

INCORPORAÇÃO DE XLPE MICRONIZADO NO POLIETILENO PARA ENCHIMENTO DE CABOS ELÉTRICOS

INCORPORATION OF MICRONIZED XLPE IN POLYETHYLENE FOR FILLING ELECTRICAL CABLES

João Victor Lansana¹

Clodoaldo Lazareti²

RESUMO

O rápido crescimento do consumo energético no Brasil, com aumento anual de 3% nas unidades consumidoras, intensificou a demanda por cabos elétricos e a geração de resíduos como XLPE. Diante dos 53,6 milhões de toneladas de lixo eletrônico global em 2019, marcando aumento de 21% frente a 2014, e dos riscos ambientais e sanitários do descarte inadequado, incluindo contaminação do solo e água e danos à saúde humana, a reciclagem surge como solução estratégica. Este estudo comprova que a micronização de XLPE e sua aplicação como enchimento de cabos em polietileno representam uma abordagem sustentável, alinhada à Política Nacional de Resíduos Sólidos e aos princípios da economia circular. Testes técnicos com concentrações de 0% a 30% de XLPE micronizado mostraram uma relação balanceada: a resistência à tração aumentou progressivamente, alcançando 117% de incremento no impacto para PE com 30% de XLPE, enquanto o alongamento diminuiu, indicando maior rigidez. A dosagem de 30% demonstrou ser ideal para aplicações que requerem alta resistência mecânica. A textura áspera observada nos protótipos, decorrente do XLPE, não afetou a funcionalidade, pois as normas técnicas regulam apenas isolamento e capas, não aspectos estéticos de enchimentos.

A iniciativa da CABOSDEMA em implementar esta solução reforça seu compromisso com inovação sustentável, reduzindo pressão em aterros e promovendo reuso de recursos. Os resultados confirmam que o XLPE reciclado equilibra desempenho mecânico e viabilidade ambiental, permitindo ajustes conforme necessidades específicas de rigidez versus ductilidade, com plena conformidade normativa. A metodologia proposta não só reduz impactos ambientais, como também agrega valor à cadeia produtiva, estabelecendo-se como modelo para práticas circulares na indústria de cabos elétricos.

Palavras-chave: cabos elétricos, resíduos plásticos, micronização de XLPE, inovação sustentável, reutilização de recursos.

ABSTRACT

The rapid growth of energy consumption in Brazil, with a 3% annual increase in consumer units, has intensified the demand for electrical cables and the generation of waste such as XLPE. Given the 53.6 million tons of global electronic waste in 2019—a 21% increase compared to 2014—and the environmental and health risks of improper disposal, including soil and water contamination and harm to human health, recycling emerges as a strategic solution. This study proves that the micronization of XLPE and its application as a filler in polyethylene cables represent a sustainable approach, aligned with the National Solid Waste Policy and the principles of the circular economy. Technical tests with concentrations of 0% to 30%

micronized XLPE showed a balanced relationship: tensile strength progressively increased, reaching a 117% improvement in impact resistance for PE with 30% XLPE, while elongation decreased, indicating greater rigidity. The 30% dosage proved ideal for applications requiring high mechanical strength. The rough texture observed in the prototypes, resulting from XLPE, did not affect functionality, as technical standards regulate only insulation and sheathing—not the aesthetic aspects of fillers.

CABOSDEMA's initiative to implement this solution reinforces its commitment to sustainable innovation, reducing landfill pressure and promoting resource reuse. The results confirm that recycled XLPE balances mechanical performance and environmental feasibility, allowing adjustments based on specific stiffness versus ductility needs while fully complying with regulations. The proposed methodology not only reduces environmental impacts but also adds value to the production chain, establishing itself as a model for circular practices in the electrical cable industry.

Keywords: electrical cables, plastic waste, XLPE micronization, sustainable innovation, resource reuse.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica tem impulsionado a produção em larga escala de cabos elétricos. A Empresa De Pesquisa Energética (2024) afirma que, nos últimos 20 anos, o consumo de energia elétrica no Brasil cresceu significativamente. O Conselho De Consumidores De Energia Elétrica Do Estado De Goiás (2024) relata que, de 2004 a 2023, o número de unidades consumidoras residenciais cresceu a uma taxa anual de 3,0%, saltando de cerca de 47 milhões para aproximadamente 82 milhões de consumidores. Esse aumento reflete a expansão do acesso à eletricidade no Brasil e destaca a tendência de aumento no consumo de energia elétrica no país, impulsionada pelo crescimento econômico, pela ampliação do acesso à eletricidade e pelas transformações na matriz energética, resultando em uma considerável geração de resíduos plásticos.

A Ciclovivo (2020) aponta que o aumento do lixo eletrônico, incluindo cabos elétricos, tem sido significativo nos últimos anos. Em 2019, o mundo gerou um recorde de 53,6 milhões de toneladas métricas de resíduos eletrônicos, representando um aumento de 21% em relação a 2014. De acordo com a Lei nº 12.305, de 2010, estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010), os resíduos de cabos elétricos devem ser descartados de maneira ambientalmente adequada para evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública, muitas vezes em aterros sanitários ou por meio de incineração. Isso representa um desafio ambiental significativo.

Nesse contexto, a reciclagem emerge como uma solução promissora para mitigar os impactos ambientais negativos, especificamente, a micronização dos resíduos plásticos de XLPE e sua incorporação em polietileno para enchimentos de cabos elétricos representam uma abordagem inovadora e sustentável para o gerenciamento desses resíduos.

O Setor Elétrico (2017) relata que a indústria de cabos elétricos depende fortemente de materiais termofixos, como o Polietileno Reticulado (XLPE), devido às suas propriedades de isolamento e resistência. A revista Potência (2023) relata que o descarte desses materiais pode resultar em poluição ambiental e desperdício de recursos. Portanto, a reciclagem dos

resíduos não apenas reduz o impacto ambiental, mas também promove a economia circular na indústria. Esse tipo de processo apresenta desafios técnicos, incluindo a necessidade de garantir a homogeneidade e a qualidade do material, bem como a viabilidade econômica. No entanto, a incorporação dos resíduos micronizados em polietileno oferece uma oportunidade para reduzir a dependência de matérias-primas virgens e promover a sustentabilidade na indústria.

1.1 Problema

O descarte inadequado de resíduos da indústria de cabos elétricos representa um sério problema ambiental, especialmente no que se refere à contaminação do solo e da água. De acordo com a 123 Ecos (2023), há risco de contaminação do solo e da água com resíduos eletrônicos; essa poluição prejudica ecossistemas, impactando a fauna e a flora, e pode comprometer a saúde humana ao ser incorporada na cadeia alimentar, ressalta o autor. A exposição às substâncias presentes nos resíduos eletrônicos pode causar danos a órgãos como rins, fígado e sistema nervoso central. Além disso, pode estar associada a doenças respiratórias, neurológicas e reprodutivas, conforme afirma o estudo realizado pela Superintendência De Gestão Ambiental Da Universidade De São Paulo (2024).

1.2 Objetivo

Este artigo tem como objetivo realizar uma análise abrangente dos desafios e oportunidades na utilização de resíduos plásticos de XLPE como enchimento de cabos. Serão discutidos aspectos técnicos, econômicos e ambientais relacionados à incorporação desses resíduos em polietileno, além de apresentar estudos de caso e exemplos práticos para ilustrar a viabilidade e os benefícios dessa abordagem. Por meio desta análise crítica, busca-se contribuir para o avanço da pesquisa e para práticas sustentáveis na indústria de cabos elétricos.

1.3 Justificativa

A reciclagem do XLPE, em vez de seu descarte em aterros sanitários, desempenha um papel crucial na preservação ambiental, na promoção da sustentabilidade e na redução dos impactos negativos tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana. O descarte inadequado desses resíduos em aterros resulta frequentemente na perda de recursos valiosos que poderiam ser reutilizados. Através do processo de reciclagem, é possível recuperar materiais que podem ser reaproveitados pela indústria, como enchimentos, favorecendo a economia circular, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos e evitando o desperdício de materiais. Neste contexto, é imprescindível destacar o papel da empresa Cabosdema, que, com seu compromisso com a inovação e sustentabilidade, demonstra interesse em apoiar e expandir esse estudo voltado para a reciclagem do XLPE. Ao promover essa prática, além de contribuir diretamente para a redução da pressão sobre os aterros sanitários que, em várias regiões, já atingem sua capacidade máxima de acordo com a Dinamic Ambiental (2018). Assim, Cabosdema se posiciona como um aliado essencial na construção desse artigo em busca de soluções mais sustentáveis, incentivando a adoção de práticas que não apenas respeitem o meio ambiente, mas também promovam a economia circular de forma efetiva e responsável. Conforme a Brasil Escola (2025) explana a reciclagem desempenha é um papel crucial na

preservação ambiental, especialmente quando se trata de materiais que, de outra forma, seriam enviados para aterros sanitários. Ao reaproveitar esses materiais, consegue-se minimizar o desperdício e ajudar a reduzir o volume de resíduos acumulados em aterros e lixões.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Classificação dos materiais plásticos

"Os termoplásticos distinguem-se dos demais plásticos por seu comportamento reversível ao calor, permitindo múltiplos ciclos de processamento sem alteração significativa em suas propriedades quando submetidos a condições adequadas de temperatura e pressão" (DUTRA, 2018, p. 78). O autor destaca que a cadeia molecular linear dos termoplásticos permite o deslizamento entre moléculas sob calor sua reciclabilidade os torna predominantes em aplicações de consumo (75% do mercado de plásticos), a cristalinidade varia conforme o polímero (ex.: PEAD é semicristalino, PS é amorfo)

Para Canevarolo (2013) Os termorrígidos, também conhecidos como termofixos, polímeros em rede ou em retículo, são plásticos que, ao serem expostos a um aumento significativo de temperatura e uma leve pressão, tornam-se maleáveis e fluem, assumindo a forma do molde. O autor elucida que durante esse processo, ocorre uma reação química que forma ligações cruzadas entre as cadeias, resultando em sua solidificação. Após essa cura, aumentos subsequentes de temperatura e pressão não afetam mais o material, tornando-o insolúvel, infusível e não reciclável.

A diferença principal entre termofixos e termoplásticos está na reação ao calor: os termofixos tornam-se permanentes após a cura e não podem ser remodelados, enquanto os termoplásticos podem ser reaquecidos e moldados várias vezes. Advtec aditivos (2024).

2.2 Polietileno

De acordo com Ronca (2017). O polietileno (PE) é o plástico mais produzido, com uma estrutura simples de repetição de unidades de CH₂. Suas principais vantagens incluem baixo custo, excelente isolamento elétrico, boa resistência química, processabilidade, resistência, flexibilidade e, em alguns casos, transparência. O autor cita que até a década de 1950, o PE era feito por processos de alta pressão, resultando em materiais ramificados de baixa densidade. A introdução de catalisadores metálicos permitiu a produção de diferentes tipos de PE, variando de alta a baixa densidade, além de copolímeros com propriedades variadas. Para Morassi (2013). Filmes e embalagens para indústria alimentícia, limpeza entre outros são as maiores aplicações do polietileno devido a sua tenacidade e resistência a tração moderada, boa resistência química. Com densidade menor que da água e temperatura de fundição entre 80 e 130°C. É um termoplástico transparente sob a forma de filme, porém constituinte de um aspecto translúcido e ceroso.

A molécula de polietileno na sua forma habitual é composta por um par de carbono ligados de forma covalente a outro par de hidrogênio repetida em uma longa espinha dorsal, grupos metila finaliza as extremidades, ressalta Bassani (2013). De acordo com Coutinho (2003). A

quantidade relativa amorfa e cristalina manipula diretamente na flexibilidade do polietileno, com menores unidades de cristal o polímero é parcialmente cristalino.

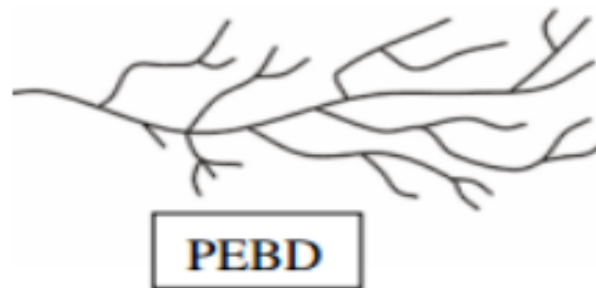
2.2.1 Tipos de polietileno

De acordo com a Thermoplastic coating (2023). Existem vários tipos de polietilenos e, os mais usuais são;

2.2.1.1 Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE)

O PEBD (polietileno de baixa densidade) é um polímero termoplástico conhecido por sua flexibilidade, transparência e resistência à umidade. Usado em embalagens, filmes, brinquedos e dispositivos médicos, é produzido pela polimerização do etileno sob alta pressão, resultando em menor densidade e maior maleabilidade. Tuteja et al, (2024). A figura 1 a seguir representa a estrutura molecular do PEBD.

Figura 1: Representação esquemática do Polietileno de baixa densidade



Fonte: Bassani (2014)

2.2.1.2 Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE)

O polietileno de alta densidade (HDPE ou PEAD) é um termoplástico derivado do petróleo, exigindo cerca de 1,75 kg de petróleo para produzir 1 kg do material. Reciclável e identificado pelo símbolo "2", sua principal diferença em relação ao PEBD está no nível de ramificação. O HDPE possui uma estrutura mais cristalina e melhores propriedades mecânicas devido à menor quantidade de ramificações. Kumar et al. (2011) conforme ilustra a figura 2.

Figura 2: Estrutura Molecular de um Polietileno de alta densidade



Fonte: Ferreira (2021)

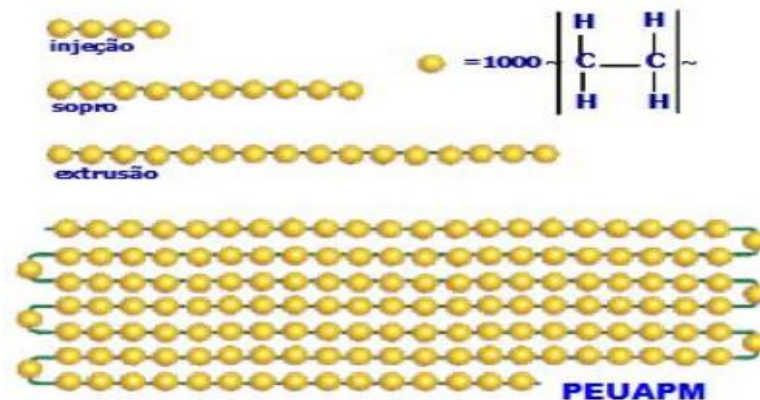
2.2.1.3 Polietileno de baixa densidade linear (PEBDL)

Para Jordan et al. (2016) O polietileno linear de baixa densidade (PEBDL) é amplamente usado em embalagens e filmes devido à sua resistência química e à tração. A produção ocorre com catalisadores Ziegler-Natta, metalloceno e metais de transição tardia, cada um influenciando suas propriedades. De acordo com autor O PEBDL com Ziegler-Natta tem melhor resistência mecânica, o metalloceno apresenta maior atividade catalítica, e os metais de transição tardia geram excelente desempenho. Essas melhorias ampliam suas aplicações nas áreas elétrica, médica e cirúrgica, com potencial para produção em larga escala.

2.2.1.4 Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM)

A norma ISO 11542-2 (1998) define o PEUAPM como um polímero com massa molar mínima de 1 milhão de g/mol e grau de polimerização de cerca de 36.000 por cadeia. Produzido sob alta pressão e temperatura, apresenta cristalinidade entre 58% e 75%. Suas cadeias longas garantem excelente deslizamento, resistência ao impacto, fadiga e abrasão. No entanto, a usinagem gera resíduos de difícil destinação industrial. A figura 3 mostra um comparativo do tamanho da molécula dos polietilenos convencionais ao Polietileno de ultra alto peso molecular.

Figura 3: Comparação entre moléculas de polietileno



Fonte: Braskem (2013)

Segundo a BRASKEM, o PEUAPM tem um peso molecular cerca de 10 vezes maior que o do HDPE, o que lhe confere alta resistência à abrasão e impacto, além de um baixo coeficiente de atrito, tornando-o ideal para aplicações de alto desempenho.

2.2.1.5 Polietileno reticulado (XLPE ou PEX)

O polietileno reticulado é um material que possui uma história de 30 anos de utilização bem-sucedida no mercado Europeu, com extensos testes de durabilidade e desempenho. Foi introduzido pela primeira vez na América do Norte em 1984 e, desde então, entrou em uso ao redor do mundo para uma variedade de aplicações De Barros et al (2009)

Affatato (2008) afirma que o polietileno reticulado, comumente abreviado para PEX ou XLPE, é uma forma de polietileno com reticulações, conforme ilustra a figura 4. É o desenvolvimento

mais empolgante na tecnologia articular e consiste em um processo no qual as moléculas de polietileno são unidas, resultando em um material mais forte, melhorando substancialmente a resistência ao desgaste do material. De acordo com o autor as Ligações covalentes são formadas entre as cadeias poliméricas, inibindo, assim, a mobilidade e orientação das cadeias e, como resultado, o desgaste.

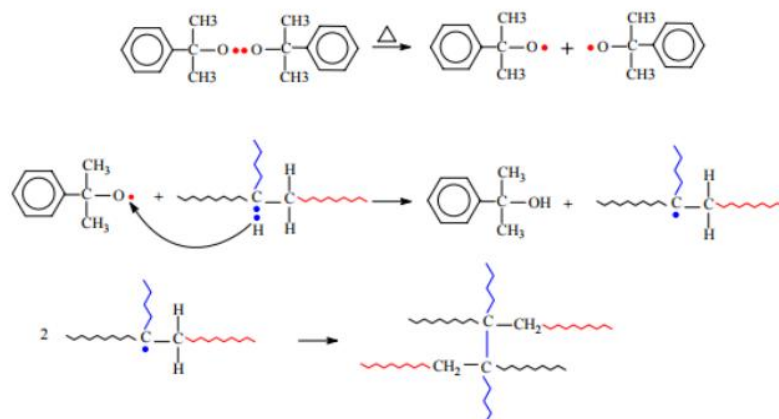
Figura 4: Representação da cadeia do Polietileno Reticulado



Fonte: Bassani (2014)

Existem três métodos principais para obter polietileno reticulado: adição de peróxido, radiação e silano. No método com peróxido, a decomposição térmica do peróxido de dicumila (DCP) gera radicais livres, que atacam moléculas de polietileno, formando ligações entre dois radicais. A concentração de peróxido usada é cerca de 2% antes da extrusão. A decomposição do DCP ocorre a 150°C, com um tempo de meia-vida de 14 minutos e uma energia de ativação de 37 kcal/mol conforme explica Gulmine, (2004) apud Freitas (2017). A reticulação via peróxido é ilustrada conforme a figura 5.

Figura 5: Processo de reticulação do polietileno



Fonte: Gulmine (2004)

2.3 Aplicações do XLPE

Os cabos elétricos são essenciais na distribuição segura e eficiente de eletricidade. O XLPE, utilizado como isolante em cabos de alta tensão, oferece vantagens como baixa perda dielétrica, alta constante dielétrica, excelente condutividade térmica, maior

estabilidade térmica e alta resistência ao estresse elétrico. Nazrin et al, (2024)
Para Andritsch et al, (2017), o XLPE substituiu os sistemas de isolamento com papel impregnado de óleo em cabos de média e alta tensão devido à sua capacidade de suportar temperaturas mais altas e à sua fabricação eficiente por meio de tecnologia de extrusão controlada.
O XLPE é amplamente utilizado em cabos de alta tensão devido às suas excelentes propriedades de isolamento elétrico, resistência térmica e química, e durabilidade. A norma ABNT NBR 6251/82 garante a qualidade desses cabos, que são ideais para sistemas de distribuição de energia, incluindo energia renovável. Eles suportam altas temperaturas, resistem à radiação ultravioleta e apresentam baixa perda dielétrica, aumentando a eficiência na transmissão de energia.

2.4 Construções de cabos elétricos

2.4.1 Trefilação

Segundo o fabricante de cabos Conducobre (2024). A fabricação de cabos elétricos inicia-se com condutores de cobre flexível e isolamento plástico, seguindo normas da ABNT ou internacionais para garantir qualidade. No início do processo a empresa Lamesa (2019), destaca que o cobre usado deve ter 99,9% de pureza e é fornecido em vergalhões de 8 mm no Brasil. O processo de trefilação reduz seu diâmetro em duas etapas: a primeira para 1,8 mm e a segunda para tamanhos abaixo de 0,200 mm, usando trefilas multifilares. Durante a trefilação, óleo é aplicado para lubrificação e resfriamento, e os fios passam por recozimento para recuperar suas propriedades.

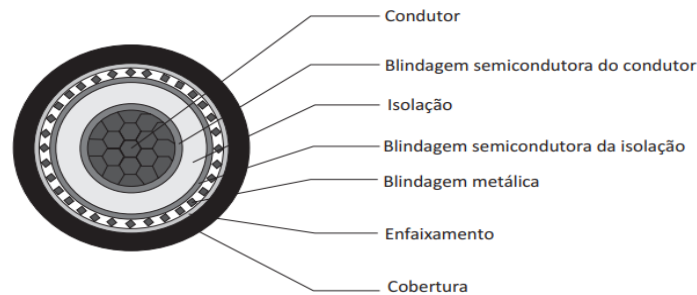
2.4.2 Encordoamento

Os condutores de cobre são compostos por vários fios finos, com o diâmetro máximo de cada fio determinado por norma. O processo envolve reunir a quantidade de fios necessária para cada bitola, formando uma "corda". Para isso, utiliza-se a máquina Reunidora (ou Buncher, em inglês), que recebe os fios das trefilas multifilares e os agrupa, criando uma "corda" com perfil circular, homogêneo e com alta flexibilidade afirma a Conducobre (2024).

2.4.3 Isolamento dos condutores

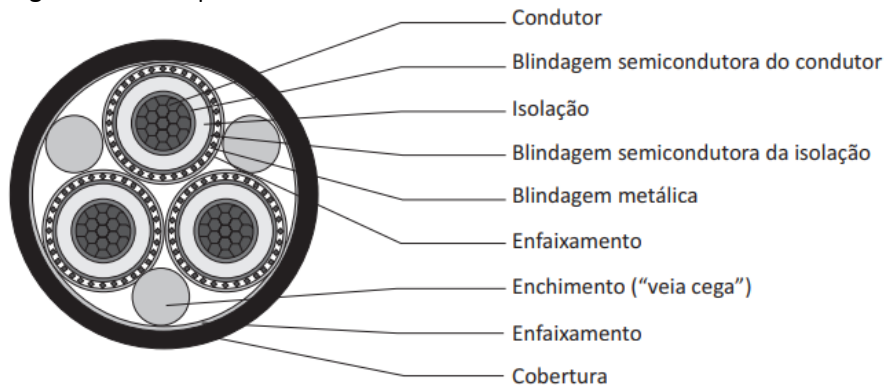
Os condutores elétricos necessitam de isolamento para evitar contato com outros materiais, prevenindo curto-circuito e danos físicos. Esse isolamento é aplicado por extrusão, onde grãos aquecidos formam uma massa moldável que é pressionada sobre o condutor, criando uma camada uniforme. Após o resfriamento, a isolamento mantém sua forma e aderência. A coloração segue normas técnicas, sendo obtida por pigmentação ou co-extrusão, que adiciona uma camada externa fina sobre a base, afirma Lamesa (2019).

Conforme Paula, (2023). Os cabos isolados de média e alta tensão possuem blindagem metálica aterrada, que determina a espessura da isolamento. Embora existam cabos blindados de baixa tensão, a blindagem é essencial para média e alta tensão. Além disso, incluem camadas semicondutoras, sem relação com os semicondutores da eletrônica. A construção mais simples e comum desses cabos é a que inclui essas características. ilustrado na figura 6.

Figura 6: Cabo Unipolar

Fonte: Paula (2023)

Os cabos unipolares possuem um único condutor, enquanto os de baixa tensão podem ter de um a cinco condutores. Cabos de controle podem conter dezenas, e os de média e alta tensão geralmente possuem um ou três condutores, sendo usados em sistemas trifásicos. Cabos trifásicos são escolhidos por economia, especialmente em sistemas submarinos, onde também se utilizam cabos unipolares. É ilustrada pela figura 7 destacando-se, na imagem a presença da veia cega, condutor não energizado utilizado para preenchimento e simetria do cabo.:

Figura 7: Cabo tripolar

Fonte Paula (2023)

2.5 Descarte e reciclagem de resíduos de cabos elétricos

No estudo de Araujo (2006) afirma-se que os fios e cabos produzidos são utilizados em diversas indústrias, como eletroeletrônica, construção civil, automotiva, máquinas, refrigeração, telecomunicações e energia. Os resíduos de fios e cabos se dividem em:

- Resíduos pré-consumo: Aparas industriais geradas nas fábricas de fios e cabos (sucata interna).
- Resíduos pós-consumo: Originados por empresas que utilizam fios e cabos em redes elétricas, telefonia ou na montagem de equipamentos eletroeletrônicos, além de ser gerados durante reformas, consertos de equipamentos e descarte de produtos no fim da vida útil.

As empresas distribuidoras de eletricidade geram dois tipos principais de resíduos: metais e materiais de difícil reciclagem, como poliméricos, cerâmicos e compósitos. A reciclagem de metais é bem desenvolvida, enquanto a de materiais como resinas epóxi, poliéster e XLPE ainda enfrenta desafios. Devido a essas dificuldades, esses materiais têm baixa valorização e são tratados separadamente. Mancini, (2009).

De acordo com a Mais Polímeros (2020). A reciclagem de polímeros pode ser dividida em três principais tipos, cada um adequado a diferentes tipos de materiais plásticos e processos de reciclagem, sendo:

- A reciclagem química decompõe polímeros plásticos em monômeros ou compostos químicos por meio da despolimerização, rompendo ligações moleculares. Os produtos resultantes podem ser reprocessados como matéria-prima virgem, sendo reinseridos na produção de novos plásticos. Souza, (2013).
- A reciclagem energética converte resíduos plásticos em energia, através da queima controlada em fornos, gerando calor e eletricidade. O processo de incineração, realizado com excesso de oxigênio, produz dióxido de carbono, vapor de água e energia. Souza (2013).
- A reciclagem mecânica é o processo mais comum para plásticos, envolvendo a coleta, trituração, limpeza e reprocessamento dos materiais sem alterar sua estrutura química. Amplamente utilizada na indústria, ela aproveita resíduos de processos como injeção e acabamento. Esse tipo de reciclagem inclui etapas de separação, moagem, lavagem, secagem e transformação. Souza (2013).

De acordo com a Plástico virtual (2025). A micronização é um processo de moagem mecânica que reduz o tamanho das partículas de materiais, incluindo polímeros, para escalas micrométricas. Usado principalmente na indústria de plásticos para preparar cargas e aditivos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais utilizados no estudo foram a resina LLDPE DFDA-7530 NT da Dow, doada pela empresa Cabosdema, e o XLPE micronizado, cedido pela Prof. Dra. Edilene de Cássia, da Escola SENAI Mario Amato.

3.2 Métodos

Para a obtenção do composto de polietileno com XLPE, foi utilizada uma extrusora monorosca de duplo filete tipo barreira, do fabricante MIOTTO, com diâmetro 60 mm.

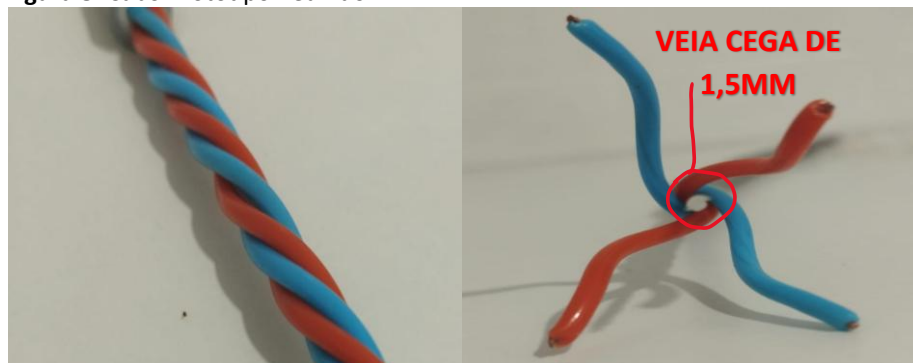
A obtenção dos corpos de prova seguiu a norma internacional **IEC 60811-501** da Comissão Eletrotécnica Internacional. Foram preparadas quatro amostras com variação gradativa na incorporação de XLPE, nos percentuais de 0%, 10%, 20% e 30%.

Para o ensaio de tração, foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio KRATOS, modelo KE 1000 MP.

Para a obtenção da veia cega PEBD/XLPE com diâmetro de 1,5mm, foi utilizada uma extrusora monorosca de filete simples, do fabricante MIOTTO, com diâmetro 35mm.

Para a produção do cabo protótipo, foi empregada uma máquina RDT BUNCHER 800 (CORTINOVIS DO BRASIL), modelo OF 158. O processo consistiu na utilização de uma veia cega de PEBD com 30% de XLPE micronizado (1,5 mm de diâmetro) como núcleo central, em torno do qual foram torcidas helicoidalmente quatro veias condutoras de 0,5 mm² de XLPE nas cores laranja e azul (alternadas). As veias foram reunidas mecanicamente, resultando em um núcleo torcido compacto, cujo arranjo final, conforme ilustrado na figura 8, apresenta um núcleo central de PEBD/XLPE como elemento estrutural, veias condutoras periféricas em disposição simétrica e uma geometria otimizada para desempenho mecânico e elétrico.

Figura 8: Cabo Protótipo Reunido



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O cabo com enchimento intermediário foi produzido mediante extrusão por pressão do núcleo reunido, utilizando uma extrusora monorosca MIOTTO diâmetro 60 mm. O processo, que empregou o mesmo equipamento utilizado para os corpos de prova, assegurou conformação cilíndrica precisa, uniformidade dimensional e compactação adequada do enchimento, conforme ilustrado na figura 9.

Figura 9: Cabo Protótipo Com Capa De Enchimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estudos demonstram que Cucchiara e Bonse (2015) observaram que 5% de XLPE em HDPE aumentou a resistência ao impacto em 10x, com redução gradual em teores maiores (10-30%), porém mantendo valores superiores ao HDPE puro. Freitas (2017) confirmou que mesmo baixas concentrações (1-9%) melhoram propriedades mecânicas.

4.1 Resultados dos ensaios de tração

Os resultados apresentados na tabela a seguir representam a média aritmética dos valores obtidos nos ensaios de tração realizados em cinco corpos de prova para cada condição de amostra com 0%, 10%, 20% e 30% de adição de XLPE micronizado, conforme metodologia estabelecida.

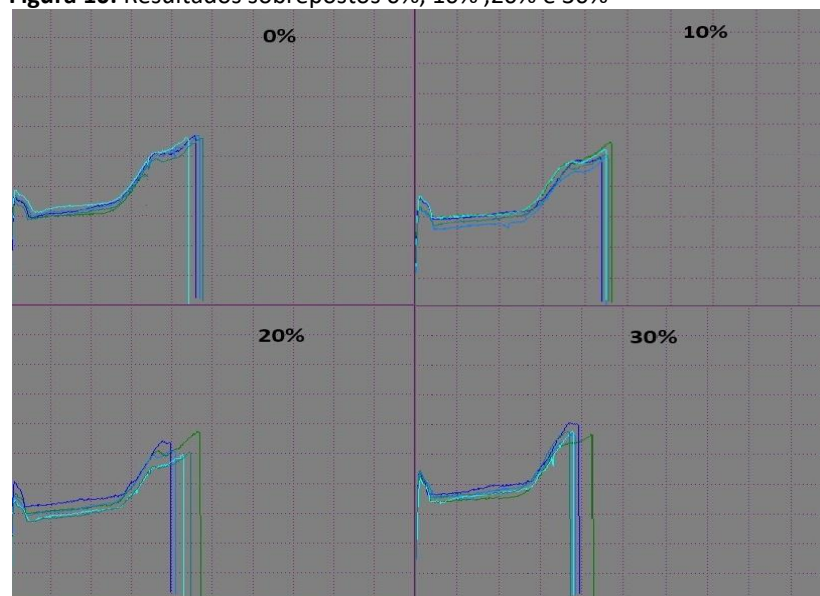
Tabela 1 – Média dos resultados das amostras

MÉDIA DOS RESULTADOS DAS AMOSTRAS			
AMOSTRA	FORÇA MAX. N	% ALONGAMENTO	LIM. RESISTÊNCIA MPA
0%	166,77	1342,44	15,51
10%	148,16	1238,71	16,03
20%	153,06	1152,18	16,11
30%	170,75	1044,83	17,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A figura 10 apresenta os resultados gráficos sobrepostos obtidos nos ensaios de tração realizados com 5 corpos de prova de cada tipo de amostra. O gráfico ilustra o comportamento mecânico dos materiais testados, destacando:

Figura 10: Resultados sobrepostos 0%, 10%, 20% e 30%



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os ensaios de tração realizados em amostras com diferentes teores de XLPE micronizado (0%, 10%, 20% e 30%) revelaram comportamentos distintos nas propriedades mecânicas avaliadas: força máxima (N), alongamento (%) e resistência à tração (MPa). A seguir, apresenta-se uma análise crítica desses resultados:

4.1.1 Tendência de Alongamento (%):

O gráfico demonstra uma redução progressiva no percentual de alongamento à medida que a concentração de XLPE micronizado aumenta. Essa diminuição sugere que o material se torna mais rígido e menos deformável com a adição do aditivo, possivelmente devido a uma maior restrição na mobilidade das cadeias poliméricas.

- 0% XLPE: Maior alongamento, indicando maior ductilidade.
- 30% XLPE: Menor alongamento, sugerindo maior fragilidade.

4.1.2 Força Máxima (N):

Apesar da redução no alongamento, a força máxima suportada pelas amostras não apresentou queda significativa, indicando que o XLPE micronizado pode estar contribuindo para uma maior resistência à deformação sem comprometer totalmente a capacidade de carga.

4.2. Resistência à Tração (MPa) – Aumento Progressivo

Os resultados mostram um crescimento consistente no limite de resistência à tração com o incremento de XLPE micronizado:

- 0% XLPE: Menor resistência, condizente com o comportamento do material virgem.
- 30% XLPE: Maior resistência, indicando que o aditivo atua como um reforço, aumentando a capacidade de suportar cargas antes da ruptura.

Esse comportamento pode ser atribuído à dispersão eficiente do XLPE micronizado na matriz polimérica, que atua como um agente de reforço, restringindo a movimentação das cadeias e melhorando a transferência de tensões.

4.3. Relação entre Alongamento e Resistência

A diminuição do alongamento em paralelo ao aumento da resistência sugere um compromisso (trade-off) típico em compósitos poliméricos:

- Vantagem: Maior resistência mecânica, útil em aplicações que demandam maior rigidez.
- Desvantagem: Redução da tenacidade, o que pode limitar aplicações que exigem deformação antes da fratura.

4.4 Considerações sobre a Dispersão do XLPE Micronizado

O aumento na resistência à tração demonstra que a incorporação do XLPE foi eficiente, evitando a formação de aglomerados que poderiam comprometer a integridade do material, embora a redução no alongamento indique que teores acima de 30% podem resultar em um material excessivamente rígido para determinadas aplicações. Conforme comprovado por BOSS (2014) Apud SILVA (2018), a adição de 30% de XLPE em MDPE elevou significativamente a resistência ao impacto de 6,0 kJ/m² (MDPE puro) para 13 kJ/m², mantendo-se em 11 kJ/m² evidenciando que essa concentração é ideal para aplicações que demandam alta resistência ao impacto, conforme atestado por diversos estudos experimentais.

4.5 Produção do Protótipo e Análise de Resultados

O processo de fabricação do protótipo seguiu rigorosamente os parâmetros de uma produção convencional, sem qualquer modificação nos procedimentos operacionais. Entretanto, observou-se que o produto final apresentou uma textura superficial mais áspera em comparação com cabos convencionais - característica atribuída à concentração de XLPE micronizado utilizada na composição.

É importante destacar que, embora esta alteração estética tenha sido notada, ela não representa um fator crítico para a aplicação pretendida, uma vez que:

- O material foi desenvolvido especificamente para função de enchimento
- Não existem requisitos normativos que regulem aspectos superficiais em elementos de enchimento de cabos elétricos
- As regulamentações vigentes focam exclusivamente nas características de isolamento dos condutores e nas propriedades das capas externas

Esta variação no acabamento superficial não compromete em absoluto o desempenho funcional do produto, mantendo-se plenamente adequado para sua aplicação como elemento de preenchimento em sistemas cabos elétricos.

5 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a incorporação de XLPE micronizado proporciona um equilíbrio entre propriedades mecânicas e características superficiais, evidenciando eficácia no aumento da resistência com a contrapartida de redução do alongamento - relação crucial para definir a concentração ideal conforme os requisitos de rigidez e ductilidade de cada aplicação. Embora o processo convencional de fabricação tenha gerado um protótipo com textura mais áspera devido ao XLPE, essa alteração mostrou-se irrelevante funcionalmente, pois o material foi desenvolvido especificamente como enchimento, setor que não possui exigências normativas sobre aspectos superficiais, focando-se apenas nas propriedades de isolamento e capas externas.

Esses achados comprovam a viabilidade técnica da solução, onde o XLPE micronizado surge como alternativa eficiente para aplicações que demandam maior resistência mecânica em enchimentos, mantendo pleno desempenho funcional apesar das variações texturais e permitindo ajustes precisos nas propriedades conforme necessidades específicas, sempre em conformidade com as normativas vigentes.

REFERÊNCIAS

123Ecos. **Resíduos Eletrônicos: Impactos Ambientais e Soluções**, 2023. Disponível em: <<https://123ecos.com.br/docs/residuos-eletronicos/>>, Acesso em 2 março, 2025.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **Cabos de potência com isolamento extrudada para tensões de 1 Kv a 35 Kv, NBR 6251** – Requisitos Construtivos, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **Cabos de potência com isolamento extrudada para tensões de 1 Kv a 35 Kv, NBR 7287** – Requisitos Construtivos, 2018.

ADVTEC ADITIVOS. **Termofixos: o que são e por que são essenciais na indústria moderna?** 2024. Disponível em: <<https://advtecaditivos.com.br/blog/termofixos/termofixos-o-que-sao-e-por-que-sao-essenciais-na-industria-moderna/>>. Acesso em: 31 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO.

Índice de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil. Disponível em: <<https://www.plasticotransforma.com.br/portal/mpt/arquivos/listas/15001/thumb.pdf?v=1>>. Acesso em: 19 jan. 2025

AFFATATO, S.. **Ageing of polyethylene composite implants in medical devices**. Ageing Of Composites, [S.L.], p. 357-374, 2008. Elsevier. In book: Aging of composites, Edition: 1° Publisher: Woodhead Publishing Limited Editors: Martin R

ANDRITSCH, Thomas; VAUGHAN, Alun; STEVENS, Gary C. **Novel insulation materials for high voltage cable systems**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 33, n. 4, p. 27-33, 2017.

ARAÚJO, Mishene Christie Pinheiro Bezerra de. **Reciclagem de fios e cabos elétricos**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BASSANI, Tais Sartori. **Reciclagem mecânica do resíduo industrial de polietileno reticulado**. 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Curso de Engenharia de Materiais.

SILVA, Fabio Nelson da; BOCK, Prof. Dr. Eduardo Guy Perpetuo. **CARACTERÍSTICAS DO XLPE PARA ISOLAÇÃO DE CABOS PARA SISTEMAS DE ENERGIA RENOVÁVEL**. Revista Ft, [S.L.], v. 27, n. 127, p. 1-10, 6 nov. 2023. Zenodo. <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.10075183>. Disponível em: <https://revistaft.com.br/caracteristicas-do-xlpe-para-isolacao-de-cabos-para-sistemas-de-energia-renovavel/>. Acesso em: 03 mar. 2025.

BRASKEM. **Catálogo de Produto UTEC**. Disponível em:

<https://www.braskem.com.br/portal/Principal/arquivos/listas/12833/thumb.PDF?v=#:~:text=O%20ultra%20alto%20peso%20molecular,v%C3%A1rias%20aplica%C3%A7%C3%B5es%20de%20alto%20desempenho.> Acesso em: 14 de fevereiro de 2025

GUITARRARA, Paloma. **"Reciclagem"; Brasil Escola. 2025**. Disponível em:

<<https://brasilecola.uol.com.br/biologia/reciclagem.htm>>. Acesso em: 2 mar. 2025.
BRASIL. **MMA publica portaria que regula a Lei de Incentivo à Reciclagem**. Disponível em: <[MMA publica portaria que regula a Lei de Incentivo à Reciclagem — Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima](#)>. Acesso em: 19 jan. 2025.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. Artiliber editora, São Paulo, v. 24, 2010.

CICLOVIVO. **Resíduos eletrônicos aumentam 21% nos últimos 5 anos**. 2020 Disponível em: <<https://ciclovivo.com.br/planeta/desenvolvimento/residuos-eletronicos-aumenta-5-anos/>> com Acesso em: 2 mar. 2025.

Conselho de Consumidores de Energia Elétrica do Estado de Goiás CONCEG. 2024 **Crescimento do número de unidades consumidoras residenciais entre 2004 e 2023**. Disponível em: <<https://conceg.com.br/consumo-residencial-de-eletricidade-cresceu-1115-em-20-anos-aponta-pesquisa/>>. Acesso em: 2 mar. 2025.

CONDUSCOBRE. **Catálogo: Processo de Fabricação de Cabos Elétricos**. 2024. Disponível em: <<https://conduscobre.com.br/processo-de-fabricacao-de-cabos-eletricos/>>. Acesso em: 2 mar. 2025

CUCCHIARA, M. G.; BONSE, B. C. **Propriedades de PEAD contendo XLPE proveniente de revestimento de fios e cabos elétricos**. 2015. 40 f. Iniciação Científica (Engenharia de Materiais) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2015.

Barros, M. S. M. ; MARQUES, M. F. V. . **Influência das condições de reticulação do Polietileno através do método silano**. In: 10 Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPol, 2009, Foz do Iguaçu. 10 Congresso Brasileiro de Polímeros, 2009.

CONCEITO.DE. **Polietileno – O que é, conceito, tipos e propriedades**. 28 abr. 2015. Atualizado em 12 set. 2024. Disponível em: <<https://conceito.de/polietileno>>. Acesso em: 15 mar. 2025

DUTRA, José Carlos. **Materiais Poliméricos: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2018. 320 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Consumo de energia elétrica no Brasil: crescimento significativo e desempenho da classe industrial**. Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-lanca-o-anuario-estatistico-de-energia-eletrica-20-anos-um-olhar-sobre-os-20-anos-de-estatisticas-do-setor-eletrico-brasileiro>>. Acesso em: 2 mar. 2025.

Fernanda M. B. Coutinho, Ivana L. Mello, Luiz C. de Santa Maria. **Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, núm. 1, janeiro-março, 2003, pp. 1-13, Associação Brasileira de Polímeros Brasil.

FERREIRA, Eder Coelho; FECHINE, Guilhermino José Macêdo. *Física dos polietilenos: uma abordagem baseada na microestrutura e nas propriedades mecânicas*. 1. ed. São Paulo:

Editora Mackenzie, 2021. 132 p. : il. ; 23 cm.

FREITAS, R. S. **Efeito do teor e do tamanho de partícula do polietileno reticulado (XLPE) nas propriedades de engenharia de polietileno de alta densidade (HDPE)**. 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2017. Disponível em:

<<https://repositorio-api.fei.edu.br/server/api/core/bitstreams/7518d31e-9800-4295-ac4e-fcbb7be4c9de/content>>. Acesso em: 27 mai. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 11542-2: Plastics - Ultra-high-molecular-weight polyethylene (PE-UHMW) moulding and extrusion materials - Part 2: Preparation of test specimens and determination of properties. * Geneva: ISO, 1998

JORDAN, J. L.; CASEM, D. T.; BRADLEY, J. M.; DWIVEDI, A. K.; BROWN, E. N.; JORDAN, C. W. Mechanical properties of low-density polyethylene. **Journal of Dynamic Behavior of Materials**, v. 2, p. 411-420, 2016.

KUMAR, Sachin; PANDA, Achyut K.; SINGH, Raghubansh Kumar. **A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel**. Resources, Conservation and Recycling, v. 55, n. 11, p. 893-910, 2011.

LAMESA CABOS ELÉTRICOS. Processo de fabricação de cabos elétricos. 2019. Disponível em: <https://lamesa.com.br/processo_fabricacao.asp>. Acesso em: 2 mar. 2025.

MAIS POLÍMEROS. **Plásticos recicláveis**, 2020.

Disponível em: <<https://maispolimeros.com.br/2020/02/28/plasticos-reciclaveis/>>. Acesso em: 31 mar. 2025.

MANCINI, Sandro Donnini et al. Materiais Descartados no Setor Elétrico: Pers-pectivas de Reutilização e Reciclagem. In: **Latin-American congress on electricity generation and transmission**. 2009.

MORASSI, Odair José. **Polímeros termoplásticos, termofixos e elastômeros**. Conselho Regional de Química IV Região (SP). Minicursos, v. 2013, 2013.

NAZRIN, A. et al. Innovative approaches for augmenting dielectric properties in cross-linked polyethylene (XLPE): A review. *Heliyon*, v. 10, n. 8, e34737, ago. 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34737.

O SETOR ELÉTRICO. **Avaliação técnica e vida útil do TR XLPE em cabos de média tensão**. 2017 Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/avaliacao-tecnica-e-vida-util-do-tr-xlpe-em-cabos-de-media-tensao/>>. Acesso em: 2 mar. 2025.

PAULA, João José Alves de. **Cabos elétricos de potência: dimensionamento**. São Paulo: Blucher, 2023. 444 p. : il. Bibliografia.. Disponível em:

<https://storage.blucher.com.br/book/pdf_preview/PDF_caboseletricosdepotencia.pdf>.

Acesso em 15 mar. 2025

PLÁSTICO VIRTUAL. **Para que serve a micronização de polímeros**, 2025. Disponível em: <<https://plasticovirtual.com.br/para-que-serve-a-micronizacao-de-polimeros>> Acesso em: 3 mar. 2025.

PEREIRA, Tamara Lino; SILVA, Nancy Christiane Ferreira. **Melhoria da Qualidade no Processo de Extrusão**: em uma indústria de cabos elétricos. 2017.

REVISTA POTÊNCIA. Reciclagem de fios e cabos elétricos. *Revista Potência*, [S. l.], 2023. Disponível em: <<https://revistapotencia.com.br/portal-potencia/feiras-e-eventos/reciclagem-de-fios-e-cabos-eletricos/>>. Acesso em: 18 mar. 2025.

RONCA, Sara. **Polyethylene**. In: Brydson's plastics materials. Butterworth-Heinemann, 2017. p. 247-278.

Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312002187_Polyethylene> Acesso em: 30 mar. 2025.

SGA. Descarte inadequado de resíduos eletrônicos afeta meio ambiente e saúde da população, 2024. Disponível em: < <https://sga.usp.br/descarte-inadequado-de-residuos-eletronicos-afeta-meio-ambiente-e-saude-da-populacao> >. Acesso em: 2 mar. 2025.

SILVA, L. M. R. **Resíduo de polietileno reticulado (XLPE) como modificador de impacto de polipropileno**. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.fei.edu.br/items/cef5ef3a-73d6-429e-a18c-132a958d7c55/full>>. Acesso em: 2 mar. 2025.

SOUZA, Carolina Pimentel de. **Reciclagem de plásticos: estudo das metodologias aplicáveis aos resíduos industriais e pós-consumo**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/103807/000936641.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 2 mar. 2025.

TUTEJA, Jaya; VYAS, Aparna; SAND, Arpit. **Introductory Chapter: Polyethylene–Its Properties and Application in Industry and in Households**. In: Polyethylene–New Developments and Applications. IntechOpen, 2024.

THERMOPLASTIC COATING. **Types of polyethylene**, 2023. Disponível em: <<https://www.thermoplasticcoating.com/pt/types-of-polyethylene/>> Acesso em: 31 mar. 2025.

FREITAS, R. S. **Efeito do teor e do tamanho de partícula do polietileno reticulado (XLPE) nas propriedades de engenharia de polietileno de alta densidade (HDPE)**. 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2017 Disponível em:

<<https://repositorio.feis.edu.br/items/c7c9e2bd-a91e-495f-bca0-ea961d83a58f>> . Acesso em: 15 mai 2025.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha esposa, Alessandra Zimmerer, pela paciência, apoio incondicional e compreensão durante toda a minha jornada acadêmica, especialmente nos momentos mais desafiadores.

Aos engenheiros Cícera Barros e Claudio Lamelas, meu profundo reconhecimento pelo suporte intelectual, orientações técnicas e disponibilidade dos equipamentos necessários para a realização dos ensaios práticos, fundamentais para este trabalho.

Aos docentes da Faculdade SENAI Mario Amato, em especial à professora doutora Edilene de Cássia, pela disponibilização de materiais de estudo e valiosas contribuições ao meu aprendizado.

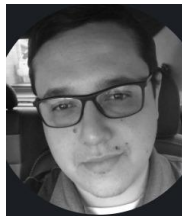
Ao professor Henry Bakos, pelo apoio na oficina da faculdade.

Por fim, mas não menos importante, ao professor e orientador Clodoaldo Lazareti, que não apenas me guiou neste trabalho, mas também abriu minha mente para novas perspectivas, contribuindo significativamente para o meu crescimento profissional e acadêmico.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

Sobre os autores:

¹ JOÃO VICTOR LANSANA



Possui graduação em Gestão da produção industrial pela Faculdade Universidade Cruzeiro do Sul (2023), cursando atualmente a Pós-Graduação em Engenharia de Polímeros pela Faculdade de tecnologia SENAI Mario Amato (2025) Tem experiência na área de processos plásticos, com ênfase em extrusão e confecção de cabos elétricos. É Coordenador de Produção na empresa YOFC Brasil unidade de Diadema responsável pelos setores de Produção.

² CLODOALDO LAZARETI (Orientador)



Possui graduação em Tecnologia Mecânica ênfase em Produção pela FATEC SP (2001) e Tecnologia de Produção com ênfase em Plásticos pela FATEC ZL (2006), especialização em Docência no Ensino Superior pela Universidade Nove de Julho (2011) e mestrado em Nanociências e Materiais Avançados pela Universidade Federal do ABC UFABC (2011). Atualmente é professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato, lecionando as disciplinas Fundamentos de Polímeros e Aditivação, blendas e compósitos no curso Tecnológico em Polímeros e disciplina Estrutura e Propriedades dos Polímeros na Pós-graduação em Engenharia de Polímeros. Tem experiência na área de Gestão de Produção, Planejamento e Controle de Produção, acompanhamento técnico de processos de injeção plástica bem como desenvolvimento de processos fabris.

