

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DANIELLA CÁSSIA LIMA RIBEIRO

**REUTILIZAÇÃO DE TUBOS DE PVC NA PRODUÇÃO DE NOVOS TUBOS:
ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PROPORÇÕES DE
MATERIAL RECICLADO NA SUA ESTRUTURA**

BELO HORIZONTE

2025

DANIELLA CÁSSIA LIMA RIBEIRO

REUTILIZAÇÃO DE TUBOS DE PVC NA PRODUÇÃO DE NOVOS TUBOS:
ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PROPORÇÕES DE MATERIAL
RECICLADO NA SUA ESTRUTURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: João Paulo Ferreira Santos

BELO HORIZONTE

2025

DANIELLA CÁSSIA LIMA RIBEIRO

**REUTILIZAÇÃO DE TUBOS DE PVC NA PRODUÇÃO DE NOVOS TUBOS:
ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PROPORÇÕES DE
MATERIAL RECICLADO NA SUA ESTRUTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a. Aline Silva Magalhães

Prof. Dr. Leonardo Dalseno Antonino

Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre me incentivou nos estudos, acreditou no meu potencial e me guiou com amor, força e sabedoria. Tudo o que sou hoje é reflexo da mulher incrível que me criou e inspirou.

AGRADECIMENTOS

Com o coração cheio de gratidão, agradeço à minha família, meu alicerce em todos os momentos. À minha mãe, Mônica, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando com amor, coragem e palavras que me impulsionaram a seguir em frente mesmo nas fases mais difíceis. Sua força e dedicação me ensinaram a nunca desistir dos meus sonhos. À minha irmã, Camila, minha parceira de vida, que sempre divide comigo alegrias, medos e vitórias. À minha sobrinha, Aurora, que com seu amor mais puro e verdadeiro, me dá forças todos os dias para seguir em frente. Seu sorriso ilumina meus dias e me lembra do que realmente importa.

Ao meu noivo, Gustavo, meu companheiro de todas as horas, que esteve ao meu lado em cada desafio, me oferecendo suporte, carinho e amor incondicional. Obrigada por acreditar em mim até quando eu mesma duvidei.

Às minhas amigas queridas, Milena e Mariana, que tornaram essa caminhada no CEFET-MG mais leve, divertida e cheia de memórias boas. A presença de vocês foi essencial para que eu chegasse até aqui com o coração mais tranquilo e feliz.

Agradeço, ao meu orientador Prof. Dr. João Paulo Santos, pela paciência, compreensão e por acreditar no meu trabalho, mesmo quando ele ainda era apenas uma ideia.

E, por fim, agradeço a todos os professores, funcionários e amigos que fiz no CEFET-MG, que contribuíram de forma valiosa para o meu aprendizado e crescimento. Levo comigo não apenas o conhecimento adquirido, mas também os valores, os exemplos e as vivências que ajudaram a moldar quem me tornei ao longo dessa jornada.

Meu sincero e profundo agradecimento a todos que fizeram parte dessa história.

RESUMO

A busca por práticas alinhadas à sustentabilidade e à economia circular tem pressionado a indústria a desenvolver soluções inovadoras para a gestão de seus resíduos. Na manufatura de tubos de PVC, a geração de produtos não conformes segundo as normas representa uma oportunidade de aplicar esses conceitos na prática, transformando o que seria um resíduo em um recurso valioso. A motivação para este trabalho reside na necessidade de validar tecnicamente essa revalorização, pois a incorporação de material reciclado pode alterar as propriedades mecânicas e físicas do produto final. Assim, a análise criteriosa do desempenho de peças com diferentes teores de reciclado é essencial para definir os limites seguros dessa aplicação, sem comprometer a qualidade e a segurança exigidas pelas normas. Este trabalho avaliou a viabilidade da reutilização de resíduos micronizados provenientes do processo de fabricação de tubos de PVC, por meio da incorporação de diferentes dosagens desse material a compostos virgens para a produção de novos tubos. Foram elaboradas formulações com 20%, 50%, 70% e 100% de material reciclado (MC), produzindo por extrusão tubos de esgoto DN100 e tubos soldáveis DN25. As amostras foram submetidas a ensaios técnicos conforme as normas ABNT NBR 5688:2021, NBR 5648:2024 que definem as características e propriedades necessárias para conformidade dos tubos, incluindo análises de espessura, densidade aparente, variação longitudinal, teor de cinzas, resistência ao impacto e pressão hidrostática interna. Os resultados demonstraram que os tubos de esgoto DN100 apresentaram bom desempenho em todas as dosagens, atendendo aos requisitos normativos, enquanto os tubos soldáveis DN25 mantiveram conformidade apenas até 50% de MC, sendo reprovados nos ensaios de impacto em dosagens superiores. Concluiu-se que a utilização de resíduos micronizados se apresenta tecnicamente viável, contribuindo para a sustentabilidade do processo industrial por meio da redução do uso de matéria-prima virgem e do reaproveitamento de resíduos internos.

Palavras-chave: PVC. Reciclagem. Extrusão. Sustentabilidade. Resíduos industriais.

ABSTRACT

The pursuit of practices aligned with sustainability and the circular economy has pressured the industry to develop innovative solutions for its waste management. In the manufacturing of PVC pipes, the generation of non-conforming products according to standards represents an opportunity to apply these concepts in practice, transforming what would be waste into a valuable resource. The motivation for this work lies in the need to technically validate this revalorization, as the incorporation of recycled material can alter the final product's mechanical and physical properties. Thus, a critical analysis of the performance of parts with distinct levels of recycled content is essential to define the safe limits of this application, without compromising the quality and safety required by the standards. This study aimed to evaluate the feasibility of reusing micronized scrap material (MC) from the PVC pipe manufacturing process by incorporating different dosages of this material into virgin compounds to produce new pipes. Formulations containing 20%, 50%, 70%, and 100% of micronized material (MC) were prepared to produce through extrusion DN100 sewage pipes and DN25 solvent-weld pipes. The samples were subjected to technical tests in accordance with ABNT NBR 5688:2021, NBR 5648:2024, which define the necessary characteristics and properties for pipe compliance, including analyses of thickness, bulk density, longitudinal retraction, ash content, impact resistance, and internal hydrostatic pressure. The results showed that the DN100 sewage pipes performed well at all dosages, meeting normative requirements, while the DN25 solvent-weld pipes remained compliant only up to 50% MC, failing the impact tests at higher dosages. It was concluded that the use of micronized waste is technically feasible, contributing to the sustainability of the industrial process by reducing the use of virgin raw materials and promoting the reuse of internal scrap.

Keywords: PVC. Recycling. Extrusion, Sustainability, Industrial scrap.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – PVC: Demanda por segmento de mercado em 2022	17
Figura 2 - Tempo aproximado de vida em serviço de produtos de PVC, em função do percentual aplicado	18
Figura 3 - Mero do PVC	19
Figura 4 - Esquema de interação das moléculas de PVC quando não plastificadas	22
Figura 5 - Representação esquemática de uma extrusora	25
Figura 6 - Distribuição dos materiais que compõem o resíduo sólido urbano	28
Figura 7 - Distribuição média dos plásticos encontrados no resíduo sólido urbano	29
Figura 8 - Identificação dos produtos de PVC pela ABNT NBR 13230	30
Figura 9 - Fluxograma do procedimento experimental	33
Figura 10 - Composto com base em PVC	34
Figura 11 - Tubo de PVC extrudado	35
Figura 12 - Material inservível Micronizado (MC)	35
Figura 13 - Micronizador	36
Figura 14 - Misturador Plasmec	37
Figura 15 - Painel para determinação de dosagem de material	38
Figura 16 - Tubos para testes sendo extrudados	38
Figura 17 – Agitador eletromagnético	39
Figura 18 - Equipamento para teste de densidade aparente	41
Figura 19 - Circometro	42
Figura 20 - Micrômetro digital	43
Figura 21 – Equipamento para teste de impacto	44
Figura 22 - Ponteira utilizada para teste de impacto	44
Figura 23 – Equipamento para teste de classe de rigidez	45
Figura 24 - Equipamento para determinação do teor de cinzas	47
Figura 25 - Gráfico de distribuição granulométrica do Composto Branco	50
Figura 26 - Gráfico de distribuição granulométrica do Composto Marrom	50
Figura 27 - Gráfico de Densidade aparente x Dosagem de material	51
Figura 28 - Diâmetro das amostras de Tubo 100mm Esgoto (Branco)	53
Figura 29 - Diâmetro das amostras de Tubo 25mm soldável (Marrom)	54
Figura 30 - Variação da espessura ao longo do diâmetro do tubo	55
Figura 31 - Variação da espessura ao longo do diâmetro do tubo	56

Figura 32 - Corpos de prova após o ensaio de resistência ao impacto	58
Figura 33 – Classe de rigidez média (Pa) em função da dosagem de material MC para o Tubo Esgoto DN100 (Branco)	60
Figura 34 – Corpos de prova após o ensaio de PHI	62
Figura 35 - Variação Longitudinal Média x Dosagem de MC	64
Figura 36 - Média do teor de cinzas por dosagem de material MC	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa de Consumo Per Capita de PVC (2023-2024)	16
Tabela 2 - Principais aditivos utilizados e seus efeitos nas formulações de PVC	21
Tabela 3 - Proporções de mistura entre composto de PVC virgem e material inservível micronizado	37
Tabela 4 - Distribuição granulométrica Blend de material	49
Tabela 5 - Diâmetro das amostras	53
Tabela 6 - Resultados dos testes de resistência ao impacto	58
Tabela 7 - Resultado da classe de rigidez Tubo Esgoto DN 100	60
Tabela 8 - Resultado do teste de Pressão Hidrostática Interna	62
Tabela 9 - Variação Longitudinal após Exposição a 140 °C	63
Tabela 10 - Resultados do teor de cinzas	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Panorama do consumo mundial de PVC	16
3.2 O PVC no saneamento básico e sua relevância ambiental	17
3.3 Estrutura, composição e propriedades do PVC	18
3.4 Utilização de aditivos no composto de PVC	21
3.5 Processo de moldagem por extrusão de Tubos de PVC	23
3.5.1 Componentes Essenciais da Extrusora	24
3.5.2 Propriedades Reológicas e Térmicas do Composto de PVC	26
3.6 Tratamento de resíduos de PVC	27
3.6.1 Reciclagem primária de PVC	29
3.6.2 Reciclagem química de PVC	30
3.6.3 Reciclagem energética de PVC	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Visão geral	33
4.2 Materiais	34
4.3 Métodos	36
4.3.1 Incorporação do material inservível micronizado em diferentes proporções no processo de extrusão de novos tubos	36
4.4 Caracterizações e Ensaios	39
4.4.1 Caracterização granulométrica	39
4.4.2 Densidade aparente	40
4.4.3 Diâmetro dos tubos	42
4.4.4 Medida de espessura	42
4.4.5 Teste de resistência ao impacto	43
4.4.6 Determinação da classe de rigidez	45
4.4.7 Determinação da pressão hidrostática interna (PHI)	46

4.4.8 Determinação da estabilidade dimensional	46
4.4.9 Ensaio de teor de cinzas	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1 Granulometria do material	49
5.2 Densidade aparente	51
5.3 Diâmetro externo dos tubos	52
5.4 Medida de espessura	54
5.5 Resistência ao impacto	57
5.6 Classe de rigidez	59
5.7 Pressão hidrostática interna (PHI)	61
5.8 Estabilidade dimensional	63
5.9 Teor de cinzas	65
6 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros são macromoléculas formadas pela repetição de unidades menores, os meros, que se unem por meio de reações químicas. Na construção civil, esses materiais desempenham um papel crucial devido às suas propriedades versáteis, como leveza, alta durabilidade, resistência química, além de excelentes capacidades de isolamento térmico e acústico (MANRICH, 2021). Tais características os tornam substitutos eficientes e, por vezes, superiores a materiais tradicionais como o metal, a madeira e o concreto, especialmente em aplicações como tubulações, esquadrias, revestimentos e conduítes, contribuindo para a inovação e sustentabilidade do setor.

O Policloreto de Vinila (PVC) se destaca como um dos polímeros mais amplamente empregados na construção civil. O PVC é um termoplástico, o que significa pertencer a uma classe de polímeros que se caracterizam por amolecer e se tornar fluidos quando aquecidos, permitindo que sejam moldados em diversas formas, e que retornam ao estado sólido ao serem resfriados. Esse ciclo de aquecimento e resfriamento pode ser repetido várias vezes sem que ocorram alterações químicas significativas em sua estrutura, o que torna esses materiais facilmente recicláveis. Essa propriedade decorre da sua estrutura molecular, formada por longas cadeias lineares ou ramificadas, unidas por forças de atração intermoleculares secundárias, que são enfraquecidas pelo calor. O PVC é obtido a partir da polimerização do cloreto de vinila, apresenta excelente resistência à propagação de chama, conferindo segurança em diversas aplicações. Além disso, demonstra grande durabilidade a intempéries (radiação UV, chuva e vento), baixa permeabilidade a gases e líquidos, e notável isolamento térmico, elétrico e acústico. Sua facilidade de processamento, aliada a uma boa reciclabilidade e à grande versatilidade de seus compostos, tornam o PVC uma excelente opção para uma ampla variedade de aplicações, desde tubulações e esquadrias até revestimentos e forros (JULIANA et al., 2006). As principais técnicas de processamento incluem calandragem para filmes e lonas, extrusão para perfis, tubos flexíveis e rígidos, e cabos, moldagem por sopro para frascos e recipientes, e moldagem por injeção para peças complexas (JULIANA et al., 2006).

A reciclagem do PVC é um procedimento relativamente simples, especialmente quando se trata de resíduos gerados internamente pelas indústrias, como aparas e produtos defeituosos. Por apresentarem baixa contaminação e uma composição química bem definida, esses materiais podem ser facilmente recuperados por meio de processos mecânicos. A moagem ou micronização do material, seguida de filtração para remover quaisquer impurezas remanescentes, permite a reintrodução desses resíduos no ciclo produtivo, reduzindo a

necessidade de matéria-prima virgem e minimizando o descarte em aterros (MANRICH, 2021). Essa característica é um ponto forte do PVC em termos de sustentabilidade e economia circular.

Além da construção civil, onde encontra vasta aplicação em sistemas hidráulicos, elétricos e de vedação, o PVC é utilizado em diversos outros setores. Na área de embalagens, sua toxicidade e inércia o tornam ideal para produtos alimentícios e farmacêuticos. No setor médico-hospitalar, é empregado em bolsas de soro e cateteres devido à sua biocompatibilidade. Em calçados e acessórios de moda, confere flexibilidade e resistência, o PVC pode ser moldado de diversas maneiras o que demonstra sua versatilidade de aplicação. Além disso, o PVC apresenta uma excelente relação custo-benefício quando comparado a materiais concorrentes, como madeira, metais e cerâmicas, oferecendo desempenho superior em aspectos como resistência à umidade, durabilidade, leveza, facilidade de instalação e baixa necessidade de manutenção, a um custo competitivo, o que impulsiona sua adoção em larga escala (MANRICH, 2021). Para tal, este estudo busca avaliar as propriedades físico-químicas das misturas resultantes, confrontando-as com os requisitos da norma ABNT NBR 5688: Tubos e conexões de PVC-U para sistemas prediais de água pluvial, esgoto sanitário e ventilação – Requisitos para o Tubo DN 100 Esgoto fabricado com composto branco e ABNT NBR 5648: Tubos e conexões de PVC – com junta soldável para sistemas prediais de água fria – Requisitos, para o tubo DE 20 Soldável fabricado com composto marrom. A finalidade é determinar a conformidade e a eficácia da reintrodução desses resíduos no ciclo produtivo, visando otimizar processos e promover a sustentabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho objetiva analisar a viabilidade técnica da reutilização de resíduos de Policloreto de Vinila (PVC), gerados no processo de fabricação de tubos, por meio da sua incorporação em diferentes dosagens de 20%, 50%, 70% e 100% na linha de produção dos Tubos de esgoto DN100 e Tubos soldáveis DN25.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver e caracterizar misturas de PVC incorporando diferentes frações de resíduo micronizado, com o intuito de identificar a proporção ideal para sua reintrodução no processo produtivo de tubos.
- Avaliar as propriedades físico-químicas e mecânicas das misturas resultantes, comparando os resultados com os requisitos das normas ABNT NBR 5688 e ABNT NBR 5648 com os padrões de controle de qualidade internos da empresa.
- Realizar testes de conformidade nas misturas desenvolvidas para verificar o atendimento às normas de desempenho aplicáveis a tubos de PVC, garantindo a viabilidade técnica do uso dos resíduos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O policloreto de polivinila (PVC) é um dos polímeros termoplásticos mais versáteis e amplamente utilizados no mundo, com sua aplicação ganhando destaque a partir da metade do século XX. Sua importância no setor da construção civil é inegável, especialmente na fabricação de tubos rígidos, que se tornaram essenciais para sistemas hidráulicos, de esgoto e de ventilação (LUZ JR. et al., 2023; MANRICH, 2021). Essa proeminência se deve à combinação de propriedades intrínsecas do PVC, como durabilidade, resistência química, leveza, facilidade de instalação e excelente relação custo-benefício (ANTÔNIO JR. et al., 2023).

Para além da infraestrutura e construção civil, o PVC desempenha um papel crucial na qualidade de vida da sociedade moderna, oferecendo soluções em uma vasta gama de produtos. Ele é empregado em calçados, devido à sua flexibilidade e resistência ao desgaste, em embalagens, por sua barreira a gases e umidade, em brinquedos pela maleabilidade, em laminados técnicos, pela durabilidade e adaptabilidade, entre outros bens de consumo duráveis (ANTÔNIO JR. et al., 2023). Essa diversidade de aplicações ressalta a relevância econômica e social do PVC no cenário global.

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a economia circular tem impulsionado a busca por soluções para a gestão de resíduos poliméricos. No contexto da fabricação de tubos de PVC, a geração de aparas e produtos não conformes é inerente ao processo. Assim, a reutilização desses resíduos representa uma estratégia eficaz para reduzir o consumo de matéria-prima virgem, minimizar o descarte em aterros (MANRICH, 2021).

Neste cenário, a proposta de incorporar resíduos de PVC micronizado ao material virgem, portanto, surge como uma alternativa promissora. Essa prática visa desenvolver misturas em diferentes proporções, buscando determinar a dosagem ideal que permita a reintrodução do material reciclado sem comprometer as características de desempenho do produto final. A análise aprofundada das propriedades físicas, químicas e visuais dos tubos produzidos com essas misturas é crucial para verificar se eles mantêm os padrões de qualidade e as características desejadas, assemelhando-se ao máximo aos produtos fabricados com 100% de PVC virgem (ABNT NBR 5688, 2021). Essa abordagem não apenas contribui para a sustentabilidade, mas também pode gerar benefícios econômicos para as indústrias, ao otimizar o uso de recursos e reduzir custos de produção e descarte.

3.1 Panorama do consumo mundial de PVC

O Policloreto de Vinila (PVC) figura entre os três termoplásticos mais consumidos globalmente, consolidando sua importância estratégica para diversas indústrias. O mercado mundial de PVC tem demonstrado crescimento robusto, superando a marca de 45 milhões de toneladas anuais e sendo avaliado em mais de 50 bilhões de dólares em 2023 (MORDOR INTELLIGENCE, 2024). A distribuição geográfica do consumo sofreu uma transformação significativa nas últimas duas décadas, com a região da Ásia-Pacífico, impulsionada pela China, emergindo como o principal polo de demanda, respondendo por mais da metade do consumo mundial. Nesse cenário, o Brasil continua a ser um mercado relevante na América Latina.

Dados recentes apontam que o consumo nacional atingiu 1,122 milhão de toneladas em 2023, elevando o consumo per capita para aproximadamente 5,2 kg/habitante/ano (IBPVC, 2024). Embora represente um crescimento em relação a décadas passadas, este número ainda se mostra consideravelmente abaixo do observado em nações desenvolvidas, indicando que o mercado interno brasileiro ainda possui um significativo potencial de expansão, especialmente em setores de infraestrutura e construção civil.

Tabela 1 - Estimativa de Consumo Per Capita de PVC (2023-2024)

País/Região	Consumo per capita (kg/hab/ano)
Mercados Desenvolvidos	
Estados Unidos	~ 20 kg
Europa Ocidental	~ 15 kg
Mercados em Ascensão	
China	> 17 kg
Brasil	~ 5,2 kg
Índia	~ 2,5 kg
Média Mundial	~ 6,0 kg

Fonte: IBPVC, 2024.

A análise da Tabela 1, que apresenta uma estimativa do consumo per capita de PVC para o período de 2023-2024, revela uma profunda reconfiguração do cenário global em comparação com as duas décadas anteriores. A transformação mais expressiva é a ascensão da China como líder de consumo, com uma estimativa superior a 17 kg/habitante/ano, um salto exponencial em relação aos 5,2 kg registrados em 2004. Em contraste, mercados desenvolvidos como os Estados Unidos (~20 kg/hab/ano) e a Europa Ocidental (~15 kg/hab/ano), embora mantenham elevados patamares de consumo, são hoje considerados mercados maduros com demanda mais estável. Neste novo panorama, o Brasil exibe um crescimento consistente,

evoluindo para aproximadamente 5,2 kg/hab/ano, um indicador que, assim como o da Índia (~2,5 kg/hab/ano), sinaliza um contínuo e significativo potencial de expansão, especialmente em setores ligados à infraestrutura e construção civil.

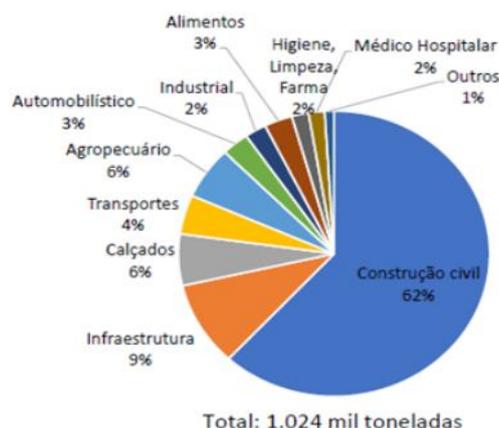
3.2 O PVC no saneamento básico e sua relevância ambiental

A relevância do PVC no contexto brasileiro é ampliada pelo novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020). Este marco estabelece ambiciosas metas para a universalização dos serviços de saneamento no Brasil até 2033, visando garantir que 99% da população tenha acesso à água potável e 90% ao tratamento e à coleta de esgoto. Nesse cenário, o PVC assume um papel central devido à sua versatilidade e propriedades que o tornam ideal para diversas etapas do ciclo do saneamento.

O PVC não é apenas um dos termoplásticos mais consumidos globalmente por sua importância econômica e social, mas também por sua notável versatilidade, sendo empregado em praticamente todo o ciclo do saneamento, desde a captação e distribuição de água potável até a coleta e tratamento de efluentes. Nas instalações prediais, ele está presente em cerca de 90% das tubulações de água e esgoto. Na infraestrutura urbana, sua predominância se mantém, com o PVC compondo aproximadamente 85% das tubulações de água e 60% das tubulações de esgoto (IBPVC, 2023). A alta resistência à corrosão, durabilidade, leveza e facilidade de instalação do PVC são fatores que justificam sua preferência em sistemas de saneamento, onde a integridade e longevidade da rede são cruciais.

Os principais mercados de aplicação, setores e processos utilizados para o PVC no Brasil, em 2022, podem ser visualizados na Figura 1.

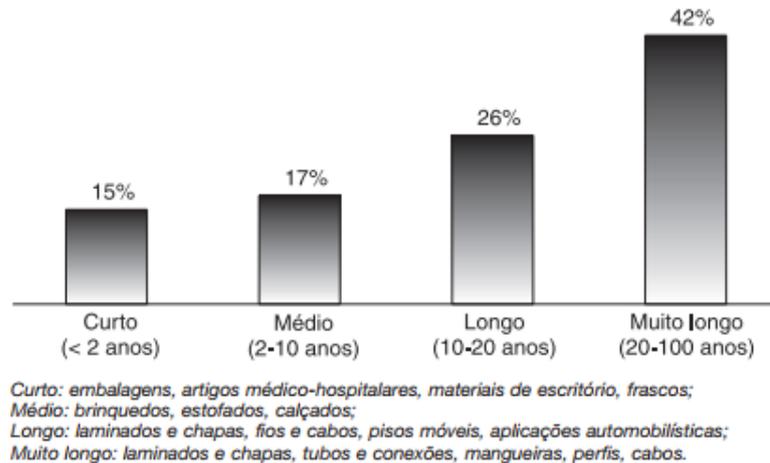
Figura 1 – PVC: Demanda por segmento de mercado em 2022



Fonte: MAXIQUIM, 2022.

Visando o contexto ambiental, o PVC é caracterizado como um material de aplicações de longo ciclo de vida, ou seja, aplicações nas quais o tempo de vida útil do produto, antes de seu descarte para o meio ambiente, é considerado bastante longo. Tal período pode ser, por exemplo, de mais de 20 anos. A Figura 2 apresenta o tempo de vida útil aproximado dos principais produtos feitos com PVC e seu percentual de utilização (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023).

Figura 2 - Tempo aproximado de vida em serviço de produtos de PVC, em função do percentual aplicado



Fonte: ECVN, 2011.

3.3 Estrutura, composição e propriedades do PVC

A síntese do PVC, um dos polímeros mais utilizados mundialmente, é um processo químico que se inicia com a obtenção do seu monômero, o cloreto de vinila (MVC). A rota de produção mais comum para o MVC envolve duas etapas principais a partir de matérias-primas básicas: o eteno, derivado do petróleo ou gás natural, e o cloro, obtido através da eletrólise do cloreto de sódio (sal marinho). Inicialmente, o eteno reage com o cloro em um processo de cloração direta para formar o 1,2-dicloroetano (DCE). Parte do DCE é então submetido a um craqueamento térmico (pirólise) a altas temperaturas, resultando na formação do monômero cloreto de vinila e de ácido clorídrico (HCl) como subproduto. Este HCl é, por sua vez, utilizado em uma segunda etapa, a de oxicloração, na qual reage com mais eteno e oxigênio para produzir mais DCE, otimizando o uso dos reagentes em um ciclo fechado e economicamente viável (RODOLFO JR; NUNES; ORMANJI, 2006).

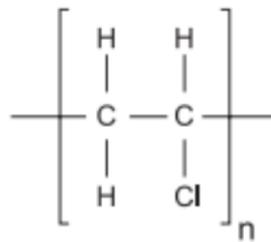
A transformação do monômero em polímero ocorre através de uma reação de polimerização por adição, majoritariamente via radicais livres. O método mais empregado

industrialmente para a produção de PVC é a polimerização em suspensão. Neste processo, o MVC líquido é disperso em água (meio onde é insolúvel) através de forte agitação e com o auxílio de agentes suspensores, formando pequenas gotas. A reação é iniciada por catalisadores (iniciadores) solúveis no monômero, e o calor gerado pela reação exotérmica é eficientemente dissipado pela água. Ao final do processo, obtém-se o polímero na forma de partículas porosas de cor branca, com tamanho e morfologia controlados, que são posteriormente separadas, secas e aditivadas conforme a aplicação final desejada (CANEVAROLO JR., 2006; MANO, 2005).

Existem outros métodos de polimerização, como em emulsão, massa e solução, que conferem diferentes propriedades à resina de PVC, adequando-a a uma vasta gama de produtos, desde tubulações rígidas a filmes flexíveis.

A estrutura molecular do PVC é tipicamente representada por meio da repetição de sua unidade monomérica, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Mero do PVC



Fonte: ANTONIO JR. *et al.*, 2023.

A representação “[*n*]” na estrutura molecular indica que a unidade fundamental (mero) se repete *n* vezes ao longo da cadeia polimérica. Esse parâmetro, conhecido como grau de polimerização, está diretamente relacionado a massa molar do polímero, influenciando suas propriedades físicas e mecânicas (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023).

Em termos de composição química, o PVC se destaca por sua matéria-prima. Cerca de 57% de sua massa é constituída por cloro, um elemento abundante derivado do sal marinho, uma fonte praticamente inesgotável. Os 43% restantes provêm de fontes não renováveis, como petróleo e gás natural. É importante notar que a produção de PVC consome apenas aproximadamente 0,25% do suprimento mundial dessas últimas fontes, conferindo-lhe uma pegada de carbono relativamente menor em comparação com outros termoplásticos derivados exclusivamente do petróleo (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023). Essa composição híbrida contribui

para a percepção do PVC como um material com vantagens ambientais, especialmente considerando a origem renovável de uma parte significativa de sua massa.

As características intrínsecas do PVC são notáveis e justificam sua vasta gama de aplicações:

- **Leveza:** Com densidade de aproximadamente $1,4 \text{ g/cm}^3$, facilita o manuseio e a instalação dos produtos.
- **Temperatura de processamento:** Apresenta temperatura de fusão (ou amolecimento) quando aquecido na faixa de 80°C , o que o torna relativamente fácil de processar.
- **Baixa Absorção de Água:** Possui absorção de água de cerca de 0,5% (em 24 horas), o que contribui para sua estabilidade dimensional e resistência em ambientes úmidos (IBPVC, 2023).
- **Resistência Mecânica:** Exibe resistência à tração entre 40 e 55 MP e resistência à compressão entre 45 e 70 MPa, indicando boa capacidade de suportar esforços mecânicos (IBPVC, 2023).
- **Resistência Biológica e Química:** É resistente à ação de fungos, bactérias, insetos e roedores, além de ser inerte à maioria dos reagentes químicos, o que o torna ideal para tubulações e revestimentos.
- **Durabilidade:** Sólido e tenaz, impermeável a gases e líquidos, e altamente resistente a intempéries (sol, chuva, vento e maresia). Sua vida útil em construções pode superar 50 anos, o que o classifica como um material de longo ciclo de vida (IBPVC, 2023; ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023).
- **Sustentabilidade:** É reconhecido como ambientalmente correto, sendo reciclável e frequentemente incorporado em produtos reciclados. Sua fabricação ocorre com baixo consumo de energia (IBPVC, 2023).

O PVC é um polímero que apresenta estrutura predominantemente amorfa, com baixos níveis de cristalinidade, geralmente inferiores a 10%. Essa baixa cristalinidade se deve à presença do átomo de cloro em sua cadeia principal, que dificulta o empacotamento regular das moléculas e a formação de regiões cristalinas bem definidas. Diferentemente de outros polímeros semicristalinos, como o polietileno ou o polipropileno, o PVC não tem sua cristalinidade significativamente aumentada por variações na temperatura de polimerização, sendo suas propriedades mecânicas e térmicas mais influenciadas por aditivos e pelo processo de transformação do que pelas condições de síntese em si. Essa microestrutura influencia diretamente as propriedades mecânicas e térmicas do material.

3.4 Utilização de aditivos no composto de PVC

A utilização prática das resinas de PVC, com exceção de aplicações extremamente específicas, exige sua mistura com uma variedade de aditivos. Esses aditivos são substâncias ou compostos químicos incorporados à resina em proporções específicas para conferir ao produto final características desejadas. Isso inclui desde a modificação de propriedades intrínsecas, como rigidez ou flexibilidade, transparência ou opacidade, até o aumento da resistência à exposição ao intemperismo ou a agentes químicos.

A seleção e dosagem dos aditivos são cruciais para o desempenho e a aplicabilidade do composto de PVC. A Tabela 2 apresenta os principais aditivos utilizados e seus efeitos nas formulações de PVC.

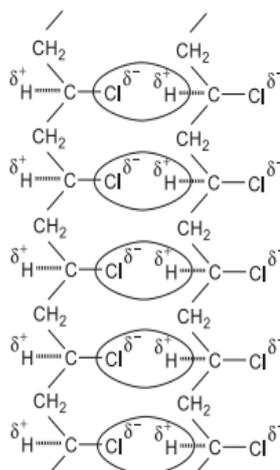
Tabela 2 - Principais aditivos utilizados e seus efeitos nas formulações de PVC

Aditivo	Usado em resina de		Efeito na formulação
	Microssuspensão ou emulsão	Suspensão	
Agente de expansão			Formação de estrutura celular, com consequente redução de densidade
Antibloqueios			Redução da aderência entre as camadas de filmes de PVC.
Antiestáticos			Redução de tendência de formação de cargas estáticas superficiais.
<i>Antifogging</i> (tensoativos)			Redução da tendência de embaçamento em filmes de PVC decorrentes da condensação da umidade ou vapor.
Biocidas			Redução da tendência de formação de colônias de fungos e bactérias em aplicações flexíveis.
Cargas			Redução de custos e alteração de propriedades mecânicas, térmicas e dielétricas.
Deslizantes (slip)			Redução do coeficiente de atrito entre camadas de filme PVC.
Desmoldantes			Redução da tendência de adesão às paredes dos moldes.
Espessantes			Aumento da viscosidade do plastisol.
Estabilizantes			Inibição das reações de degradação pelo calor, luz e agentes oxidantes.
Lubrificantes			Lubrificação interna e/ou externa, com consequente redução da fricção durante o processamento.
Modificadores de fluxo			Alteração do comportamento de fluxo durante o processamento.
Modificadores de impacto			Aumento da resistência ao impacto.
Pigmentos			Modificação da aparência.
Plastificantes			Modificação da dureza e flexibilidade.
Redutores de viscosidade			Redução de viscosidade de pastas.
Retardantes de chama			Modificação das características de inflamabilidade.
Solventes			Formação de soluções com PVC.

Fonte: ANTONIO JR. *et al.*, 2023.

De maneira geral, os produtos de PVC podem ser classificados em dois grandes grupos: rígidos e flexíveis. A resina de PVC é naturalmente rígida devido às fortes interações intermoleculares entre suas cadeias poliméricas. A Figura 4 ilustra esquematicamente como essas moléculas interagem quando não plastificadas. A presença do átomo de cloro, que possui alta eletronegatividade, induz a formação de dipolos elétricos ao longo da cadeia polimérica. Essas ligações químicas, fortemente negativas nos átomos de cloro e positivas nos átomos de hidrogênio (ligados ao mesmo átomo de carbono), geram uma intensa atração eletrostática entre as moléculas de PVC. Esse mecanismo de atração intermolecular, conhecido como ligação secundária ou de Van der Waals do tipo dipolo-dipolo, é o principal responsável pela rigidez do polímero.

Figura 4 - Esquema de interação das moléculas de PVC quando não plastificadas



Fonte: ANTONIO JR. *et al.*, 2023.

Para a produção de compostos flexíveis de PVC, uma classe especial de aditivos, os plastificantes, é incorporada à resina. A IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) define plastificantes como "substâncias incorporadas a plásticos ou elastômeros com a finalidade de aumentar sua flexibilidade, processabilidade ou capacidade de alongamento. Um plastificante pode reduzir a viscosidade do fundido, abaixar sua temperatura de transição de segunda ordem (temperatura de transição vítrea ou Tg.) ou diminuir seu módulo de elasticidade. (IUPAC, 1997). Em termos práticos, plastificantes são quaisquer substâncias que, ao serem adicionadas ao PVC, reduzem sua rigidez e aumentam sua flexibilidade.

Os plastificantes comerciais são, em sua maioria, líquidos inodoros, incolores, insolúveis em água e de baixa volatilidade. Quimicamente, são comumente ésteres ou poliésteres, incluindo aqueles baseados em ácidos adípicos, fosfóricos, sebácicos, trimelíticos

ou azeláicos. Eles atuam interpondo-se entre as cadeias poliméricas do PVC, enfraquecendo as forças de atração dipolo-dipolo e permitindo maior mobilidade e flexibilidade ao material. A escolha do plastificante é crucial e depende das propriedades finais desejadas para o produto (MANRICH, 2021).

3.5 Processo de moldagem por extrusão de Tubos de PVC

A moldagem por extrusão representa uma das técnicas de processamento mais fundamentais na indústria de polímeros. É um método contínuo e altamente eficiente para converter compostos poliméricos em uma vasta gama de produtos com perfil constante, sendo um pilar essencial na fabricação de produtos de PVC. Estima-se que entre 45% e 50% de todos os produtos de PVC são manufaturados por meio deste processo (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023). A versatilidade do PVC, potencializada pela capacidade de aceitar diversas modificações através da incorporação de aditivos conforme detalhado na Seção 3.4, é um fator crucial que expande sua aplicabilidade na extrusão, permitindo a produção de itens tão diversos quanto filmes para embalagens, fios e cabos elétricos, chapas, perfis variados como esquadrias e forros e, tubos para múltiplas finalidades, desde sistemas de saneamento a aplicações industriais.

O processo de extrusão consiste, fundamentalmente, em forçar o material polimérico geralmente em forma de grânulos ou pó a passar por um cilindro aquecido de forma controlada. Isso é alcançado pela ação de bombeamento e cisalhamento de uma ou duas roscas (parafusos) helicoidais sem fim, que giram e promovem a compactação, fusão (plastificação) e homogeneização da massa polimérica. À medida que o material avança pelo cilindro, ele é aquecido tanto por resistências elétricas externas quanto pelo calor gerado pelo atrito e cisalhamento da rosca. No final do cilindro, o polímero fundido e homogêneo é comprimido e forçado através de uma matriz (cabeçote), que confere ao produto o perfil transversal desejado (MASCIA, 2004). Após a saída da matriz, o produto extrudado é submetido a etapas subsequentes e cruciais de calibração dimensional, resfriamento geralmente por banhos d'água ou sprays e, finalmente, puxamento/arraste para manter a forma e as dimensões e corte em comprimentos definidos ou enrolamento para produtos flexíveis como fios e filmes, dependendo da aplicação final (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023). Essas etapas pós-matriz são vitais para a estabilidade dimensional e acabamento superficial do produto.

3.5.1 Componentes Essenciais da Extrusora

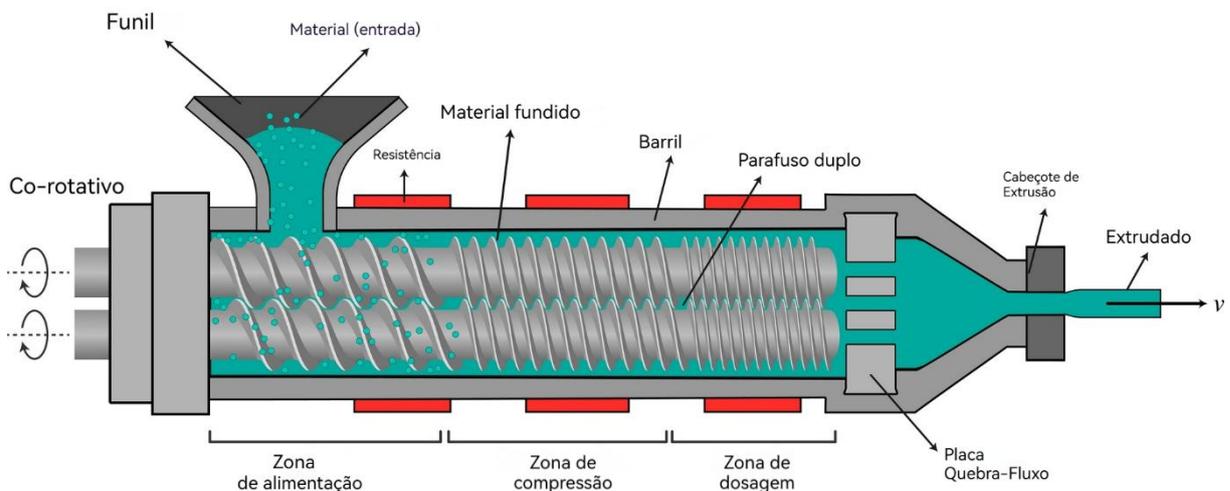
Uma extrusora é um equipamento complexo, concebido para operar continuamente, composto por diversos elementos essenciais que trabalham em conjunto para garantir a eficiência, controle e qualidade do processo. Os principais componentes incluem:

- **Motor elétrico:** Fornece a potência mecânica necessária para o acionamento da rosca(s).
- **Conjunto de engrenagens redutoras:** Responsável por converter a alta velocidade de rotação do motor em um alto torque na rosca, essencial para superar a resistência do polímero durante a fusão e o bombeamento, garantindo a plastificação eficiente.
- **Cilindro (ou canhão):** Uma câmara metálica aquecida que aloja a rosca(s). É dividido em zonas de aquecimento independentes para controlar o perfil de temperatura ao longo do processo. Por ele, o polímero é transportado, fundido e homogeneizado.
- **Rosca (ou parafusos):** A peça central da extrusora, com perfil helicoidal. As roscas são projetadas com diferentes zonas (alimentação, compressão/transição e dosagem/medição) que transportam, comprimem, fundem e homogeneizam o polímero dentro do cilindro. Para o PVC, extrusoras de dupla-rosca (roscas paralelas ou cônicas, geralmente contra rotantes) são frequentemente preferidas em relação às mono-roscas, devido à sua capacidade superior de mistura, cisalhamento controlado (minimiza degradação térmica do PVC) e degasagem (remoção de gases e umidade) (MANRICH, 2021).
- **Matriz (ou cabeçote):** Bocal moldado estrategicamente posicionado na saída do cilindro que confere o formato final ao produto extrudado. Para tubos, utilizam-se matrizes anulares, que formam o perfil circular oco. O design da matriz é crítico para garantir um fluxo uniforme do polímero e dimensões precisas do produto.
- **Carcaça:** Estrutura robusta que oferece suporte mecânico e alinhamento para todos os componentes da extrusora.
- **Painel de comando e controle:** Sistema eletrônico que permite o monitoramento e ajuste preciso de parâmetros críticos como temperatura nas diversas zonas, velocidade da rosca, pressão no cabeçote e velocidade de puxamento, garantindo a repetibilidade e a qualidade do processo.

- **Resistências de aquecimento:** Elementos elétricos externos que fornecem o calor inicial e mantêm as zonas do cilindro e da matriz nas temperaturas ideais de processamento do polímero.
- **Ventiladores de resfriamento:** Atuam em conjunto com as resistências, controlando a temperatura do cilindro. Eles dissipam o excesso de calor gerado por cisalhamento, evitando o superaquecimento em zonas específicas e a degradação do polímero.
- **Bomba de vácuo (Sistema de degasagem):** Utilizada em muitas extrusoras de PVC, especialmente em dupla-rosca. Aplica vácuo em uma zona específica do cilindro para remover voláteis como umidade, monômeros residuais e subprodutos gasosos da degradação, como HCl do polímero fundido, o que melhora significativamente a qualidade do produto final, reduzindo bolhas e defeitos.

No processamento de PVC, especialmente o não plastificado (rígido), a extrusora de rosca dupla ilustrada na Figura 5 é o equipamento predominante devido à sensibilidade térmica e alta viscosidade do material. Diferentemente das extrusoras monorrosca, os modelos de rosca dupla oferecem um controle de processo mais rigoroso e uma mistura mais eficiente a temperaturas mais baixas, minimizando o risco de degradação do polímero (RODOLFO JR. *et al.*, 2006).

Figura 5 - Representação esquemática de uma extrusora



Fonte: HASELHUHN. *et al.*, 2021.

Para a extrusão de perfis, forros e tubos de PVC, as extrusoras de rosca dupla cônicas e contra rotantes são as mais utilizadas. Nesta configuração, os filetes das roscas se interpenetram

e giram em sentidos opostos, promovendo um transporte forçado do material, similar a uma bomba de deslocamento positivo. Essa ação mecânica gera um alto cisalhamento que é fundamental para a plastificação (fusão) do composto de PVC em pó (*dry-blend*), garantindo uma excelente homogeneização dos aditivos e uma massa fundida de qualidade, com baixo tempo de residência e sob estrito controle de temperatura, características essenciais para se obter um produto final com as propriedades desejadas (CANEVAROLO JR., 2006).

3.5.2 Propriedades Reológicas e Térmicas do Composto de PVC

O processamento do PVC por extrusão exige um controle rigoroso de variáveis que são diretamente influenciadas pelas características intrínsecas do polímero e por sua formulação.

A alta viscosidade no estado fundido é uma das principais características do PVC rígido (PVC-U). Devido às fortes interações intermoleculares (dipolo-dipolo) e à ausência de plastificantes, o material exige um elevado aporte de energia mecânica para ser processado. Isso se traduz em maior torque e pressão na extrusora para garantir a plastificação completa e o fluxo adequado através da matriz (MANRICH, 2021). Em contrapartida, o PVC flexível, aditivado com plastificantes, exibe uma viscosidade significativamente menor, o que facilita seu escoamento e reduz o esforço mecânico demandado pelo equipamento (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023).

Adicionalmente, o PVC é um polímero termicamente sensível. Sua janela de processamento é relativamente estreita (tipicamente entre 120°C e 220°C), pois temperaturas elevadas podem iniciar um processo de degradação com a liberação de ácido clorídrico (HCl). Essa reação não apenas compromete as propriedades do polímero, causando perda de resistência e escurecimento, mas também gera um subproduto altamente corrosivo para os componentes metálicos da extrusora (MANRICH, 2021). Portanto, o uso de estabilizantes térmicos na formulação é indispensável, e o controle preciso do perfil de temperatura e do tempo de residência do material no equipamento é crucial para assegurar a qualidade do produto e a integridade da máquina (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023).

O sucesso do processo também depende de fatores operacionais, como a forma de alimentação do material e a proteção do equipamento.

- **Forma de Alimentação:** O composto de PVC pode ser alimentado como um *dry-blend* (mistura seca em pó, que pode conter *masterbatches*) ou como um composto granulado. O *dry-blend* exige que a extrusora transfira uma grande quantidade de energia de

cisalhamento para promover a fusão e a homogeneização da massa. Já o composto granulado, por possuir uma pré-história térmica e mecânica de um processo anterior, demanda menor trabalho da extrusora para atingir o estado fundido e ser conformado na matriz (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023).

- **Proteção Contra Corrosão:** Em virtude do risco de liberação de HCl, a proteção das superfícies metálicas de roscas, cilindros e matrizes é uma medida preventiva essencial. Tratamentos superficiais, como a cromação, ou a fabricação de componentes em aços de alta liga resistentes à corrosão são práticas recomendadas para prolongar a vida útil do equipamento e evitar a contaminação do produto (MANRICH, 2021).

Após a passagem pela matriz, o processo de fabricação de tubos de PVC continua com etapas de pós-conformação, que são determinantes para as dimensões e propriedades do produto final.

- **Calibração e Resfriamento:** O perfil extrudado entra em um calibrador a vácuo, que o conforma e estabiliza suas dimensões externas. Imediatamente após, o tubo passa por tanques de resfriamento (geralmente com água em *spray* ou por imersão), onde ele se solidifica. A taxa de resfriamento controlada é fundamental para evitar tensões internas e garantir a microestrutura adequada (MASCIA, 2004).
- **Puxamento e Corte:** Um sistema de puxador com velocidade constante traciona o tubo de forma contínua, sendo este o principal controle da espessura da parede. Ao final da linha, serras automáticas cortam o tubo nos comprimentos especificados, podendo seguir para etapas adicionais como a formação de bolsas de encaixe.

3.6 Tratamento de resíduos de PVC

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a gestão de resíduos sólidos tem impulsionado a busca por métodos eficazes de tratamento e revalorização de materiais poliméricos, incluindo o Policloreto de Vinila (PVC). O processo de reciclagem de produtos à base de PVC pode ocorrer por meio de três abordagens distintas, classificadas de acordo com a origem do material e o método de processamento empregado:

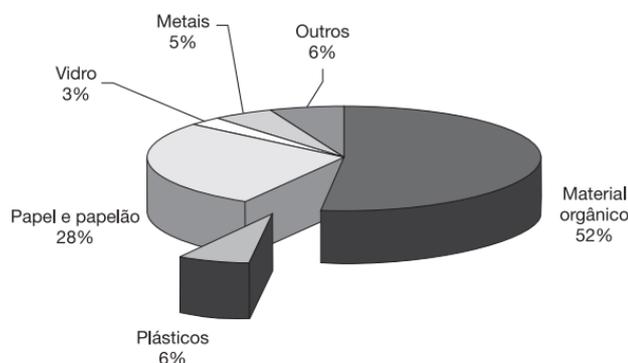
- **Reciclagem Mecânica:** Consiste na combinação de um ou mais processos operacionais cujo objetivo é reprocessar o material polimérico descartado, transformando-o em matéria-prima secundária (reciclado) adequada para a fabricação de novos produtos. Esta é a forma mais comum de reciclagem de plásticos.

- **Reciclagem Primária:** Refere-se especificamente ao reprocessamento de resíduos industriais, como aparas e refugos, gerados no próprio processo de transformação do polímero. Caracteriza-se por materiais limpos e com composição conhecida.
- **Reciclagem Secundária:** Envolve o tratamento de materiais pós-consumo, ou seja, resíduos plásticos descartados pela sociedade e provenientes, por exemplo, do resíduo sólido urbano (RSU). Este tipo de reciclagem geralmente exige processos mais complexos devido à heterogeneidade e contaminação do material.

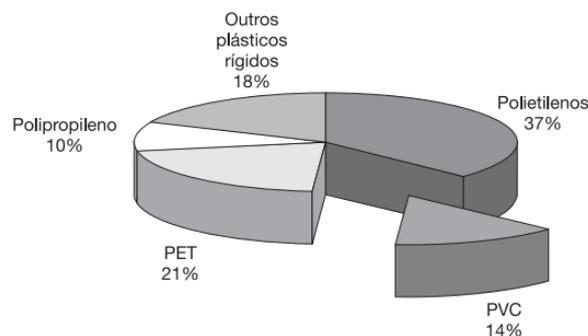
Com relação à composição do resíduo sólido urbano (RSU), dados da Organização Não-Governamental CEMPRE (Compromisso Empresarial para a Reciclagem) indicam que os plásticos representam aproximadamente 6% em peso do total desses resíduos (cemitérios e aterros). Dessa fração plástica, cerca de 14% correspondem ao PVC, o que equivale a aproximadamente 0,8% do total dos resíduos sólidos urbanos. Para fins de comparação, os materiais orgânicos (restos de alimentos, podas etc.) representam uma parcela significativamente maior, em torno de 52% em peso do RSU (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023). Essa análise da composição do RSU é fundamental para o planejamento de estratégias de coleta seletiva e reciclagem.

A Figura 6 ilustra a distribuição percentual dos principais materiais que compõem o resíduo sólido urbano, enquanto a Figura 7 detalha a distribuição média dos diferentes tipos de plásticos encontrados nesse resíduo, evidenciando a fração específica do PVC no Brasil.

Figura 6 - Distribuição dos materiais que compõem o resíduo sólido urbano



Fonte: WIEBECK, H; PIVA, A. M., 2000.

Figura 7 - Distribuição média dos plásticos encontrados no resíduo sólido urbano

Fonte: WIEBECK, H; PIVA, A. M., 2000.

Nos tópicos a seguir, os três tipos de reciclagem de PVC serão abordados com maior profundidade, explorando suas particularidades e desafios.

3.6.1 Reciclagem primária de PVC

O processo de reciclagem primária de PVC é considerado a forma mais direta e economicamente vantajosa de revalorização. É tipicamente realizado dentro das próprias instalações da indústria geradora das aparas, ou por empresas especializadas que prestam esse serviço. A principal vantagem reside na qualidade do material descartado: as aparas industriais são, em sua maioria, limpas e isentas de contaminantes difíceis de remover, como tintas, adesivos ou resíduos orgânicos.

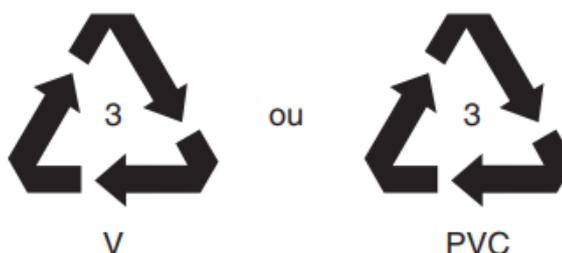
Dessa forma, o processo de reciclagem primária geralmente envolve etapas mais simples, como a moagem do material para redução de tamanho e, eventualmente, uma extrusão com filtragem para remover pequenas impurezas residuais. O material obtido (geralmente em forma de granulado ou pó moído) está, então, pronto para ser reintroduzido no processo de fabricação de novos produtos. Além disso, as aparas de reciclagem primária possuem uma composição química bem definida, com pouca variação em relação à sua origem, o que simplifica o controle de qualidade e a formulação do composto reciclado (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023).

Em contraste, a reciclagem secundária (pós-consumo) é um processo consideravelmente mais complexo, exigindo etapas adicionais de triagem, lavagem e secagem para eliminação dos diversos contaminantes provenientes do resíduo sólido urbano, além de moagem, extrusão/filtração e granulação (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023). A formulação do PVC reciclado,

especialmente o secundário, frequentemente necessita de correção antes da etapa de extrusão, por meio da incorporação de plastificantes (para produtos flexíveis), ou da complementação de teores de estabilizantes térmicos e lubrificantes para garantir a estabilidade do material durante o reprocessamento e o desempenho do produto final (MANRICH, 2021).

Para facilitar a identificação e a correta segregação dos produtos de PVC para reciclagem, utiliza-se uma codificação específica, padronizada mundialmente e, no Brasil, especificada pela norma ABNT NBR 13230: Símbolo de identificação de materiais plásticos. O símbolo universalmente reconhecido para produtos de PVC é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Identificação dos produtos de PVC pela ABNT NBR 13230



Fonte: ANTONIO JR. *et al.*, 2023.

3.6.2 Reciclagem química de PVC

A reciclagem química de PVC representa um conjunto de processos tecnológicos avançados que visam converter o resíduo polimérico em suas matérias-primas básicas ou em outros produtos químicos de valor, em vez de simplesmente reprocessá-lo plasticamente. Esses processos são particularmente relevantes para resíduos de PVC que seriam de difícil reciclagem mecânica devido à contaminação ou degradação.

De acordo com ANTÔNIO JR. *et al.* (2023), entre os processos já disponíveis ou em desenvolvimento para a reciclagem química do PVC, destacam-se as seguintes rotas e seus produtos principais:

- **Hidrogenação do resíduo:** Processo que, sob condições específicas, gera produtos como ácido clorídrico (HCl).
- **Pirólise:** Decomposição térmica do PVC na ausência ou com pouca presença de oxigênio, resultando na formação de ácido clorídrico (HCl), carvão coque (carbono sólido) e uma mistura de hidrocarbonetos líquidos e gasosos.

- **Gaseificação:** Processo de conversão do PVC em uma mistura de gases, predominantemente ácido clorídrico (HCl), monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), que podem ser utilizados como combustível ou matéria-prima química.
- **Incineração:** Embora seja primariamente um processo de recuperação energética, a incineração completa do PVC também gera subprodutos gasosos, como ácido clorídrico (HCl), dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O). O tratamento do HCl gasoso é crucial para evitar impactos ambientais (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023).

Além desses métodos consolidados ou em fase de pesquisa e desenvolvimento, há processos inovadores que buscam otimizar a conversão de resíduos de PVC em matérias-primas básicas, reduzindo a complexidade do tratamento de subprodutos clorados. Dentre essas alternativas, destacam-se:

- **Gaseificação em banho metálico:** Visa a produção de ácido clorídrico (HCl) e outros gases sintéticos.
- **Gaseificação em banho de escória:** Similar ao processo anterior, utilizando um banho de escória para facilitar a reação e a recuperação do HCl.
- **Gaseificação em leito fluidizado com combustão subsequente:** Um método que combina a gaseificação do PVC com a combustão dos produtos gasosos, focando na recuperação de energia e na gestão do HCl.
- **Pirólise com subsequente combustão:** Combina a decomposição térmica com a queima dos produtos pirolíticos.
- **Pirólise com subsequente extração de metais:** Focado na recuperação de metais presentes em resíduos de PVC mistos, além da decomposição do polímero.

Essas rotas químicas visam não apenas a redução do volume de resíduos, mas também a criação de um ciclo de valor agregado, transformando um passivo ambiental em insumos para a indústria petroquímica.

3.6.3 Reciclagem energética de PVC

A reciclagem energética, também conhecida como recuperação energética, é um processo de tratamento de resíduos que consiste na compactação dos materiais descartados e sua subsequente incineração controlada. O principal objetivo é converter a energia química contida nos resíduos em energia calorífica (vapor) ou eletricidade. Este método é

frequentemente aplicado a resíduos plásticos que não são economicamente viáveis para a reciclagem mecânica ou química (MANRICH, 2021).

No caso do PVC, a incineração gera gases, incluindo o ácido clorídrico (HCl), que deve ser rigorosamente tratado por meio de sistemas de controle de emissões (como lavadores de gases) para neutralizar os componentes ácidos e reduzir o impacto sobre a atmosfera. As cinzas resultantes do processo de incineração, que contêm minerais inertes, são posteriormente dispostas em aterros sanitários de forma controlada (ANTÔNIO JR. *et al.*, 2023). A reciclagem energética é uma opção importante para a gestão de resíduos, contribuindo para a redução da dependência de aterros sanitários e para a geração de energia, embora com a necessidade de rigorosos controles ambientais.

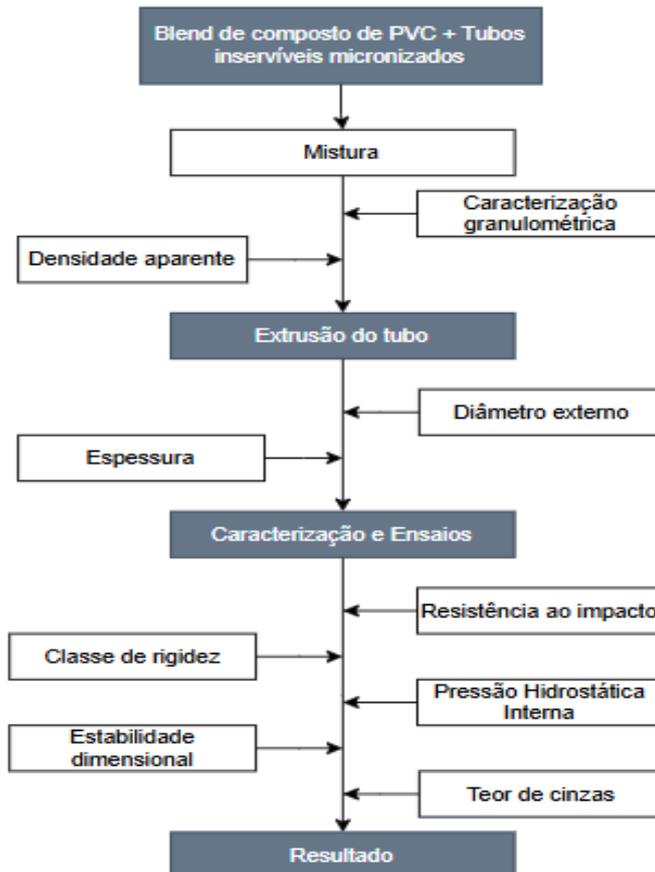
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Visão geral

O presente estudo foi desenvolvido em colaboração com a Indústria Amanco Wavin – Unidade Ribeirão das Neves (MG), uma empresa líder no setor de fabricação de tubos de PVC. Esta parceria estratégica foi fundamental para o acesso aos insumos necessários e ao processo produtivo real da indústria, garantindo que a pesquisa fosse conduzida em condições representativas e com materiais genuínos. A colaboração permitiu a obtenção de dados e resultados com alta aplicabilidade industrial.

Os procedimentos experimentais para a realização deste trabalho seguiram uma sequência lógica de etapas, desde a preparação dos materiais até a caracterização dos produtos finais. O fluxograma detalhado dessas etapas é apresentado na Figura 9, fornecendo uma visão geral da metodologia aplicada.

Figura 9 - Fluxograma do procedimento experimental



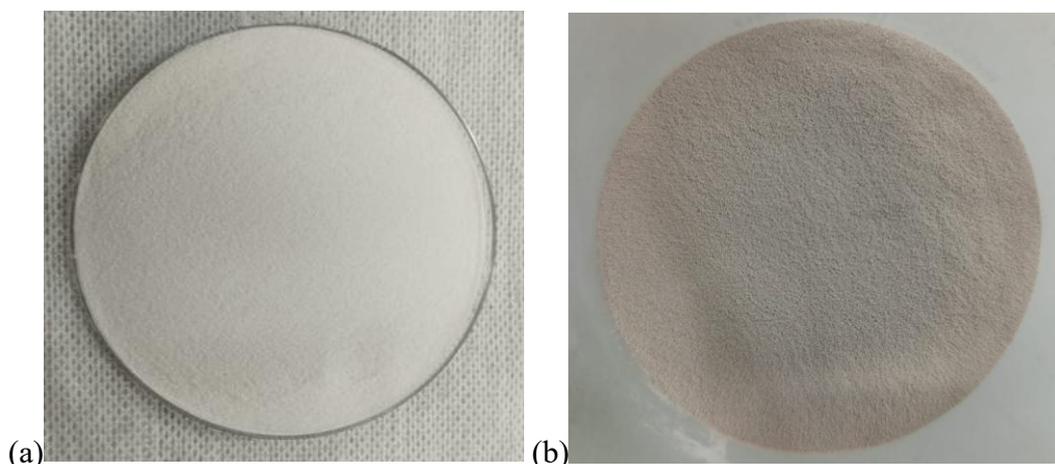
Fonte: Próprio autor, 2025.

4.2 Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram selecionados para representar tanto a matéria-prima virgem quanto os resíduos gerados no processo de fabricação de tubos de PVC na Amanco Wavin.

O composto de PVC em pó branco para tubos da linha esgoto e marrom para linha soldável demonstrados na Figura 10, empregado como matéria-prima virgem para a fabricação dos tubos de diversos diâmetros, consiste em um *blend* otimizado. Sua formulação básica compreende uma resina de PVC (Policloreto de Vinila) como polímero base, carbonato de cálcio (CaCO_3) atuando como carga e, estabilizantes essenciais para conferir estabilidade térmica durante o processamento por extrusão e garantir a durabilidade do produto final (MANRICH, 2021). A escolha desses componentes visa otimizar as propriedades mecânicas, o custo e a processabilidade do material.

Figura 10 - Composto com base em PVC

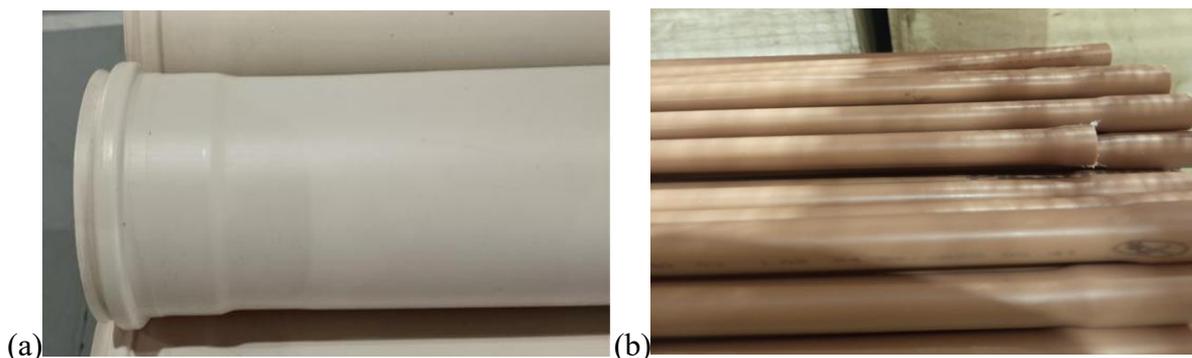


(a) Composto Branco utilizado para produção de Tubos da linha Esgoto.

(b) Composto Marrom utilizado para produção de tubos da linha Soldável.

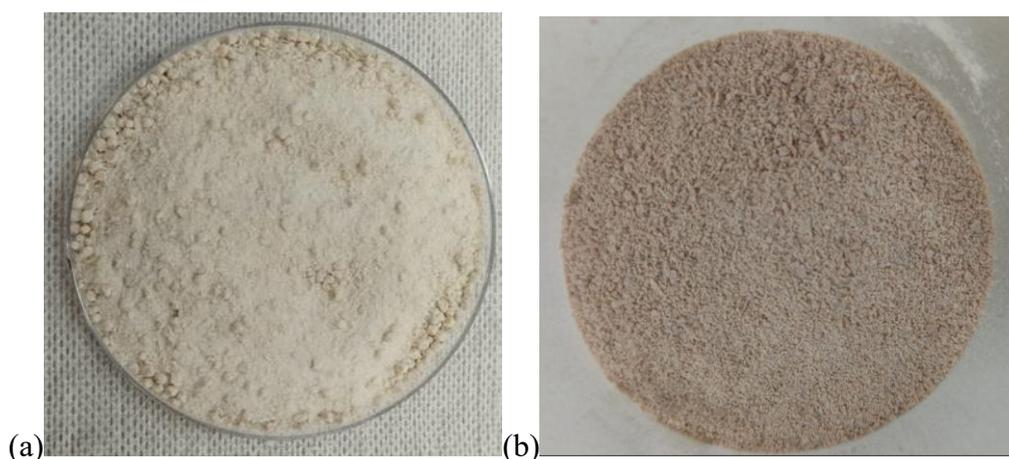
Fonte: Próprio autor, 2025.

Os tubos de PVC representados na Figura 11 que serão os corpos de prova utilizados nas caracterizações foram obtidos por meio do processo de extrusão.

Figura 11 - Tubo de PVC extrudado

(a) Tubo Esgoto 100mm Diâmetro nominal (DN). (b) Tubo Soldável 25mm Diâmetro externo (DE).
Fonte: Próprio autor, 2025.

O material inservível micronizado (MC) demonstrado na Figura 12 representa um resíduo valioso do processo produtivo. Este material é proveniente de tubos que, por apresentarem defeitos físicos ou visuais tais como variações dimensionais fora da tolerância, bolhas, manchas ou marcas de arrasto, são considerados não conformes e, portanto, impróprios para comercialização, de acordo com os rigorosos padrões de qualidade da empresa.

Figura 12 - Material inservível Micronizado (MC)

(a) Tubo Esgoto 100mm DN inservível micronizado.
(b) Tubo Soldável 25mm DE inservível micronizado.

Fonte: Próprio autor, 2025.

Esse material é inicialmente moído e, em seguida, submetido à micronização em um micronizador industrial (Figura 13), equipamento projetado para reduzir o tamanho de partículas sólidas, transformando-as em micropartículas. O processo de micronização ocorre por meio do atrito entre dois discos metálicos, geralmente fabricados em aço temperado ou aço inoxidável, posicionados com um espaçamento de 0,8 mm. Após essa etapa, o material passa

por uma peneira, que realiza a separação dos grãos conforme a granulometria desejada (AGMAC, 2025).

Figura 13 - Micronizador



Fonte: Próprio autor, 2025.

Uma forma simples de distinção visual entre o material inservível micronizado e o composto virgem é a sua granulometria: o material micronizado, por ter sido moído em partículas finas de aproximadamente 0,8mm à 2,5mm, apresenta uma área de superfície de contato significativamente menor em comparação com o pó do composto virgem que possui partículas de aproximadamente 0,1mm à 0,2mm (observar Figuras 10 e 12, respectivamente). Essa diferença granulométrica é um fator crítico que pode influenciar diretamente a homogeneidade da mistura com a matéria-prima virgem e, conseqüentemente, a qualidade da dispersão e as propriedades finais do produto durante o processo de extrusão.

4.3 Métodos

4.3.1 Incorporação do material inservível micronizado em diferentes proporções no processo de extrusão de novos tubos

A metodologia experimental foi seguida para investigar, de forma abrangente, a viabilidade técnica e as conseqüências da reintrodução de resíduos de tubos de PVC no ciclo produtivo. O foco principal reside na incorporação do material inservível micronizado em diferentes proporções no processo de extrusão de novos tubos. O objetivo central é verificar se os tubos fabricados com a adição desse material reciclado mantêm as propriedades físicas,

químicas e visuais desejadas, buscando identificar as dosagens ideais que garantam que o produto final seja comparável ou equivalente aos tubos produzidos integralmente com matéria-prima virgem, em conformidade com as normas ABNT NBR 5688:2021, ABNT NBR 5648:2024 e os critérios internos de qualidade da empresa.

Para que sejam feitos os testes, foram desenvolvidas misturas (*blends*) de composto de PVC virgem com o material inservível micronizado em diversas proporções de mistura Composto virgem/ Material Micronizado (MC), conforme detalhado na Tabela 3. Essa variação de dosagens foi estrategicamente definida para que sejam testadas diferentes composições de material branco e marrom, permitindo a identificação de limites de incorporação e a compreensão de seus impactos nas propriedades do produto final.

Tabela 3 - Proporções de mistura entre composto de PVC virgem e material inservível micronizado

Composto de PVC Virgem (%)	Material inservível micronizado (%)
80	20
50	50
30	70
0	100

Fonte: Próprio autor, 2025.

Para preparação e homogeneização dos *blends* nas proporções especificadas foi utilizado um misturador Plasmec industrial demonstrado na Figura 14, onde a proporção desejada de material virgem e MC é setada no painel demonstrado na Figura 15, foram produzidos corpos de prova por extrusão, no formato de Tubos Esgoto SN DN100 e Tubos Soldáveis DE25 onde o processo de extrusão é apresentado na Figura 16.

Figura 14 - Misturador Plasmec



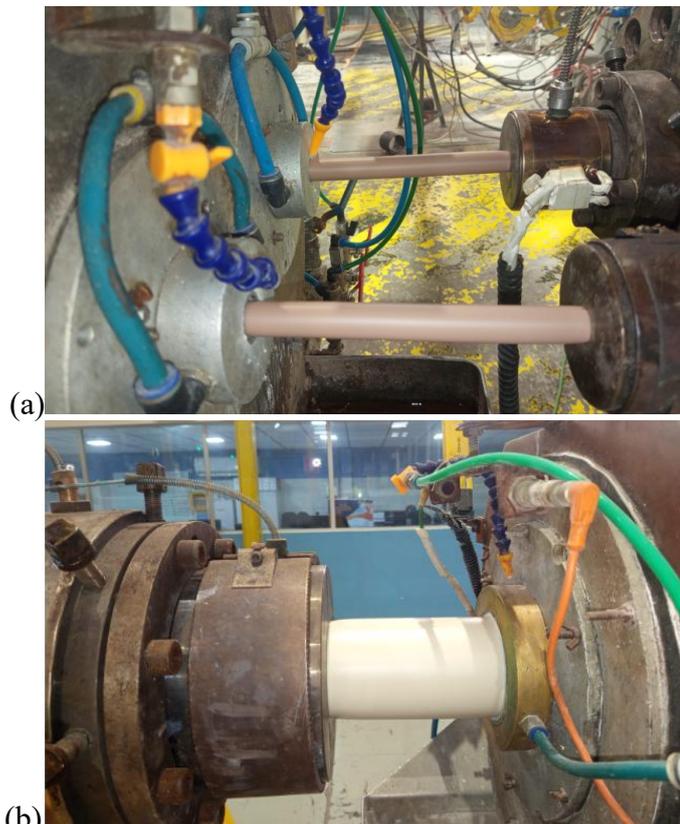
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 15 - Painel para determinação de dosagem de material



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 16 - Tubos para testes sendo extrudados



(a) Extrusora KRAUSS-MAFFEI: KMD 75 produzindo Tubo Soldável DE25.

(b) Extrusora BATTENFELD: BEX-90 produzindo tubo Esgoto SN DN100.

Fonte: Próprio autor, 2025.

É crucial ressaltar que as condições de processamento foram mantidas consistentes em todas as extrusões para minimizar variáveis externas e isolar o efeito da proporção de material reciclado. A combinação desses ensaios e análises proporciona uma compreensão abrangente da viabilidade técnica da incorporação dos resíduos micronizados.

4.4 Caracterizações e Ensaio

4.4.1 Caracterização granulométrica

A caracterização granulométrica é um ensaio fundamental na avaliação de materiais particulados, sendo crucial para a compreensão e controle das propriedades de compostos poliméricos. No contexto deste estudo, a comparação da granulometria entre o composto de PVC virgem e o material inservível micronizado é de suma importância. A distribuição do tamanho das partículas afeta diretamente a homogeneidade da mistura, o comportamento reológico durante o processamento por extrusão e, conseqüentemente, as propriedades físico-mecânicas do produto, como resistência mecânica, compactação e acabamento superficial (POWERS, 2012).

Para a determinação da distribuição granulométrica dos materiais, empregou-se a técnica de análise granulométrica por peneiramento, realizada por agitação no agitador eletromagnético B-AGIT da marca TECNAL demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Agitador eletromagnético



Fonte: Próprio autor, 2025.

Este método clássico e amplamente utilizado consiste na separação das partículas por tamanho através de uma série de peneiras com aberturas de malha padronizadas e decrescentes, empilhadas verticalmente. No presente trabalho, foram utilizadas peneiras com as seguintes aberturas de malha: 0,425 mm, 0,300 mm, 0,240 mm, 0,180 mm e 0,125 mm, além do coletor (fundo falso).

O material é depositado na peneira superior, e o conjunto é submetido a um movimento de agitação mecânica ou vibratória por 25 minutos. Durante a agitação, as partículas de menor dimensão passam pelas aberturas da malha, sendo retidas na peneira subsequente com abertura menor ou no fundo, enquanto as maiores ficam retidas na peneira correspondente ao seu diâmetro. Ao final do processo, a massa de material retida em cada peneira é determinada, permitindo o cálculo da porcentagem em massa de cada fração granulométrica e a construção da curva de distribuição granulométrica cumulativa (ABNT NBR 6502, 1995).

4.4.2 Densidade aparente

A densidade aparente é definida como a razão entre a massa de um material sólido particulado e o volume que ele ocupa em condições livres de compactação. Este parâmetro é de grande relevância para o controle de qualidade de resinas e compostos de PVC, pois reflete características físicas como porosidade, distribuição granulométrica, formato das partículas e o valor K da resina, relacionado à viscosidade e ao desempenho no processamento. O valor K é um índice empírico que representa a viscosidade intrínseca de uma solução de PVC, sendo diretamente proporcional ao peso molecular da resina. Quanto maior o valor K, maior o peso molecular, o que geralmente implica em maior resistência mecânica e maior tempo de plastificação no processamento térmico. Resinas com valor K entre 57 e 70 são comumente utilizadas na indústria de tubos rígidos, devido ao equilíbrio entre processabilidade e propriedades finais.

A conformidade da densidade aparente é um critério fundamental para avaliação de compostos de PVC utilizados em processos industriais, especialmente em aplicações que exigem controle rigoroso de propriedades físico-mecânicas. A metodologia aplicada neste trabalho segue os procedimentos descritos na norma ASTM D1895-69. O equipamento utilizado é composto por um funil de aço inoxidável com dimensões padronizadas, um frasco receptor com volume conhecido (100 cm³), suporte metálico com aro de fixação, espátula, pincel para limpeza e balança analítica com precisão de 0,001 g.

O ensaio foi conduzido utilizando o equipamento apresentado na Figura 18. Para a realização do ensaio, seguiu-se um procedimento meticuloso que começou com a limpeza prévia do funil e do frasco receptor, assegurando que nenhum resíduo contaminasse a amostra. Em seguida, verificou-se a altura entre o bico do funil e a borda do frasco, ajustando-a para 3,8 cm, conforme a especificação normativa. Após a pesagem do frasco receptor vazio e a tara da

balança, o fundo do funil foi vedado para a adição da amostra até o seu completo preenchimento. Com a remoção da vedação, o material escoou livremente, sendo realizada uma verificação visual para garantir o posicionamento central do fluxo no frasco. Por fim, a superfície da amostra foi nivelada com uma espátula metálica, removendo-se o excesso quando necessário, antes da pesagem final do frasco contendo a amostra.

Figura 18 - Equipamento para teste de densidade aparente



Fonte: Próprio autor, 2025.

A densidade aparente (DA) foi calculada pela EQUAÇÃO 1:

$$DA = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Em que:

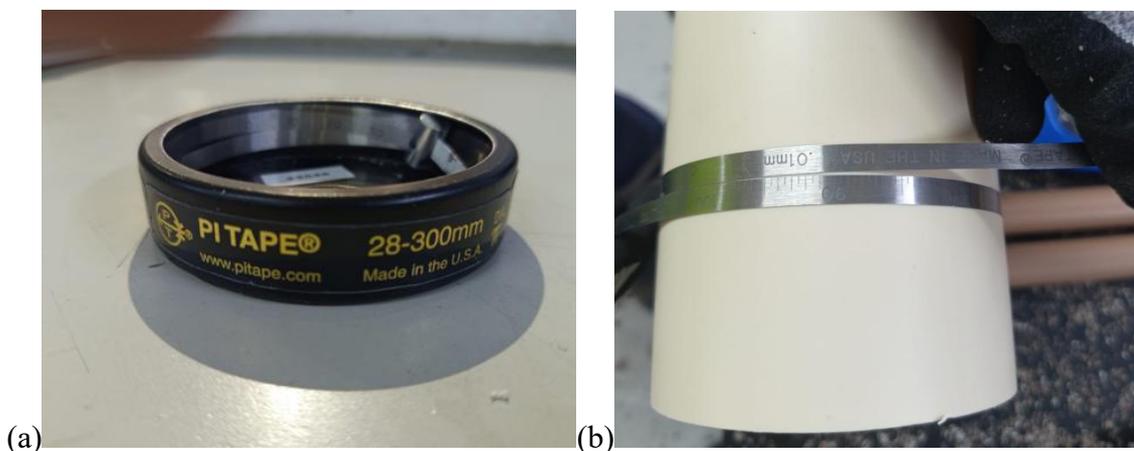
- M = massa da amostra, em gramas (g);
- V = volume do frasco receptor, igual a 100 cm³.

Os resultados foram expressos em g/cm³, com três casas decimais, conforme recomendado pela instrução técnica interna.

4.4.3 Diâmetro dos tubos

A medição do diâmetro externo médio foi realizada com precisão utilizando uma fita circométrica (circometro), conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Circometro



(a) Circometro PITAE 28-300mm. (b) Medição de um tubo DN 100mm utilizando o circometro.

Fonte: Próprio autor, 2025.

Este instrumento é particularmente adequado para a medição de diâmetros de peças cilíndricas, pois converte a medida da circunferência diretamente em diâmetro, minimizando erros decorrentes de pequenas ovalizações que podem ocorrer em tubos (MACHADO; BOTOSSO, 2017). A precisão na medição é vital, pois desvios fora da faixa especificada pela NBR 5688 podem levar a problemas de montagem, perdas de carga no sistema, ou mesmo falhas estruturais.

Os corpos de prova, produzidos com as diferentes dosagens de material inservível micronizado (MC) para avaliar o impacto do material reciclado nas propriedades finais do tubo, foram submetidos a essas medições dimensionais.

4.4.4 Medida de espessura

Para a avaliação da conformidade dimensional dos tubos produzidos, as medições de espessura foram realizadas em 8 pontos equidistantes ao longo da circunferência do tubo, utilizando um micrômetro digital de alta precisão e é feita uma média desses valores para se

obter o resultado. Este procedimento visa não apenas verificar a espessura média, mas também identificar quaisquer variações ou excentricidades na parede do tubo, que podem surgir devido a instabilidades no processo de extrusão ou características heterogêneas do material. A Figura 20 ilustra o equipamento utilizado para essa medição.

Figura 20 - Micrômetro digital



Fonte: Próprio autor, 2025.

4.4.5 Teste de resistência ao impacto

Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos com comprimento mínimo de 200 mm. Sobre esses corpos de prova foram traçadas linhas equidistantes entre si, de forma simétrica, conforme o número de pontos de impacto especificados pela norma. Antes da aplicação dos impactos, as amostras foram submetidas a um condicionamento térmico por 15 minutos em banho termo estabilizado, mantido à temperatura de $(0 \pm 1) ^\circ\text{C}$, conforme recomenda a norma ABNT NBR 5688:2021, que trata dos requisitos para tubos de PVC rígido para instalações prediais de água fria.

Após o condicionamento, as amostras foram retiradas do banho, uma por vez, e submetidas a seis impactos consecutivos. Cada impacto foi promovido pela queda livre de um percussor de massa $0,800 \pm 0,005$ kg, a partir de uma altura de 1200 mm, incidindo verticalmente sobre os pontos previamente demarcados, o equipamento utilizado é demonstrado na Figura 21. O objetivo é verificar se ocorrem fraturas, trincas ou qualquer forma de falha visível no material.

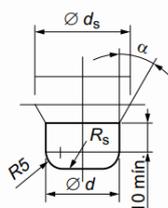
Figura 21 – Equipamento para teste de impacto



Fonte: Próprio autor, 2025.

Um detalhe fundamental para a padronização e eficácia deste ensaio é o tipo de ponteira utilizada no percussor. As normas ABNT, como a NBR 5688 e a NBR 5648, especificam que a ponteira deve ser semiesférica, com um diâmetro de 25,0 mm demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Ponteira utilizada para teste de impacto



**Tipo d25 (para percussores de massa
0,5 Kg e 0,8 Kg)**

Fonte: NBR ABNT 5688, 2018.

Esse formato da ponteira é crucial para simular um impacto mais distribuído e evitar que a falha ocorra devido a concentrações de tensão pontuais, permitindo uma avaliação mais precisa da tenacidade do material. O objetivo final é verificar se ocorrem fraturas, trincas ou qualquer forma de falha visível no material, garantindo sua robustez em condições de manuseio e serviço.

4.4.6 Determinação da classe de rigidez

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubo com comprimento de (150 ± 5) mm, conforme especificado pela norma de ensaio de rigidez anular, referenciada na ABNT NBR 5688:2021. A medição do comprimento (L) foi realizada em quatro pontos equidistantes com o auxílio de um paquímetro digital com resolução centesimal, e a média aritmética foi utilizada como valor representativo. A espessura também foi previamente medida, e os pontos com menor espessura foram identificados com marcações para garantir a correta orientação durante o ensaio. Antes do teste, os corpos de prova foram condicionados em ambiente com temperatura controlada a $(20 \pm 3/-2)$ °C por um período mínimo de 5 minutos assegurando que todos estivessem em equilíbrio térmico.

Durante o ensaio de compressão, o corpo de prova foi posicionado entre os pratos da máquina universal EMIC apresentada na Figura 23, de forma que o ponto de menor espessura estivesse a 90° em relação aos pratos de compressão para comprimir o ponto mais frágil do tubo. O posicionamento foi realizado com força inferior a 5 N para evitar pré-deformações. A carga foi então aplicada de forma controlada até atingir a deflexão necessária para a avaliação da rigidez. Segundo a NBR 5688, os tubos devem apresentar uma rigidez anular mínima de 1500 Pa, correspondente à classe de rigidez SN 1500, para serem considerados conformes.

Figura 23 – Equipamento para teste de classe de rigidez



Fonte: Próprio autor, 2025.

4.4.7 Determinação da pressão hidrostática interna (PHI)

Para o ensaio, devem ser testadas três amostras representativas de cada formulação, conforme descrito na NBR 5683. Os corpos de prova devem ser previamente preparados com dimensões de aproximadamente 200 mm comprimento, vedados em ambas as extremidades e conectados ao equipamento de pressurização com água, de modo a garantir a estanqueidade do sistema durante todo o ensaio.

4.4.8 Determinação da estabilidade dimensional

A metodologia aplicada segue os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 5687 (ABNT, 2017).

De acordo com a norma, os corpos de prova, com comprimento previamente determinado, devem ser submetidos a uma temperatura de $(140 \pm 4)^\circ\text{C}$ por um período especificado em estufa ventilada. Após o resfriamento, é medida a variação no comprimento do tubo em relação à sua dimensão inicial, sendo o resultado expresso em percentual de contração ou expansão.

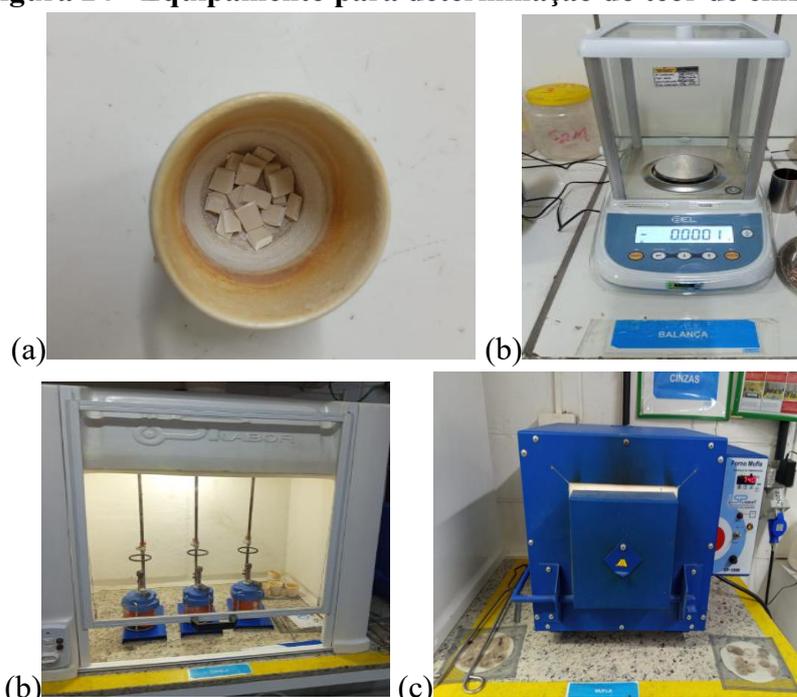
4.4.9 Ensaio de teor de cinzas

O método empregado para este ensaio baseia-se na calcinação da amostra em mufla a uma temperatura de $(1050 \pm 50)^\circ\text{C}$ até que seja atingida a massa constante do resíduo inorgânico, conforme especificado pela norma ABNT NBR NM 84:2005 (ABNT, 2005). Para determinar o teor de cinzas, a metodologia seguiu etapas rigorosas para garantir a precisão dos resultados. Primeiramente, para a amostragem, um segmento de tubo de aproximadamente 50 g foi retirado e cuidadosamente picado em pedaços de 3 a 5 mm, visando facilitar a combustão. Em seguida, as amostras picadas foram acondicionadas em cadinhos de porcelana previamente tarados e identificados para rastreabilidade. Antes da calcinação principal, os cadinhos passaram por uma pré-queima com bico de Bunsen, uma etapa controlada para volatilizar gradualmente a maior parte dos componentes orgânicos e evitar chamas excessivas na mufla.

Posteriormente, na etapa de calcinação em mufla, os cadinhos foram inseridos gradualmente, e a temperatura foi elevada para $(1050 \pm 50)^\circ\text{C}$, mantida por no mínimo 6 horas

ou até a completa incineração da matéria orgânica. Essa alta temperatura e tempo prolongado garantindo a oxidação total dos componentes orgânicos do PVC e aditivos combustíveis. Por fim, para o resfriamento e pesagem, os cadinhos foram removidos da mufla e resfriados em um dessecador, crucial para prevenir a reabsorção de umidade pelo resíduo inorgânico, o equipamento utilizado é demonstrado na Figura 24. As amostras resfriadas foram pesadas em balança analítica (0,0001 g), e o ciclo de aquecimento, resfriamento e pesagem foi repetido até que a diferença entre duas pesagens consecutivas fosse inferior a 0,005 g, confirmando a obtenção da massa constante do resíduo inorgânico (cinzas).

Figura 24 - Equipamento para determinação do teor de cinzas



(a) Cadinho com amostra de tubos picados. (b) Balança analítica para Pesagem. (c) Preparação da amostra para pré-queima com bico de Bunsen. (d) Mufla para calcinação da amostra a (1050 ± 50) °C.

Fonte: Próprio autor, 2025.

O cálculo do teor de cinzas, expresso em porcentagem, é realizado com base na massa final do resíduo inorgânico em relação à massa inicial da amostra. Os resultados desse ensaio fornecem dados essenciais para avaliar a homogeneidade das misturas com material reciclado e sua conformidade com as especificações da formulação.

A porcentagem de cinzas é obtida pela EQUAÇÃO 2.

$$\text{Teor de cinzas}(\%) = \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

- m_0 : massa inicial da amostra (g);
- m_1 : massa final de cinzas (g).

A média das três amostras, desde que com diferença inferior a 0,10%, estima o valor final do teor de cinzas da amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Granulometria do material

A Tabela 4 apresenta a distribuição granulométrica dos Blends de material feitos com proporções de composto de PVC virgem e material MC em diferentes dosagens antes de passar pelo processo de extrusão para fabricação dos corpos de prova demonstrando a distribuição do tamanho dos grãos.

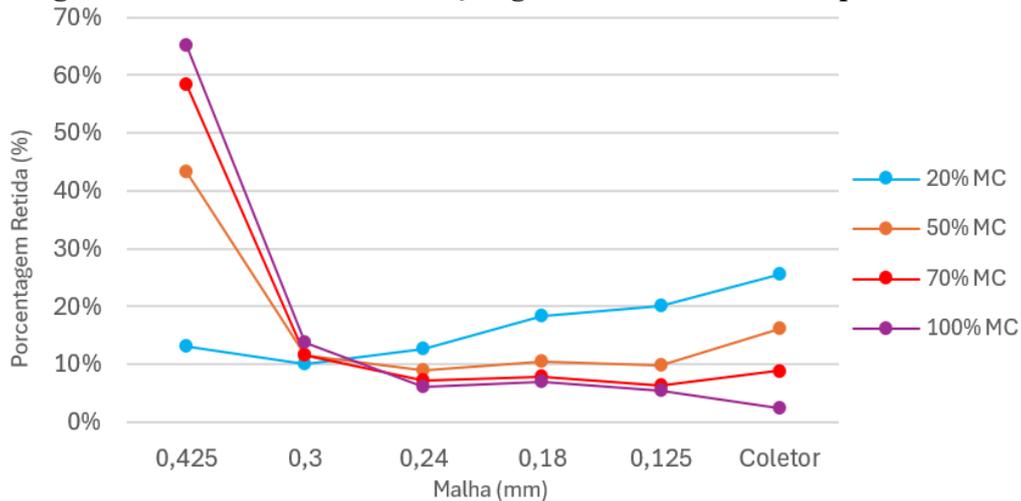
Tabela 4 - Distribuição granulométrica Blend de material

Composto	Malha - mm	20% MC	50%MC	70%MC	100%MC
Branco	0,425	13,15%	43,20%	58,35%	65,15%
	0,300	10,15%	11,55%	11,60%	13,82%
	0,240	12,70%	8,90%	7,15%	6,21%
	0,180	18,40%	10,50%	7,80%	6,95%
	0,125	20,10%	9,75%	6,25%	5,40%
	Coletor	25,50%	16,10%	8,85%	2,47%
Marrom	0,425	9,13%	25,33%	37,49%	46,18%
	0,300	14,31%	26,81%	29,17%	31,23%
	0,240	20,15%	18,52%	15,82%	13,57%
	0,180	21,88%	14,16%	8,63%	4,89%
	0,125	16,08%	9,74%	5,05%	2,11%
	Coletor	18,45%	5,44%	3,84%	2,02%

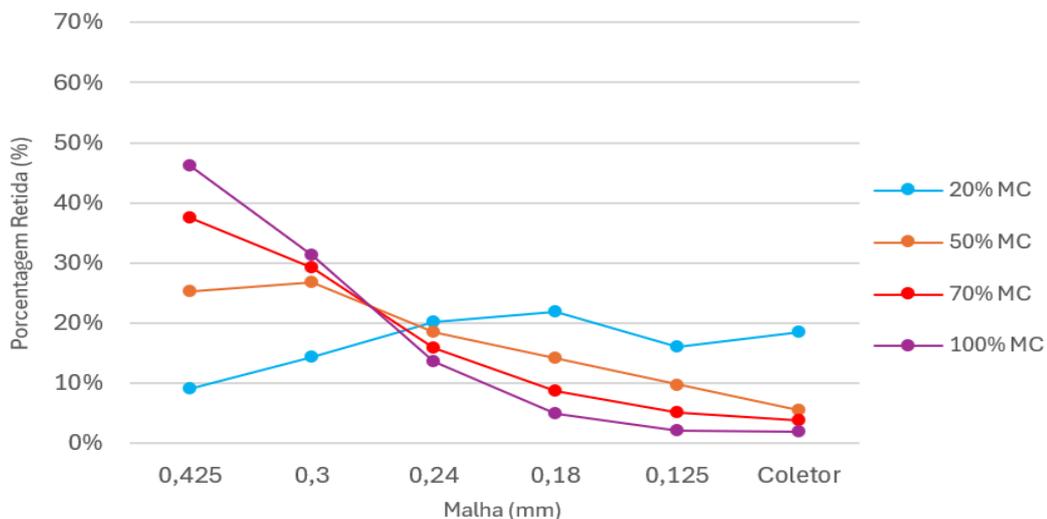
Fonte: Próprio autor, 2025.

Nota-se a predominância de partículas maiores no material em concentrações elevadas de MC, o que pode apresentar desafios consideráveis no processo de extrusão como variação brusca dos parâmetros de processo que dificultam o controle do processo produtivo. Partículas muito grandes podem não fundir completamente ou se homogeneizar de forma eficiente, levando a pontos de fragilidade ou heterogeneidade no produto final.

Ao comparar os dados granulométricos dos compostos Branco e Marrom, apresentados nos gráficos das Figuras 25 e 26, observam-se perfis de distribuição distintos.

Figura 25 - Gráfico de distribuição granulométrica do Composto Branco

Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 26 - Gráfico de distribuição granulométrica do Composto Marrom

Fonte: Próprio autor, 2025.

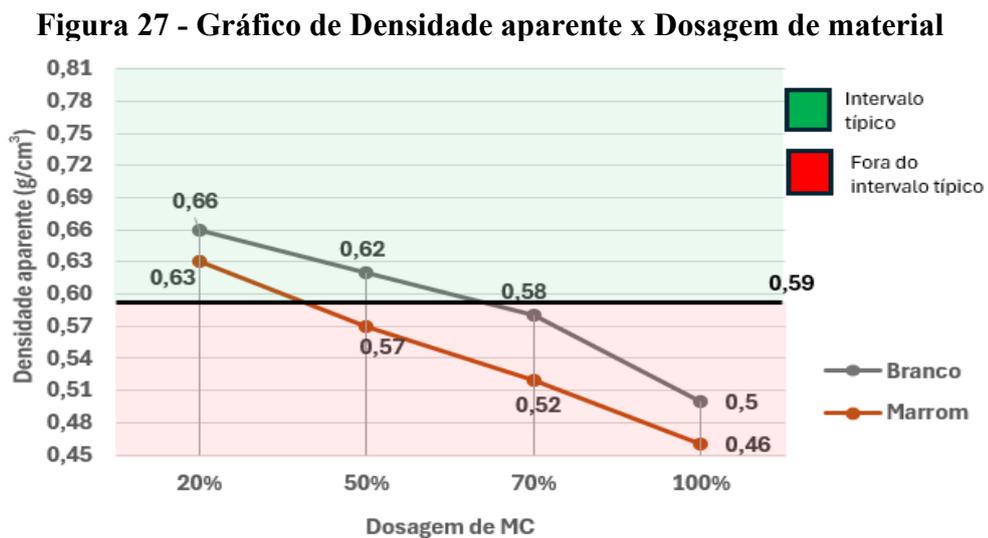
Ao comparar os dados granulométricos, o composto Branco apresenta-se consistentemente mais grosso, com um percentual retido na malha de 0,425 mm significativamente maior em todas as dosagens de MC. Curiosamente, em baixas concentrações de material reciclado (20% MC), o composto Branco também exibe uma maior concentração de partículas finas (25,50% no coletor) em comparação ao Marrom (18,45%), sugerindo que sua base virgem possui uma distribuição de tamanho de partícula mais ampla e heterogênea.

A matéria-prima virgem, que tipicamente possui granulometria na faixa de 0,1 mm a 0,2 mm, tem forte influência nas misturas com 20% MC. Nessa dosagem, ambos os compostos apresentam alta concentração de partículas nessa faixa (aproximadamente 38%), confirmando

o impacto da base virgem na distribuição granulométrica total. Contudo, os perfis distintos entre os compostos Branco e Marrom indicam que suas respectivas matérias-primas virgens possuem características granulométricas diferentes.

5.2 Densidade aparente

A Figura 27 apresenta a densidade aparente dos Blends de material feitos com proporções de composto de PVC virgem e material MC em diferentes dosagens antes de passar pelo processo de extrusão para fabricação dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Os valores típicos para compostos de PVC rígido são entre 0,59 e 0,82 g/cm³, a análise dos dados da Figura 27 revelam uma tendência onde a densidade aparente de ambos os compósitos diminui progressivamente com o aumento da dosagem de MC. Este comportamento é esperado e alinha-se aos princípios fundamentais de misturas físicas, nos quais a introdução de um componente de menor densidade resulta na redução da densidade global do sistema (CALLISTER, 2020). A eficácia do MC como agente de redução de massa o qualifica para aplicações em compósitos leves, um campo de grande interesse industrial para o desenvolvimento de produtos como painéis de baixo peso e componentes com menor carga estrutural (SILVA; COSTA, 2022).

Um ponto de interesse é a natureza não linear da redução de densidade. Observa-se que a queda nos valores de densidade se acentua em maiores concentrações de MC. Por exemplo,

no compósito Branco, a variação entre 70% e 100% de MC (uma queda de 0,08 g/cm³) é mais pronunciada que a variação entre 20% e 50% (queda de 0,04 g/cm³). Este fenômeno, que resulta em uma curva de característica convexa, é consistente com estudos sobre o empacotamento de partículas e a relação entre fração mássica e volumétrica em misturas heterogêneas (OLIVEIRA, 2021). À medida que o componente mais leve se torna dominante, seu impacto na densidade total é potencializado.

Além disso nota-se no gráfico da Figura 27 que somente as amostras com 20% e 50% de MC Branco e 20% de MC Marrom ficaram dentro do intervalo típico de densidade para compostos de PVC, porém isso não exclui a utilização das demais dosagens pois as normas NBR 5688 e NBR 5648 não exigem que a densidade aparente esteja dentro dos parâmetros típicos, porém é necessário avaliar os resultados dos demais ensaios para validação do material.

5.3 Diâmetro externo dos tubos

A conformidade dimensional é um requisito crítico para tubos de policloreto de vinila não plastificado (PVC-U), especialmente aqueles destinados a sistemas prediais, pois garante a interoperabilidade com conexões e a integridade hidráulica e mecânica da instalação. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 5688 (ABNT, 2021), estabelece os requisitos para tubos e conexões de PVC-U aplicáveis a sistemas prediais de água pluvial, esgoto sanitário e ventilação.

Para o propósito deste estudo, o tubo avaliado deve corresponder ao diâmetro nominal (DN) 100, que, de acordo com a referida norma (ABNT, 2021), deve apresentar um diâmetro externo médio variando entre 101,60 mm e 102,00 mm, e para tubos diâmetro externo (DE) 25 pode variar entre 25,00 mm e 25,20 mm. Essa tolerância dimensional é crucial para assegurar a vedação adequada e a facilidade de acoplamento com outras peças do sistema.

A análise dos diâmetros das amostras, apresentada na Tabela 5, permite avaliar a influência da incorporação do material micronizado na conformidade dimensional dos tubos produzidos.

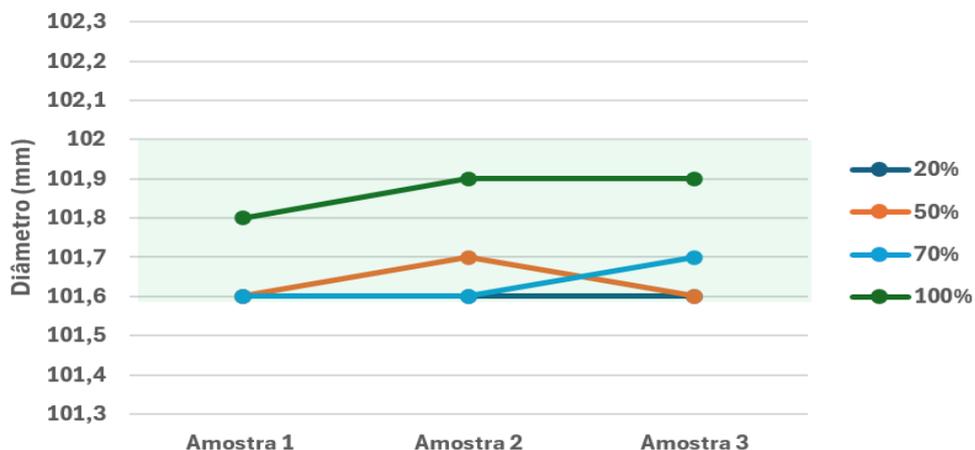
Tabela 5 - Diâmetro das amostras

Tubo	Dosagem de MC	Diâmetro externo Normativo	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Resultado
Esgoto 100mm (Branco)	20%	101,60 + 0,40	101,60	101,60	101,60	Aprovado
	50%		101,60	101,70	101,60	Aprovado
	70%		101,60	101,60	101,70	Aprovado
	100%		101,80	101,90	101,90	Aprovado
Soldável 25mm (Marrom)	20%	25,00 + 0,20	25,01	25,02	25,01	Aprovado
	50%		25,04	25,03	25,03	Aprovado
	70%		25,03	25,05	25,04	Aprovado
	100%		25,06	25,07	25,06	Aprovado

Fonte: Próprio autor, 2025.

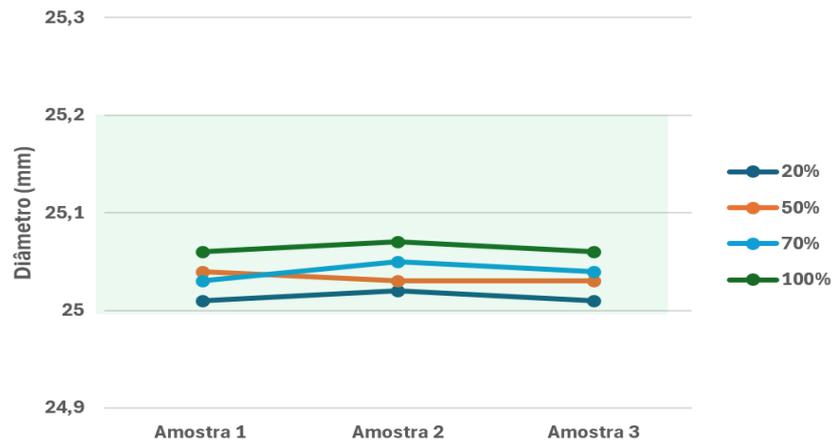
Com base nas Figuras 28 e 29 nota-se que todas as amostras dos tubos, tanto do tipo esgoto DN100 quanto do tipo soldável DN25, atenderam aos limites dimensionais estabelecidos pelas normas técnicas, indicando conformidade dimensional mesmo com a adição de diferentes dosagens de material micronizado (MC). De acordo com a norma ABNT NBR 5648:2021, o diâmetro externo para tubos de PVC do tipo esgoto DN100 deve ser de 101,6 mm, com uma tolerância de $\pm 0,40$ mm, e para tubos soldáveis DN25, o valor normativo é de 25,00 mm, com tolerância de $\pm 0,20$ mm.

Figura 28 - Diâmetro das amostras de Tubo 100mm Esgoto (Branco)



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 29 - Diâmetro das amostras de Tubo 25mm soldável (Marrom)



Fonte: Próprio autor, 2025.

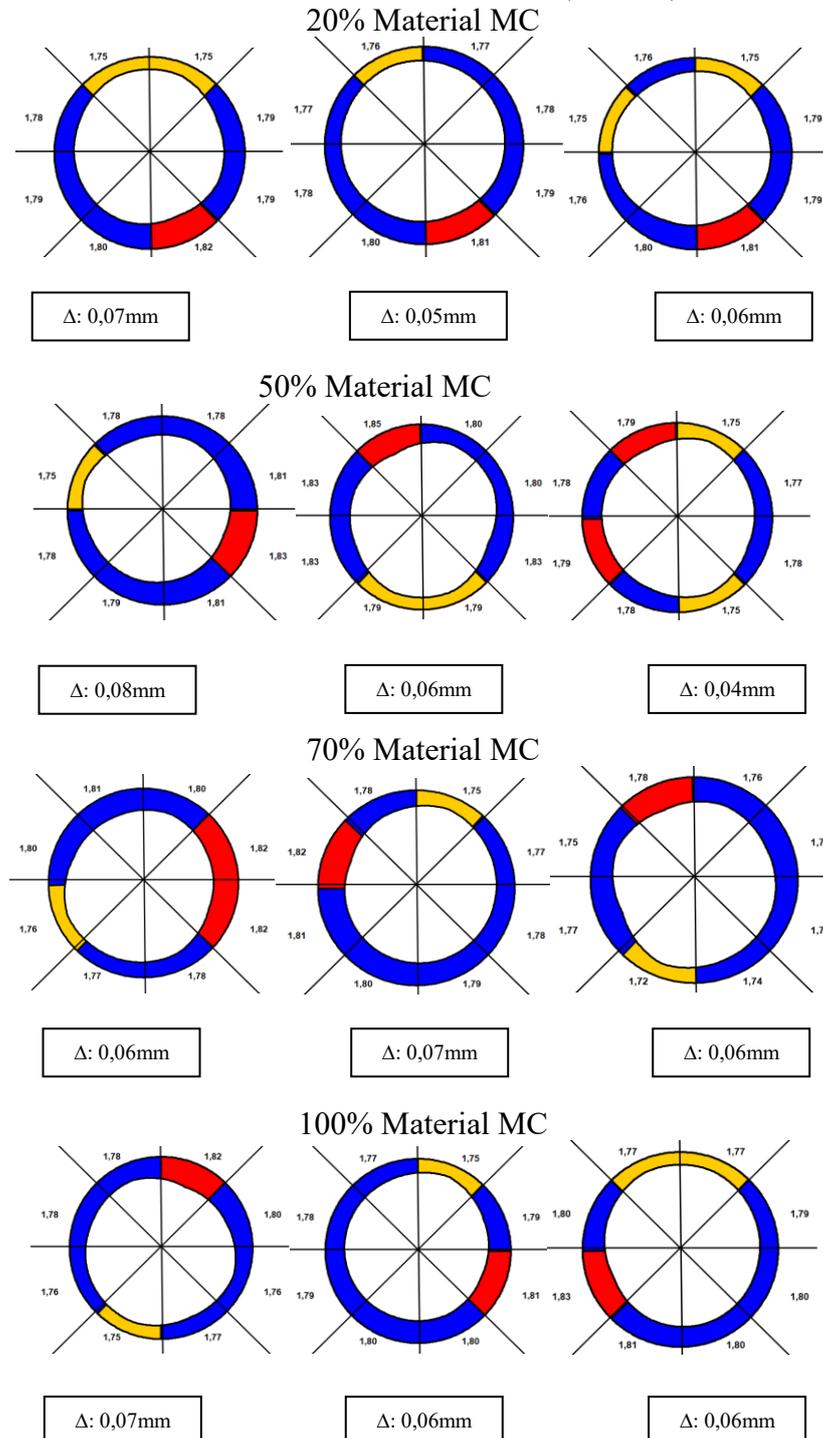
Os resultados mostram que, mesmo em dosagens elevadas de MC, como 100%, os diâmetros externos permaneceram dentro das faixas aceitáveis da norma. Essa estabilidade dimensional sugere que a incorporação do material micronizado não compromete a conformidade com os requisitos normativos, corroborando com estudos prévios como o de (Faria *et al.* 2010), que destacam o potencial de reprocessamento de resíduos industriais sem prejuízo às propriedades dimensionais de produtos poliméricos.

5.4 Medida de espessura

A espessura da parede é um atributo dimensional crítico em tubos de PVC-U, impactando diretamente sua resistência mecânica, capacidade de suportar pressão interna e vida útil. A variação da espessura pode comprometer a integridade estrutural do sistema e a uniformidade de fluxo. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 5688 (ABNT, 2015), que regulamenta tubos e conexões de PVC-U para sistemas prediais, a espessura mínima da parede para um tubo com diâmetro nominal (DN) 100 deve ser de 1,75 mm, enquanto a espessura máxima permitida é de 2,20 mm. Complementarmente, a NBR 5648 (ABNT, 2024), que trata de tubos de PVC rígido para condução de água sob pressão – junta soldável, estabelece que para o tubo de 25 mm (DN 25), a espessura mínima deve ficar entre 1,65 mm e máxima de 2,00 mm, dependendo da classe de pressão. A observância desses limites é fundamental para garantir o desempenho e a segurança dos tubos em suas diversas aplicações.

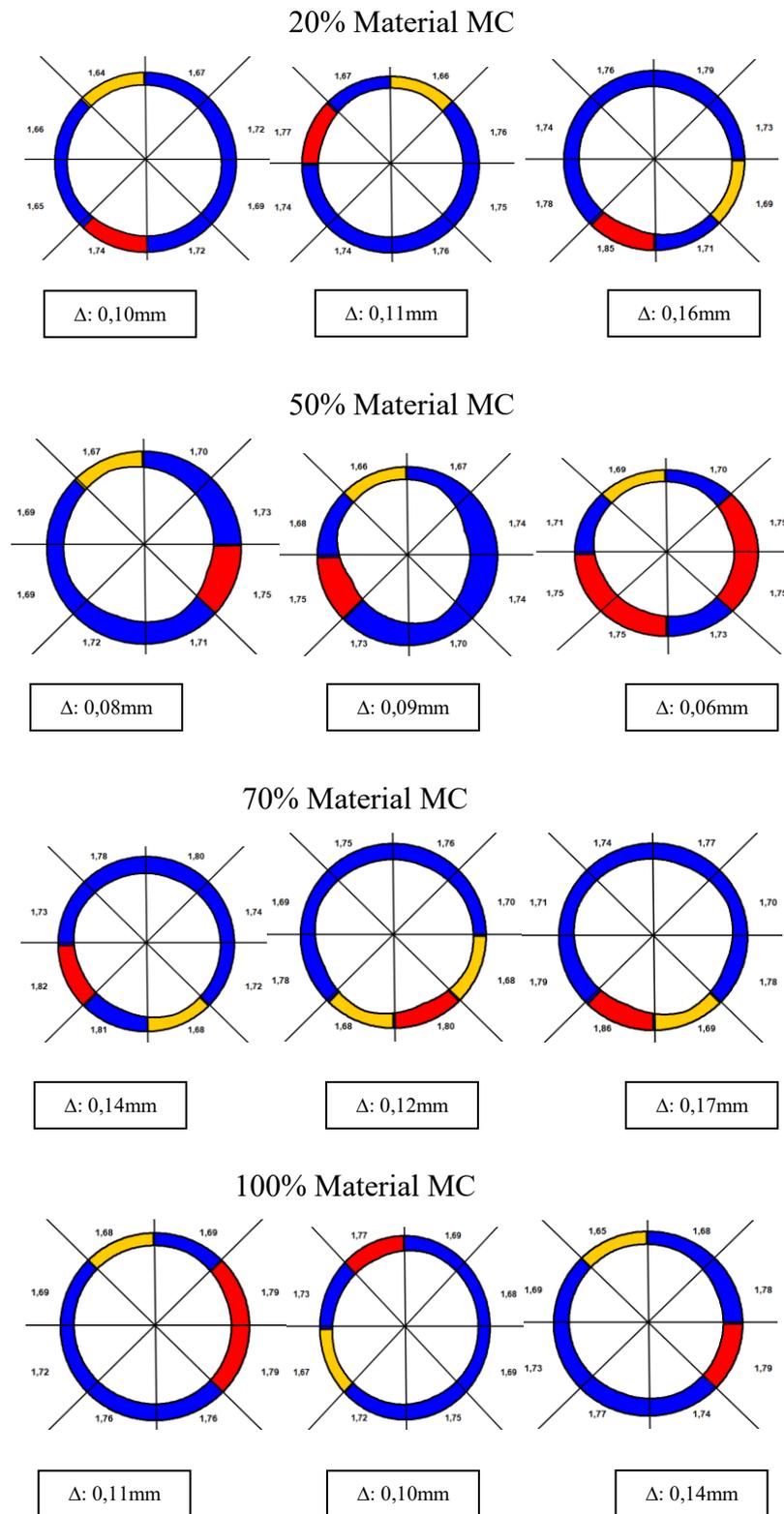
As Figuras 30 e 31 ilustram a variação da espessura ao longo da circunferência dos tubos extrudados, para diferentes proporções de material reciclado (MC), considerando os tubos de esgoto DN100 (Branco) e os tubos soldáveis DE25 (Marrom), onde delta (Δ) representa a diferença entre a maior e a menor espessura encontrada.

**Figura 30 - Variação da espessura ao longo do diâmetro do tubo
TUBO ESGOTO SN DN100 (Branco)**



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 31 - Variação da espessura ao longo do diâmetro do tubo TUBO SOLDÁVEL DE25 (Marrom)



Fonte: Próprio autor, 2025.

Para os tubos DN100, cuja faixa de espessura permitida pela indústria varia entre 1,75 mm e 1,85 mm, os deltas observados ficaram entre 0,04 mm e 0,07 mm, valores compatíveis com a tolerância técnica geralmente aceita para processos de extrusão contínua, que gira em torno de $\pm 0,05$ mm (MASCIA, 2004; MANRICH, 2021). Essa variação é considerada normal e aceitável, não comprometendo a qualidade nem o desempenho estrutural dos tubos produzidos, mesmo com a presença de até 100% de material reciclado na composição.

Em contrapartida, os tubos soldáveis DE25, com tolerância industrial de espessura entre 1,65 mm e 1,75 mm, apresentaram deltas de variação entre 0,06 mm e 0,17 mm, com os valores mais altos ocorrendo nas formulações de 70% e 100% de MC. Esses resultados confirmam uma acentuada instabilidade dimensional nas dosagens mais altas, comprometendo a conformidade do produto em ambas as direções da faixa de tolerância. Nas amostras com 70% e 100% de MC, foram registrados não apenas pontos com espessura inferior à mínima permitida de 1,65 mm, mas também diversos pontos que excederam a espessura máxima de 1,75 mm, atingindo valores de até 1,88 mm. Essa incapacidade de manter a espessura dentro dos limites especificados, tanto para mais quanto para menos, pode comprometer a estanqueidade das conexões, a resistência mecânica e a vida útil do produto. De acordo com Manrich (2021), esse comportamento é típico de formulações com maior proporção de reciclado, especialmente quando há heterogeneidade granulométrica ou falhas na plastificação da massa polimérica.

5.5 Resistência ao impacto

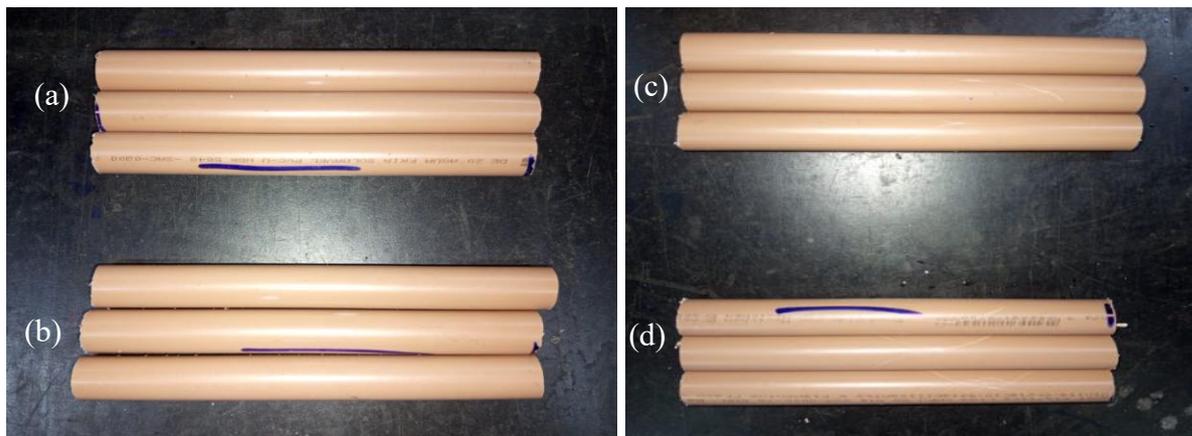
O ensaio de impacto em polímeros é fundamental para avaliar a tenacidade, ou seja, a capacidade do material de absorver energia sem sofrer fratura. Esse tipo de ensaio fornece informações relevantes sobre a resistência à propagação de trincas e a fragilidade do material, especialmente quando submetido a solicitações dinâmicas. No caso de tubos poliméricos, esse ensaio é particularmente importante, uma vez que esses componentes estão sujeitos a impactos acidentais durante o transporte, manuseio e instalação.

O ensaio de resistência ao impacto não é exigido para o Tubo Esgoto SN DN100 segundo a ABNT NBR 5688:2021 portanto o ensaio só foi realizado para o Tubo Soldável DE25. Os resultados do ensaio estão apresentados na Tabela 6 e as trincas nos corpos de prova podem ser observadas na Figura 32.

Tabela 6 - Resultados dos testes de resistência ao impacto

Tubo	Dosagem de MC	Especificações	Quebra/ Golpes	Resultado
Soldável 25mm	20%	Massa = 0,5Kg Altura = 0,5m	0/3	Aprovado
	50%		0/3	Aprovado
	70%		1/3	Reprovado
	100%		2/3	Reprovado

Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 32 - Corpos de prova após o ensaio de resistência ao impacto

(a) 20% MC. (b) 50%MC. (c) 70%MC. (d)100%MC.

Fonte: Próprio autor, 2025.

Os resultados do ensaio de resistência ao impacto, apresentados na Tabela 6, demonstram que a incorporação de material reprocessado (MC) influencia negativamente o desempenho mecânico do Tubo Soldável DE25. As amostras com até 50% de MC foram aprovadas, sem apresentar falhas, indicando que essa proporção ainda mantém a integridade estrutural necessária para suportar impactos, conforme exigido pela ABNT NBR 5648:2018. No entanto, nas amostras com 70% e 100% de MC, o número de falhas ultrapassou o limite estipulado de zero falhas devido a quantidade reduzida de corpos de prova resultando na reprovação do material.

A redução da resistência ao impacto nas dosagens mais altas podem estar associadas à degradação térmica acumulada do PVC durante os ciclos anteriores de processamento, perda de plastificantes e aditivos essenciais, ou à presença de impurezas que afetam a coesão da matriz polimérica. Isso evidencia uma perda significativa das propriedades mecânicas quando a

porcentagem de MC é elevada, especialmente acima de 50%, comprometendo a qualidade e a segurança do produto final. Portanto, os dados indicam a necessidade de limitar a dosagem de MC no composto para garantir a conformidade com as normas técnicas e assegurar o desempenho adequado do tubo em aplicações reais.

5.6 Classe de rigidez

O ensaio de rigidez é um teste mecânico fundamental na caracterização de materiais poliméricos, pois permite avaliar a resistência do material à deformação quando submetido a uma carga mecânica. Esse ensaio pode ser realizado por meio de testes de tração, compressão ou flexão, dependendo da geometria da amostra e do tipo de sollicitação predominante na aplicação final. Uma das principais propriedades obtidas nesses testes é o módulo de elasticidade longitudinal, também conhecido como módulo de Elasticidade (E), que expressa a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante na região linear e elástica do comportamento mecânico do polímero.

O valor do módulo de elasticidade é de grande relevância para prever o desempenho do material em condições de uso reais, especialmente em aplicações que exigem resistência à flexão ou compressão, como no caso de tubos para condução de fluidos sob pressão ou enterrados. Além disso, o ensaio fornece informações que auxiliam no dimensionamento estrutural de componentes plásticos e na comparação entre formulações com diferentes composições, como aquelas contendo frações de material reciclado.

O procedimento segue as diretrizes para determinação da rigidez anular em tubos termoplásticos, tendo como referência o comportamento do material sob compressão diametral. As deformações, que demonstram o comportamento do material durante o ensaio, estão apresentadas na Tabela 7 compila os resultados numéricos obtidos para cada corpo de prova.

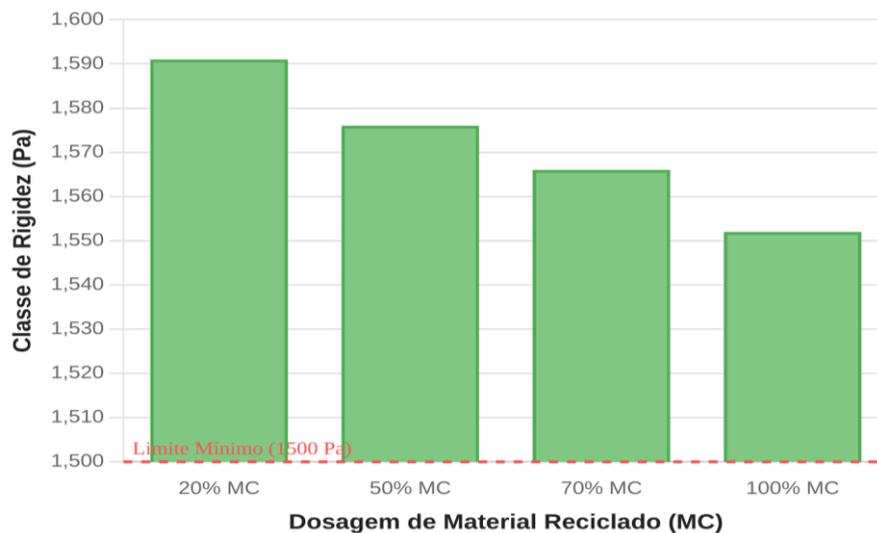
Tabela 7 - Resultado da classe de rigidez Tubo Esgoto DN 100

Dosagem de MC	Corpo de Prova	Espessura Mínima	Especificação 1500 (Pa)	Resultado
20%	1	1,75	1600	Aprovado
	2	1,76	1600	Aprovado
	3	1,75	1600	Aprovado
50%	1	1,75	1600	Aprovado
	2	1,75	1600	Aprovado
	3	1,77	1600	Aprovado
70%	1	1,76	1600	Aprovado
	2	1,75	1600	Aprovado
	3	1,74	1600	Aprovado
100%	1	1,75	1600	Aprovado
	2	1,75	1500	Aprovado
	3	1,77	1600	Aprovado

Fonte: Próprio autor, 2025.

Conforme demonstrado na Figura 33, todos os corpos de prova ensaiados, independentemente da dosagem de MC, foram aprovados. Os resultados atenderam ao requisito mínimo de 1500 Pa para a classe de rigidez nominal (CRN) estabelecida pela norma ABNT NBR 7362 (ABNT, 2018), que rege os requisitos para sistemas de tubulação de esgoto. A aprovação unânime em todas as formulações é um indicativo da viabilidade técnica da utilização do MC como componente na fabricação dos tubos.

Figura 33 – Classe de rigidez média (Pa) em função da dosagem de material MC para o Tubo Esgoto DN100 (Branco)



Fonte: Próprio autor, 2025.

Apesar da aprovação geral, uma análise mais detalhada dos valores medidos revela uma sutil tendência de redução da rigidez anular média com o aumento da concentração de MC. A média dos resultados para a dosagem de 20% MC foi de aproximadamente 1591 Pa, enquanto para a dosagem de 100% MC, a média foi de 1552 Pa. Esta tendência está em consonância com os resultados de densidade aparente discutidos na seção anterior.

Portanto, a leve diminuição da rigidez é uma consequência esperada e coerente da redução de densidade promovida pela adição de MC. O ponto mais relevante, do ponto de vista da engenharia de materiais, é que esta redução na propriedade mecânica não comprometeu o desempenho do produto final frente à especificação normativa. Fica evidente a existência de um vantajoso balanço de propriedades: o uso do MC permite uma significativa redução na densidade do produto (e, conseqüentemente, em seu peso e custo de matéria-prima) com um decréscimo mínimo em sua rigidez anular, mantendo-o dentro da classe de desempenho especificada. Este resultado valida o MC como um aditivo eficaz para a otimização de compósitos para esta aplicação.

5.7 Pressão hidrostática interna (PHI)

Para garantir a resistência mecânica e a segurança dos tubos de PVC utilizados em aplicações sob pressão, é necessário submetê-los ao ensaio de pressão hidrostática interna, conforme os critérios estabelecidos pela norma NBR 5683 (ABNT, 2017). Esse ensaio tem por objetivo avaliar a capacidade do tubo de suportar esforços internos resultantes da pressão de serviço, sem apresentar rupturas, trincas ou deformações estruturais significativas.

Segundo os requisitos da norma, os corpos de prova devem resistir à aplicação de uma tensão circunferencial de ruptura (σ) de 33,4 MPa, sob uma temperatura controlada de 20 °C, com tolerância de -2 °C a +3 °C, durante um período de 6 minutos. Essa tensão é calculada com base no diâmetro externo e na espessura da parede do tubo, considerando-se a pressão hidrostática aplicada de forma constante.

Os resultados do teste de PHI estão demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado do teste de Pressão Hidrostática Interna

Tubo	Dosagem de MC	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Esgoto 100mm	20%	Conforme	Conforme	Conforme
	50%	Conforme	Conforme	Conforme
	70%	Conforme	Conforme	Conforme
	100%	Conforme	Conforme	Conforme
Soldável 25mm	20%	Conforme	Conforme	Conforme
	50%	Conforme	Conforme	Conforme
	70%	Conforme	Conforme	Conforme
	100%	Conforme	Conforme	Conforme

Fonte: Próprio autor, 2025.

Todos os corpos de prova se mantiveram intactos após aplicação da pressão como observado na Figura 34.

Figura 34 – Corpos de prova após o ensaio de PHI

(a) Esgoto 100mm. (b) Soldável 25mm.

Fonte: Próprio autor, 2025.

Os resultados do teste de Pressão Hidrostática Interna (PHI), mostram que todos os corpos de prova, independentemente da dosagem de material reprocessado (MC), foram aprovados, sendo considerados conformes aos critérios da norma. Isso indica que, mesmo com o aumento do percentual de MC no composto, os tubos mantiveram a integridade estrutural necessária para suportar a pressão interna exigida durante o ensaio.

Esse desempenho satisfatório pode ser atribuído ao fato de que o ensaio de PHI avalia principalmente a resistência à pressão constante ao longo do tempo, e o material reprocessado ainda mantém, nesse aspecto, uma boa capacidade de suportar esforços internos sem falhas

imediatas. No entanto, é importante destacar que, embora os tubos tenham sido aprovados nesse ensaio, outros resultados demonstraram limitações importantes nas propriedades físicas e mecânicas com o aumento do MC. Assim, embora a pressão hidrostática não tenha sido afetada significativamente, o uso de material reprocessado em altas proporções ainda requer cautela, considerando os demais parâmetros de desempenho do produto final.

5.8 Estabilidade dimensional

O ensaio de variação dimensional longitudinal avalia a estabilidade térmica dos tubos de PVC quando submetidos a elevadas temperaturas, simulando condições críticas de exposição durante o armazenamento, transporte ou aplicação final.

A Tabela 9, indica que todos os corpos de prova, tanto dos tubos de esgoto DN100 (Branco) quanto dos tubos soldáveis DE25 (marrom), mantiveram-se dentro do limite máximo de 5% estabelecido pela norma o que garante a estabilidade dimensional do material em condições térmicas adversas.

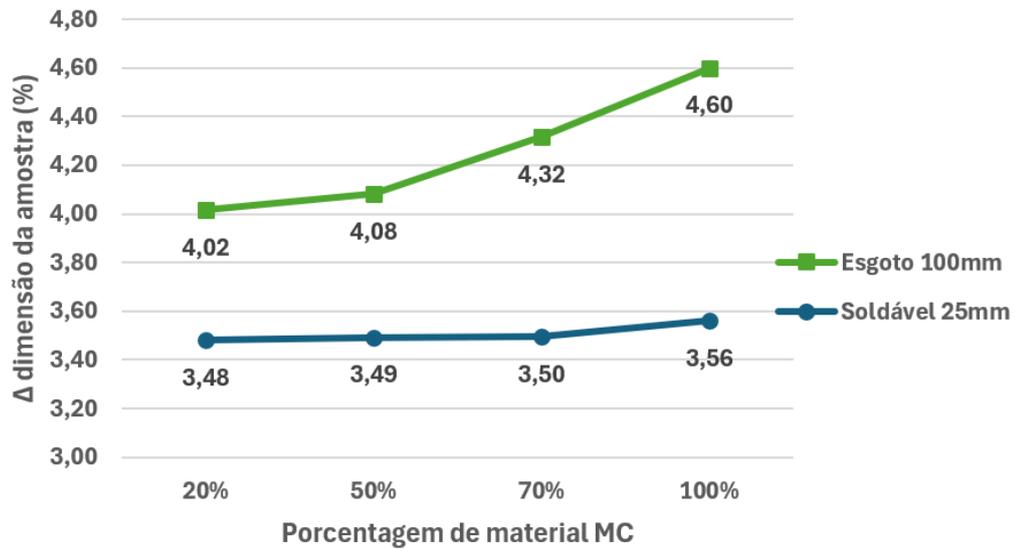
Tabela 9 - Variação Longitudinal após Exposição a 140 °C

Tubo	Dosagem de MC	Variação Amostra 1 (%)	Variação Amostra 2 (%)	Variação Amostra 3 (%)	Status
Esgoto 100mm (Branco)	20%	4,01	4,03	4,01	Conforme
	50%	4,07	4,09	4,09	Conforme
	70%	4,32	4,33	4,30	Conforme
	100%	4,58	4,61	4,61	Conforme
Soldável 25mm (Marrom)	20%	3,48	3,50	3,47	Conforme
	50%	3,49	3,48	3,50	Conforme
	70%	3,51	3,51	3,48	Conforme
	100%	3,52	3,59	3,57	Conforme

Fonte: Próprio autor, 2025.

Ao analisar os dados da Figura 35, constata-se que todas as amostras, para ambos os tipos de tubos e em todas as dosagens de MC, foram classificadas como "Conforme", atendendo ao requisito normativo.

Figura 35 - Variação Longitudinal Média x Dosagem de MC



Fonte: Próprio autor, 2025.

Observando também que para os tubos de esgoto de 100 mm (Branco), tem-se uma tendência clara de aumento da variação longitudinal conforme se eleva o teor de material reciclado, partindo de uma média de 4,02% com 20% de MC e chegando a 4,60% com 100% de MC. Embora dentro do limite de 5%, o aumento progressivo sugere que a adição de MC influencia as tensões internas do produto. Este comportamento pode ser atribuído a diferenças na reologia do composto com maior teor de reciclado, que, ao ser processado sob os mesmos parâmetros do material virgem, pode gerar um maior nível de orientação molecular e, consequentemente, maior tensão residual (SILVA; COSTA, 2023).

De forma geral, a utilização de resíduos micronizados de PVC se mostrou tecnicamente viável sob a ótica da estabilidade dimensional. Os resultados indicam, no entanto, que o aumento do teor de reciclado tende a elevar a reversão longitudinal, aproximando os valores do limite normativo, especialmente no tubo de esgoto de 100 mm. Isso sugere que, para a implementação industrial de altas dosagens de MC, um ajuste fino nos parâmetros de processo, como a temperatura da matriz e a velocidade de puxamento, poderia ser necessário para minimizar as tensões induzidas e garantir uma maior margem de segurança (BAIRD; COLT, 2017).

5.9 Teor de cinzas

O ensaio de determinação do teor de cinzas em tubos de PVC quantifica a fração inorgânica residual presente no material após a combustão completa da matéria orgânica. Este parâmetro é de extrema importância para o controle da formulação e qualidade do processo de fabricação de compostos poliméricos, especialmente aqueles que contêm cargas inorgânicas, como o carbonato de cálcio, comum em formulações de PVC rígido. A presença e a porcentagem dessas cargas afetam diretamente as propriedades mecânicas, a densidade e o custo do material (MANRICH, 2021). No contexto deste estudo, a determinação do teor de cinzas é crucial para verificar a consistência da formulação entre as amostras virgens e aquelas que incorporam o material micronizado, permitindo identificar possíveis variações na concentração de cargas ou a presença de impurezas inorgânicas oriundas do material reciclado, que podem impactar o desempenho final do tubo.

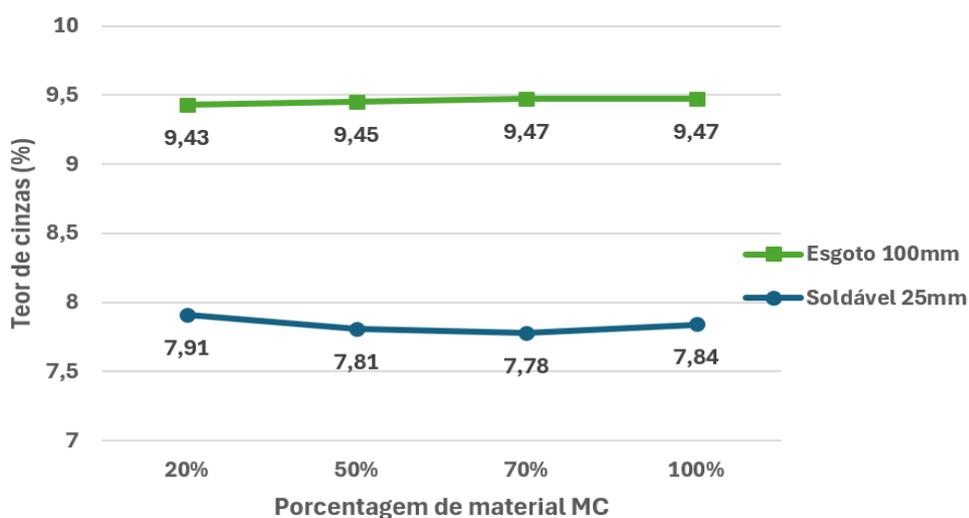
É importante ressaltar que as normas brasileiras estabelecem limites para o teor de cinzas para tubos soldáveis, o teor de cinzas deve ser de no máximo 8% e para tubos de esgoto, o teor de cinzas deve ser de no máximo 10%.

Os resultados médios, compilados da Tabela 10, são apresentados graficamente na Figura 36 para facilitar a análise comparativa.

Tabela 10 - Resultados do teor de cinzas

Tubo	Dosagem de MC	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Amostra 3 (%)	Média (%)
Esgoto 100mm	20%	9,42	9,44	9,42	9,43
	50%	9,45	9,42	9,47	9,45
	70%	9,48	9,48	9,46	9,47
	100%	9,48	9,45	9,47	9,47
Soldável 25mm	20%	7,88	7,91	7,94	7,91
	50%	7,82	7,74	7,87	7,81
	70%	7,81	7,76	7,76	7,78
	100%	7,81	7,88	7,83	7,84

Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 36 - Média do teor de cinzas por dosagem de material MC

Fonte: Próprio autor, 2025.

A análise da Figura 36 revela duas conclusões principais. A primeira é a clara diferença de formulação entre os produtos: o tubo de esgoto de 100mm possui um teor de cinzas consistentemente mais elevado, em torno de 9,45%, enquanto o tubo soldável de 25mm apresenta um nível de aproximadamente 7,85%. Isso indica que o tubo de esgoto utiliza uma maior concentração de cargas minerais, como o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), prática comum para aumentar a rigidez e reduzir custos em tubos que não são submetidos a altas pressões internas.

A segunda e mais importante observação é a notável estabilidade do teor de cinzas em todas as dosagens de material reciclado (MC) para ambos os tipos de tubo. As linhas no gráfico são essencialmente planas, demonstrando que o aumento do percentual de resíduo não alterou significativamente a composição inorgânica do produto final. Este é um resultado positivo, pois indica que o resíduo micronizado utilizado possui uma formulação similar à do composto virgem. Tal consistência simplifica o processo produtivo, pois não exige ajustes na formulação para compensar variações no nível de cargas, garantindo maior previsibilidade nas propriedades mecânicas e na densidade do produto acabado.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo buscou analisar a viabilidade técnica da reutilização de resíduos de policloreto de vinila (PVC) na produção de novos tubos, avaliando a influência de diferentes proporções de material reciclado (MC) nas propriedades do produto final, em conformidade com as normas ABNT NBR 5688 e NBR 5648 e critérios industriais. A pesquisa alcançou seu objetivo geral, demonstrando que a viabilidade da reincorporação do resíduo é tecnicamente possível, porém dependente do tipo de produto e da dosagem utilizada.

Foram desenvolvidas e caracterizadas misturas com 20%, 50%, 70% e 100% de resíduo micronizado, permitindo identificar as proporções ideais para reintrodução no processo produtivo. A avaliação das propriedades físico-químicas e mecânicas revelou comportamentos distintos entre os tubos analisados.

Para os tubos de esgoto DN100, os resultados foram satisfatórios em todas as dosagens, inclusive com 100% de MC. As amostras atenderam aos requisitos de conformidade dimensional (diâmetro e espessura), classe de rigidez, pressão hidrostática interna e estabilidade dimensional. A análise do teor de cinzas demonstrou que a formulação do resíduo era consistente com a do material virgem, não alterando a composição inorgânica do produto significativamente. Isso comprova a viabilidade técnica para a reutilização integral do resíduo neste tipo de produto.

Para os tubos soldáveis DE25, a incorporação do resíduo mostrou-se mais restritiva. Embora os tubos tenham sido aprovados nos ensaios de pressão hidrostática interna, estabilidade dimensional e teor de cinzas em todas as dosagens, foram identificadas falhas críticas em propriedades mecânicas com o aumento do teor de MC. A resistência ao impacto foi reprovada a partir de 70% de MC, indicando um aumento da fragilidade do material. Adicionalmente, a variação da espessura da parede tornou-se acentuada em dosagens superiores a 50%, comprometendo a conformidade dimensional. Desta forma, para garantir a integridade e o desempenho do tubo soldável DE25, recomenda-se limitar a adição do material micronizado a um máximo de 50%.

Este trabalho abrange a otimização de processos na indústria de transformação de PVC, fornecendo dados concretos que validam a utilização de resíduos internos de forma segura e eficiente. A implementação dessas práticas promove a sustentabilidade, reduzindo o consumo de matéria-prima virgem e os custos associados ao descarte de resíduos, alinhando a produção aos princípios da economia circular sem comprometer a qualidade e a segurança dos produtos finais, desde que os limites técnicos aqui identificados sejam respeitados.

REFERÊNCIAS

ANTÔNIO, JR. *et al.* **Tecnologia do PVC**. 2. ed. rev. [S. l.]: ProEditores, 2023. 450 p. Disponível em: <<https://www.braskem.com/Portal/Principal/Arquivos/Download/Upload/Tecnologia%20do%20PVC%20a%20edi%C3%A7%C3%A3o22.pdf>>. Acesso em: 3 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5648**: Tubos de PVC rígido para condução de água sob pressão – Junta soldável – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5683**: Tubos de policloreto de vinila (PVC) — Verificação da resistência à pressão hidrostática interna. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5687**: Tubos de policloreto de vinila (PVC) — Verificação da estabilidade dimensional. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5688**: Tubos e conexões de PVC-U para sistemas prediais de água pluvial, esgoto sanitário e ventilação – Requisitos. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7362**: Sistemas enterrados para condução de esgoto sanitário - Requisitos para tubos de PVC com junta elástica. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7678**: Plásticos – Determinação do teor de cinzas. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10821**: Tubos de PVC rígido com junta elástica para adutoras e redes de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 84**: Plásticos - Determinação da densidade aparente de materiais que não fluem facilmente através de um funil especificado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 85**: Plásticos – Determinação do índice de fluidez de massa (MFR) e do índice de fluidez de volume (MVR) de termoplásticos. Rio de Janeiro, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. **D1895-69**: Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials. West Conshohocken, PA, 1996.

BAIRD, D. G.; COLT, J. **Polymer Processing**: Principles and Design. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2017.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

EUROPEAN COUNCIL OF VINYL MANUFACTURERS (ECVM). **PVC, a versatile material for long-life applications**. Brussels, 2011.

FARIA, J. A. F.; PRUDENCIO-FERREIRA, S. H.; LIMA, S. C. G.; DIAS, N. L. Estudo da reciclagem de PVC pós-consumo proveniente de embalagens de água mineral. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 20, n. 1, p. 55-60, 2010.

HASELHUHN, Amberlee S. *et al.* **Revisão da literatura sobre projeto de extrusora de dupla rosca**. Appropedia, 2021. Disponível em: https://www.appropedia.org/Twin_screw_extruder_design_literature_review/pt. Acesso em: 26 jul. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC (IBPVC). **Conhecimento que conecta**. [S. l.]: Stela Brandig. Disponível em: <https://pvc.org.br/>. Acesso em: 3 abr. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC (IBPVC). **Consumo aparente de PVC no Brasil em 2023**. São Paulo: IBPVC, 2024.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). **Compendium of chemical terminology**. 2. ed. Oxford: Blackwell Science, 1997.

JULIANA, A. et al. Análise do processo de gelificação de resinas e compostos de PVC suspensão. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 165–176. Disponível em: <<https://www.revistapolimeros.org.br/journal/polimeros/article/doi/10.1590/S0104-14282006000200018>>. Acesso em: 6 abr. 2023.

LUZ, Jr. et al. Avaliação e caracterização de tubos fabricados com PVC reciclado. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [S. l.], v. 23, n. 4, p. 547–551. Disponível em: <https://www.revistapolimeros.org.br/doi/10.4322/polimeros.2013.045>. Acesso em: 6 abr. 2023.

MACHADO, A. R.; BOTOSSO, J. F. R. **Metrologia dimensional: princípios e fundamentos**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2017.

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

MANRICH, S. **Tecnologia de polímeros: um texto de referência para estudantes, profissionais e usuários**. São Paulo: Blucher, 2021.

MASCIA, L. **Introdução à ciência de materiais: estrutura, propriedades e aplicações dos materiais poliméricos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

MAXIQUIM. **Anuário Brasileiro do PVC 2022**. São Paulo: Instituto Brasileiro do PVC, 2022.

MORDOR INTELLIGENCE. **PVC Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029)**. [S. l.]: Mordor Intelligence, 2024. Disponível em: [Inserir a URL do relatório]. Acesso em: 26 out. 2025.

OLIVEIRA, M. S. Análise da não linearidade da densidade em misturas de agregados com diferentes granulometrias. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 24., 2021, Águas de Lindoia. **Anais [...]**. São Paulo: ABC, 2021. p. 78-85.

POWERS, J. M. **Dental materials**: properties and selection. 9. ed. St. Louis: Elsevier Mosby, 2012.

RODOLFO JR., Antonio; NUNES, Luciano R.; ORMANJI, Wagner. **Tecnologia do PVC**. 2. ed. São Paulo: Pro-Editores, 2006.

SILVA, J. F.; COSTA, M. A. Influência do teor de PVC reciclado nas propriedades reológicas e mecânicas de tubos extrudados. **Revista Brasileira de Engenharia de Polímeros**, v. 28, n. 2, p. 115-128, 2023.

SILVA, J. R.; COSTA, F. P. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com cargas minerais leves para a indústria de painéis. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 32, n. 4, e2022035, 2022. DOI: 10.1590/0104-1428.20220035.

TADMOR, Z.; GOGOS, C. G. **Principles of polymer processing**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

WIEBECK, H.; PIVA, A. M. **Plásticos**: engenharia e aplicações. São Paulo: Artliber, 2000.