

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FABIANO CAIO JOSÉ

REVALORIZAÇÃO DE POLÍMEROS DE FIOS E CABOS ELÉTRICOS
CONTAMINADOS POR COBRE: DESAFIOS DA RECICLAGEM MECÂNICA E
CAMINHOS PARA A ECONOMIA CIRCULAR

SANTOS/SP

2025

FABIANO CAIO JOSÉ

**REVALORIZAÇÃO DE POLÍMEROS DE FIOS E CABOS ELÉTRICOS
CONTAMINADOS POR COBRE: DESAFIOS DA RECICLAGEM MECÂNICA E
CAMINHOS PARA A ECONOMIA CIRCULAR**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Mecânica, sob a orientação da Prof.^a Dra. Nelize Maria de Almeida Coelho e coorientação da Prof.^a Dra. Edilene de Cássia Dutra Nunes.

SANTOS/SP

2025

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

668.4 J71r	<p>José, Fabiano Caio. Revalorização de polímeros de fios e cabos elétricos contaminados por cobre: Desafios da reciclagem mecânica e caminhos para a economia circular / Fabiano Caio José. 2025. 118 f.</p> <p>Orientador: Dra. Nelize Maria de Almeida Coelho. Coorientador: Dra. Edilene de Cássia Dutra Nunes.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília, Programa de pós-graduação em Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Mestrado em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2025.</p> <p>1. Economia Circular. 2. polímeros. 3. PVC reciclado. 4. fios e cabos elétricos. 5. contaminação por cobre. 6. sustentabilidade. I. Coelho, Nelize Maria de Almeida . II. Revalorização de polímeros de fios e cabos elétricos contaminados por cobre.</p>
---------------	---

Elaborada via formulário eletrônico, desenvolvido pelo SIBi Unisanta, com dados informados pelo autor(a). Bibliotecário responsável: Ana Maria Racioppi Silveira - CRB/8 - 1890

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

*Dedico este trabalho à memória de meu querido amigo, **Claudio Luis Magalhães Fernandes**. Sua amizade e, acima de tudo, seu encorajamento genuíno foram a força motriz que me incentivaram a iniciar esta jornada no mestrado. Sem a sua crença em meu potencial, este caminho talvez nunca tivesse sido percorrido. Que este trabalho seja uma pequena homenagem ao seu legado e à sua memória, que me acompanhará para sempre.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho é o resultado de um esforço coletivo com apoio inestimável de muitas pessoas e instituições. Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta jornada.

Em primeiro lugar, minha eterna gratidão à minha orientadora, a Prof.^a Dr.^a Nelize Maria de Almeida Coêlho, e à minha coorientadora, a Prof.^a Dr.^a Edilene de Cássia Dutra Nunes, por toda a dedicação, paciência e valiosa orientação. O conhecimento e a experiência de vocês foram fundamentais para moldar a qualidade deste projeto.

Agradeço também, de coração, aos meus colegas de mestrado, pela amizade, troca de conhecimento e o companheirismo durante toda a jornada. Agradeço também aos coordenadores Prof. Dr. Marcos Tadeu T. Pacheco e Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa por toda a ajuda e suporte ao longo do processo.

Expresso minha sincera gratidão ao SENAI-SP, pelo espaço, infraestrutura e apoio técnico que tornaram a pesquisa viável. Da mesma forma, sou grato à Universidade Santa Cecília (UNISANTA) pela oportunidade e por me acolher em seu programa de pós-graduação.

Por fim, este trabalho não teria sido possível sem o apoio incondicional da minha família. Agradeço imensamente à minha esposa Solange Cristina Urbano José, por sua compreensão e por ser meu porto seguro, e aos meus filhos Davi Urbano José e Daniel Urbano José, que são a minha maior inspiração e a razão de todo o meu esforço.

RESUMO

A transição para a Economia Circular exige que a indústria transforme passivos ambientais em ativos tecnológicos, reduzindo a dependência de materiais virgens. Esta dissertação investigou a viabilidade técnica da revalorização do PVC de revestimento de fios e cabos elétricos pós-consumo provenientes de atividades educacionais dos cursos no SENAI-SP e de indústrias da região, contaminados residualmente por cobre, para a produção artefatos comerciais. O estudo avaliou o comportamento mecânico, características microestruturais e a processabilidade de blendas compostas por 50 % de PVC virgem e 50 % de material reciclado oriundo dessas duas fontes (SENAI-SP e industrial). As imagens de MEV/EDS confirmaram a presença de partículas metálicas (cobre) e cargas minerais na matriz reciclada, mas apontaram diferenças importantes entre as superfícies, sendo a de origem SENAI mais uniforme e com menor número de defeitos. Ensaio mecânicos demonstraram que o material do SENAI possui propriedades mais próximas ao do PVC virgem, destacando-se como o mais promissor para revalorização. Os ensaios de pressão hidrostática e de ruptura revelaram que as mangueiras produzidas com blendas com PVC do SENAI superaram em cerca de 10 % a carga de falha, o que foi atribuído à ancoragem mecânica das partículas na matriz polimérica. O uso de telas filtrantes para redução da contaminação do material reciclado na etapa de extrusão se mostrou uma estratégia eficaz e foi fundamental para a melhoria da processabilidade e da aparência do material processado, levando ao sucesso na fabricação de mangueiras. Concluiu-se que, mediante controle de processo e aditivação adequada, a reciclagem mecânica de cabos não apenas é viável, como pode gerar produtos com desempenho mecânico superior para aplicações de transporte de fluidos, consolidando uma rota efetiva de valorização de resíduos na engenharia de polímeros. Os resultados reforçam a importância da inovação tecnológica e da integração entre pesquisa e indústria para consolidar a Economia Circular como modelo produtivo sustentável.

Palavras-Chave: Economia Circular; polímeros; PVC reciclado; fios e cabos elétricos; contaminação por cobre; sustentabilidade.

ABSTRACT

The transition toward a Circular Economy requires industry to convert environmental liabilities into technological assets, thereby reducing its dependence on virgin raw materials. In this context, the present dissertation investigated the technical feasibility of revalorizing post-consumer PVC obtained from the insulation of electrical wires and cables — originating from educational activities in SENAI-SP programs and from regional industries, both exhibiting residual copper contamination — for the manufacture of commercial artifacts. The study assessed the mechanical behavior, microstructural features, and processability of polymeric blends prepared with 50 % virgin PVC and 50 % recycled material from the two sources (SENAI-SP and industrial). SEM/EDS analyses confirmed the presence of metallic particles (copper) and mineral fillers in the recycled matrix; however, they also revealed significant differences between the materials, with the SENAI-derived PVC exhibiting a more uniform surface and fewer defects. Mechanical testing indicated that the SENAI material displayed properties closer to those of virgin PVC, thereby emerging as the most promising candidate for revalorization. Hydrostatic pressure and burst tests demonstrated that hoses manufactured with SENAI-based blends exhibited approximately 10 % higher failure loads, a result attributed to the mechanical anchoring of particles within the polymer matrix. The use of filtering screens during extrusion proved effective in reducing contamination and was essential for improving both the processability and the surface finish of the extruded material, ultimately enabling the successful production of hoses. Overall, the findings confirm that, with appropriate process control and additive incorporation, the mechanical recycling of electrical cables is not only technically viable but can also yield products with enhanced mechanical performance for fluid transport applications. These results strengthen the case for an effective waste-valorization route within polymer engineering and underscore the relevance of technological innovation and research–industry integration in consolidating the Circular Economy as a sustainable productive model.

Keywords: Circular Economy; polymers; recycled PVC; electrical wires and cables; copper contamination; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Setores consumidores de transformados plásticos, em valor de consumo.	21
Figura 2: Rotas de processamento para resíduos de polímero moído.	31
Figura 3: Material polimérico industrial obtido a partir do processamento primário de fios e cabos elétricos. Cedido por empresa parceira.....	35
Figura 4: Sequência do processamento das matérias-primas utilizadas.	36
Figura 5: Moinho da RECMAX.....	37
Figura 6: Extrusora granuladora Miotto. No detalhe, o cabeçote da extrusora em que a tela foi acoplada e o material retido após o primeiro ciclo de processamento, demonstrando a grande quantidade de resíduos removidos.	38
Figura 7: Evolução do material ao longo da cadeia de reciclagem: A) material polimérico obtido após o triturador, com aproximadamente 10 % de cobre; B) cobre sem PVC retirado do triturador; C) Material virgem com aditivos (Quadro 3); D) Material após a primeira extrusão misturado ao material virgem (A+C); E) Material após a segunda extrusão e pronto para revalorização.....	40
Figura 8: Desenho esquemático e registros fotográficos dos corpos de prova produzidos para cada material, segundo norma ASTM D638-22.	43
Figura 9: Durômetro Shore ZwickRoell, utilizado para medições de Shore A e Shore D.	47
Figura 10: Unidade de testes para identificação da pressão de falha do fabricante Flutrol.....	48
Figura 11: Torta de resíduos retirada da tela filtrante que foi acoplada no cabeçote da extrusora para o PVC reciclado: A) Fonte SENAI, B) Fonte Industrial.....	51
Figura 12: Micrografias da superfície do material reciclado (blenda 50/50): A) Fonte SENAI 16x, B) Fonte SENAI 500x, C) Fonte Industrial 16x, D) Fonte industrial 500x.	52
Figura 13: Comparação entre o material SENAI (imagem A) e o Industrial (imagem B) com ampliação de 5000x.	55
Figura 14: Análise Microestrutural e Elementar (MEV-EDS) da amostra SENAI a 5000x.....	58

Figura 15: Análise Microestrutural e Elementar (MEV-EDS) da amostra Industrial a 5000x.....	59
Figura 16: Comparação das propriedades mecânicas do PVC virgem (azul), blenda SENAI (vermelho) e blenda industrial (roxo), obtidos nos ensaios de tração em duas velocidades de deslocamento (V50 e V500). Parâmetros: A) Força máxima, B) Limite de resistência, C) Alongamento e D) Módulo de Elasticidade.	61
Figura 17: Curva tensão em função da deformação para o: A) PVC virgem, B) Blenda 50/50 SENAI, C) Blenda 50/50 industrial. Os dados completos estão nos Apêndices 3 a 14.....	63
Figura 18: Compartivo de dureza Shore A e Shore D entre o PVC virgem (azul), blenda SENAI (vermelho) e blenda industrial (roxo), obtidos nos ensaios de dureza Shore A e Shore D, submetidos à: A) 1 segundo, B) 5 segundos e C) 15 segundos.	65
Figura 19: Mangueira produzida com blenda SENAI/PVC Virgem 50/50 (A), evidenciando a presença de resíduos superficiais (B), mas que não foram significativos do ponto de vista funcional do aparato.	66
Figura 20: Ensaio de ruptura da mangueira feita com a blenda SENAI/PVC Virgem (50/50).	67
Figura 21: Comparação das propriedades mecânicas do PVC virgem (azul), blenda SENAI (vermelho) e blenda industrial (roxo) envelhecidos e não envelhecidos, obtidos nos ensaios de tração com velocidades de deslocamento de 50 mm/min. Parâmetros: A) Força máxima, B) Limite de resistência, C) Alongamento e D) Módulo de Elasticidade.	70
Figura 22: Curvas comparativas de tensão <i>em função de</i> deformação dos materiais após envelhecimento: A) PVC virgem, B) Blenda 50/50 SENAI, C) Blenda 50/50 industrial. Os dados completos estão nos Apêndices 15 a 20.	71
Figura 23: Imagens de MEV (500x) das superfícies dos materiais antes e depois do intemperismo acelerado: A) PVC virgem, B) Blenda SENAI, C) Blenda industrial. ...	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparação das características dos processos de polimerização do PVC.	23
Quadro 2: Segmentos de mercado que utilizam o PVC.	24
Quadro 3: Formulação padrão de PVC para manufatura de mangueira de jardim...41	
Quadro 4: Análise Morfológica das Superfícies de Fratura (MEV-BSE, 5000x).	56
Quadro 5: Comparativo químico entre os materiais (SENAI e Industrial) no EDS....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Calcinação das amostras (PVC oriundo do recobrimento de fios e cabos elétricos) para determinação do teor de metal contaminante. Teste realizado em mufla à 550 °C por 1 h.	34
Tabela 2: Perfil de temperatura utilizado na extrusora granuladora.	38
Tabela 3: Blendas poliméricas preparadas no presente estudo.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise de Ciclo de Vida
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DOP	Diocetil Ftalato (plastificante)
ECTFE	Etileno Clorotrifluoretileno
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X
EPDM	Borracha de Etileno-Propileno-Monômero Dieno
EPR	Borracha de Etileno-Propileno
ESCR	Resistência à fratura por tensão ambiental
ETFE	Etileno Tetrafluoretileno
FEP	Etileno Propileno Fluorado
HFFR	<i>Halogen Free Fire Retardant</i> – Retardante de Chama Livre de Halogênio
IBPVC	Instituto Brasileiro do PVC
K65	Valor K65, índice de concentração específico para resina de PVC
LSZH	<i>Low Smoke Zero Halogen</i> – Halogênio com baixa emissão de fumaça
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
OSE	Óleo de Soja Epoxidado (plastificante secundário/ estabilizante)
PCR	partes por cem de resina
PE	Polietileno
PFA	Perfluoroalcóxi Alcano
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
PVDF	Poli(difluoreto de vinilideno)
REEE	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
SCG	<i>Slow Crack Growth</i> (propagação lenta de trincas)
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>
UV	Ultravioleta
V50	Velocidade de ensaio de tração (50 mm/min)
V500	Velocidade de ensaio de tração (500 mm/min)
VTEOS	Viniltriétoxissilano
VTMS	Viniltrimetoxissilano
XLPE	<i>Crosslinked Polyethylene</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Relevância	16
1.2	Problemática	17
1.3	Justificativa	19
1.4	Objetivos	20
	1.4.1 Objetivo Geral	20
	1.4.2 Objetivos Específicos	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Polímeros na indústria de fios e cabos elétricos	21
	2.1.1 Policloreto de Vinila (PVC)	22
	2.1.2 Polietileno (PE)	24
	2.1.3 Borrachas (Elastômeros)	25
	2.1.4 Fluoropolímeros	26
	2.1.5 Compostos livres de halogênio e baixa emissão de fumaça	27
2.2	Critérios de seleção do material e tendências	28
2.3	Reciclagem de plásticos	29
2.4	Estado da Arte da Reciclagem de PVC no Brasil	31
2.5	Caracterização de materiais poliméricos	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Origem e especificação das amostras	34
3.2	Preparação do material polimérico	35
3.3	Formulações das blendas	40
	3.3.1 Conformação dos produtos e corpos de prova	42
3.4	Caracterização dos materiais	43
	3.4.1 Inspeção Visual	44
	3.4.2 Microscopia Eletrônica	44
	3.4.3 Ensaio de Tração	45
	3.4.4 Ensaio de Dureza	46
	3.4.5 Ensaio de Estanqueidade	47
	3.4.6 Ensaio de Ruptura	48

3.4.7 Ensaio de Intemperismo.....	49
3.4.8 Avaliação da Processabilidade	49
3.5 Análise Estatística	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Caracterização macroscópica e aspectos visuais do material reciclado	50
4.2 Caracterização microscópica do material reciclado	51
4.3 Propriedades Mecânicas – Ensaio de Tração.....	60
4.4 Dureza	64
4.5 Ensaio de estanqueidade nas mangueiras extrudadas.	66
4.6 Ensaio de Ruptura	67
4.7 Avaliação da Processabilidade.....	68
4.8 Ensaio de Intemperismo	69
4.9 Discussão integrada e implicações para a Economia Circular	75
5 CONCLUSÕES	76
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
APÊNDICE 1: Análise Microestrutural e Elementar (MEV-EDS) da amostra proveniente do SENAI a 5000x.....	91
APÊNDICE 2: Análise Microestrutural e Elementar (MEV-EDS) da amostra de origem industrial a 5000x.	92
APÊNDICE 3: Curvas de Tração PVC Virgem com V50.	93
APÊNDICE 4: Dados Ensaio de Tração PVC Virgem com V50.	94
APÊNDICE 5: Curvas de Tração PVC Virgem com V500.	95
APÊNDICE 6: Dados Ensaio de Tração PVC Virgem com V500.	96
APÊNDICE 7: Curvas de Tração Blenda Industrial com V50.	97
APÊNDICE 8: Dados Ensaio de Tração Blenda Industrial com V50.	98
APÊNDICE 9: Curvas de Tração Blenda Industrial com V500.	99
APÊNDICE 10: Dados Ensaio de Tração Blenda Industrial com V500.	100
APÊNDICE 11: Curvas de Tração Blenda SENAI com V50.	101
APÊNDICE 12: Dados Ensaio de Tração Blenda SENAI com V50.	102

APÊNDICE 13: Curvas de Tração Blenda SENAI com V500.	103
APÊNDICE 14: Dados Ensaio Blenda SENAI com V500.	104
APÊNDICE 15: Curvas de Tração PVC Virgem Não Envelhecido com V50.	105
APÊNDICE 16: Curvas de Tração PVC Virgem Envelhecido com V50.	106
APÊNDICE 17: Curvas de Tração Blenda Industrial Não Envelhecida com V50.	107
APÊNDICE 18: Curvas de Tração Blenda Industrial Envelhecida com V50.	108
APÊNDICE 19: Curvas de Tração Blenda SENAI Não Envelhecida com V50.	109
APÊNDICE 20: Curvas de Tração Blenda SENAI Envelhecida com V50.	110
APÊNDICE 21: Ensaio de Ruptura 1 – Mangueira PVC Virgem	111
APÊNDICE 22: Ensaio de Ruptura 2 – Mangueira PVC Virgem	112
APÊNDICE 23: Ensaio de Ruptura 3 – Mangueira PVC Virgem	113
APÊNDICE 24: Ensaio de Ruptura 1 – Mangueira Material SENAI	114
APÊNDICE 25: Ensaio de Ruptura 2 – Mangueira Material SENAI	115
APÊNDICE 26: Ensaio de Ruptura 3 – Mangueira Material SENAI	116
APÊNDICE 27: Publicações com ênfase no trabalho desenvolvido	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância

A sociedade contemporânea enfrenta desafios ambientais crescentes, impulsionados em grande parte pelo modelo econômico linear de extração, produção, consumo e descarte. Este modelo tem levado ao acúmulo expressivo de resíduos sólidos, contribuindo significativamente para a contaminação do solo e da água, além de intensificar o esgotamento de recursos naturais finitos (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2009). Neste cenário, a Economia Circular surge como um paradigma alternativo e promissor, promovendo, através de práticas restauradoras e regenerativas, a ampliação dos ciclos de uso dos recursos em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo, reduzindo a geração de resíduos, de forma a permitir a regeneração dos sistemas naturais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013a; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013b).

Fios e cabos elétricos são componentes elementares na vida moderna, desde a transmissão de energia em larga escala até a alimentação de dispositivos eletrônicos em indústrias e residências (LIM, 2017; LI *et al.*, 2022). Sua estrutura é composta por um condutor metálico (geralmente cobre ou alumínio), responsável pelo transporte da corrente elétrica, e um material polimérico específico, com função de isolamento elétrico/térmico e de proteção mecânica, química e ambiental, que o envolve (PEREIRA; DOS PASSOS; FERNANDES, 2018). Portanto, resíduos oriundos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), dos quais fios e cabos elétricos constituem uma parcela significativa, representam, evidentemente, uma fonte volumosa - de composição heterogênea e bastante complexa – que precisa ser trabalhada (MACHADO, 2024; MARTINHO *et al.*, 2012).

No universo dos REEE, o polímero mais utilizado para revestimento de cabos é o Policloreto de Vinila (PVC), o qual se destaca por sua notável versatilidade, custo-benefício, propriedades isolantes e características físicas (mecânicas e térmicas). Outros polímeros também são utilizados, por exemplo, o polietileno de alta densidade (PEAD), o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polietileno reticulado (XLPE), a borracha de etileno-propileno (EPR), a borracha de etileno-propileno monômero dieno (EPDM), o silicone, os fluoropolímeros e os retardantes de chama sem halogênio

(*Halogen Free Fire Retardant* – HFFR) e com baixa emissão de fumaça (*Low Smoke Zero Halogen* – LSZH). Independentemente do polímero empregado, eles devem garantir segurança, durabilidade e desempenho eficientes em sua aplicação específica diminuindo os riscos de acidentes com a rede elétrica (MARTINHO *et al.*, 2024).

A seleção depende de uma complexa interação de fatores, incluindo tensão de operação, temperaturas ambiente/operação, condições ambientais (umidade, exposição a produtos químicos, radiação UV), requisitos de flexibilidade, resistência à abrasão e comportamento em caso de incêndio (LI *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2022; MARK, 1999). Contudo, mesmo tendo um potencial enorme de recuperação, o fim da vida útil desses materiais responde por um passivo ambiental relevante, ocupando espaços em aterros sanitários, demandando custos para destinação e contribuindo para a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos (VASCONCELOS; SIMÃO; SOUZA, 2024; MARK; ERMAN; ROLAND, 2013).

A otimização da reciclagem de polímeros provenientes de resíduos elétricos, bem como o desenvolvimento de novos materiais a partir desses substratos, especialmente o PVC, são fundamentais para uma gestão mais sustentável de resíduos e, conseqüentemente, para a promoção da Economia Circular. O seu reprocessamento eficaz permite fechar o ciclo do material e reduzir a dependência de recursos virgens (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). No entanto, a viabilidade técnica e econômica do processo ainda se apresenta como um desafio significativo (LUCHT, 2020). A heterogeneidade da matriz polimérica, que carrega aditivos plastificantes, estabilizantes térmicos e retardantes de chama, por exemplo, somada à contaminação residual de metais advinda do processo primário de reciclagem mecânica, constituem barreiras operacionais importantes a serem superadas (LAHL; ZESCHMAR-LAHL, 2024).

1.2 Problemática

O processo tradicional de reciclagem de cabos elétricos envolve etapas de trituração e separação mecânica para desagregar o metal condutor do revestimento polimérico. Embora eficiente na recuperação do metal, este processo frequentemente resulta em um material polimérico impregnado com finas partículas metálicas. A contaminação

residual, normalmente entre 5 e 10 % em massa, impacta na qualidade do material reciclado e, apesar de poder ser minimizada através de ajustes no processo, é essencialmente dependente da integridade dos fios e cabos recolhidos (CUI; FORSSBERG, 2003).

A contaminação pode ocorrer em qualquer etapa da cadeia produtiva e, dependendo da natureza e da quantidade do contaminante, pode levar à perda ou alteração de algumas propriedades do material polimérico, restringindo sua aplicação (AMIN *et al.*, 2025). Estudos indicaram que partículas metálicas atuam como pontos de concentração de tensão e defeitos na matriz polimérica, resultando em uma redução da resistência à tração, da resistência ao rasgo e da ductilidade (alongamento) do material, tornando-o frágil e inadequado para aplicações que exijam bom desempenho mecânico (AFINKO POLÍMEROS, 2019). Além disso, esse tipo de contaminação favorece problemas de processabilidade por injeção e extrusão, provocando o entupimento frequente de componentes de máquinas (como bicos de injeção), e o afloramento de partículas superficiais em produtos extrudados ou calandrados, comprometendo o acabamento, a estética e, potencialmente, sua funcionalidade para diversas aplicações (CESTARI, 2011; AMIN *et al.*, 2025).

Apesar dos desafios, a grande quantidade de material polimérico proveniente de fios e cabos elétricos descartados justifica a busca por estratégias para seu reaproveitamento sustentável. Visando a melhoria das propriedades do material reciclado, pesquisas têm explorado métodos para mitigar o problema da contaminação, como a filtração por telas durante a extrusão, a separação por densidade ou mesmo a incorporação de aditivos e blendas com material virgem. Essas soluções, todavia, impactam diretamente no valor do produto, dificultando sua reinsertão na cadeia produtiva. Nesse contexto, aplicações menos exigentes mecanicamente, como mangueiras de jardim ou mantas, surgem como possibilidades iniciais de aplicabilidade do material, mas, ainda assim, dependem da qualidade alcançável, da eficiência dos processos de descontaminação ou compatibilização e dos custos de produção.

Portanto, a problemática reside na necessidade de caracterizar detalhadamente o impacto da contaminação metálica residual nas propriedades e na processabilidade do PVC reciclado de fios e cabos, e de avaliar a eficácia de estratégias de mitigação

(como a filtração durante a extrusão ou aditivação) para viabilizar o reaproveitamento do material e sua reintrodução em produtos de maior valor agregado, não apenas como carga em aplicações para a construção civil. Sem um entendimento aprofundado e soluções para lidar com essa contaminação, um fluxo importante de resíduos plásticos continuará sendo subutilizado, representando uma perda enorme de recursos e um passivo ambiental significativo.

1.3 Justificativa

A compreensão aprofundada das propriedades físico-mecânicas do material reciclado obtido a partir de polímeros que recobrem fios e cabos elétricos constitui etapa essencial para o desenvolvimento de rotas de reciclagem mais eficientes e para a identificação de suas potencialidades e limitações em novas aplicações (JOSÉ; NUNES, 2025). Embora a dificuldade com a contaminação seja conhecida, existe uma lacuna no conhecimento sobre o real impacto dessa contaminação nas propriedades finais do polímero reciclado e sua relação com as diferentes fontes, bem como sobre a eficácia de estratégias de mitigação aplicadas durante o reprocessamento. Técnicas como a filtração por telas durante a extrusão ou a incorporação de aditivos e blendas com material virgem são mencionadas, mas sua capacidade de restaurar propriedades ou viabilizar aplicações específicas necessita de avaliação sistemática e científica. Falta uma caracterização aprofundada que correlacione o nível de contaminação (ou a eficácia da sua remoção/mitigação) com o desempenho mecânico e a processabilidade do material resultante (VAN VELZEN *et al.*, 2021).

Dessa forma, este estudo justifica-se pela necessidade premente de investigar cientificamente as propriedades e a processabilidade dos polímeros reciclados de fios e cabos elétricos, focando no desafio da contaminação metálica residual. O estudo concentra-se em apresentar uma caracterização detalhada do material proveniente de fontes distintas, avaliar estratégias para o seu processamento (como extrusão com filtração e aditivação) e realizar prova de conceito através da confecção de mangueiras e mantas a partir do material reciclado. A validação técnica se mostra essencial para definir estratégias de revalorização que integrem esse material à indústria, alinhando-se às diretrizes da Economia Circular.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica do reaproveitamento de PVC do recobrimento de fios e cabos elétricos pós-consumo, investigando o impacto da contaminação metálica residual em suas propriedades físico-mecânicas e processabilidade, e analisando estratégias de processamento para a revalorização desses materiais no contexto da Economia Circular.

1.4.2 Objetivos Específicos

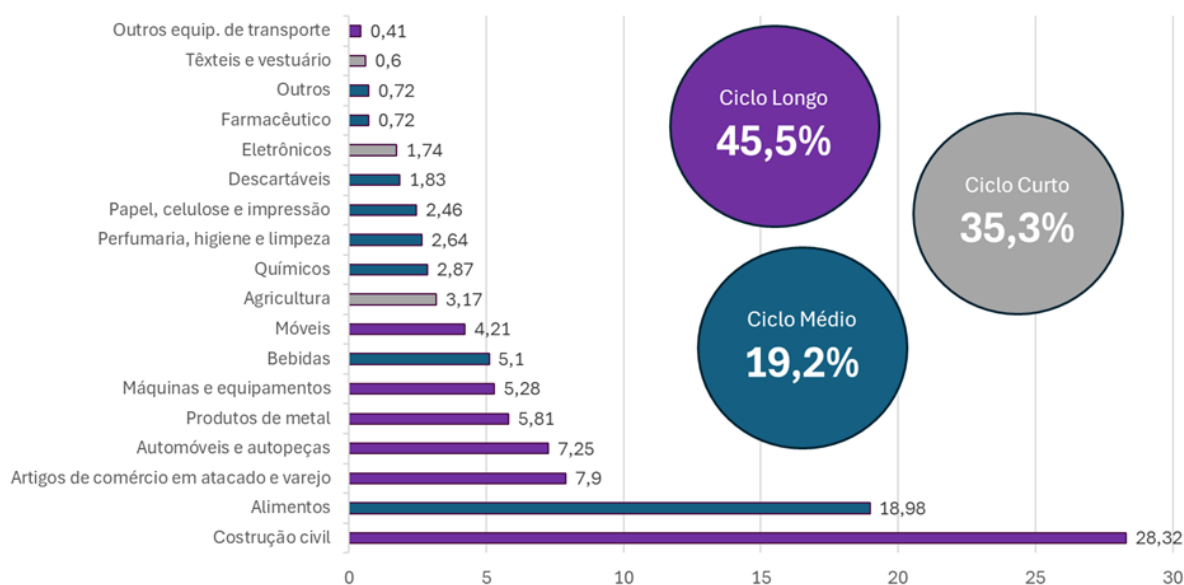
Visando alcançar o objetivo geral do trabalho, teve-se como objetivos específicos:

- a) Realizar o processamento e a reciclagem de fios e cabos elétricos provenientes de duas fontes distintas: a) SENAI-SP, resultante de resíduos de aulas nas áreas de elétrica e automação e, b) Industrial, fornecidos por uma empresa parceira interessada em reciclar o material;
- b) Avaliar qualitativamente o material polimérico reciclado, com ênfase no nível de contaminação visual e sua influência sobre as propriedades físico-mecânicas e de processabilidade;
- c) Avaliar quantitativamente o impacto da contaminação metálica nas propriedades mecânicas-chave (resistência à tração, alongamento na ruptura, módulo de elasticidade, dureza e resistência ao rasgo) e na processabilidade (observando dificuldades em processos de extrusão, calandragem e injeção) do polímero reciclado.
- d) Investigar a eficácia de estratégias de processamento para mitigar os efeitos da contaminação, especificamente a filtração por telas durante a extrusão e a incorporação de aditivos (plastificantes, estabilizantes, lubrificantes) no PVC virgem para confecção de blenda com material reciclado comparando as propriedades do material processado com o material original contaminado;
- e) Produzir protótipos de produtos com material reciclado, como mangueiras (via extrusão) utilizando blenda de polímero reciclado e PVC virgem e avaliar suas características funcionais e de acabamento (por exemplo, estanqueidade, integridade superficial, presença de partículas visíveis);

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Polímeros são macromoléculas formadas pela repetição regular de unidades estruturais menores, os monômeros, unidas entre si por ligações covalentes. Essa repetição pode ocorrer centenas ou milhares de vezes, originando cadeias longas de massas molares elevadas – geralmente superiores a 10.000 g/mol – e propriedades versáteis. São utilizados nas mais diversas áreas e em produtos que apresentam desde ciclos de vida curtos – de até um ano de uso – até ciclos longos – acima de cinco anos, podendo chegar a 50 anos de uso (NUNES; LOPES, 2014). Na Figura 1 apresenta-se um infográfico dos setores consumidores de transformados de plástico e o tempo de ciclo de vida destes materiais.

Figura 1: Setores consumidores de transformados plásticos, em valor de consumo.



Fonte: ABIPLAST (2024).

2.1 Polímeros na indústria de fios e cabos elétricos

Diversos tipos de polímeros termoplásticos e termofixos são empregados na indústria de fios e cabos elétricos, cada um apresentando um conjunto característico de propriedades físicas, químicas e elétricas que determinam seu desempenho e adequação a diferentes aplicações.

O policloreto de vinila (PVC) é amplamente reconhecido como o principal material utilizado na fabricação de fios e cabos elétricos, devido à sua excelente relação custo-benefício, facilidade de processamento e boas propriedades de isolamento, resistência à chama e à umidade (IGUS, 2024). Na instituição SENAI-SP, em que esta pesquisa foi desenvolvida, 98,7% dos revestimentos poliméricos de fios e cabos, empregados nas aulas (mais de 10 toneladas anuais) são compostos à base de PVC, evidenciando sua predominância nas aplicações práticas. Em nível mundial, o PVC também se mantém como o polímero mais utilizado na faixa de baixa tensão (até 1.000 V), o que justifica a delimitação deste estudo exclusivamente a esse material, dada sua relevância técnica e representatividade industrial.

2.1.1 Policloreto de Vinila (PVC)

O policloreto de vinila é um polímero termoplástico obtido pela polimerização em cadeia do monômero cloreto de vinila (C_2H_3Cl). Sua polimerização ocorre por mecanismo radicalar, em que um iniciador, ex. peróxido de benzofila, se decompõe para gerar radicais livres. Esses radicais, por sua vez, reagem com outra molécula de monômero, adicionando-a à cadeia e regenerando o radical na extremidade da cadeia polimérica, que cresce, sucessivamente (NUNES; SANTOS, 2015).

A polimerização do PVC pode ser realizada por diferentes processos, com características específicas que influenciam as propriedades do produto. No processo em suspensão, o monômero é disperso em água sob a forma de pequenas gotículas estabilizadas por agentes de suspensão, nas quais ocorre a reação, originando partículas esféricas de PVC. Já na polimerização em emulsão, utiliza-se um sistema semelhante, porém com a adição de emulsificantes que formam micelas, no interior das quais se dá a polimerização. A microsuspenção apresenta semelhanças com o processo em emulsão, diferenciando-se pelo uso de um iniciador solúvel no monômero e pela completa emulsificação deste por homogeneização mecânica sob altas taxas de cisalhamento, o que resulta em partículas ainda menores e mais uniformes. Por fim, na polimerização em massa, o monômero é convertido diretamente em polímero sem o uso de solventes ou dispersantes, proporcionando um produto de elevada pureza, embora com maior complexidade de controle térmico

e de viscosidade durante a reação (RODOLFO JR.; TSUKAMOTO, 2018). Apresenta-se no Quadro 1, um resumo comparativo entre os vários processos de polimerização.

Quadro 1: Comparação das características dos processos de polimerização do PVC.

PROCESSO	TAMANHO DAS PARTÍCULAS	PUREZA	APLICAÇÕES	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Suspensão	Grandes	Moderada	Tubos, perfis	Simple, baixo custo	Ampla distribuição granulométrica
Massa	Pequenas	Alta	Filmes, revestimentos	Alta pureza	Complexo, custo elevado
Microssuspensão	Muito pequenas	Alta	Plastificantes, compostos para injeção	Controle de tamanho	Custo elevado
Emulsão	Muito pequenas	Alta	Adesivos, tintas	Alta reatividade	Dificuldade remoção de emulsificantes

Fonte: Adaptado de RODOLFO Jr.; TSUKAMOTO (2018).

O policloreto de vinila apresenta um conjunto de propriedades que justificam sua ampla utilização industrial (Quadro 2). Trata-se de um material quimicamente resistente a ácidos, bases e diversos solventes orgânicos, sendo elegível para utilização em tubulações e revestimentos. Além disso, é um excelente isolante térmico e elétrico, sendo resistente à chama devido à presença de cloro em sua estrutura. O PVC possui boa resistência à tração e pode apresentar diferentes níveis de dureza, variando de rígido a altamente flexível conforme os aditivos incorporados. Exibe ainda estabilidade térmica em uma ampla faixa de temperatura, é impermeável a líquidos e gases e considerado atóxico quando utilizado conforme as normas de segurança. Sua versatilidade é ampliada pela compatibilidade com diversos processos de moldagem, possibilitando a fabricação de produtos para os mais variados segmentos industriais (RODOLFO JR.; TSUKAMOTO, 2018; ZWEIFEL; MAIER; SCHILLER, 2009).

Historicamente, o policloreto de vinila é um dos materiais mais utilizados para a isolação e revestimento de cabos elétricos, especialmente em aplicações de baixa tensão – como em instalações prediais, equipamentos eletrônicos e em automóveis - devido ao seu baixo custo, boas propriedades dielétricas e flexibilidade (PRYSMIAN GROUP, [202-?]), No entanto, encontra limitações importantes de uso em altas temperaturas, já que os plastificantes usados para tornar o material flexível podem vazar, levando ao endurecimento e à rachadura do isolamento. Ademais, em caso de incêndio (combustão), o PVC libera uma fumaça escura e opaca e gases tóxicos e

corrosivos, devido à presença de cloro em sua composição, o que tem levado à busca por materiais alternativos para aplicações onde a segurança contra incêndio é crítica (MARTINKA *et al.*, 2018). No Brasil, normas como a ABNT NBR 7288 (2018) especificam os requisitos para cabos isolados com PVC.

Quadro 2: Segmentos de mercado que utilizam o PVC.

SEGMENTO DE MERCADO	PRINCIPAIS APLICAÇÕES
Construção civil	Tubos, conexões/acessórios, perfis, janelas, forros, portas, rodapés, divisórias, pisos, papel parede, quadros de distribuição de eletricidade, eletrodutos;
Infraestrutura	Tubos e conexões para drenagem, saneamento de água/esgoto, adução, distribuição água e escoamento de esgoto;
Calçados	Solados, calçados, laminado em PVC com reforço para forros de calçados, laminado em PVC para cabedal;
Transportes	Lona de caminhão para coberturas de carga a granel, lona para transportes ferroviários e marítimos;
Agropecuário	Tubos e conexões para irrigação, mangueiras, lonas, geomembranas;
Automobilístico	Laminados sintéticos com ou sem reforço para automóveis, pisos, bancos, painéis de instrumentos, revestimentos internos, mangueiras e fios elétricos;
Alimentos	Berços e bandejas, blister, filmes (esticável e encolhível);
Higiene, Limpeza, Farma	Frascos, blister de medicamentos, filme <i>skin</i> (encartelamento);
Médico Hospitalar	Bolsas de sangue/soro, tubos para transfusão de sangue, luvas cirúrgicas;
Elétricos/Eletroeletrônicos	Isolação de fios e cabos, carcaças de equipamentos eletrônicos;
Indústria de brinquedos	Bonecas, bolas, piscinas infláveis;
Outros	Vestuário/acessórios, brinquedos, cartões, comunicação visual, utilidades domésticas, piscinas

Fonte: IBPVC (2023).

2.1.2 Polietileno (PE)

O polietileno é outro polímero amplamente empregado pela indústria de cabos e fios elétricos, destacando-se por suas excelentes propriedades dielétricas – como baixa permissividade, reduzido fator de perdas e elevada resistividade elétrica -, além de

apresentar boa resistência à umidade (STEVENS, 1998). Trata-se de um termoplástico parcialmente cristalino e de elevada flexibilidade, cujas propriedades físico-químicas são fortemente influenciadas pela proporção relativa entre as fases amorfa e cristalina e pelo grau e tipo de ramificação das cadeias moleculares. Sua natureza parafínica, associada ao alto peso molecular e à estrutura parcialmente cristalina confere-lhe inércia química frente à maioria dos agentes comuns (PEACOCK, 2000; HARPER, 2002).

A classificação contemporânea dos polietilenos baseia-se fundamentalmente em sua estrutura molecular – linear ou ramificada – e em sua densidade, parâmetros determinados pelo tipo de processo de polimerização adotado e, sobretudo, pelo sistema catalítico utilizado, como também de possíveis tratamentos realizados após a polimerização que alteram as propriedades dos polietilenos (SINGH; SILVERMAN, 1991; SIRISINHA; BOONKONGKAEW; KOSITCHAIYONG, 2010; COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

Essas variáveis estruturais são responsáveis pelas distintas famílias de polietileno disponíveis comercialmente, como o polietileno de alta densidade (PEAD), o de baixa densidade (PEBD), o polietileno reticulado – XLPE, entre outros, cada um com características específicas de desempenho mecânico, térmico e elétrico, adequadas a diferentes aplicações industriais (MONTANARI; FABIANI; PALMIERI, 2003).

Para a aplicação na área de fios e cabos elétricos, existem requisitos mínimos que devem ser atendidos que são descritos em normas técnicas como, por exemplo, a ABNT NBR 7287 (2023), ABNT NBR 13248 (2015), ASTM D2863 (2019), ASTM F876-23 (2023).

2.1.3 Borrachas (*Elastômeros*)

As borrachas sintéticas desempenham um papel essencial em diversas indústrias devido às suas propriedades elásticas, resistência a condições severas e versatilidade de aplicação. Dentre a vasta gama de elastômeros disponíveis, a borracha de Etileno-Propileno (EPR), a borracha de Etileno-Propileno-Monômero Dieno (EPDM) e a borracha de Silicone se destacam por suas características e aplicações específicas (GENT, 2012; HOFMANN, 1989; KUMAR; ALAM; PARK, 2024).

A borracha de Etileno-Propileno (EPR) é um copolímero de etileno e propileno. Sua estrutura saturada confere excelente resistência ao ozônio, intemperismo e ataques químicos (MARK; ERMAN; ROLAND, 2013). A ausência de insaturações na cadeia principal torna a EPR intrinsecamente resistente à degradação por raios UV e oxidação, o que lhe garante uma longa vida útil em aplicações expostas a ambientes agressivos (GILBERT, 2016).

Já a borracha de EPDM é um terpolímero que incorpora um terceiro monômero não conjugado (dieno) à estrutura do EPR. A introdução do dieno proporciona sítios de insaturação na cadeia lateral, o que possibilita a vulcanização eficiente com enxofre (KRUŽELÁK *et al.*, 2024). Essa capacidade de vulcanização melhora significativamente as propriedades mecânicas da EPDM, como resistência à tração e alongamento na ruptura (ZHEHONG *et al.*, 2023).

A borracha de Silicone, também conhecida como polissiloxano (AHMAD *et al.*, 2025) difere significativamente das borrachas orgânicas como EPR e EPDM, pois sua cadeia principal é composta por átomos de silício e oxigênio ($-Si - O - Si - O-$) (WARRICK *et al.*, 1979). Essa estrutura inorgânica confere à borracha de silicone propriedades únicas, incluindo excelente resistência a altas e baixas temperaturas, estabilidade térmica e resistência à radiação UV e ozônio, podendo ser aplicada como isolamento em cabos de potência (ABNT NBR 7286, 2022; BAZLI *et al.*, 2021; DOW CORNING, [20--?]; HAN *et al.*, 2022).

2.1.4 Fluoropolímeros

Fluoropolímeros são uma classe de polímeros que contêm átomos de flúor em sua estrutura química, predominantemente ligados a átomos de carbono (BUCK *et al.*, 2011; CASSIDY, 2004; EBNESAJJAD, 2000; LAGAN; KESTNER, 1999). A ligação carbono-flúor ($C - F$) é uma das ligações covalentes mais fortes, conferindo a esses materiais uma combinação única de propriedades, como excepcional estabilidade térmica, inércia química, baixas propriedades dielétricas, baixo coeficiente de atrito e excelente resistência a intempéries e radiação UV (EBNESAJJAD, 2013; SCHEIRS, 1997; SCHEIRS, 2001). Essas características tornam os fluoropolímeros materiais de escolha para o revestimento de fios e cabos elétricos destinados a aplicações exigentes, onde polímeros convencionais como PVC ou polietileno não seriam

adequados (KRYCZEWSKI, 1989; ESMAIL, 2020; KHONAKDAR, 2003). Materiais como PTFE (Politetrafluoretileno), FEP (Etileno Propileno Fluorado) e ETFE (Etileno Tetrafluoretileno) possuem altíssima resistência térmica e química, excelentes propriedades dielétricas em ampla faixa de frequência e temperatura, baixo coeficiente de atrito e boa resistência à chama (HENRY; SEILER; PERRINAUD, [20--?]). Seu alto custo, todavia, restringe seu uso a aplicações críticas, como na indústria aeroespacial, militar, química e em cabos de dados de alta performance – cabos *plenum* (TENG, 2012; FERREIRA; DOS SANTOS, 2020).

2.1.5 Compostos livres de halogênio e baixa emissão de fumaça

Os compostos livres de halogênio e baixa emissão de fumaça - HFFR (*Halogen-Free Flame Retardant*) ou LSZH (*Low Smoke Zero Halogen*) - representam uma classe de materiais poliméricos desenvolvidos para mitigar os riscos associados à combustão de cabos elétricos convencionais, especialmente aqueles baseados em Policloreto de Vinila (PVC). Em situações de incêndio, cabos tradicionais podem liberar grandes quantidades de fumaça densa e tóxica e gases corrosivos, como o cloreto de hidrogênio (HCl) (WEI *et al.*, 2010).

Este fato, além de poder causar danos permanentes a equipamentos eletrônicos e estruturas metálicas (mesmo em áreas não diretamente atingidas pelas chamas), dificulta bastante a evacuação do local do sinistro por reduzir drasticamente a visibilidade, dificultando a fuga e as operações de resgate, o que representa um sério risco à saúde humana (HULL; WITKOWSKI; HOLLINGBERY, 2011; WILKIE; MORGAN, 2024). Existem normas que especificam e medem a quantidade de fumaça emitida quando um material plástico é queimado e devem ser consultadas para estabelecer os requisitos mínimos dos materiais que serão utilizados (IEC 61034-2:2005+AMD1:2013+AMD2:2019 CSV, 2019; NFPA 262, 2023).

Devido às suas características de segurança aprimoradas, os cabos HFFR/LSZH são preferencialmente utilizados em locais com alta concentração de pessoas, equipamentos de alto valor ou onde a evacuação rápida é crítica como por exemplos edifícios públicos (hospitais, escolas, aeroportos, shoppings), túneis e sistemas de metrô, plataformas offshore e embarcações, instalações industriais com equipamentos sensíveis. Fabricantes nacionais como a Prysmian e a Furukawa

possuem linhas de produtos LSZH/HFFR para atender a essa demanda (PRYSMIAN GROUP BRASIL, [202-?]; FURUKAWA ELECTRIC LATAM, [202-?]).

2.2 Critérios de seleção do material e tendências

Polímeros são componentes indispensáveis na construção de fios e cabos elétricos, proporcionando isolamento elétrico essencial e proteção contra uma variedade de fatores ambientais e mecânicos. A diversidade de materiais disponíveis, incluindo PVC, XLPE, elastômeros especializados e fluoropolímeros, permite a engenharia de cabos adaptados às mais variadas aplicações e condições operacionais. A seleção criteriosa desses polímeros, fundamentada em normas técnicas nacionais (ABNT) e internacionais (IEC, UL etc.) como as citadas anteriormente, e nas exigências específicas de cada aplicação, é vital para garantir a confiabilidade e segurança dos sistemas elétricos. A escolha do polímero adequado envolve a análise de múltiplos fatores, como por exemplo:

- a) Requisitos elétricos: tensão nominal, rigidez dielétrica, fator de perdas (IEC 60502-2:2014+AMD1:2024 CSV, 2024);
- b) Requisitos térmicos: temperatura máxima de operação contínua, em sobrecarga e em curto-circuito, temperatura mínima de instalação e operação (IEC 60332-1-2:2004; IEC 60502-2:2014+AMD1:2024 CSV, 2024);
- c) Requisitos mecânicos: flexibilidade, resistência à tração, alongamento, abrasão, impacto e esmagamento (MIL-W-22759 / SAE AS22759, 2025);
- d) Requisitos ambientais: resistência à umidade, luz solar (UV), ozônio, óleos, produtos químicos;
- e) Requisitos de segurança contra incêndio: resistência à propagação de chama, densidade de fumaça, toxicidade e corrosividade dos gases emitidos (IEC 60754-1:2011+AMD1:2019 CSV, 2019; IEC 60754-2:2011+AMD1:2019 CSV, 2019; IEC 61034-2:2005+AMD1:2013+AMD2:2019 CSV, 2019; UL-94, 2023).
- f) Custo e processabilidade: fator econômico e facilidade de extrusão e manuseio.

Impulsionada por demandas crescentes por maior desempenho, segurança especialmente em caso de incêndio e sustentabilidade, a ciência dos polímeros está em contínua evolução. As tendências atuais refletem essa evolução, focando no desenvolvimento de materiais com maior capacidade de corrente (permitindo temperaturas de operação mais elevadas), maior vida útil e menor impacto ambiental. Destaca-se, principalmente, a contínua expansão do uso de materiais LSZH/HFFR para aumentar a segurança das instalações elétricas (IGI *et al.*, 2012). Essa dinâmica assegura que novos e aprimorados materiais continuarão a surgir para atender aos desafios futuros da indústria elétrica (KACZOREK-CHROBAK; FANGRAT, 2020).

2.3 Reciclagem de plásticos

A reciclagem de materiais plásticos pós-consumo é uma estratégia essencial para reduzir o consumo de recursos naturais, minimizar a geração de resíduos e mitigar impactos ambientais. Os principais métodos incluem a reciclagem mecânica (trituração, lavagem, secagem, reprocessamento por extrusão/injeção), a reciclagem química (despolimerização ou transformação em insumos químicos) e a recuperação energética (incineração com aproveitamento de energia) (PIVA; BAHIENSE NETO; WIEBECK, 1999).

A reciclagem mecânica constitui a rota mais amplamente empregada para o reaproveitamento de termoplásticos, como o PVC e o PE. Entretanto, quando o material de origem provém de fios e cabos elétricos, a técnica enfrenta desafios operacionais e tecnológicos específicos que comprometem a eficiência do processo e a qualidade do produto reciclado (GOHATRE *et al.*, 2020):

- a) Heterogeneidade composicional: os recobrimentos poliméricos variam significativamente conforme a aplicação original, apresentando diferentes tipos e teores de plastificantes, estabilizantes, pigmentos e cargas minerais (MAZITOVA *et al.*, 2022). Essa variabilidade dificulta a padronização do processo de reciclagem e o controle das propriedades finais do material;
- b) Contaminação metálica residual: durante a separação mecânica, partículas finas de metais condutores, como cobre e alumínio, frequentemente permanecem aderidas ou mesmo incrustadas na matriz polimérica, não sendo completamente

removidas nas etapas primárias de trituração e separação. Essas partículas metálicas dispersas na matriz polimérica atuam como concentradores de tensão, favorecendo a iniciação e a propagação de trincas sob esforços mecânicos, e levam a uma redução da resistência à tração, do alongamento na ruptura — indicando perda de ductilidade — e da resistência ao rasgo, resultando em um material mais frágil e suscetível à falha prematura. Além disso, durante o reprocessamento, as partículas metálicas causam problemas como abrasão de equipamentos, entupimento de filtros e bicos de injeção, e afloramento na superfície dos produtos, comprometendo o acabamento estético e funcional (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005);

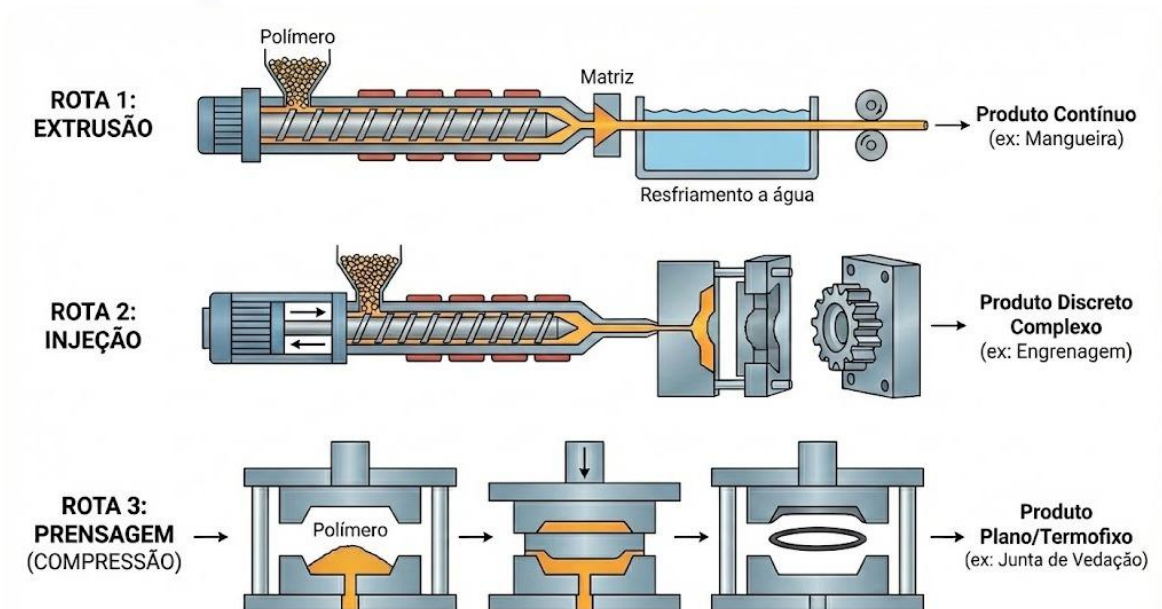
- c) Degradação termomecânica: os polímeros podem sofrer cisão de cadeias, oxidação e desestabilização térmica ao longo dos sucessivos ciclos de processamento, resultando em perda de propriedades físicas, alteração de cor e redução da estabilidade térmica e elétrica do material reciclado (DISSADO; FOTHERGILL, 1992; KHAN *et al.*, 2022; BREBU *et al.*, 1999).

No contexto da reciclagem mecânica de polímeros provenientes de fios e cabos elétricos, as etapas subsequentes de transformação do material reprocessado são determinantes para sua reinserção na cadeia produtiva. Entre as alternativas de conformação disponíveis, destacam-se três principais rotas de fabricação (Figura 2):

- a) Extrusão: a mais adequada para este tipo de material. Amplamente empregada na produção de tubos, mangueiras e perfis utilizados na construção civil e em aplicações industriais. Essa técnica apresenta maior tolerância à presença de contaminantes e permite o controle mais estável do fluxo do polímero, mostrando-se robusta para o processamento de compostos reciclados (GARCIA *et al.*, 2014).
- b) Injeção: se caracteriza pela possibilidade de moldagem de peças com geometrias complexas, como pisos táteis, componentes modulares ou peças técnicas. No entanto, trata-se de um método mais sensível às impurezas e à estabilidade reológica do material, exigindo um grau de pureza significativamente superior para garantir o enchimento uniforme do molde e evitar falhas no produto (CHACIŃSKI; SUTOWSKI, 2021).
- c) Prensagem (ou Moldagem por Compressão): é um processo utilizado

principalmente para a fabricação de produtos planos ou feitos de polímeros termofixos, como juntas de vedação. O método consiste em colocar uma quantidade pré-determinada de polímero (geralmente em pó ou pré-forma) diretamente em uma cavidade de molde aquecida; em seguida, o molde é fechado por uma prensa hidráulica, aplicando calor e alta pressão para que o material preencha toda a geometria da matriz. Diferente da extrusão e da injeção, que utilizam roscas transportadoras para plastificar o material, a prensagem foca na conformação direta pela força mecânica, resultando em peças com boas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional (MANRICH, 2013).

Figura 2: Rotas de processamento para resíduos de polímero moído.



Fonte: O autor (2025), com auxílio da IA.

2.4 Estado da Arte da Reciclagem de PVC no Brasil

O Policloreto de vinila mantém uma posição de relevância no panorama da indústria plástica nacional e internacional. Globalmente, o material representa 12,8 % da produção de resinas plásticas de base fóssil e, no Brasil, é a terceira resina plástica mais consumida, sendo 15 % do consumo total das principais resinas em 2024, conforme dados do Perfil da ABIPLAST (2025).

Apesar de seu significativo volume de consumo, o estado da arte da reciclagem de PVC no Brasil reflete um desafio particular. O índice de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil é de apenas 21 %, enquanto para o PVC este índice se situa em apenas 9,9 % (ABIPLAST, 2025). A principal justificativa para a disparidade entre o alto consumo (15 %) e o baixo índice de reciclagem (9,9 %) reside na natureza intrínseca das aplicações do PVC, que define o atual estado da arte do material:

- a) **Concentração na Construção Civil:** Conforme pontua Tsukamoto (2023), diretora executiva do IBPVC, o PVC possui a maioria das aplicações na Construção Civil. Esta é a característica fundamental que diferencia o PVC de outros plásticos com alto volume de resíduo imediato. Produtos como tubos, conexões, forros e perfis possuem um ciclo de vida útil prolongado, muitas vezes ultrapassando décadas.
- b) **Retardo no fluxo de resíduo:** diferente dos plásticos de uso único (cuja taxa de reciclagem geral no Brasil é de 11 %), os produtos de longa durabilidade do PVC retardam significativamente sua chegada à fase pós-consumo e, conseqüentemente, ao fluxo de coleta e reciclagem. O baixo índice atual reflete, portanto, a estrutura de mercado e a longevidade dos produtos, e não uma inviabilidade técnica do processo de reciclagem, que é comprovadamente existente.

Resumindo, a reciclagem de PVC no Brasil é marcada por uma reflexão, pois é uma das resinas mais consumidas, mas seu índice de reciclagem pós-consumo é baixo devido, majoritariamente, ao tempo de vida estendido de suas principais aplicações. O avanço setorial reside na mudança de foco estratégico, direcionando esforços para o ciclo de vida dos produtos descartáveis, a fim de aumentar os índices de forma responsável e sustentável.

2.5 Caracterização de materiais poliméricos

A avaliação das propriedades dos polímeros reciclados é fundamental para determinar sua adequação a novas aplicações. Pode-se citar como principais ensaios para caracterização:

- a) Ensaio mecânico: testes como o de tração (segundo normas como a ASTM D638) permitem quantificar propriedades como limite de resistência à tração (MPa), módulo de elasticidade (MPa) e alongamento na ruptura (%). Ensaio de rasgo (ASTM D1004-21) e dureza Shore (ASTM D2240-21) complementam a caracterização mecânica;
- b) Comportamento viscoelástico: os polímeros exibem viscoelasticidade, ou seja, sua resposta mecânica depende da taxa de deformação (velocidade do ensaio) e da temperatura. Em geral, taxas de deformação mais altas levam a um aumento da rigidez (módulo) e da resistência, mas a uma diminuição da capacidade de deformação (alongamento) (CANEVAROLO JR., 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção detalha os materiais utilizados, os procedimentos de preparação e processamento das amostras, os equipamentos empregados e os métodos de caracterização e análise aplicados neste estudo.

3.1 Origem e especificação das amostras

A matéria-prima utilizada foi o Policloreto de Vinila em sua forma reciclada, obtido a partir do processamento de resíduos pós-consumo de fios e cabos elétricos provenientes de duas fontes distintas:

- a) Fonte SENAI: coletado *in natura* nas escolas do SENAI-SP. Em dois anos de arrecadação, foram obtidos 21.374 kg de fios/cabos descartados em aulas das áreas de elétrica e automação, que se fracionaram em 15.045 kg de cobre e 6.329 kg de polímeros, resultando em uma média anual de 3.164,5 kg de PVC com, aproximadamente, 11 % de cobre (Tabela 1);
- b) Fonte Industrial: proveniente de uma empresa agregadora de resíduos da Grande São Paulo. O material foi recebido na forma triturada, após passar por um processo primário de moagem e separação do metal condutor e continha, cerca de, 10 % de partículas metálicas residuais – principalmente cobre, mas também alumínio e outros – (Tabela 1).

Tabela 1: Calcinação das amostras (PVC oriundo do recobrimento de fios e cabos elétricos) para determinação do teor de metal contaminante: ensaio em mufla à 550 °C por 1 h.

	Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	% Metal Residual
SENAI-SP	1	5,78	0,644	11,1
	2	5,84	0,635	10,9
	3	6,02	0,619	10,3
	Média: 10,76			
INDUSTRIAL	1	5,95	0,553	9,30
	2	6,05	0,617	10,20
	3	5,47	0,569	10,40
	Média: 9,97			

Fonte: O autor (2025).

As amostras utilizadas nesse estudo apresentavam-se em diferentes estágios do processo de reciclagem. A amostra proveniente do SENAI-SP encontrava-se em seu estado bruto (*in natura*), demandando a realização integral das etapas de separação e moagem para obtenção do PVC a ser trabalhado. Em contrapartida, a amostra de origem industrial já havia passado por um processamento inicial, apresentando-se pré-moída e livre da fração metálica mais grosseira (Figura 3).

Figura 3: Material polimérico industrial obtido a partir do processamento primário de fios e cabos elétricos. Cedido por empresa parceira.



Fonte: O autor (2025).

3.2 Preparação do material polimérico

O processamento das amostras, a preparação das blendas de material polimérico e a fabricação de produtos a partir do material compósito foram integralmente realizados na planta piloto do SENAI-SP, localizada na unidade de São Bernardo do Campo/SP.

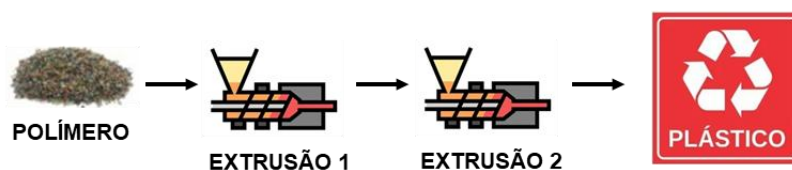
O tratamento da matéria-prima proveniente do SENAI-SP ocorreu desde a trituração mecânica inicial dos fios e cabos coletados, enquanto a matéria-prima de origem industrial foi processada a partir de uma etapa posterior, por já se encontrar pré-moída. O esquema apresentado na Figura 4 ilustra todo o processo de beneficiamento das matérias-primas utilizadas neste estudo.

Figura 4: Sequência do processamento das matérias-primas utilizadas.

a) Material SENAI-SP:



b) Material Industrial:



Fonte: O autor (2025).

Conforme é ilustrado na Figura 4, os fios e cabos arrecadados pelo SENAI passaram por uma etapa preliminar de desagregação mecânica, que foi realizada em um moinho granulador, modelo MS100 da RECMAX (Figura 5). Esta etapa fragmentou o material e promoveu a separação dos componentes metálicos (cobre) e da isolação polimérica (PVC) por granulometria. Após a trituração, o fluxo do material foi dividido: o metal, predominantemente cobre, foi segregado e direcionado à sua respectiva cadeia de reciclagem, enquanto a fração polimérica, seguiu para ser utilizada no estudo. Ao final dessa etapa, o material originário do SENAI atingiu o estágio da amostra industrial.

Os materiais triturados (SENAI e Industrial), os quais ainda compreendiam elevada concentração de contaminantes metálicos, foram, então, lavados e condicionados em uma estufa da marca Fabbe Primar para retirada da umidade residual.

Figura 5: Moinho da RECMAX.

Fonte: O autor (2025).

Na sequência, os materiais foram direcionados para uma etapa de extrusão, sendo processados individualmente. A extrusora granuladora, da marca Miotto (Figura 6), foi utilizada para promover a purificação do PVC e para homogeneizar as blendas produzidas (em uma etapa quente), sendo operada com telas metálicas de 40 *mesh* de abertura acopladas ao seu cabeçote, com a rosca à 60 rpm e com o perfil de temperatura ajustado conforme a Tabela 2. Visando maximizar a pureza do material reciclado, foi implementado um procedimento de troca sistemática das telas a cada 8 minutos de operação para evitar a saturação e manter a eficiência da filtração. As telas metálicas atuaram como um filtro, já que o material oriundo da primeira etapa (contendo elevada concentração de contaminantes metálicos) foi forçado a atravessá-las, deixando as partículas de metal mais salientes retidas. A necessidade desta etapa está evidenciada no detalhe da Figura 6, em que é possível observar a saturação da tela após o processo e o material retido, o qual era composto por metal, impurezas e material degradado.

Tabela 2: Perfil de temperatura utilizado na extrusora granuladora.

Zona	1	2	3	4	5	6
Temperatura (°C)	118	143	126	135	121	139

Fonte: O autor (2025).

Figura 6: Extrusora granuladora Miotto. No detalhe, o cabeçote da extrusora em que a tela foi acoplada e o material retido após o primeiro ciclo de processamento, demonstrando a grande quantidade de resíduos removidos.

Fonte: O autor (2025).

A determinação da abertura da tela de filtragem constituiu um parâmetro importante para a viabilidade deste estudo, definindo as condições operacionais de processamento. Testes comparativos iniciais demonstraram que telas de 30 *mesh* (0,595 mm) permitiam a passagem excessiva de contaminantes metálicos (visuais), comprometendo a pureza e possibilidades de acabamento do produto. Inversamente, telas de 50 *mesh* (0,297 mm), embora eficazes na retenção, geraram contrapressão excessiva e o travamento do fluxo, elevando o cisalhamento e o risco de degradação termomecânica do polímero. Nesse contexto, a malha de 40 *mesh* (0,42 mm) foi estabelecida, experimentalmente, como a abertura capaz de conciliar a produtividade industrial com a integridade do material, e foi utilizada em todas as etapas de processamento desta pesquisa.

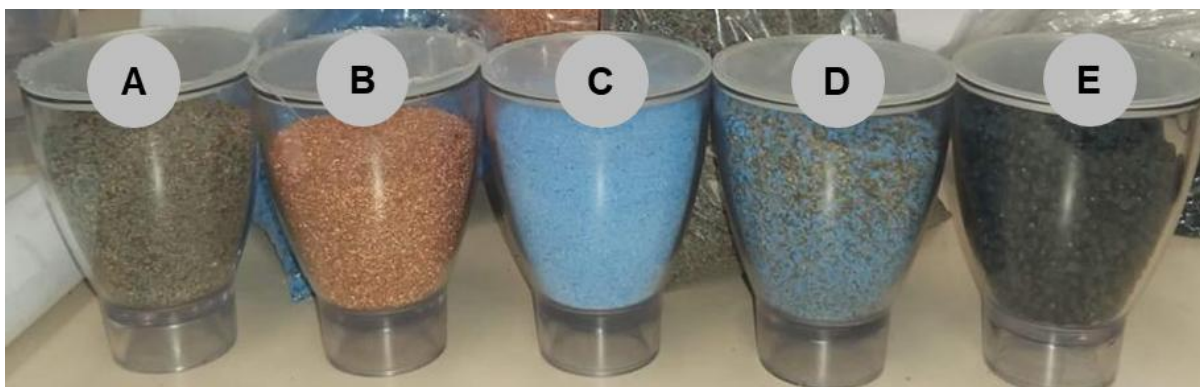
É fundamental destacar que, mesmo com a otimização da abertura da tela, não foi possível remover integralmente o material metálico aderido ou incrustado no polímero por este método. A extrusão, portanto, maximizou a remoção de impurezas sem comprometer excessivamente a integridade do polímero ou a eficiência do processo, reconhecendo a limitação intrínseca de purificação completa por meios mecânicos nesta fase.

Com o objetivo de aumentar o grau de pureza do polímero e eliminar as partículas metálicas finas remanescentes, foi proposta ainda a realização de uma etapa de decantação em meio aquoso, antes da extrusão. Este processo baseia-se na diferença de densidade entre os materiais: as partículas metálicas, sendo mais densas, decantariam no fundo do tanque, enquanto o polímero seria separado na fase superior. Contudo, observou-se que esta etapa de decantação não foi eficaz para a remoção das partículas metálicas. A análise do material pós-decantação revelou que as partículas de cobre estavam fortemente cravadas e encapsuladas na matriz polimérica, impedindo sua separação por diferença de densidade em meio aquoso. A inclusão da decantação resultou apenas em adicionar duas etapas ao processo, a de molhar o material e, conseqüentemente, a de uma nova secagem, sem proporcionar o benefício esperado de separação.

Ao final da primeira extrusão, o polímero reciclado foi novamente granulado para ser combinado em diferentes formulações de blendas. As blendas foram processadas em um segundo ciclo de extrusão misturando diferentes proporções de material reciclado

e de componente virgem, com ou sem aditivos (inseridos para melhorar as propriedades de flexibilidade e processabilidade do compósito final). O resultado dessa etapa foi um material granulado mais homogêneo e pronto para ser reinserido na cadeia produtiva, podendo ser utilizado na fabricação de novos artefatos plásticos (revalorização). Ilustra-se na Figura 7 qualitativamente os produtos obtidos em cada uma das etapas da transformação do material.

Figura 7: Evolução do material ao longo da cadeia de reciclagem: A) material polimérico obtido após o triturador, com aproximadamente 10 % de cobre; B) cobre sem PVC retirado do triturador; C) Material virgem com aditivos (Quadro 3); D) Material após a primeira extrusão misturado ao material virgem (A+C); E) Material após a segunda extrusão e pronto para revalorização.



Fonte: O autor (2025).

3.3 Formulações das blendas

No presente estudo foram preparadas blendas poliméricas (tipo B) com o PVC reciclado das duas fontes de material (SENAI e Industrial), conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3: Blendas poliméricas preparadas no presente estudo.

Blenda	PVC Virgem (%)	PVC Reciclado (%)
A	70	30
B	50	50

Fonte: O autor (2025).

A motivação inicial para este estudo surgiu de uma demanda institucional para a confecção de 5.000 metros lineares de mangueiras para jardim, destinadas a unidades escolares do SENAI-SP. Dada a escassez de dados na literatura sobre o processamento de PVC reciclado de fios e cabos, realizou-se uma tentativa baseada em práticas industriais, utilizando uma blenda 70/30 (Tipo A). A resposta positiva quanto à processabilidade nesta etapa preliminar permitiu avançar a investigação para um cenário mais crítico, aumentando-se o teor de material reciclado para a proporção 50/50 (Tipo B), ponto de partida do presente estudo. O objetivo foi verificar a viabilidade técnica e o desempenho do artefato sob uma formulação mais desafiadora em termos de processabilidade.

O PVC virgem foi aditivado para compensar a possível degradação do material reciclado durante o processamento. As características do material virgem estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3: Formulação padrão de PVC para manufatura de mangueira de jardim, para o Estado de São Paulo, cedida pela Empresa Karina Plásticos em 2005.

COMPOSTO PVC FLEXÍVEL		
COMPONENTE	PCR*	QUANTIDADE (g)
PVC (K65)	100	3.100
Stavin®	2,4	74,4
DOP	50	1.550
OSE	5	155
Estearina	0,2	6,2
Pigmento	3	93
Total	160,6	4.978,6
Fios e cabos		5.000,0
Total de composto		9.978,6

*PCR: partes por cem de resina

Fonte: O autor (2025).

A unidade “PCR” (partes por cem de resina) foi utilizada no Quadro 3 para definir a quantidade de cada aditivo em relação a 100 partes de resina de PVC. Os aditivos incorporados seguiram a receita cedida pela Empresa Karina Plásticos:

- a) Dioctil Ftalato (DOP): utilizado na proporção de 50 PCR, atua como um plastificante primário, conferindo maior flexibilidade e elasticidade ao material;
- b) Óleo de soja epoxidado (OSE): adicionado na concentração de 5 PCR, funciona como um plastificante secundário e co-estabilizante térmico, auxiliando na proteção do polímero contra a degradação térmica;
- c) Estabilizante térmico à base de estanho (Stavin[®]) ou similar: acrescido em 2,4 PCR, é fundamental para prevenir a decomposição do PVC sob as altas temperaturas do processamento, que pode levar à liberação de ácido clorídrico (HCl) e à perda de propriedades;
- d) Estearina (ácido esteárico): incorporada na proporção de 0,2 PCR, atua como um lubrificante externo, facilitando o processamento ao reduzir o atrito entre o polímero e as superfícies metálicas dos equipamentos de extrusão ou moldagem.

3.3.1 Conformação dos produtos e corpos de prova

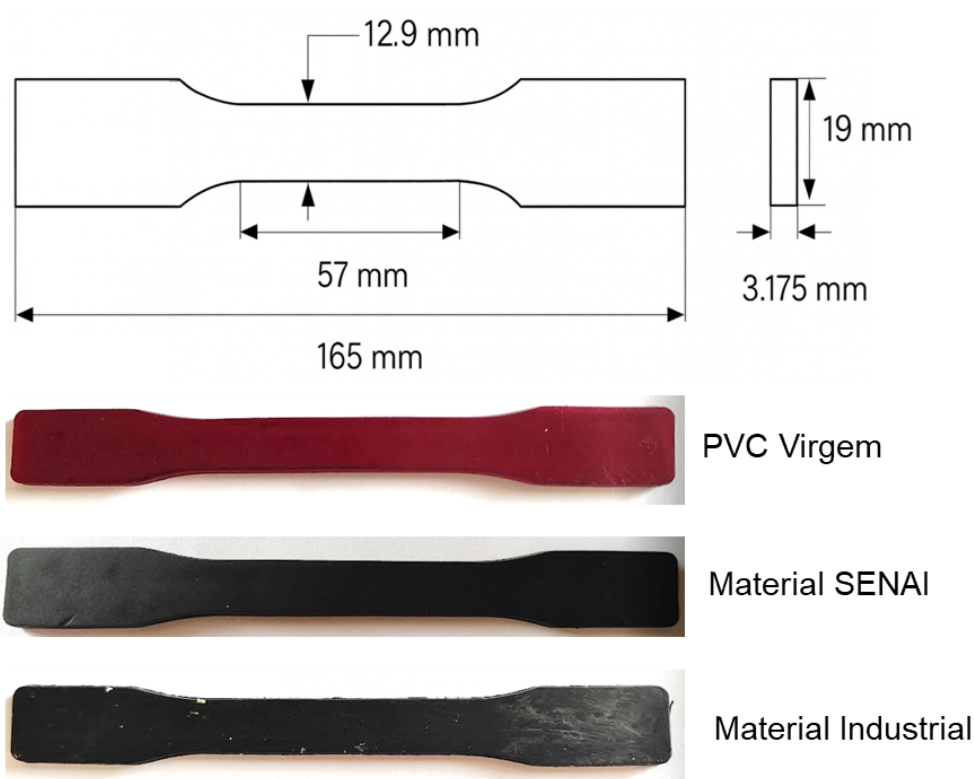
As blendas do tipo B foram utilizadas na fabricação de diferentes artefatos por meio dos seguintes processos:

- a) Extrusão de mangueiras: amostras de mangueiras foram fabricadas em uma extrusora específica para tubos e mangueiras da marca Reifenhauer para avaliar a aplicabilidade do material em perfis tubulares;
- b) Injeção: produtos com geometria complexa, como um piso tátil, foram testados, e obtiveram sucesso de produção, porém ainda é necessário maior refinamento na separação dos materiais para mitigar os entupimentos, indicando, nesse momento, uma possível limitação da processabilidade do material para essa aplicação específica;

- c) Prensagem: placas com medidas de 200 mm x 200 mm x 2 mm e 310 mm x 310 mm x 10 mm foram produzidas integralmente com material reciclado. Apesar do sucesso de execução, observou-se baixa produtividade, devido ao tempo estendido de fabricação, em torno de 12 minutos por placa.

A caracterização das propriedades mecânicas foi feita em corpos de prova produzidos em uma injetora ROMI, modelo Prática 80T. Os corpos de prova para ensaio de tração foram moldados no formato de gravata, seguindo a norma ASTM D638-22 (Figura 8).

Figura 8: Desenho esquemático e registros fotográficos dos corpos de prova produzidos para cada material, segundo norma ASTM D638-22.



Fonte: O autor (2025).

3.4 Caracterização dos materiais

Nesta etapa do estudo foi realizada a caracterização das blendas do tipo B (50/50) com material reciclado proveniente das duas fontes: SENAI-SP e industrial. O objetivo foi comparar o comportamento e as propriedades de ambas, buscando identificar semelhanças e diferenças que permitissem compreender a viabilidade técnica para a produção de novos produtos.

Para avaliar a influência do tratamento de separação inicial, a viabilidade do PVC reciclado, bem como a qualidade dos produtos desenvolvidos, ensaios de tração, dureza, microscopia (MEV-EDS) e envelhecimento acelerado foram realizados. Após o envelhecimento, ensaios de tração e de imagem também foram executados, possibilitando uma análise comparativa detalhada das duas fontes de material.

3.4.1 Inspeção Visual

A inspeção visual foi o primeiro método de avaliação qualitativa, aplicado em todas as etapas do processo. Embora simples, esse procedimento é essencial para determinar a aceitabilidade estética e o acabamento do produto, fatores que impactam sua aplicação comercial. A análise macroscópica teve como objetivo identificar a presença e a dispersão de contaminantes, especialmente as partículas metálicas residuais. Nos produtos, como as mantas calandradas e as mangueiras extrudadas, a inspeção focou na verificação de defeitos superficiais, como o afloramento – fenômeno no qual as partículas de metal migram para a superfície do produto durante o processamento.

3.4.2 Microscopia Eletrônica

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada para visualizar diferenças microestruturais entre as blendas 50/50 com PVC das duas fontes, de forma a auxiliar na compreensão do comportamento e das propriedades desses materiais.

As superfícies de análise foram obtidas pela quebra criogênica em nitrogênio líquido (-196°C) que induz intencionalmente a fratura frágil e revela a morfologia interna do material. Ao resfriar o polímero a temperaturas extremamente baixas, o material é levado muito abaixo da temperatura de transição vítrea e sua mobilidade molecular é drasticamente reduzida, tornando-o extremamente rígido e quebradiço e minimizando a deformação plástica durante a fratura. Portanto, a natureza intrinsecamente rugosa e irregular da superfície exposta, desprovida de evidências de estrição significativa, é exatamente o que se espera de uma fratura induzida criogenicamente, permitindo:

- a) Revelar a morfologia interna: a fratura frágil expõe a estrutura interna do material (como fases, cargas, vazios, ou a própria morfologia da matriz polimérica) de forma mais evidente, sem a distorção que ocorreria com a deformação plástica.

b) Analisar defeitos estruturais: havendo poros, inclusões ou outras heterogeneidades, a fratura criogênica os evidenciará, pois, a trinca tenderá a se propagar através ou ao redor desses pontos de menor resistência.

Devido à natureza intrinsecamente isolante do Policloreto de Vinila (PVC), as amostras foram submetidas à metalização (*sputtering*) após a fratura, visando melhorar a condutividade superficial do material para a análise. Amostras não condutoras, quando submetidas ao feixe de elétrons primários, geralmente acumulam carga na superfície, o que pode gerar aquecimento localizado e levar à degradação ou queima do material. A deposição de uma fina camada metálica por *sputtering* cria, portanto, uma superfície condutora que permite o escoamento dos elétrons acumulados, evitando o problema. Além disso, essa camada contribui para a estabilidade da análise e para uma melhor qualidade da imagem.

A análise da superfície de fratura das amostras foi conduzida por MEV utilizando o potencial de aceleração de 10,0 kV e o detector de Elétrons Secundários (SE), fornecendo informações detalhadas sobre os mecanismos de falha e a microestrutura celular induzida pelo processo de injeção de nitrogênio. Complementarmente, a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) foi empregada para determinar a composição elementar em pontos específicos, fornecendo informações sobre a natureza das fases presentes e a homogeneidade dos materiais.

3.4.3 Ensaio de Tração

A integridade estrutural e o comportamento mecânico dos materiais produzidos foram avaliados com um ensaio de tração. A finalidade do teste foi verificar quantitativamente o impacto do reprocessamento e da presença de partículas metálicas no material. O ensaio seguiu rigorosamente a norma padrão ASTM D638-22, utilizando corpos de prova em formato de gravata (Figura 8). Eles foram conduzidos em uma Máquina Universal de Ensaio Kratos, com dispositivo de tração e célula de carga de 5 kN, empregando duas velocidades distintas de deslocamento (50 mm/min e 500 mm/min) para avaliar a influência da taxa de deformação no comportamento do material. A partir deste ensaio, foram determinadas propriedades fundamentais:

- a) Limite de resistência à tração (MPa): indica a tensão máxima que o material suporta antes de começar a fraturar. É um indicador direto da sua força.
- b) Alongamento na ruptura (%): mede o quanto o material consegue se deformar (esticar) antes de romper. É uma medida crucial da sua ductilidade ou fragilidade. Um baixo alongamento é característico de materiais frágeis.
- c) Módulo de elasticidade (MPa): representa a rigidez do material, ou seja, sua resistência à deformação elástica.

O ensaio foi realizado em um lote de 10 amostras por tipo de material reciclado (fonte SENAI e industrial) com composição 50/50, totalizando 20 testes, a fim de garantir a reprodutibilidade dos resultados, os quais foram tratados estatisticamente para maior confiabilidade.

3.4.4 Ensaio de Dureza

A dureza das blendas tipo B foi medida utilizando um Durômetro Shore Zwickroell, (Figura 9). Este método avalia a resistência de um material à penetração de uma ponta padronizada sob uma força definida. A dureza é um indicativo da flexibilidade e da resistência a riscos e marcas na superfície do produto. Dependendo da flexibilidade do composto, a medição é realizada na escala Shore A (para materiais mais moles e elastoméricos) ou na escala Shore D (para plásticos mais rígidos) (ASTM D2240-21). Esta propriedade é relevante para definir o campo de aplicação do produto, influenciando desde a sensação tátil até a sua performance em contato com outras superfícies.

Figura 9: Durômetro Shore Zwickroell, utilizado para medições de Shore A e Shore D.



Fonte: O autor (2025).

3.4.5 Ensaio de Estanqueidade

O ensaio de estanqueidade consiste em submeter um reservatório a uma pressão interna de fluido (geralmente água) por um determinado período e verificar a ocorrência de vazamentos. Nesse estudo, o teste teve como objetivo validar a integridade das paredes das mangueiras fabricadas, garantindo que a presença de partículas metálicas residuais ou outras heterogeneidades do processo de extrusão não proporcionaram microfuros, porosidades ou pontos de fraqueza que comprometessem a função primária desse utensílio em transportar fluidos sem vazamentos. Segundo a Norma NBR 12.218, mangueiras de irrigação de jardins, abastecimento e lavagem devem suportar pressões entre 70 e 100 psi¹.

¹ A unidade psi (*pound-force per square inch*) não pertence ao Sistema Internacional (SI). Para fins de conversão: 100 psi equivalem a aproximadamente 0,69 MPa ou 6,89 bar.

Para esses ensaios, as mangueiras, com uma de suas extremidades vedadas, foram preenchidas com ar comprimido a uma pressão de 145 psi e, posteriormente, imersas em um tanque com água para observação da formação de bolhas.

3.4.6 Ensaio de Ruptura

Os ensaios de ruptura foram realizados submetendo as mangueiras fabricadas a sobrepressões crescentes até a completa falha do material (rompimento da parede). O objetivo do teste foi avaliar o comportamento mecânico do material e identificar a pressão de falha.

Esses testes foram realizados em uma unidade de pressurização hidropneumática da marca Flutrol especialmente projetada para aplicação de cargas internas em corpos de prova tubulares (Figura 10). O sistema operou utilizando água limpa e filtrada como fluido de teste, de modo a minimizar efeitos de compressibilidade, reduzir impactos durante a ruptura e mitigar riscos operacionais associados à projeção de fragmentos ou do chicoteamento característico de mangueiras flexíveis no momento do colapso. O monitoramento e o registro da pressão interna dos corpos de prova foram processados pelo software Elipse, também desenvolvido pela Flutrol. Três amostras da mangueira feitas com PVC virgem e com a blenda 50/50 do SENAI foram avaliadas.

Figura 10: Unidade de testes para identificação da pressão de falha do fabricante Flutrol.



Fonte: O autor (2025).

3.4.7 Ensaio de Intemperismo

Para avaliação do comportamento dos materiais sob condições de envelhecimento, foi realizado o ensaio de intemperismo acelerado em câmara de radiação ultravioleta (UV), conforme a norma ASTM G154 – Ciclo 1 (2023). O tempo total de exposição foi de 500 h, com irradiância de 0,77 W/m²/nm, comprimento de onda (UV-A) de 340 nm e ciclo de exposição programado de 8 h com radiação UV a 60(± 3)°C para a temperatura do Painel Preto. Foram ensaiadas três amostras, previamente preparadas em forma de corpos de prova: PVC virgem (Quadro 3) e as blendas 50/50 SENAI e Industrial. O método de exposição em câmara UV foi selecionado por promover um envelhecimento artificial agressivo, representando de forma acelerada os efeitos da radiação solar e da umidade sobre os materiais poliméricos. Após o período de exposição, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, visando comparar as propriedades mecânicas iniciais e finais e, assim, avaliar as alterações estruturais e de desempenho decorrentes do envelhecimento.

3.4.8 Avaliação da Processabilidade

A avaliação da processabilidade foi uma análise qualitativa contínua, realizada durante os próprios processos de transformação. Ela consistiu na observação do comportamento do material nas máquinas, buscando identificar sua viabilidade industrial. Na extrusão, foram monitorados parâmetros como a estabilidade do fluxo de material fundido e, principalmente, a frequência de troca das telas de filtragem, que serviu como um indicador direto da quantidade de contaminantes retidos.

3.5 Análise Estatística

Nos ensaios de tração, foi realizada avaliação estatística dos resultados obtidos para as 10 amostras analisadas de cada blenda (composição 50/50), calculando-se a média e o desvio padrão. Então, aplicou-se um filtro estatístico, eliminando os dados que se encontravam fora do intervalo de 1 desvio padrão acima e abaixo da média. As estatísticas descritivas (média, desvio padrão, valor máximo e mínimo) foram então recalculadas com base nas amostras consideradas, garantindo um mínimo de 5 amostras válidas por condição, conforme permitido pela norma ASTM D638-22.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção tem a finalidade de apresentar, interpretar e discutir os resultados obtidos ao longo do estudo de revalorização do PVC proveniente do recobrimento de fios e cabos elétricos pós-consumo. As análises aqui descritas foram conduzidas com o objetivo de avaliar a influência da contaminação metálica residual sobre as propriedades físico-mecânicas, a processabilidade e o desempenho funcional do material reciclado, bem como verificar a eficácia das estratégias adotadas para sua descontaminação e requalificação, tais como a filtração durante a extrusão e a incorporação de aditivos e blendas com material virgem.

4.1 Caracterização macroscópica e aspectos visuais do material reciclado

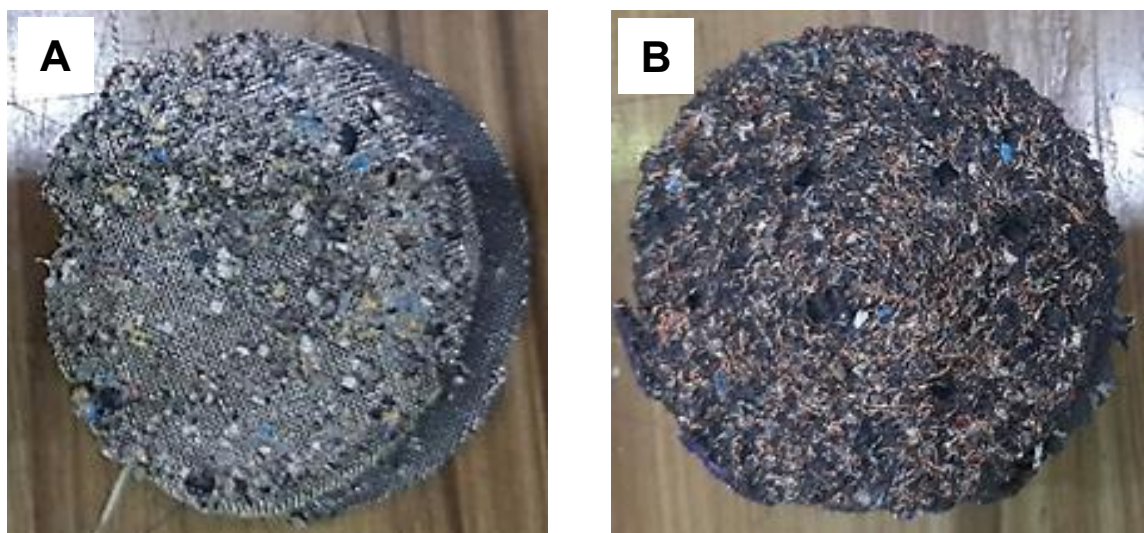
A avaliação visual constituiu a etapa inicial na caracterização do material polimérico reciclado, fornecendo informações essenciais sobre a extensão da contaminação metálica residual, o grau de dispersão das partículas ao longo da matriz polimérica e a qualidade superficial do produto.

Após as etapas de processamento (extrusão para separação, extrusão para granulação e injeção dos corpos de prova), as amostras SENAI e Industrial apresentaram distinções visuais, de cor e textura. O material SENAI resultou em uma massa com aparência mais homogênea, superfície consistente e cor acinzentada; mesmo sendo um compósito reciclado, era razoavelmente uniforme. O material Industrial revelou-se mais heterogêneo, com textura e pigmentação superficial bastante irregulares, com presença de pequenos pontos e inclusões (partículas de metal e materiais contaminantes) e cor mais escurecida – próxima do preto – por conta do maior tempo de residência na máquina e, conseqüentemente, do provável aumento da degradação do material.

Conforme exibido na Tabela 1, o processo de trituração e separação mecânica, embora eficiente na recuperação do cobre, não eliminou completamente a presença de cobre no material polimérico, tendo este sido enviado para o processo de extrusão com teor de metal próximo a 10 %. Todavia, o comportamento dos materiais na máquina extrusora revelou que, mesmo possuindo teores aproximados de metal, a processabilidade da massa polimérica das duas fontes não foi similar, tendo o material

de origem industrial se apresentou mais complexo e com uma taxa de formação de volume de torta bastante superior. A saturação do filtro para a operação com o polímero do SENAI exigiu trocas de tela a cada 8 minutos, enquanto o polímero de origem industrial requisitou trocas com tempo abaixo de 5 minutos. Além disso, o material do SENAI apresentou fluxo estável e contínuo, contrastando com o fluxo instável e pulsante do material industrial. Na Figura 11 são apresentados registros fotográficos de tortas retiradas do filtro da extrusora para ambos os materiais, em que é possível observar a diferença da aparência, volume e heterogeneidade da massa retida.

Figura 11: Torta de resíduos retirada da tela filtrante que foi acoplada no cabeçote da extrusora para o PVC reciclado: A) Fonte SENAI, B) Fonte Industrial.

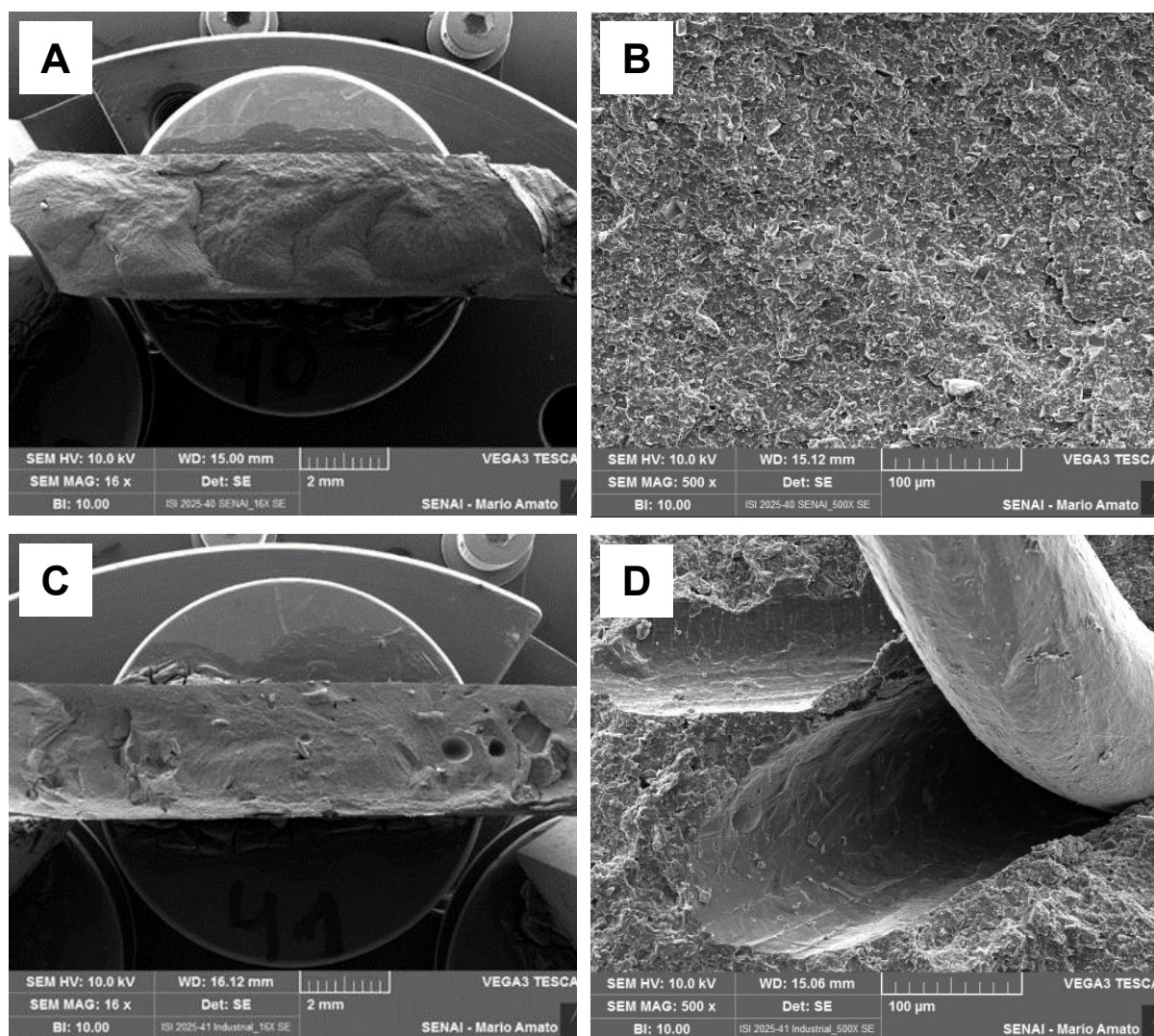


Fonte: O autor (2025).

4.2 Caracterização microscópica do material reciclado

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu observar a morfologia da superfície do material e identificar a presença de vazios e contaminantes. No contexto deste estudo, esta análise proporcionou a comparação da matriz do PVC no material reciclado (blendas), evidenciando o efeito do processo de segregação cobre/PVC (realizado nos fios e cabos utilizados como matéria-prima) sobre a contaminação metálica residual e a homogeneidade do material (Figura 12). Essas características morfológicas e estruturais dos materiais são importantes, pois se relacionam diretamente com as propriedades e o desempenho de cada material.

Figura 12: Micrografias da superfície do material reciclado (blenda 50/50): A) Fonte SENAI 16x; B) Fonte SENAI 500x; C) Fonte Industrial 16x; D) Fonte Industrial 500x.



Fonte: O autor (2025).

As imagens da Figura 12 apresentam a superfície dos materiais reciclados (fonte SENAI e Industrial) com aumentos de 16 e 500 vezes. A característica mais proeminente das imagens A e C é a topografia irregular de ambos os materiais com a presença pronunciada de uma textura áspera com macro-rugosidades, múltiplos planos de fratura e descontinuidades. Esta característica é consistente com a fratura frágil induzida criogenicamente, em que a trinca se propaga rapidamente através de caminhos de menor resistência, admitindo um percurso complexo através do material. As variações na textura e a forma como a trinca se propagou sugeriram a presença de múltiplas fases poliméricas, impurezas e/ou cargas/contaminantes.

Na amostra proveniente do SENAI (A), observou-se uma superfície de fratura relativamente mais homogênea, com zonas lamelares e aspecto granuloso, mas sem grandes cavidades aparentes, refletindo uma distribuição mais uniforme das partículas metálicas contaminantes. Este fato sugere uma menor concentração de vazios e uma estrutura aparentemente mais compacta, indicando um grau ligeiramente superior de pureza ou melhor dispersão dos contaminantes metálicos.

Por outro lado, a amostra de origem industrial (C) apresentou uma superfície substancialmente mais irregular e heterogênea, com presença evidente de vazios, poros e cavidades de tamanhos variados. Esses vazios são indicativos de extração de partículas metálicas (*pull-out*) durante a fratura criogênica e/ou de regiões de má adesão interfacial no material. A rugosidade mais acentuada e as descontinuidades observadas evidenciaram uma amostra mais contaminada e com maior degradação estrutural. Especialmente nesse material, a heterogeneidade da superfície revelou que diferentes mecanismos de fratura atuaram localmente. As áreas com vazios arredondados representam alguma ductilidade, enquanto as áreas mais planas ou angulares sinalizam uma fratura mais frágil ou clivagem.

As micrografias com ampliação de 500 vezes permitiram observar a interface entre a matriz e os contaminantes com maior detalhamento. Nessas imagens constatou-se que, apesar de ambas as amostras apresentarem topografia irregular, a textura da amostra do SENAI (B) se mostrou relativamente contínua, sem evidência clara de inclusões grandes de metal. A ausência de trincas profundas e a distribuição fina dos contaminantes demonstraram menor severidade na perda de integridade interfacial.

Em contrapartida, a amostra industrial (D) revelou a presença de uma grande estrutura, de contorno definido, incrustada no material e uma região com descolamento ao seu redor, contendo microtrincas radiais e cavidades. A interface dessa estrutura apresentou-se relativamente lisa em relação a matriz circundante, dando indicativos de separação interfacial e baixa aderência. Esse tipo de morfologia é característico de inclusões não compatibilizadas, que agem como concentradores de tensão e núcleos potenciais de fratura sob carregamento mecânico. A estrutura alongada indicou uma deformação severa, um estiramento antes da fratura final, o que é um forte indício de ductilidade, característica de material metálico, como o cobre.

O mecanismo de fratura aparentemente foi misto, se caracterizando pela interação entre regiões dúcteis, associadas às partículas de cobre, e zonas frágeis, correspondentes à matriz polimérica. O cobre, por ser um metal dúctil, resiste à fratura criogênica, se deformando plasticamente antes de se separar ou romper, tornando-se um local preferencial para a nucleação e o crescimento de vazios sob tensão. Assim, nas regiões contendo cobre, ocorreram deformações plásticas significativas, estiramento e formação de microvazios (*dimples*), enquanto na matriz circundante a fratura se desenvolveu de maneira predominantemente frágil, por clivagem ou separação interfacial. A propagação da trinca foi retardada ou desviada pelas partículas de cobre, que atuaram como pontes dúcteis, absorvendo energia e dificultando a continuidade da fratura. Esse comportamento propiciou o aparecimento de superfícies rugosas e irregulares, conforme visto nas imagens de menor ampliação.

Deve-se ressaltar que, embora a quebra criogênica não simule o impacto em serviço, a exposição das heterogeneidades e interfaces fracas é essencial, já que são concentradoras de tensão e podem alterar significativamente as propriedades mecânicas do material (como tenacidade, resistência ao impacto e à fadiga) em condições operacionais. Desse modo, a superfície de fratura criogênica revela a complexidade e as potenciais fragilidades de um material polimérico reciclado, expondo descontinuidades e interfaces fracas que, em temperatura ambiente, poderiam permanecer mascaradas.

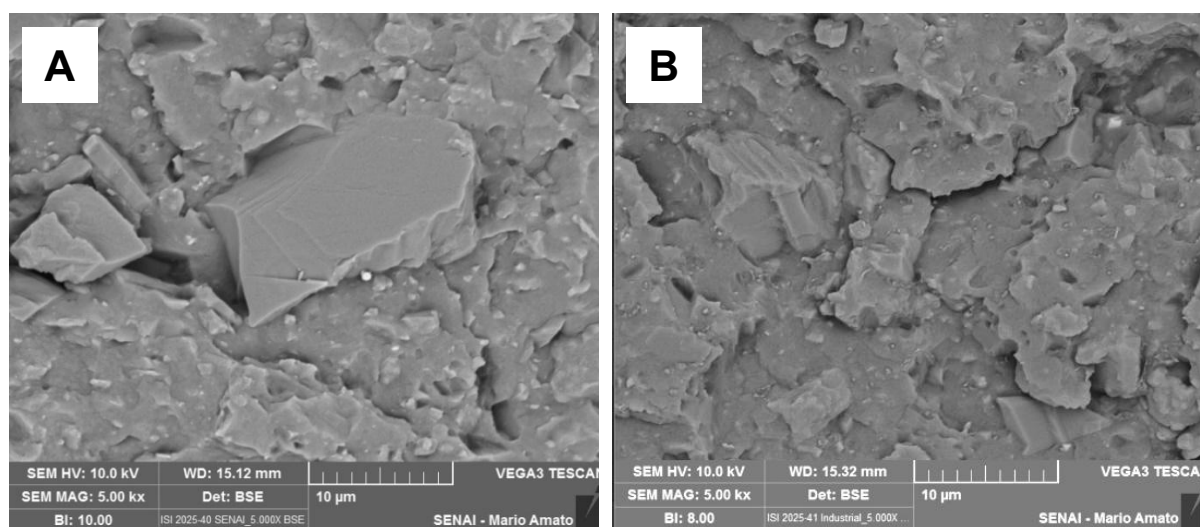
A análise comparativa das micrografias obtidas com ampliação de 5000 vezes e detector de elétrons retroespalhados (BSE) revelou diferenças importantes entre as amostras provenientes do SENAI (imagem A) e da fonte industrial (imagem B), permitindo uma avaliação mais aprofundada da morfologia interna, do grau de contaminação, da distribuição e natureza das impurezas e da integridade microestrutural do PVC reciclado (Figura 13).

Na Figura 13A, correspondente à amostra do SENAI, observou-se uma matriz de PVC com uma superfície rugosa e heterogênea, característica de materiais poliméricos processados. Na parte central, uma partícula de grande tamanho relativo, contorno bem definido e geometria plana e facetada, típica de uma inclusão cristalina de elevada rigidez, foi detectada. Os espectros EDS revelaram se tratar de um contaminante mineral (Figura 14). A interface entre a partícula e o PVC se mostrou

relativamente contínua, com evidência razoável de descolamento e sem grandes vazios interfaciais imediatos. Esse fato confirmou a deficiência interfacial característica de materiais reciclados heterogêneos, mas sugeriu que, embora a inclusão estivesse presente, a coesão local não foi completamente comprometida.

Por outro lado, a amostra de PVC reciclado da fonte Industrial (Figura 13B) apresentou uma morfologia significativamente mais heterogênea, com maior densidade e uma distribuição mais homogênea de partículas contaminantes aderidas. Além das partículas angulares maiores, notou-se uma presença importante de inclusões metálicas de menor dimensão, que pareciam estar mais dispersas e incrustadas na superfície do polímero. A maior concentração de partículas finas e sua presença distribuída ao longo de todo o material corrobora a descrição prévia de que esta matéria-prima possuía uma contaminação residual por metais mais pronunciada e de difícil remoção. Além disso, a maior heterogeneidade estrutural sugeriu um material mais degradado, compatível com múltiplos ciclos de processamento térmico e contaminações cruzadas da matriz polimérica.

Figura 13: Comparação entre o material SENAI (imagem A) e o Industrial (imagem B) com ampliação de 5000x.



Fonte: O autor (2025).

Em síntese, as imagens microscópicas confirmaram que ambas as fontes de PVC reciclado continham impurezas, todavia a amostra industrial se apresentou mais desafiadora por conter maior dispersão e quantidade de partículas finas metálicas.

Para facilitar a comparação, as principais características estão exibidas no Quadro 4.

Quadro 4: Análise Morfológica das Superfícies de Fratura (MEV-BSE, 5000x).

Característica Morfológica	PVC Reciclado – Blenda B (Fonte SENAI)	PVC Reciclado – Blenda B (Fonte Industrial)
Textura da Matriz Polimérica	<ul style="list-style-type: none"> Rugosa, com presença de microvazios 	<ul style="list-style-type: none"> Um pouco mais rugosa e com presença microvazios, textura mais evidente
Presença de Inclusões	<ul style="list-style-type: none"> Principalmente $CaCO_3$ 	<ul style="list-style-type: none"> $CaCO_3$ Cobre residual (Cu)
Tamanho das partículas contaminantes	<ul style="list-style-type: none"> $CaCO_3$: tamanho variado, desde fragmentos menores a grãos maiores e bem definidos (angulares). 	<ul style="list-style-type: none"> $CaCO_3$: de tamanho similar Cobre: aparece em tamanhos variados, desde pequenas partículas a aglomerados maiores.
Distribuição das Partículas	<ul style="list-style-type: none"> $CaCO_3$: disperso na matriz, com algumas regiões de maior concentração. 	<ul style="list-style-type: none"> $CaCO_3$: disperso, com distribuição mais heterogênea devido à presença adicional e irregular do cobre.
Grau de Contaminação (MEV-BSE)	<ul style="list-style-type: none"> Baixo grau de contaminação, foco na carga de $CaCO_3$. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto grau de contaminação por cobre residual, claramente visível como regiões de alto brilho.
Implicações Potenciais	<ul style="list-style-type: none"> Fratura influenciada pelo descolamento interfacial $CaCO_3/PVC$. Concentração de tensões nas bordas angulares do $CaCO_3$. Propriedades mecânicas podem ser mais consistentes, mas com menor tenacidade devido à carga. 	<ul style="list-style-type: none"> Fratura mais complexa devido à interação trifásica $CaCO_3/PVC/Cu$. O cobre pode aumentar a tenacidade local (deformação plástica) ou atuar como um concentrador de tensão. Maior variabilidade nas propriedades mecânicas devido à maior heterogeneidade.

Fonte: O autor (2025).

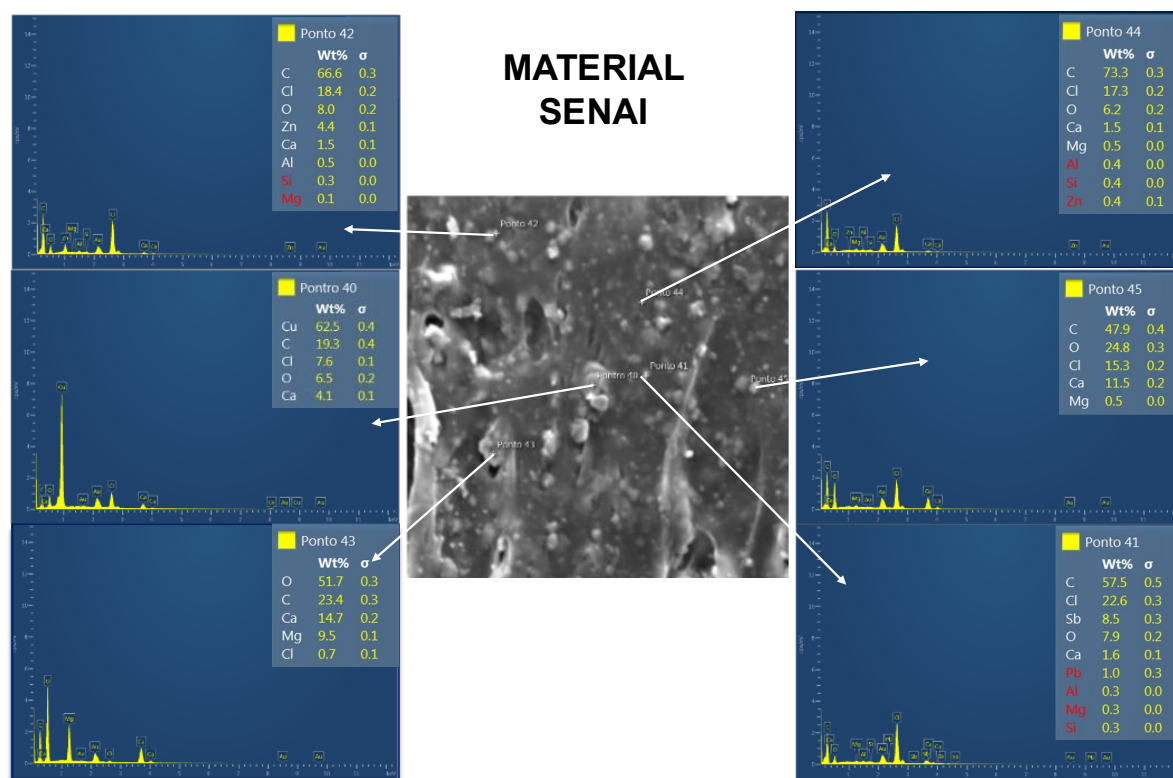
A espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) foi empregada em pontos específicos de interesse nas micrografias de MEV para determinar a composição elementar de cada microrregião selecionada. A análise integrada dos dados de MEV e EDS permitiu uma compreensão química aprofundada (matriz polimérica, cargas, aditivos e contaminantes). As imagens ampliadas dessa avaliação estão contidas nos Apêndices 1 e 2, mas foram incluídas no corpo do texto (Figuras 14 e 15) para permitir a rápida identificação dos pontos analisados. O Quadro 5 resume as principais diferenças na composição elementar e interpretação dos pontos analisados por EDS para os materiais do SENAI e Industrial.

Quadro 5: Comparativo químico entre os materiais (SENAI e Industrial) no EDS.

Característica	Ponto	Localização	Composição (%wt)	Interpretação
Produto SENAI				
Contaminantes	40	Partícula brilhante destacada na imagem de elétrons retro espalhados.	Cu (62,5), C (19,3), Cl (7,6), O (6,5), Ca (4,1)	Partícula com alta concentração de cobre e cargas minerais comuns. Sugere um contaminante metálico ou um pigmento inorgânico específico.
Aditivos	41	Região da matriz contendo aditivos dispersos.	C (57,5), Cl (22,6), Sb (8,5), O (7,9), Ca (1,6), Pb (1,0)	Matriz polimérica (C e Cl) com presença significativa de antimônio. A associação Sb/Cl indica uso de retardante de chama (Sb_2O_3). Presença de traços de chumbo.
Matriz com estabilizante	42	Região da matriz polimérica.	C (66,6), Cl (18,4), O (8,0), Zn (4,4), Ca (1,5), Al (0,5)	Matriz de PVC rica em zinco. Sugere a presença de estabilizantes térmicos à base de zinco ou estearato de zinco disperso na matriz.
Carga Mineral	43	Partícula com contraste distinto na matriz.	O (51,7), C (23,4), Ca (14,7), Mg (9,5), Cl (0,7)	Partícula mineral rica em oxigênio, cálcio e magnésio. A estequiometria sugere Dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) ou uma mistura de carbonato de cálcio com compostos de magnésio.
Matriz Polimérica Pura	44	Região homogênea da matriz.	C (73,3), Cl (17,3), O (6,2), Ca (1,5), Mg (0,5), Al (0,4)	Região representativa da matriz de PVC (alto carbono e cloro) com baixa interferência de cargas inorgânicas ou aditivos metálicos pesados.
Matriz com Carga Mineral	45	Região da matriz com inclusão mineral.	C (47,9), O (24,8), Cl (15,3), Ca (11,5), Mg (0,5)	Região intermediária contendo polímero (PVC) e carga mineral à base de cálcio, indicada pelo aumento de Ca e O e redução relativa de C e Cl.
Produto Industrial				
Carga Mineral	3	Partícula maior e mais brilhante, com morfologia facetada.	O (44,9), Ca (28,6), C (25,1), Cl (1,0), Mg (0,5)	Carbonato de cálcio, possivelmente calcita ou aragonita. Pequena quantidade de Mg.
Matriz Polimérica	4	Região da matriz ou de uma partícula menor e mais escura.	C (75,9), Cl (11,8), O (10,2), Ca (2,1)	Região da matriz polimérica com aditivos clorados e baixa porcentagem de cargas minerais.
Carga Mineral Mista	5	Partícula de tamanho intermediário, contornos menos definidos.	O (53,9), C (25,1), Ca (11,6), Mg (8,7), Cl (0,7)	Carbonato de <i>Ca</i> e <i>Mg</i> , possivelmente ($CaMg(CO_3)_2$), ou mistura de $CaCO_3$, com composto rico em magnésio.
Aditivo	6	Partícula brilhante e bem definida, fase metálica/alta densidade.	Sb (85,2), C (6,1), O (4,0), Ca (2,7), Cl (2,0)	Predominância de antimônio, indicando retardante de chama sinérgico.
Carga Mineral	7	Partícula de tamanho intermediário, similar ao Ponto 3.	O (48,1), C (29,2), Ca (20,0), Cl (2,7)	Carbonato de cálcio ($CaCO_3$), similar ao Ponto 3, sem magnésio significativo.
Matriz Polimérica Pura	8	Região da matriz ou de uma inclusão menor, superfície rugosa e escura.	C (85,6), O (10,1), Ca (3,1), Cl (1,2)	Região da matriz polimérica mais pura, com menos cargas minerais que o Ponto 4.

Fonte: O autor (2025).

Figura 14: Análise Microestrutural e Elementar (MEV-EDS) da amostra SENAI a 5000x.



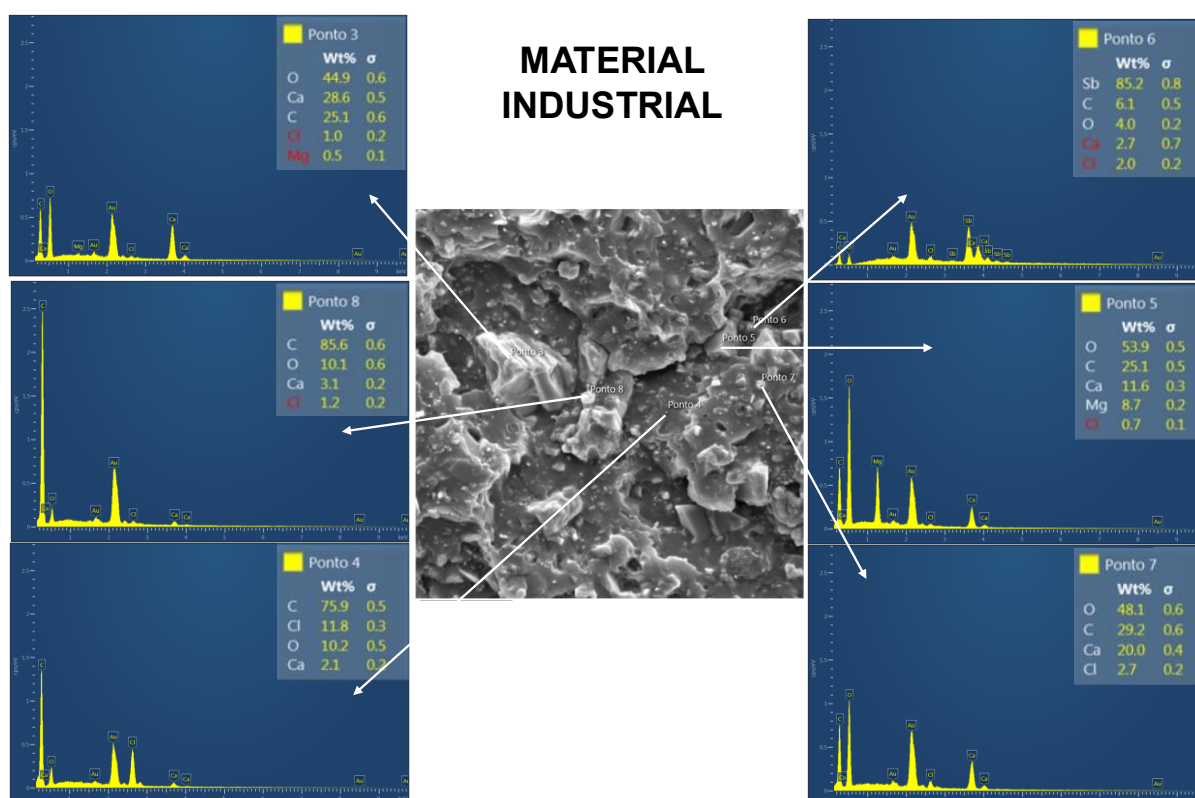
Fonte: O autor (2025).

A análise por EDS nos pontos 40 a 45 da Figura 14 forneceu dados quantitativos sobre a composição elementar do PVC reciclado proveniente do SENAI:

- Matriz Polimérica e Aditivos (Pontos 41, 42, 43, 44, 45): a predominância de carbono e cloro confirmou a matriz de PVC. Ademais, o Ponto 41 destacou-se pela presença significativa de chumbo (8,5 %) e antimônio (1,0 %), indicando o uso de estabilizantes térmicos à base de chumbo e retardantes de chama (trióxido de antimônio), típicos de formulações antigas ou específicas. Já no Ponto 42, a presença de zinco revelou uma região estabilizada com sistemas mistos (Ca/Zn), indicando heterogeneidade na composição dos resíduos processados.
- Cargas Minerais (Pontos 41, 42): a detecção de cálcio e oxigênio nestes pontos, misturada à matriz polimérica, representa cargas inorgânicas de enchimento, majoritariamente carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Esta carga está dispersa na matriz para conferir volume e estabilidade dimensional, aparecendo associada tanto aos estabilizantes de chumbo (Ponto 41) quanto aos de zinco (Ponto 42).

- c) Contaminante Metálico / Fase Condutora (Ponto 40): partícula com concentração majoritária de cobre (62,5%) e resíduos de carbono e cloro na superfície. Trata-se de um fragmento do filamento condutor que permaneceu aderido ou encapsulado pela matriz polimérica após a moagem. A presença deste metal é um indicador da eficiência da separação mecânica e representa tanto um valor econômico a ser recuperado quanto um desafio para a pureza do polímero reciclado.

Figura 15: Análise Microestrutural e Elementar (MEV-EDS) da amostra Industrial a 5000x.



Fonte: O autor (2025).

Já a análise por EDS nos pontos 3 a 8 da Figura 15 forneceu dados quantitativos sobre a composição elementar do PVC reciclado de origem industrial:

- a) Matriz Polimérica (Pontos 4 e 8): a presença significativa de carbono, cloro e oxigênio são fortes indicativos da composição da matriz polimérica (PVC), com o ponto 8 apresentando uma região ainda mais rica de polímero.
- b) Cargas Minerais (Pontos 3, 5, 7): a alta concentração de oxigênio, cálcio e carbono nos Pontos 3 e 7 sugeriu a presença de carbonato de cálcio ($CaCO_3$). O ponto 5,

com notável quantidade de magnésio e cálcio indicaram a presença de carbonato de cálcio e magnésio, possivelmente dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), ou uma mistura de carbonato de cálcio com um composto rico em magnésio.

- c) Aditivo Específico (Ponto 6): a predominância de antimônio é um achado distintivo. O antimônio é frequentemente utilizado como retardante de chama sinérgico em polímeros, especialmente em combinação com compostos halogenados.

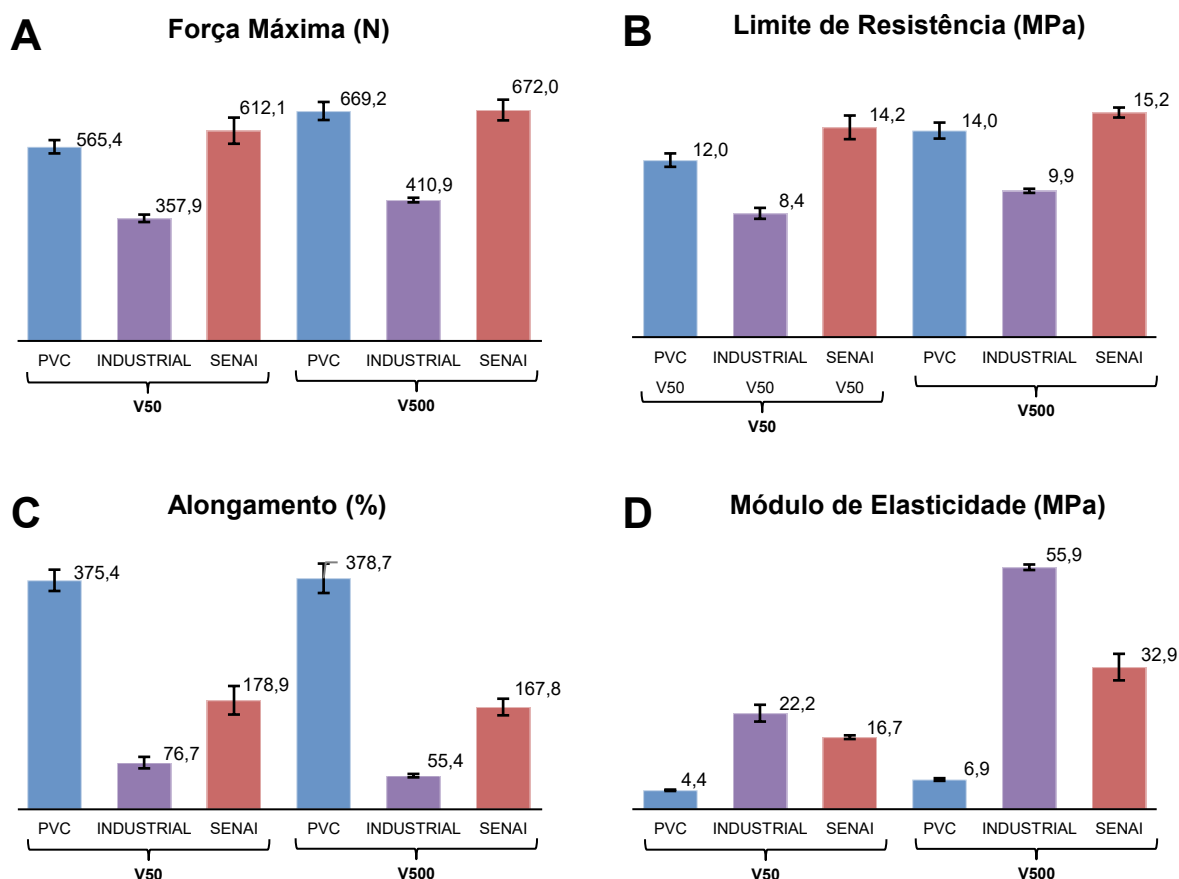
A análise microestrutural e elementar comparativa revelou que o produto desenvolvido no SENAI demonstrou mais características de homogeneidade e pureza em sua matriz polimérica, superando o material industrial em aspectos essenciais. Embora o produto SENAI também tenha apresentado uma estrutura particulada e granular, a distribuição das fases e a composição elementar dos pontos analisados indicaram um material com menor presença de contaminantes metálicos complexos, o que é uma vantagem significativa.

4.3 Propriedades Mecânicas – Ensaio de Tração

O ensaio de tração permite avaliar o desempenho mecânico dos materiais, pois quantifica a influência de contaminantes, no caso partículas metálicas, na resistência, ductilidade e rigidez do material. Além disso, a velocidade de deformação aplicada durante o teste fornece informações sobre o comportamento viscoelástico. As curvas de tensão em função da deformação das 10 amostras com as duas velocidades de deslocamento (V50: 50 mm/min e V500: 500 mm/min), estão exibidas na Figura 17. Todas as curvas dos ensaios de tração também estão apresentadas com seus respectivos detalhamentos numéricos nos Apêndices 3 a 14.

Visando melhor visualização dos dados obtidos, foram elaborados gráficos comparativos de força máxima, limite de resistência, alongamento e módulo de elasticidade para o PVC virgem, blenda SENAI/PVC, blenda Industrial/PVC virgem, considerando as duas velocidades de deslocamento (Figura 16).

Figura 16: Comparação das propriedades mecânicas do PVC virgem (azul), blenda SENAI (vermelho) e blenda industrial (roxo), obtidos nos ensaios de tração em duas velocidades de deslocamento (V50 e V500). Parâmetros: A) Força máxima, B) Limite de resistência, C) Alongamento e D) Módulo de Elasticidade.



Fonte: O autor (2025).

A Força Máxima (FM) representa a carga máxima suportada pelo material antes da falha. Em V50 a blenda SENAI demonstrou o maior valor (~612 N), seguido do PVC virgem (~565 N) e da blenda industrial (~358 N). Com o aumento da velocidade para V500, todos os materiais apresentaram incrementos na Força Máxima, com a blenda SENAI mantendo a superioridade (672 N), o PVC virgem aumentando para 669 N e o industrial para 411 N. Esse comportamento é típico de polímeros, os quais se tornam mais rígidos e resistentes sob taxas de deformação mais altas.

Em relação ao Limite de Resistência à Tração (LRT), que é a tensão máxima que o material suporta antes de fraturar ou se deformar plasticamente de forma irreversível, em V50 a blenda SENAI novamente apresentou o maior valor (14,18 MPa), seguido

do PVC virgem (11,98 MPa) e da blenda Industrial (8,39 MPa). Em V500, todos os materiais tiveram aumento do LRT (virgem: 13,96 MPa; Industrial: 9,91 MPa; SENAI: 15,18 MPa), sendo o do SENAI o mais consistente, com menor desvio padrão.

No Alongamento na Ruptura – que mede o quanto ele pode esticar antes de romper – o PVC virgem se destacou como o mais dúctil em ambas as velocidades (375 % em V50 e 379 % em V500). A blenda SENAI apresentou ductilidade intermediária (179 % e 168 %) e a blenda industrial, a menor (77 % e 55 %), reforçando seu caráter mais rígido. A redução de alongamento das blendas SENAI e industrial em V500 reflete o comportamento típico de polímeros sob maiores taxas de deformação.

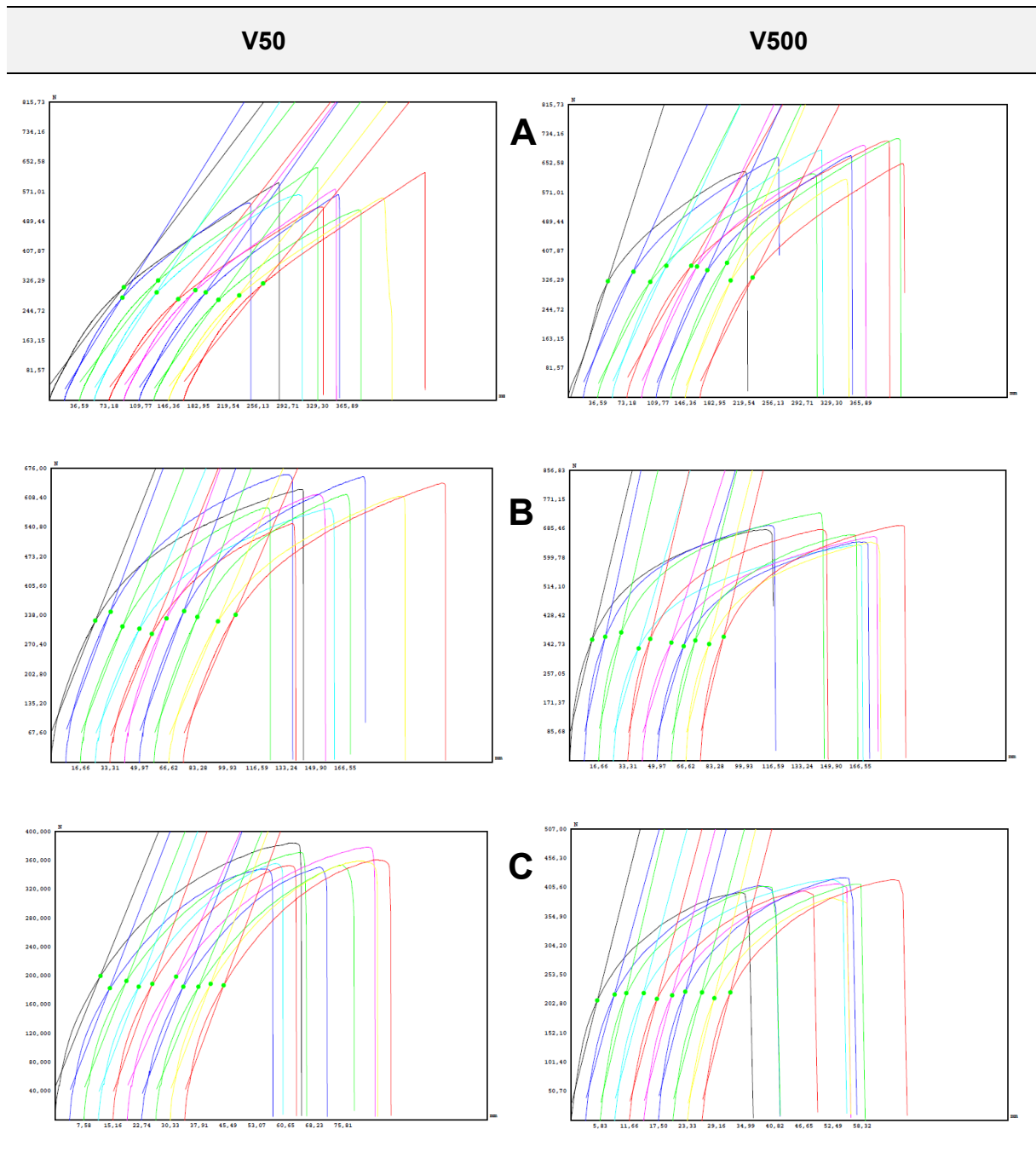
O Módulo de Elasticidade, isto é, a resistência à deformação elástica, confirmou a rigidez relativa dos materiais: em V50, a blenda industrial foi a mais rígida (22,2 MPa), seguida da blenda SENAI (16,7 MPa) e do PVC virgem (4,4 MPa). Em V500, houve aumento expressivo do módulo em todos os materiais – tendo o PVC virgem alcançado 6,9 MPa, a blenda SENAI 32,9 MPa e a blenda industrial 55,9 MPa. Os valores obtidos são consistentes com os materiais avaliados, sendo a blenda industrial a mais rígida e o PVC virgem o mais flexível.

A análise comparativa apontou três perfis mecânicos distintos, influenciados pela composição e pela velocidade de deformação:

- a) PVC Virgem: se apresentou como um material de alta ductilidade, suportando uma deformação plástica significativa antes da fratura, e menor rigidez (baixo módulo de elasticidade), sendo sua resistência e força máxima aumentados com a velocidade, resposta esperada e típica para esse material.
- b) Blenda SENAI: destacou-se por apresentar consistentemente os maiores valores de FM e LRT em ambas as velocidades, superando até o PVC virgem. Isso sugere que a sua microestrutura e composição (incluindo zinco como aditivo funcional e menor presença de contaminantes) reforçou sua capacidade de carga sem comprometer drasticamente o alongamento, que ainda foi considerável (>160 %).
- c) Blenda industrial: demonstrou um perfil mais rígido e menos dúctil, com os menores valores de alongamento na ruptura e os maiores valores do módulo de elasticidade em ambas as velocidades, com FM e LRT mais baixos, possivelmente

devido à presença de Antimônio (Sb) a uma microestrutura lamelar que pode não favorecer a resistência à tração. O aumento significativo do Módulo de Elasticidade em V500 (> 150 %) reforçou sua natureza mais rígida e menos flexível sob altas taxas de deformação.

Figura 17: Curva tensão em função da deformação para o: A) PVC virgem, B) Blenda 50/50 SENAI, C) Blenda 50/50 industrial. Os dados completos estão nos Apêndices 3 a 14.



Fonte: o autor (2025).

Em suma, a incorporação de PVC reciclado oriundo do SENAI na blenda ofereceu um balanço vantajoso de resistência e alongamento ao material, superando o PVC virgem em resistência à tração e apresentando ductilidade adequada. Por outro lado, o PVC reciclado de origem industrial se mostrou mais rígido e menos resistente do que o oriundo do SENAI, em ambas as velocidades. A menor resistência à tração observada no material Industrial pode ser atribuída à maior quantidade de partículas metálicas residuais, que atuam como pontos de concentração de tensão, facilitando a iniciação e propagação de trincas durante a sollicitação mecânica. Esse material Industrial, por ser mais rígido e menos resistente, pode ter aplicações limitadas onde flexibilidade e alta capacidade de carga são necessárias.

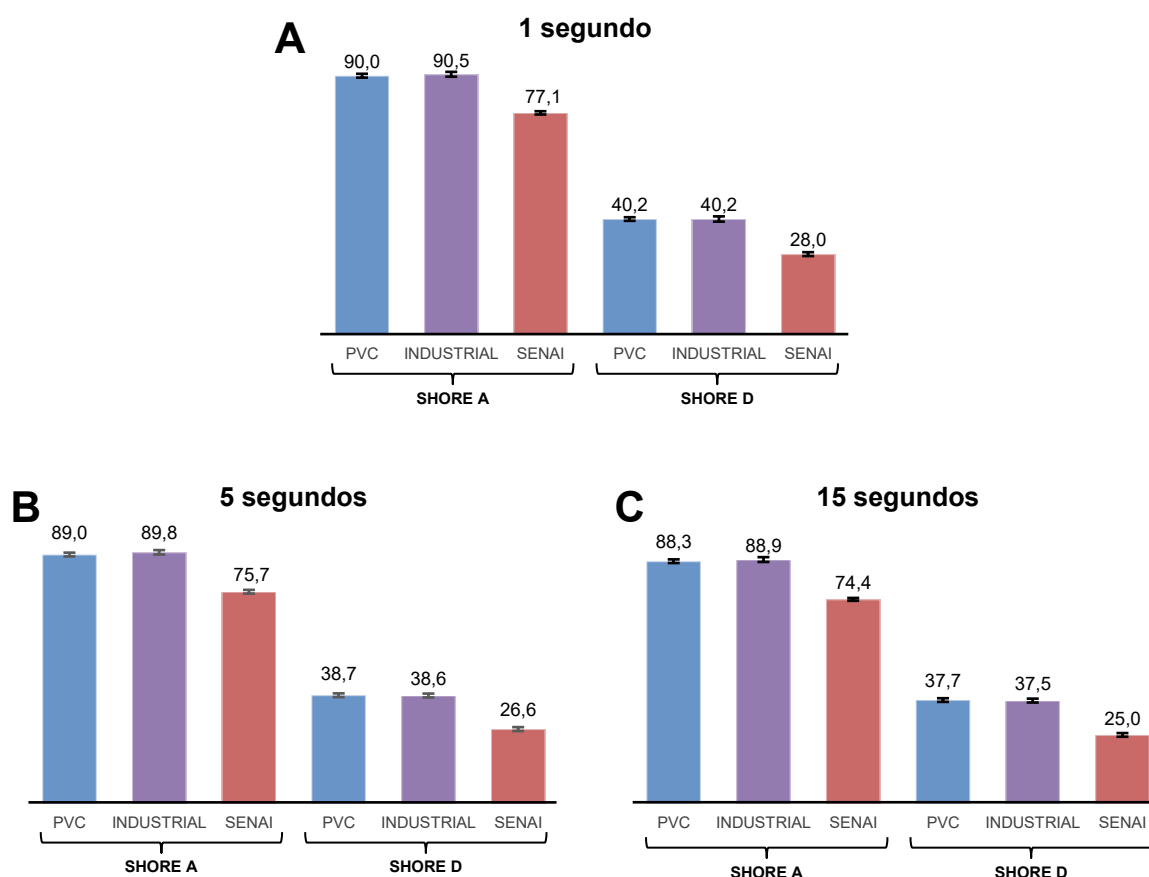
4.4 Dureza

A dureza é uma propriedade fundamental para caracterizar materiais poliméricos, pois indica sua resistência à indentação e à deformação plástica. Para esse tipo de material, utilizam-se principalmente as escalas Shore A (materiais macios) e Shore D (materiais rígidos). A seleção correta da escala é essencial para obter resultados precisos e significativos: valores acima de 90 Shore A devem ser avaliados em Shore D, enquanto valores abaixo de 20 Shore D devem ser medidos em Shore A, evitando o fundo de escala e garantindo precisão na faixa adequada do instrumento.

O tempo de aplicação da carga também influencia a leitura devido ao comportamento viscoelástico dos polímeros. Leituras em 1 s capturam a resposta elástica inicial e são úteis para uma avaliação rápida e para materiais que exibem pouca fluência; em 5 s, fornecem um valor mais estável e são comumente adotadas em normas como a ASTM D2240; e, em 15 s, evidenciam a fluência sob carga contínua.

Neste estudo, foram realizados ensaios de dureza Shore A e Shore D no PVC Virgem, e nas blendas 50/50 do SENAI e industrial, com medições nos tempos de 1, 5 e 15 s. Embora a principal escala para o material em questão possa ser a Shore A, a inclusão de medições em Shore D permitiu uma compreensão mais completa do espectro de rigidez do material, do comportamento sob diferentes condições de indentação, e da evolução temporal associada ao comportamento viscoelástico. Os resultados estão apresentados na Figura 18.

Figura 18: Compartivo de dureza Shore A e Shore D entre o PVC virgem (azul), blenda SENAI (vermelho) e blenda industrial (roxo), obtidos nos ensaios de dureza Shore A e Shore D, submetidos à: A) 1 segundo, B) 5 segundos e C) 15 segundos.



Fonte: O autor (2025).

Na escala Shore A, destinada a materiais mais macios, o PVC virgem e a blenda com resíduo industrial apresentaram durezas iniciais próximas (~90), enquanto a blenda com resíduo do SENAI exibiu valores significativamente menores (~75). Essa diferença demonstrou que o material com resíduo SENAI, além de ser mais macio, possuía maior flexibilidade entre as amostras avaliadas na escala Shore A.

Tendência similar foi observada na escala Shore D, em que o PVC virgem e a blenda industrial registraram valores próximos (~40 e ~37), respectivamente para 1 e 15 s, enquanto a blenda SENAI apresentou as menores leituras (28 → 25), novamente refletindo menor rigidez estrutural.

A diminuição observada da dureza de 1 para 15 s em todos os materiais, em ambas as escalas, indica um comportamento viscoelástico dos materiais. Essa variação

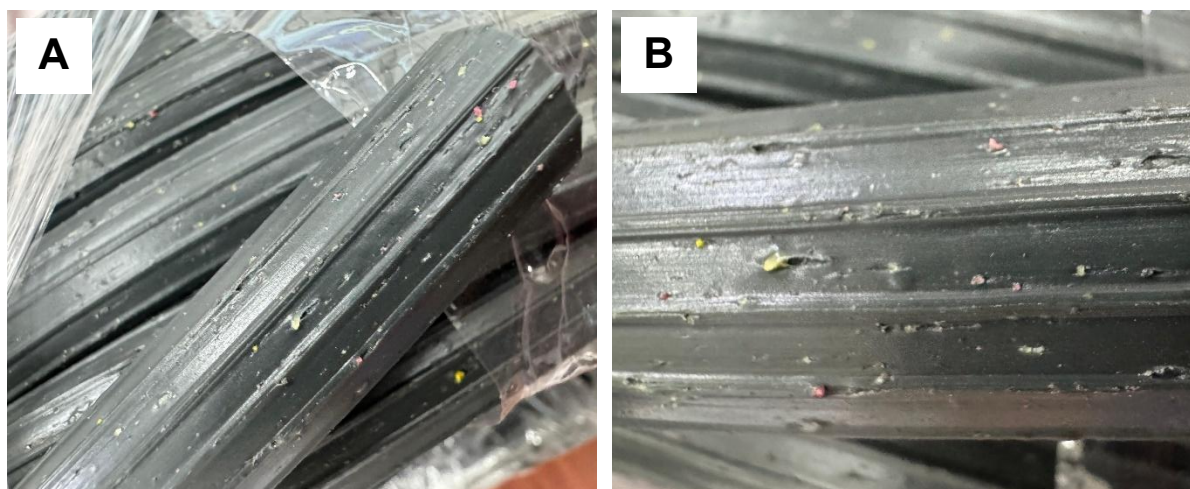
reflete o relaxamento da cadeia polimérica sob a carga constante do indentador do durômetro, sendo os materiais com maior capacidade de relaxamento aqueles que tendem a apresentar uma queda mais acentuada na leitura ao longo do tempo.

Relacionando os resultados de dureza com os ensaios de tração observou-se coerência: a blenda SENAI combinou um Módulo de Elasticidade intermediário com maior valor de alongamento na ruptura e menor dureza, sendo, portanto, o mais macio e dúctil. Essa combinação se mostrou a mais desejável para aplicações que exigem flexibilidade. Por outro lado, o PVC virgem e a blenda industrial exibiram maior dureza e maior rigidez, com destaque para o industrial, que apresentou o maior módulo de elasticidade, confirmando seu comportamento mais rígido e resistente à penetração.

4.5 Ensaio de estanqueidade nas mangueiras extrudadas.

O ensaio de estanqueidade verificou a capacidade funcional das mangueiras produzidas com a blenda SENAI/PVC Virgem (50/50), avaliando sua aptidão para reter fluidos sob pressão sem apresentar vazamentos (Figura 19). Esse teste foi particularmente relevante diante da presença de contaminantes metálicos no composto reciclado, identificados nas análises microestruturais, que poderiam originar defeitos, atuando como concentradores de tensão e comprometendo a estanqueidade da mangueira inviabilizando sua aplicação.

Figura 19: Mangueira produzida com blenda SENAI/PVC Virgem 50/50 (A), evidenciando a presença de resíduos superficiais (B), mas que não foram significativos do ponto de vista funcional do aparato.



Fonte: O autor (2025).

As amostras submetidas à pressão de ensaio (145 psi) não apresentaram indícios de vazamento, demonstrando que, mesmo ainda contendo partículas residuais de cobre e cargas minerais, o encapsulamento feito pela matriz polimérica foi eficiente, garantindo a coesão necessária para suportar a solicitação mecânica e validando a viabilidade técnica das mangueiras produzidas com 50% de material reciclado.

4.6 Ensaio de Ruptura

O comportamento mecânico limite e a segurança estrutural das mangueiras foi avaliado com o ensaio de ruptura, submetendo os corpos de prova a pressões crescentes até a falha catastrófica da parede (Figura 20). O monitoramento em tempo real dos testes foi realizado pelo software *Elipse*, que garantiu a precisão no registro da pressão no momento do colapso da estrutura. Os gráficos de todos os ensaios estão apresentados nos Apêndices 21 a 26.

Figura 20: Ensaio de ruptura da mangueira feita com a blenda SENAI/PVC Virgem (50/50).



Fonte: O autor (2025).

Os resultados obtidos revelaram um desempenho surpreendente e ligeiramente superior para o compósito desenvolvido com material do SENAI. Enquanto as amostras produzidas exclusivamente com PVC virgem apresentaram valores de ruptura de 235, 240 e 243 psi, as amostras contendo 50 % de material reciclado demonstraram tenacidade ligeiramente superior, suportando pressões de 266, 274 e 249 psi. Essa análise demonstrou que a presença do resíduo de cabos elétricos não comprometeu a resistência à pressão interna; pelo contrário, promoveu um incremento de cerca de 10 % nesta propriedade em relação ao padrão virgem.

O aumento na resistência à ruptura pôde ser atribuído à presença das cargas minerais (carbonato de cálcio e silicatos) e partículas metálicas residuais identificadas na análise microestrutural (EDS). Esses elementos, quando bem encapsulados pela matriz polimérica, como comprovado anteriormente pelo teste de estanqueidade, podem atuar como agentes de reforço mecânico, aumentando a rigidez do sistema e elevando a pressão necessária para deformar e romper a parede da mangueira.

4.7 Avaliação da Processabilidade

A processabilidade do material é sempre o ponto principal para qualquer possibilidade de aproveitamento de polímeros reciclados, pois sem a convicção de que ele apresentará bom desempenho de processamento, não há viabilidade técnica e econômica. Nesse estudo, ensaios práticos iniciais em calandras, extrusoras, prensas e injetoras foram conduzidos mesmo antes dos testes laboratoriais e forneceram indícios importantes sobre o comportamento desses materiais, especialmente quanto à estabilidade do fluxo fundido, que motivaram o desenvolvimento desse trabalho.

No início a elevada frequência de troca das telas de filtragem na saída da extrusora e os entupimentos sucessivos no bico da máquina injetora demandaram ajustes constantes. Essa dificuldade foi correlacionada à maior carga de partículas metálicas residuais identificadas na composição do material, as quais obstruíam os filtros e promoviam falhas no preenchimento dos moldes. Por outro lado, elas foram importantes para compreender a influência da primeira etapa de extrusão, que se mostrou fundamental para operações com alta produtividade (injeção e extrusão). Quanto mais eficaz a remoção das impurezas na primeira extrusão, melhor foi a processabilidade do material.

O comportamento do material durante as etapas de processamento forneceu informações importantes sobre seus limites de aplicação. De maneira geral, a blenda feita com material SENAI exibiu fluxo significativamente mais estável, menor frequência de troca de telas e resultou em melhor desempenho tanto na extrusão quanto na calandragem e prensagem, onde gerou lâminas mais homogêneas e com menos defeitos superficiais. Assim, a avaliação integrada entre processabilidade e caracterização mecânica indicou que o material SENAI apresentava maior viabilidade industrial e desempenho superior, enquanto o material industrial demonstrava limitações diretamente relacionadas ao nível mais elevado de impurezas metálicas.

4.8 Ensaio de Intemperismo

Os ensaios foram realizados com corpos de prova de PVC virgem e de blends 50/50 SENAI e industrial, sendo três unidades sem envelhecimento e três envelhecidas para cada material. Após 500 horas de exposição à radiação UV, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração com velocidade de 50 mm/min. O objetivo foi comparar as propriedades mecânicas dos materiais antes e depois do envelhecimento, observando as alterações estruturais e de desempenho associadas à degradação do material (Figuras 21 e 22).

Importante mencionar que os corpos de prova utilizados nesses ensaios não foram os mesmos daqueles utilizados na seção 4.3, o que explica a diferença nos valores. Aqui, o desvio padrão apresentado foi maior, pois não foi realizado o tratamento estatístico dos dados, já que o número de amostras era limitado à 3.

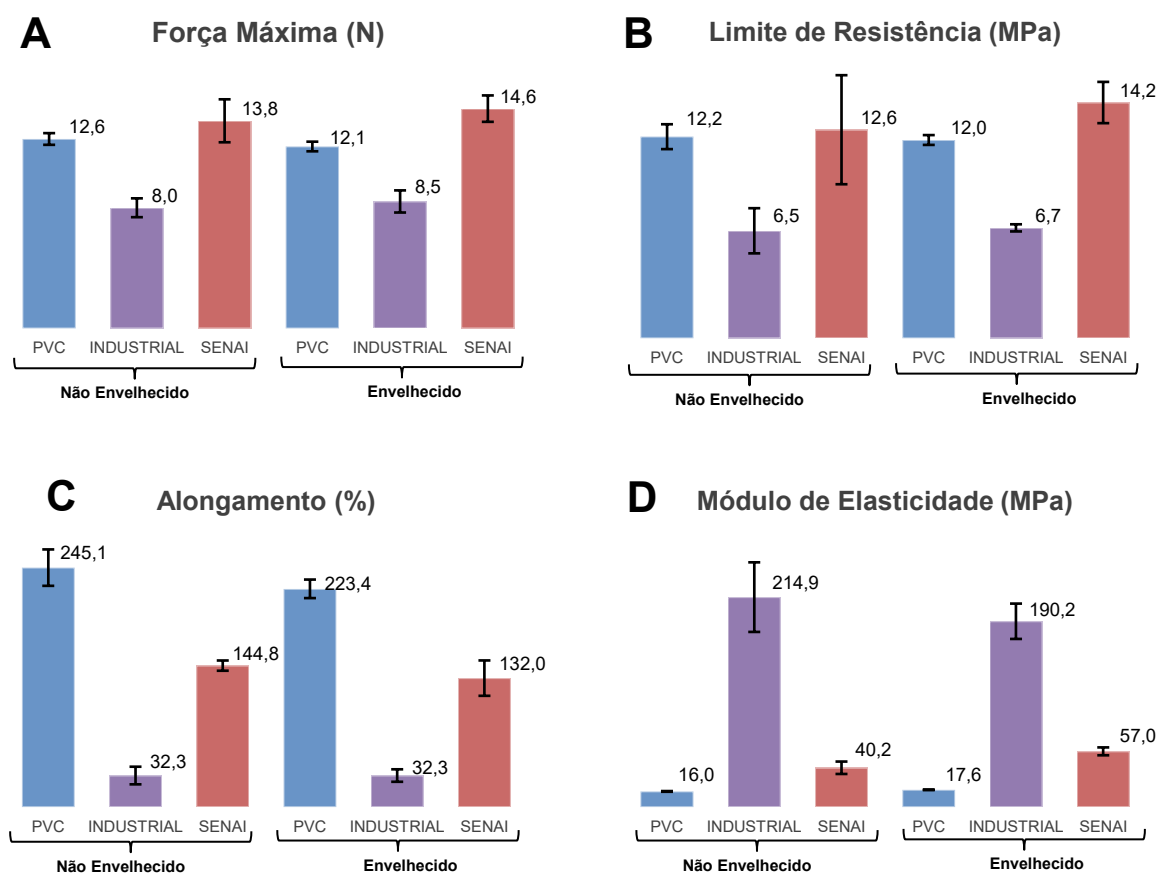
Os ensaios de tração após 500 horas de intemperismo acelerado permitiram observar:

- a) PVC virgem: apresentou uma leve queda na FM (12,6→12,1 N) e no LRT (12,2→11,9 MPa), acompanhada de redução perceptível no alongamento (245,1→229,4 %), indicando perda de ductilidade e uma degradação superficial por UV que afetou a capacidade máxima de carga, mas mantendo grande parte da resistência do material.
- b) Blenda SENAI: demonstrou um comportamento interessante, com um leve aumento na FM (12,8→14,5 N), no LRT (12,6→14,2 MPa) e no Módulo de

Elasticidade (40,2→57,0 MPa) e redução moderada no alongamento (149,8→132,1 %) após o envelhecimento. Essas observações indicam que o envelhecimento afetou a capacidade do material de se deformar, sugerindo um efeito de endurecimento superficial por reticulação ou perda de plastificantes induzida pela radiação UV.

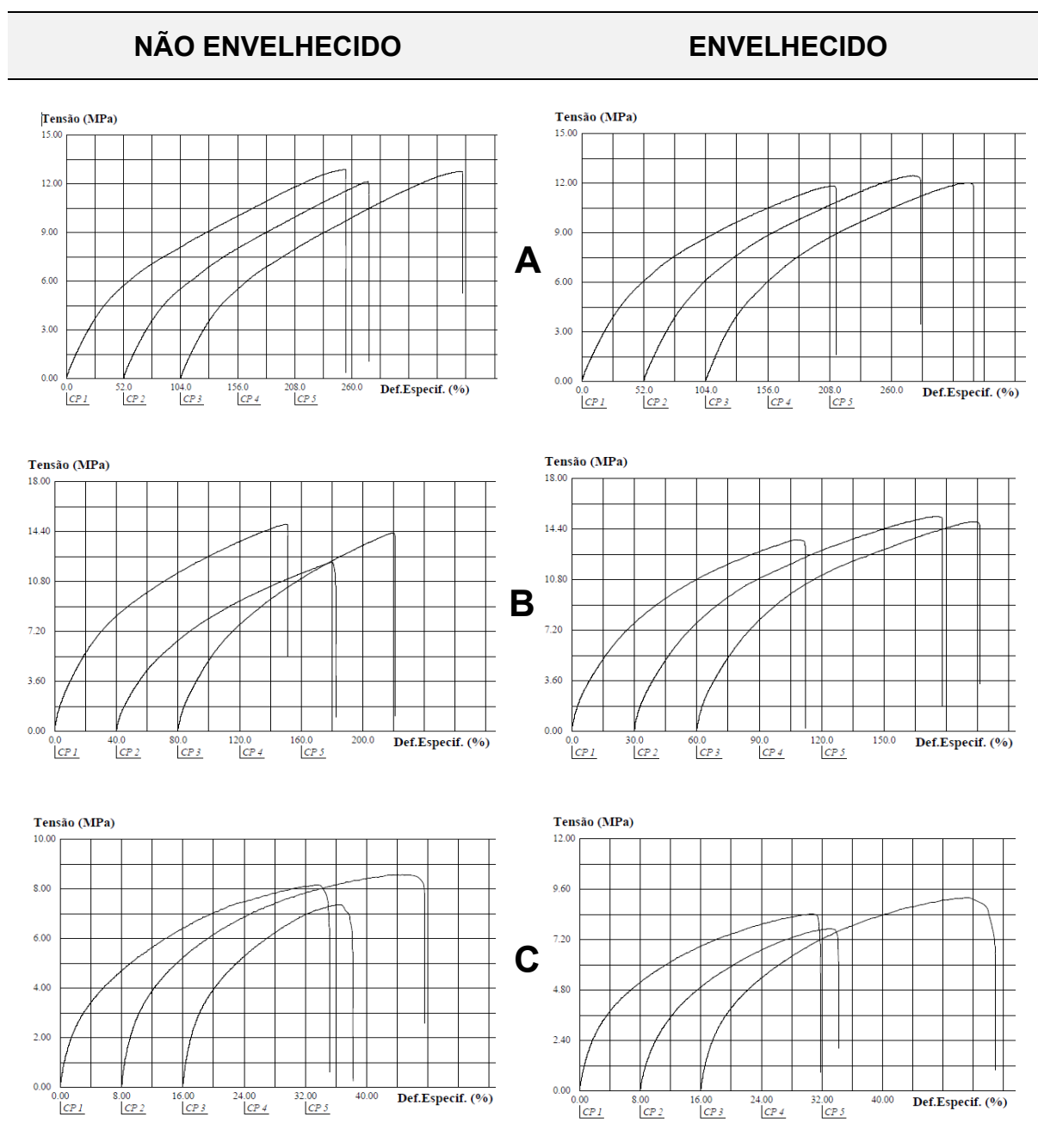
- c) Blenda industrial: exibiu comportamento incomum. A FM e o LRT apresentaram leves acréscimos (8,1→8,5 N e 6,5→6,7 MPa), enquanto o alongamento permaneceu baixo e praticamente inalterado, indicando uma degradação mais severa da cadeia polimérica ou uma fragilização que não se manifestou como aumento de rigidez.

Figura 21: Comparação das propriedades mecânicas do PVC virgem (azul), blenda SENAI (vermelho) e blenda industrial (roxo) envelhecidos e não envelhecidos, obtidos nos ensaios de tração com velocidades de deslocamento de 50 mm/min. Parâmetros: A) Força máxima, B) Limite de resistência, C) Alongamento e D) Módulo de Elasticidade.



Fonte: O autor (2025).

Figura 22: Curvas comparativas de tensão *em função de* deformação dos materiais após envelhecimento: A) PVC virgem, B) Blenda 50/50 SENAI, C) Blenda 50/50 industrial. Os dados completos estão nos Apêndices 15 a 20.



Fonte: O autor (2025).

No conjunto, os resultados indicaram que o intemperismo afetou as propriedades mecânicas de todos os materiais, mas de maneiras distintas. O PVC virgem e a blenda SENAI apresentaram um aumento da rigidez que veio acompanhada de uma perda de ductilidade, evidenciada pela redução do alongamento na ruptura. Já a blenda

industrial revelou um comportamento menos previsível, sugerindo maior susceptibilidade à quebra de cadeia e perda de integridade estrutural.

A análise das alterações superficiais do material é essencial para entender a sua durabilidade em ambientes externos. Por conseguinte, ela foi complementada com imagens de MEV para uma compreensão mais profunda dos mecanismos de degradação superficial.

As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram obtidas com ampliação de 500 vezes, tanto na condição não envelhecida quanto após 500 horas de intemperismo acelerado e confirmaram que o intemperismo acelerado induziu alterações morfológicas distintas em cada material, que se correlacionaram com as mudanças em suas propriedades mecânicas (Figura 23).

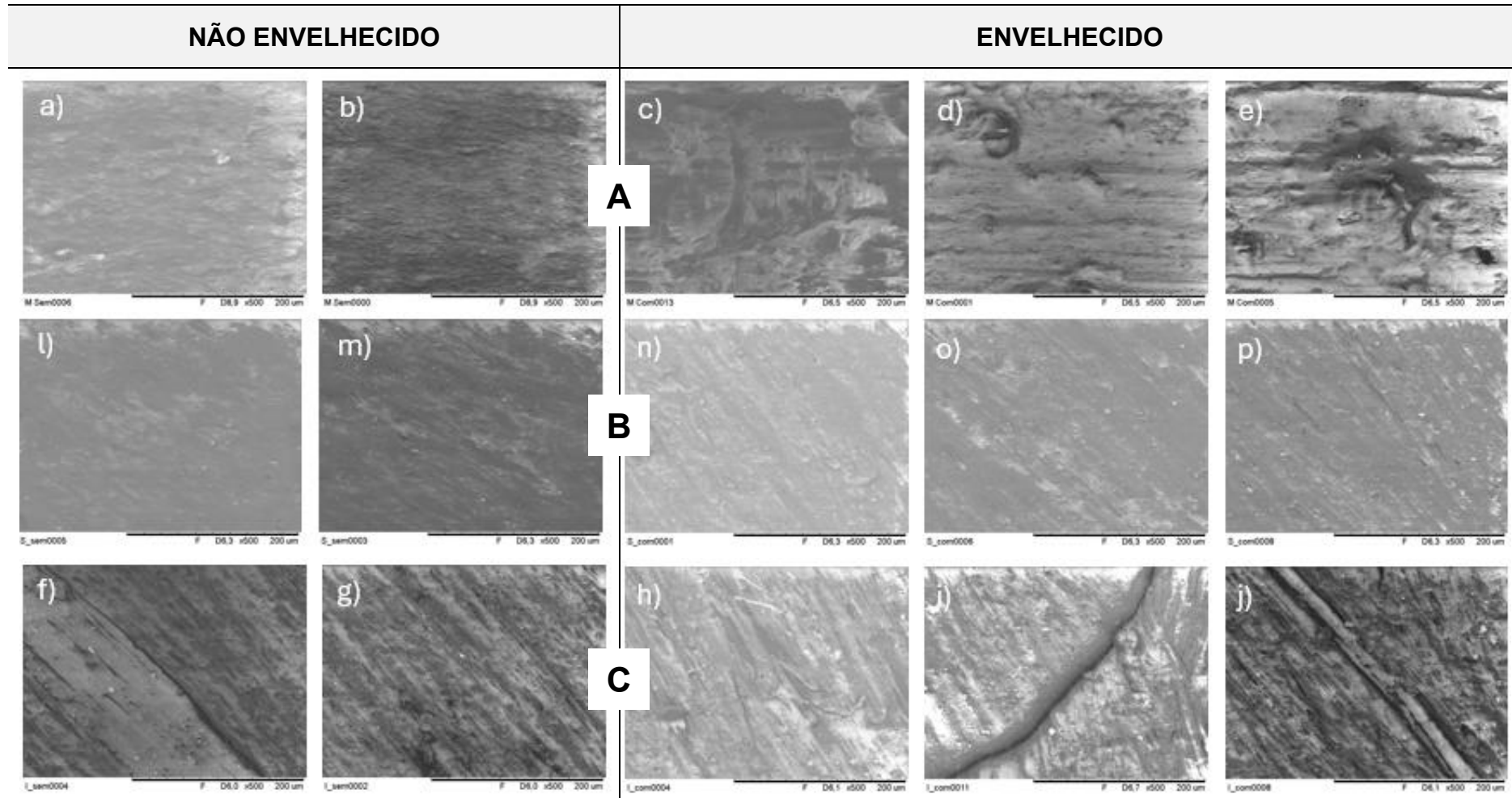
No PVC virgem (Figura 23A, miniaturas a e b), a superfície inicial apresentou aspecto homogêneo, com textura relativamente lisa e baixa incidência de defeitos, característica típica de um material monofásico com boa coesão entre cadeias. Após o envelhecimento (miniaturas c, d e e), observou-se o surgimento de microfissuras discretas e uma leve acentuação de rugosidade superficial, compatíveis com processos de oxidação superficial, perda gradual de plastificantes e clivagem induzidas por radiação UV. Ainda assim, o material manteve um padrão bastante uniforme, coerente com a redução moderada de ductilidade observada nos ensaios mecânicos.

Na blenda SENAI (Figura 23B, miniaturas l e m), a superfície não envelhecida mostrou-se visualmente limpa e com certa homogeneidade, apresentando textura relativamente contínua, ocorrência moderada de defeitos e distribuição uniforme dos elementos constituintes. Após o envelhecimento (miniaturas n, o e p), poucas alterações morfológicas foram visíveis, possivelmente um leve aumento de rugosidade e mínimas microfissuras superficiais. Tais observações apoiam a hipótese de que um endurecimento ou reticulação provocado pela exposição à luz UV aumentou a resistência e rigidez do material, mesmo com a perda de alongamento, sugerindo uma degradação mais controlada ou uma maior resistência intrínseca aos fatores de intemperismo.

As amostras da blenda industrial (Figura 23C) apresentaram, mesmo antes do envelhecimento, uma superfície substancialmente mais heterogênea, com presença de estrias, cavidades, regiões de tração diferencial e marcas de fluxo, indicando uma microestrutura irregular e alto grau de contaminação ou incompatibilidade entre fases (miniaturas f e g). Após o intemperismo, essas irregularidades tornaram-se mais evidentes, com a ampliação de fissuras e regiões de degradação localizada (miniaturas i, j e l), todavia, a ausência de uma deterioração mais severa, juntamente com o aumento da resistência à tração, sugere que os mecanismos de envelhecimento podem envolver rearranjos moleculares internos, uma reticulação ou uma estabilização superficial que não se manifestou como fragilização visível.

Finalmente, de forma comparativa, o PVC virgem apresentou o menor grau de degradação morfológica e mantendo sua integridade superficial, o material SENAI demonstrou bom desempenho com alterações moderadas, porém consistentes com aumento de rigidez após envelhecimento, enquanto o resíduo industrial evidenciou degradação mais evidente, com ampliação de defeitos, destacamento interfacial e acúmulo de tensões, o que explica a queda de propriedades mecânicas observada. Assim, as imagens de MEV corroboram de maneira clara os resultados de tração e dureza, evidenciando que a formulação SENAI supera a Industrial em estabilidade estrutural e consistência microestrutural.

Figura 23: Imagens de MEV (500x) das superfícies dos materiais antes e depois do intemperismo acelerado: A) PVC virgem, B) Blenda SENAI, C) Blenda industrial.



Fonte: O autor (2025).

4.9 Discussão integrada e implicações para a Economia Circular

A contaminação residual por cobre, mesmo em baixos teores, ainda continua sendo um desafio, porém gerando novas possibilidades de aplicações. Conforme discutido por Cui e Forssberg (2003), a presença de metais em polímeros reciclados pode atuar como catalisador de degradação termoxidativa (calor e oxigênio) durante o reprocessamento, comprometendo as propriedades finais do material. A análise de MEV (Figura 12), por exemplo, revelou a presença de partículas metálicas que, embora dispersas, podem iniciar processos de degradação.

A processabilidade do material, mesmo otimizada, ainda necessita de ajustes do material buscando a homogeneidade da mistura, já que a temperatura, parâmetro crítico que pode limitar a taxa de produção e a qualidade final do produto, é um forte agente de degradação da matriz polimérica. Nesse contexto, a alteração de propriedades devido à degradação ou à presença de contaminantes dificulta o processamento em equipamentos convencionais, exigindo ajustes específicos e customizados nas condições de extrusão e moldagem.

Por fim, destaca-se que a inserção do PVC reciclado na Economia Circular é mais significativa que propriamente o desempenho técnico dos materiais aqui estudados, e exige um equilíbrio estratégico entre custo, sustentabilidade e desempenho. Historicamente, materiais reciclados apresentam um custo de produção inicial superior ao dos materiais virgens, devido aos desafios da coleta, separação, purificação e reprocessamento.

Todavia, a necessidade global para um modelo de Economia Circular solicita a reintrodução desses materiais no mercado, o que não é apenas uma questão de responsabilidade ambiental, mas uma estratégia essencial para a conservação de recursos, a redução de resíduos e a mitigação dos impactos climáticos, justificando o investimento na superação das barreiras de custo iniciais por meio de inovações tecnológicas e políticas públicas de incentivo.

Dessa forma, consolida-se a análise crítica que sustenta as conclusões e recomendações desse estudo, evidenciando a contribuição científica e tecnológica do trabalho para o aproveitamento sustentável de resíduos poliméricos contaminados com metais, principalmente, o cobre.

5 CONCLUSÕES

Para enfrentar os desafios associados ao reaproveitamento de polímeros provenientes de fios e cabos elétricos pós-consumo, este estudo analisou o impacto da contaminação metálica residual — especialmente cobre — sobre as propriedades físico-mecânicas, morfológicas e de processabilidade do PVC reciclado, propondo estratégias de mitigação e avaliando a reciclagem mecânica como estratégia para inserção desses resíduos na Economia Circular. A partir da caracterização dos materiais reciclados foi possível concluir que:

- a) a reciclagem mecânica do PVC contaminado por cobre é tecnicamente possível, desde que associada a estratégias adequadas de remoção de contaminantes e aditivação funcional. A reciclagem mecânica se mostrou eficaz para alcançar níveis de revalorização compatíveis com produtos comerciais;
- b) a contaminação metálica residual, especialmente por cobre, é determinante para o desempenho dos materiais reciclados, afetando diretamente as propriedades mecânicas, o comportamento reológico e o acabamento superficial;
- c) a extrusão com filtração por telas mostrou-se uma estratégia eficaz para reduzir parcialmente a contaminação metálica, melhorando significativamente a processabilidade do material e diminuindo entupimentos, embora não tenha eliminado completamente as partículas incrustadas na matriz polimérica;
- d) As blendas 50/50 de material virgem aditivado e PVC reciclado resultaram em um material com maior limite de resistência à tração e força máxima em relação ao material reciclado sem aditivos, indicando que formulações adequadas conseguem mitigar de forma efetiva os efeitos da degradação e da contaminação;
- e) As análises de MEV evidenciaram diferenças na superfície dos materiais reciclados, destacando maior heterogeneidade e a presença representativa de partículas metálicas incrustadas na amostra industrial, em contraste com a maior uniformidade e menor número de defeitos visualizados no material do SENAI;
- f) Os ensaios de tração e dureza confirmaram que o fator granulometria e dispersão do contaminante é determinante. Apesar do material SENAI ter apresentado teor de cobre comparável, a sua eficácia superior foi atribuída à menor dimensão das

partículas metálicas, que reduziram a formação de concentradores de tensão e, conseqüentemente, a fragilização. A relação entre a quantidade de resíduos presentes na matriz polimérica reciclada e a rigidez, ductilidade e resistência mecânica do material foi confirmada, sendo o Industrial mais rígido e frágil e o do SENAI mais equilibrado entre flexibilidade e resistência. O PVC reciclado proveniente do SENAI demonstrou melhor desempenho global, apresentando propriedades mecânicas mais próximas ao PVC virgem, maior estabilidade de fluxo e menor incidência de falhas superficiais, destacando-se como material mais promissor para revalorização. O PVC reciclado de origem Industrial exibiu maior quantidade de contaminantes, tanto metálico quanto de outros tipos de matrizes poliméricas e, conseqüentemente, apresentou desempenho inferior.

- g) O envelhecimento acelerado revelou que o PVC virgem e o material SENAI tendem a aumentar a rigidez após exposição ao intemperismo, comportamento associado à possível reticulação superficial ou perda de plastificantes; já o material industrial apresentou sinais de degradação estrutural mais acentuada.
- h) A fabricação de mangueiras extrudadas foi tecnicamente viável, validando a aplicabilidade industrial para produtos de menor exigência mecânica e confirmando que o PVC reciclado pode ser reintroduzido na cadeia produtiva com desempenho satisfatório.

Em suma, esse estudo contribuiu para ampliar o entendimento sobre o comportamento mecânico e morfológico de polímeros reciclados contaminados por metais, demonstrando uma aplicação prática para o reaproveitamento seguro e economicamente viável desses resíduos. Assim, ele reafirma que transformar resíduos em recursos é um caminho viável e necessário.

A revalorização de polímeros contaminados, quando sustentada por Ciência, Tecnologia e Gestão Circular, representa não apenas uma solução para o problema dos resíduos industriais, mas uma transição rumo a indústria mais inteligente, responsável e regenerativa, capaz de alinhar competitividade e sustentabilidade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No contexto da Engenharia Mecânica e da Economia Circular, os resultados reforçam o papel da reciclagem como eixo estratégico para redução do descarte inadequado e substituição parcial de matéria-prima virgem, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade industrial e eficiência de recursos.

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, foram vislumbradas algumas oportunidades para dar continuidade à pesquisa, as quais sugerem-se, entre outras:

- a) estudar blendas com teor superior de PVC reciclado, mensurando suas propriedades físico-mecânicas e possíveis aplicações comerciais;
- b) determinar a condutividade elétrica das blendas de material reciclado, visando o emprego desse material em situações em que um material isolante é requerido;
- c) testar o emprego do material reciclado na manufatura de outros produtos de valor comercial;
- d) avaliar como sucessivos reprocessamentos poderiam afetar a degradação mecânica do material, simulando ciclos reais da economia circular;
- e) realizar análises de custo, análises de ciclo de vida (ACV) e viabilidade industrial considerando escalabilidade, logística reversa e competitividade frente ao PVC virgem. Então, quantificar os benefícios ambientais da revalorização do PVC e orientar políticas industriais voltadas à circularidade dos materiais;
- f) estudar técnicas de separação primária do polímero e secundária do cobre.
- g) avaliar e otimizar a granulometria do material industrial, visando melhorar seu desempenho nos processos subsequentes e sua aplicabilidade industrial.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. **Perfil 2025**. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2025/>. Acesso em: 15 out. 2025.

ADVANCING STANDARDS TRANSFORMING MARKETS. **ASTM G154-23**: Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2023.

ADVANCING STANDARDS TRANSFORMING MARKETS. **ASTM D 638-22**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

ADVANCING STANDARDS TRANSFORMING MARKETS. **ASTM D1004-21**: Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ADVANCING STANDARDS TRANSFORMING MARKETS. **ASTM D2240-21**: Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ADVANCING STANDARDS TRANSFORMING MARKETS. **ASTM D2863**: Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-Like Combustion of Plastics (Oxygen Index). West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ADVANCING STANDARDS TRANSFORMING MARKETS. **ASTM F876-23**: Standard Specification for Crosslinked Polyethylene (PEX) Tubing. West Conshohocken: ASTM International, 2023.

AFINKO POLÍMEROS. **Como determinar uma contaminação em um polímero?** Afinko Polímeros, 2019. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/como-determinar-uma-contaminacao-em-um-polimero/>. Acesso em: 2 ago. 2025.

AHMAD, S.; AHMED, R.; RAHMAN, R. A.; ULLAH, A.; JAMAL, A.; AKRAM, R. A comprehensive study of nano/micro fillers on silicone rubber insulators: Electrical, mechanical, and thermal characterization. *Resultados em Engenharia*, [S. l.], v. 25, n. 103654-, 2025. DOI 10.1016/j.rineng.2024.103654. Disponível em: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=d1f1ff22-86ff-3dda-a84c-3e0b6c46cc52>. Acesso em: 4 set. 2025.

AL-SALEM, S. M.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. **Waste Management**, 29(10), 2009, p.2625-2643. ISSN 0956-053X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09002190?via%3Dihub>. Acesso em: 30 ago. 2025.

AMIN, M. L. *et al.* Plastics Recycling: A Comparative Study of Different Analytical Techniques. **Macromolecular Materials & Engineering**, [s. l.], p. 1, 2025. DOI 10.1002/mame.202500195. Disponível em: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=0a1e2544-4bb7-3cd3-affe-a8a6d57c3245>. Acesso em: 2 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 2017. 23p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13248**: Cabos de potência e condutores isolados sem cobertura, não halogenados e com baixa emissão de fumaça, para tensões até 1 kV - Requisitos de desempenho. Versão corrigida 2015. Rio de Janeiro, 2014. 31p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7286**: Cabos de potência com isolação extrudada de borracha etilenopropileno (EPR, HEPR ou EPR 105) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro, 2022. 37p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7287**: Cabos de potência com isolação extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro, 2023. 33p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7288**: Cabos de potência com isolação sólida extrudada de cloreto de polivinila (PVC) ou polietileno (PE) para tensões de 1 kV a 6 kV - Especificação. Rio de Janeiro, 2018. 20 p.

BAZLI, L.; ESKANDARINEZHAD, S.; KAKUR, N.; RAMACHANDRAN, V.; BACIGALUPE, A.; MANSILLA, M.; ESCOBAR, M. Electrical properties of polymer blend composites based on silicone rubber/EPDM/clay hybrid for high voltage insulators. **Journal of Composites and Compounds**, 2021, 3(6), 18–24. DOI: <https://doi.org/10.52547/jcc.3.1.3>. Disponível em: <https://www.jourcc.com/index.php/jourcc/article/view/jcc313/143>. Acesso em: 30 ago. 2025.

BREBU, M. *et al.* Study of the natural ageing of PVC insulation for electrical cables. **Polymer Degradation and Stability**, v. 67, n. 2, dez. 1999, p. 209–221, [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(99\)00114-7](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(99)00114-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391099001147?via%3Dihub>. Acesso em: 15 set. 2024.

BUCK, R. C.; FRANKLIN, J.; BERGER, U.; CONDER, J. M.; COUSINS, I. T.; DE VOOGT, P.; VAN LEEUWEN, S. P. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v.7, Issue 4, p. 513-541, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/ieam.258>. Disponível em: <https://academic.oup.com/ieam/article-abstract/7/4/513/7741313?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 30 ago. 2025.

CANEVAROLO Jr., S. V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Artliber, 2013.

CASSIDY, P. E. Well architected fluoropolymers: synthesis, properties and applications by Bruno Améduri and Bernard Boutevin (Ecole Nationale Supérieure de Chemie de Montpellier). Elsevier Ltd: Oxford. 2004. xviii + 481 pp. \$189.00. ISBN 0-08-044388-5. **Journal of the American Chemical Society**, 127(9), 3233–3234. doi:10.1021/ja040989f.

CESTARI, S. P. **Papel sintético sustentável para embalagem**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236945526_Dissertacao_Sibele_-_Papel_sintetico_sustentavel_-_versao_final. Acesso em: 19 ago. 2024.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.13, n.1, p. 1-13, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/26367236_Polietileno_Principais_tipos_propriedades_e_aplicacoes. Acesso em: 11 set. 2024.

CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 99, n. 3, p. 243–263, 28 May 2003. DOI: 10.1016/S0304-3894(03)00061-X. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00061-X). Acesso em: 24 abr. 2025.

DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J. C. **Electrical degradation and breakdown in polymers**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1992. 601p. ISBN: 0863411967. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=8Tm7dH99-XEC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 04 set. 2025.

DOW CORNING. **Silicone rubber for wire and cable applications**. [S.l.]: Dow Corning, [20--?]. Disponível em: XXXX. Acesso em: 15 maio 2024.

EBNESAJJAD, S. (ed.) **Introduction to fluoropolymers: materials, technology and applications**. Oxford: William Andrews Publishing. 2013. ISBN 978-1-4557-7. 442-5. 331p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=NrE7knXbDC0C&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 04 set. 2025.

EBNESAJJAD, S. **Fluoroplastics, vol. 1 - non-melt processible fluoroplastics**: The definitive user's guide and databook. Norwich: Plastics Design Library. 2000. 361p. ISBN 1-884201-84-7. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=-H4yIE71aGMC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 04 set. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition**, 2013a, 98p. Disponível em: https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/27265af68f11ef30/original/Towards-the-circular-economy-Vol-1.pdf?_gl=1*1681lok*_gcl_au*MjlzNDk5NjcwLjE3NTY0OTQ4NjQ.*_ga*MTQwMjAwMDg4My4xNzU2NDk0ODY0*_ga_V32N675KJX*czE3NTY0OTQ4NjEkbzEkZzEkdDE3NTY0OTUxODckajUzJGwwJGgw. Acesso em: 17 set. 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy vol. 2: Opportunities for the consumer goods sector**, 2013b, 112p. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-2-opportunities-for-the-consumer-goods>. Acesso em: 28 ago. 2025.

ESMAIL, A. H. M. S. Impact of Insulation and Sheathing PVC Mixture on the Physical Properties. **Scholars International Journal of Chemistry and Material Sciences**, 3(3), p. 24-30, 2020. ISSN 2617-6556 (Online). DOI: 10.36348/sijcms. 2020.v03i03.002. Disponível em: https://saudijournals.com/media/articles/SIJCMS_33_24-30.pdf). Acesso em: 02 nov. 2025.

FERREIRA, M. B. S.; DOS SANTOS, C. G. Estudo da influência dos métodos de reticulação sobre as propriedades do polietileno. **Periódico Tchê Química**, v. 17, n. 36, p. 7-17, 2020. DOI: 10.52571/PTQ.v17.n36.2020.23_Periodico36_pgs_7_17.pdf. Disponível em: <https://www.tchequimica.com/issue36.php>. Acesso em: 27 ago. 2025.

FURUKAWA ELECTRIC LATAM. **Produtos: cabos de energia**. [S.l.]: Furukawa Electric Latam, [202-?]. Disponível em: <https://www.furukawalatam.com/pt-br/produtos-e-solucoes/cabos-de-energia>]. Acesso em: 15 maio 2024.

GARCIA, P. S.; CRUZ, S. A.; NERÍN, C. Comparação de diferentes processos de extrusão para limpeza do polipropileno reciclado removendo contaminantes voláteis e não voláteis. **Progresso em Plásticos de Borracha e Tecnologia de Reciclagem**, v. 30, n. 1, p. 37-54, 2014.

GENT, A. N. **Engineering with Rubber**. 3rd ed. Hanser, 2012, p. I-XVIII, ISBN 9783446427648. DOI: <https://doi.org/10.3139/9783446428713.fm>. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9783446427648500181>. Acesso em: 04 set. 2025.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, 114, 11-32, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615012287> Acesso em: 15 set. 2024.

GILBERT, Marianne (ed.). **Brydson's Plastics Materials**. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

GOHATRE, O.K., JAIDEV, K., SURESH, S.S., BISWAL, M., MOHANTY, S. AND NAYAK, S.K. Composition and Recyclability Analysis of Poly(Vinyl Chloride) Recovered from Computer Power Cables and Commercial Wires. *J Vinyl Addit Technol*, 2020. 26: 213-223. Disponível em: <https://doi.org.ez255.periodicos.capes.gov.br/10.1002/vnl.21734>. Acesso em: 02 nov. 2025.

HAN, R., LI, Y., ZHU, Q., NIU, K. Research on the preparation and thermal stability of silicone rubber composites: A review. **Composites Part C: Open Access**, v. 8, p. 100249, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100249>. Acesso em: 02 nov. 2025.

HARPER, C. A. (Ed.). **Handbook of plastics, elastomers, and composites**. 4th Edition. New York: McGraw-Hill. 2002. ISBN: 9780071384766.

HENRY, J.J.; SEILER, D.; PERRINAUD, R. **The “goods” on fluoropolymers in wire and cable**. Arkema Inc., [20--?]. Disponível em: https://hpp.arkema.com/files/live/sites/shared_arkema/files/downloads/HPP/article-reprints/Extreme-materials/kynar-article-reprints/ar-the-goods-on-fluoropolymers-in-wire-and-cable.pdf. Acesso em: 22 ago. 2025.

HOFMANN, W. **Rubber Technology Handbook**. New York: Hanser, 1989. 611p.

HULL, T. R.; WITKOWSKI, A.; HOLLINGBERY, L. Fire retardant action of mineral fillers. **Polymer Degradation and Stability**, 96 (8), 1462-1469, 2011. DOI: 10.1016/j.polymerdegradstab.2011.05.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391011001807>. Acesso em: 18 maio 2025.

IBPVC – Instituto Brasileiro do PVC. **Análise de desempenho de mercado e acompanhamento de indicadores setoriais da cadeia produtiva de PVC 2023**. Disponível em: [Relatorio_IBPVC_indicadores_anuais_2023_final.pdf](#). Acesso em: 23 set. 2024.

IGI, T.; MURATA, Y.; ABE, K.; SAKAMAKI, M.; KASHIYAMA, S.; KATAKAI, S. Advanced HVDC XLPE cable and accessories. In: 9th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2012), Hong Kong, 2012, p. 1-6. [Anais]. DOI: 10.1049/cp.2012.2129. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6615039>. Acesso em: 22 ago. 2025.

IGUS. **Conheça os tipos de materiais de revestimento de cabos e suas diferenças.** 2024. Disponível em: <https://blog.igus.com.br/conheca-os-tipos-de-materiais-de-revestimento-de-cabos-e-suas-diferencas/>. Acesso em: 31 out. 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – **IEC 60332-1-2: 2004.** Tests on electric and optical fiber cables under fire conditions - Part 1-2: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable - Procedure for 1 kW pre-mixed flame. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/1475>. Acesso em: 16 maio 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – **IEC 60502-2:2014+AMD1:2024 CSV.** Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/95394>. Acesso em: 16 maio 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – **IEC 60754-1:2011+AMD1:2019 CSV.** Test on gases evolved during combustion of materials from cables - Part 1: Determination of the halogen acid gas content. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/66144>. Acesso em: 16 maio 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – **IEC 60754-2:2011+AMD1:2019 CSV.** Test on gases evolved during combustion of materials from cables - Part 2: Determination of acidity (by pH measurement) and conductivity. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/66145>. Acesso em: 16 maio 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – **IEC 61034-2:2005+AMD1:2013+AMD2:2019 CSV.** Measurement of smoke density of cables burning under defined conditions - Part 2: Test procedure and requirements. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/66136>. Acesso em: 16 maio 2025.

JOSÉ, F. C.; NUNES, E. C. D. Transformando resíduos em recursos: a economia circular e a reciclagem de cabos elétricos. **Brazilian Journal of Development.** Curitiba, v.11, n. 8, 2025. DOI: 10.34117/bjdv11n8-010. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/81489/55930>. Acesso em: 30 ago. 2025.

KACZOREK-CHROBAK, K.; FANGRAT, J. PVC-based copper electric wires under various fire conditions: Toxicity of fire effluents. **Materials**, v. 13, n. 5, p. 1111, 2020. DOI: 10.3390/ma13051111. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/5/1111>. Acesso em: 15 ago. 2025.

KHAN, W. S.; ASMATULU, E.; UDDIN, M. N.; ASMATULU, R. **Recycling and reusing of engineering materials – Recycling for sustainable developments**. Amsterdam: Elsevier, 2022, ISBN 9780128224618. DOI: 10.1016/B978-0-12-822461-8.12001-7. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128224618120017>. Acesso em: 29 ago. 2025.

KHONAKDAR, H. A., MORSHEDIAN, J.; WAGENKNECHT, U.; JAFARI, S. H. An investigation of chemical crosslinking effect on properties of high-density polyethylene. **Polymer**, 44 (15), 2003, p. 4301-4309. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00363-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003238610300363X?via%3DiHub>. Acesso em: 27 ago. 2025.

KRUŽELÁK, J.; KVASNIČÁKOVÁ, A.; DŽUGANOVÁ, M.; HANZLIK, J.; BEDNARIK, M.; CHODÁK, I.; HUDEC, I. Sulfur and peroxide vulcanization of the blends based on styrene–butadiene rubber, ethylene–propylene–diene monomer rubber and their combinations. **Materials**, v. 17, n. 11, p. 2718, 2024. DOI: 10.3390/ma17112718. Disponível em: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=101bbf52-0474-384e-9ed7-1175b1eb19af>. Acesso em: 4 set. 2025.

KRYSZEWSKI, M. **Electrical properties of fluoropolymers**. In: G. HOUGHAM, P. E. CASSIDY, K.; JOHNS, T. DAVIDSON (Eds.). *Fluoropolymers: Synthesis and Properties*. Springer US. (1989).

KUMAR, V.; ALAM, M. N.; PARK, S. S. Review of recent progress on silicone rubber composites for multifunctional sensor systems. **Polymers**, [S. l.], v. 16, n. 13, p. 1841, 2024. DOI: 10.3390/polym16131841. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16131841>. Acesso em: 05 set. 2025.

LAGAN, A.; KESTNER, J. **Fluoropolymers**. In: *Modern Plastics Handbook*. McGraw-Hill. (1999).

LAHL, U.; ZESCHMAR-LAHL, B. material recycling of plastics – a challenge for sustainability. **Sustainability** 2024, 16, 6630, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16156630>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/15/6630>. Acesso em: 04 set. 2025.

LI, C.; ZHANG, C.; ZHAO, H.; ZHANG, H.; WANG, X.; HAN, B. Grafted UV absorber as voltage stabilizer against electrical degradation and breakdown in cross-linked polyethylene for high voltage cable insulation. **Polymer Degradation and Stability**, v.185, 2021. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109498. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391021000185>. Acesso em: 15 set. 2024.

LI, Y.; QI, L.; LIU, Y.; QIAO, J.; WANG, M.; LIU, X.; LI, S. Recent advances in halogen-free flame retardants for polyolefin cable sheath materials. **Polymers**, 2022, v. 14, n. 14, p. 2876, 2022. DOI: 10.3390/polym14142876. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/14/2876#:~:text=Generally%2C%20halogen%2Dfree%20FRs%20are,crucial%20for%20new%20material%20development>. Acesso em: 15 maio 2025.

LIM, H. C. A. **Chapter 20 – Thermoplastic polyesters**. Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition). Butterworth-Heinemann, 2017, p. 527-543, ISBN 9780323358248. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00020-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323358248000207>. Acesso em: 04 set. 2025.

LUCHT, D. P. L. **Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de formulações de poli (cloreto de vinila) com diferentes massas molares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/220413>. Acesso em: 30 ago. 2025.

MACHADO, G. B. **Reciclagem de fios elétricos**. Portal de resíduos sólidos. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-fios-eletricos/>. Acesso em: 17 set. 2024.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. São Paulo: Artliber, 2013.

MARK, J. E.; ERMAN, B.; ROLAND, C. M. (Ed.) **The Science and Technology of Rubber**. Fourth Edition. Elsevier. 2013, 816p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05820-9>.

MARK, J. E. (Ed.). **Polymer Data Handbook**. New York: Oxford University Press, 1999. ISBN 978-0195107890. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Mina-Karimi-Avargani/post/How_can_I_interpret_an_increase_in_FTIR_spectra_baseline_for_treated_HDPE/attachment/5e98b7dd4f9a520001e0559e/AS%3A881036355440642%401587066844677/download/James+E.+Mark+-+Polymer+Data+Handbook+\(2009%2C+Oxford+University+Press%2C+USA\).pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mina-Karimi-Avargani/post/How_can_I_interpret_an_increase_in_FTIR_spectra_baseline_for_treated_HDPE/attachment/5e98b7dd4f9a520001e0559e/AS%3A881036355440642%401587066844677/download/James+E.+Mark+-+Polymer+Data+Handbook+(2009%2C+Oxford+University+Press%2C+USA).pdf). Acesso em: 09 nov. 2024.

MARTINHO, E.; DE SOUZA, D. F.; MARTINHO, M. B.; MARTINS JR, W. A.; MORITA, L. H. M. MAIONCHI, D. O. (Org). **Anuário estatístico de acidentes de origem elétrica 2024 - ano base 2023**. Salto: Abracopel, 2024. DOI: 10.29327/5388685., versão online. Disponível em: https://abracopel.org/wp-content/uploads/2024/04/Anuario-2024-EBOOK_compressed.pdf. Acesso em: 15 set. 2024.

MARTINHO, G.; PIRES, A.; SARAIVA, L.; RIBEIRO, R. Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. **Waste Management**, 32(6), p. 1213-1217, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.02.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X12000700>. Acesso em: 29 ago. 2025.

MARTINKA et al. **Fire Risk of Halogen-Free Electrical Cable**. Research papers Faculty of Materials Science and Technology in Trnava - Slovak University of Technology in Bratislava, v. 26, n. 42, p. 21-27, 2018. DOI: 10.2478/rput-2018-0002. Disponível em: https://www.academia.edu/95593453/Fire_Risk_of_Halogen_Free_Electrical_Cable. Acesso em: 22 ago. 2025.

MAZITOVA, A. K.; ZARIPOV, I. I.; AMINOVA, G. K.; OVOD, M. V.; SUNTSOVA, N. L. Fillers for polymer composite materials. **Nanotekhnologii v Stroitel'stve**, v.14, n. 4, p. 294-299, 2022. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-4-294-299. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/364052204_Fillers_for_polymer_composite_materials. Acesso em: 30 ago. 2025.

MIL-W-22759 / SAE AS22759. **Military / Aerospace wire and cable products. Polytetrafluoroethylene (PTFE) – Glass – PTFE**. SAE International. 2025. Disponível em: <https://www.rdsWire.com/uploads/Datasheets/SAE-AS22759-3%20Formerly%20MIL-W-22759-3.pdf>. Acesso em: 18 maio 2025.

MONTANARI, G. C.; FABIANI, D.; PALMIERI, F. Effect of temperature and electrical field on space charge and electroluminescence in XLPE. 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Albuquerque, NM, USA, 2003, pp.205-208. [Anais]. DOI: 10.1109/CEIDP.2003.1254829.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 262**. Standard Method of Test for Flame Travel and Smoke of Wires and Cables for Use in Air-Handling Spaces. 2023. Disponível em: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-262-standard-development/262>. Acesso em: 19 maio 2025.

NUNES, E. C. D.; LOPES, F. R. S. **Polímeros**: estrutura, propriedades e aplicações. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

NUNES, E. C. D.; SANTOS, L. J. **Termoplásticos**: estruturas, propriedades e aplicações. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015. 168p.

PEACOCK, A. J. **Handbook of Polyethylene**: structures, properties, and applications. Boca Raton: CRC Press, 2000. 544p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482295467>. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482295467/handbook-polyethylene-andrew-peacock>. Acesso em: 09 nov. 2024.

PEREIRA, P. R.; PASSOS, E. D.; FERNANDES, J. C. L. Estudos das propriedades elétrica e resistência a chama de cabos e fios de cobre/alumínio revestido de PVC. **Caleidoscópio**, v. 10, n. 1, p. 1-2, 2018. Disponível em: <https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais/article/view/528/630>. Acesso em: 30 ago. 2025.

PIVA, A. M.; BAHIENSE NETO, M.; WIEBECK, H. A reciclagem de PVC no Brasil. **Polímeros**, v. 9 (4), 1999. DOI: 10.1590/S0104-14281999000400032. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/Jm6ydcrkTb83F9pfrtxXpBb/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 28 ago. 2025.

PRYSMIAN GROUP BRASIL. **Catálogos**: Energia. [S.l.]: Prysmian Group, [202-?]. Disponível em: <https://br.prysmian.com/pt/cabos-energia>. Acesso em: 15 maio 2024.

PRYSMIAN GROUP. **Cable compounds**: Insulation. [S.l.]: Prysmian Group, [202-?]. Disponível em: Prysmian. Acesso em: 15 maio 2024.

RODOLFO Jr., A.; TSUKAMOTO, C. **Tecnologia do PVC**. 3. ed. revista e ampliada. São Paulo: Olhares, 2018.

SCHEIRS, J. **Fluoropolymers**: Technology, Markets and Trends. Rapra industry analysis report series. Smithers Rapra Technology. 2001. 140p. ISBN-13: 978-1-85957-273-3.

SCHEIRS, J. (Ed.). **Modern Fluoropolymers**: High Performance Polymers for Diverse Applications. New Jersey: John Wiley & Sons. 1997. 664p. ISBN: 978-0-471-97055-2.

SINGH, A.; SILVERMAN, J. (Eds.). **Radiation Processing of Polymers**. (Progress in polymer processing; v.3). New York: Hanser Publishers. 1991. ISBN 0-19-520914-1. Disponível em: <https://cms.tpps.org/wp-content/uploads/2025/06/Radiation-Processing-of-Polymers-Silverman.pdf>. Acesso em: 11 set. 2025.

SIRISINHA, K.; BOONKONGKAEW, M.; KOSITCHAIYONG, S The effect of silane carriers on silane grafting of high-density polyethylene properties of crosslinked products. **Polymer Testing**, 29 (8), 2010, p. 958-965. DOI: 10.1016/j.polymrtesting.2010.08.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941810001285>. Acesso em: 27 ago. 2025.

SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005. DOI: 10.1590/S0100-40422005000100014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bTLkNHWGnpsj4SWWjgLB49L/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 29 ago. 2025.

STEVENS, M. P. **Polymer Chemistry**: An Introduction. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 1998. ISBN 978-0195124446.

TENG, H. Overview of the development of the fluoropolymer industry. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 496-512, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app2020496>. Acesso em: 05 set. 2025.

UNDERWRITERS LABORATORIES. **UL 94**: Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances. 5th ed. 2023.

VAN VELZEN, E. U. T.; CHU, S.; CHACON, F. A.; BROUWER, M. T.; MOLENVELD, K. The impact of impurities on the mechanical properties of recycled polyethylene. **Packaging Technology and Science**, v. 34(4), p. 201-260, 2021. DOI: 10.1002/pts.2551. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pts.2551>. Acesso em: 29 ago. 2025.

VASCONCELOS, C. L.; SIMÃO, M. O. A. R.; SOUZA, I. N. Gestão e descarte de equipamentos eletroeletrônicos: o caso de uma secretaria do município de Manaus. **Revista Delos**, [S. l.], v. 17, n. 60, p. e2117, 2024. DOI: 10.55905/rdelosv17.n60-031. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/2117>. Acesso em: 10 set. 2025.

WARRICK, E. L.; PIERCE, O. R.; POLMANTEER, K. E.; SAAM, J. C. Silicone elastomer developments 1967–1977. **Rubber Chemistry and Technology**. 1979; v. 52(3), p.437–525. DOI: 10.5254/1.3535229. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137334306>. Acesso em: 04 set. 2025.

WEI, M.; MURPHY, D.; BARRY, C.; MEAD, J. Halogen-free flame retardants for wire and cable applications. **Rubber Chemistry and Technology**. v.83, n. 3, p.282-302, 2010. DOI: 0.5254/1.3525686.

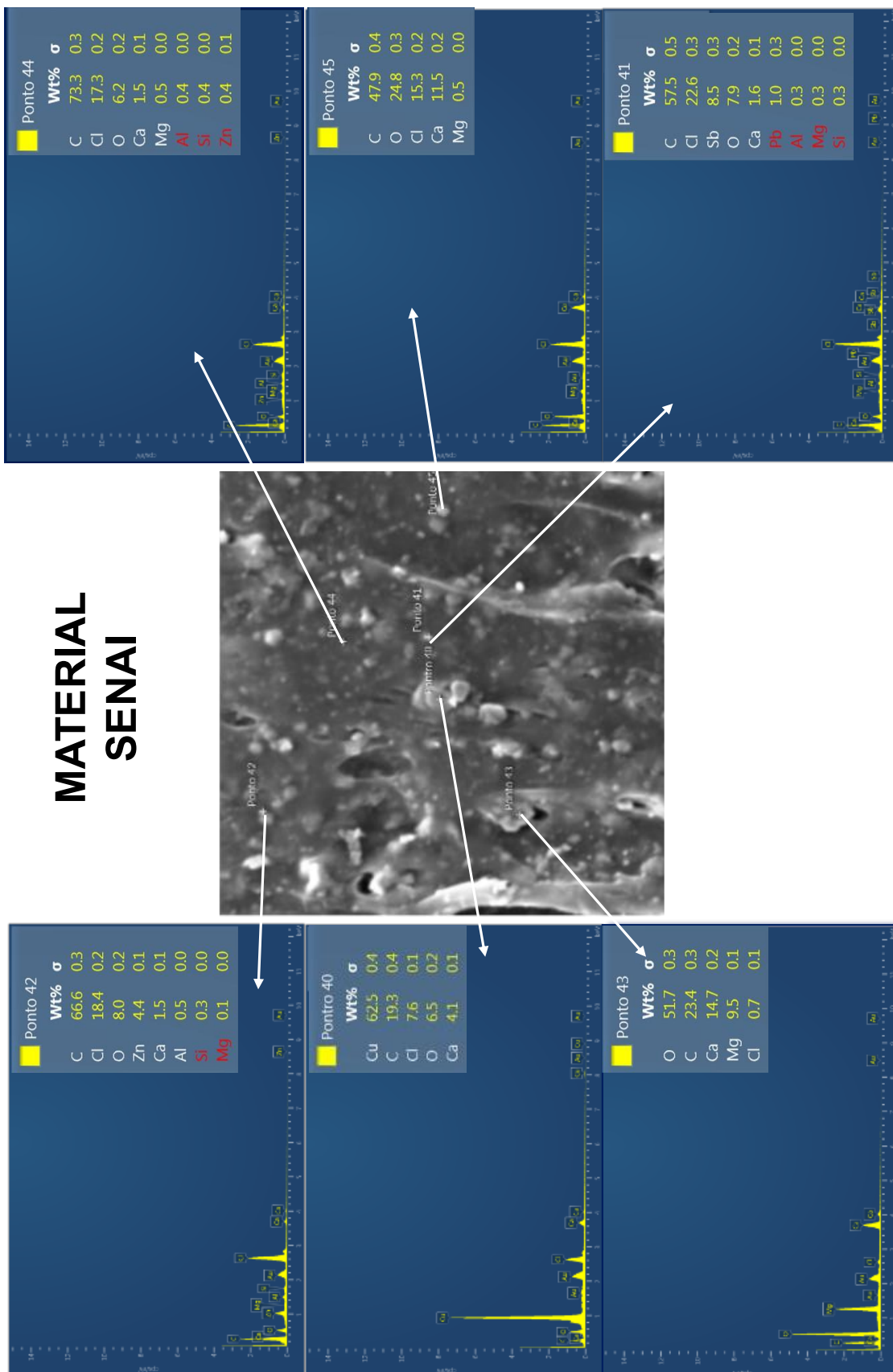
WILKIE, C. A.; MORGAN, A. B. (Ed.). **Fire retardancy of polymeric materials**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2024. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Fire_Retardancy_of_Polymeric_Materials/muAPEQAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1. Acesso em: 28 ago. 2024.

ZHEHONG, L.; ZHU, Z.; ZHANG, Y.; WANG, C.; BAI, H.; ZHANG, G.; HU, Y.; JIANG, W. Enhancing the anti-migration performance and mechanical properties of EPDM insulation through functionalized GO. **Polymers** 2023, 15, 1731. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071731>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/369718796_Enhancing_the_Anti-Migration_Performance_and_Mechanical_Properties_of_EPDM_Insulation_through_Functionalized_GO/link/680f6d53bfbe974b23bc94c5/download. Acesso em: 11 set. 2025.

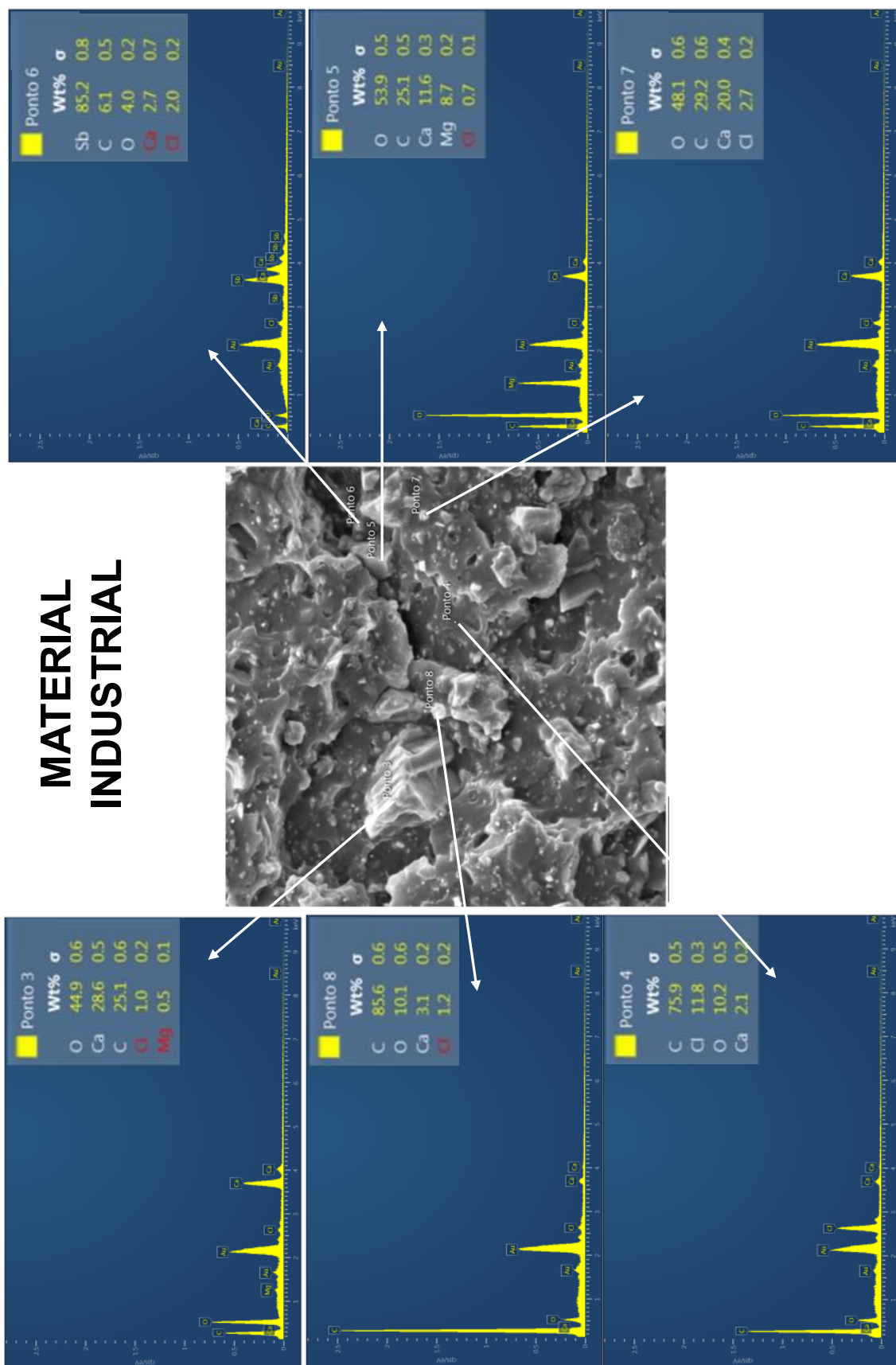
ZWEIFEL, H.; MAIER, R. D.; SCHILLER, M. **Plastics Additives Handbook**. 6 th ed. Hanser Publications, 2009.

APÊNDICE 1: Análise Microestrutural e Elementar (MEV-EDS) da amostra proveniente do SENAI a 5000x.

**MATERIAL
SENAI**



APÊNDICE 2: Análise Microestrutural e Elementar (MEV-EDS) da amostra de origem industrial a 5000x.



APÊNDICE 3: Curvas de Tração PVC Virgem com V50.

ENSAIO: 00009393

DATA: 07/05/2025

HORA: 02:32:58

NORMA: ASTM D638 OFICIAL

TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO

Identificação: SENAI MANGUEIRA

CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1)

PRÉ CARGA (1a. Amostra): 1,00 N

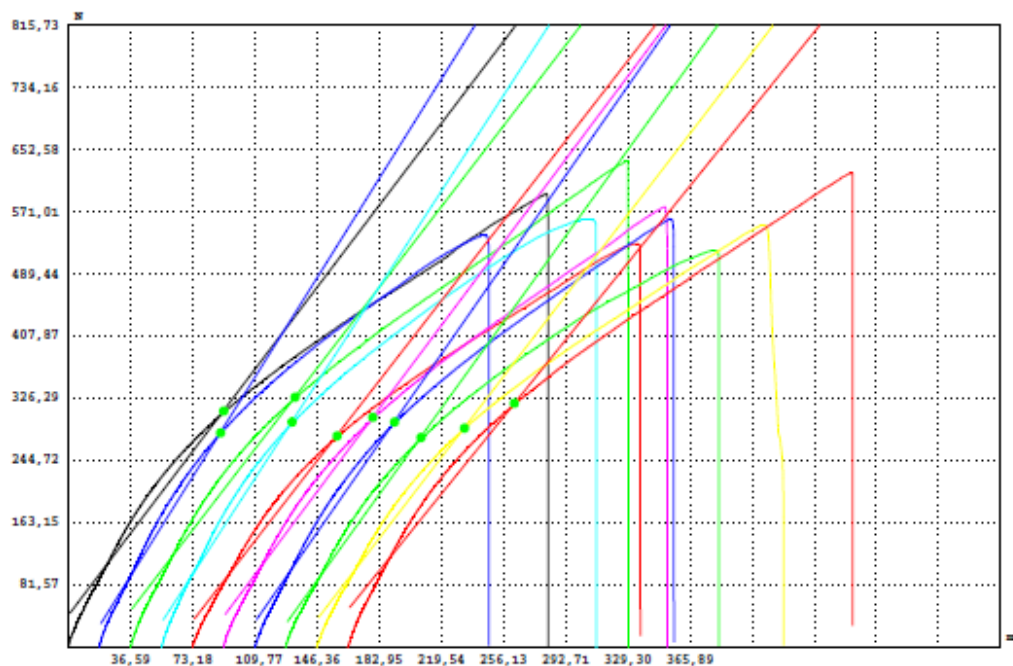
PRÉ CARGA (Demais Amostras): 6,27 N

VEL. DESLOC.: 50,00 mm/min

TEMPERATURA: 23,00°C

UMIDADE RELATIVA: 59,00 %

Cliente: FABIANO



Amostra No.	Id. Amostra	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	ALONGAMENTO %	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	LARGURA mm	ESPESURA mm
1	1	595,76	12,94	6,73	309,98	403,44	4,45	13,620	3,3800
2	2	540,36	11,04	5,75	281,43	327,54	5,08	13,630	3,5900
3	3	636,95	13,08	6,74	328,33	418,87	4,15	13,270	3,6700
4	4	561,93	11,56	6,08	295,70	365,64	4,93	13,390	3,6300
5	5	529,57	12,20	6,39	277,35	376,57	4,61	13,400	3,2400
6	6	578,11	11,85	6,19	301,82	373,11	4,26	13,630	3,5800
7	7	562,42	11,42	6,01	295,70	352,51	4,53	13,640	3,6100
8	8	520,74	10,83	5,73	275,31	364,04	4,48	13,430	3,5800
9	9	554,08	12,19	6,33	287,55	392,40	4,46	13,330	3,4100
10	10	622,24	12,63	6,50	320,17	424,50	3,91	13,500	3,6500
Valor Mínimo		520,74	10,83	5,73	275,31	327,54	3,91	13,270	3,2400
Valor Máximo		636,95	13,08	6,74	328,33	424,50	5,08	13,640	3,6700
V. Médio		570,22	11,97	6,24	297,33	379,86	4,49	13,484	3,5340
D. Padrão		38,38	0,77	0,36	17,95	30,22	0,34	0,139	0,1414

Informações do Ensaio:

APÊNDICE 4: Dados Ensaio de Tração PVC Virgem com V50.

Amostra Original
 ENSAIO: 00008383 DATA: 07/05/2025 HORA: 14:32:58
 NORMA: ASTM D638 OFICIAL TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 Identificação:PVC
 CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1) PRÉ CARGA(1a. Amostra): 1,00 N PRÉ CARGA(Demais Amostras):6,27 N
 VEL. DESLOC.: 50,00 mm/min
 TEMPERATURA: 23,00°C UMIDADE RELATIVA: 59,00 %

Amostra	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	LIMITE DE ESCOAMENTO	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO	ALONGAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE	LARGURA	ESPESSURA
	N	MPa	MPa	N	%	MPa	mm	mm
1	595,760	12,940	6,730	309,980	403,440	4,450	13,620	3,380
2	540,360	11,040	5,750	281,430	327,540	5,080	13,630	3,590
3	636,950	13,080	6,740	328,330	418,870	4,150	13,270	3,670
4	561,930	11,560	6,080	295,700	365,640	4,930	13,390	3,630
5	529,570	12,200	6,390	277,350	376,570	4,610	13,400	3,240
6	578,110	11,850	6,190	301,820	373,110	4,260	13,630	3,580
7	562,420	11,420	6,010	295,700	352,510	4,530	13,640	3,610
8	520,740	10,830	5,730	275,310	364,040	4,480	13,430	3,580
9	554,080	12,190	6,330	287,550	392,400	4,460	13,330	3,410
10	622,240	12,630	6,500	320,170	424,500	3,910	13,500	3,650
Valor Mínimo	520,740	10,830	5,730	275,310	327,540	3,910	13,270	3,240
Valor Máximo	636,950	13,080	6,740	328,330	424,500	5,080	13,640	3,670
V. Médio	570,216	11,974	6,245	297,334	379,862	4,486	13,484	3,534
D. Padrão	38,378	0,772	0,360	17,953	30,225	0,344	0,139	0,141
R (amplitude)	116,210	2,250	1,010	53,020	96,960	1,170	0,370	0,430
X+desvio	608,594	12,746	6,605	315,287	410,087	4,830	13,623	3,675
x-desvio	531,838	11,202	5,885	279,381	349,637	4,142	13,345	3,393
Média (limites)	565,443	11,975			375,387	4,420		
D. Padrão (limites)	19,284	0,452			17,465	0,160		
Máximo (limites)	584,727	12,427			392,852	4,580		
Mínimo (limites)	546,160	11,523			357,922	4,260		
n Amostra (limites)	6	6			7	7		

Os dados em destaque foram eliminados por estar fora do intervalo de 1 (um) desvio padrão acima e abaixo da média o que foi estabelecida pela Análise Estatística.

APÊNDICE 5: Curvas de Tração PVC Virgem com V500.

ENSAIO: 00008382

DATA: 01/01/2011

HORA: 00:28:04

NORMA: ASTM D638 OFICIAL

TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO

Identificação: SENAI MAGUEIRA

PRÉ CARGA (1a. Amostra): 1,00 N

PRÉ CARGA (Demais Amostras): 8,16 N

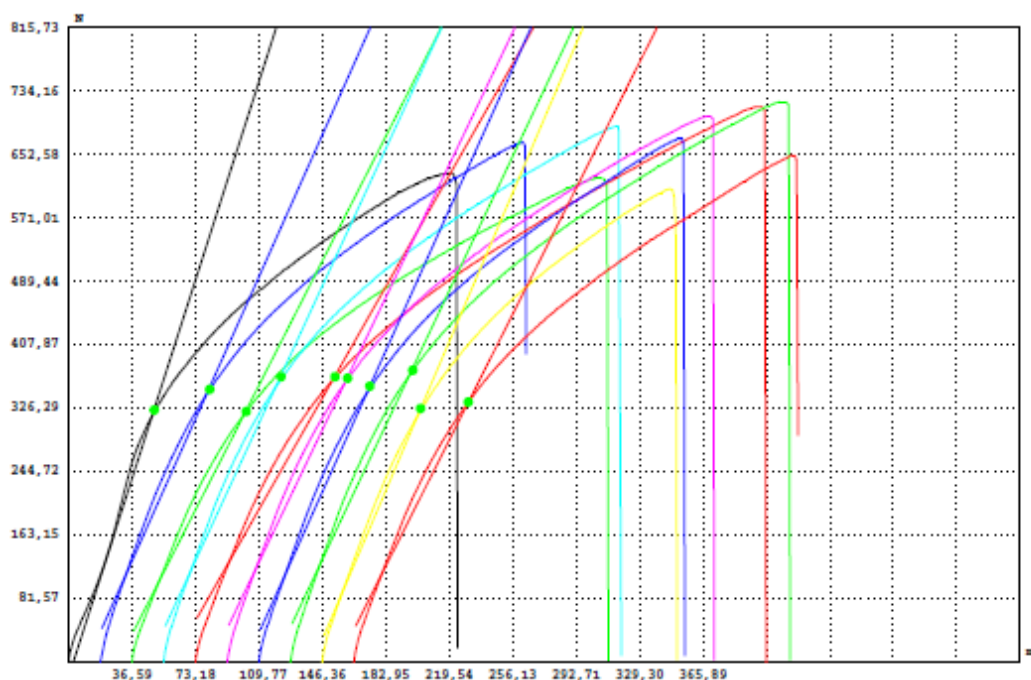
CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1)

VEL. DESLOC.: 500,00 mm/min

TEMPERATURA: 23,00°C

UMIDADE RELATIVA: 59,00 %

Cliente: FABIANO



Amostra No.	Id. Amostra	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	ALONGAMENTO %	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	LARGURA mm	ESPESURA mm
1	1	629,11	13,16	6,78	324,25	320,77	10,21	13,540	3,5300
2	2	669,31	13,59	7,12	350,76	351,00	7,06	13,640	3,6100
3	3	622,24	14,55	7,53	322,21	392,59	7,13	13,490	3,1700
4	4	689,42	13,98	7,44	367,08	377,17	6,82	13,510	3,6500
5	5	714,43	15,16	7,79	367,08	470,33	5,79	13,350	3,5300
6	6	702,17	14,39	7,48	365,04	401,46	6,65	13,630	3,5800
7	7	673,24	13,67	7,21	354,84	351,09	7,01	13,640	3,6100
8	8	720,80	14,70	7,65	375,24	411,57	6,71	13,620	3,6000
9	9	608,51	12,43	6,67	326,29	292,33	7,44	13,560	3,6100
10	10	651,66	13,66	7,01	334,45	365,91	6,47	13,590	3,5100
Valor Mínimo		608,51	12,43	6,67	322,21	292,33	5,79	13,350	3,1700
Valor Máximo		720,80	15,16	7,79	375,24	470,33	10,21	13,640	3,6500
V. Médio		668,09	13,93	7,27	348,72	373,42	7,13	13,557	3,5400
D. Padrão		39,46	0,80	0,37	20,26	49,91	1,17	0,091	0,1374

Informações do Ensaio:

APÊNDICE 6: Dados Ensaio de Tração PVC Virgem com V500.

Amostra Original
 ENSAIO: 00008382 DATA: 07/05/2025 HORA: 10:00:00
 NORMA: ASTM D638 OFICIAL TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 Identificação: PVC
 CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1) PRÉ CARGA(1a. Amostra): 1,00 N PRÉ CARGA(Demais Amostras): 8,16 N
 VEL. DESLOC.: 500,00 mm/min
 TEMPERATURA: 23,00°C UMIDADE RELATIVA: 59,00 %

Amostra	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	LIMITE DE ESCOAMENTO	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO	ALONGAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE	LARGURA	ESPESSURA
	N	MPa	MPa	N	%	MPa	mm	mm
1	629,110	13,160	6,780	324,250	320,770	10,210	13,540	3,530
2	669,310	13,590	7,120	350,760	351,000	7,060	13,640	3,610
3	622,240	14,550	7,530	322,210	392,590	7,130	13,490	3,170
4	689,420	13,980	7,440	367,080	377,170	6,820	13,510	3,650
5	714,430	15,160	7,790	367,080	470,330	5,790	13,350	3,530
6	702,170	14,390	7,480	365,040	401,460	6,650	13,630	3,580
7	673,240	13,670	7,210	354,840	351,090	7,010	13,640	3,610
8	720,800	14,700	7,650	375,240	411,570	6,710	13,620	3,600
9	608,510	12,430	6,670	326,290	292,330	7,440	13,560	3,610
10	651,660	13,660	7,010	334,450	365,910	6,470	13,590	3,510
Valor Mínimo	608,510	12,430	6,670	322,210	292,330	5,790	13,350	3,170
Valor Máximo	720,800	15,160	7,790	375,240	470,330	10,210	13,640	3,650
V. Médio	668,089	13,929	7,268	348,724	373,422	7,129	13,557	3,540
D. Padrão	39,457	0,803	0,373	20,259	49,911	1,171	0,091	0,137
R (amplitude)	112,290	2,730	1,120	53,030	178,000	4,420	0,290	0,480
X+desvio	707,546	14,732	7,641	368,983	423,333	8,300	13,648	3,677
x-desvio	628,632	13,126	6,895	328,465	323,511	5,958	13,466	3,403
Média (limites)	669,152	13,963			378,684	6,911		
D. Padrão (limites)	26,180	0,539			24,107	0,310		
Máximo (limites)	695,332	14,501			402,791	7,221		
Mínimo (limites)	642,971	13,424			354,577	6,602		
n Amostra (limites)	6	8			7	8		

Os dados em destaque foram eliminados por estar fora do intervalo de 1 (um) desvio padrão acima e abaixo da média o que foi estabelecida pela Análise Estatística.

APÊNDICE 7: Curvas de Tração Blenda Industrial com V50.

ENSAIO: 00008266

DATA: 27/02/2025

HORA: 09:53:52

NORMA: ASTM D638 OFICIAL

TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO

Identificação: PVC

CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1)

PRÉ CARGA(1a. Amostra): 4,000 N

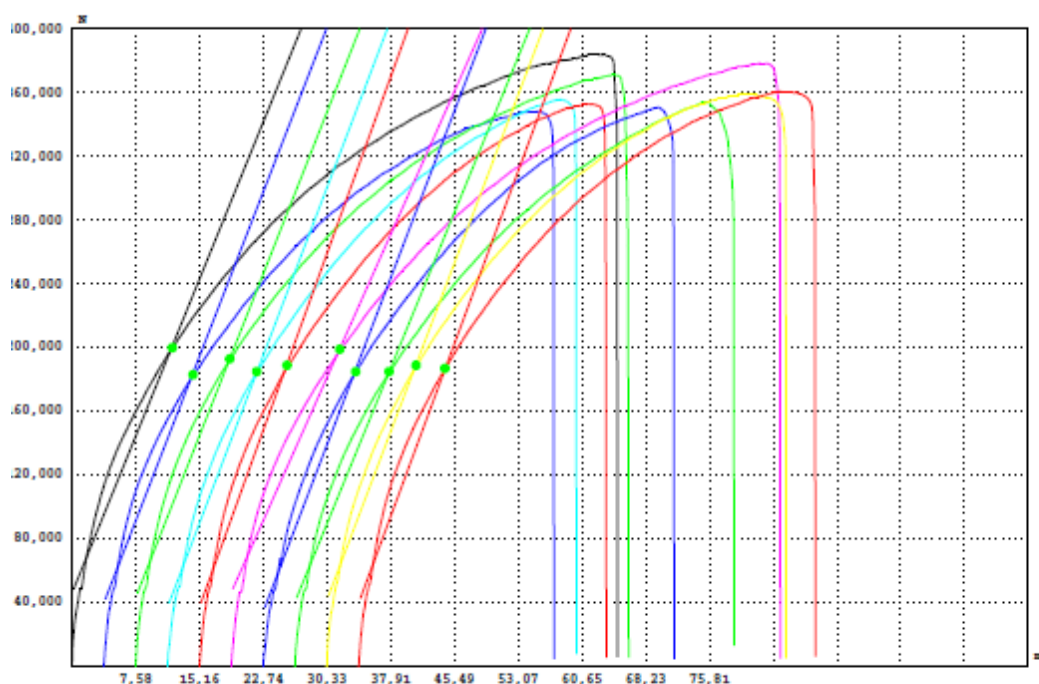
PRÉ CARGA(Demais Amostras): 4,000 N

VEL. DESLOC.: 50,00 mm/min

TEMPERATURA: 23,00°C

UMIDADE RELATIVA: 59,00 %

Cliente: FABIANO INDUST



Amostra No.	Id. Amostra	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	ALONGAMENTO %	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	LARGURA mm	ESPESURA mm
1	1	383,936	9,018	4,698	200,000	92,70	21,231	13,430	3,1700
2	2	348,387	8,335	4,378	183,000	76,50	22,643	13,440	3,1100
3	3	371,188	8,690	4,518	193,000	83,77	21,803	13,390	3,1900
4	4	355,987	8,077	4,197	185,000	69,49	21,914	13,520	3,2600
5	5	353,045	8,405	4,499	189,000	69,13	24,211	13,550	3,1000
6	6	378,543	8,898	4,678	199,000	93,29	19,384	13,420	3,1700
7	7	350,839	8,130	4,287	185,000	69,84	22,260	13,570	3,1800
8	8	354,271	8,042	4,200	185,000	74,61	20,348	13,430	3,2800
9	9	359,419	8,493	4,466	189,000	78,04	22,896	13,520	3,1300
10	10	360,890	8,302	4,302	187,000	77,59	22,850	13,500	3,2200
Valor Mínimo		348,387	8,042	4,197	183,000	69,13	19,384	13,390	3,1000
Valor Máximo		383,936	9,018	4,698	200,000	93,29	24,211	13,570	3,2800
V. Médio		361,651	8,439	4,422	189,500	78,50	21,954	13,477	3,1810
D. Padrão		12,166	0,338	0,180	5,986	8,90	1,378	0,062	0,0597

Informações do Ensaio:

APÊNDICE 8: Dados Ensaio de Tração Blenda Industrial com V50.

Amostra Industrial 1								
ENSAIO: 00008266 DATA: 27/02/2025 HORA: 09:53:52								
NORMA: ASTM D638 OFICIAL TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO								
Identificação: PVC								
CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1) PRÉ CARGA(1a. Amostra): 4,000 N PRÉ CARGA(Demais Amostras):4,000 N								
VEL. DESLOC.: 50,00 mm/min								
TEMPERATURA: 23,00°C UMIDADE RELATIVA: 59,00 %								
Amostra	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	LIMITE DE ESCOAMENTO	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO	ALONGAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE	LARGURA	ESPESSURA
	N	MPa	MPa	N	%	MPa	mm	mm
1	383,936	9,018	4,698	200,000	92,700	21,231	13,430	3,170
2	348,387	8,335	4,378	183,000	76,500	22,643	13,440	3,110
3	371,188	8,690	4,518	193,000	83,770	21,803	13,390	3,190
4	355,987	8,077	4,197	185,000	69,490	21,914	13,520	3,260
5	353,045	8,405	4,499	189,000	69,130	24,211	13,550	3,100
6	378,543	8,898	4,678	199,000	93,290	19,384	13,420	3,170
7	350,839	8,130	4,287	185,000	69,840	22,260	13,570	3,180
8	354,271	8,042	4,200	185,000	74,610	20,348	13,430	3,280
9	359,419	8,493	4,466	189,000	78,040	22,896	13,520	3,130
10	360,890	8,302	4,302	187,000	77,590	22,850	13,500	3,220
Valor Mínimo	348,387	8,042	4,197	183,000	69,130	19,384	13,390	3,100
Valor Máximo	383,936	9,018	4,698	200,000	93,290	24,211	13,570	3,280
V. Médio	361,651	8,439	4,422	189,500	78,500	21,954	13,477	3,181
D. Padrão	12,166	0,338	0,180	5,986	8,900	1,378	0,062	0,060
R (amplitude)	35,549	0,976	0,501	17,000	24,160	4,827	0,180	0,180
X+desvio	373,817	8,777	4,602	195,486	87,400	23,332	13,539	3,241
x-desvio	349,485	8,101	4,242	183,514	69,600	20,576	13,415	3,121
Média (limites)	357,948	8,393			76,725	22,228		
D. Padrão (limites)	10,811	0,368			9,410	1,941		
Máximo (limites)	368,759	8,761			86,135	24,169		
Mínimo (limites)	347,138	8,024			67,315	20,287		
n Amostra (limites)	7	6			6	7		

Os dados em destaque foram eliminados por estar fora do intervalo de 1 (um) desvio padrão acima e abaixo da média o que foi estabelecida pela Análise Estatística.

APÊNDICE 9: Curvas de Tração Blenda Industrial com V500.

ENSAIO: 00008275

DATA: 06/03/2025

HORA: 07:35:18

NORMA: ASTM D638 OFICIAL

TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO

Identificação: PVC

CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1)

PRÉ CARGA (1a. Amostra): 3,00 N

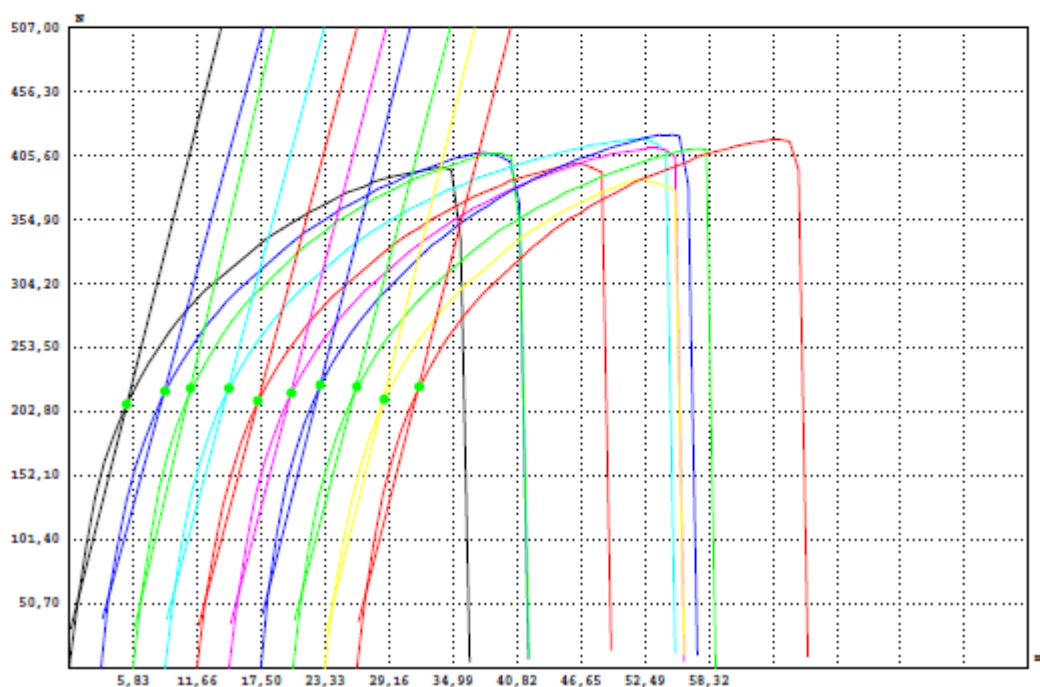
PRÉ CARGA (Demais Amostras): 5,07 N

VEL. DESLOC.: 500,00 mm/min

TEMPERATURA: 23,00°C

UMIDADE RELATIVA: 59,00 %

Cliente: FABIANO IND2



Amostra No.	Id. Amostra	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	ALONGAMENTO %	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	LARGURA mm	ESPESURA mm
1	1	397,18	9,64	5,08	209,14	52,19	58,35	13,550	3,0400
2	2	408,45	9,88	5,30	219,28	55,66	53,61	13,510	3,0600
3	3	407,47	9,32	5,08	221,81	51,57	59,15	13,530	3,2300
4	4	418,75	10,06	5,33	221,81	66,43	54,33	13,380	3,1100
5	5	399,63	9,82	5,20	211,67	53,93	55,87	13,390	3,0400
6	6	411,89	10,01	5,30	218,01	59,30	56,05	13,360	3,0800
7	7	422,67	10,01	5,31	224,35	56,84	56,66	13,490	3,1300
8	8	411,40	9,86	5,35	223,08	55,04	54,91	13,420	3,1100
9	9	387,61	9,24	5,07	212,94	46,79	58,25	13,450	3,1200
10	10	418,75	10,00	5,32	223,08	58,73	56,12	13,300	3,1500
Valor Mínimo		387,61	9,24	5,07	209,14	46,79	53,61	13,300	3,0400
Valor Máximo		422,67	10,06	5,35	224,35	66,43	59,15	13,550	3,2300
V. Médio		408,38	9,78	5,23	218,52	55,65	56,33	13,438	3,1070
D. Padrão		10,93	0,29	0,12	5,42	5,28	1,81	0,082	0,0574

Informações do Ensaio:

APÊNDICE 10: Dados Ensaio de Tração Blenda Industrial com V500.

Amostra Industrial 1								
ENSAIO: 00008275 DATA: 06/03/2025 HORA: 07:35:18								
NORMA: ASTM D638 OFICIAL TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO								
Identificação:PVC								
CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1) PRÉ CARGA(1a. Amostra): 3,00 N PRÉ CARGA(Demais Amostras):5,07 N								
VEL. DESLOC.: 500,00 mm/min								
TEMPERATURA: 23,00°C UMIDADE RELATIVA: 59,00 %								
Amostra	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	LIMITE DE ESCOAMENTO	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO	ALONGAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE	LARGURA	ESPESSURA
	N	MPa	MPa	N	%	MPa	mm	mm
1	397,180	9,640	5,080	209,140	52,190	58,350	13,550	3,040
2	408,450	9,880	5,300	219,280	55,660	53,610	13,510	3,060
3	407,470	9,320	5,080	221,810	51,570	59,150	13,530	3,230
4	418,750	10,060	5,330	221,810	66,430	54,330	13,380	3,110
5	399,630	9,820	5,200	211,670	53,930	55,870	13,390	3,040
6	411,890	10,010	5,300	218,010	59,300	56,050	13,360	3,080
7	422,670	10,010	5,310	224,350	56,840	56,660	13,490	3,130
8	411,400	9,860	5,350	223,080	55,040	54,910	13,420	3,110
9	387,610	9,240	5,070	212,940	46,790	58,250	13,450	3,120
10	418,750	10,000	5,320	223,080	58,730	56,120	13,300	3,150
Valor Mínimo	387,610	9,240	5,070	209,140	46,790	53,610	13,300	3,040
Valor Máximo	422,670	10,060	5,350	224,350	66,430	59,150	13,550	3,230
V. Médio	408,380	9,780	5,230	218,520	55,650	56,330	13,438	3,107
D. Padrão	10,930	0,290	0,120	5,420	5,280	1,810	0,082	0,057
R (amplitude)	35,060	0,820	0,280	15,210	19,640	5,540	0,250	0,190
X+desvio	419,310	10,070	5,350	223,940	60,930	58,140	13,520	3,164
x-desvio	397,450	9,490	5,110	213,100	50,370	54,520	13,356	3,050
Média (limites)	410,906	9,910			55,408	55,922		
D. Padrão (limites)	6,699	0,139			2,821	0,638		
Máximo (limites)	417,605	10,049			58,228	56,560		
Mínimo (limites)	404,207	9,771			52,587	55,284		
n Amostra (limites)	6	8			8	5		

Os dados em destaque foram eliminados por estar fora do intervalo de 1 (um) desvio padrão acima e abaixo da média o que foi estabelecida pela Análise Estatística.

APÊNDICE 11: Curvas de Tração Blenda SENAI com V50.

ENSAIO: 00008267

DATA: 27/02/2025

HORA: 10:42:21

NORMA: ASTM D638 OFICIAL

TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO

Identificação: PVC

CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1)

PRÉ CARGA (1a. Amostra): 4,00 N

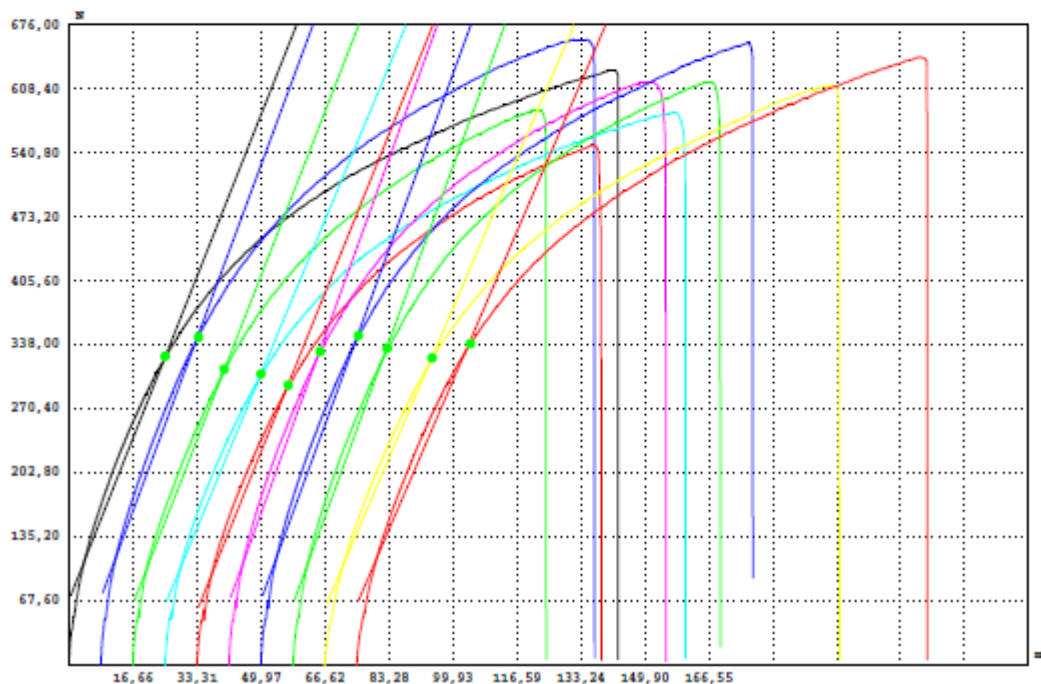
PRÉ CARGA (Demais Amostras): 6,76 N

VEL. DESLOC.: 50,00 mm/min

TEMPERATURA: 23,00°C

UMIDADE RELATIVA: 59,00 %

Cliente: FABIANO SENAI



Amostra No.	Id. Amostra	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	ALONGAMENTO %	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	LARGURA mm	ESPESURA mm
1	1	627,64	14,30	7,43	326,17	204,24	16,24	13,420	3,2700
2	2	660,98	14,54	7,62	346,45	183,61	16,76	13,530	3,3600
3	3	585,96	13,98	7,46	312,65	153,67	17,26	13,430	3,1200
4	4	584,00	13,80	7,27	307,58	193,66	16,05	13,520	3,1300
5	5	549,18	13,50	7,27	295,75	150,46	17,22	13,430	3,0300
6	6	616,36	13,38	7,19	331,24	162,54	16,95	13,510	3,4100
7	7	657,06	14,32	7,58	348,14	182,96	16,83	13,620	3,3700
8	8	615,87	13,31	7,23	334,62	159,03	16,67	13,690	3,3800
9	9	612,44	14,83	7,86	324,48	191,40	16,01	13,320	3,1000
10	10	642,35	15,70	8,30	339,69	212,17	16,07	13,280	3,0800
Valor Mínimo		549,18	13,31	7,19	295,75	150,46	16,01	13,280	3,0300
Valor Máximo		660,98	15,70	8,30	348,14	212,17	17,26	13,690	3,4100
V. Médio		615,18	14,17	7,52	326,68	179,37	16,61	13,475	3,2250
D. Padrão		34,86	0,74	0,35	17,09	21,78	0,48	0,126	0,1469

Informações do Ensaio:

APÊNDICE 12: Dados Ensaio de Tração Blenda SENAI com V50.

Amostra SENAI								
ENSAIO: 00008267 DATA: 27/02/2025 HORA: 10:42:21								
NORMA: ASTM D638 OFICIAL TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO								
Identificação:PVC								
CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1) PRÉ CARGA(1a. Amostra): 4,00 N PRÉ CARGA(Demais Amostras):6,76 N								
VEL. DESLOC.: 50,00 mm/min								
TEMPERATURA: 23,00°C UMIDADE RELATIVA: 59,00 %								
Amostra	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	LIMITE DE ESCOAMENTO	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO	ALONGAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE	LARGURA	ESPESSURA
	N	MPa	MPa	N	%	MPa	mm	mm
1	627,640	14,300	7,430	326,170	204,240	16,240	13,420	3,270
2	660,980	14,540	7,620	346,450	183,610	16,760	13,530	3,360
3	585,960	13,980	7,460	312,650	153,670	17,260	13,430	3,120
4	584,000	13,800	7,270	307,580	193,660	16,050	13,520	3,130
5	549,180	13,500	7,270	295,750	150,460	17,220	13,430	3,030
6	616,360	13,380	7,190	331,240	162,540	16,950	13,510	3,410
7	657,060	14,320	7,580	348,140	182,960	16,830	13,620	3,370
8	615,870	13,310	7,230	334,620	159,030	16,670	13,690	3,380
9	612,440	14,830	7,860	324,480	191,400	16,010	13,320	3,100
10	642,350	15,700	8,300	339,690	212,170	16,070	13,280	3,080
Valor Mínimo	549,180	13,310	7,190	295,750	150,460	16,010	13,280	3,030
Valor Máximo	660,980	15,700	8,300	348,140	212,170	17,260	13,690	3,410
V. Médio	615,180	14,170	7,520	326,680	179,370	16,610	13,475	3,225
D. Padrão	34,860	0,740	0,350	17,090	21,780	0,480	0,126	0,147
R (amplitude)	111,800	2,390	1,110	52,390	61,710	1,250	0,410	0,380
X+desvio	650,040	14,910	7,870	343,770	201,150	17,090	13,601	3,372
x-desvio	580,320	13,430	7,170	309,590	157,590	16,130	13,349	3,078
Média (limites)	612,089	14,181			178,867	16,690		
D. Padrão (limites)	37,947	0,796			23,398	0,429		
Máximo (limites)	650,036	14,977			202,264	17,119		
Mínimo (limites)	574,141	13,386			155,469	16,261		
n Amostra (limites)	7	7			6	5		

Os dados em destaque foram eliminados por estar fora do intervalo de 1 (um) desvio padrão acima e abaixo da média o que foi estabelecida pela Análise Estatística.

APÊNDICE 13: Curvas de Tração Blenda SENAI com V500.

ENSAIO: 00008276

DATA: 06/03/2025

HORA: 08:22:43

NORMA: ASTM D638 OFICIAL

TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO

Identificação: PVC

CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1)

PRÉ CARGA(1a. Amostra): 3,00 N

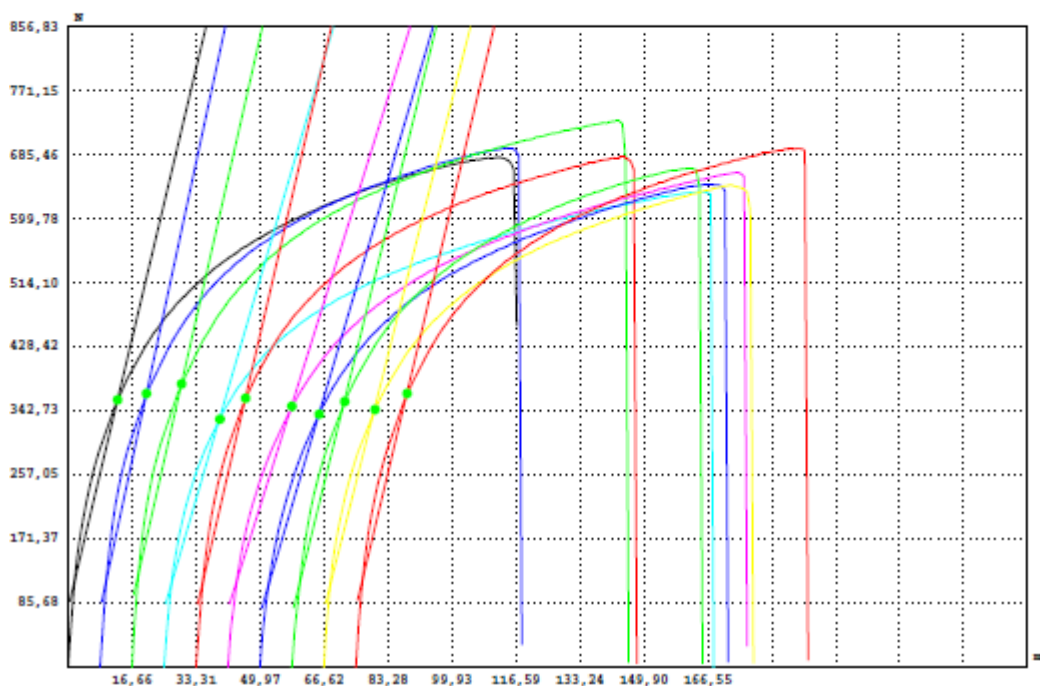
PRÉ CARGA(Demais Amostras): 8,57 N

VEL. DESLOC.: 500,00 mm/min

TEMPERATURA: 23,00°C

UMIDADE RELATIVA: 59,00 %

Cliente: FABIANO SENAI2



Amostra No.	Id. Amostra	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	ALONGAMENTO %	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	LARGURA mm	ESPESURA mm
1	1	682,55	15,09	7,91	357,73	166,91	33,19	13,380	3,3800
2	2	694,81	15,38	8,11	366,29	156,89	36,61	13,570	3,3300
3	3	731,10	16,20	8,40	379,15	184,76	34,79	13,510	3,3400
4	4	636,46	15,39	8,03	332,02	204,47	29,66	13,380	3,0900
5	5	682,55	14,94	7,88	359,87	164,00	33,62	13,400	3,4100
6	6	662,45	15,92	8,39	349,16	193,17	27,40	13,510	3,0800
7	7	646,27	14,85	7,78	338,45	174,14	27,82	13,430	3,2400
8	8	667,35	15,11	8,05	355,58	152,73	32,84	13,510	3,2700
9	9	645,78	14,98	8,00	344,87	159,77	32,91	13,430	3,2100
10	10	694,32	15,35	8,10	366,29	168,17	33,07	13,380	3,3800
Valor Mínimo		636,46	14,85	7,78	332,02	152,73	27,40	13,380	3,0800
Valor Máximo		731,10	16,20	8,40	379,15	204,47	36,61	13,570	3,4100
V. Médio		674,37	15,32	8,06	354,94	172,50	32,19	13,450	3,2730
D. Padrão		28,68	0,44	0,20	14,17	16,74	2,97	0,069	0,1179

Informações do Ensaio:

APÊNDICE 14: Dados Ensaio Blenda SENAI com V500.

Amostra SENAI
 ENSAIO: 00008276 DATA: 06/03/2025 HORA: 08:22:43
 NORMA: ASTM D638 OFICIAL TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 Identificação: PVC
 CÉLULA DE CARGA: 500 kgf (1) PRÉ CARGA(1a. Amostra): 3,00 N PRÉ CARGA(Demais Amostras):8,57 N
 VEL. DESLOC.: 500,00 mm/min
 TEMPERATURA: 23,00°C UMIDADE RELATIVA: 59,00 %

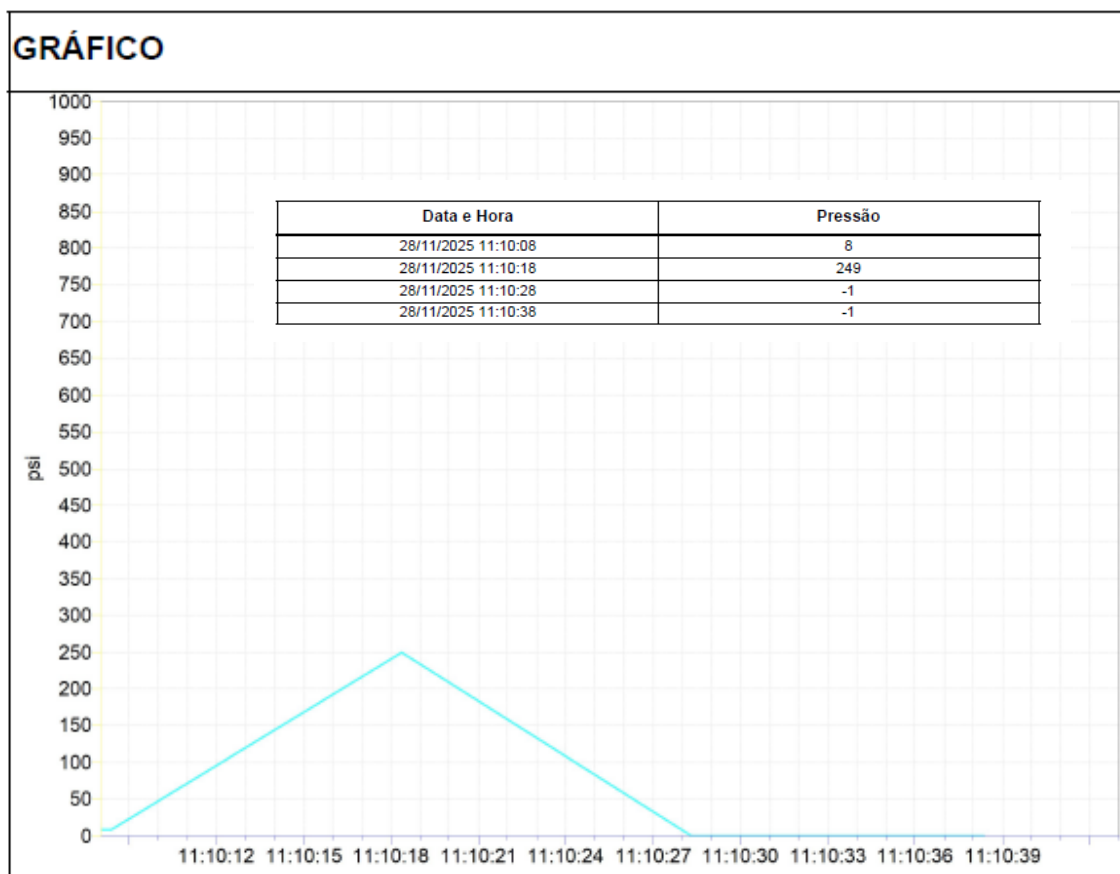
Amostra	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	LIMITE DE ESCOAMENTO	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO	ALONGAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE	LARGURA	ESPESSURA
	N	MPa	MPa	N	%	MPa	mm	mm
1	682,550	15,090	7,910	357,730	166,910	33,190	13,380	3,380
2	694,810	15,380	8,110	366,290	156,890	36,610	13,570	3,330
3	731,100	16,200	8,400	379,150	184,760	34,790	13,510	3,340
4	636,460	15,390	8,030	332,020	204,470	29,660	13,380	3,090
5	682,550	14,940	7,880	359,870	164,000	33,620	13,400	3,410
6	662,450	15,920	8,390	349,160	193,170	27,400	13,510	3,080
7	646,270	14,850	7,780	338,450	174,140	27,820	13,430	3,240
8	667,000	15,110	8,050	355,580	152,730	32,840	13,510	3,270
9	645,780	14,980	8,000	344,870	159,770	32,910	13,430	3,210
10	694,320	15,350	8,100	366,290	168,170	33,070	13,380	3,380
Valor Mínimo	636,460	14,850	7,780	332,020	152,730	27,400	13,380	3,080
Valor Máximo	731,100	16,200	8,400	379,150	204,470	36,610	13,570	3,410
V. Médio	674,370	15,320	8,060	354,940	172,500	32,190	13,450	3,273
D. Padrão	28,680	0,440	0,200	14,170	16,740	2,970	0,069	0,118
R (amplitude)	94,640	1,350	0,620	47,130	51,740	9,210	0,190	0,330
X+desvio	703,050	15,760	8,260	369,110	189,240	35,160	13,519	3,391
x-desvio	645,690	14,880	7,860	340,770	155,760	29,220	13,381	3,155
Média (limites)	671,966	15,177			167,806	32,869		
D. Padrão (limites)	30,011	0,337			13,579	3,066		
Máximo (limites)	701,978	15,514			181,385	35,934		
Mínimo (limites)	641,955	14,840			154,226	29,803		
n Amostra (limites)	8	7			7	7		

Os dados em destaque foram eliminados por estar fora do intervalo de 1 (um) desvio padrão acima e abaixo da média o que foi estabelecida pela Análise Estatística.

APÊNDICE 21: Ensaio de Ruptura 1 – Mangueira PVC Virgem

 FLUTROL	<h3>Relatório Gráfico - Dados Técnicos</h3>
--	---

INFORMAÇÕES DE ENSAIO	
Certificado de Teste:	Teste de estouro- Senai
Modelo Válvula:	Mangueira azul
Número de Série:	N/A
Certificado Transmissor:	LP-613546
Pedido Cliente:	
Pedido Flutrol:	
Data Inicial:	28/11/2025 11:10:08
Data Final:	28/11/2025 11:10:43



APÊNDICE 22: Ensaio de Ruptura 2 – Mangueira PVC Virgem



INFORMAÇÕES DE ENSAIO

Certificado de Teste: Teste de estouro- Senai

Modelo Válvula: Mangueira azul

Número de Série: N/A

Certificado Transmissor: LP-613546

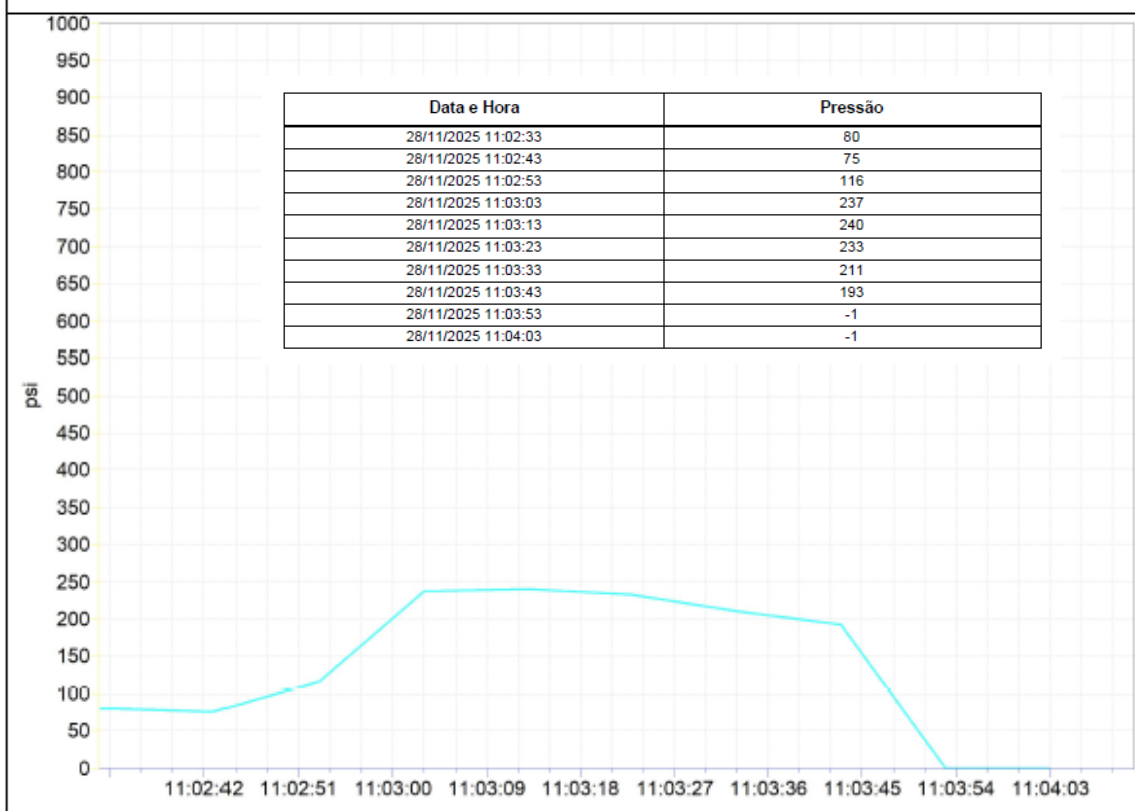
Pedido Cliente:

Pedido Flutrol:

Data Inicial: 28/11/2025 11:02:32

Data Final: 28/11/2025 11:04:11

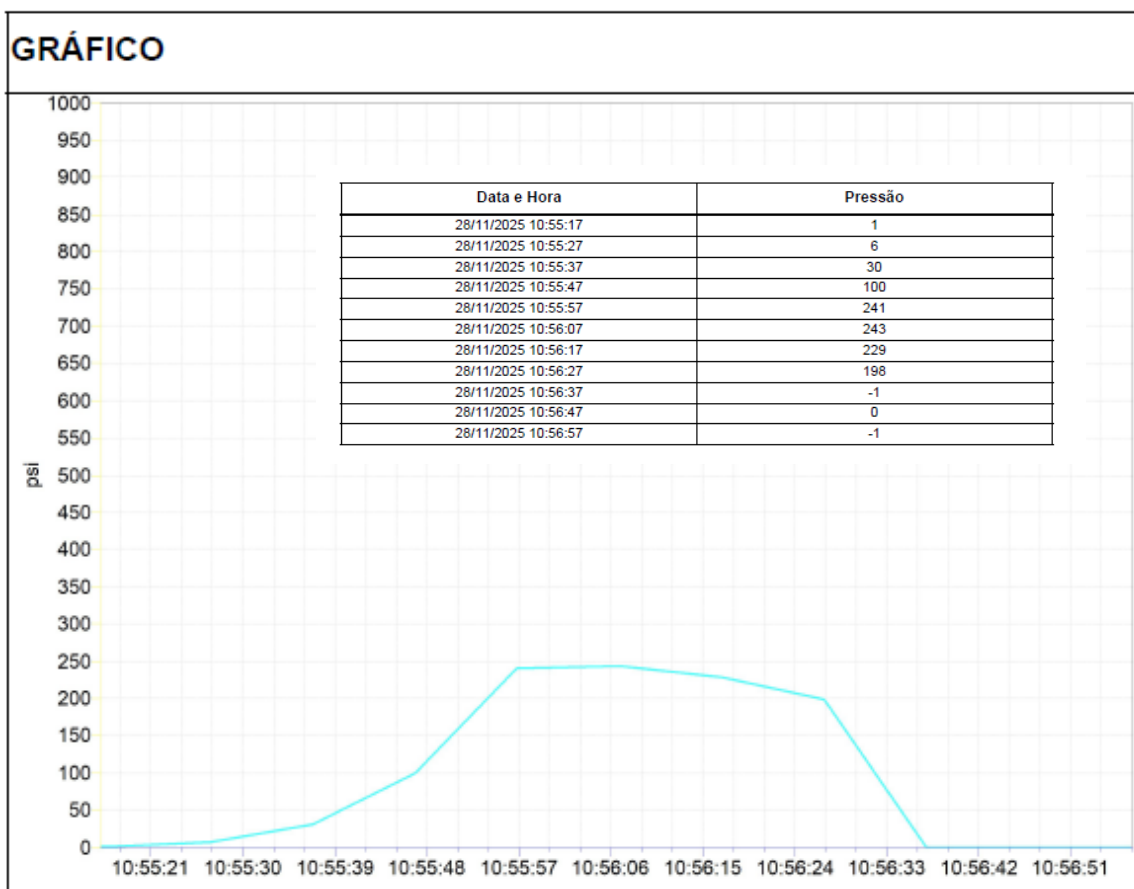
GRÁFICO



APÊNDICE 23: Ensaio de Ruptura 3 – Mangueira PVC Virgem

	<h3>Relatório Gráfico - Dados Técnicos</h3>
---	---

INFORMAÇÕES DE ENSAIO	
Certificado de Teste:	Teste de estouro- Senai
Modelo Válvula:	Mangueira azul
Número de Série:	N/A
Certificado Transmissor:	LP-613546
Pedido Cliente:	
Pedido Flutrol:	
Data Inicial:	28/11/2025 10:55:16
Data Final:	28/11/2025 10:56:57



APÊNDICE 24: Ensaio de Ruptura 1 – Mangueira Material SENAI



INFORMAÇÕES DE ENSAIO

Certificado de Teste: Teste de estouro- Senai

Modelo Válvula: Mangueira Preta

Número de Série: N/A

Certificado Transmissor: LP-613546

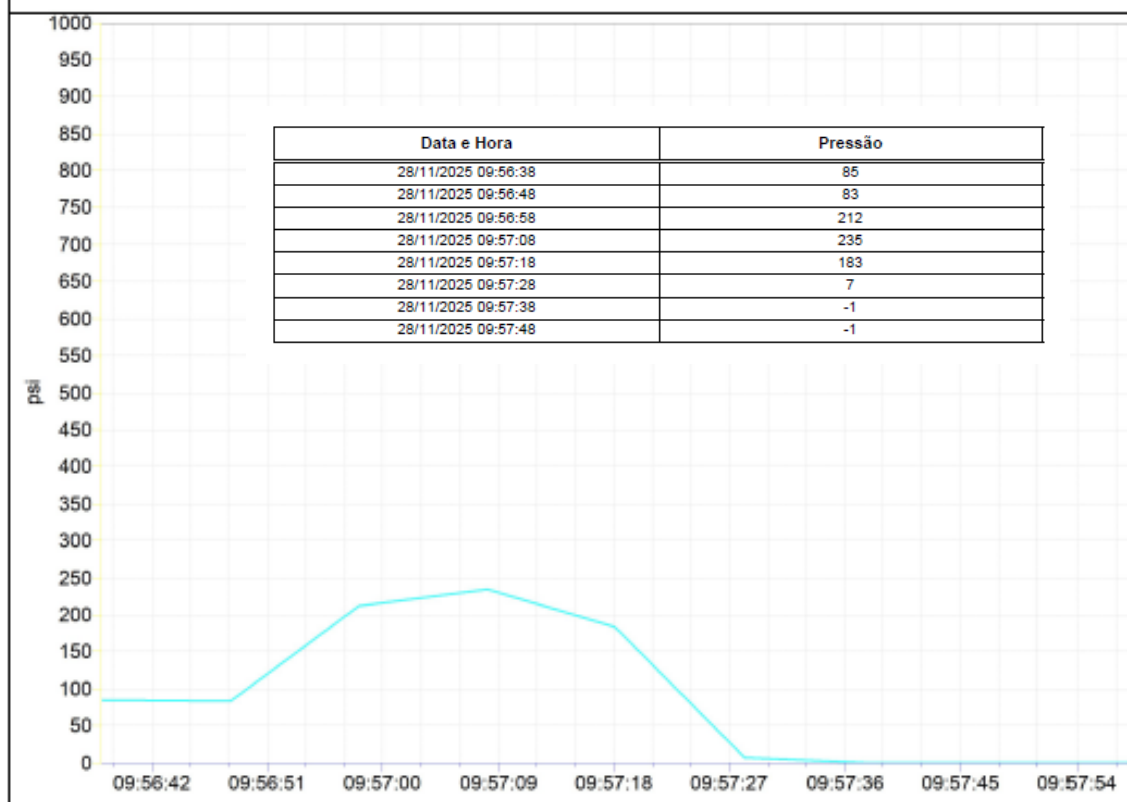
Pedido Cliente:

Pedido Flutrol:

Data Inicial: 28/11/2025 09:56:38

Data Final: 28/11/2025 09:57:58

GRÁFICO



APÊNDICE 25: Ensaio de Ruptura 2 – Mangueira Material SENAI



INFORMAÇÕES DE ENSAIO

Certificado de Teste: Teste de estouro- Senai

Modelo Válvula: Mangueira Preta

Número de Série: N/A

Certificado Transmissor: LP-613546

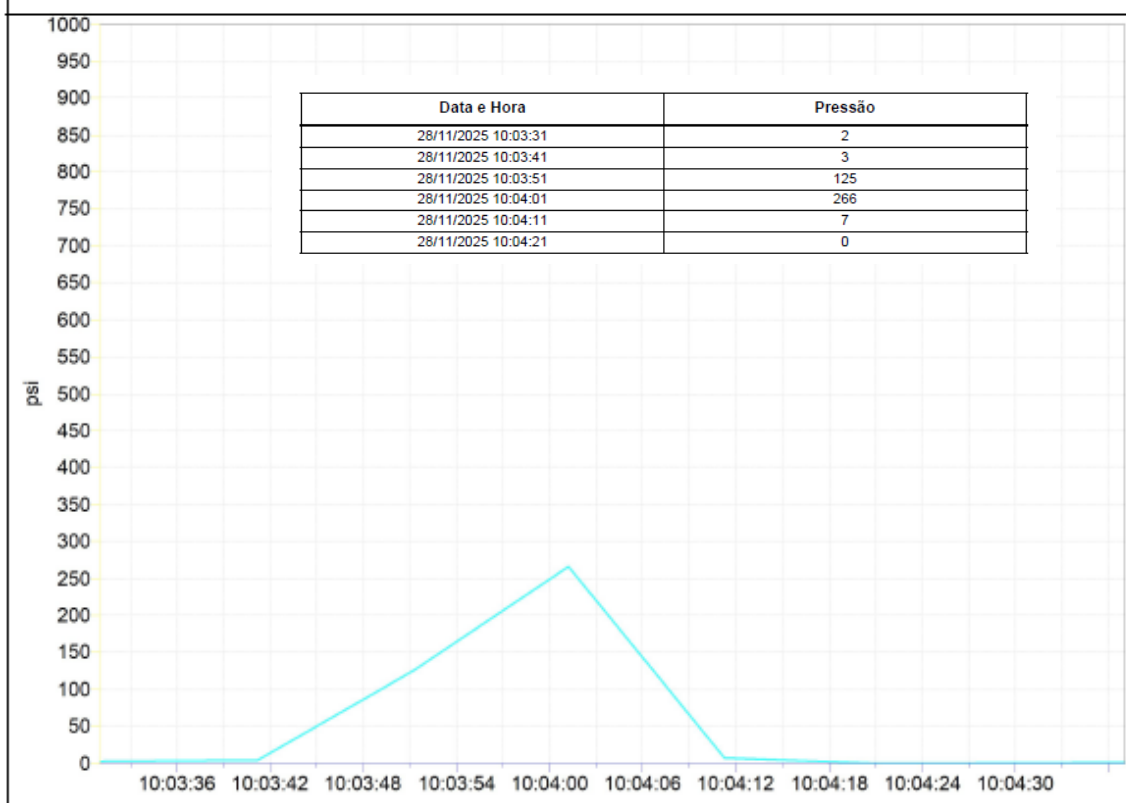
Pedido Cliente:

Pedido Flutrol:

Data Inicial: 28/11/2025 10:03:31

Data Final: 28/11/2025 10:04:37

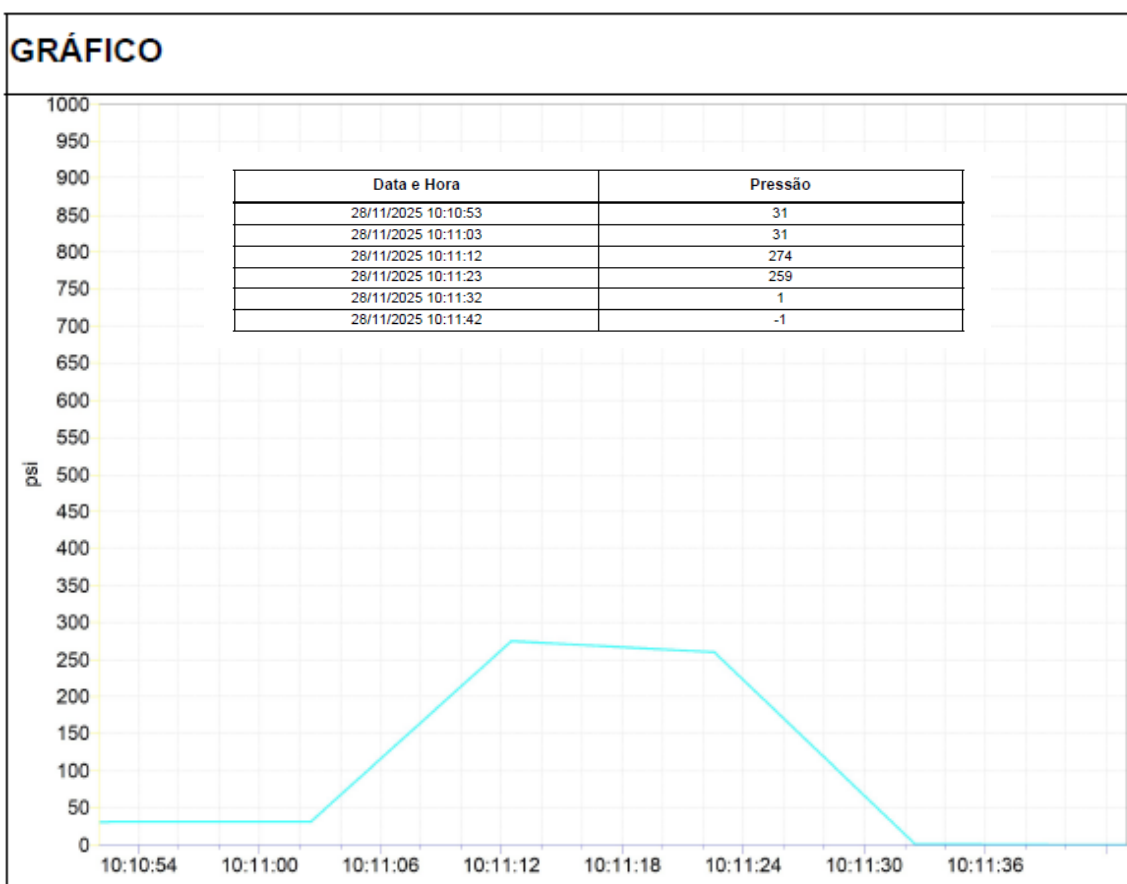
GRÁFICO



APÊNDICE 26: Ensaio de Ruptura 3 – Mangueira Material SENAI

	<h3>Relatório Gráfico - Dados Técnicos</h3>
---	---

INFORMAÇÕES DE ENSAIO	
Certificado de Teste:	Teste de estouro- Senai
Modelo Válvula:	Mangueira Preta
Número de Série:	N/A
Certificado Transmissor:	LP-613546
Pedido Cliente:	
Pedido Flutrol:	
Data Inicial:	28/11/2025 10:10:52
Data Final:	28/11/2025 10:11:43



APÊNDICE 27: Publicações com ênfase no trabalho desenvolvido

1. JOSÉ, F. C.; NUNES, E. C. D. **Transformando resíduos em recursos: a economia circular e a reciclagem de cabos elétricos**. Brazilian Journal of Development, 11(8), e81489. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv11n8-010>.
2. JOSÉ, F. C.; NUNES, E. C. D.; COELHO, N. M. A.. **Economia Circular e Reciclagem de PVC de Cabos Elétricos: caracterização, impacto nas propriedades mecânicas e estratégias para o reaproveitamento sustentável**. Anais do XIV Encontro Nacional de Pós-graduação, v. 9, p. 24-28, 2025. doi.org/10.5281/zenodo.17204090.
3. JOSÉ, F. C.; FIGUEIREDO, A. E. P. **Revestimento Polimérico: A barreira de Proteção Essencial em Fios e Cabos Elétricos**. In: ENPG - Encontro Nacional de Pós-Graduação, 2025, Santos. Anais do Encontro Nacional de Pós-Graduação. Santos: Editorial, 2025. v. 9. p. 7-12. doi.org/10.5281/zenodo.17204119.
4. CORDEIRO, Yasmim Oliveira; JOSÉ, Fabiano Caio; NUNES, Edilene de Cássia Dutra. **Revalorização de resíduos de fios e cabos elétricos: Abordagem integrada para a reciclagem de PVC e recuperação de cobre na economia circular**, Sessão Painel no II Congresso UniSENAI-SP de Educação, São Caetano do Sul, 2025.
5. JOSÉ, F. C.; NUNES, E. C. D.. **Transformando resíduos em recursos: a economia circular e a reciclagem de cabos elétricos**. I CONGRESSO UNISENAI-SP, 2024, São Paulo. I Congresso UniSENAI-SP de Educação, Tecnologia e Inovação. São Paulo, 2024. v. 1.