concentrações suficientemente baixas para evitar a gaseificação da substância e para assim possibilitar, após sua conclusão, na obtenção de espécies moleculares em frações menores. As especificidades de seu produto, que podem variar em função de quantidade e qualidade, se desenvolvem de acordo com parâmetros utilizados em sua operação, como a aplicação de tecnologia, tempo de residência, taxa de aquecimento, temperatura e substância a ser degradada (Silvério et al, 2008; Lora et al., 2012).

As variáveis empregadas no processo estão diretamente relacionadas com os resultados da composição dos produtos principais gerados em sua finalização. O aumento do tempo de residência dos vapores em seu reator impulsiona o desenvolvimento das porções sólidas e empobrece as líquidas e gasosas (Sanchez et al., 2009). Já o aumento da taxa de aquecimento e temperatura, influenciam no rendimento dos produtos voláteis e gasosos e consequentemente ampliam a produção de gás; por outro lado, a sua diminuição, maximiza a produção de carvão vegetal (Gomez, 2002). Por outra perspectiva, temperaturas moderadas e baixas pressões incitam a produção de conteúdos líquidos (Inganzo et al., 2002). Além disso, faz-se relevante mencionar que o tamanho das partículas do resíduo trabalhado é um fator que possui a capacidade de afetar a efetividade da pirólise, uma vez que como o mecanismo de transferência de calor também depende dele para ser desenvolvido, quanto maior o diâmetro, menor a transmissão de calor para o interior dessa partícula e mais dificultoso é o seu processamento (Gomez, 2002).

Dentre as possibilidades de desenvolver o processo de pirólise, a carbonização destaca-se como a sua variante mais lenta e antiga que visa a obtenção do combustível carvão vegetal através do aquecimento do material sob uma faixa de temperatura que está entre 300 e 500 °C até a remoção total do seu composto volátil, podendo também ter como produto, em menores quantidades, bio-óleo e ácido pirolenhoso (Pedroza et al., 2011). De maneira semelhante, a pirólise convencional, também definida como pirólise lenta, ocorre sob uma taxa de aquecimento mais baixa em relação às demais, tendo como objetivo principal a obtenção majoritária de carvão vegetal que pode ser obtido em um intervalo de tempo entre 5 e 30 minutos, em

conjunto a pequenas quantidades de bio-óleo e gás (Gomez, 2000). Por outro lado, a pirólise rápida, que é tida como um mecanismo mais avançado, desenvolve-se em taxas de aquecimento superiores, transitando entre 600 e 1200 °C/min durante condução e convecção de calor, e tempo de residência baixíssimo, onde é possível alcançar altos rendimentos de bio-óleo (Gomez, 2002).

O Quadro 7 descreve as características das tecnologias atreladas ao processo de pirólise.

Quadro 7 - Características das tecnologias de pirólise

Tecnologia	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura máxima	Produto principal
Carbonização	Horas - dias	Muito pequena	400	Carvão
Convencional	5-30 min	Pequena	600	Gás e líquido
Rápida	0,5-5 s	Intermediária	650	Gás e líquido
Flash	< 1 s	Alta	< 650	Gás e líquido
Ultrarrápida	< 0,5 s	Muito alta	1.000	Gás e líquido
A vácuo	2-30 s	Intermediária	400	Gás e líquido

Fonte: Lora et al., (2012).

Essa técnica quando aplicada como tratamento térmico de resíduos têxteis vê-se como vantajosa pela exigência de equipamento simples, por ser uma operação de baixa pressão, ter residual pouco significativo no que se refere a impactos ambientais, pela alta eficiência de conversão na ordem de 83% e pelo seu potencial de geração de múltiplos produtos como bio-óleo, carvão e gases que podem ser direcionados à produção de energia. Ademais, devido ao fato de não haver queima envolvida em sua execução, há uma menor possibilidade de serem gerados gases poluentes e toxinas nocivas, o que permite uma melhor aplicabilidade da tecnologia dentro dos conceitos de sustentabilidade no gerenciamento de resíduos sólidos (Velmurugan, 2021).

4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho baseou-se em pesquisas bibliográficas descritivas, que, segundo Gerhardt e Silveira (2009), envolvem a utilização de informações documentais de outros autores. O objetivo foi apresentar e detalhar os diferentes tratamentos térmicos aplicáveis aos resíduos têxteis, como incineração, gaseificação e pirólise.

Inicialmente, foram coletadas informações de fontes secundárias, como livros, artigos científicos, teses, dissertações e publicações especializadas que abordam a temática deste trabalho. A coleta dessas informações foi realizada de maneira sistemática, utilizando palavras-chave específicas, como: “tratamento térmico de resíduos têxteis”, “pirólise de resíduos têxteis”, “incineração de resíduos têxteis” e “gaseificação de resíduos têxteis”. Foram selecionadas fontes tanto em língua portuguesa quanto em língua inglesa, ampliando o espectro de referências e garantindo a diversidade de perspectivas.

As fontes foram selecionadas a partir de bases de dados do Google Acadêmico e o Portal de Busca Integrada da USP, o que ampliou significativamente o alcance e a profundidade da investigação. Os critérios de inclusão priorizaram publicações diretamente relacionadas à temática do tratamento térmico de resíduos têxteis, enquanto estudos que não se alinharam a esse foco foram excluídos.

Após a coleta de dados, a análise foi realizada qualitativamente, visando interpretar criticamente as informações da literatura e identificar os conceitos centrais sobre os processos de incineração, gaseificação e pirólise no tratamento de resíduos têxteis.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de resíduos sólidos e o subsequente manejo, tratamento e disposição desses materiais representam um grande desafio para os centros urbanos. Para atenuar a pressão ambiental causada por esses resíduos, que geralmente são destinados a aterros sanitários e ocupam grandes extensões de terras, é essencial o desenvolvimento de estudos e técnicas especializadas que proponham alternativas viáveis para o tratamento de tais passivos ambientais (Muller et al., 2021).

No caso dos resíduos têxteis, foco deste trabalho, a maior parte é destinada a aterros sanitários, juntamente com resíduos de diversas outras fontes. No território englobado pela União Europeia, por exemplo, estima-se que cerca de 87% dos resíduos têxteis gerados são encaminhados para aterros sanitários (Guillot, 2021).

A disposição de resíduos têxteis em aterros sanitários gera uma gama de impactos, uma vez que esses materiais ocupam grande volume, apresentam lenta decomposição e, com a expansão dos centros urbanos e o aumento da produção de resíduos, torna-se necessário o estudo e o emprego de técnicas alternativas para o tratamento e manejo dos mesmos, visando atenuar a pressão sobre os aterros sanitários e oferecer uma destinação ambientalmente sustentável a essa classe de resíduos (Santos, 2020).

O tratamento térmico, então, mostra-se como uma alternativa viável à disposição de resíduos em aterros sanitários, caracterizando-se pelo manejo dos resíduos a partir do emprego de altas temperaturas (Machado, 2015).

Neste contexto, os resultados e discussões deste trabalho foram organizados de acordo com as técnicas de tratamento térmico de resíduos têxteis. A partir de uma revisão da literatura sobre incineração, gaseificação e pirólise desses resíduos, foram selecionados artigos que abordam essas temáticas.

5.1. Incineração de resíduos têxteis

Como discutido ao longo do presente escrito, a incineração é uma das principais técnicas de tratamento térmico e visa realizar o gerenciamento dos resíduos sólidos a partir do emprego de altas temperaturas a fim de garantir a combustão e,

consequentemente a redução do volume dos resíduos recebidos na usina de incineração (Andrade, 2005).

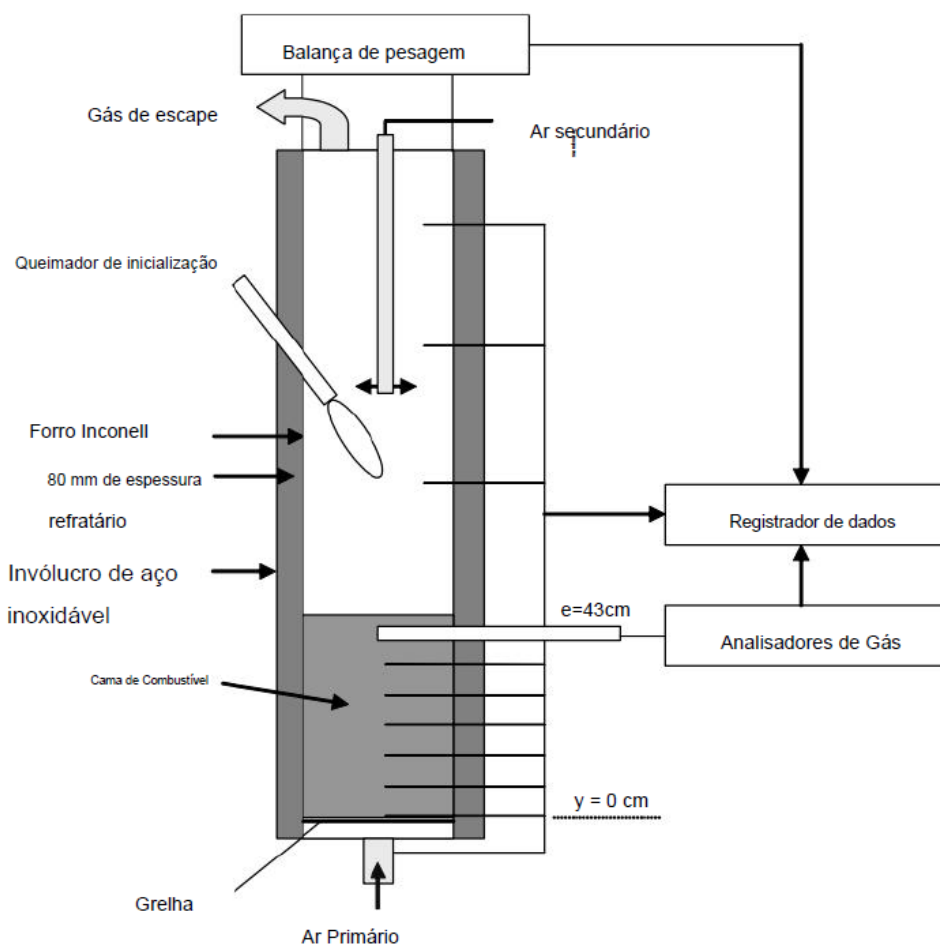
Dentre as vantagens deste processo, observa-se a atenuação da patogenicidade e substâncias indesejáveis devido às altas temperaturas empregadas ao longo do tratamento e, também, a redução considerável do volume do resíduo tratado que, devido ao processo de combustão, é reduzido a cinzas (Gouveia e Prado, 2010). Outro potencial observado do tratamento térmico através da incineração é a possível produção energética derivada do processo de geração de vapor de água que pode ser transformado em eletricidade a partir da queima dos resíduos (Cardozo; Mannarino; Ferreira, 2021).

Apesar dos benefícios observados, há importantes aspectos do processo de incineração que devem ser observados para garantir a viabilidade socioambiental do emprego da técnica, uma vez que, a incineração apresenta externalidades significativas, relacionados à emissão de substâncias como materiais particulados e gases poluentes que são tóxicos a saúde humana e ao meio ambiente (Gripp, 1998).

Quanto à aplicação do método de incineração para classe de resíduos têxteis, estudos de bancada e em escala foram realizados para avaliar a eficiência e viabilidade da incineração no gerenciamento de tais resíduos. Ryu et al., (2007), realizaram um estudo em laboratório utilizando incineradores de bancada para examinar a incineração de resíduos têxteis. O estudo analisou o processo de combustão tanto dos resíduos têxteis individualmente quanto misturados com outros materiais, como madeira e papelão.

No estudo, foram utilizados resíduos têxteis compostos por uma mistura de algodão e poliéster, fibras naturais e sintéticas, respectivamente, que possuem alto poder calorífico. O experimento foi conduzido em um reator de leito fixo, com variação das entradas de ar entre 117 e 1638 kg/m²h. O reator, ilustrado na Figura 1, possui um diâmetro interno de 20 cm e uma altura de 1,5 m. Este foi revestido com um material isolante de 80 mm de espessura (Ryu et al., 2007).

Figura 1 - Reator de leito fixo utilizado no processo de incineração



Fonte: Ryu et al., (2007).

O estudo revelou que a queima dos resíduos têxteis, quando colocados sozinhos no reator, iniciada na frente de ignição (onde a combustão começa e se propaga) se espalhou rapidamente pelos canais de ar formados aleatoriamente entre os materiais. Como consequência, uma grande quantidade de resíduos localizada na parte superior não foi queimada durante o processo de incineração. A formação arbitrária desses canais de ar entre os têxteis impactou negativamente a uniformidade do perfil de temperatura e resultou em uma perda de peso irregular durante a incineração. Os resultados indicam que a combustão dos resíduos têxteis em reatores de leito fixo ocorre de forma muito lenta, diminuindo a eficiência do processo e aumentando a formação de alcatrão, o qual, ao ser queimado, libera substâncias tóxicas na atmosfera (Ryu et al., 2007).

Entretanto, ao analisar a queima dos resíduos têxteis no processo de co-combustão com madeira e papelão, os autores observaram uma melhoria na

combustão quando os resíduos foram misturados com papelão, em vez de madeira. Isso ocorreu porque o papelão tem uma densidade volumétrica semelhante à dos resíduos têxteis. Na mistura com papelão, a frente de ignição se espalhou rapidamente, e o ar foi distribuído de forma mais uniforme entre os materiais, resultando em um perfil de temperatura mais estável e maior eficiência na combustão (Ryu et al., 2007).

Os autores destacam que a aplicação de reatores de leito fixo para a queima de resíduos têxteis é pouco abordada na literatura, sendo mais comum para a incineração de outros tipos de resíduos, como madeira e papelão. Além disso, o estudo concluiu que, devido à baixa eficiência na queima isolada dos resíduos têxteis nesse tipo de reator, sua utilização não é recomendada (Ryu et al., 2007).

Já Youhanan (2013), em seu estudo sobre a avaliação de técnicas de recuperação de resíduos têxteis, analisou dados de um incinerador de queima direta localizado em Högdalen, Suécia, em 2010. A incineração de resíduos têxteis nesse tipo de incinerador apresenta a vantagem de não exigir a separação prévia dos materiais, permitindo que os resíduos sejam transportados diretamente para a usina de incineração.

O estudo determinou que a incineração de 1 tonelada de resíduos têxteis domésticos mistos, compostos por algodão e poliéster, gerou aproximadamente 15.800 MJ de energia como subproduto, considerando uma eficiência de 90%, e resultou em 27 kg de resíduos após o processo. Além disso, foi estimado que o incinerador emitiu cerca de 785 kg de CO₂ na atmosfera (Youhanan, 2013).

Embora a incineração tenha reduzido o volume de 1 tonelada para 27 kg, a autora ressalta que os resíduos finais ainda representam passivos ambientais que precisam ser tratados e destinados adequadamente para evitar impactos negativos ao meio ambiente. Ademais, destaca-se a significativa quantidade de dióxido de carbono emitida na atmosfera durante o processo (Youhanan, 2013).

Portanto, a incineração como método de tratamento de resíduos têxteis apresenta dois enfoques principais: a redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e a eliminação de patógenos, especialmente em casos de contaminação. Ainda assim, o foco central desse método é a diminuição do volume de resíduos nos aterros sanitários. No entanto, essa prática levanta preocupações ambientais significativas devido à emissão de gases poluentes e cinzas na atmosfera.

Segundo Jeihanipour et al., (2010), a incineração eficiente de resíduos têxteis e a solução de questões técnicas relacionadas à instalação de incineradores ainda estão em fase de desenvolvimento, e há poucos estudos sobre o tema. Durante a pesquisa para este trabalho, foram encontrados poucos artigos que abordassem essa temática, sendo a maioria deles bastante antigos. Assim, torna-se essencial a realização de mais estudos para compreender melhor a relevância e o impacto dessa técnica na indústria têxtil.

5.2. Gaseificação de resíduos têxteis

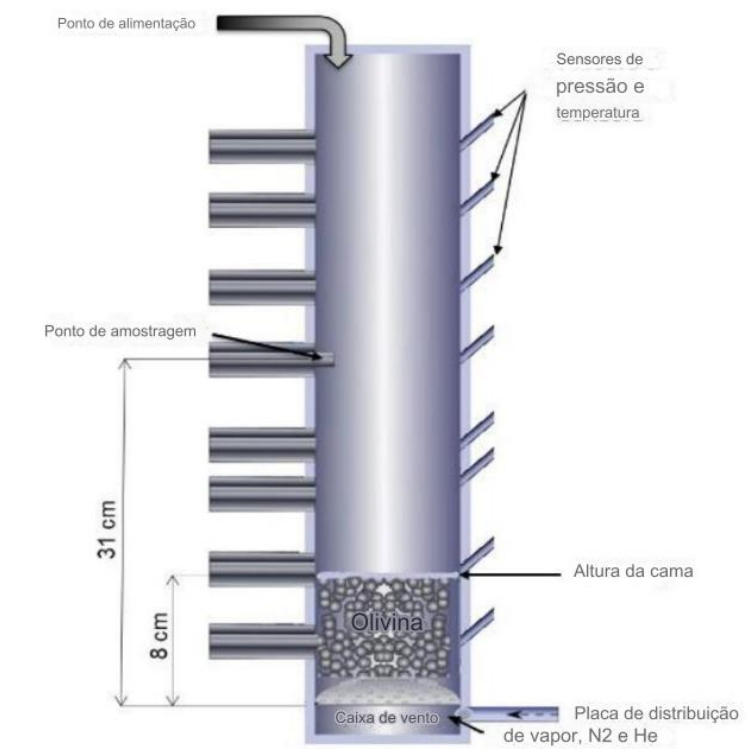
A gaseificação de resíduos é um método de tratamento térmico que converte materiais em altas temperaturas, fazendo-os reagir com um agente gaseificante, como dióxido de carbono, ar ou vapor. O objetivo desse processo é a produção de gás de síntese, composto principalmente por metano, hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono. Além disso, a gaseificação pode gerar subprodutos como alcatrão, cinzas e etileno (Tripathi et al., 2024).

Na literatura, o uso da gaseificação como método de tratamento para resíduos sólidos urbanos é amplamente explorado em experimentos e estudos teóricos. No entanto, há poucos artigos que abordam a aplicação dessa técnica especificamente para resíduos têxteis. Os estudos disponíveis sobre essa temática concentram-se principalmente em estabelecer modelos cinéticos para a gaseificação e a sua utilização para reciclagem de produtos químicos (Rittfors, 2020).

Vela, Maric e Seemann (2019) abordaram a gaseificação como uma técnica de reciclagem termoquímica de resíduos têxteis utilizando um reator de leito fluidizado. O estudo teve como objetivo avaliar se a gaseificação desses resíduos pode promover a reciclagem das matérias-primas presentes nos têxteis, convertendo-as em produtos químicos de alto valor por meio da quebra das cadeias poliméricas.

O experimento foi realizado em escala de bancada, utilizando um reator de leito fluidizado, ilustrado na Figura 2, com 1,27 m de altura e 77,9 mm de diâmetro interno. O leito era composto por minerais de olivina, ricos em magnésio, sílica e ferro. Foram testados três tipos de resíduos têxteis: algodão, poliéster e uma mistura de poliéster com algodão. O experimento foi dividido em duas etapas: na primeira, o material foi gaseificado a 650 °C, 750 °C e 850 °C; na segunda, ocorreu a combustão do combustível não convertido (Vela; Maric; Seemann, 2019).

Figura 2 - Reator de leito fluidizado utilizado no processo de gaseificação



Fonte: Vela; Maric; Seemann, (2019).

O estudo demonstrou que a gaseificação de resíduos têxteis é eficiente na recuperação de gás de síntese, composto por monóxido de carbono, hidrogênio e metano, além de compostos aromáticos BTXS, como benzeno, tolueno, xileno e estireno. O algodão mostrou-se mais indicado para a produção de gás de síntese, enquanto o poliéster e suas misturas com algodão são mais eficazes na geração de BTXS. Além disso, os autores ressaltaram que a reciclagem de têxteis formados apenas por algodão é menos complexa do que quando feita com fibras mistas, formadas por materiais naturais e sintéticos (Vela; Maric; Seemann, 2019).

A revisão bibliográfica sobre esta temática revelou uma escassez de estudos significativos sobre o uso da gaseificação para resíduos têxteis, especialmente em escalas além dos estudos laboratoriais. Os trabalhos existentes têm se concentrado principalmente na cinética do processo de gaseificação. Embora essa técnica seja promissora, é crucial o desenvolvimento de novos estudos que explorem os diferentes aspectos do manejo de resíduos têxteis, utilizando a gaseificação, para que ela se torne uma alternativa viável e aplicável para o tratamento dessa classe de resíduos.

5.3. Pirólise de resíduos têxteis

O processo térmico de ruptura da estrutura molecular de materiais carbonáceos na ausência total ou parcial de oxigênio, denominado pirólise, trata-se de uma tecnologia que tem sido vista como uma possibilidade para o gerenciamento de resíduos sólidos em alternativa à disposição destes em aterros sanitários e a utilização de incineradores, pelo fato de que além de reduzi-los, é possível transformá-los em produtos de valor agregado (Carvalho, 2023). Nesse prisma, os impactos decorrentes da destinação corriqueira de resíduos têxteis que são expressos pelo aumento da formação de gases de efeito estufa, liberação de microplásticos e contaminação de águas subterrâneas, surgem como uma problemática que podem ser mitigadas pela aplicação dessa tecnologia (Dissanayake et al., 2018).

Tendo como observadas essas problemáticas, o campo da pesquisa tem sido cada vez mais alimentado pelo tópico tanto no desenvolvimento de ensaios que aplicam a pirólise de forma isolada, quanto àqueles que são englobados pela associação dela a outras técnicas de tratamento térmico de resíduos têxteis. Com base na seleção de alguns desses estudos, vê-se como relevante o levantamento das análises obtidas mediante seus resultados.

Pela ótica de Carvalho (2023) na aplicação da pirólise em tecidos mistos compostos por algodão e poliéster em diferentes quantidades, torna-se viável avaliar numericamente a efetividade da prática *in situ*. Seu experimento foi realizado em tecidos brancos cortados em quadrados de 1 cm e 5 mg, que após inseridos em estrutura de platina foram expostos a faixa de temperatura 50°C a 800°C sob taxa de aquecimento de 10°C/min a 20°C/min e atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100mL/min. Com base no peso restante no recipiente após a finalização, obtiveram-se os valores percentuais de massa eliminada em função da temperatura por meio da Análise Termogravimétrica (TGA); através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram examinados os aspectos e morfologia do tecido e com auxílio da Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foram qualificados os grupos funcionais constituintes do material. Seguindo com a conclusão do processo, a autora pode inferir que a pirólise era melhor elaborada nos tecidos completamente desfiados pelo aumento da superfície de contato dos mesmos, e deste modo, houve uma redução de 84% da massa do material sob temperatura de degradação que variou entre 422°C e 426°C em função da composição do material

(em porcentagem de poliéster e algodão), o que demonstrou pouca influência desse fator na eficácia de seu procedimento. Por fim, por meio das análises chegou-se na hipótese de que quanto maior a quantidade de resíduos excedentes da pirólise, maior a quantidade de fibras classificadas como matéria plástica presentes no tecido, conseguindo atingir uma projeção onde para quilo de produto gerado no processo em amostras com 80% de algodão e 20% de poliéster, havia 25,77 milhões de microplásticos.

Com base nos estudos levantados na etapa de revisão bibliográfica e nos resultados verificados no artigo analisado, é factível afirmar que a pirólise de resíduos têxteis é uma estratégia interessante a ser elaborada no que tange a viabilidade ambiental de gerenciamento de resíduos sólidos vislumbrando um caminho de reciclagem sustentável de tecidos. Porém, nesse entremeio, é importante levar em consideração os desafios de sua viabilidade em grande escala diante do crescimento de indústrias desse nicho que corroboram com a produção exponencial desses resíduos, tendo em vista a sensibilidade das variáveis existentes nesse processo e o manejo de seus produtos com potencial de reaproveitamento (Carvalho, 2023).

5.4. Análise cinética e comparativa da pirólise e gaseificação

Além do emprego das técnicas isoladas de pirólise e gaseificação para o tratamento de resíduos têxteis, Wen et al., (2017) investigaram os aspectos cinéticos da pirólise e da gaseificação de resíduos têxteis utilizando o dióxido de carbono como agente gaseificante, a fim de determinar qual a melhor técnica de acordo com o material têxtil analisado.

Os experimentos foram conduzidos em um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier, acoplado a um analisador termogravimétrico, sob pressão atmosférica. As temperaturas variaram de 800 a 1000 °C para a gaseificação e de 300 a 500 °C para a pirólise. Foram testadas amostras de fibras de algodão, poliéster e lã. Os processos de pirólise e gaseificação foram analisados separadamente (Wen et al., 2017).

Antes da pirólise, as amostras foram secas por 24 horas em uma estufa a 80 °C. A gaseificação foi precedida por uma etapa de pirólise em uma mufla a 400 °C, que converteu os resíduos têxteis em carvão (Wen et al., 2017).

Os resultados mostraram que, durante a pirólise, o aumento da temperatura acelerou o processo. O algodão apresentou a maior reatividade, enquanto o poliéster foi o mais resistente à pirólise, com a lã ocupando uma posição intermediária (Wen et al., 2017).

Na etapa de gaseificação, os têxteis exibiram comportamentos distintos em função das suas diferenças de massa. O carvão de algodão apresentou uma perda de massa mais significativa com o aumento da temperatura, seguido pelo carvão de poliéster e, por último, pelo carvão de lã (Wen et al., 2017).

A análise cinética revelou que a energia de ativação para o poliéster foi de $162,38 \text{ kJ mol}^{-1}$ na pirólise e $178,15 \text{ kJ mol}^{-1}$ na gaseificação. Para o algodão, os valores foram de $103,05 \text{ kJ mol}^{-1}$ na pirólise e $144,49 \text{ kJ mol}^{-1}$ na gaseificação. No caso da lã, a energia de ativação foi de $110,02 \text{ kJ mol}^{-1}$ para a pirólise e $79,37 \text{ kJ mol}^{-1}$ para a gaseificação (Wen et al., 2017).

Devido às características cinéticas e à dinâmica térmica específicas de cada material têxtil, observou-se um comportamento distinto durante a pirólise e a gaseificação. Assim, o algodão se mostrou mais eficaz na pirólise, o poliéster apresentou melhor desempenho na gaseificação e a lã obteve melhores resultados com a pirólise (Wen et al., 2017).

Os autores concluíram que a aplicação dessas técnicas é uma abordagem promissora para o tratamento de resíduos têxteis, pois possibilita uma conversão eficaz do dióxido de carbono e reduz a emissão desse gás na atmosfera, além de maximizar o aproveitamento dos resíduos têxteis (Wen et al., 2017).

5.5. Comparativo das técnicas de tratamento térmico analisadas

O Quadro 8 sintetiza os principais parâmetros empregados no desenvolvimento das técnicas de tratamento térmico de resíduos têxteis discutidos ao longo deste trabalho, oferecendo uma visão comparativa dos resultados obtidos nos estudos analisados.

Quadro 8 - Comparativo das técnicas de tratamento térmico analisadas

Tratamento térmico	Autores	Método	Resultados
Incineração	Ryu et al. (2007)	Incineração de resíduos de algodão e poliéster em reator de leito fixo	Queima incompleta, canais de ar irregulares, formação de alcatrão; Co-combustão com papelão melhorou a eficiência da combustão.
	Youhanan (2013)	Incineração de resíduos têxteis mistos em um incinerador em Högdalen, Suécia	1 t de resíduos gerou 15.800 MJ de energia e 27 kg de resíduos finais; 785 kg de CO ₂ por tonelada incinerada.
Gaseificação	Vela, Maric e Seemann (2019)	Gaseificação de algodão, poliéster e suas misturas em reator de leito fluidizado	Algodão eficiente na produção de gás de síntese; Poliéster e misturas mais eficazes na geração de BTXs. Reciclagem de algodão é mais simples do que de fibras mistas.
Pirólise	Carvalho (2023)	Pirólise de resíduos têxteis mistos de poliéster e algodão	O material tratado perdeu 84% da sua massa inicial produzindo carvão e material particulado.

Fontes: Adaptado de Ryu et al. (2007); Youhanan (2013); Vela; Maric; Seemann (2019); Carvalho (2023).

6. CONCLUSÃO

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos representa um grande desafio, especialmente em relação ao manejo e à disposição adequada desses materiais. Esse cenário é particularmente relevante para os resíduos têxteis, cuja gestão se mostra complexa. Diante disso, este trabalho teve como objetivo analisar as principais técnicas de tratamento térmico aplicáveis a esse tipo de resíduo, com foco na incineração, gaseificação e pirólise.

O desenvolvimento da pesquisa baseou-se em uma revisão bibliográfica descritiva, utilizando fontes secundárias, como livros, artigos científicos, teses, dissertações e publicações especializadas que abordam o tema proposto.

O tratamento térmico de resíduos têxteis se caracteriza pelo uso de altas temperaturas para reduzir, transformar ou eliminar esses materiais. A incineração, por exemplo, é eficaz na redução substancial do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e na eliminação de patógenos. No entanto, ela gera preocupações ambientais devido à emissão de gases poluentes e à formação de cinzas. Conforme apontado pela Nota Técnica da Defensoria Pública do Estado de São Paulo (2024), o uso em larga escala da incineração gera sérios questionamentos quanto à emissão de gases tóxicos prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente.

Enquanto no processo de gaseificação, visualizam-se benefícios relevantes no campo da economia circular devido ao seu potencial de produção de combustíveis alternativos e da geração de energia elétrica a partir de resíduos têxteis produzidos em grande escala; podendo essa técnica, inclusive, ser aplicada dentro das próprias indústrias produtoras de tecido que assim poderiam obter uma forma de lucro ao gerenciar os seus resíduos (Muhammad, 2022). Apesar disso, seria também necessário realizar o manejo das impurezas possivelmente presentes no gás de síntese obtido, o que desencadearia mais uma etapa ao procedimento e mais resíduos a serem tratados através de técnicas adicionais (Lora et al., 2012).

Finalmente, referente a pirólise, são encontrados aspectos positivos expressivos pois a despeito de possuir muitas semelhanças com a gaseificação em relação ao seu funcionamento e produtos gasosos, ela consegue desenvolver frações sólidas e líquidas que podem ser aproveitadas como combustíveis. Adicionalmente, pelo fato de não necessitar de uma forma de queima envolvida até a sua finalização,

a produção de sedimentos que impactam de maneira negativa o meio ambiente é reduzida (Velmurugan, 2021). Contudo, como a constituição do material pirolisado está diretamente relacionada com a qualidade e quantidade de seus produtos, a depender da composição do tecido a ser tratado, este pode liberar substâncias tóxicas ao longo da separação por meio de reações químicas de suas partículas. Em adição, destaca-se também a necessidade da execução de outros processos para o aproveitamento dos compostos gerados (Lee et al., 2023).

Embora as técnicas estudadas – incineração, gaseificação e pirólise – apresentem um grande potencial para a gestão de resíduos têxteis, os estudos atuais ainda são insuficientes para consolidar essas metodologias como alternativas viáveis à disposição em aterros sanitários. Nesse contexto, a realização de pesquisas futuras se torna fundamental.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/normas/ABNT_NBR_n_10004_2004.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2024.

ANDRADE, J. P. B. O.; COLTRO, L. **Incineração de resíduos**. Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens, v. 17, n. 1, 2005.

ANDRADE, Júlia Fonseca C.; NUNES, Cleyse Kelly B.; BENITES, Igor Matheus; CASTRO, Ana Maria R. C. de; SCHALCH, Valdir. **Reciclagem e tratamento: contribuições científicas em resíduos sólidos: compilação de estudos do NEPER**. 3. ed. São Carlos: NEPER, 2023. 66 p. Disponível em: <<https://www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/1216>>. Acesso em: 13 ago. 2024.

BALAT, H.; KIRTAY, E. **Hydrogen from biomass: Present scenario and future prospects**. International Journal of Hydrogen Energy, Oxford, v. 35, n. 14, p. 7416-7426, 2010.

BRASIL. **Desenvolvimento Regional. Diagnóstico de Resíduos Sólidos. Secretaria Nacional de Saneamento**, 2020. 145 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/residuos-solidos-1/2019>. Acesso em: 28 ago. 2024.

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 21 ago. 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 316, de 20 de março de 2002.** Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos sólidos industriais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 28-29, 22 mar. 2002. Disponível em: <<https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Conama-316-02-Tratamento-T%C3%A9rmico-de-Res%C3%ADduos.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2024.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento:** diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2019. Brasília, DF: Ministério do 4.

CARDOZO, Bárbara Cristina; MANNARINO, Camille Ferreira; FERREIRA, João Alberto. **Análise do monitoramento ambiental da incineração de resíduos sólidos urbanos na Europa e a necessidade de alterações na legislação brasileira.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, p. 123-131, 2021.

CARVALHO, Agatha Martins de. **Avaliação da pirólise no manejo de resíduos têxteis mistos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

DIAS, Sylmara Gonçalves. **O desafio da gestão de resíduos sólidos urbanos.** GV-executivo, v. 11, n. 1, p. 16-20, 2012.

DISSANAYAKE, D. G. K, et al. **Developing a compression moulded thermal insulation panel using postindustrial textile waste.** Waste Management. v. 79, p. 356–361, 2018.

DEFENSORIA PÚBLICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Nota técnica:** Impactos da incineração de resíduos sólidos urbanos. São Paulo, 2024.

DOGRU, M. et al. **Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier.** Energy, vol. 27, p. 415-427, 2002.

ELLIOTT, P. et al. **Cancer incidence near municipal solid waste incinerators in Great Britain.** British Journal of Cancer, v. 73, n. 5, p. 702-710, 1996.

GEDANKEN. **Como fazer uma gestão de resíduos eficiente na indústria têxtil?** Disponível em: <<https://gedanken.com.br/conteudo/gestao-de-residuos/>>. Acesso em: 25 ago. 2024.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa.** Plageder, 2009.

GOMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão.** 2002. 103 f. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.

GOMEZ, Edgardo Olivares et al. **Projeto de pirólise rápida contínua de biomassa com ar em reator de leito fluidizado atmosférico.** Encontro de tecnologia no meio rural, 3., 2000, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200020&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 08 set. 2024.

GOUVEIA, Nelson; PRADO, Rogério Ruscitto do. **Análise espacial dos riscos à saúde associados à incineração de resíduos sólidos:** avaliação preliminar. Revista Brasileira de Epidemiologia, v. 13, p. 3-10, 2010.

GOUVEIA, N. **Saúde e meio ambiente nas cidades: os desafios da saúde ambiental.** Saúde e Sociedade, v.8, n.1, p.49-61, 1999.

GRIPP, William Gomes. **Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos:** considerações sobre a proposta para São Paulo. 1998. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo.

GUILLOT, J. D. **O Impacto da Produção e dos Resíduos Têxteis no Ambiente (Infografia).** Direção-Geral da Comunicação: Serviço de Estudos do Parlamento Europeu, 2021.

GUIMARÃES, Bárbara Andressa; MARTINS, Suzana Barreto. **Proposta de metodologia de prevenção de resíduos e otimização de produção aplicada à indústria de confecção de pequeno e médio porte**. *Projetica*, v. 1, n. 1, p. 184-200, 2010.

HELENO, Vinício; SILVA, Jonathas. **Técnicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos e suas características socioambientais**. *Agrarian Academy*, v. 9, n. 17, 2022.

HIGMAN, Christopher; DER BURGT, Maarten van. **Gasification**. 2nd. 2008.

INGUANZO, M. et al. **On the pyrolysis of sewage sludge**: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 63, n. 1, p. 209-222, 2002.

INSTITUTO DE ESTUDOS E MERCADO ADVANCED (IEMI). **No jeanswear, o varejo alavanca números do setor**. Instituto de Estudos e Mercado Advanced, 2024. Disponível em: <<https://iemi.com.br/no-jeanswear-varejo-alavanca-numeros-do-setor/>>. Acesso em: 21 ago. 2024.

IPEA. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil**: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. 2021. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/en/topics/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>. Acesso em: 21 ago. 2024.

JAYAH, T. H et al. **Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying**. *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, pp. 459-469, 2003.

JEIHANIPOUR, Azam et al. **A novel process for ethanol or biogas production from cellulose in blended-fibers waste textiles**. *Waste Management*, v. 30, n. 12, p. 2504-2509, 2010.

JUANGA-LABAYEN, Jeanger P.; LABAYEN, Ildefonso V.; YUAN, Qiuyan. **A review on textile recycling practices and challenges**. *Textiles*, v. 2, n. 1, p. 174-188, 2022.

KUASNE, Angela. **Curso têxtil em malharia e confecção - 2º módulo: fibras têxteis**. 2. ed. Araranguá, 2008. 90 p. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/88/Apostila_fibras.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2024.

LEE, Hee Sue et al. **Upcycling textile waste using pyrolysis process**. Science of The Total Environment, v. 859, p. 160393, 2023.

LORA, Electo Eduardo Silva et al. **Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. Biocombustíveis. Interciência, v. 1, p. 411-498, 2012.

MACHADO, Camila Frankenfeld. **Incineração: uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP**. 2015.

MANNARINO, Camille Ferreira; FERREIRA, João Alberto; GANDOLLA, Mauro. **Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência europeia**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21, p. 379-385, 2016.

MARCHI, Cristina Maria Dacach Fernandez. **Gestão dos resíduos sólidos: conceitos e perspectivas de atuação**. Curitiba: Appris, 2018.

MARCHI, Cristina Maria Dacach Fernandez. **Cenário mundial dos resíduos sólidos e o comportamento corporativo brasileiro frente à logística reversa**. Perspectivas em Gestão & Conhecimento, v. 1, n. 2, p. 118-135, 2011.

MARTINS, J. H. **Impactos ambientais da incineração de resíduos têxteis**. Journal of Environmental Management, v. 15, n. 2, p. 102-119, 2021.

MENEGUCCI, Franciele et al. **Resíduos têxteis: análise sobre descarte e reaproveitamento nas indústrias de confecção**. n. 2015.

MIDILLI, A. et al. **Hydrogen production from hazelnut shell by applying airblown downdraft gasification technique**. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 26, p. 29-37, 2001.

MUHAMMAD, Sajid et al. **Gasification of municipal solid waste: Progress, challenges, and prospects**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 168, 2022.

MÜLLER, Luiz Neto Paiva e Silva et al. **Uma análise multicritério de alternativas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos do município de Juazeiro do Norte no Ceará**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, n. 1, p. 159-170, 2021.

MUTHU, Subramanian Senthilkannan. **Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain**. 2nd ed. Elsevier Science & Technology, 2020.

OPPELT, E. Timothy. **Incineration of hazardous waste**. JAPCA, v. 37, n. 5, p. 558-586, 1987.

PRATES, Luisa Ferolla Spyer; PIMENTA, Cristiane F.; RIBEIRO, Henrique F. **Alternativas tecnológicas para tratamento de resíduos sólidos urbanos**. APPREHENDERE - Aprendizagem & Interdisciplinaridade, v. 1, n. 2-especial, 2019.

PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F. **Características químicas de lodos de esgotos produzidos no Brasil**. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica, v. 4, p. 1-13, 2011.

RAMÍREZ, J. J.; MARTÍNEZ, J. D. **Experimentos de gasificación con cascarilla de arroz colombiana en lecho fluidizado**. Colección Monografías y Tesis, Medellín Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 183 p., 2007.

RITTFORS, Julia. **Thermochemical textile recycling: Investigation of pyrolysis and gasification of cotton and polyester**. 2020.

RUSHTON, Lesley. **Health hazards and waste management**. British Medical Bulletin, v. 68, n. 1, p. 183-197, 2003.

RYU, Changkook et al. **Combustion of textile residues in a packed bed**. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 31, n. 8, p. 887-895, 2007.

SANCHEZ, M. E., MENÉNDEZ, J. A., DOMÍNGUEZ, A., PIS, J. J., MARTÍNEZ, O., CALVO, L. F., BERNAD, P. L. **Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge**. Biomass and Bioenergy, v. 33, p. 933-940, 2009.

SANTOS, Isabella Silva dos Santos. **Impactos ambientais gerados pelos resíduos têxteis no Brasil e alternativas para o futuro: uma revisão sistemática**. 2020.

SANTOS, R. M.; FREITAS, L. M.; OLIVEIRA, J. C. **Tecnologias de incineração para resíduos sólidos têxteis: um estudo de caso**. Environmental Science & Technology, v. 52, n. 9, p. 5552-5560, 2018.

SILVÉRIO, Flaviano Oliveira; BARBOSA, Luiz Cláudio Almeida; PILÓ-VELOSO, Dorila. **A pirólise como técnica analítica**. Quimica Nova, v. 31, p. 1543-1552, 2008.

SZIGETHY, Leonardo; ANTENOR, Samuel. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. 2021. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/en/topics/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>. Acesso em: 21 ago. 2024.

TIJMNENSEN, M. J. A. **The production of Fisher Tropsh liquids and power through biomass gasification**. Ph.D thesis, Utrech University, 2000.

TRIPATHI, Manikant et al. **Recent technologies for transforming textile waste into value-added products: A review**. Current Research in Biotechnology, v. 7, p. 100225, 2024.

VELA, Isabel Cañete; MARIC, Jelena; SEEMANN, Martin. **Valorisation of textile waste via steam gasification in a fluidized bed reactor**. Division of Energy Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2019.

VELMURUGAN, V. **Review of Research and Development on Pyrolysis Process**. Materials Today: Proceedings. 2021

WANG, L.; WELLER.C. L.; JONES, D. D.; HANNA, M. A. **Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production**. Biomass and Bioenergy, vol. 32, p. 573-581, 2008.

WEN, Cheng et al. **The pyrolysis and gasification performances of waste textile under carbon dioxide atmosphere**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 128, p. 581-591, 2017.

WARNECKE, R. **Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier**. Biomass and Bioenergy, vol. 18, p. 489-497, 2000.

YOUHANAN, Lena. **Environmental assessment of textile material recovery techniques**: Examining textile flows in Sweden. 2013.