

# A PIRÓLISE COMO AGENTE DE TRANSFORMAÇÃO QUÍMICA E SOCIAL: CONVERTENDO RESÍDUOS TÊXTEIS A CARVÃO ATIVADO PARA A MODA CIRCULAR

Jenny Sayaka Komatsu<sup>1\*</sup>, Eliane Ornelas<sup>1</sup>, Anderson Luis Barbosa<sup>2</sup>, Bruno Ramos<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ESR Soluções Sustentáveis, São Paulo, Brasil (jenny.sayaka@esr.eco.br)

<sup>2</sup>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

<sup>3</sup>Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil

**Resumo:** Este artigo apresenta a conversão de resíduos têxteis em carvão granular e em pó. Resultados de microscopia eletrônica e área superficial demonstraram a obtenção de carvão de qualidade comparável à de produtos de origem não sustentável e importados. Essa abordagem promissora permite impulsionar a circularidade da moda e a sustentabilidade na indústria, agregando valor a resíduos e fomentando a indústria nacional.

**Palavras-chave:** resíduos têxteis; carvão; indústria da moda; pirólise

## INTRODUÇÃO

O setor da moda, um setor colossal avaliado em aproximadamente 2,5 trilhões de dólares em 2020, e tendo crescido 21% entre 2020 e 2022 (Amed *et al.*, 2023) é um dos que mais contribuem para a poluição global. A produção de cerca de 100 bilhões de peças de vestuário por ano resulta em uma quantidade impressionante de resíduos têxteis. Aproximadamente 85% dos têxteis são descartados a cada ano (Ellen MacArthur Foundation, 2017), o que equivale a um caminhão basculante cheio de roupas que acaba em aterros sanitários a cada segundo, exacerbando a emissão de gases de efeito estufa e ameaçando gravemente a qualidade do solo e da água por meio da lixiviação de produtos químicos perigosos.

Aqui no Brasil, estimativa da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) aponta que cerca de 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis são descartados por ano – correspondendo a 5% dos resíduos gerados no País (Puente, 2022).

Para além da degradação ambiental, os impactos sociais e econômicos das operações atuais do setor de moda são substanciais. O advento do mercado da "moda rápida" aumentou o desemprego de artesãos e trabalhadores têxteis tradicionais. Em 2022, o setor de *fast fashion* foi avaliado em US\$ 106 bilhões (Statista, 2023), e seu crescimento (atualmente com um CAGR estimado de mais de 10%) tem marginalizado os pequenos produtores que não conseguem competir com roupas produzidas em

massa e de baixo preço, exacerbando assim a desigualdade econômica.

Somando-se a isso, as práticas globais injustas de gerenciamento de resíduos aumentam a complexidade do problema. Os países desenvolvidos exportam uma parte significativa de seus resíduos têxteis para nações em desenvolvimento, transferindo o ônus ambiental para regiões mal equipadas para lidar com ele. Por exemplo, em 2021, os EUA exportaram o equivalente a 830 milhões de dólares em roupas usadas (Simões & Hidalgo, 2023), mais de 1 milhão de toneladas, a países em desenvolvimento, impondo mais pressão sobre as economias e as infraestruturas dos países receptores.

Dada a escala desses desafios, há uma necessidade urgente de soluções sustentáveis. A transformação de resíduos têxteis em produtos de carvão apresenta uma oportunidade promissora para resolver esses problemas. Ao converter resíduos em recursos com valor agregado, podemos fazer a transição de um setor de moda linear e gerador de resíduos para um setor circular. Isso não apenas atenua os danos ambientais, mas também promove a igualdade social e fomenta a reconstrução da indústria nacional, criando novos empregos e reduzindo a dependência da extração de matérias-primas e da importação de produtos industrializados como carvão ativado. Dessa forma, a conversão de resíduos têxteis em carvão serve como uma estratégia fundamental, possivelmente remodelando o futuro do setor da moda e abrindo caminho para práticas globais sustentáveis.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas típicas de um processo de preparação de carvão e carvão ativado a partir de resíduos têxteis são mostradas na Figura 1. O cerne do processo de conversão é a *pirólise*. Esse processo envolve o aquecimento dos resíduos em ausência de oxigênio, resultando na decomposição térmica dos materiais orgânicos presentes nas fibras têxteis. Durante a pirólise, ocorrem reações complexas que levam à formação de carvão sólido e subprodutos gasosos e líquidos, com potencial de aproveitamento para geração de energia e uso como precursor na indústria química (Lee *et al.*, 2023). O carvão resultante é caracterizado por sua estrutura porosa e alta capacidade de adsorção, o que o torna adequado para diversas aplicações, como filtragem de água e ar, remediação ambiental e produção de energia.



Figura 1. Cadeia de processamento do resíduo têxtil para produção de carvão e subprodutos.

Neste processo, utilizamos o resíduo têxtil como recebido (i.e. sem um processo de lavagem ou corte). Os materiais têxteis são separados visualmente de acordo com a natureza do tecido em fibras naturais e sintéticas. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos banhando-se os tecidos em uma solução aquosa de ácido nítrico e arranjados em um reator de vidro borossilicato de 5L de capacidade (~1 kg de resíduos). O reator foi tampado e colocado em um forno elétrico sem circulação de ar, programado para aquecer a 400 °C com uma rampa de 10 °C/min até 300 °C, um período de 1h de espera, e uma segunda etapa de aquecimento a uma taxa de 2 °C/min. Após a finalização do aquecimento, o material foi mantido no forno até a temperatura atingir naturalmente 100 °C. Após o resfriamento, o reator foi removido do forno e mantido fechado até que se atingisse a temperatura ambiente.

O material pirolisado foi moído após a queima. O carvão de origem sintética foi moído em almofariz e pistilo até atingir a granulometria desejada, resultando em um carvão granular (CGT). Em contrapartida, o carvão de origem natural foi processado em um moinho de bolas, por 3h, resultando em um carvão em pó (CPT). Parte do material poroso foi utilizado para fabricação de pellets utilizando uma composição proprietária de material cerâmico.

O material foi analisado quanto à sua área superficial por uma análise de adsorção de N<sub>2</sub> (Micromeritics, Gemini II), e foi inspecionado por microscopia óptica e eletrônica de varredura.

A comparação foi realizada com carvão granular comercial (CAG comercial, Carbon Clear, BahiaCarbon Agro Indústria Ltda.), carvão pelletizado comercial (CAP pellet, HomeBioGas), e carvão em pó comercial (CAP comercial, Dinâmica).

Por fim, a CPT preparado foi utilizado para preparação de corpos de prova de compósitos cerâmicos utilizando composição variada de argila comercial (Paschoal Cerâmica), bentonita e quartzo. Para preparo dos objetos, foram utilizadas impressoras 3D de extrusão de pasta (DuraPrinter 3, DuraCer Ltda.) e de filamento polimérico (Creator Pro, Flashforge Inc.), para preparo dos moldes de impressão em ABS (3D Fila Ltda.).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta as inspeções microscópicas do tecido natural e do tecido sintético, bem como dos materiais pós-pirólise (CPT e CGT, respectivamente). As pirólises tiveram um rendimento de ~10% em relação à massa inicial do tecido alimentado no forno.

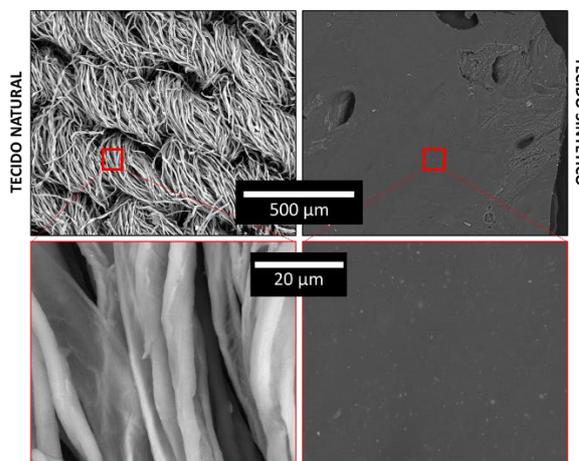


Figura 2. Microscopia dos carvões obtidos a partir do tecido natural (esquerda) e do tecido sintético (direita)

Pode-se observar nas microscopias que o tecido natural mantém sua estrutura filamentosa após a pirólise, resultando em um material fino composto por camadas de ca.  $10,5 \pm 1,6 \mu\text{m}$  de largura e  $\sim 1,2 \mu\text{m}$  de espessura entrelaçadas. Essa estrutura, por sua fragilidade, é facilmente rompida e dá origem ao carvão pulverizado (CPT). Em contrapartida, o tecido sintético é liquefeito e fundido, formando pedaços sólidos de carvão com porosidade interna (CGT), porém com maior resistência mecânica que o tecido natural pirolisado, tornando-o ideal para aplicações em leitos fixos.

Os materiais preparados foram submetidos a uma análise de área superficial a partir de adsorção de nitrogênio. A Tabela 1 apresenta as áreas superficiais dos materiais obtidos após o tratamento e as compara com materiais comerciais de referência.

Tabela 1. Área superficial dos materiais obtidos.

Material	Área ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )
CGT	286,3
CPT	334
CAG comercial	513,22
CAP comercial	411,62
CAP pellet	462,63

É possível observar que as amostras de carvão preparados possuem áreas menores que as dos carvões ativados comerciais, apesar de relativamente próximas para o carvão em pó (CPT).

Para promover o uso do carvão, estudamos o preparo de peças adsorventes de alta porosidade. A Figura 3 ilustra dois exemplos de peças preparadas a partir de formulações com carvão pulverizado (CPT). A figura 3(a) mostra um objeto preparado utilizando manufatura aditiva por extrusão controlada de pasta cerâmica com ~20% (massa seca) de CPT. Já a figura 3(b) mostra um objeto preparado utilizando uma técnica de moldagem por prensagem de uma massa contendo ~60% (massa seca) de CPT.

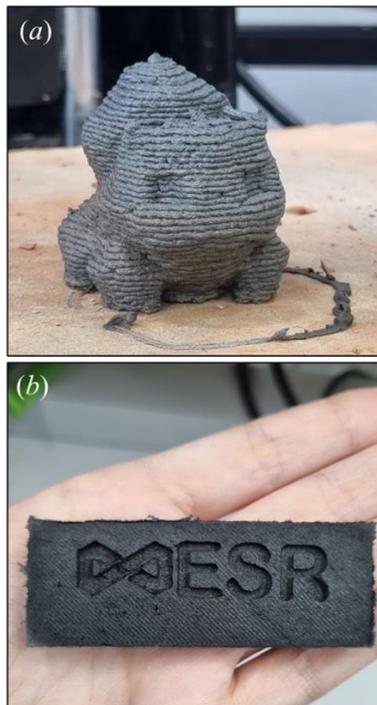


Figura 3. Fabricação de peças cerâmicas incorporadas com carvão (a) por manufatura aditiva e (b) por moldagem em prensa

O ensaio de prototipagem por extrusão de pasta permitiu observar que a presença do carvão, ainda que em quantidades elevadas, não impactou a reologia e a extrudabilidade da pasta cerâmica, resultando em um produto mecanicamente robusto e dimensionalmente equivalente aos preparados sem a incorporação do carvão à pasta. Por sua vez, o ensaio de manufatura por moldagem mostrou ser possível preparar uma massa cerâmica plástica, com excelente capacidade de transferência de padrões geométricos, mesmo com alta carga de carvão. Observou-se ainda que o corpo teve poucas alterações pós-secagem. Sabe-se que a retração de corpos cerâmicos no período da secagem é crítica para a conformidade geométrica da peça final. A alta estabilidade geométrica conseguida pode ser atribuída à presença de pedaços filamentosos do carvão, que agem como preenchedores (“fillers”) e diminuem o efeito da retração causada pela perda de água no processo de secagem. Essa é uma estratégia conhecida na arte cerâmica, frequentemente atingida pela incorporação de resíduos de papel (“paper clay”) na formulação (Gault, 2013).

Por fim, para avaliar o efeito do carvão como gerador de porosidade no substrato cerâmico, um fragmento da pasta utilizada na extrusão do objeto mostrado na Figura 3(a) foi submetido a uma queima de média temperatura (~1100 °C), visando sinterizar parcialmente o substrato cerâmico. Observou-se que o carvão ocasionou a geração de uma estrutura macroporosa, aumentando potencialmente sua capacidade de adsorção. A Figura 4 mostra a estrutura do fragmento antes (4(a)) e após (4(b)) a queima.

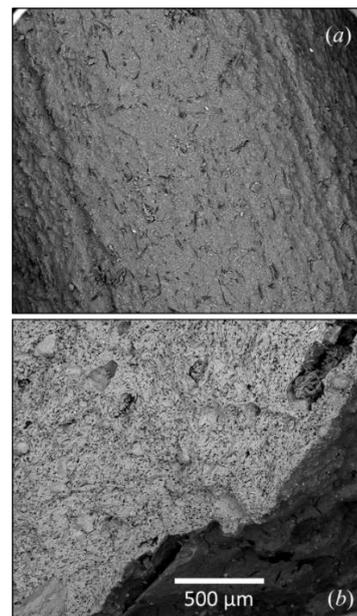


Figura 4. Estrutura do fragmento de composto cerâmico (a) antes e (b) após queima e remoção do carvão incorporado

A queima deixou poros de tamanhos variados, entre 1,3 e 8000  $\mu\text{m}^2$ , com tamanho médio de 23,6  $\mu\text{m}^2$  – equivalente a um diâmetro médio de ~5,5  $\mu\text{m}$ .

Para fazer uso da porosidade e funcionalizar os objetos de cerâmica sinterizada, avaliou-se a viabilidade de utilizar os substratos sinterizados no processo de pirólise do resíduo têxtil. Nessa etapa, foram utilizados tecidos sintéticos, devido a sua capacidade de gerar carbono fluidizado (e.g. óleos e gases) que poderia ser incorporado aos poros do material cerâmico e revesti-los de carvão. A Figura 5a,b ilustra alguns objetos obtidos nessa etapa, e a Figura 5c mostra a distribuição estimada de carbono nos poros do material, de acordo com análise de dispersão de raios-X (EDS).

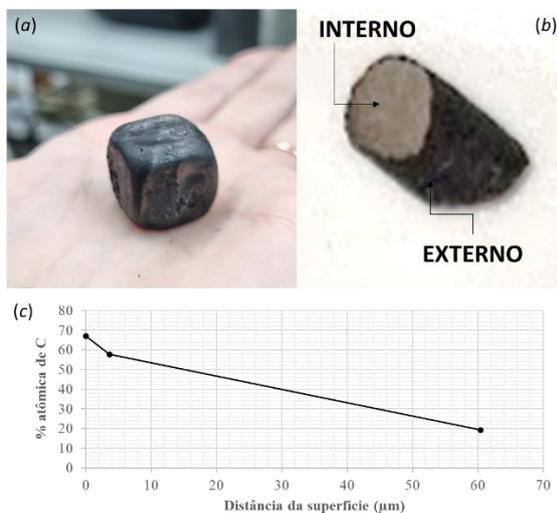


Figura 5. Análise do processo de recobrimento de cerâmicas sinterizadas. (a) Peça pós-pirólise, (b) fragmento fraturado, mostrando a difusão do carbono pelos poros internos do material, e (c) estimativa semi-quantitativa da concentração atômica de carbono a partir da superfície do corpo de prova mostrado na figura 5(b), obtido por análise de EDS.

Foi possível observar a viabilidade de impregnação do carvão na superfície externa e interna do material cerâmico sinterizado exposto ao processo de pirólise do tecido sintético, sugerindo a eficiência dessa técnica para obtenção de peças de carvão macroporosas a partir da combinação com materiais cerâmicos.

### CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por meio da microscopia eletrônica de varredura e da análise da área superficial dos carvões produzidos a partir de resíduos têxteis evidenciam a viabilidade e a qualidade do processo desenvolvido. A capacidade de obter carvão de qualidade comparável à de produtos obtidos a partir de biomassa e importados, a partir de resíduos têxteis oferece uma oportunidade promissora para a indústria da moda reduzir seu

impacto ambiental e avançar em direção a um modelo mais sustentável. Além disso, esses resultados incentivam a exploração de novas aplicações e possibilidades para o carvão derivado de resíduos têxteis, abrindo caminho para soluções inovadoras e conscientes em toda a cadeia produtiva. Essa abordagem é um passo importante rumo a uma indústria da moda circular, onde os resíduos são transformados em recursos valiosos, impulsionando a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem em particular ao Prof. Dr. Douglas Gouvêa da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo suporte acadêmico e de infraestrutura.

### REFERÊNCIAS

- Amed, I.; André, S.; Balchandani, A.; Berg, A.; Rölkens, F. *The State of Fashion 2023: Holding onto growth as global clouds gather*. McKinsey & Company: New York, 2023.
- Ellen MacArthur Foundation. *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*. Ellen MacArthur Foundation: Isle of Wight, 2017.
- Gault, R. *Paperclay: Art and Practice*. University of Pennsylvania Press: Pittsburgh, 2013.
- Lee, H.S.; Jung, S.; Lin, K.A.; Kwon, E.E.; Lee, J. *Upcycling textile waste using pyrolysis process*. *Science of the Total Environment*, 859, 160393. 2023.
- Puente, B. *Brasil descarta mais de 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis por ano*. CNN Brasil, 3 de junho de 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/brasil-descarta-mais-de-4-milhoes-de-toneladas-de-residuos-texteis-por-ano/>. Acessado em 06/07/2023.
- Simoes, A.J.C.; Hidalgo, C.A. *Observatory of Economic Complexity: Used Cloth in United States*. OEC, 2023. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/used-clothing/reporter/usa>. Acessado em 25/06/2023.
- Statista. *Fast fashion market value forecast worldwide from 2022 to 2027*. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1008241/fast-fashion-market-value-forecast-worldwide/>. Acessado em: 25/06/2023.