

RESÍDUOS TÊXTEIS: ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XII-003>

Victor Oliveira Bispo (*), Rodolfo Sbrolini Tiburcio

* Universidade Federal do ABC, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Av. dos Estados, 5001, Santo André – SP, 9280-560, victor.bispo@aluno.ufabc.edu.br

RESUMO

Um desafio crucial é desenvolver processos mais sustentáveis para suprir a economia global e preservar recursos naturais. O uso de resíduos têxteis surge como alternativa para uma economia de baixo carbono, sendo continuamente produzidos pelo mercado global de fibras. Quando inviável o reuso e a reciclagem, a recuperação energética é uma opção, sendo essencial a caracterização laboratorial dos resíduos têxteis, principalmente em virtude da composição variada das fibras, o que confere distintas características combustíveis. Nesse sentido, o trabalho objetivou a caracterização de amostras de resíduos têxteis (fibras naturais e sintéticas) para avaliar seu potencial energético como combustível derivado de resíduo (CDR), empregando-se análises de umidade, de densidade a granel, de poder calorífico e de composição imediata. Os resultados indicaram o potencial energético de resíduos têxteis, especialmente poliamida e poliéster, cujos valores de poder calorífico inferior variaram entre 21,8 29,2 MJ/kg, em base seca, enquanto os teores de materiais voláteis variaram entre 87,9 e 98,9% em massa, respectivamente. Com relação ao teor de umidade, as amostras de malha apresentaram um maior percentual de umidade total, no entanto, o máximo valor obtido foi de 9,1% em massa para malha com elastano. Já a densidade a granel é fundamental para estimar a quantidade de energia por volume de resíduos transportado. As amostras de malha apresentaram os maiores valores de densidade, embora o poder calorífico tenha sido o menor observado dentre as amostras, mas comparáveis com combustíveis de fonte renovável empregados em sistemas de cogeração. Por apresentarem características combustíveis favoráveis quanto ao poder calorífico significativo, ao elevado teor de materiais voláteis e baixa presença de cinzas, resíduos têxteis podem ser empregados como CDR em caldeiras industriais, fornos, gaseificadores e pirolisadores. Esse cenário pode contribuir com a redução do volume de resíduos encaminhado para aterros sanitários ou dispostos inadequadamente em vazadouros a céu aberto. Portanto, espera-se que este trabalho contribua para alternativas de valorização energética de resíduos, promovendo a ampliação da sustentabilidade da cadeia produtiva de têxteis e auxiliando no alcance de objetivos da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas.

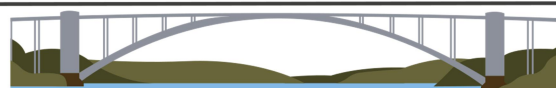
PALAVRAS-CHAVE: aproveitamento de têxteis, fibras residuais, recuperação energética, tratamento de resíduos

ABSTRACT

A crucial challenge is to develop more sustainable processes to supply the global economy and preserve natural resources. The use of textile waste emerges as an alternative for a low-carbon economy, being continuously produced by the global fiber market. When reuse and recycling are unfeasible, energy recovery is an option, making the laboratory characterization of textile waste essential, mainly due to the varied composition of fibers, which confers distinct combustible characteristics. In this sense, the work aimed to characterize samples of textile waste (natural and synthetic fibers) to evaluate their energy potential as refuse-derived fuel (RDF), employing analyses of moisture content, bulk density, heating value, and proximate analysis. The results indicated the energy potential of textile waste, especially polyamide and polyester, whose lower heating value ranged between 21.8 and 29.2 MJ/kg on a dry basis, while the volatile matter content ranged between 87.9 and 98.9% by mass, respectively. Regarding moisture content, the knitted fabric samples showed a higher percentage of total moisture; however, the maximum value obtained was 9.1% by mass for knitted fabric with elastane. Bulk density is fundamental for estimating the amount of energy per volume of transported waste. The knitted fabric samples showed the highest density values, although their heating value was the lowest observed among the samples, but comparable to renewable source fuels used in cogeneration systems. Due to their favorable combustible characteristics regarding significant heating value, high volatile matter content, and low ash content, textile waste can be used as RDF in industrial boilers, furnaces, gasifiers, and pyrolyzers. This scenario can contribute to reducing the volume of waste sent to landfills or improperly disposed of in open dumps. Therefore, this work is expected to contribute to alternative energy recovery methods for waste, promoting the expansion of sustainability in the textile production chain and assisting in achieving the objectives of the 2030 Agenda of the United Nations.

8° CONRESOL

8° Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



FOZ DO IGUAÇU
• 06 a 08 de Maio de 2025 •

KEY WORDS: textiles recovery, residual fibers, energy recovery, waste treatment

INTRODUÇÃO

Um importante desafio enfrentado pela sociedade é o desenvolvimento e aprimoramento de processos mais sustentáveis, capazes de suprir as necessidades econômicas globais e assegurar a manutenção de recursos naturais às gerações futuras. Uma alternativa é o aproveitamento de resíduos, pois denotam potencial para a implementação de processos de recuperação energética, frente à transição para uma economia de baixo carbono, visto que são contínua e abundantemente produzidos por diversos setores da economia (FARAHMANDPOUR et al., 2022).

Produtos de origem têxtil atendem a uma gama diversificada de finalidades, incluindo vestuário, itens de cama/mesa/banho, aplicações industriais, médicas e científicas, e dentre outras. Logo, desempenham um papel econômico importante para atender as necessidades da sociedade moderna. Nesse contexto, o Brasil é um dos grandes produtores e um dos maiores consumidores mundiais de produtos têxteis e se enquadra no perfil de “produtor-consumidor”. Entretanto, atrelado ao crescimento econômico e populacional, há um crescente aumento dos resíduos, o que representa um desafio em termos de destinação adequada do montante produzido de têxteis residuais pré-consumo e pós-consumo (IEMI, 2024).

O mercado mundial de têxteis inclui a produção e comercialização de fibras sintéticas (poliéster, poliamida e outras – 65%), fibras regeneradas (fibras celulósicas artificiais – 6%) e fibras de origem vegetal (algodão e outras – 27%) e animal (lã, penugem, caxemira e outras – 2%), conforme ilustrado na Figura 1.

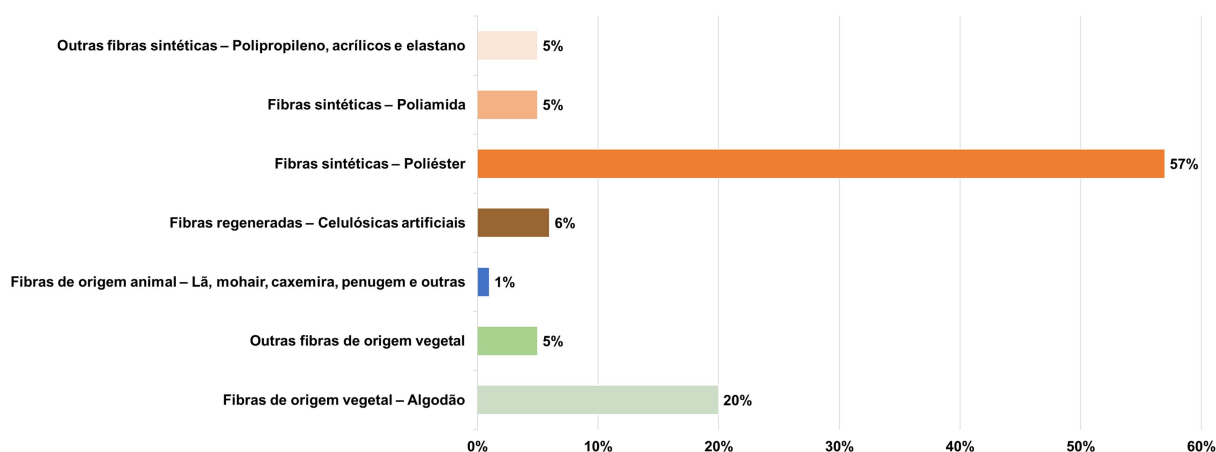


Figura 1. Distribuição percentual de fibras sintéticas, naturais (de origem vegetal e animal) e regeneradas no mercado mundial de têxteis. Fonte: adaptado de Textile Exchange (2024).

A partir da fabricação de produtos têxteis são gerados resíduos pós-consumo (advindos após o uso pelo consumidor) e pré-consumo (obtidos durante a fabricação, nas fases de corte ou a partir da identificação de imperfeições/avarias), que representaram 78,1 e 21,9%, respectivamente, do total de resíduos gerados globalmente em 2021 (isto é, 88,6 e 24,9 milhões de toneladas, respectivamente; CIRCLE ECONOMY FOUNDATION, 2024). Nas últimas décadas foi observada uma escalabilidade no número de têxteis produzidos. Em 2023, a produção global foi de 124 milhões de toneladas de fibras (contra 34 milhões de toneladas em 1975), o que denota um desafio relacionado aos resíduos provenientes do consumo dos têxteis, tornando-se fundamental a proposição de múltiplas alternativas para definir rotas de destinação adequadamente corretas (TEXTILE EXCHANGE, 2024).

Na Figura 2 é ilustrada a ordem de prioridade definida a partir da escalabilidade e viabilidade da destinação de resíduos têxteis, denominada 10 R's para a economia circular, que tem como propósito reduzir a geração de resíduos, otimizar a utilização dos materiais ao longo de múltiplos ciclos de vida dos produtos e prolongar sua aplicação em cada etapa de reutilização (SHAMSUZZAMAN et al., 2025).

Quando o reuso e a reciclagem são inviáveis, a recuperação energética é uma alternativa potencial. Para viabilizar essa alternativa, a caracterização laboratorial dos resíduos têxteis é de suma importância, visto que suas propriedades físico-químicas e termofísicas podem variar conforme a composição das fibras utilizadas na fabricação dos têxteis. Resultados a partir de análises de caracterização permitem avaliar seu potencial de recuperação energética e sua adequação às rotas de conversão termoquímica, tornando possível fornecer parâmetros para possíveis avanços tecnológicos nos processos atrelados, e contribuir para a projeção, operação e manutenção de equipamentos envolvidos na conversão energética,

colaborando para a eficiência e a vida útil dessas instalações, bem como para a ampliação da sustentabilidade no gerenciamento de resíduos têxteis (CHEN et al., 2023).



Figura 2. 10 R's para a economia circular por ordem de prioridade.

Fonte: adaptado de Shamsuzzaman et al. (2025).

OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho foi a caracterização de amostras de resíduos têxteis a partir de análises laboratoriais para obtenção de resultados fundamentais, visando a avaliação do seu potencial de recuperação energética (na forma de combustível derivado de resíduo – CDR) em rotas de conversão termoquímica.

METODOLOGIA

Coleta e armazenamento das amostras

A partir de uma colaboração científica com uma empresa de destinação da cadeia produtiva de têxteis (Momo Ambiental Ltda.), visando avaliar o potencial energético de têxteis residuais pré-consumo, amostras de diferentes composições foram coletadas (Figura 3), etiquetadas e transportadas para os laboratórios de pesquisa (Laboratório de Caracterização de Biomassa e Biocombustíveis – LACABIO) da Universidade Federal do ABC (campus São Bernardo do Campo – SP).



Figura 3. Amostras de resíduos têxteis *in natura* pré-consumo coletadas a partir de colaboração científica.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Análise de umidade

Partindo-se de amostras laboratoriais de até 2 kg, de acordo com a norma ASTM E829:2023, realizou-se a análise de teor de umidade em estufa com circulação de ar forçada (*Ethik Technology 400-9D*; ASTM E949:2004), em três réplicas dos têxteis residuais *in natura* (isto é, na forma como foram disponibilizados e coletados, sem processamento laboratorial).

A análise foi conduzida com o auxílio de cadinhos cilíndricos de alumínio (5 cm de altura × 7 cm de diâmetro) e balança analítica (*Shimadzu AUW220D*), e realizada em duas etapas. Para a obtenção da umidade seca por ar (**A** – Equação 1, % em massa), as amostras foram dispostas na estufa em temperatura ambiente por um período de 24 horas. Ao final desse processo, as amostras foram colocadas novamente na estufa por mais 60 minutos à temperatura de 107 ± 3 °C para obtenção da umidade residual (**R** – Equação 2, % em massa).

$$\mathbf{A} = \left(\frac{\mathbf{a} - \mathbf{b}}{\mathbf{a}} \right) \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

onde **a** é a massa da amostra (g); **b** é a massa da amostra seca por ar (g).

$$\mathbf{R} = \left(\frac{\mathbf{b} - \mathbf{c}}{\mathbf{b}} \right) \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

onde **c** é a massa da amostra seca por aquecimento (g) à temperatura de 107 °C.

A umidade total (**U_T**, % em massa) foi determinada a partir da Equação 3, a qual relaciona os resultados da umidade seca por ar e da umidade residual (seca por aquecimento).

$$\mathbf{U_T} = \left[\frac{\mathbf{R} \times (100 - \mathbf{A})}{100} \right] + \mathbf{A} \quad \text{Equação (3)}$$

Processamento das amostras

Para redução do tamanho das amostras *in natura*, com vistas à realização das análises previstas (densidade a granel, poder calorífico e composição imediata), os resíduos foram processados com o auxílio de tesoura de aço inoxidável. O procedimento manual foi necessário, pois não foi possível realizar a fragmentação em moinho analítico de facas devido às características das fibras têxteis, as quais apresentam resistência à trituração.

Análise de densidade a granel

A densidade a granel (**D_G** – Equação 4) foi obtida experimentalmente a partir de análises realizadas em quatro réplicas, empregando-se recipiente com volume conhecido (*becker* de 250 ml) e balança analítica (*Shimadzu AUW220D*). Evitando-se a compressão, as amostras foram dispostas no *becker* para determinação da massa, conforme estabelecido pela norma ASTM E1109:2019.

$$\mathbf{D_G} = \left(\frac{\mathbf{m_a} - \mathbf{m_0}}{\mathbf{V}} \right) \quad \text{Equação (4)}$$

onde **m_a** é a massa do recipiente com amostra (g); **m₀** é a massa do recipiente vazio (g); **V** é o volume do recipiente (m³).

Análise de poder calorífico

A determinação de poder calorífico superior (PCS) foi conduzida em bomba calorimétrica (*IKA C 5000*), sob condição pressurizada com oxigênio, seguindo a norma ASTM E711:2023, a qual indica a utilização de amostras de até 1 g para cada análise. De tal maneira, para cada um dos resíduos têxteis avaliados neste trabalho (Figura 3) foram desenvolvidos experimentos em três réplicas. Considerando que a amostra avaliada contém um determinado teor de umidade, o equipamento fornece o poder calorífico superior em base úmida (isto é, PCS_{bu}).

Para as análises de poder calorífico dos resíduos têxteis desfibrados (branco e misto) foi necessária a densificação das amostras em prensa analítica (*IKA C21*), devido à sua baixa densidade. Este procedimento foi realizado para aumentar a quantidade de massa avaliada (no intervalo de 0,2 a 0,6 g) e, assim, obter dados confiáveis.

Estimativa de poder calorífico inferior

Visando avaliar o potencial combustível das fibras têxteis avaliadas, o poder calorífico inferior (PCI) foi determinado a partir de modelo matemático (Equação 5) reportado pela literatura (LOO & KOPPEJAN, 2008) que considera o PCS e os teores de umidade e de hidrogênio contidos na amostra.

$$PCI_{bu} = PCS_{bu} - (\gamma + \varepsilon) \quad \text{Equação (5)}$$

onde PCI_{bu} é o poder calorífico inferior em base úmida (MJ/kg); PCS_{bu} é o poder calorífico superior em base úmida (MJ/kg); $\gamma = 2,444 \times (U_{eq}/100)$ é a entalpia de mudança de fase da água presente na amostra (MJ/kg), sendo U_{eq} a umidade de equilíbrio (% em massa); $\varepsilon = 2,444 \times (H_{bs}/100) \times (8,936) \times (1 - U_{eq}/100)$ é a entalpia de mudança de fase da água formada a partir da combustão do hidrogênio contido na amostra analisada (MJ/kg), sendo H_{bs} o teor de hidrogênio em base seca (% em massa).

Para o teor de hidrogênio, a partir de dados reportados pela literatura, estabeleceu-se 9,0% para as amostras de poliamida e de poliamida com elastano (KIJO-KLECZKOWSKA et al., 2022), 4,2% para desfibrado branco, poliéster com elastano (CHENG et al., 2024) e 6,1% para as amostras de tecido misto, desfibrado misto, malha e de malha com elastano (LIN et al., 2020; CHENG et al., 2024).

O poder calorífico inferior em base úmida foi convertido para base seca a partir da Equação 6, considerando o teor de umidade da amostra determinado no período de realização da análise de poder calorífico, de acordo com o procedimento experimental descrito anteriormente para a análise de umidade.

$$PCI_{bs} = PCI_{bu} \times \left(\frac{100}{100 - U} \right) \quad \text{Equação (6)}$$

onde PCI_{bs} é o poder calorífico inferior em base seca (MJ/kg); PCI_{bu} é o poder calorífico inferior em base úmida (MJ/kg); U é a umidade da amostra analisada (% em massa).

Análise de composição imediata

O teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas (% em massa) foi determinado em forno tipo mufla (*SolidSteel SSFm; Nova Instruments NI 1385*), com o auxílio de cadinhos de porcelana e balança analítica (*Marte AW220*), de acordo com as normas ASTM E897:2004 e ASTM E830:2004.

Para a quantificação de materiais voláteis, utilizou-se uma temperatura de $950 (\pm 20) ^\circ\text{C}$ e as amostras permaneceram nesta temperatura por um período de 7 minutos e, apenas para esta etapa, com os cadinhos foram tampados, em virtude do processo de volatilização abrupta. O teor de cinzas foi determinado à temperatura de $575 (\pm 25) ^\circ\text{C}$, até massa constante, ou seja, a análise foi finalizada somente quando a variação de massa foi observada na terceira casa decimal (isto é, 0,001 g) da massa entre duas leituras consecutivas. Já o percentual de carbono fixo foi calculado pela diferença entre materiais voláteis e cinzas.

Tratamento de dados experimentais

Os dados obtidos experimentalmente foram tratados a partir de análises estatísticas descritivas. Os resultados foram apresentados no formato $X = \bar{X} \pm \sigma$, onde $\bar{X}$ é a média e σ é o erro. Para o cálculo do erro foi realizada propagação de

incertezas (estatísticas, instrumentais e operacionais), considerando erros sistemáticos e aleatórios. O erro operacional adotado foi 1% e o erro instrumental considerado foi de acordo com o manual de cada equipamento utilizado.

RESULTADOS

Em virtude das diversas possibilidades de fabricação de produtos em termos de composição de fibras (sintéticas, naturais e/ou regeneradas), os resíduos têxteis podem apresentar características combustíveis distintas. Logo, as análises laboratoriais desenvolvidas neste trabalho foram fundamentais para avaliar o seu potencial de recuperação energética.

A análise de umidade das amostras *in natura* foi realizada para obtenção de resultados preliminares sobre os resíduos coletados em colaboração com empresa de destinação da cadeia produtiva de têxteis. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Análise de umidade das amostras de resíduos têxteis *in natura* (isto é, sem processamento).

Fonte: Elaborada pelos autores.

Amostra	A (% em massa)	R (% em massa)	U _T (% em massa)
Poliamida	1,12 ± 0,03	1,59 ± 0,03	2,69 ± 0,05
Desfibrado branco	0,21 ± 0,06	0,17 ± 0,02	0,37 ± 0,06
Desfibrado misto	0,28 ± 0,11	0,32 ± 0,03	0,60 ± 0,11
Poliéster com elastano	0,09 ± 0,01	0,14 ± 0,03	0,23 ± 0,03
Poliéster	0,12 ± 0,02	0,12 ± 0,01	0,24 ± 0,02
Malha com elastano	2,14 ± 0,05	7,09 ± 0,09	9,07 ± 0,11
Misto	1,06 ± 0,07	1,87 ± 0,13	2,91 ± 0,14
Malha	0,89 ± 0,06	6,64 ± 0,08	7,47 ± 0,10
Poliamida 90% com elastano	0,87 ± 0,12	1,45 ± 0,14	2,31 ± 0,18
Poliamida 80% com elastano	1,13 ± 0,04	1,22 ± 0,10	2,34 ± 0,11

A = umidade seca por ar; R = umidade residual (seca por aquecimento); U_T = umidade total

Observa-se que as amostras com poliéster em sua composição apresentaram um menor percentual de umidade total (poliéster, poliéster com elastano e desfibrado branco; entre 0,2 e 0,4% em massa), o que pode ser justificado pela tensão superficial do plástico presente no tecido, que é menor do que a tensão superficial da água, conferindo características hidrofóbicas às amostras. Além disso, as fibras de poliéster, quando comparadas ao algodão, têm um elevado grau de cristalinidade e orientação, resultando em uma região amorfa relativamente pequena que dificulta a absorção de umidade (YANG et al., 2020).

As amostras contendo malha apresentaram um maior percentual de umidade total (7,5% em massa para malha e 9,1% em massa para malha com elastano), devido às características estruturais do tecido relacionadas à porosidade e permeabilidade. Logo, resíduos têxteis de malha ou de composições contendo malha tendem a uma maior permeabilidade ao ar e vapor de água (CHEN et al., 2021).

Com relação às amostras de poliamida e de poliamida com elastano, o teor de umidade total determinado foi intermediário (entre poliéster e malha). Já as amostras de desfibrado branco e misto possuem espaçamento significativo entre as fibras e, dessa forma, uma menor retenção de umidade em seu interior (0,4 e 0,6% em massa, respectivamente).

Considerando processos de combustão direta, o emprego de resíduos com baixo teor de umidade como fonte de energia, necessitará uma menor quantidade de energia sob a forma de calor para aquecer e evaporar a água presente. Destaca-se que fatores como composição dos têxteis, densidade, rugosidade da superfície, forças capilares influenciada pela geometria das fibras e condições ambientais (temperatura, umidade relativa do ar etc.) impactam diretamente no teor de umidade presente em cada amostra (DUPRAT, 2022).

A densidade a granel é a relação entre a massa de um resíduo e o seu volume, considerando as características da amostra na ausência de compressão e o espaço ocupado por partículas sólidas, líquidas e gasosas. Trata-se de uma propriedade fundamental para estimar a quantidade de energia por volume de resíduos transportado ($E/V = \rho \times PC$, onde ρ é a densidade e PC é o poder calorífico), por exemplo. Os resultados relacionados à densidade a granel das fibras têxteis analisadas estão indicados na Tabela 2, os quais estão diretamente ligados a estrutura e a composição dos produtos.

As amostras de malha e malha com elastano apresentam os maiores valores de densidade (123,8 e 127,3 kg/m³, respectivamente), enquanto as amostras de desfibrado branco e misto, por possuírem característica volumosa, apresentaram os menores valores (12,7 e 19,7 kg/m³, respectivamente). Esses resultados corroboram com as características visuais e táteis, uma vez que a malha possui maior espessura comparada aos demais resíduos têxteis.

Tabela 2. Análise de densidade a granel das amostras de resíduos têxteis.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Amostra	Densidade a granel (kg/m ³)
Poliamida	114,64 ± 7,92
Desfibrado branco	12,73 ± 0,74
Desfibrado misto	19,68 ± 1,06
Poliéster com elastano	100,71 ± 3,67
Poliéster	42,17 ± 0,49
Malha com elastano	127,32 ± 3,73
Misto	87,70 ± 2,55
Malha	123,79 ± 3,20
Poliamida 90% com elastano	99,27 ± 3,41
Poliamida 80% com elastano	85,98 ± 1,81

As fibras de poliamida, de poliamida com elastano (90 e 80%) e de poliéster com elastano apresentaram valores relativamente elevados (114,6; 99,3; 86,0 e 100,7 kg/m³, respectivamente). Logo, têxteis com densidade elevada apresentam características de transporte e armazenamento favoráveis por ocuparem um menor volume para uma mesma quantidade de massa, quando comparados aos resíduos com densidade relativamente baixa.

Para complementar a caracterização dos resíduos têxteis, o poder calorífico superior (PCS) foi determinado em bomba calorimétrica e os resultados estão indicados na Tabela 3. Por definição, o poder calorífico representa a quantidade de energia sob a forma de calor liberada a partir da combustão completa de uma quantidade de massa de um resíduo e, portanto, é uma propriedade fundamental para avaliar o potencial energético das fibras residuais.

Tabela 3. Análise de poder calorífico superior (PCS) das amostras de resíduos têxteis.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Amostra	Teor de umidade (% em massa ^a)	PCS (MJ/kg ^b)
Poliamida	2,55 ± 0,07	31,20 ± 0,31
Desfibrado branco	0,42 ± 0,06	23,16 ± 0,47
Desfibrado misto	0,59 ± 0,05	22,32 ± 0,23
Poliéster com elastano	0,23 ± 0,01	23,61 ± 0,24
Poliéster	0,21 ± 0,01	22,69 ± 0,29
Malha com elastano	8,93 ± 0,10	18,44 ± 0,19
Misto	3,58 ± 0,29	28,40 ± 1,38

Malha	7,98 ± 0,10	17,61 ± 0,18
Poliamida 90% com elastano	2,35 ± 0,04	31,06 ± 0,38
Poliamida 80% com elastano	2,29 ± 0,03	31,19 ± 0,32

^a determinado no período de realização da análise de poder calorífico; ^b base seca

Já o poder calorífico inferior (PCI) foi estimado a partir de modelo matemático que considera o poder calorífico superior e os teores de umidade e hidrogênio contidos na amostra (Tabela 4). Ressalta-se que quanto maior o teor de hidrogênio presente na amostra, menor será o poder calorífico inferior, visto que há entalpia de mudança de fase da água formada a partir da combustão do hidrogênio.

Tabela 4. Estimativa de poder calorífico inferior (PCI) das amostras de resíduos têxteis.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Amostra	Teor de umidade (% em massa ^a)	PCI (MJ/kg ^b)
Poliamida	2,55 ± 0,07	29,15 ± 0,29
Desfibrado branco	0,42 ± 0,06	22,23 ± 0,47
Desfibrado misto	0,59 ± 0,05	20,98 ± 0,22
Poliéster com elastano	0,23 ± 0,01	22,69 ± 0,23
Poliéster	0,21 ± 0,01	21,77 ± 0,29
Malha com elastano	8,93 ± 0,10	16,87 ± 0,18
Misto	3,58 ± 0,29	26,98 ± 1,38
Malha	7,98 ± 0,10	16,07 ± 0,16
Poliamida 90% com elastano	2,35 ± 0,04	29,02 ± 0,36
Poliamida 80% com elastano	2,29 ± 0,03	29,15 ± 0,30

^a determinado no período de realização da análise de poder calorífico; ^b base seca

Dentre os resíduos têxteis avaliados, as amostras de poliamida e de poliamida com elastano apresentaram os maiores valores de poder calorífico (isto é 31,1–31,2 e 29,0–29,2 MJ/kg, em base seca, para o PCS e PCI, respectivamente), corroborando com resultados reportados pela literatura (KIJO-KLECZKOWSKA et al., 2022). Já as amostras de malha e de malha com elastano apresentaram os menores valores dentre os têxteis (PCS de 17,6 e 18,4 MJ/kg, em base seca, respectivamente), o que pode indicar que os resíduos são compostos por fibras naturais, uma vez que o PCS de tecidos de algodão reportado pela literatura foi similar (QI et al., 2021).

Por sua vez, as amostras de desfibrado (branco e misto), poliéster e poliéster com elastano apresentaram valores de poder calorífico semelhantes (isto é, 22,3–23,6 e 21,0–22,7 MJ/kg, em base seca, para o PCS e PCI, respectivamente). O PCS do poliéster encontrado na literatura foi de 22,0 MJ/kg (CHENG et al., 2024), valor similar ao encontrado neste trabalho.

O poder calorífico está relacionado diretamente com os tipos de ligação química encontrados em resíduos (H–C, C–Cl, C=C etc.), devido à presença de moléculas/compostos que podem sofrer combustão e agregar energia sob a forma de calor aos processos termoquímicos. Fibras com maior teor de carbono orgânico tendem a liberar mais energia sob a forma de calor quando submetidas à combustão, como é o caso das fibras sintéticas (poliamida, por exemplo), em comparação com as fibras naturais (YANG & HE, 2012). Além disso, o poliéster, por exemplo, pode apresentar diferenças no poder calorífico em função dos distintos tipos disponíveis no mercado como poli(butileno adipato co-tereftalato) – PBAT, polibutileno succinato – PBS, policaprolactona – PCL, poli(ácido láctico) – PLA etc. (CHEN et al., 2023).

Com relação à análise imediata, os resultados dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas obtidos em forno tipo mufla estão apresentados na Tabela 5 para cada amostra. Os materiais voláteis constituem componentes de baixa massa molecular e seus maiores teores foram observados para as amostras de poliamida e de poliamida com elastano

(isto é, ~ 98,0% em massa), enquanto para as demais amostras os valores foram similares entre si (de 87,5 a 92,4% em massa). Logo, fibras têxteis possuem potencial combustível, o elevado teor de materiais voláteis contribui com o início do processo de combustão.

Já o carbono fixo representa a fração da amostra que permanece como carvão após a liberação dos voláteis e contribuem com a manutenção da combustão. A partir dos resultados, nota-se que poliéster com elastano e malha com elastano foram as amostras com maior teor de carbono fixo (11,6 e 11,7% em massa, respectivamente). Poliamida e poliamida com elastano tiveram os menores teores (máximo 0,4% em massa), enquanto desfibrado (branco e misto), poliéster e malha tiveram valores intermediário e similares entre si (de 7,3 a 8,3% em massa).

Com relação às cinzas—isto é, a fração inorgânica presente na amostra, a qual pode reduzir significativamente o poder calorífico, dependendo da concentração e dos elementos presentes—, as amostras de poliamida e de poliamida 90% com elastano apresentaram os maiores teores (1,6 e 1,7%, respectivamente), no entanto, encontram-se abaixo dos percentuais encontrados em combustíveis de fonte renovável utilizados em sistemas de cogeração, por exemplo. Já os menores teores foram determinados para as amostras de desfibrado branco, de poliéster e de desfibrado misto (máximo 0,3% em massa).

Tabela 5. Análise imediata das amostras de resíduos têxteis (isto é, sem processamento).

Fonte: Elaborada pelos autores.

Amostra	MV (% em massa ^a)	CZ (% em massa ^a)	CF (% em massa ^a)
Poliamida	98,33 ± 0,99	1,55 ± 0,02	0,12 ± 0,10
Desfibrado branco	91,64 ± 1,08	0,23 ± 0,04	8,13 ± 0,65
Desfibrado misto	92,38 ± 0,99	0,31 ± 0,02	7,31 ± 0,44
Poliéster com elastano	87,92 ± 0,97	0,46 ± 0,07	11,62 ± 0,53
Poliéster	90,90 ± 1,22	0,29 ± 0,01	8,81 ± 0,86
Malha com elastano	87,49 ± 0,93	0,81 ± 0,01	11,70 ± 0,46
Misto	94,48 ± 1,33	1,09 ± 0,08	4,43 ± 0,96
Malha	90,76 ± 1,07	0,62 ± 0,01	8,62 ± 0,64
Poliamida 90% com elastano	98,28 ± 0,98	1,69 ± 0,02	0,03 ± 0,06
Poliamida 80% com elastano	98,88 ± 0,99	0,67 ± 0,01	0,45 ± 0,11

MV = materiais voláteis; CZ = cinzas; CF = carbono fixo; ^a base seca

Considerando o fluxo global dos resíduos têxteis gerados em 2021, estudos indicaram que 0,3% das fibras residuais foi destinado para a reciclagem em circuito fechado, 6,3% para o processo *downcycling* (isto é, aproveitamento dos subprodutos gerados na reciclagem têxtil como insumos para etapas produtivas posteriores), 8,0% para o reuso, 2,2% para as perdas de coleta e classificação, 61,4% para disposição final em aterros sanitários ou queima direta, e uma pequena quantidade distribuída pela dispersão das microfibras no ambiente (CIRCLE ECONOMY FOUNDATION, 2024). Logo, pode-se observar um desperdício de recurso potencial de massa de resíduos encaminhados à disposição final.

Diante do exposto, os resultados de caracterização obtidos neste trabalho são essenciais para a tomada de decisões relacionadas ao uso de resíduos têxteis em sistemas térmicos e produção de biocombustíveis, pois fornecem parâmetros qualitativos e quantitativos para avaliar a recuperação de recursos, considerando informações sobre teor de umidade, densidade, poder calorífico e composição imediata.

Por apresentarem características combustíveis favoráveis quanto ao poder calorífico significativo, ao elevado teor de materiais voláteis e baixa presença de cinzas, resíduos têxteis podem ser usados como combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras industriais, fornos, gaseificadores e pirolisadores, em instalações de recuperação de energia. Esse cenário constitui uma alternativa para o tratamento de têxteis residuais inviáveis ao reuso e à reciclagem, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e o Plano Nacional de Resíduos

Sólidos (Decreto nº 11.043/2022). E, portanto, pode contribuir com a redução do volume de resíduos encaminhado para aterros sanitários ou dispostos inadequadamente em vazadouros a céu aberto.

Com vistas à complementação dos resultados e da avaliação do potencial energético dos resíduos têxteis, as seguintes análises serão realizadas: quantificação do percentual em massa de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio (em analisador elementar); e análise elementar das cinzas (metais, semimetais e halogênios) obtidas na análise imediata, a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (de acordo com a norma ASTM E1508:2019).

A análise da composição elementar das cinzas permite identificar potenciais indicadores de corrosão e/ou incrustação, variando conforme as propriedades dos resíduos. Com base nesses resultados, é possível propor melhorias em sistemas de recuperação de energia como, por exemplo, o desenvolvimento de novas ligas metálicas para equipamentos e tubulações.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados de caracterização físico-química e termofísica das amostras avaliadas neste trabalho foi possível identificar o potencial de recuperação energética de resíduos têxteis (inviáveis ao reuso e à reciclagem), principalmente das amostras de poliamida (integral e com elastano), visto que apresentaram poder calorífico elevado, frente às demais amostras. Ademais, as amostras compostas por fibras de poliéster (integral, desfibrado e com elastano) também apresentaram características combustíveis favoráveis, incluindo baixa retenção de umidade, poder calorífico relativamente alto e teores de materiais voláteis e carbono fixo elevados. Logo, o uso de fibras sintéticas em processos de recuperação energética é promissor, pois além das características apresentadas, tais fibras possuem maior abundância no mercado mundial de têxteis (67%; vide Figura 1), tornando a viabilidade da sua utilização como combustível derivado de resíduos (CDR) ainda mais proeminente.

E, embora as fibras naturais tenham apresentado menores quantidades de energia por unidade de massa, os valores encontrados neste trabalho corroboram com a literatura e estão próximos do poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar, amplamente utilizado em sistemas térmicos do setor sucroenergético.

Com os resultados de caracterização dos resíduos têxteis, espera-se a proposição de alternativas *textile waste to energy* para ampliar a sustentabilidade da cadeia produtiva das fibras sintéticas, naturais e regeneradas. Além disso, almeja-se atingir objetivos para o desenvolvimento mais sustentável da Organização das Nações Unidas, em especial, a obtenção de energia limpa e acessível (objetivo 7), a industrialização sustentável (objetivo 9) e a proposição de ações contra as alterações globais do clima (objetivo 13).

Portanto, este trabalho possui relevância na integração das áreas de engenharia, meio ambiente e energia, e os resultados poderão contribuir para o avanço de alternativas de tratamento e valoração de resíduos dispostos em aterros sanitários ou áreas irregulares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Chen, Q.; Shou, D.; Zheng, R.; Tang, K.-P. M.; Fu, B.; Zhang, X.; Ma, P. **Moisture and thermal transport properties of different polyester warp-knitted spacer fabric for protective application**. AUTEX research journal, 21: 182-191, 2021.
2. Chen, Hongmei.; Chen, F.; Chen, Hui.; Liu, H.; Chen, L.; Yu, L. **Thermal degradation and combustion properties of most popular synthetic biodegradable polymers**. Waste Management & Research, 41: 431-441, 2023.
3. Cheng, Y. W.; Huang, J.; Tang, X.; Fu, W.; Xu, D.; Wang, C. **Delving into textile fast pyrolysis: A holistic study on the effects of feedstock and temperature variability**. Journal of Cleaner Production, 484: 144278, 2024.
4. Circle Economy Foundation. **The circularity gap report – Textiles**. 2024. Disponível em: <https://www.circularity-gap.world/textiles>. Acesso: 31 de março de 2025.
5. Duprat, C. **Moisture in textiles**. Annual review of fluid mechanics, 54: 443-467, 2022.
6. Farahmandpour, R.; Keikhosro Karimi, K.; Denayer, J. F. M.; Shafiei, M. **Innovative biorefineries for cleaner waste textile management towards circular economy: Techno-economic analysis**. Journal of Cleaner Production, 378: 134500, 2022.

7. IEMI, Inteligência de mercado. **Relatório setorial da indústria têxtil brasileira – Resenha**. São Paulo: IEMI, 24: 1-88, 2024. Disponível em: <https://iemi.com.br/brasil-textil-2024/>. Acesso: 31 de março de 2025.
8. Kijo-Kleczkowska, A.; Szumera, M.; Gnatowski, A.; Sadkowski, D. **Comparative thermal analysis of coal fuels, biomass, fly ash and polyamide**. Energy, 258: 124840, 2022.
9. Lin, Y.; Ge, Y.; Xiao, H.; He, Q.; Wang, W.; Chen, B. **Investigation of hydrothermal co-carbonization of waste textile with waste wood, waste paper and waste food from typical municipal solid wastes**. Energy, 210: 118606, 2020.
10. Loo, S. V.; Koppejan, J. **The handbook of biomass combustion and co-firing**. London: Earthscan, 2008.
11. Qi, R.; Xu, Z.; Zhou, Y.; Zhang, D.; Sun, Z.; Chen, W.; Xiong, M. **Clean solid fuel produced from cotton textiles waste through hydrothermal carbonization with FeCl₃: Upgrading the fuel quality and combustion characteristics**. Energy, 214: 118926, 2021.
12. Shamsuzzaman, M.; AL. MAMUN, M. A. A.; HASAN, H. M. R. U.; Hassan, R.; Zulkernine, A.; Atik, M. A. R.; Islam, M. **Fashion circularity: Potential of reusing and recycling remnant fabric to create sustainable products**. Sustainability, 17: 1-22, 2025.
13. Textile Exchange. **Materials market report**. 2024. Disponível em: <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2024/>. Acesso: 31 de março de 2025.
14. Yang, C. Q.; He, Q. **Textile heat release properties measured by microscale combustion calorimetry: experimental repeatability**. Fire and Materials, 36: 127-137, 2012.
15. Yang, T.; Yu, H.; Liu, Y.; Dong, Z.; Ma, P. **The unidirectional wettability property of a new warp-knitted double-face fabric**. Fibers and polymers, 21: 1627-1633, 2020.