

# ESTUDO DA PREPARAÇÃO DO MASTERBATCH DE COBRE E POLIPROPILENO PRODUZIDO A PARTIR DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Anthony Ioannis Ikonomidis <sup>1</sup>; Viviane Tavares de Moraes <sup>2</sup>

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

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

**Resumo.** *Durante a última década, a produção de equipamentos eletroeletrônicos (EEEs) teve um aumento absurdo com a demanda de eletrodomésticos e ascensão da Internet. Por consequência, a geração dos resíduos de EEEs (REEEs) teve um crescimento ainda maior. O Brasil se destaca como um dos maiores geradores de REEEs do mundo. Com isso, foram criados regulamentos e métodos para manuseio de REEEs de forma responsável. Porém, por uma falta de incentivo e pelos métodos desenvolvidos serem muito complexos e caros, isso não surtiu muito efeito nos números finais. Portanto, esse estudo envolve a caracterização mecânica e térmica de compósitos feitos com partículas de cobre, para specular o comportamento desses materiais compósitos ao aplicar a nanopartícula recuperada. Assim, foi preparado um masterbatch compósito de PP (polipropileno) com progressivo aumento das concentrações de cobre, utilizando um homogeneizador termocinético até a concentração máxima de cobre no PP, em seguida foi caracterizado com testes de FTIR, TGA, DSC, ensaios mecânicos e análise em MEV, observando as mudanças de comportamento em comparação com PP puro. Com o masterbatch de maior concentração de cobre incorporada, foi realizada a sua dosagem em novas matrizes de polipropileno (PP) utilizando o mesmo equipamento e caracterizadas igualmente, as dosagens foram de 0,5% até 1,5%. Os resultados mostram que o masterbatch pode chegar até 30% de cobre em PP mantendo a homogeneização sem aparentes degradações. Esse masterbatch pode ser usado para fabricação de até 1,5 vezes a massa de materiais de PP com 1% de cobre. Se mostrando promissor para a eventual aplicação da nanopartícula e, se mantida igual, viável para aplicação industrial, muito provavelmente ajudando a trazer a reciclagem dos REEEs em alta no Brasil, promovendo a fabricação sustentável de produtos caros utilizando como matéria-prima o REEE, estimulando a economia circular.*

## Introdução

Equipamentos eletroeletrônicos (EEEs) é a classificação de produtos que possuem qualquer propriedade eletrônica em seu funcionamento. E tais produtos se tornam resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEEs) quando são descartados de forma inapropriada ou sem o intuito de serem reciclados. Nos últimos anos, houve um crescimento da geração de REEEs, o que pode ser entendido pelo aumento na demanda de EEEs vindo de fatores como avanço tecnológico; obsolescência programada e a falta de incentivo dos Estados por uma forma adequada de descarte e tratamento de tais resíduos. Medidas mostram que a produção de REEEs no mundo em 2022 foram de 61,9 bilhões de kg com 7,8 kg per capita e apenas 13,8 bilhões de kg foram formalmente coletadas e recicladas (taxa de coleção = 22,3%). Com a América do Sul registrando 4,41 bilhões de kg e o Brasil sendo seu principal contribuinte, segundo a revista The Global E-Waste Monitor 2024 do Sustainable Cycle Programme da UNITAR (UNITAR – SCYCLE Programme, 2024). A mesma também cita que regulamentos aplicados a EEEs visam prolongação da vida útil dos equipamentos e possui muito pouco foco em cuidar dos REEEs, praticando métodos de reciclagem muito complexos, contribuindo para a falta de motivação para a reciclagem dos REEEs.

Enfim, o mal manuseio desses resíduos é um problema de extrema urgência, pois os REEEs têm a presença de materiais altamente tóxicos e nocivos ao meio ambiente como chumbo, mercúrio, arsênio e outros metais. Todavia, se o descarte for realizado de forma eficiente, os REEEs podem ser uma ótima fonte de materiais úteis para a fabricação de produtos valiosos e importantes em diversas áreas da indústria, conhecido atualmente como a mineração urbana.

Como há uma grande quantidade de prata, ouro e especialmente cobre em placas de circuito impresso (PCIs) (Korf et al, 2019), representando até 30% da massa dos REEEs (UNITAR – SCYCLE Programme, 2024) o termo mineração urbana aparece de forma a sinalizar que os REEEs são uma fonte secundária de metais, uma vez que o minério desses metais podem ter concentrações de 0,7% a 1,5% de cobre; 0,0001% de prata e ouro e que a sua concentração pode ser maior nos REEEs, como por exemplo nas placas de circuito impresso que concentram cerca de 0,18% de prata; 0,08% de ouro e 27% de cobre (PALZA, 2015 e ABREU, 2010).

Utilizando os métodos de reciclagem previamente desenvolvidos (CALDAS *et al*, 2021; ESPINOSA, TENORIO e MORAES, 2011; MARTINS *et al*, 2024), a partir de processos hidrometalúrgicos é possível extrair os metais presentes em forma de nanopartícula para utilização em um novo produto, assim aumentando o valor agregado do REEE e levando a um significativo retorno financeiro. Como por exemplo, é possível incorporar o cobre reciclado na produção das fibras poliméricas antibacterianas da máscara cirúrgica, substituindo a prata, barateando o produto no processo (KARTHIC *et al*, 2011). Portanto, ao descartar os REEEs de forma adequada e praticar métodos eficientes de reciclagem, surgiria uma opção sustentável e barata de produção de diversos produtos de alto valor e melhoria nas condições de ambientais e de saúde de comunidades que situam próximos de regiões de descarte de REEEs.

A fabricação de nanopartículas metálicas a partir de REEEs poderão ser utilizadas em matrizes poliméricas para garantir características bactericidas em tecido sintéticos, como o polipropileno por exemplo, assim viabilizar economicamente o escalonamento do processo de reciclagem.

Como etapa inicial de escalonamento da preparação de compósitos de polipropileno com nanopartículas de cobre é essencial a preparação de masterbatch concentrado com partículas de cobre sintéticas, a fim de avaliar o efeito e/ou comportamento do cobre na matriz polimérica, antes dos testes com as nanopartículas obtidas pelo processo real de reciclagem.

O masterbatch pode ser definido como um material concentrado que é utilizado como veículo para dosagem de matrizes poliméricas virgens, um exemplo de uso desse método de produção é a fabricação de plásticos coloridos onde se tem vários masterbatches de cores principais e são fracionados em diferentes quantidades para chegar em uma cor específica.

Este estudo não difere muito com o estudo do desenvolvimento de um masterbatch concentrado de partículas de cobre incorporado em matriz de polipropileno para a produção de materiais compósitos em concentrações menores. Observando o comportamento do material e as discrepâncias que surgem com a incorporação do cobre em comparação com a matriz pura, a fim de especular os valores para a aplicação da nanopartícula recuperada de REEEs no futuro e analisar sua viabilidade.

Ademais, o cobre é um metal muito importante para múltiplas áreas da indústria como um ótimo condutor de eletricidade e altamente flexível, ainda mais como é um metal relativamente barato. Por isso, métodos de aquisição e reciclagem de cobre são importantes tópicos para estudo e avanço na economia circular. Ainda mais que o cobre compartilha de propriedades similares com a de outros metais preciosos e mais caros, como a prata e o ouro. (Ao pesquisar: Cobre: 23,00 – 44,00 R\$/kg; Prata: 3.200,00 - 5.500,00 R\$/kg; Ouro: 45.000,00 – 80.500,00 R\$/kg) (MEDIA, 2024). Com isso, o trabalho vai ter um foco em incorporação da nanopartícula de cobre em polipropileno para produção de tais materiais, como por exemplo as fibras do tecido antibacteriano de máscaras cirúrgicas que envolve um compósito polimérico de PP e nanopartícula de prata. O cobre possui ação bactericida quase idêntica a prata de acordo com PALZA, 2015, possibilitando uma substituição efetiva e econômica.

Portanto, o projeto visa explorar um método da produção de materiais compósitos de partículas metálicas produzidas pela reciclagem de REEEs em matriz polimérica a fim de incentivar a reciclagem e baratear a produção de alguns materiais. Pelo processo de recuperação já desenvolvido, é possível sintetizar partículas metálicas até o nível nanométrico para fabricação de produtos de alto valor agregado, por exemplo o valor do cobre é de 23R\$/kg - 44R\$/kg e sua versão em nanopartícula chega até 62.000,00R\$/kg, assim, com a quantidade de cobre presente nos REEEs em comparação com os outros metais mais caros, o processo pode viabilizar o processo de reciclagem inteiro no

Brasil, garantindo um retorno financeiro com o produto final e possivelmente inspirar futuros estudos envolvendo a produção de materiais nanométricos de forma sustentável.

Para adquirir uma incorporação eficiente é importante analisar a capacidade que a matriz polimérica tem de incorporar a partícula metálica, nesse caso será do cobre em PP. Portanto, como é possível aproximar as propriedades de uma partícula independente da ordem de grandeza, foram feitas medidas e testes com a micropartícula de cobre a fim de adquirir um intervalo aproximado do limite e comportamentos esperados ao incorporar a nanopartícula de cobre no futuro.

## **Material e Métodos**

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

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  $\pm 0,01$ g.

A incorporação do metal na matriz polimérica foi realizada a partir de fusão e mistura dos dois corpos com o homogeneizador termocinético por batelada a partir de amostras pesadas com o pó da micropartícula de cobre e outras com pedaços cortados do masterbatch. Na literatura há outros métodos de incorporação como utilizar a resina da matriz polimérica como um meio reacionário para sintetização da partícula inorgânica, de acordo com PALZA, 2015.

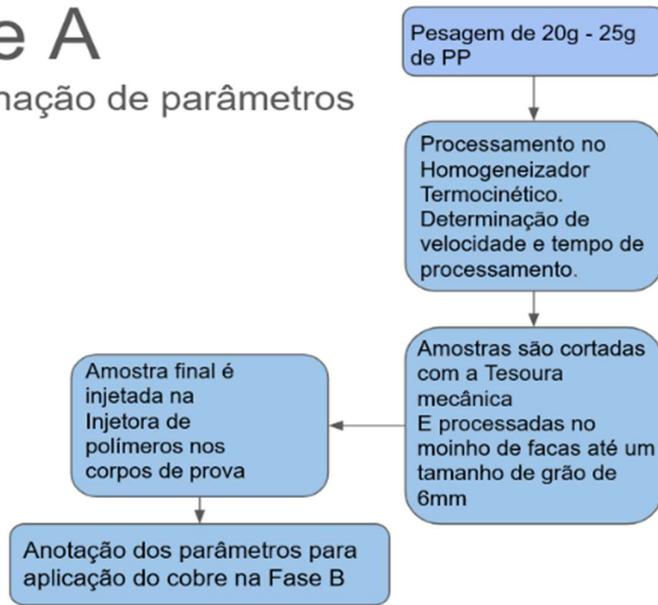
E para a avaliação das amostras dosadas com o masterbatch foram feitos os testes mecânicos de tração seguindo a norma de teste e modelagem do corpo de prova da ASTM D638. Observando as mudanças em comparação com PP puro. Como também ensaios de TGA, DSC e FTIR para caracterização e observações em MEV para análise do processo de homogeneização e morfologia, além de observações na aparência do resultado e na perda de massa pós-processamento.

Os processamentos do estudo foram divididos em três fases A, B e C seguindo o fluxograma mostrado na Figura 1.

Figura 1– Fluxograma dos processos

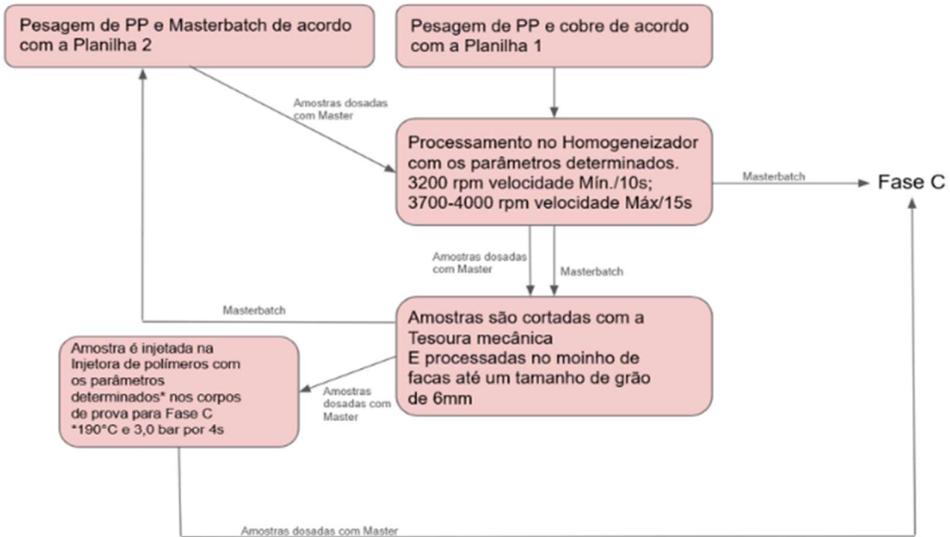
## Fase A

Determinação de parâmetros



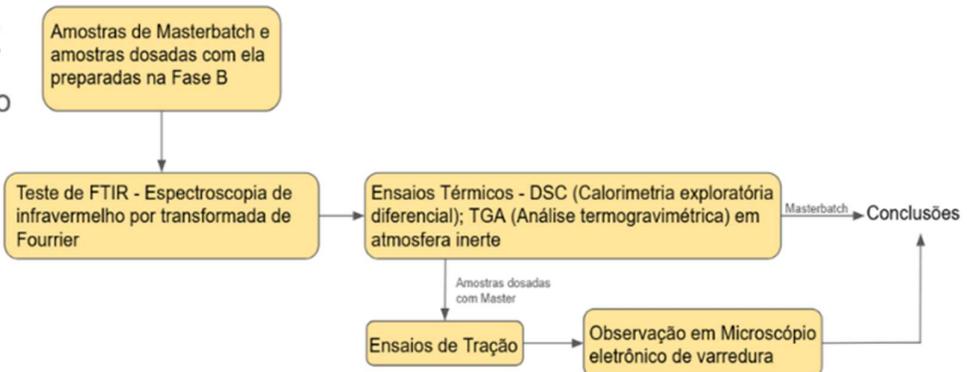
## Fase B

Preparação do Masterbatch e Dosagem



## Fase C

Caracterização



Para a pesagem de cobre e polipropileno foi feito cálculos básicos de balanço de massa como visto na Tabela 1. E para dosagem foi necessário resolver um sistema de equações onde uma equação determinava que a massa de PP virgem mais a fração de PP no masterbatch tem que ser igual a massa

de PP total necessária para atingir a dosagem desejada, e a outra que a fração de cobre no masterbatch tem que ser igual a massa de cobre necessária para a concentração desejada. Assim adquirindo os valores na Tabela 2.

Tabela 1 – Pesagens de cobre e PP para fabricação do masterbatch

Master	Massa de Cu(g)	Massa de PP(g)	Massa Total(g)	Fração Cu(%)
1	0.00	20.00	20.00	0.00%
2	1.00	19.00	20.00	5.00%
3	2.00	18.00	20.00	10.00%
4	3.00	17.00	20.00	15.00%
5	4.00	16.00	20.00	20.00%
6	5.00	15.00	20.00	25.00%
7	6.00	14.00	20.00	30.00%
8	7.00	13.00	20.00	35.00%
9	8.00	12.00	20.00	40.00%
10	9.00	11.00	20.00	45.00%
11	10.00	10.00	20.00	50.00%

Tabela 2 – Massas de PP e masterbatch para dosagem em matriz virgem

x	y	mPP puro (g)	m Mater (g)
99,50%	0,50%	19,67	0,33
99,00%	1,00%	19,33	0,67
98,50%	1,50%	19,00	1,00

x = fração de PP  
y = fração de Cobre  
mPPpuro = massa de PP virgem/puro  
mMast = massa fracionada de Masterbatch 30% Cobre

Na fase A foram feitos testes com os equipamentos utilizando PP puro para a determinação de parâmetros de homogeneização a fim de ter os valores de velocidades de rotação mínima, máximas, tempo de processamento, massa máxima de processamento, granulometria, tempo e temperatura de injeção para adição da carga de cobre e fabricação do masterbatch.

Com os parâmetros obtidos, move-se para a fase B onde foi feito o processamento do masterbatch e dosagem das matrizes de PP virgem utilizando o concentrado. Então as amostras são cortadas e trituradas em pellets de 6mm no moinho de facas, e depois são injetadas nos corpos de prova para os ensaios mecânicos e levados para a caracterização.

Na fase C foram realizadas as caracterizações controle (PP puro), do masterbatch e das amostras dosadas. Foram feitos testes de FTIR, DSC, TGA no masterbatch e nas amostras dosadas a fim de avaliar processos de degradação térmica ao longo do processo de homogeneização e injeção plástica. Então foram realizados os testes mecânicos de tração nas amostras dosadas observando as mudanças em resistência e alongamento. Após o ensaio de tração os corpos de foram analisados na zona de fratura em MEV a fim de avaliar o mecanismo de falha e corroborar com os resultados do ensaio de tração.

## Resultados e Discussão

Diante os resultados por fase, tem-se o seguinte:

Na fase A chegou-se aos parâmetros de processamento no homogeneizador termocinético e

injetora de polímeros. No homogeneizador a amostra se mostrou delicada e qualquer segundo a mais na batelada poderia causar esfarelamento e/ou perda total de amostra. Ainda que o tempo tenha parecido mudar em relação com a quantidade de massa de amostra presente na câmara, sendo uma relação diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a massa de amostra presente maior o tempo, anotando 5s para 10g de amostra e 10s para 20g de amostra. Isso pode ser explicado ao considerar que a velocidade de homogeneização seja constante, evidenciado pela relação quase linear dentro do intervalo observado e mantendo os parâmetros de velocidade, com o tempo aumentando apenas com a adição massa. Enfim, a condição ótima para a estabilidade da amostra obtida foi de 20g de material com 10s a 15s com rotação mínima (velocidade de homogeneização) de 3.000 rpm e 10s a 15s na rotação máxima (velocidade de plastificação) de 3.700 rpm. Ademais, os parâmetros para a injetora de polímeros encontrada foi uma temperatura de injeção por 4s a um pressionar de 4,0 bar no molde

Com isso, move-se para a fase B onde foi fabricado o masterbatch e realizado as dosagens com ele. Foi adicionado 5% de carga em processo por batelada, em cada batelada foi acrescido 5% de cobre até a carga máxima de 30% de cobre no PP virgem, sem evidências de degradação ou de aglomeração. Observou-se que a dosagem de 35% e 40% de cobre não formou massa homogênea do masterbatch e, portanto, foi considerado 30% o limite de carga para a preparação do masterbatch de PP com cobre e passou a ser a base de cálculos para o resto do estudo. Ampliando a estabilidade do masterbatch com 30% de cobre, foi realizada a tabela com as medidas precisas de massa e massa pós-processamento visto na Tabela 3 para uma garantia de que 30% era uma concentração estável. A partir dessa, é possível determinar que 30% de cobre é a concentração mais estável para a fabricação do masterbatch.

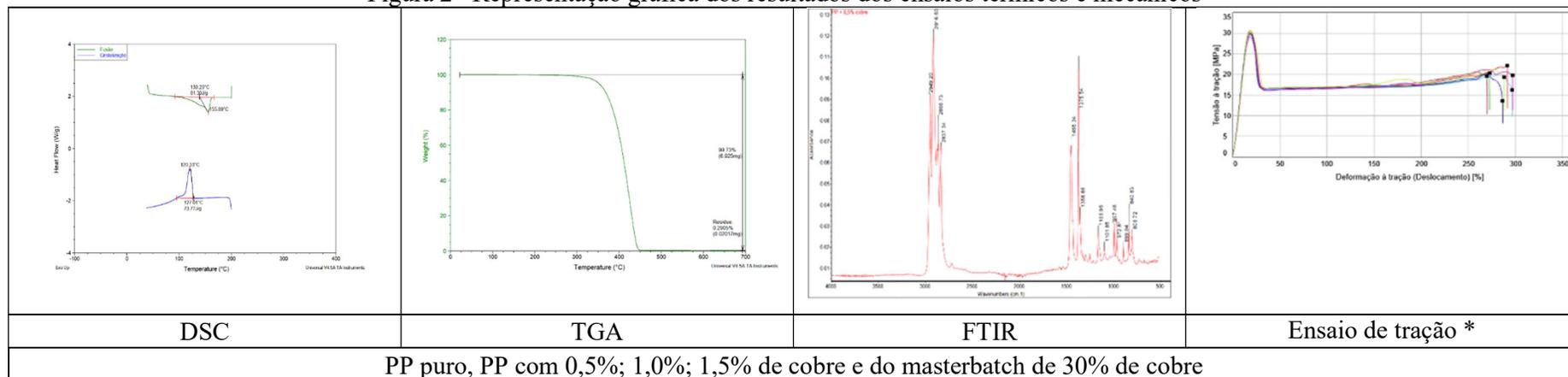
Tabela 3 – Massas medidas e massas pós-processamento para o masterbatch de 30% de cobre

Amostra	Massa de Cu(g)	Massa de PP(g)	Massa Total(g)	Fração Cu(%)	Massa pós processo(g)
1	6.01	14.14	20.15	29.83%	20.13
2	6.00	14.01	20.01	29.99%	19.98
3	6.02	14.00	20.02	30.07%	20.04
4	6.03	13.97	20.00	30.15%	19.95
5	6.02	13.99	20.01	30.08%	20.06
6	6.01	13.99	20.00	30.05%	20.01
<b>Total</b>	<b>36.09</b>	<b>84.10</b>	<b>120.19</b>	<b>30.03%</b>	<b>120.17</b>
<b>Média</b>	<b>6.02</b>	<b>14.02</b>	<b>20.03</b>	<b>30.03%</b>	<b>20.03</b>

Uma nota importante é que o tempo de processamento no homogeneizador desviava daquele anotado na fase A com a adição da massa de cobre, essa sendo diretamente proporcional. Aumentando o tempo de processamento de 10s - 15s para 30s no masterbatch 30% mantendo os parâmetros de velocidade e massa total iguais. Uma possível explicação desse fenômeno é que a cinética da homogeneização diminui conforme a massa da matriz diminui e a massa metálica aumenta, aumentando o tempo geral de homogeneização.

Então por fim, as amostras realizadas são movidas para a fase C onde será feita a caracterização dos materiais com os testes térmicos de DSC e TGA, e química com o FTIR, procurando variações nos picos com formação de novas ligações, para uma garantia de que o material se manteve igual durante o processo. E por fim, os testes de tração no grupo controle e nas amostras dosadas. Chegando aos gráficos vistos na Figura 2 e Tabela 4.

Figura 2– Representação gráfica dos resultados dos ensaios térmicos e mecânicos



PP puro, PP com 0,5%; 1,0%; 1,5% de cobre e do masterbatch de 30% de cobre

\*Exceto do masterbatch com 30% de cobre.

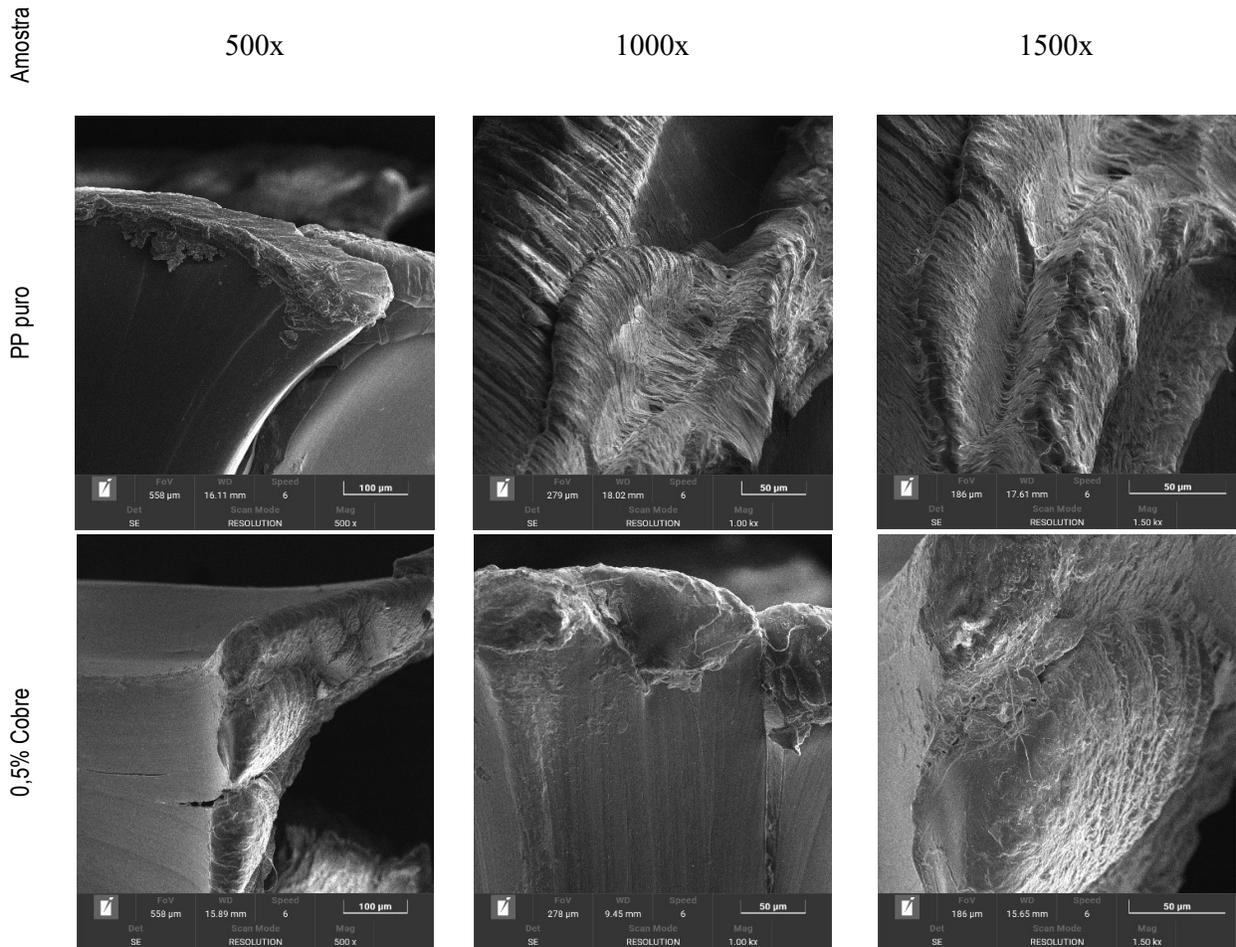
Tabela 4 - Resultados dos ensaios térmicos e mecânico

Ensaio	Característica	unidade	0%	0,50%	1,00%	1,50%	30%
<b>DSC</b>	Temperatura de cristalização	°C	123,65	127,01	127,32	127,58	131,86
		J/g	77,69	73,77	76,58	77,98	78,81
	Temperatura de fusão	°C	131,54	155,89	154,55	152,57	121,75
<b>TGA</b>	Temperatura de degradação	°C	440	450	450	480	429
<b>Ensaio de tração</b>	<b>Resistência à tração</b>	MPa	31,77 +/- 0,88	29,96 +/- 0,5	32,07 +/- 0,45	29,33 +/- 0,94	não foi produzido
	<b>Módulo de elasticidade</b>	MPa	451,67 +/- 14,40	224,37 +/- 4,08	233,86 +/- 7,57	216,72 +/- 8,29	corpo de prova com esta concentração
	<b>Alongamento até fratura</b>	%	314,98 +/- 26,56	285,83 +/- 11,02	218,38 +/- 32,12	250,73 +/- 17,68	

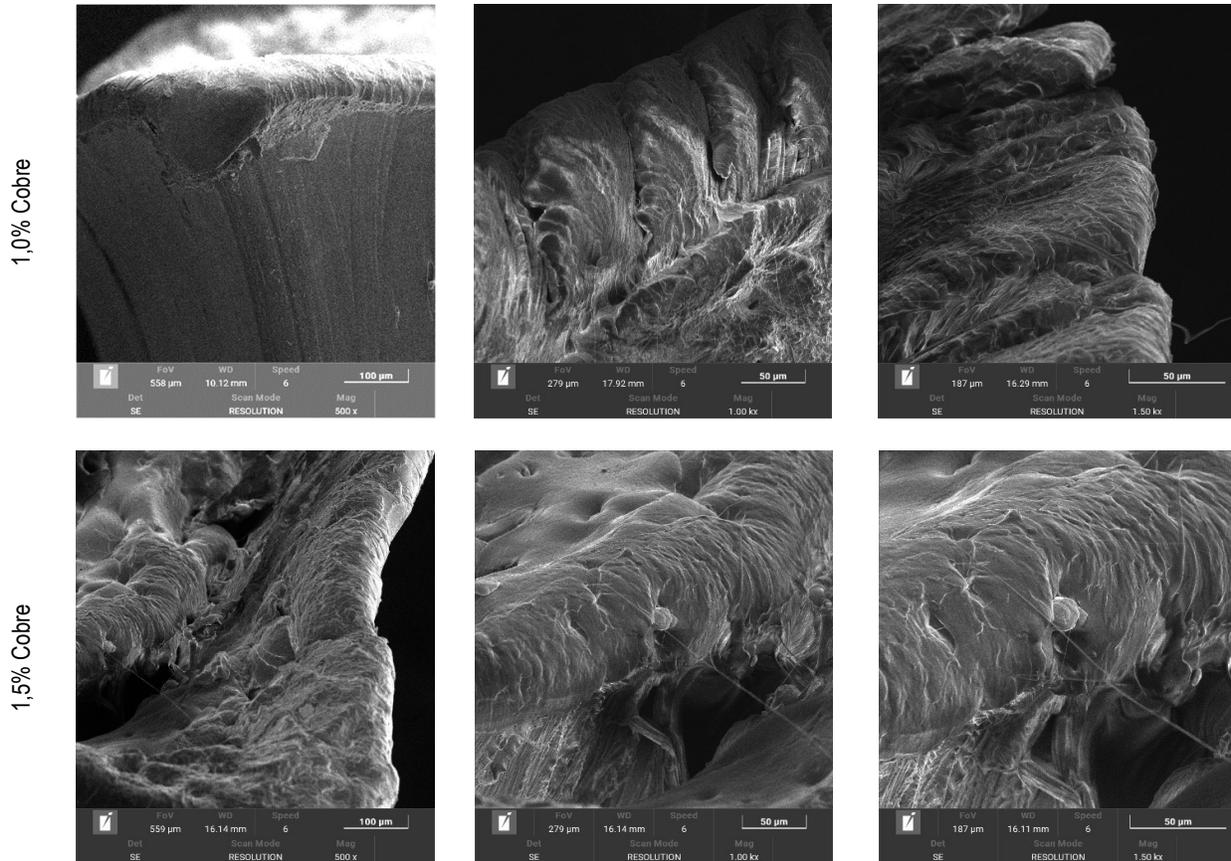
O masterbatch não apresenta ensaio de tração pois seu propósito é ser apenas um veículo para fabricação de materiais compósitos em concentrações menores, dosando matrizes virgens de PP, portanto não há necessidade de testar suas características mecânicas.

As caracterizações térmicas de FTIR, DSC e TGA tinham como objetivo analisar quaisquer discrepâncias que possam ter ocorrido no processamento e com a adição da massa de cobre na matriz, procurando determinar se ainda seria possível realizar os processamentos industriais já utilizados em polipropileno no material adquirido para que ele possa ser facilmente aplicado na produção de materiais compósitos de PP. E pelos resultados apresentados na Figura 2 e na Figura 3 é possível concluir que o material apresenta uma tendência a aumentar as temperaturas de cristalização e derretimento, porém pode-se dizer que as mudanças dentro do intervalo de concentração das dosagens não são significativas, portanto, seus parâmetros se mantêm relativamente iguais a do PP puro. Com os objetivos em mente, foram feitos os ensaios de tração e observação em MEV pós-tração analisando se a adição do cobre na matriz mudaria seu comportamento geral (Figura 4). Espera-se que com a adição de partícula metálica em uma matriz dúctil, o material passe a ter comportamento frágil (ABREU, FORTE e LIBERMAN, 2010). Isso é visto com os ensaios de tração, onde conforme a concentração de cobre aumenta, seu alongamento (deslocamento) diminui e a resistência aumenta, tendendo ao material frágil.

Figura 4 – Imagens das amostras após ensaio de tração na área de fratura, por MEV



Cont. Figura 5 - Imagens das amostras após ensaio de tração na área de fratura, por MEV



Apesar disso, as observações obtidas pelo MEV na Figura 4 mostram que o material manteve sua característica dúctil visto que ele apresenta deformação plástica / estiramento no ponto do rompimento por tração. Mesmo que os resultados de tração apresentam uma tendência a comportamento frágil perdendo parte de sua elasticidade, ao corroborar com as observações do MEV, o material feito dentro desse intervalo de concentração ainda apresenta uma característica plástica. O que indica que ele ainda pode ser processado industrialmente com todos os parâmetros próximos ao do polipropileno puro.

## Conclusões

Com os resultados obtidos pode-se concluir que:

O teor máximo de micropartículas de cobre dosado no PP para formação do masterbatch em homogeneizador termocinético é de no máximo 30% sem evidências de degradação.

Com o masterbatch foi possível realizar a sua dosagem em novas matrizes de polipropileno (PP) nas dosagens de 0,5%; 1,0% e 1,5%, sem perda de propriedades mecânicas e térmicas do PP.

Este masterbatch pode ser usado para fabricação de até 1,5 vezes a massa de materiais de PP com 1% de cobre.

Pode ser utilizado para a fabricação de fibras de PP para indústria têxtil como alternativa de fios com nanoprata de características bactericidas.

O uso de cobre no masterbatch pode ser uma alternativa sustentável já que o cobre seria recuperado de REEEs.

O uso de microcobre em PP se mostra promissor para a eventual aplicação das nanopartículas obtidas de REEEs, viabilizando economicamente o processo de reciclagem no Brasil, estimulando a economia circular.

## Agradecimentos

Ao Instituto Mauá de Tecnologia; Laboratório de Metalografia; Laboratório de microscopia avançada, à Fapesp Processos nº 2018/07461-7, nº 2020/09163-3 e nº 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 Croce 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.

Karthik Chamakura, Rafael Perez-Ballester, Zhiping Luo, Sajid Bashir, Jingbo Liu, Comparison of bactericidal activities of silver nanoparticles with common chemical disinfectants, **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, Volume 84, Issue 1, 2011.

KHETRIWAL, D. S., KRAEUCHI, P. e WIDMER, R. Producer responsibility for e-waste management: Key issues for consideration – Learning from the Swiss experience. **Journal of Environmental Management**. v. 9, p. 153-165. 2009.

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.

MARTINS, Thamiris Auxiliadora Gonçalves ; LIU, Wenying; MORAES, Viviane Tavares de; ESPINOSA, Denise Croce Romano. Study of the Recovery and Purification of Copper from the Recycling of Motherboard Waste and Its Application for Nanoparticle Synthesis. **Journal of sustainable metallurgy**, v. 01, p. 1-19, 2024.

MEDIA, Fusion. **Futuros de Metais**. 2024. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/metals>. Acesso em: 25 nov. 2024.

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: 16 nov. 2024.

YAMANE, Luciana Harue; MORAES, Viviane Tavares de; ESPINOSA, Denise Croce Romano; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers, **Waste Management**, Volume 31, Issue 12, 2011, pg 2553-2558.