

FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS NANO-COMPÓSITOS DE COBRE A PARTIR DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Anthony Ioannis Ikonomidis ¹; Viviane Tavares de Moraes ²

¹ Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professora do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. A produção de equipamentos eletroeletrônicos (EEE) escalou de uma forma absurda a geração dos resíduos de EEEs (REEEs), com isso a necessidade de aproveitamento de materiais através da mineração urbana. Com objetivo de valorizar os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos estuda-se a incorporação de nanopartículas de cobre obtidas pelo processo hidrometalúrgico de reciclagem dos REEEs em matriz polimérica a fim de produzir fibras de polipropileno (PP) para tecidos bactericidas. Nesta fase estuda-se o potencial de incorporação e as principais propriedades mecânicas do PP com nanocobre. A metodologia utilizada foi mistura de carga em homogeneizador termocinético para preparação do masterbath, injeção plástica com a dosagem do masterbath, ensaios térmicos e ensaios mecânicos de tração. Os resultados apresentaram melhora do desempenho mecânico do PP em relação a matriz virgem e a dosagem com microcobre.

Introdução

Atualmente, com o crescimento da internet e popularização dos modelos de linguagem de IA a produção de equipamentos eletroeletrônicos (EEE) escalou de uma forma absurda, e ainda mais a geração dos resíduos de EEEs (REEEs) que são produzidos assim que o equipamento é descartado de forma inadequada ou sem o intuito de ser reaproveitado. Ainda outros fatores que contribuem para a geração desses resíduos vêm de obsolescência programada e a falta de incentivo geral por um método apropriado de descarte e tratamento dos resíduos. De acordo com a The Global E-Waste Monitor 2024 do Sustainable Cycle Programme da UNITAR, a geração global de REEEs em 2022 foram de 61.900 mil toneladas de resíduos, sendo que apenas 13.800 mil toneladas foram registradas para coleta. Também é destacado que as legislações e métodos aplicados atualmente são mirados na extensão da vida efetiva do equipamento, procurando deter a obsolescência. E os protocolos de reciclagem e manuseio dos REEEs são dados pouca atenção. Com métodos caros e complicados para o manejo adequado, há uma falta de incentivo geral quanto à reciclagem desses resíduos em grande escala. Isso apresenta um problema urgente, onde os resíduos contêm quantidades consideráveis materiais nocivos à saúde e ao meio ambiente como chumbo e mercúrio. Se mostrando uma grande ameaça para comunidades perto de centros de reciclagem de REEEs (ABEDIN et al, 2025). Porém, estes materiais são muito valiosos para diversas áreas da indústria para serem utilizados como matéria-prima de produtos de alto valor agregado, ou seja, os REEEs podem ser uma fonte rica de metais valiosos com um método eficiente de reciclagem. Como por exemplo, placas de circuito impresso (PCIs), representando cerca de 30% da massa dos REEEs, têm em sua composição grandes frações de prata, ouro e cobre, sendo em média 0,18%, 0,08% e 27%, respectivamente (PALZA, 2015 e ABREU, 2010). Então a extração desse cobre para reutilização pode valorizar os REEEs e viabilizar o processo de reciclagem, especialmente a nanopartícula de cobre que é muito mais valorizado que o metal na sua forma comum. O valor do cobre é de 23 a 44R\$/kg, enquanto sua versão em nanopartícula chega até 62.000,00R\$/kg (IKONOMIDIS e MORAES, 2024). Por exemplo, é possível substituir a nanoprata nas fibras poliméricas de máscaras cirúrgicas pelo nanocobre, proporcionando a mesma eficiência com matéria-prima mais barata e de fonte sustentável (KARTHIC et al, 2011). Além disso, considerando que a quantidade de cobre presente nos REEEs varia entre 20% e 40% em massa (UNITAR – SCYCLE Programme, 2024), existe o potencial de cerca de 5.000 mil toneladas de

recuperação deste elemento para viabilizar o fluxo de reciclagem desses resíduos, garantindo um retorno financeiro com os produtos que utilizam esse cobre como matéria-prima. Portanto, se os resíduos fossem descartados de forma responsável e reaproveitados por métodos de reciclagem mais prático, seria possível promover uma economia circular, reduzir os danos ao meio ambiente na retirada de materiais tóxicos e reduzir o consumo de recursos naturais para manufatura de produtos de alto valor agregado.

Com isso, este estudo é a continuação de um projeto envolvendo a recuperação da nanopartícula de cobre a partir dos REEEs utilizando processos hidrometalúrgicos (CALDAS et al, 2021; ESPINOSA, TENORIO e MORAES, 2011; MARTINS et al, 2024) e o estudo das aplicações dessa partícula, procurando achar uma forma de efetivar a aplicação dela em larga escala, mais especificamente envolvendo a incorporação de cobre em polipropileno para avaliação do método masterbatch (TUMKUS e MORAES, 2023; IKONOMIDIS e MORAES, 2024). O objetivo deste trabalho é estudar a aplicação do método de masterbatch com nanopartícula de cobre utilizando os dados das propriedades do masterbatch de microcobre, procurando discrepâncias na homogeneização e realizando ensaios mecânicos e térmicos para avaliação do material, onde poucas variações nas propriedades da matriz original mostra uma facilitação da aplicação na indústria sendo possível utilizar os parâmetros do PP puro para a preparação de produtos. Além de testes envolvendo a condutividade do material, onde a deposição de material metálico em matrizes não-condutivas pode fazer que o espécime passe a possuir uma condutividade elétrica significativa (XIE et al, 2024), buscando mais possíveis aplicações práticas para o material. Com os resultados sendo utilizados para registrar intervalos de valores e comportamentos únicos que possam surgir ao aplicar de nanopartícula de cobre em PP para a incorporação da nanopartícula extraída dos REEEs em um futuro trabalho.

Material e Métodos

Os materiais utilizados nesse estudo foram pellets de PP 100% da Braskem RT400NAQ e pó de nanopartícula de cobre puro da Sigma Aldrich.

Todos os espécimes foram condicionados no laboratório a uma temperatura de 20°C por 24 horas e isolados em recipientes inertes quando pesados na balança. Cada medida mássica foi realizada em uma balança analítica com erro de +-0,01g. A incorporação do metal na matriz polimérica foi realizada a partir de fusão e mistura dos dois corpos com o homogeneizador termocinético por intensa agitação a partir de amostras pesadas com o pó da nanopartícula de cobre e outras com pedaços cortados do masterbatch. Há outras formas de incorporar a partícula na matriz, como utilizar a resina da matriz polimérica como um meio reacionário para reação de redução da partícula metálica (PALZA, 2015). O cálculo para as pesagens de pó de nanopartícula/masterbatch e PP são de acordo com um básico balanço de massa, mantendo a massa total da amostra fixo em 20 gramas para simplificação.

A massa total de masterbatch foi obtida a partir de cinco amostras diferentes de PP concentrado que foram moídos em um moinho de facas até granulometria de cerca de 0,1 até 0,8 mm e estas foram quarteadas, um processo de divisão da amostra em sub-amostras que são representativas do material total, efetivamente fazendo que a mistura dos masters tenha a concentração do masterbatch total como mostrado na Tabela 1. Então, o masterbatch total é utilizado para dosagem em matrizes de PP virgem de 0,5% a 1,5% utilizando o mesmo método de homogeneização, fazendo as pesagens de acordo com os cálculos mostrados na Figura 1 utilizando a concentração do masterbatch total. As amostras dosadas são injetadas no modelo de corpo de prova de acordo com a norma de ensaio de tração da ASTM D638 com uma injetora de polímeros, como mostrado na Figura 2, para a caracterização mecânica dos materiais por teste de resistência de tração. Como também são realizados ensaios de espectrofotometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), termogravimetria (TGA) e varredura diferencial de calorimetria (DSC) para especificação térmica das amostras dosadas e masterbatch, procurando avaliar como o processo de homogeneização e injeção possa ter modificado as características dos materiais. Após

os ensaios de tração, as amostras são analisadas em MEV na região de fratura com o objetivo de corroborar as observações com os resultados mecânicos, assim tem-se uma análise do comportamento do material em função da adição do nanocobre.

Primeiramente, para as dosagens, uma quantidade de PP e masterbatch quarteado são pesados juntos para atingir uma certa concentração de acordo com os cálculos na Figura 1. Os espécimes então são levados até o homogeneizador termocinético onde eles serão misturados no produto final. O homogeneizador opera 10 segundos na velocidade mínima de 3200 rpm e 10 segundos na máxima de 3700 – 3900 rpm. Então a massa dosada é cortada e moída em um moinho de facas para injeção plástica. Na injetora de polímeros a amostra é injetada no corpo de prova de tração com uma temperatura de 190°C por 4 segundos, pressionando o molde com 4,0 bar de pressão. Estes parâmetros foram determinados por IKONOMIDIS e MORAES, 2024 ao utilizar os mesmos equipamentos para a homogeneização e injeção do PP com micropartícula de cobre.

Tabela 1 – Pesagens das amostras de masterbatch e concentrações

Master	PP(g)	NPCu (g)	PP + NPCu (g)	%NPCu
1	10,22	2,27	12,49	18,17%
2	10,84	1,67	12,51	13,35%
3	10,52	3,47	13,99	24,80%
4	10,22	2,78	13,00	21,38%
5	10,27	1,99	12,26	16,23%
Total	52,07	12,18	64,25	18,96%

Figura 1 – Planilha com o resultado dos cálculos e exemplo de cálculo das dosagens em PP virgem

Dose	m total	m PP	m Cu	mMast	mPPpuro
0,5%	20	19,9	0,1	0,53	19,47
1,0%	20	19,8	0,2	1,06	18,94
1,5%	20	19,7	0,3	1,58	18,42
2,0%	20	19,6	0,4	2,11	17,89
2,5%	20	19,5	0,5	2,64	17,36

Dosagens:

$$\text{Master} \Rightarrow m_{\text{Mast}} \cdot x_{\text{PP}} + m_{\text{Mast}} \cdot x_{\text{Cu}} = m_{\text{Mast}}$$

* Dose 0,5%, 20g total:

$$m_{\text{PPp}} + m_{\text{Mast}} \cdot x_{\text{PP}} = 20 \cdot (1 - 0,005)$$

$$m_{\text{Mast}} \cdot x_{\text{Cu}} = 20 \cdot 0,005$$

p/ o Master total quartenado:

$$m_{\text{PPp}} + m_{\text{Mast}} \cdot (1 - 0,1896) = 19,9$$

$$m_{\text{Mast}} \cdot 0,1896 = 0,1$$

$$\Rightarrow m_{\text{Mast}} = 0,527 \text{ gramas}; m_{\text{PPp}} = 19,473 \text{ gramas}$$

Figura 2 – Corpo de prova de tração de uma amostra dosada com 1,0% de nanocobre



Isso é repetido para cada contração, de 0,5%NPCu, 1,0%NPCu e 1,5%NPCu. As amostras e masterbatch são levadas para caracterização térmica e mecânica. Os ensaios térmicos consistem em: FTIR procurando verificar se o material se manteve constante durante o processo, DSC e TGA para avaliar mudanças na degradação térmica do material a respeito dos processos de homogeneização e injeção plástica;

Em seguida dos ensaios de tração, as amostras são analisadas em MEV na região do rompimento, onde é possível verificar qual foi o mecanismo de falha para julgar o comportamento geral do material, procurando analisar se os espécimes preservaram a sua ductibilidade.

Por fim, foi realizado um teste de condutividade do material para cada dosagem e para PP puro como grupo controle. O método aplicado foi o método de Van der Pauw que envolve medir a corrente e tensão elétrica separadamente nos cantos do espécime em duas direções. Com as medidas calcula-se as resistências em cada direção e estes valores são aplicados na Equação 1 e substituindo o resultado na Equação 2 tem-se o valor da condutividade. Este método foi escolhido pela sua simplicidade e indiferença a geometria do espécime (XIE et al, 2024), porém há um pequeno erro associado à técnica, onde as vezes é levado em consideração um fator de correção na equação, e/ou o método é levemente modificado para certas situações como descrito por XIE et al, 2024. Além de que as amostras têm que seguir uma grande lista de critérios para o uso efetivo do procedimento, envolvendo: A continuidade da superfície, uniformidade da espessura, a distância entre sondas etc.; No entanto, as amostras que foram injetadas no formato dos corpos de prova ensaio de tração seguem estes requerimentos, e como o método não é destrutivo é possível utilizar uma amostra e depois levá-la ao ensaio de tração sem modificações. Portanto, foram separados um de cada dosagem para os testes de condutividade utilizando o método de Van der Pauw sem erros significativos.

Equação 1 e 2 – Fórmulas para os cálculos da resistividade e condutividade do material

$$\rho_v = \frac{\pi t}{\ln 2} \frac{(R_{AB,CD} + R_{BC,DA})}{2} F \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

Onde:

ρ_v é a resistividade do material [$\Omega \cdot m$]

t é a espessura do espécime [m]

F é o fator de erro

$R_{AB,CD}$ é a resistência medida com os multímetros nos cantos AB e CD [Ω]

$R_{BC,DA}$ é a resistência medida com os multímetros nos cantos BC e DA [Ω]

σ é a condutividade do material [S/m]

Resultados e Discussão

De acordo com IKONOMIDIS e MORAES, 2024, as amostras de PP dosadas com microcobre podem degradar no homogeneizador termocinético devido processo de cisalhamento excessivo na câmara de mistura e resultar em perda total da amostra, para evitar esta degradação controla-se o tempo de mistura na câmara, no caso do PP com microcobre após testes em função do tempo, pode-se definir tempo de homogeneização de 15 segundo. Assim quando foi preparado o PP com nanocobre partiu-se dos mesmos parâmetros de tempo que o utilizado no microcobre.

Ao utilizar os parâmetros definidos anteriormente, todas as amostras dosadas formaram massa homogênea sem sinais de degradação aparente do material. Então as amostras foram levadas para caracterização mecânica, com ensaios de tração, e térmica com ensaios de FTIR, DSC e TGA. As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados dos ensaios de PP com nanocobre e PP com microcobre, estes últimos obtidos por IKONOMIDIS e MORAES, 2024 para comparação entre a adição de microcobre e a adição de nanocobre a matriz polimérica.

Na questão da dispersão do cobre pela matriz, todas as amostras, assim como o masterbatch,

mostram uma coloração fortemente escura e marrom, independente da concentração do material. Diferente das adições com microcobre que apresentavam uma coloração de cobre metálico mais forte conforme a concentração aumentava. Uma possível causa disso pode ser pelo fato de que a nanopartícula é muito menor que a micropartícula, ou seja, para que ela atinja a mesma massa que o microcobre numa dada dosagem, haverá mais partículas de material presentes. Além de que a nanopartícula se infiltra entre as cadeias poliméricas melhor que a micropartícula, possivelmente preenchendo os vazios intermoleculares das cadeias poliméricas, caracterizando a tonalidade escura independente da concentração.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios térmicos e mecânico para a micropartícula de cobre

Ensaio	Característica	PP Puro	0,5%MP	1,0%MP	1,5%MP	30%MP
DSC	Temperatura de cristalização (°C)	123,65	127,01	127,32	127,58	131,86
		77,69	73,77	76,58	77,98	78,81
	Temperatura de fusão (°C)	131,54	155,89	154,55	152,57	121,75
TGA	Temperatura de degradação (°C)	440	450	450	480	429
Ensaio de tração	Resistência à tração (MPa)	31,77 +/- 0,88	29,96 +/- 0,5	32,07 +/- 0,45	29,33 +/- 0,94	não há dados
	Módulo de elasticidade (MPa)	451,67 +/- 14,40	224,37 +/- 4,08	233,86 +/- 7,57	216,72 +/- 8,29	
	Alongamento até fratura (%)	314,98 +/- 26,56	285,83 +/- 11,02	218,38 +/- 32,12	250,73 +/- 17,68	

Fonte: Ikonomidis e Moraes, 2024

Tabela 3 - Resultados dos ensaios térmicos e mecânico para a nanopartícula de cobre

Ensaio	Característica	PP puro	0,5%NP	1,0%NP	1,5%NP	18,96%NP
DSC	Temperatura de cristalização (°C)	123,65	123,16	123,05	122,75	130,51
		77,69	68,78	63,22	67,88	54,45
	Temperatura de fusão (°C)	131,54	150,95	149,53	150,86	107,68
TGA	Temperatura de degradação (°C)	440	431	452	462	436
Ensaio de tração	Resistência à tração (MPa)	31,77 +/- 0,88	28,20 +/- 1,44	27,18 +/- 0,20	27,24 +/- 0,47	não foi produzido corpo de prova com esta concentração
	Módulo de elasticidade (MPa)	451,67 +/- 14,40	968,0 +/- 83,31	924,07 +/- 50,82	904,35 +/- 49,05	
	Alongamento até fratura (%)	314,98 +/- 26,56	276,88 +/- 202,3	279,05 +/- 25,29	360,91 +/- 32,63	

O masterbatch não apresenta ensaio de tração pois seu propósito é ser apenas um veículo para fabricação dos materiais em menores concentrações, então não é preciso realizar uma caracterização mecânica.

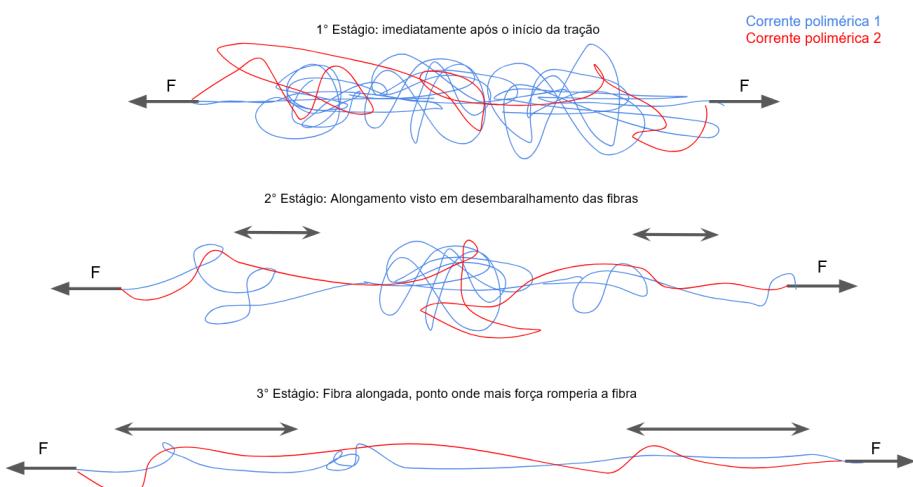
É notável que o nanocobre possuí um módulo de elasticidade e alongamento muito superiores em comparação com o microcobre, onde a adição do microcobre tem uma leve tendência

a diminuir o alongamento, enquanto ele aumenta em função do aumento da concentração de nanocobre. Portanto a adição de nanocobre causa um aumento na ductibilidade e da tenacidade do material, enquanto a adição de microcobre causa o material a ter uma tendência frágil, pois o tamanho de sua partícula funciona como um macrodefeito. Espera-se que a adição da carga metálica na matriz dúctil faça que o material aproxime ao comportamento de um material frágil (ABREU, FORTE e LIBERMAN, 2010), o que é o caso para a adição de microcobre mas não para o nanocobre. Este comportamento pode estar associado ao mecanismo de como um polímero é alongado: No início as cadeias poliméricas estão descontraídas e desorganizadas, misturadas entre si. Ao tracionar o material, as cadeias deslizam entre si, enroscando umas nas outras e formando nós e ganchos. O plástico então vai se alongando até que eventualmente as cadeias se prendem completamente, onde de pouco em pouco as cadeias são rompidas na medida que a força estica o plástico até que ele é rasgado por inteiro, exemplificado pelo esquema na Figura 3 (JIA et al, 2020). A micropartícula de cobre, quando incorporada ao PP, fica presa e intercalada entre as cadeias poliméricas. Então quando o PP com MPCu é alongado, as cadeias se prendem na partícula do cobre, impedindo que elas se estendam, onde então as cadeias são rompidas mais cedo, fazendo que o material apresente um menor alongamento. No entanto, a nanopartícula de cobre é muito menor que a micropartícula, e então ela não atrapalha esse mecanismo de alongamento do polímero, em realidade a partícula reforça as correntes por forças intermoleculares, evidenciado pelo módulo de elasticidade que está associado à força das ligações internas do material.

Quanto aos ensaios térmicos é possível visualizar que há um aumento da temperatura de degradação do PP quando dosado com micro ou nanocobre.

As caracterizações térmicas foram realizadas procurando quaisquer discrepâncias em comparação com a matriz original que surjam em função da adição da partícula metálica e efeitos dos processamentos. Procurando determinar se seria possível aplicar os processamentos comuns do PP puro no material produzido sem que haja necessidade de modificar os parâmetros, assim facilitando a aplicação prática na indústria para fabricação de materiais compósitos. Pelos resultados apresentados na Tabela 3 e em comparação com os valores do microcobre na Tabela 2, conclui-se que, assim como no microcobre, a adição de nanocobre apresenta uma tendência a aumentar as temperaturas de fusão, cristalização e degradação, indicando uma maior força do material em relação as suas ligações internas. Porém as mudanças dentro do intervalo de concentração das dosagens não são significativas em aplicações práticas, então é possível dizer que as características térmicas sem mantêm relativamente iguais às do PP puro.

Figura 3 – Exemplo simplificado do mecanismo molecular do alongamento de um plástico, mostrando a interação entre duas cadeias poliméricas



A fim de ter uma melhor ideia do comportamento do material, os corpos de prova de tração foram observados em MEV após a tração na zona de fratura, procurando analisar a morfologia do rompimento, visto nas Figuras 4 e 5, as imagens do PP puro foram obtidas por IKONOMIDIS e

MORAES, 2024. Com os resultados de tração em mente, é esperado que as imagens mostrem uma falha característica de material dúctil, e que, pela dispersão mais uniforme, seja possível observar os aglomerados de nanocobre entre as cadeias poliméricas ao ampliar a imagem.

Figura 4 - Imagens das amostras dosadas com nanocobre após ensaio de tração na região de fratura, por MEV

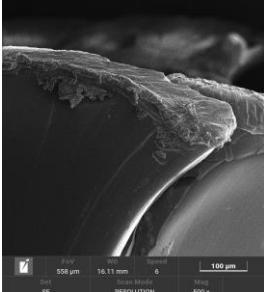
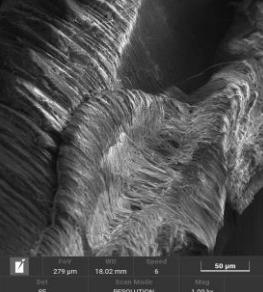
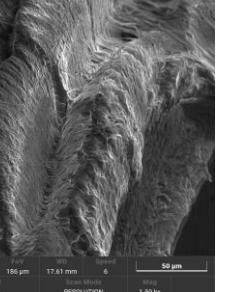
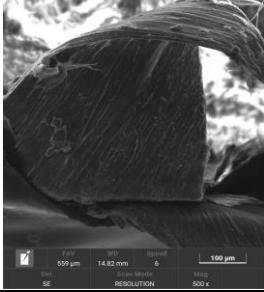
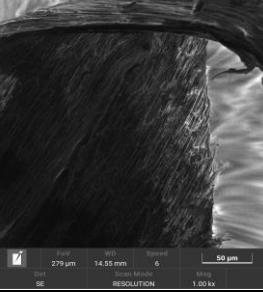
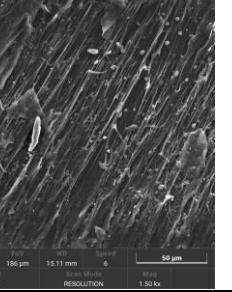
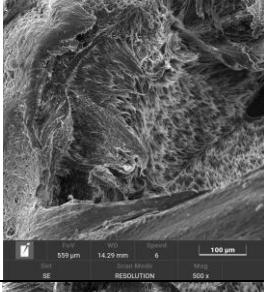
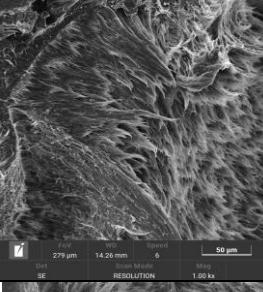
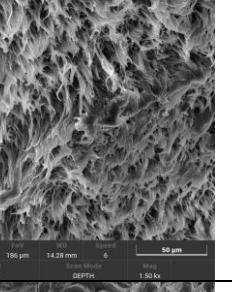
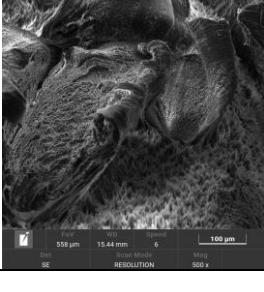
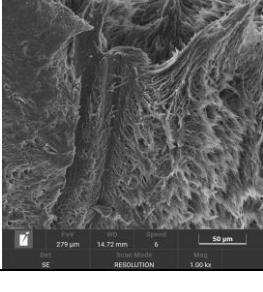
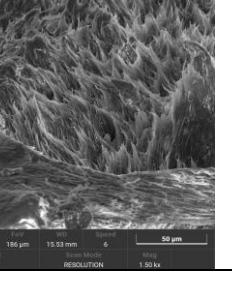
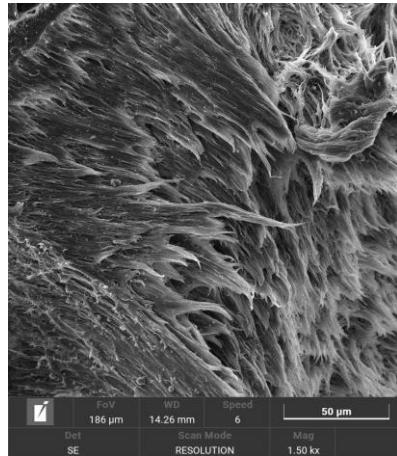
Amostra	500x	1000x	1500x
PP puro (Fonte: Ikonomidis e Moraes,			
0,5% Nanocobre			
1,0% Nanocobre			
1,5% Nanocobre			

Figura 5 – Ampliação 1500x de uma amostra de PP 1,0%NPCu em MEV



Ao comparar com a análise do PP puro, é possível ver que as dosagens mantiveram a característica dúctil, dado as evidências de deformação e alongamento até a ruptura por tração. Apesar de não haver evidências, é muito provável que os conglomerados entre cadeias nas maiores ampliações sejam as nanopartículas de cobre incorporadas no material, visto a grande presença e como estão aderidos às cadeias. Enfim, as ondulações presentes no material são evidências de estiramento antes da ruptura do material, uma característica de material dúctil. Ou seja, ao corroborar com os resultados de tração, é possível concluir que o material mantém a sua ductibilidade durante todo o processamento, e suas características térmicas não variam fortemente no intervalo de dosagem. Evidenciando a possibilidade de aplicar os procedimentos de PP puro da indústria no material dosado com nanopartícula de cobre. Ademais, a homogeneização com a nanopartícula de cobre se mostra mais efetiva comparada a micropartícula, apresentando um futuro promissor para a futura aplicação da nanopartícula recuperada dos REEEs.

Diante os resultados dos testes de condutividade, é esperado que a deposição de material condutivo em uma fibra não-condutiva faça que o material como um todo passe a ser condutivo (ZEYUE XIE et al, 2024). Com os resultados apresentados na Tabela 4, isso se manteve verdade. Porém o incremento de condutividade com a adição do nanocobre não é grande suficiente para ter um efeito considerável na prática. As tensões de 5V até 30V não mostraram a geração de uma corrente elétrica ao pôr o material num circuito elétrico com uma fonte e um amperímetro em série. Apesar da melhor dispersão da nanopartícula, é possível que as dosagens sejam muito pequenas para gerar o movimento eletrônico necessário para conduzir eletricidade. Uma possibilidade é que as nanopartículas estejam muito infiltradas na matriz para trocarem elétrons na matriz. Talvez haja uma tensão de quebra – uma tensão elétrica na qual faça que o material conduza energia elétrica – porém, nos intervalos das dosagens, esta tensão deve ser grande demais para uma aplicação prática. Ainda que os valores não são muito conclusivos e é possível que ocorreu uma falha no método. Isso porque XIE ZEYUE et al, 2024 registrou que a resistividade volumétrica comum do PP puro se encontra no intervalo entre 10^4 – 10^7 $\Omega \cdot \text{cm}$ dependendo do método de síntese do fornecedor e forma do material, o que corresponde a cerca de 10^{-6} – 10^{-9} S/m. Este valor é diferente do encontrado na literatura, pois o arranjo de grupos funcionais nos tipos de cadeia polimérica (isotáctico, sindiotáctico, atáctico), assim como aditivos e plastificantes podem influenciar nesse valor com o resultado obtido para PP puro utilizado nesta pesquisa, neste caso utilizou-se como base de comparação o valor de PP puro utilizado no estudo como valor de referência.

Tabela 4 – Valores dos testes de condutividade pelo método de Van der Pauw

Amostra	σ (S/m)
PP puro	0,025
1,0% NPCu	0,033
1,5% NPCu	0,046

(os valores se mantiveram iguais nos dois lados das amostras)

Observa-se que ao adicionar nanocobre na matriz polimérica há um acréscimo de mais de 30% no valor da condutividade do nanocompósito resultante, indicando potencial melhora no desempenho de condutividade elétrica, permitindo futuros estudos sobre eletrodeposição metálica em nanocompósitos.

Conclusões

Com tudo em mente, é possível concluir que:

O mecanismo de incorporação da nanopartícula de cobre em PP puro se mantém igual quando realizado por fusão cinética, independente do tamanho da partícula, ainda que a dispersão do cobre na matriz se mostrou mais efetiva. Demonstrando que ainda é possível usar essa metodologia de fabricação do material quando for aplicada a nanopartícula extraída de REEEs. Ademais é possível aplicar o método de masterbatch para dosagem em matrizes virgens de PP sem degradações aparentes dos materiais para a fabricação de produtos.

O material dosado pode ser utilizado para a fabricação de fibras de PP para a indústria têxtil como uma alternativa sustentável para tecidos bactericidas ainda utilizando os mesmos parâmetros para PP puro para fácil aplicação. A respeito de outras utilidades do material dosado, talvez seja possível que ele possua uma condutividade elétrica, o que abre a possibilidade de tecidos eletricamente condutivos, porém seria necessária uma melhor análise para uma aplicação prática dessa funcionalidade.

Como o objetivo é explorar o comportamento do material para uma especulação e expectativa de parâmetros para a aplicação da nanopartícula de cobre recuperada de REEEs, qualquer uso do material dosado pode ser considerado de uma alternativa sustentável economicamente viável dado a valorização da nanopartícula de cobre e sua abundância nos REEEs, estimulando uma economia circular.

O uso da nanopartícula de cobre terceirizada apresentou-se altamente promissora para a futura aplicação do nanocobre extraído de REEEs, mostrando estabilidade e consistência nos resultados acompanhado da aplicação da micropartícula de cobre. Ao efetivar a incorporação da nanopartícula reciclada, será aberto uma grande oportunidade para a viabilização econômica do processo de reciclagem dos REEEs no Brasil e promovendo a economia circular. Ademais, este trabalho procura inspirar futuros trabalhos que procurem métodos de recuperação de materiais em produtos descartados e efetivação de aplicações industriais para tais, estimulando ainda mais uma economia circular e sustentável.

Agradecimentos

Processo Fapesp EMU 20/09163-3,
Processo Fapesp RTI 2019/25707-6

Referências Bibliográficas

ABREU, F.O.M., FORTE, M.M.C., LIBERMAN, S. A. Propriedades Mecânicas e Morfologia de Blendas de Polipropileno com TPEs. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 16, nº 1, p. 71-78, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D638 - 10: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 5 ed. West Conshohocken, 2010. 8 p.

CALDAS, Marcos Paulo Kohler; MARTINS, T. A. G.; MORAES, Viviane Tavares de; TENORIO, J. A. S.; ESPINOSA, Denise Crocce Romano. Synthesis of Ag nanoparticles from waste printed circuit board. *Journal of environmental chemical engineering*, v. 9, p. 1-12, 2021.

ESPINOSA, Denise C.R.; TENORIO, J. A. S.; MORAES, V. T.. Processo de reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. 2011, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: PI11051841, título: "Processo de reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 21/12/2011.

IKONOMIDIS, Anthony; MORAES, V. T.. Estudo da Preparação do Masterbatch de Cobre e Polipropileno Produzido a Partir de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos. 2024. 10 f.

JIA, Y.; WANG, H.; LIU, B.; HUANG, Y.; GAO, H.. Intrinsic-to-extrinsic Transition in Fracture Toughness Through Structural Design: A Lesson from Nature. 2020. 7 f.

KORF, Nathalie; LOVIK, Amund N.; FIGI, Renato; SCHREINER, Claudia; KUNTZ, Claudia; MÄHLITZ, Paul Martin; RÖSSLEIN, Matthias; WÄGER, Patrick; ROTTER, Vera Susanne. Multi-element chemical analysis of printed circuit boards – challenges and pitfalls. 2019. 13 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Chair Of Circular Economy And Recycling Technology, Technische Universität Berlin, Berlin, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19302922#bi005>. Acesso em: 16 nov. 2024

MD. JAINAL ABEDIN, SUPAT WANWONGWATANA, MD. NURUL HUDA BHUIYAN, MOHAMMAD MONIRUZZAMAN, QUANYIN TAN, LI LIANG, Health risk assessments of worker exposure to heavy metals in informal e-waste recycling communities in Chattogram City, Bangladesh, *Chinese Journal of Analytical Chemistry* (2025), doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjac.2025.100654>

PALZA, Humberto. Antimicrobial polymers with metal nanoparticles. 2015. 16 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/16/1/2099>. Acesso em: 16 nov. 2024.

THE GLOBAL E-WASTE MONITOR 2024. Geneva/Bonn: International Telecommunication Union (Itu) And United Nations Institute For Training And Research (Unitar), 18 mar. 2024. Anual. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>. Acesso em: nov. 2025.

TUMKUS, G. H.; MORAES, V. T.. Estudo da Incorporação de Micropartículas de Cobre Sintetizadas a Partir de Resíduos Eletroeletrônicos em Matriz de Polipropileno. 2023. 10 f

XIE, Z.; VENTURA, H.; ARDANUY, M. A Review of the Electrical Conductivity Test Methods for Conductive Fabrics. *Textiles* 2024, 4, 284–308. <https://doi.org/10.3390/textiles4030017>. Acesso em: nov. 2025