

# ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE MICROPARTÍCULAS DE COBRE SINTETIZADAS A PARTIR DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM MATRIZ POLIMÉRICA

Gabriela Hernandez Tumkus <sup>1</sup>; Viviane Tavares de Moraes <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluna de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

<sup>2</sup> Professora do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

**Resumo.** *Atualmente, o Brasil é um dos maiores produtores de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEEs) do mundo, sendo que esse resíduo possui em sua estrutura uma Placa de Circuito Impresso (PCI), as quais podem conter até 40% da sua massa em metais com alto valor agregado e que podem ser reciclados. No entanto, embora no país tenha descartado os REEEs em pontos de coleta, lixo domiciliar, aterros industriais e cooperativas de resíduos, em 2019 mais de 2 milhões de toneladas de resíduos, apenas cerca de 140 toneladas foram recicladas, uma vez que o processo envolve técnicas complexas que não estão difundidas pelo território nacional. Assim, esse projeto tem como objetivo viabilizar a incorporação de micropartículas de cobre em matriz polimérica de polipropileno, incentivando um modelo de fabricação de micro compósitos mais econômico e sustentável, por meio da reciclagem de equipamentos eletrônicos. Para isso, foi utilizado um homogeneizador termocinético para a dispersão das partículas do metal no polipropileno em diferentes porcentagens: 0,5%, 1,0% e 1,5%, as quais foram submetidas a ensaios mecânicos de tração e alongamento. Por meio dos testes realizados, foi percebido uma constância na resistência à tração do equipamento com o aumento da carga, mas, uma diminuição na % de alongamento do material, apesar disso, concluiu-se que os resultados foram satisfatórios, mostrando a viabilidade da aplicação do projeto em processos industriais.*

## Introdução

No ano de 2022, a indústria de eletroeletrônicos atingiu um faturamento de 218,2 bilhões de reais, 3% a mais que o ano anterior, segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (Abinee, 2023). Esse crescimento vem acontecendo a vários anos, e, junto a obsolescência planejada, a rápida inovação tecnológica e a falta de iniciativas do Estado para gerenciar o descarte desses materiais, contribui para um aumento cada vez maior na taxa de geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) (SANT'ANNA, 2014). Esse resíduo chama a atenção por seu rápido crescimento, em apenas 5 anos a quantidade de REEE descartados aumentou 9,2 Mega toneladas, o que é preocupante pela presença de materiais tóxicos, como chumbo, arsênio e mercúrio, podendo levar a contaminação da água, do solo e do ar, além de riscos para a saúde de trabalhadores envolvidos no processo de reciclagem, após a adoção das diretivas europeias esses metais tóxicos não podem mais fazer parte dos equipamentos eletroeletrônicos e com isso a ausência desses metais facilita o processo de reciclagem (NEUTZLING, 2014).

No entanto, com um descarte adequado, são equipamentos que possuem relevância, nas dimensões econômica, social e ambiental, dado que possuem em sua composição metais nobres. Dessa forma, sua reciclagem evita que materiais tóxicos sejam despejados na natureza, enquanto no âmbito social e econômico, permite o reaproveitamento de equipamentos descartados, mas em condição de uso, vendendo-os a um preço mais acessível e construindo um mercado de segunda mão, além da recuperação de metais com alto valor no mercado e a geração de empregos durante esse processo (NEUTZLING, 2014).

Porém, mesmo que a reciclagem dos resíduos eletrônicos seja extremamente importante, esse ainda é um procedimento muito mal aproveitado no Brasil. O país é o segundo maior produtor de resíduos eletroeletrônicos entre os países emergentes (SIGRIST & FONSECA, 2015), sendo responsável por descartar mais de 2 milhões de toneladas de REEE em 2019, mas, uma parcela muito

pequena chega a ser reciclada, em 2012, foram apenas 140 toneladas. (Unitar, 2019).

Uma vez que praticamente todos os equipamentos eletroeletrônicos apresentam em sua estrutura uma Placa de Circuito Impresso (PCI), a qual pode corresponder a até 30% do peso dos equipamentos, essa é uma estrutura muito importante para o processo de reciclagem. Essas placas são formadas, em geral, por plásticos e metais, onde estes últimos representam 40% do seu peso, sendo cerca de 50% cobre, 20% estanho, 10% ferro, 5% níquel, 5% chumbo, 5% alumínio e 3% zinco, sem contar a presença de metais preciosos como prata, ouro e paládio (VEIT, 2005).

Ademais, enquanto é possível se obter até 2% de cobre por meio da extração de minérios (GUIMARÃES, 2014), as PCIs, podem ser formadas por até 20% desse metal (VEIT, 2005), o qual é atualmente o terceiro metal mais consumido no mundo. Isso por conta da sua boa condutividade elétrica e térmica e resistência mecânica, à corrosão e à fadiga (MORAES, 2011), além de possuir propriedades antimicrobianas, o que amplia ainda mais seus campos de atuação.

Em geral, a reciclagem das PCIs pode envolver técnicas pirometalúrgicas, hidrometalúrgicas, eletrometalúrgicas ou mecânicas (VEIT, 2005). Esse processo pode ser separado em três etapas: o desmanche, quando as peças maiores e de fácil identificação são separadas, por exemplo, partes metálicas, de vidro, revestimentos plásticos e até mesmo materiais perigosos como baterias e capacitores; a trituração, e, por último, a separação, em que os materiais triturados são separados por métodos magnéticos, que retiram os metais ferromagnéticos, físicos, que utilizam técnicas de separação por tamanho e densidade das partículas, e eletrostáticos, cujo objetivo é identificar materiais condutores e não condutores, etapa responsável por isolar os metais com alto valor agregado (SCHNEIDER, 2020).

Entretanto, esse processo envolve altas tecnologias, as quais não estão difundidas pelo Brasil, de forma que existem poucas empresas instaladas no país especializadas nesse processo. A maioria das empresas do ramo realizam o armazenamento e trituração das placas, e a reciclagem de materiais como plástico, vidro e madeira, enquanto o refino em escala industrial dos metais é feito no exterior, em países como Canadá, Bélgica, Alemanha, Estados Unidos e Cingapura. Como exemplo, tem-se a empresa Umicore, que é referência na recuperação de metais e atua com a reciclagem em território nacional desde 2005, mas, sua planta de refino está localizada na Bélgica (OLIVEIRA, 2010). Sendo assim, enquanto esses países recebem o lucro da recuperação de metais, o Brasil recebe os rejeitos dos REEES e materiais prejudiciais, o gasto energético do processo de reciclagem, e a coleta de emissões atmosféricas.

Para dar ainda mais importância à reciclagem dos resíduos eletrônicos, a partir desse processo podem ser obtidas micro e nanopartículas de cobre. Esse material, quando incorporado em matriz polimérica, tem ganhado destaque por sua ação antibactericida, sendo amplamente utilizado nas indústrias de tecido, embalagens de alimentos e equipamentos médicos (SILVESTRE, 2013). Tendo tudo isso em vista, esse estudo procura viabilizar a formação de compósitos poliméricos, ao verificar a compatibilidade de partículas de cobre em matriz de polipropileno, possibilitando o desenvolvimento de novos produtos antibacterianos para aplicações médicas e têxteis, mas com um custo de produção mais baixo, ao propor a substituição das partículas de prata pelo cobre, e assim, valorizando os materiais recuperados de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Para isso, pretende-se incorporar as micropartículas de cobre em polipropileno e então avaliar o comportamento mecânico do PP quando adicionadas concentrações variadas do metal.

O polipropileno é um dos polímeros mais consumidos no mundo hoje em dia, desde que começou a ser fabricado, sua produção possui o maior crescimento da história dos plásticos. Isso se justifica pelas suas boas propriedades térmicas, químicas e elétricas, além de ser resistente à ruptura (PETRY, 2011). Assim, o PP se tornou muito importante para as indústrias de plásticos e tecidos, ademais, é um material frequentemente utilizado em filtros, fraldas e máscaras cirúrgicas, e, embora se espere que as fibras sintéticas sejam mais resistentes às bactérias, os microrganismos podem facilmente atacar as cadeias carbônicas do polímero, o que torna necessária a incorporação de aditivos antimicrobianos (JEONG, 2004).

Logo, as partículas de prata surgiram como uma alternativa para a produção desses compósitos, devido à sua toxicidade para uma grande quantidade de microrganismos (DOMENECH, 2013). A prata

vem sendo usada a bastante tempo como desinfetante e antisséptico, com aplicação nas áreas de medicina, biotecnologia, cosméticos, tecidos e em produtos eletrônicos (BENEDITO, SILVA & SANTOS).

Por exemplo, na medicina, a prata pode ser utilizada em próteses ósseas, equipamentos cirúrgicos, tecidos, implantes, na superfície de válvulas cardíacas, cateteres e marca-passos. Ademais, é utilizada pela indústria têxtil para fabricação de roupas e lençóis, inclusive hospitalares. (BENEDITO, SILVA & SANTOS)

No entanto, enquanto uma tonelada de cobre custa cerca de 5600 dólares, a mesma quantidade de prata tem o valor de US\$590.000,00 (LME, 2020). Portanto, visto que o cobre apresenta propriedades semelhantes à prata, a substituição de um metal pelo outro se torna uma alternativa viável para redução dos gastos de produção. Além disso, suas partículas podem ser produzidas a partir de um processo de reciclagem, que, além de todos os outros benefícios, pode economizar até 83% de energia em relação a sua extração primária (SILVA, 2021), tornando o produto final mais barato e sustentável.

## **Materiais e Métodos**

Com base no processo de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos desenvolvido por Moraes (2011) foi possível fazer a recuperação seletiva de cobre a partir de resíduos eletroeletrônicos. Assim o estudo em questão partiu para a aplicação do cobre recuperado na forma de micropartículas desenvolvida por Moraes (2011).

Existem vários métodos propostos pela literatura para a produção de compósitos poliméricos, como por exemplo, Silvestre et al (2013) utilizou uma extrusora de parafuso duplo para a formação de um composto de polipropileno com óxido de zinco, enquanto Da Silva (2023) empregou um misturador de laboratório Rheomix para incorporar partículas de prata em PP.

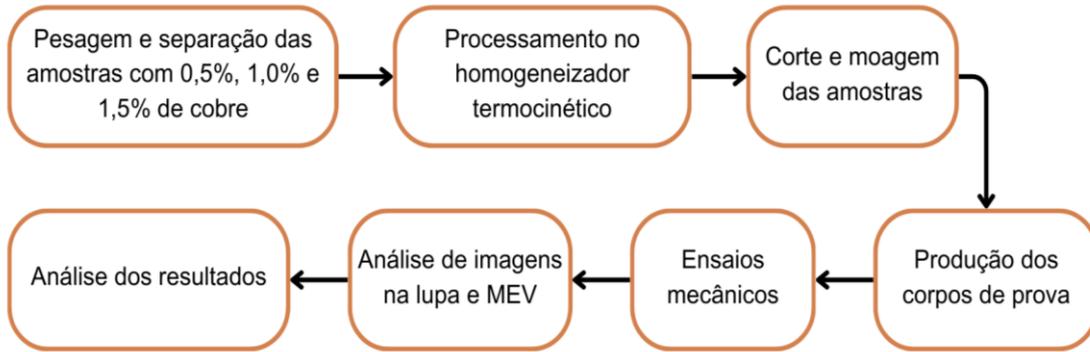
Para essa pesquisa, a incorporação das partículas em PP foi feita em um homogeneizador termocinético de bancada MH – 25 (Figura 1). Os materiais usados na pesquisa foram a micropartícula de cobre puro, que foi introduzida em polipropileno RT400NAQ, vendido pela Braskem, com a presença do agente compatibilizante Dupont Fusabond N416.

Figura 1 - Homogeneizador termocinético



O procedimento para a realização deste estudo pode ser visto no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma de etapas da pesquisa



Primeiramente foi pesada em uma balança analítica, amostras com 10g de polipropileno, 7% de Fusabond e cobre em diferentes porcentagens: 0,0%, 0,5%, 1,0% e 1,5%. Para evitar a perda do metal, a medição foi feita em um saco plástico de PP puro, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Recipientes usados para a pesagem dos materiais



Então, o processamento de cada unidade no homogeneizador foi realizado com uma velocidade média de 4000 rpm, utilizando apenas o rotor de velocidade mínima do equipamento, por 20 segundos. Depois de retirada, a massa, ainda maleável, foi amassada com uma espátula, formando uma placa fina, as quais foram serradas manualmente em pedaços de cerca de 1 cm e trituradas no moinho de facas SL – 31, com grelha de 3 mm de abertura.

A seguir, o pó formado foi deixado no agitador de peneira por 40 minutos, a fim de retirar os fragmentos com mais de 2 mm, e, então levado para uma injetora, MAQ-INJET 6000P, que pode ser vista na Figura 4 junto com o moinho. A injeção dos corpos de prova foi feita com uma pressão de 2 bar e uma temperatura média de 190°C.

Figura 4 - Injetora do lado esquerdo e moinho no lado direito



Esses corpos de prova foram enviados para ensaios mecânicos de impacto, realizados com uma velocidade média de 50 mm/min, a fim de medir a resistência do material à tração e o seu alongamento máximo para cada porcentagem de cobre. Todos os ensaios mecânicos foram realizados em quintuplicata.

Além desses testes, foram feitas imagens do material e das micropartículas de cobre puras na lupa e no microscópio eletrônico de varredura (MEV), com o intuito de avaliar a dispersão do cobre no polímero e seu comportamento após ruptura. Também foi utilizada a técnica de EDS (Espectroscopia por energia dispersiva), associada ao MEV, para caracterização química da micropartícula de cobre e das amostras produzidas.

Para isso, as amostras de polímero foram cortadas em pedaços menores de no máximo 1 cm<sup>3</sup> e fixadas em uma fita de carbono, as amostras foram então metalizadas com ouro paládio, tornando o material condutor para análise de MEV.

## Resultados e discussão

A partir dos parâmetros utilizados no homogeneizador, foi obtida uma massa fundida e de aspecto visual homogênea, que formou uma placa de espessura que facilitasse o corte manual na serra, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - A esquerda, a amostra depois de sair do homogeneizador e à direita, na forma de placa



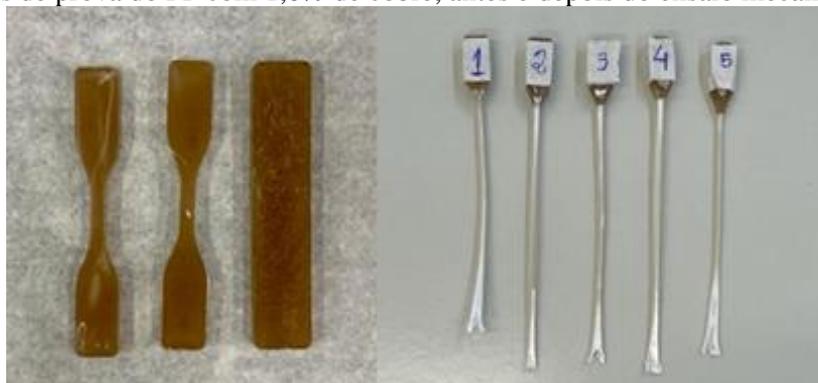
O próximo passo do procedimento consistia em serrar as amostras, triturá-las no moinho e passar pela peneira, como é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Amostras serradas, à esquerda, e depois de trituradas e peneiradas, à direita



Esse material foi usado para moldar os corpos de prova vistos na Figura 7, antes e depois de passar pelos testes mecânicos.

Figura 7 - Corpos de prova do PP com 1,0% de cobre, antes e depois do ensaio mecânico de tração axial



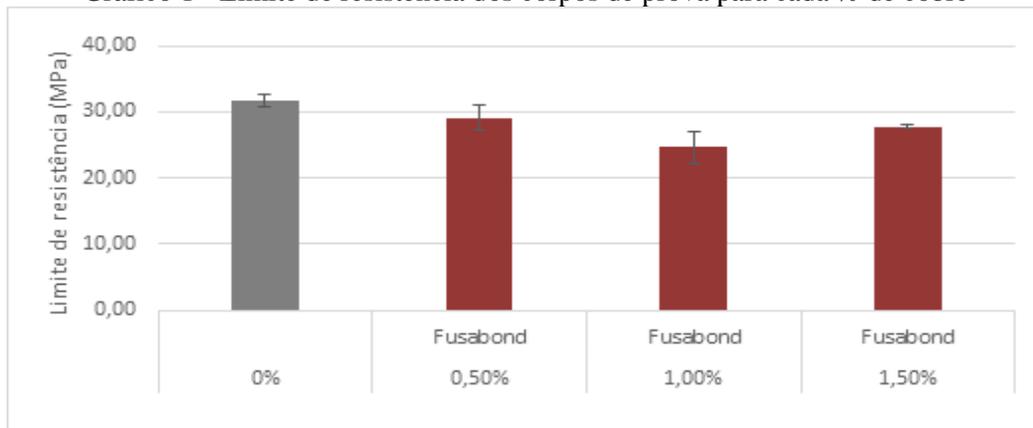
Os resultados dos testes realizados, estes são os ensaios de resistência e alongamento dos corpos de prova, podem ser vistos na Tabela 1, tanto para o PP puro, como para 0,5% da massa em cobre, 1,0% e 1,5%. Nela, mostra-se o valor médio obtido para esses ensaios assim como o desvio padrão entre os resultados encontrados.

Tabela 1 - Resultados dos testes de resistência e alongamento

Matriz	PP							
	0% cobre		0,5% cobre		1,0% cobre		1,5% cobre	
Limite de resistência (MPa)	31,76	+/- 0,99	29,05	+/- 1,88	24,64	+/- 2,50	27,82	+/- 0,25
Alongamento (%)	313,92	+/- 8,31	432,44	+/- 11,08	312,55	+/- 12,91	254,23	+/- 21,89

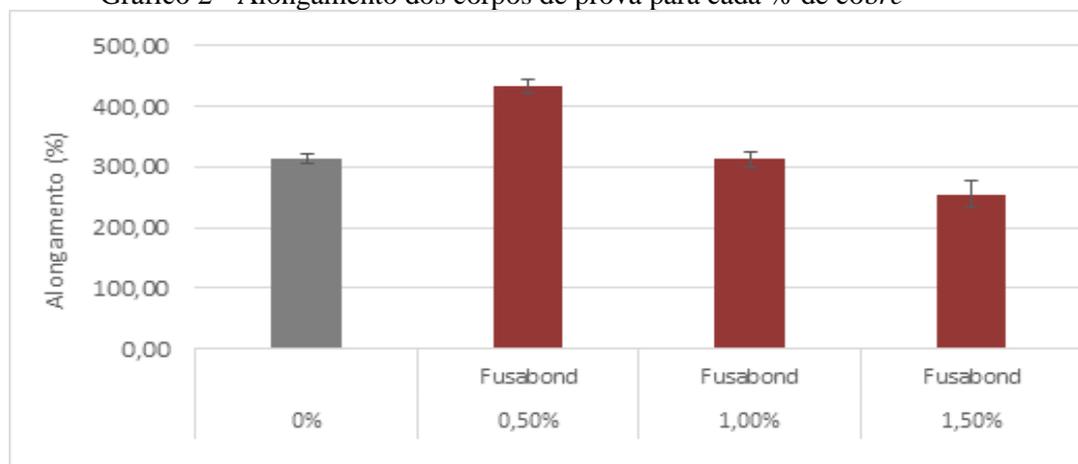
Os resultados do ensaio mecânico de resistência a tração podem ser visualizados no Gráfico 1. Embora existam pequenas variações na média dos valores, ao considerar o desvio padrão das medições, percebe-se que não houve uma variação expressiva no limite da resistência com o aumento da carga de cobre no polímero.

Gráfico 1 - Limite de resistência dos corpos de prova para cada % de cobre



Ademais, podem ser analisados de forma semelhante os valores obtidos para os testes de alongamento do material (Gráfico 2). Nesse caso, nota-se que existe um padrão de decaimento do alongamento conforme a quantidade de cobre aumenta.

Gráfico 2 - Alongamento dos corpos de prova para cada % de cobre

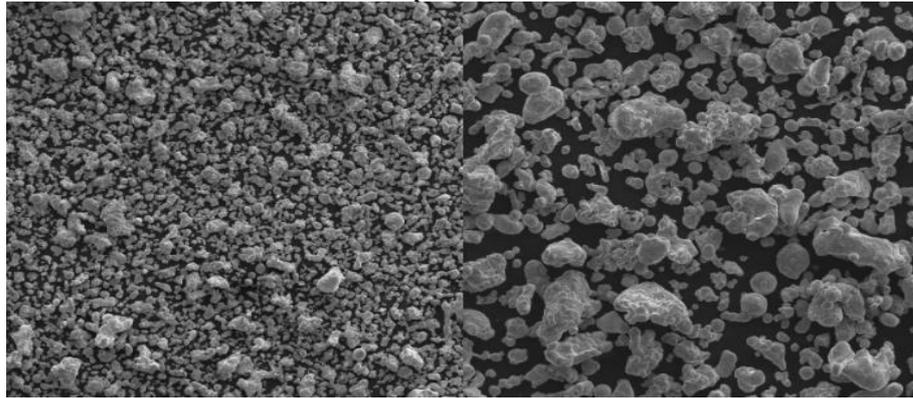


Sendo assim, pode-se dizer que a adição de micropartículas na matriz polimérica não impactou de forma significativa a resistência mecânica do material, no entanto, o mesmo não pode ser dito para o alongamento. O decaimento percebido no gráfico acima indica que o material se torna mais suscetível ao rompimento nos pontos em que existe uma partícula, assim, quanto maior a massa de cobre adicionada, menor o alongamento, uma vez que a partícula pode ser um precursor da fratura do material.

O aumento no alongamento das amostras contendo 0,5% de cobre, pode ser justificado pela presença do agente compatibilizante Fusabond. Desta forma quando se aumenta a massa de carga na proporção da matriz observa-se uma diminuição do alongamento uma vez que as partículas de cobre funcionam como defeitos na matriz polimérica e não como reforço mecânico. De qualquer forma nas 3 variações de massa estudadas não se observa diminuição significativa em relação ao desempenho mecânico e ao seu alongamento.

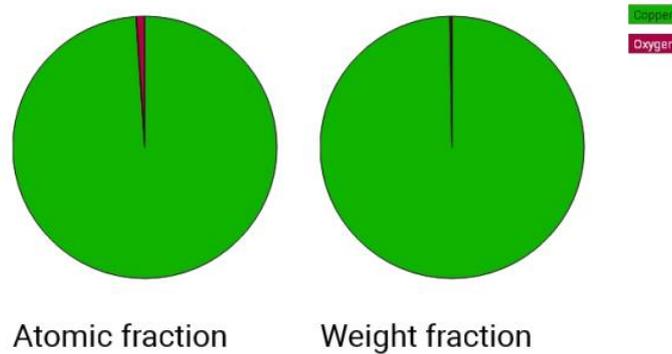
A Figura 8 mostra as imagens de MEV das micropartículas de cobre utilizadas no estudo, com 300 e 1000 vezes de magnificação, nela é possível perceber que mesmo as micropartículas de cobre pura, existem partículas aglomeradas.

Figura 8 - Imagens de elétrons secundários da micropartícula de cobre com 300 e 1000 vezes de aumento



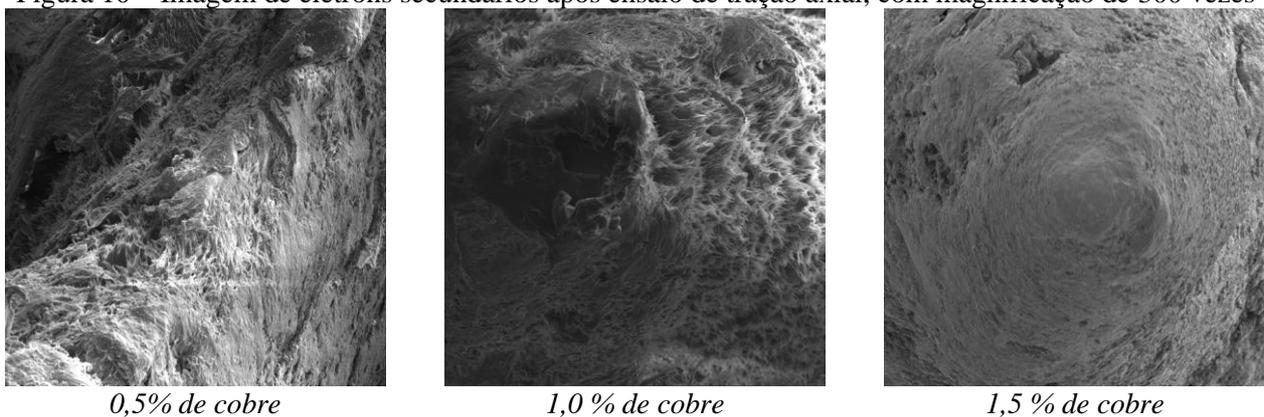
A análise de EDS realizada para as micropartículas de cobre comprovou a pureza do material, como pode ser visto nos gráficos da Figura 9.

Figura 9 - análise de EDS das micropartículas de cobre



A Figura 10 mostra as imagens de elétrons secundários da ruptura dos corpos de prova com 0,5%, 1,0% e 1,5% de cobre, respectivamente, também feitas utilizando o MEV, com 300 vezes de aumento. Analisando essas imagens, é possível identificar o comportamento dúctil do polímero, uma vez que é perceptível os locais onde o material se deformou e esticou antes de romper.

Figura 10 – Imagem de elétrons secundários após ensaio de tração axial, com magnificação de 300 vezes



Para cada uma dessas amostras foram realizadas análises da composição química do material, por EDS. A Tabela 2 mostra os resultados de análises feitas para o compósito com 0,5% , 1,0% e 1,5% de cobre.

**Tabela 2 - Resultado das análises de EDS para amostra com 0,5%, 1,0% e 1,5% de cobre**

Elemento	% mássica 0,5% de cobre	% mássica 1,0% de cobre	% mássica 1,5% de cobre
Carbono	72,84	84,22	69,41
Cobre	0,44	2,41	9,20
Oxigênio	26,72	13,37	21,39

Em todos os três casos, percebe-se pontos de aglomeração de cobre na matriz do polímero, uma vez que as porcentagens encontradas em pontos diferentes da amostra apresentam valores bem distintos, por exemplo, para 0,5% de cobre, foi medido 0,91% de metal em um ponto e apenas 0,44% em outro.

## Conclusões

Tendo em vista os resultados apresentados, conclui-se que a metodologia utilizada para a incorporação de micropartículas metálicas em polímeros foi eficiente, já que os resultados do comportamento de micropósitos poliméricos não sofreram alteração significativa na resistência mecânica e no alongamento.

Também foi possível concluir por meio das análises realizadas no microscópio eletrônico de varredura que o cobre não se dispersou homogeneamente pelo polímero, formando regiões com grandes aglomerados de partículas, isso pode ter acontecido em parte por conta do material de partida utilizado, no qual as micropartículas de cobre puras já se encontravam aglomeradas.

Assim, constata-se a viabilidade da aplicação de micropartículas de cobre em matriz polimérica de polipropileno para aplicações médicas e têxteis, por exemplo, como um substituinte da prata, reduzindo o valor de produção desses compósitos ao mesmo tempo que incentiva a reciclagem de metais presentes em resíduos de equipamentos eletroeletrônico, ao aumentar o valor agregado à esses materiais.

## Agradecimentos

Ao IMT, Laboratório de Metalografia, Grupo de Pesquisa Engenharia e Ciências dos Materiais, Processo Fapesp 2020/09163-3.

## Referências Bibliográficas

- SILVA, F. R. Recuperação de Metais em Placas de Circuitos Impressos pelo Método de Carbonização. UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS CAMPUS DE PALMAS, p. 46, 2021.
- BENEDITO, A. DE S.; SILVA, F. F.; SANTOS, Í. V. DE S. NANOPARTÍCULAS DE PRATA: APLICAÇÕES E IMPACTO AMBIENTAL. Faculdades Oswaldo Cruz, p. 12, 4 2018.
- Domènech, Berta & Muñoz, M. & Muraviev, Dmitri & Macanás, Jorge. (2013). Polymer-Silver Nanocomposites as Antibacterial materials.
- JEONG, S. H.; YEO, S. Y.; YI, S. C. The effect of filler particle size on the antibacterial properties of compounded polymer/silver fibers. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE, p. 5, 2004.
- PETRY, A. MERCADO BRASILEIRO DE POLIPROPILENO COM ÊNFASE NO SETOR AUTOMOBILÍSTICO. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, p. 35, jul. 2011.
- SILVESTRE, C. et al. Preparation and characterization of isotactic polypropylene/zinc oxide microcomposites with antibacterial activity. Polymer Journal, p. 8, 2013.
- DE OLIVEIRA, C. R. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O TRATAMENTO E RECICLAGEM DO LIXO DE INFORMÁTICA. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, p. 65, 2010.
- DEPNER, R. F. R. et al. O COBRE COMO SUPERFÍCIE DE CONTATO ANTIMICROBIANA E

- SUA POTENCIAL APLICAÇÃO NA MEDICINA VETERINÁRIA. p. 12, 12 fev. 2015.
- DE MORAES, V. T. RECUPERAÇÃO DE METAIS A PARTIR DO PROCESSAMENTO MECÂNICO E HIDROMETALÚRGICO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSOS DE CELULARES OBSOLETOS. p. 135, 2011.
- GUIMARÃES, Y. F. RECUPERAÇÃO DO COBRE CONTIDO EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO. p. 52, mar. 2014.
- VEIT, H. M. RECICLAGEM DE COBRE DE SUCATAS DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO. p. 115, jan. 2005.
- SIGRIST, C. S. L. et al. DESENVOLVIMENTO DE PONTO DE COLETA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, p. 16, 2015.
- FORTI, V. et al. The Global E-waste Monitor 2020. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM\\_2020\\_def\\_july1\\_low.pdf](https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf)>.
- SANT'ANNA, L. T.; MACHADO, R. T. M.; DE BRITO, M. J. OS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL E NO EXTERIOR: DIFERENÇAS LEGAIS E A PREMÊNIA DE UMA NORMATIZAÇÃO MUNDIAL. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 8, n. 1, p. 37–53, 2014.
- DOS SANTOS, C. A. F.; DO NASCIMENTO, L. F. M.; NEUTZLING, D. M. A Gestão dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) e as Consequências para a Sustentabilidade: As Práticas de Descarte dos Usuários Organizacionais. Revista Capital Científico, v. 12, n. 1, 15 jan. 2014.
- Comportamento da Indústria Elétrica e Eletrônica em 2022. Acesso em: 16 ago. 2023.
- SCHNEIDER, E. L. et al. Reaproveitamento de resíduo de placas de circuito impresso como cargas em compósitos de polipropileno. Revista Matéria, v. 25, n. 3, 3 2020.
- DA SILVA, L. K. R. POLIPROPILENO MODIFICADO COM SEMICONDUTORES A BASE DE PRATA: COMPÓSITOS COM ALTA POTENCIALIDADE CONTRA SARS-CoV-2 E OUTROS PATÓGENOS. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 2023.