

# MOAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

## PRINTED CIRCUIT BOARD MILLING

**Vinicius Gomes da Silva**

Graduando de Eng. Metalúrgica, 7º período  
Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ  
Período PIBITI/CETEM: Setembro de 2025 a Agosto de 2026  
gomesvinicius.20231@poli.ufrj.br

**Caroline Rodrigues dos Santos Brigido**

Orientadora, Eng. Metalúrgica e de Materiais, D.Sc.  
cbrigido@cetem.gov.br

**Gabriel Kamilo Pantoja Barrios**

Coorientador, Eng. Química, D.Sc.  
gbarrios@cetem.gov.br

## RESUMO

O aumento da geração de resíduos eletroeletrônicos, aliado à rápida obsolescência das Placas de Circuito Impresso (PCIs), torna a recuperação de materiais uma demanda estratégica para a mineração urbana e a economia circular. As PCIs apresentam composição altamente heterogênea, contendo metais valiosos, polímeros e materiais cerâmicos, o que exige processos eficientes de fragmentação e separação. Nesse contexto, a etapa de moagem é fundamental para promover a liberação dos constituintes e viabilizar as operações subsequentes de separação física, química e metalúrgica. Este trabalho apresenta a caracterização da fragmentação de PCIs por meio de ensaios de compressão, testes em moinho de facas e modelagem computacional via método dos elementos discretos no *software Altair EDEM*. Os resultados experimentais indicaram forças médias de ruptura de 290N para placas de memória RAM e de 486N para os demais tipos de placas analisadas. Tais parâmetros subsidiam o dimensionamento de processos de cominuição mais eficientes, contribuindo diretamente para o avanço de soluções sustentáveis no contexto da mineração urbana e da economia circular.

**Palavras chave:** Placas de Circuito Impresso (PCIs), Resíduos eletroeletrônicos, Moagem, Mineração urbana.

## ABSTRACT

The increase in electronic waste generation, combined with the rapid obsolescence of Printed Circuit Boards (PCBs), makes material recovery a strategic demand for urban mining and the circular economy. PCBs feature a highly heterogeneous composition, containing valuable metals, polymers, and ceramic materials, which requires efficient fragmentation and separation processes. In this context, the milling step is essential to promote the liberation of constituents and enable subsequent physical, chemical, and metallurgical separation operations. This work presents the characterization of PCB fragmentation using compression tests, knife mill testing, and computational modeling via the discrete element method (DEM) in Altair EDEM software. Experimental results indicated average fracture forces of 290N for RAM memory modules and 486N for the other analyzed board types. These parameters support the design of more efficient comminution processes, directly contributing to the advancement of sustainable solutions in the context of urban mining and the circular economy.

**Keywords:** Printed Circuit Boards (PCBs), Electronic waste, Comminution, Urban mining.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente produção e o descarte global de dispositivos eletrônicos intensificam a busca por soluções eficazes para os Resíduos Eletroeletrônicos (REEE) (Forti, 2019). Nesse contexto, a reciclagem das Placas de Circuito Impresso (PCIs) surge como desafio e uma oportunidade. As PCIs contêm metais valiosos, como cobre, ouro e prata, além de polímeros e cerâmicas, formando um rico repositório de recursos. Para viabilizar a recuperação desses materiais e reduzir o impacto ambiental do REEE, torna-se relevante estudar as características da fragmentação de PCIs e assim tornar seu processamento mais eficiente, além de avaliar os desafios desta abordagem com o intuito de remediá-las (Silva, 2025).

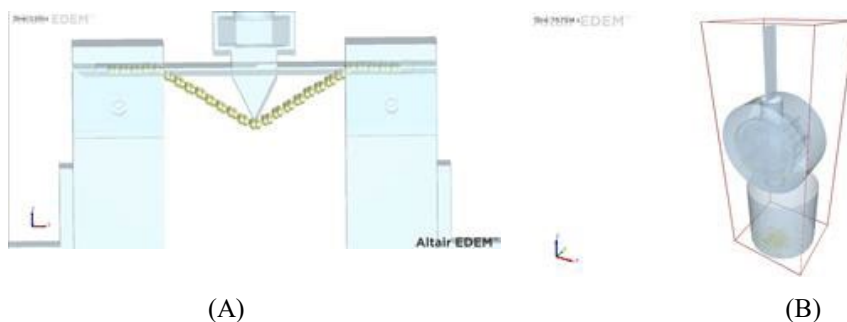
O reaproveitamento de PCIs é um campo multidisciplinar e que abrange desde a engenharia até a gestão de resíduos (Grigorescu, et al., 2019; Peixoto, 2024). A cominuição controlada das PCIs permite a liberação e a posterior separação dos diferentes constituintes. Dessa forma, este trabalho buscou contribuir para a sustentabilidade ambiental e fortalecer a economia circular ao promover a caracterização da resistência à compressão das PCIs e a modelagem da fragmentação usando o Método dos Elementos Discretos DEM. Trabalhos como este são importantes, pois a rápida evolução tecnológica amplia o volume e a diversidade das PCIs, tornando ainda mais urgente os aprimoramentos nos processos de recuperação de materiais (Xavier e Ottoni, 2021).

## 2. OBJETIVOS

A finalidade da presente pesquisa foi caracterizar a cominuição de placas de circuito impresso (PCIs). Para tanto as PCIs foram caracterizadas respeito à resistência a compressão, cominuídas em moinho de facas, adicionalmente foi calibrado o modelo de Bonded V2 para descrever a fragmentação das placas no simulador EDEM.

## 3. METODOLOGIA

As amostras utilizadas neste trabalho foram divididas em duas categorias, a primeira foram as placas de memória RAM com dimensões de 133,54 mm × 29,76 mm × 1,22 mm e massa média de 21,66 g. A segunda categoria foram PCIs provenientes de computadores descartados, previamente desmonteladas e cortadas em dimensões semelhantes às das memórias RAM. Os ensaios de compressão foram realizados na prensa *Tecsistel Servus 30 kN*, adaptada com um suporte para fixação das PCIs e um indentador de geometria triangular, ambos fabricados por manufatura aditiva em ácido polilático (PLA) (Figura 01A). Foram utilizadas cinco amostras de memória RAM e cinco das demais PCIs. Os dados de força em função do tempo até a ruptura foram adquiridos por meio do software *DM Viewer*. Para reproduzir o ensaio, foi desenvolvido um modelo computacional usando o método dos elementos discretos (DEM), no software *Altair EDEM*, especificamente o modelo de ligação de partículas Bonde V2. O suporte e o indentador, assim como o moinho de facas, foram desenhados no software *SketchUp* (Figura 01B). As placas foram representadas por 297 partículas de 5 mm × 3 mm de área em formato retangular, com massa e propriedades mecânicas equivalentes às das amostras reais.



Fonte: Autores.

**Figura 1:** A) Suporte utilizado no Tecsistel Servus 30 kN B) Moinho de facas.

Os ensaios de moagem foram realizados em um moinho de facas Willye Super Macro – MSM610, equipado com quatro facas móveis e seis fixas, operando a 1720 rpm e potência nominal de 800W. A alimentação foi realizada por meio de um alimentador contínuo, com taxa média de 14,47g/s. A vazão mássica de saída foi medida por uma célula de carga e a corrente elétrica por um sensor de corrente, ambos desenvolvidos com a plataforma *Arduino*. Com base nos dados experimentais, foi realizada uma nova simulação no *Altair EDEM*, utilizando um modelo tridimensional do moinho e a amostra virtual de PCI, permitindo comparar os resultados experimentais e simulados quanto à potência consumida (Equação 01) para o ensaio de moagem real; capacidade de processamento (Equação 02), energia específica (Equação 03) e potência mecânica angular (Equação 04) para o ensaio virtual.

$$P = I \times V \quad (1)$$

$$Q = P_{\text{médio}} / Q_{\text{média}} \quad (2)$$

$$q = E / m \quad (3)$$

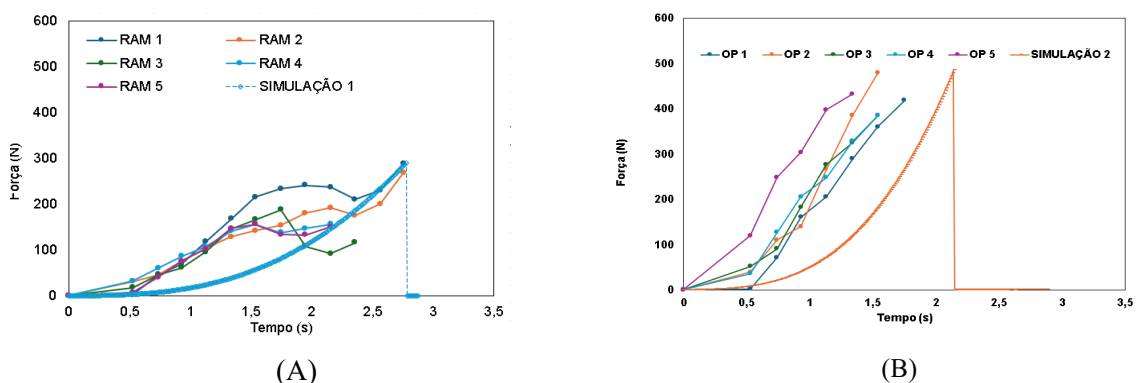
$$P = (w \times T \times \pi) / 30 \quad (4)$$

Onde “P”: Potência útil do motor (W); “Q”: Capacidade Mássica Teórica (kg/h); “P<sub>médio</sub>”: Potência média do motor (J/s); “Q<sub>média</sub>”: Energia específica média (J/Kg); “q”: Energia específica de quebra (J/Kg); “E”: Energia utilizada (J); “m”: Massa da PCI (Kg); “ω”: Velocidade Angular (rpm); “T”: Torque (Nm);  $\pi \approx 3,14$ .

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização das Placas de Circuito Impresso (PCIs)

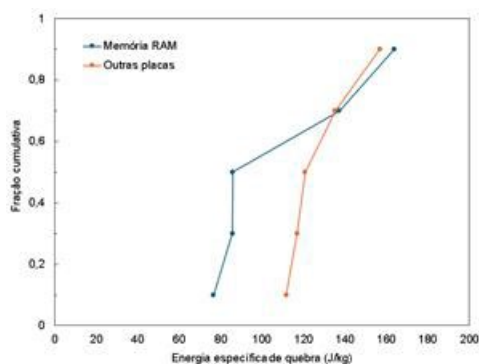
Na Figura 02 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização no equipamento *Tecsisel Servus* 30 kN. Na Figura 02A, para as placas RAM, a força máxima de ruptura foi de 290 N no tempo de 2,78s. Enquanto na Figura 02B a força de ruptura foi de 486 N no tempo de 2,14s. Nestes ensaios foi possível observar que os outros tipos de placas (OP) exigem uma aplicação de força maior para a fratura total, isto pode estar associado ao material FR-4 (composto de tecido de fibra de vidro e resina epóxi) que pode estar presente na composição da placa e possuírem maior resistência. As simulações da quebra das placas foram próximas aos ensaios reais, e os parâmetros do modelo de Bonded V2 correspondem a:  $5,10^9$  N/m<sup>3</sup> em *Normal Stiffness per unit area*; 0 N/m<sup>3</sup> em *Normal Range*;  $1,10^9$ /m<sup>3</sup> em *Shear Stiffness per unit area*; 0 N/m<sup>3</sup> em *Shear Range*;  $5,10^6$  Pa em *Normal Strength*;  $5,10^6$  Pa em *Shear Strength*; 1 em *Bonded Disk Scale*. Os pontos máximos locais representam momentos de fratura das fibras de vidro e fissuras internas. Ao alcançar o ponto crítico e final das placas, ocorre a fratura completa, onde a placa se divide em dois fragmentos.



Fonte: Autores.

**Figura 2:** A) Fratura das memórias RAM. Sendo “SIMULAÇÃO 1”: Modelagem das placas de RAM; B) Fratura das Outras Placas (OP). Sendo “SIMULAÇÃO 2”: Modelagem das OPs.

Através do cálculo de energia específica de quebra das amostras, foi possível estimar uma fração cumulativa, cujos resultados são evidenciados na Figura 03. Observamos que aproximadamente 50 % das placas de memória RAM fragmentou com energia aproximada de 80 J/Kg, enquanto os outros tipos de placas começaram a se fragmentar apenas por volta dos 110 J/Kg. Para frações cumulativas de 0,9 (90%), nas placas de RAM, foi encontrada a maior energia específica de 163,8 J/kg; enquanto, para as outras placas, a maior energia específica de 156,8 J/Kg. Nestes ensaios, foi possível observar que, as placas de RAM foram as primeiras a fraturar, mas exigiram mais energia específica para que todas fossem fraturadas, enquanto os outros tipos de PCIs precisaram de uma maior energia específica de quebra nas primeiras placas, porém uma energia menor para o total de placas. Para a fração cumulativa de 0,9, as placas do tipo RAM apresentaram o maior valor de força máxima registrada (163,8 N), ao passo que os demais tipos de PCI atingiram o limite de 128,6 N. Nesses ensaios, observou-se que as placas RAM iniciaram o processo de fratura precocemente; contudo, demandaram maior energia específica para a fratura total do conjunto. Em contrapartida, as demais PCIs exigiram maior energia específica para o rompimento das placas iniciais, mas menor energia para a fratura completa do lote. Para etapas mais avançadas de fragmentação, a composição das placas de RAM e das outras placas necessitam de energias muito próximas umas das outras.

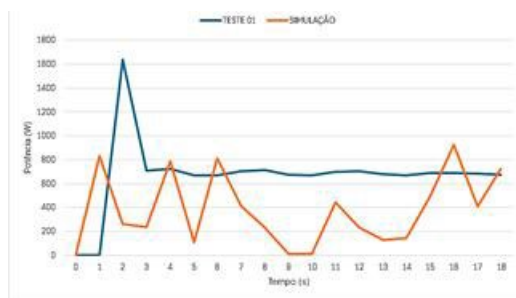


Fonte: Autores.

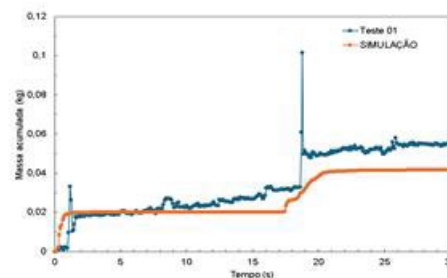
**Figura 3:** Fração cumulativa da energia específica de quebra das placas de memória RAM e outras placas.

## 4.2 Moagem de PCIs e Modelagem Computacional

Na Figura 04 são apresentados os resultados do ensaio real de moagem de PCIs em moinho de facas, onde foi possível obter a potência (Figura 04A) e a massa acumulada (Figura 04B) no Teste 01 e na simulação. Acerca da Figura 04A a potência média obtida do Teste 01 e da simulação, da energia específica média da PCI do tipo RAM, e da Equação 02, foi possível estimar uma capacidade mássica de 6,76 kg/s (no Teste 01) e 3,44 kg/s (na simulação). Na Figura 04B as amostras do teste 01 ficaram retidas no interior do moinho ou presas às suas extremidades, devido à sua geometria, tornando necessária a interrupção dos ensaios, o que contribuiu para o pico do gráfico em 0,1 Kg no tempo de 19s. Esse comportamento justifica a adoção de um pré-tratamento das PCIs por meio de uma guilhotina, reduzindo-as a fragmentos de aproximadamente 3 cm<sup>3</sup>, conforme proposto por Silva (2019). Também estão em concordância com outros estudos sobre moagem de PCIs, que apontam a fragmentação controlada como etapa essencial para aumentar a liberação dos constituintes e a eficiência dos processos de separação (Grigorescu *et al.*, 2019; Peixoto, 2024).



(A)



(B)

Fonte: Autores.

**Figura 4:** A) Potência elétrica do moinho de facas. B) Massa acumulada dos PCIs.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que diferentes tipos de PCIs apresentaram comportamentos distintos durante a fratura, com as memórias RAM rompendo-se em média com 109,9 J/Kg de energia específica, e as demais placas em média de 120,9 J/Kg. Os ensaios experimentais, aliados às simulações DEM, permitiram caracterizar parâmetros relevantes para a moagem, como potências que se aproximavam dos 800 W em alguns momentos, capacidade mássica de processamento 6,76 kg/s e comportamento elástico do material, com um formato inadequado para a moagem direta, exigindo um pré-tratamento. Dessa forma, a metodologia proposta demonstrou potencial para auxiliar no desenvolvimento de equipamentos mais eficientes e para a reciclagem de resíduos eletroeletrônicos.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa, que possibilitou a realização deste trabalho. Agradecem ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) pela infraestrutura e ao Laboratório de Conservação e Alterabilidade de Materiais de Construção (LACON) assim como agradecem a equipe técnica pelo apoio na realização dos ensaios.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Silva, G. S. da. 2025. *Desenvolvimento de processo hidrometalúrgico para recuperação de cobre de placas de circuito impresso. Dissertação (mestrado)* – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, fortaleza, 2025.
- Forti, V. O crescimento do lixo eletrônico e suas implicações globais. *Panorama Setorial da Internet*, n. 4, 2019. Disponível em: <https://cetic.br/media/docs/publicacoes/6/20191217174403/panorama-setorial-xi-4-lixo-eletronico-atualizado.pdf>. Acesso em: 28 de Jul. de 2025.
- Xavier, L.H.S.M., Ottoni, M. (org). *Mineração urbana: conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. 2021.
- Grigorescu, RM; Grigore, ME; Iancu, L.; Ghioca, P.; Ion, R.-M. *Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos: Uma Revisão dos Métodos de Identificação de Materiais Poliméricos*. Reciclagem 2019, 4 , 32. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/recycling4030032>. Acesso em: 27 jul. 2026.

Peixoto, R. de A. O. 2024. *Remoção de metais em placas de circuito impresso de computadores utilizando o processo de biolixiviação. Tese (Doutorado)* - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 120f. 2024.

SILVA, Emanuel Carlos Santana da. *Placas de circuito impresso: levantamento da composição*. 2019. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

TRIMBLE INC. *SketchUp*. Software de modelagem tridimensional. Versão 2025. Westminster, CO, 2025. Disponível em: <https://sketchup.trimble.com/pt-br>. Acesso em: 27 jul. 2026.

ALTAIR ENGINEERING INC. *Altair EDEM Student Version*. Software de simulação pelo Método dos Elementos Discretos (DEM). Versão 2025. Troy, MI, 2025. Disponível em: <https://www.siemens.com/en-us/products/simcenter/fluids-thermal-simulation/edem/>. Acesso em: 27 jul. 2026.