

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS LAGOA DO SINO

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

ISADORA PRADELLA CARVALHO

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE
POLIETILENO RECICLADO PARA PRODUÇÃO DE CAIXAS D'ÁGUA

Buri

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS LAGOA DO SINO

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

ISADORA PRADELLA CARVALHO

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE
POLIETILENO RECICLADO PARA PRODUÇÃO DE CAIXAS D'ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de São Carlos.

Orientação: Prof. Dr. Jonathan Gazzola

Buri

2024

Carvalho, Isadora Pradella

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA
DO USO DE POLIETILENO RECICLADO PARA
PRODUÇÃO DE CAIXAS D'ÁGUA / Isadora Pradella
Carvalho -- 2025.

40f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Jonathan Gazzola

Banca Examinadora: Kelen Cristiane Cardoso, Ricardo

Manoel Romão

Bibliografia

1. Avaliação do Polietileno Reciclado . 2. Ensaio
mecânico. I. Carvalho, Isadora Pradella. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Folha de Aprovação.

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do(a) candidato(a) Isadora Pradella Carvalho, realizada em 27/01/2025:

Prof. Dr. Jonathan Gazzola – Orientador(a)
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Profa. Dra. Kelen Cristiane Cardoso
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Prof. Engenheiro Ambiental Ricardo Manoel Romão
Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP

RESUMO

O crescente aumento da geração de resíduos sólidos, impulsionado pela urbanização, expansão econômica e crescimento populacional, apresenta um desafio ambiental significativo. Os plásticos, cuja produção global cresceu exponencialmente desde 1950, são um dos principais componentes desses resíduos, com apenas 20% sendo reciclados. Este estudo analisou a viabilidade técnica e econômica do uso de polietileno reciclado na produção de caixas d'água, promovendo a economia circular. Ensaios mecânicos demonstraram que o polietileno reciclado apresenta resistência e estabilidade adequadas, especialmente com espessuras otimizadas, garantindo segurança estrutural e funcionalidade. Além disso, a análise de qualidade da água revelou que o material não compromete o pH do fluido armazenado. Apesar do aumento de peso em relação às caixas d'água convencionais, o uso do polietileno reciclado mostrou-se uma alternativa sustentável e viável tecnicamente, embora economicamente menos atrativa devido ao custo elevado do produto final. O estudo conclui que avanços nos processos de reciclagem podem melhorar a competitividade deste material, reduzindo seu impacto ambiental e fortalecendo seu potencial de aplicação.

Palavras-chave: Resíduos; Reciclagem; Polietileno; Economia Circular; Testes mecânicos.

ABSTRACT

The increasing generation of solid waste, driven by urbanization, economic expansion, and population growth, presents a significant environmental challenge. Plastics, whose global production has grown exponentially since 1950, are one of the main components of this waste, with only 20% being recycled. This study analyzed the technical and economic feasibility of using recycled polyethylene in the production of water tanks, promoting the circular economy. Mechanical tests demonstrated that recycled polyethylene exhibits adequate strength and stability, especially with optimized thicknesses, ensuring structural safety and functionality. Additionally, the water quality analysis revealed that the material does not compromise the pH of the stored fluid. Despite the increased weight compared to conventional water tanks, the use of recycled polyethylene proved to be a sustainable and technically viable alternative, although economically less attractive due to the high cost of the final product. The study concludes that advances in recycling processes could improve the competitiveness of this material, reducing its environmental impact and enhancing its potential for application.

Keywords: Waste; Recycling; Polyethylene; Circular Economy; Mechanical Tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Gráfico de crescimento da produção global de plástico virgem.	14
Figura 2. Classificação dos polímeros.	16
Figura 3. Comportamento polímero.	17
Figura 4. Comportamento corpos de prova.	18
Figura 5. Processo de rotomoldagem: (1) é inserido uma quantidade específica de polímero com o molde em temperatura ambiente; (2) o molde começa a rotacionar bilateralmente, sendo inserido em uma ambiente com temperatura elevada; (3) o molde é transferido para um pré-resfriamento; (4) o produto é retirado do molde para o resfriamento total.	20
Figura 6. Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração.	21
Figura 7. Corpos de prova de polietileno reciclado para ensaio mecânico.	21
Figura 8. Amostra produzida para o cálculo de densidade.	22
Figura 9. Tipos de curva característica de material polimérico.	24
Figura 10. Cálculo do módulo de elasticidade pelo módulo tangente.	24
Figura 11. Determinação da tensão de escoamento por desvio.	25
Figura 12. Registro do pHmetro utilizado.	26
Figura 13. Dimensões utilizadas para a simulação da caixa de água.	27
Figura 14. Caixa d'água plotada no AutoDesk Inventor para realização de simulação.	27
Figura 15. Registro da pesagem da amostra.	28
Figura 16. Corpos de prova após a realização dos ensaios mecânicos.	29
Figura 17. Curva de Tensão x Deformação Específica para o POLIETILENO REICLADO: a) CP1; b) CP2; c) CP3; d) CP4; e) CP5; f) CP6; g) CP7; h) CP8.	29
Figura 18. Linha tangente para determinação do módulo de elasticidade.	30
Figura 19. Linha paralela para determinação da tensão de escoamento.	30
Figura 20. Resultados gráficos da espessura 5 mm.	32
Figura 21. Resultados gráficos da espessura 24 mm.	33
Figura 22. Resultados gráficos da espessura 45 mm.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados encontrados.	31
Tabela 2. Resultados das simulações.....	32
Tabela 3. Resultados do pH.	35
Tabela 4. Preço das caixas de água.....	35

LISTA DE SIGLAS

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PEBD - Polietileno de Baixa Densidade

PEBDL - Polietileno de Baixa Densidade Linear

PEUAPM - Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

PEUBD - Polietileno de Ultra Baixa Densidade

ASTM - American Society for Testing and Materials

LECMat - Laboratório de Ensaios e Caracterização de Materiais

DEP-So - Departamento de Engenharia de Produção de Sorocaba

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

ISO - International Standard Organization

LISTA DE SÍMBOLOS

σ - Força máxima

F - Força aplicada

A0 - Área

ε - Deformação específica

L0 - Comprimento inicial

ρ - Densidade

m – Massa

V – Volume

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 USO DE POLIETILENO NA FABRICAÇÃO DE CAIXA D'ÁGUA	15
2.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DOS POLÍMEROS.....	16
2.3. PROCESSO DE RECICLAGEM SECUNDÁRIA.....	18
1.1 ROTOMOLDAGEM.....	19
3. MATERIAIS	20
3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	20
3.2 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO MATERIAL.....	22
3.3 ENSAIO DE QUALIDADE DA ÁGUA ARMAZENADA	25
3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	26
4. RESULTADOS	28
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	35
6. CONCLUSÃO	38
7. REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos tem se tornado uma preocupação global nas últimas décadas, devido ao impacto ambiental causado pelo seu aumento. Fatores como o crescimento populacional, a urbanização acelerada e a expansão das atividades econômicas contribuem diretamente para o agravamento desse cenário. Em 2023, o Brasil registrou a geração de 81 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), o que equivale a 221 mil toneladas por dia, com uma média de 1,047 kg de RSU gerado por habitante diariamente. Dentro desse panorama, os resíduos plásticos destacam-se como uma das principais problemáticas ambientais, devido ao aumento exponencial da sua produção e às dificuldades no descarte e reciclagem adequados. (WWF, 2019; CHIERRITO et al., 2018; ABREMA, 2018)

Desde 1950, a produção global de plástico cresceu cerca de 200 vezes, refletindo diretamente no acúmulo de resíduos e nos impactos negativos aos ecossistemas. Embora a reciclagem seja uma alternativa viável, atualmente apenas 20% dos resíduos plásticos coletados mundialmente são reciclados, enquanto grande parte é destinada a aterros sanitários ou incinerada, práticas que agravam os problemas ambientais. Esse cenário destaca a necessidade urgente de promover soluções mais sustentáveis para o gerenciamento e reaproveitamento de plásticos. Sendo assim, a transformação de plásticos pós-consumo em novos materiais, como o polietileno reciclado, destaca-se como uma alternativa promissora, tanto por promover a economia circular quanto por reduzir o impacto ambiental. Este polietileno, obtido pela combinação de polietileno de baixa densidade (PEBD) e alta densidade (PEAD), pode apresentar outras aplicações, como na fabricação de caixas d'água, contribuindo para a redução de resíduos e a reutilização de materiais de forma sustentável (GANDHI et al., 2021).

O presente trabalho tem como objetivo analisar a utilização de polietileno reciclado advindos da mistura de PEAD e PEBD na composição para a fabricação de caixas d'água, avaliando a viabilidade técnica e econômica que o uso dessa matéria prima pode oferecer frente aos produtos comerciais, bem como, seus benefícios ambientais. A metodologia se baseou no comportamento mecânico do polímero reciclado analisado, com base na norma ASTM D 638-10, a fim de compreender suas propriedades e desempenho em aplicações específicas, bem como, a determinação de sua densidade. Análise do grau de acidez indicaram a qualidade da água armazenada. Simulação computacional, utilizando o Método dos Elementos Finitos, foi realizada

para determinar as dimensões que ofereçam qualidade de segurança e peso do material. Os dados de peso também determinaram o custo final do produto que, comparado com o preço da caixa d'água comercial indicaram a viabilidade econômica.

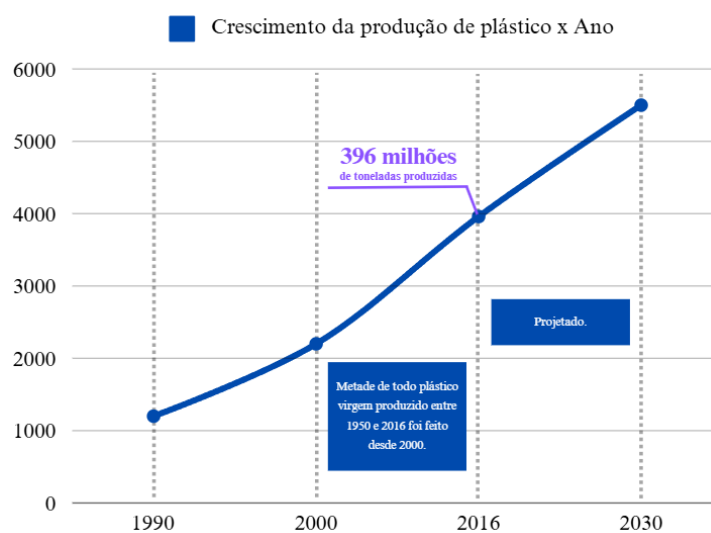
A relevância deste estudo está na busca por alternativas que reduzam a dependência de materiais virgens, promovam a reutilização de resíduos e incentivem práticas sustentáveis, alinhando-se às diretrizes da economia circular. O trabalho também se propõe a discutir os desafios técnicos e ambientais associados à produção e ao uso de plásticos reciclados, contribuindo para o desenvolvimento de soluções que unam inovação e sustentabilidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os resíduos sólidos têm se tornado uma preocupação crescente nas últimas décadas, visto que há um aumento significativo de sua geração em todo o mundo. O crescimento populacional acelerado, a urbanização intensa e a expansão das atividades econômicas são fatores que contribuem diretamente para esse fenômeno. Dentro desse panorama, a produção global de plásticos tem aumentado de maneira preocupante, refletindo uma parte significativa desse problema. (CHIERRITO et al., 2018)

Desde 1950, a produção de plástico virgem cresceu exponencialmente, aumentando cerca de 200 vezes. Desde os anos 2000, esse índice tem crescido 4% ao ano. Em 2016, a produção global de plástico atingiu 396 milhões de toneladas, representando aproximadamente 53 quilos de plástico por pessoa no planeta. Os impactos desse crescimento desenfreado são alarmantes. Caso nenhuma medida efetiva seja adotada, mais 104 milhões de toneladas de plástico poderão ser despejadas na natureza até 2030, conforme ilustra a Figura 1. (WWF, 2019)

Figura 1. Gráfico de crescimento da produção global de plástico virgem.



Fonte - adaptado de WWF, 2019.

Dentre os resíduos gerados em 2016, apenas 63% passaram por um ciclo controlado de tratamento, enquanto 37% não receberam tratamento adequado, sendo destinados a aterros sanitários, onde podem levar até 400 anos para se decompor ou para a incineração industrial, que é utilizada para tratar 15% dos resíduos plásticos, responsável pela emissão de 2,7 toneladas métricas de dióxido de carbono na atmosfera para cada tonelada métrica de resíduo plástico incinerado. Atualmente, apenas 20% dos resíduos plásticos mundiais são coletados para reciclagem, um terço dos resíduos plásticos acabam como poluição plástica. (WWF, 2019)

A busca pela diminuição do impacto causado pelo plástico é essencial. A transformação de resíduos plásticos em novos materiais não apenas ajuda a mitigar os problemas ambientais, mas também promove a economia circular, na qual os materiais são continuamente reaproveitados, e a geração de resíduos é minimizada. (GANDHI et al., 2021)

O desperdício de plástico tem sido uma preocupação crescente devido ao seu longo tempo de decomposição e aos danos causados aos ecossistemas. Nesse contexto, a reciclagem de plásticos é um processo essencial que envolve a coleta e separação de materiais usados, que são submetidos a transformações físicas e/ou químicas para serem reaproveitados. Silva e Neto (2016) e Caraschi e Leão (2002) explicam que o processo de reciclagem de resíduos plásticos pode ser feito de forma mecânica, química ou energética, sendo o primeiro o mais persistente no qual consiste na conversão do

material em grânulos que, através de processos de injeção, são disponibilizados como fonte de matéria-prima para produção de produtos manufaturados. Apesar do viés ambiental, a falta de preparo técnico no conhecimento de polímeros, aliados à falta de separação dos resíduos na fonte geradora levam ao comprometimento da qualidade do material produzido (CARASCHI e LEÃO, 2002; SILVA e NETO, 2016).

Atualmente há diversos tipos de polietilenos disponíveis no mercado. Silva e Neto (2016) e Coutinho, Mello e Santa Maria (2003) afirmam que o polietileno pode ser classificado como: Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD), Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM) e o Polietileno de Ultra Baixa Densidade (PEUBD), sendo cada um com características físicas de mecânicas distintas e dependentes das condições reacionais e o sistema catalítico empregado no processo de formação do material (COUTINHO, MELLO e SANTA MARIA, 2003; SILVA e NETO, 2016).

2.1 USO DE POLIETILENO NA FABRICAÇÃO DE CAIXA D'ÁGUA

O uso de plástico reciclável na fabricação de caixas d'água oferece benefícios ambientais. Já que, contribui para a redução de resíduos plásticos que são destinados ao meio ambiente, minimizando assim a quantidade de plástico descartado de maneiras inadequadas mencionadas anteriormente. Ao reutilizar materiais plásticos, como os polietilenos de alta e baixa densidade, há uma diminuição do consumo de recursos naturais e uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa. (WWF, 2019)

Embora o polietileno de baixa densidade linear (PEBDL) seja o material mais comum para a fabricação de caixas d'água, a produção de polietileno envolve o consumo de recursos fósseis e a emissão de gases de efeito estufa, impactando o meio ambiente. Além disso, se descartadas inadequadamente, as caixas d'água de polietileno podem levar séculos para se decompor. (TIGRE, 2021).

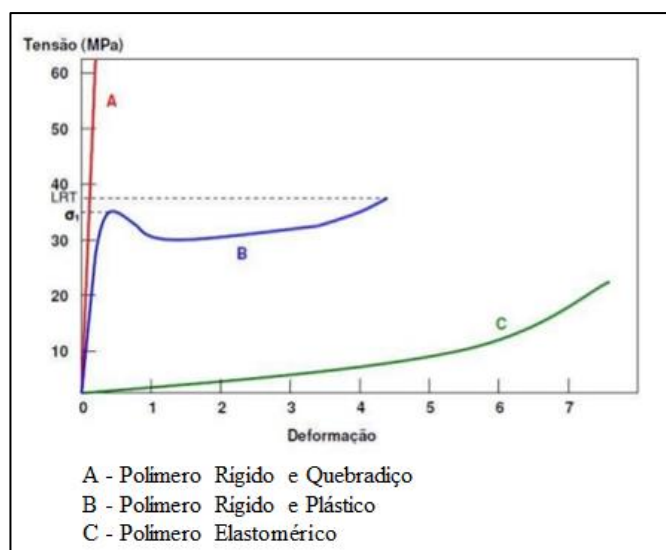
Além dos benefícios ambientais, utilizar plástico reciclável traz vantagens econômicas. O custo de produção com plásticos reciclados tende a ser mais baixo do que com o plástico novo, proporcionando uma alternativa mais acessível, principalmente para projetos de grande escala ou regiões com limitações orçamentárias. Ao incentivar a reutilização de materiais há uma movimentação na economia circular, minimizando o desperdício. Dessa forma, a produção de caixas d'água com plástico

reciclado não só é vantajosa para o meio ambiente, mas também oferece uma solução econômica e sustentável para a sociedade. (GANDHI et al., 2021)

2.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DOS POLÍMEROS

Devido a grande variedade dos materiais poliméricos, sua variação na fonte e variação no processo de formação de grânulos, bem como, processos de injeção, Caraschi e Leão (2002) demonstra a necessidade de fazer uma caracterização física e mecânica dos polímeros reciclados. Para compreender o comportamento mecânico dos polímeros, é essencial analisar detalhadamente suas propriedades mecânicas. Conforme ilustrado na Figura 2, a classificação do material pode ser realizada com base no comportamento da curva Tensão x Deformação.

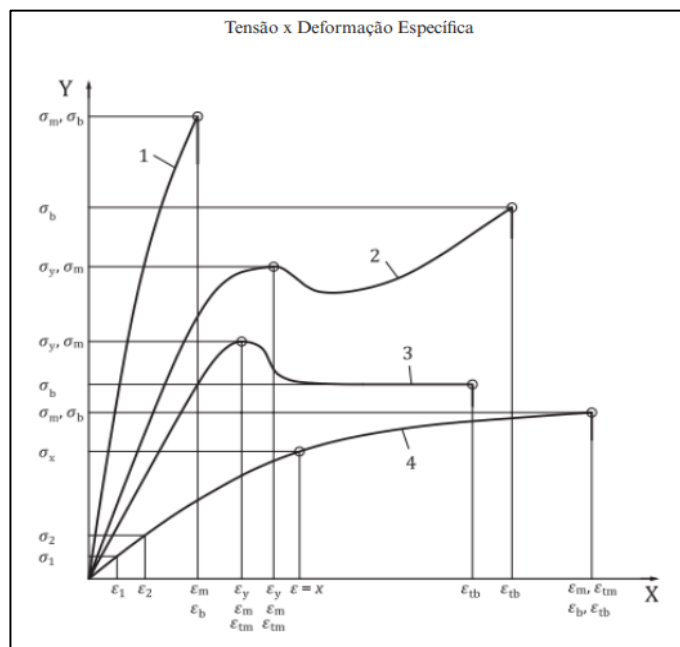
Figura 2. Classificação dos polímeros.



Fonte - Adaptado do livro CALLISTER, JR

Com base nas análises, foi possível enquadrar o polietileno reciclado obtido em um perfil adequado, considerando suas propriedades específicas. Esse processo foi fundamental para determinar a forma de se determinar o módulo de elasticidade, o limite de escoamento e o limite de resistência à tração, permitindo determinar o desempenho esperado do material em condições reais de uso e avaliar sua viabilidade como matéria-prima para a produção de caixas d'água. (ASTM D-638; CALLISTER, 2008). A Figura 2 ilustra os diversos tipos de curva característica de polímeros.

Figura 3. Comportamento polímero.



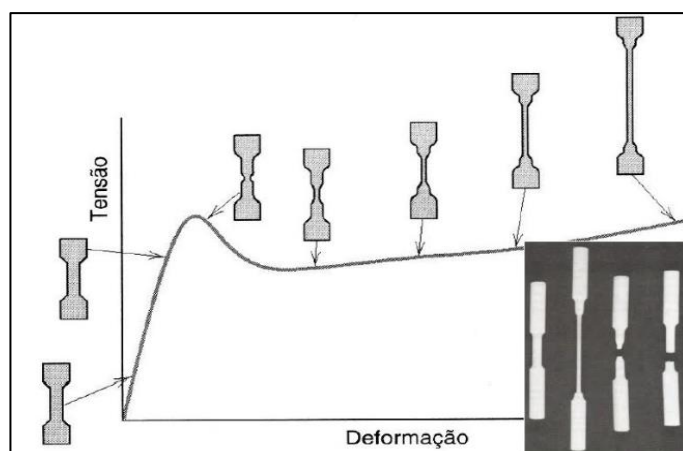
Fonte - adaptado de ISO 527, 2019.

A Figura 2, extraída da norma ISO 527, ilustra quatro diferentes comportamentos mecânicos de materiais poliméricos, cada um representando características distintas relacionadas à sua estrutura e propriedades:

- A curva 1 representa um material que se rompe sem apresentar deformação plástica significativa. Esse comportamento é típico de materiais frágeis, como vidro ou cerâmica, que suportam apenas pequenas deformações antes de falharem.
- A curva 2 mostra um material que possui um ponto de escoamento definido, seguido por um aumento na tensão antes do rompimento. Esse comportamento é característico de metais.
- A curva 3 representa um material com um ponto de escoamento claro, mas sem endurecimento por deformação. Após o escoamento, a tensão permanece constante ou diminui ligeiramente antes de o material atingir a ruptura. Esse comportamento é observado em polímeros ou metais sob certas condições de processamento.
- A curva 4 descreve um material que suporta grandes deformações antes de falhar, geralmente acima de 50% de deformação. Esse comportamento é típico de elastômeros, como borrachas, que exibem alta elasticidade e resistência à deformação.

A Figura 3 ilustra o comportamento do corpo de prova ao longo do processo de ensaio mecânico de tração, destacando as diferentes etapas e respostas do material à aplicação de tensão. Inicialmente, o corpo de prova apresenta uma deformação uniforme na fase elástica, onde a relação entre tensão e deformação é linear e o material retorna à sua forma original quando a carga é removida. Com o aumento da tensão, o material atinge o ponto de escoamento, marcando o início da deformação plástica. Nesse estágio, o corpo de prova começa a se deformar permanentemente, alterando suas dimensões sem que a tensão aumente significativamente. À medida que o ensaio avança, o material entra na fase de endurecimento por deformação, onde a tensão necessária para continuar a deformação aumenta, refletindo uma reorganização estrutural interna que torna o material mais resistente. Após atingir a tensão máxima, ocorre a estrição, caracterizada pela redução localizada da seção transversal do corpo de prova. Isso leva à queda gradual na tensão, culminando na ruptura do material, momento em que o corpo de prova falha e se divide. (CALLISTER, 2008)

Figura 4. Comportamento corpos de prova.



Fonte - adaptado de Callister (2008).

2.3. PROCESSO DE RECICLAGEM SECUNDÁRIA

A reciclagem pode ser classificada em quatro categorias principais, de acordo com a origem e o destino final do material reciclado. A reciclagem primária ocorre dentro da própria linha de produção, reaproveitando resíduos industriais. A reciclagem secundária, aplica-se a resíduos sólidos urbanos e industriais. A reciclagem terciária envolve processos químicos para decomposição dos materiais, permitindo sua reutilização na produção de novos polímeros. Por fim, a reciclagem quaternária consiste

na conversão térmica dos resíduos para recuperação energética. Neste estudo será utilizada a reciclagem secundária. (SARAIVA, 2020; ZANIN E MANCINI, 2015)

Na reciclagem secundária, a matéria-prima é obtida a partir de resíduos sólidos urbanos, que passam por um processo estruturado para reaproveitamento eficiente. O processo envolve a reutilização de polímeros já processados, como engradados e filmes *stretch* previamente utilizados. Inicialmente, realiza-se a triagem desses materiais, com o objetivo de separá-los e classificá-los adequadamente. Em seguida, os materiais selecionados passam pela etapa de trituração, que reduz seu tamanho a partículas menores, facilitando o processamento posterior. (CERQUEIRA, 2010; (SARAIVA, 2020)

Após a trituração, os fragmentos são encaminhados ao processo de extrusão. Nessa fase, o material é fundido e homogeneizado, assegurando uniformidade estrutural e resultando em granulados. Por fim, o material granulado é submetido à micronização, onde é reduzido a partículas ultrafinas, adequadas para incorporação no processo de moldagem por rotomoldagem. (SARAIVA, 2020)

2.4. ROTOMOLDAGEM

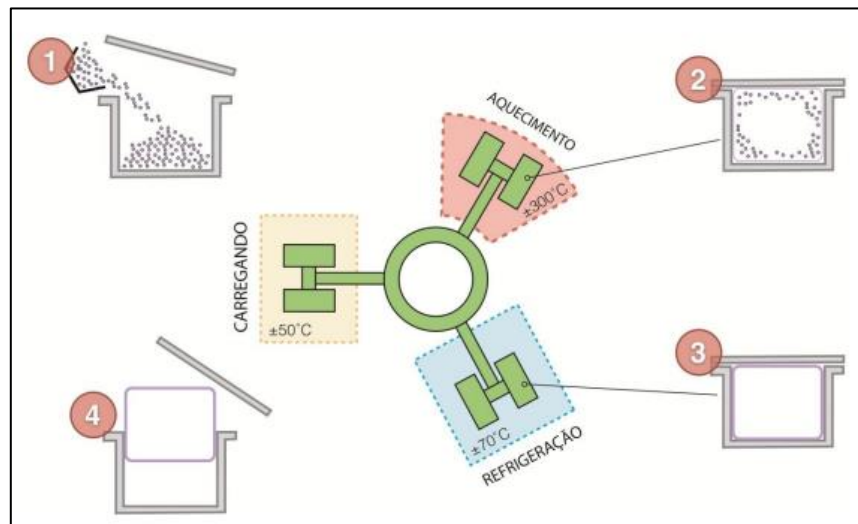
A rotomoldagem, também conhecida como moldagem rotacional, se diferencia de processos como a injeção, pois não utiliza pressão, mas sim o aquecimento do material e a rotação do molde, em conjunto com a gravidade, Segundo Marques (2015), a rotomoldagem é ideal para a fabricação de peças grandes, ocas e sem rebarbas. As peças produzidas por este processo podem variar em tamanho, formato e quantidade, com o processo sendo flexível e capaz de atender diferentes necessidades. Embora os custos de equipamentos e ferramentas sejam baixos, o tempo de processamento é maior e requer mais mão de obra. Esse processo utiliza principalmente termoplástico. Com o avanço do uso do polietileno em pó nos anos 1950, a indústria experimentou grande crescimento. (MEES, 2015)

Segundo Mees (2014) o processo de rotomoldagem (Figura 5) ocorre em quatro etapas principais:

1. Alimentação do molde com o polímero, já com a quantidade definida.
2. Aquecimento do molde, onde o polímero derrete e, com o movimento se molda à matriz.

3. Resfriamento, no qual a peça começa a solidificar enquanto o molde continua em movimento.
4. Desmoldagem, realizada em uma área especializada, onde a peça é retirada e deixada para resfriamento completo.

Figura 5. Processo de rotomoldagem: (1) é inserido uma quantidade específica de polímero com o molde em temperatura ambiente; (2) o molde começa a rotacionar bilateralmente, sendo inserido em uma ambiente com temperatura elevada; (3) o molde é transferido para um pré-resfriamento; (4) o produto é retirado do molde para o resfriamento total.



Fonte - Mees (2015).

3. MATERIAIS

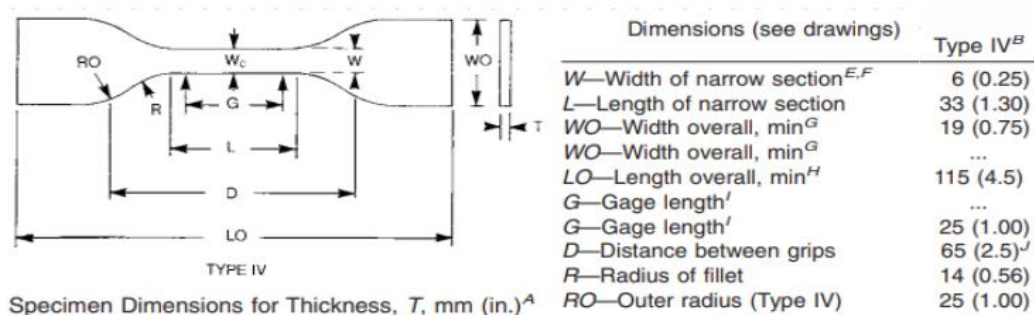
Para realizar o trabalho de pesquisa, a metodologia experimental foi dividida em cinco fases a se saber: 1 - Coofecção dos Corpos de Prova; 2 - Ensaio de caracterização física e mecânica do material; 3 - Ensaio de qualidade da água armazenada; 4 - Simulação Computacional, utilizando o Método dos Elementos Finitos; 5 - Análise de viabilidade técnica e econômica.

3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O material e a conformação dos corpos de prova de polietileno a ser analisado foram fornecidos pela empresa Dog Lar. Para esse trabalho, foram produzidos corpos de prova para ensaio de tração, determinação de densidade e armazenamento de água. Para a empresa fornecedora do material, o processo de formação de pellets foi feito a partir da mistura de materiais reciclados de polietileno de alta densidade misturado com polietileno de baixa densidade, passados pelo processo de rotomoldagem em molde.

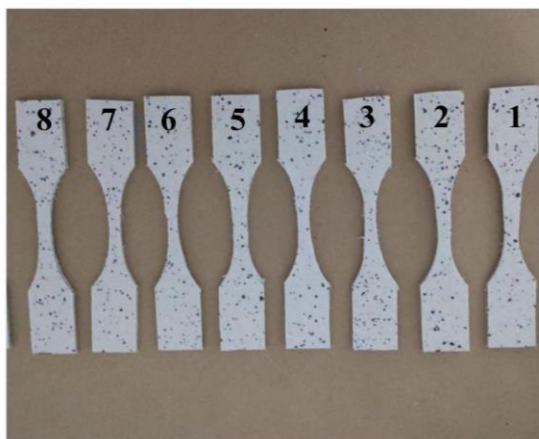
As dimensões para os corpos de prova para ensaio de esforço mecânico seguiram as recomendações feitas pela norma ASTM D638-10, referente a ensaios de tração em polímeros. As placas de onde foram retirados os corpos de prova apresentaram uma espessura de 3,5 mm. De acordo com a norma, a espessura enquadrava as dimensões de área no tipo type IV. A Figura 6 ilustra o formato e as dimensões de área estabelecida pela norma ASTM. Salienta-se que a norma exige 06 corpos de prova mínimos, porém, para esse trabalho de pesquisa, foram confeccionados 08 corpos de prova para ensaios de tração (Figura 7) usinados conforme as dimensões recomendadas por norma.

Figura 6. Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte - ASTM D-638 - 10.

Figura 7. Corpos de prova de polietileno reciclado para ensaio mecânico.



Fonte - acervo próprio.

Para a determinação da densidade do material, foi produzido um corpo de prova retangular maciço com dimensões de 2,5 cm de largura, 9,1 cm de comprimento e 2 cm de altura, conforme ilustrado na Figura 8. Essa etapa é essencial para correlacionar a densidade do material às suas características mecânicas e ao desempenho esperado em aplicações práticas.

Figura 8. Amostra produzida para o cálculo de densidade.



Fonte - acervo próprio.

3.2 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO MATERIAL

Os ensaios experimentais de tração deste projeto foram realizados no Laboratório de ensaios e Caracterização de Materiais (LECMat) do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos - campus Sorocaba (DEP-So).

A análise de densidade do material utilizou uma balança da marca modelo clink com capacidade de 10000g e precisão de 0,1g (Figura 12) para determinação de seu peso. A determinação do volume (V) do objeto foi obtido através da equação 01.

$$V = L \times h \times c \quad (01)$$

Onde:

V = Volume do corpo de prova [cm³]

L = Largura do corpo de prova [cm]

h = Altura do corpo de prova [cm]

c = Comprimento do corpo de prova [cm]

A equação 02 determina o cálculo da densidade do material analisado.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (02)$$

Onde:

ρ = Densidade do material [g/cm³]

m = peso do material [g]

Para o ensaio de esforço mecânico, foi realizado um ensaio de carregamento uniaxial de tração. Para tal, foi utilizado uma máquina universal de ensaios mecânicos

Emic DL30000N linha DL acoplado de célula de carga com capacidade de carga de 20 kN e sensores para aplicação da força, bem como, para medição de seu deslocamento. A aplicação da força sobre o corpo de prova foi realizada sob uma taxa de deformação de 5,0 mm/min, conforme estabelecido pela ASTM D638-10.

Os resultados coletados pelos sensores da célula de carga foram registrados em um datalogger e transferidos para o computador para posterior tratamento de dados para obtenção da sua curva característica. Para realizar esse tratamento de dados, foi utilizado o software Microsoft Excel, bem como seu delineamento matemático para determinação de sua curva característica, o qual foram obtidos através das equações 03 e 04:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (03)$$

Onde:

σ = Tensão [MPa]

F = Força aplicada [N]

A_0 = Área do corpo de prova [mm²]

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (04)$$

Onde:

ε = Deformação específica [mm/mm]

L = Comprimento útil do corpo de prova com a aplicação da carga [mm]

L_0 = Comprimento útil do corpo de prova sem a aplicação da carga [mm]

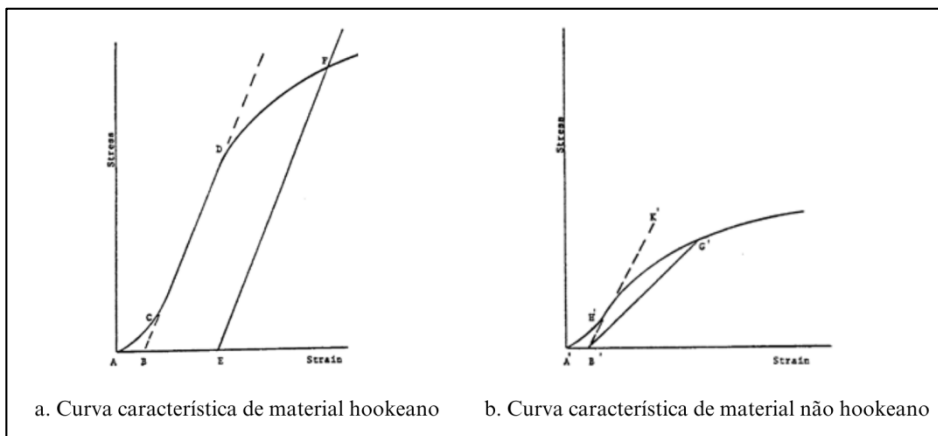
Para caracterização mecânica do material, determinou-se as constantes de módulo de elasticidade (E), tensão máxima ao escoamento (σ_{esc}) e a tensão máxima à tração (σ_{max}).

A definição do comportamento do gráfico obtido e a forma para determinação da tensão de escoamento, tensão máxima e módulo de elasticidade foram baseados nos comportamentos dos gráficos fornecidos pela norma ASTM D638-10.

Para a determinação do módulo de elasticidade, o comportamento da curva característica deve classificar o material como hookeano ou não hookeano (Figura 9). Após essa classificação visual, foi definida a seção da norma referente ao seu cálculo. Para curvas onde a região da linha elástica é linear (material Hookeano), o módulo de elasticidade deve ser calculado através de seu grau inclinação. Para situações onde a

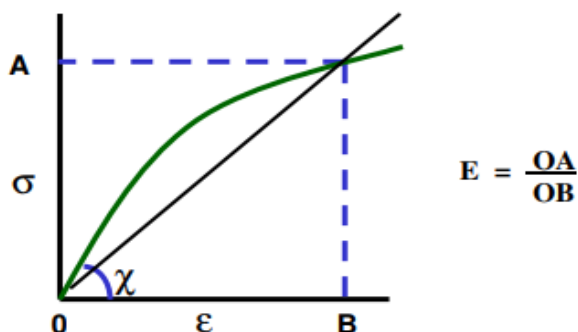
região elástica apresenta-se não-linear (material não Hookeano), o E deve ser calculado através do módulo tangente (Figura 10), presente na seção A2.16.

Figura 9. Tipos de curva característica de material polimérico.



Fonte - ASTM D638-10

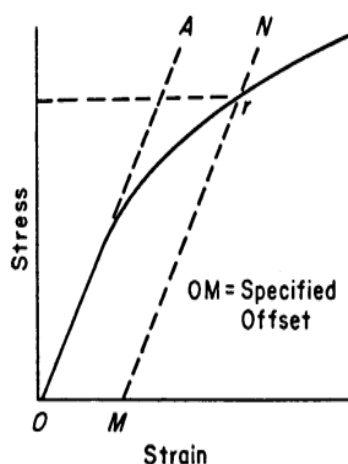
Figura 10. Cálculo do módulo de elasticidade pelo módulo tangente.



Fonte – adaptado de HIBBELER, 2004.

A determinação da tensão de escoamento foi feita de acordo com a metodologia da tensão de escoamento por desvio, apresentado na seção A2.6 da norma ASTM D638-10. Nesse caso, determinou-se uma curva paralela à curva característica com deformação de 0,2% e o ponto onde essa linha paralela encosta na curva, uma segunda linha perpendicular é plotada para determinar a tensão de escoamento, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11. Determinação da tensão de escoamento por desvio.



Fonte - ASTM D-638 - 10.

Por fim, a tensão máxima à tração ou também chamado como “tensão nominal” é definido pela seção A2.18 como a máxima tensão que o corpo suporta durante o ensaio de tração. Tal dado foi obtido observando os dados de tensão calculados para cada corpo de prova.

Os valores característicos de cada constante elástica para o material analisado foi definido pela média dos dados de cada ensaio. Além disso, foi calculado o desvio-padrão para se analisar a dispersão dos dados.

3.3 ENSAIO DE QUALIDADE DA ÁGUA ARMAZENADA

Para verificar a estabilidade química do plástico desenvolvido na produção de caixas de água, foi realizada uma análise de pH do fluido em contato com o material. O experimento foi conduzido no laboratório químico, localizado empresa Nouryon. Para análise foi utilizado o pHmetro da marca Metrohm, mostrado na Figura 12.

Figura 12. Registro do pHmetro utilizado.



a) Água armazenada no recipiente do material analisado. b) Amostra de controle da fonte de água.

Fonte - acervo próprio.

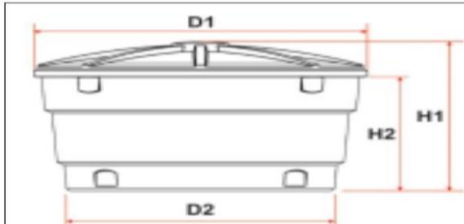
Para conferir os valores de pH, a amostra produzida foi preenchida com água (Figura 10), enquanto outro recipiente, um béquer, foi utilizado como controle, contendo apenas água nas mesmas condições. Após a realização da primeira medição de pH em ambos os recipientes, uma nova medição foi realizada após um intervalo de quinze minutos para avaliar possíveis alterações nos valores.

3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para efeitos de modelagem da caixa d'água no ambiente virtual, foi adotado as dimensões padrão de uma caixa d'água comercial de 300 litros (Figura 13). Os dados obtidos de caracterização mecânica e de densidade foram utilizados para verificar a viabilidade da produção de uma caixa de água utilizando polietileno reciclado e, para isto foi elaborado uma simulação técnica, utilizando o Método dos Elementos Finitos, que seguiu as dimensões de uma caixa de água padrão da marca Tigre. Este modelo foi escolhido devido à sua ampla aceitação no mercado e às especificações técnicas que atendem às necessidades residenciais e industriais. A simulação computacional seguiu as diretrizes estabelecidas por Cardoso et al., (2024) e utilizou-se do software AutoDesk Inventor. A simulação adotada foi do tipo estática com a base da caixa sendo adotada como base de apoio. A carga aplicada foi do tipo “pressão” e sua magnitude foi de 0,105 Mpa aplicado em todas as superfícies internas, simulando a pior situação de carregamento que o produto possa enfrentar. A malha aplicada no processo de simulação foi de 38040 nós e 19176 elementos. O modelo virtual da caixa d'água usado

na simulação computacional, bem como a aplicação de carga e a malha aplicada estão ilustrados na Figura 14.

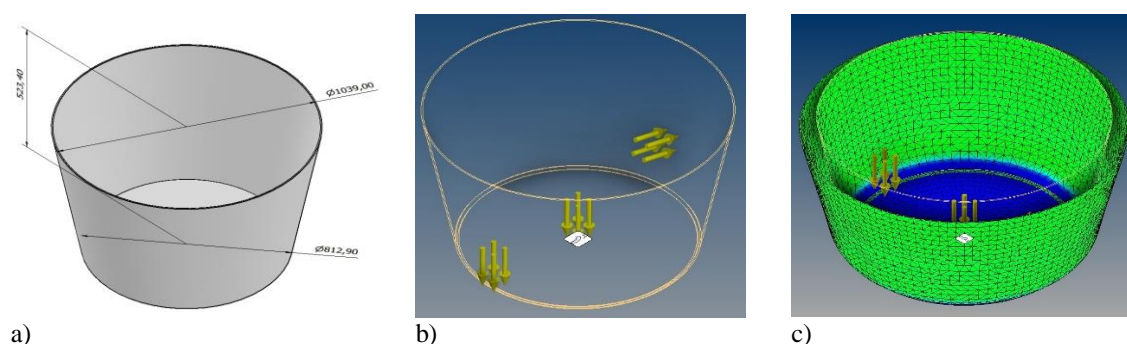
Figura 13. Dimensões utilizadas para a simulação da caixa de água.



Dimensões	Valor	Unidade de medida
Volume	310	litros
Espessura	5	mm
D1	1039	mm
D2	812,9	mm
H1	644	mm
H2	523,4	mm

Fonte - adaptado de TIGRE, 2021.

Figura 14. Modelo virtual da caixa d'água usado na simulação computacional: a) Dimensões da caixa; b) Aplicação da carga nas faces internas; c) Malha de simulação adotado.



Fonte - acervo próprio.

A partir das simulações realizadas, foi possível determinar as dimensões ideais para a produção da caixa d'água utilizando polietileno reciclado. Para alcançar esse objetivo, foram realizadas três simulações distintas, cada uma com diferentes configurações e variáveis. Durante as análises, foram avaliados parâmetros essenciais para garantir a eficiência e a segurança do projeto. Os valores de massa, tensão de Von Mises, Primeira tensão principal (tensão máxima) e a Terceira tensão principal (tensão de escoamento), que indicam os limites máximos suportados pelo material antes de deformações permanentes ou falhas. E o fator de segurança, por sua vez, foi analisado para assegurar que o projeto mantenha uma margem de segurança adequada em condições ideais de operação.

3.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICO E ECONÔMICA

Finalmente, para determinar o uso do material analisado, uma análise técnica e econômica foi realizada. Para análise técnica, os resultados da simulação computacional, juntamente com os dados de coeficiente de segurança, bem como, o

peso do material foram analisados e discutidos para determinar a possibilidade ou não do uso do polímero analisado. Além disso, a qualidade armazenada da água foi levada em questão através da análise de acidez para determinar se o produto não altera as condições do produto armazenado. Para determinar a viabilidade econômica, foi determinado junto a empresa Dog Lar o custo de produção da caixa d'água e, este dado foi comparado com o valor comercial das caixas d'água de mesma capacidade.

4. RESULTADOS

A Figura 15 mostra o corpo sendo pesado para determinação de sua densidade. Com a amostra produzida e utilizando a balança já mencionada durante o relatório, foi possível determinar a massa da amostra, que apresentou um valor de 22 g. O valor foi obtido após a estabilização da leitura na balança, para que fosse garantida uma maior precisão e confiabilidade na medição.

Figura 15. Registro da pesagem da amostra.

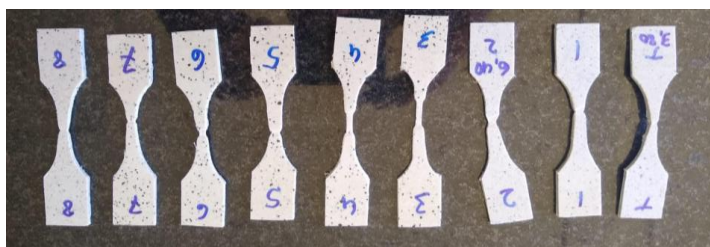


Fonte - Acervo próprio.

Com os dados necessários previamente obtidos, foi possível calcular a densidade da amostra utilizando a relação entre a massa e o volume previamente detalhado. O volume, calculado a partir das dimensões previamente coletadas, foi de 28,86 cm³. Sendo assim, a densidade do material foi de 0,76 g/cm³.

A Figura 16 mostra o estado de deformação plástica dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração.

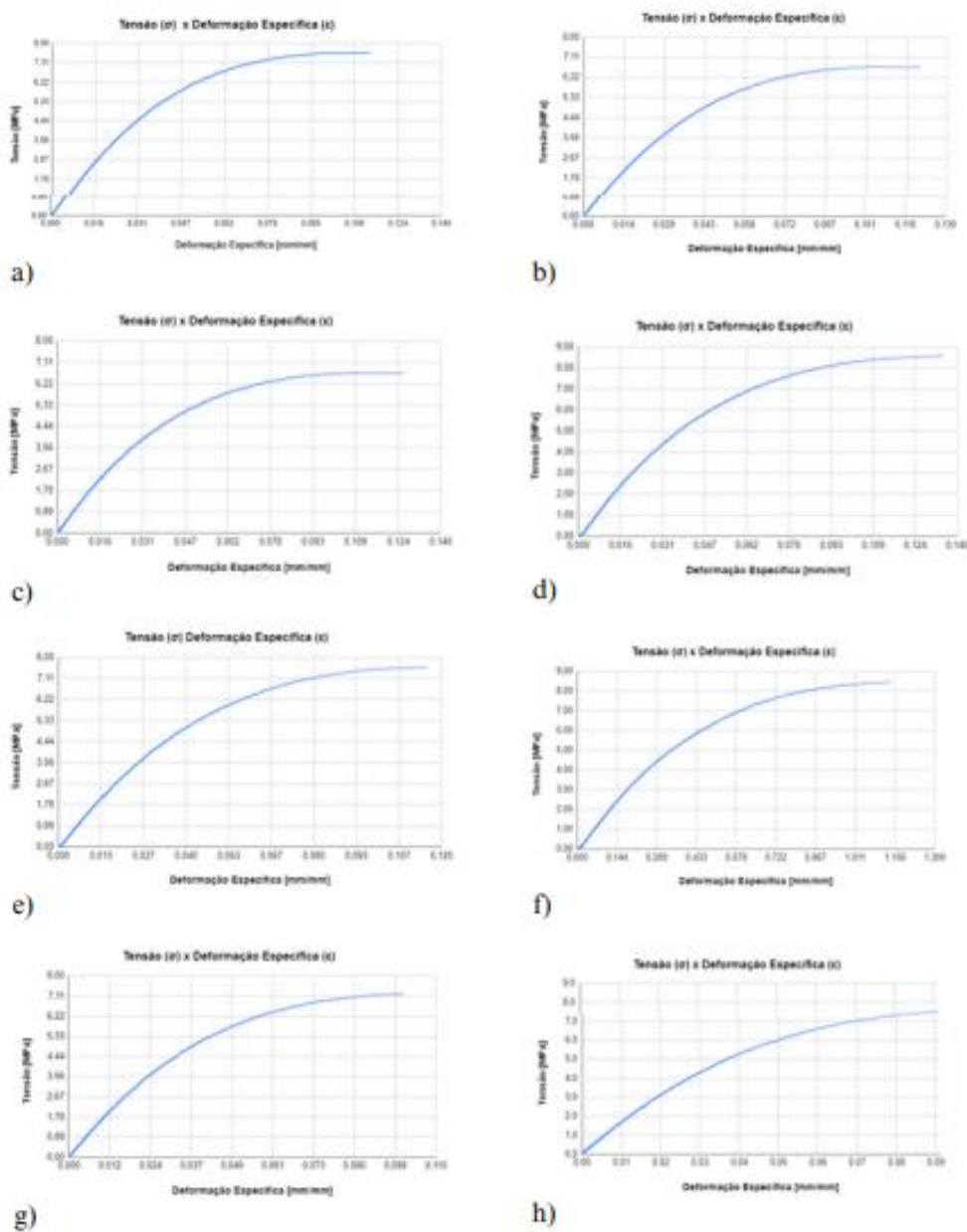
Figura 16. Corpos de prova após a realização dos ensaios mecânicos.



Fonte - acervo próprio.

A Figura 17 mostra os gráficos de tensão x deformação específica obtida para cada corpo de prova ensaiado.

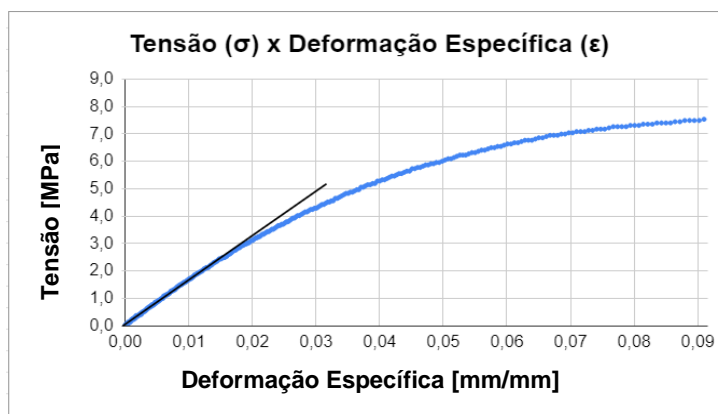
Figura 17. Curva de Tensão (MPa) x Deformação Específica (mm/mm) para o POLIETILENO RECICLADO: a) CP1; b) CP2; c) CP3; d) CP4; e) CP5; f) CP6; g) CP7; h) CP8.



Fonte - Acervo próprio.

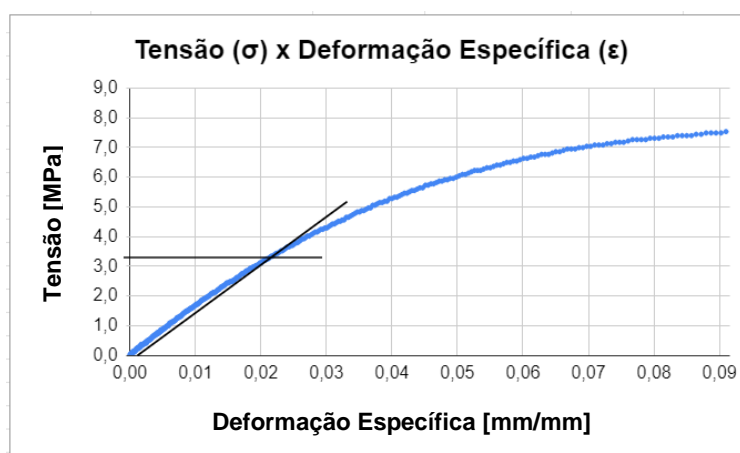
Com os dados da curva de tensão x deformação específica, foi possível obter os dados das constantes do material analisado. Observando o comportamento da curva, no qual apresenta a região elástica com curvatura, ao invés de um segmento de reta, logo, segundo a norma ASTM D638-10, o polímero analisado ficou classificado como um material com região não hookeana. Logo, o cálculo do módulo de elasticidade foi realizado através da linha tangente e seguindo as recomendações da seção A1.3 da norma aplicada. Além disso, a curva indicou que a tensão de escoamento deve ser calculada através da técnica do limite de deslocamento com escoamento, como recomenda a seção A2.6 da norma e, para o caso desse trabalho de pesquisa, foi admitido uma deformação de 0,2% para plotar a linha paralela. A Figura 18 ilustra o exemplo da plotagem da linha tangente para determinação do módulo de elasticidade e, a Figura 19 ilustra a plotagem da linha paralela para determinação da tensão de escoamento. A Tabela 01 apresenta os dados de constantes elásticas obtidas para o Polietileno reciclado analisado.

Figura 18. Linha tangente para determinação do módulo de elasticidade.



Fonte - Acervo próprio.

Figura 19. Linha paralela para determinação da tensão de escoamento.



Fonte - acervo próprio.

Tabela 1. Resultados encontrados.

Corpo de prova	Parâmetros		
	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)
CP1	123,148	3,900	7,542
CP2	65,424	3,450	8,583
CP2	157,131	3,250	8,444
CP4	80,407	4,100	8,444
CP5	118,313	3,950	7,580
CP6	162,367	3,000	6,696
CP7	189,630	3,500	7,235
CP8	214,321	3,250	7,530
Média	140,140	3,475	7,561
Desvio Padrão	51,599	0,393	0,671

Fonte - acervo próprio.

Analisando a Figura 18 e as curvas de tensão x deformação específica apresentados na Figura 19, nota-se que os corpos de prova apresentaram uma deformação plástica visível, o que denota visualmente que o Polietileno reciclado analisado seja classificado como dúctil, rígido e plástico. Os corpos de prova 3 e 4 apresentaram o maior índice de deformação com uma maior área de empescoamento que os demais. Nos demais, a deformação plástica foi menor. Considerando o desvio padrão obtido nos ensaios, observa-se que o módulo de elasticidade apresentou uma alta dispersão. As tensões características apresentaram uma maior estabilidade dos dados.

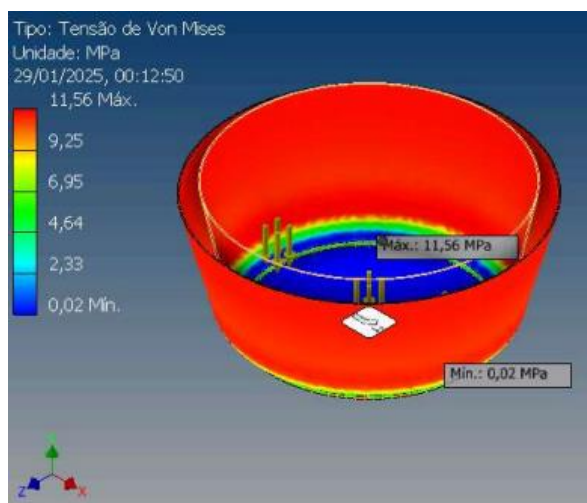
Os resultados característicos de propriedade mecânica e de densidade foram plotados no software AutoDesk Inventor e sua simulação realizada. Para esse trabalho realizou-se uma simulação com a espessura comercial e outras duas, considerando a espessura que suporte as tensões combinadas (Von Misses) e as tensões principais (máxima e de escoamento). Os parâmetros obtidos para cada uma das espessuras estão apresentados na Tabela 2. As Figuras 20, 21 e 22 mostram os resultados de simulação computacional para as espessuras adotadas nesse trabalho de pesquisa. Os parâmetros obtidos para cada uma das espessuras estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados das simulações.

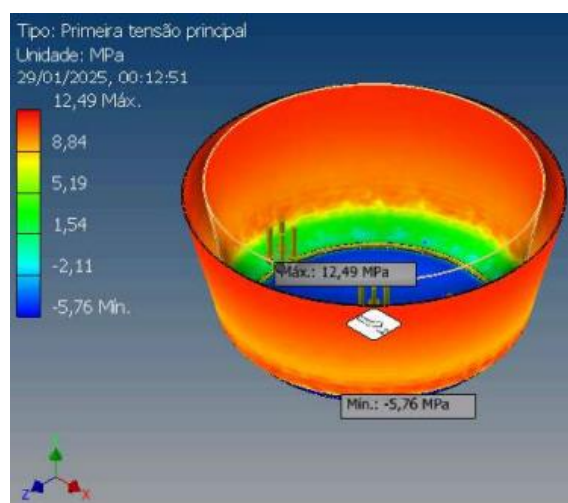
Parâmetros	Dimensões TIGRE		
	Espessura 5 mm	Espessura 24 mm	Espessura 45 mm
Massa (kg)	7,84	36,12	64,90
Tensão de Von Mises (MPa)	11,56	3,15	1,52
Primeira Tensão principal (MPa)	12,48	3,45	1,61
Terceira Tensão principal (MPa)	4,62	0,73	0,30
Fator de segurança	0,3	1,10	2,29

Fonte - acervo próprio.

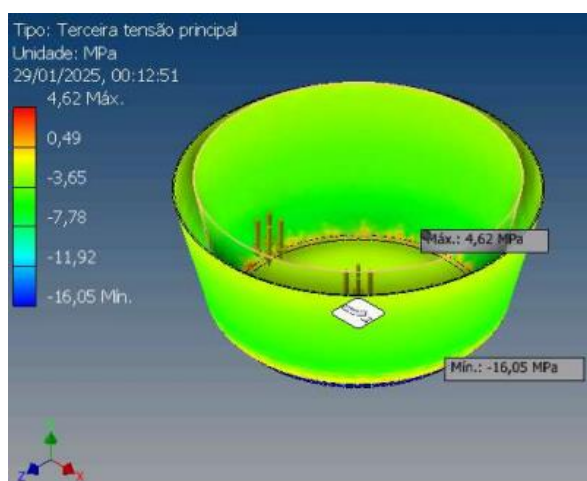
Figura 20. Resultados gráficos da espessura 5 mm.



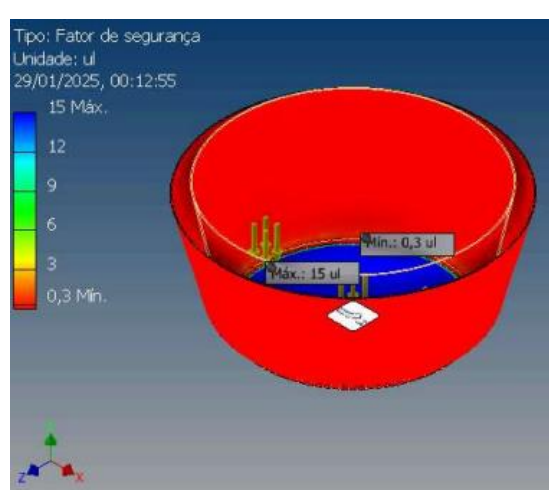
Tensões de Von Mises



Tensão de escoamento



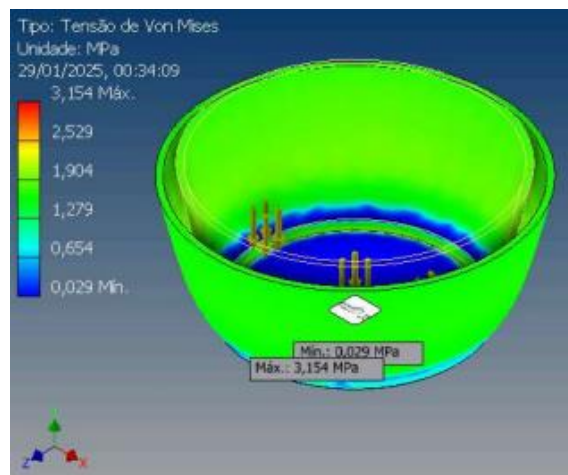
Tensão máxima



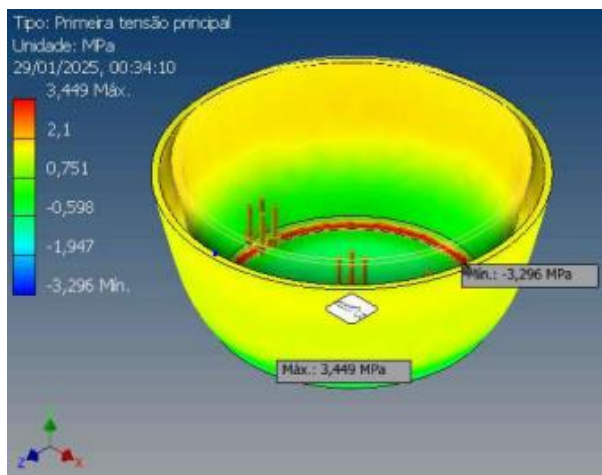
Fator de segurança

Fonte - acervo próprio

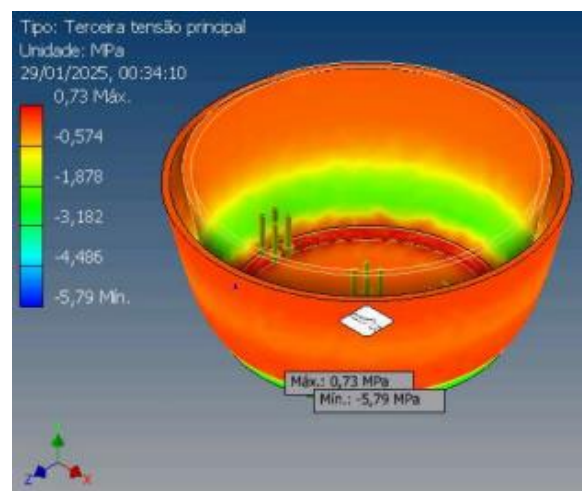
Figura 21. Resultados gráficos da espessura 24 mm.



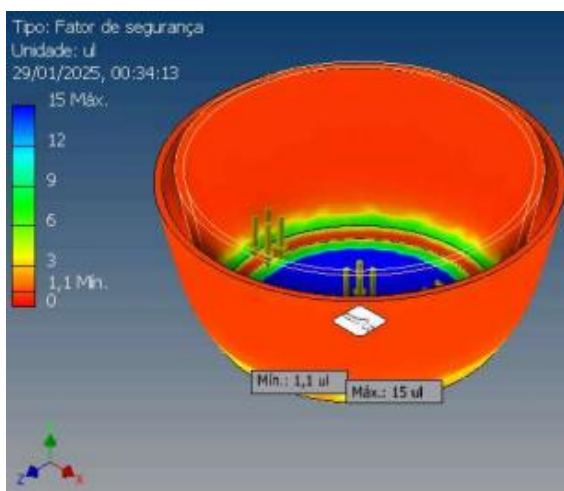
Tensões de Von Mises



Tensão de escoamento



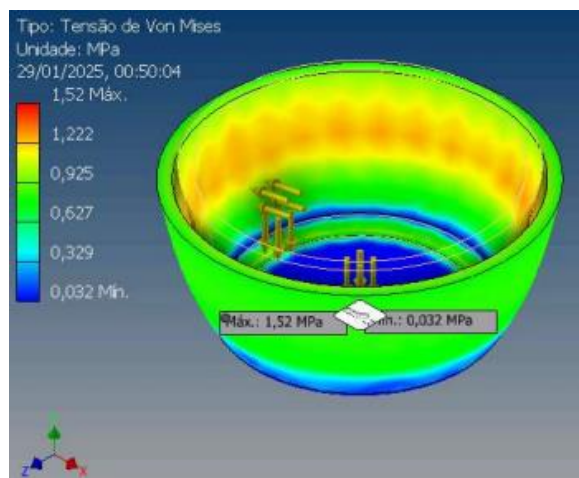
Tensão máxima



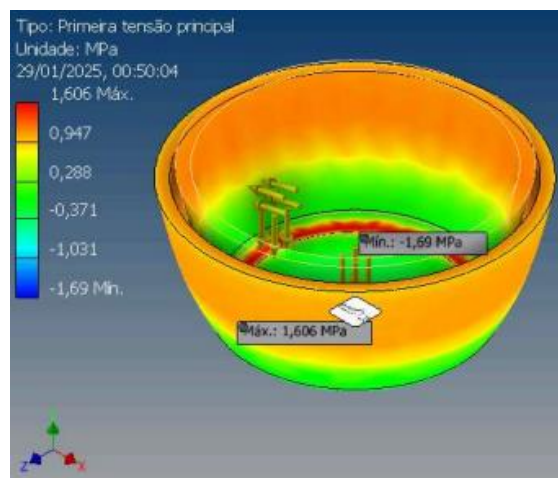
Fator de segurança

Fonte - acervo próprio

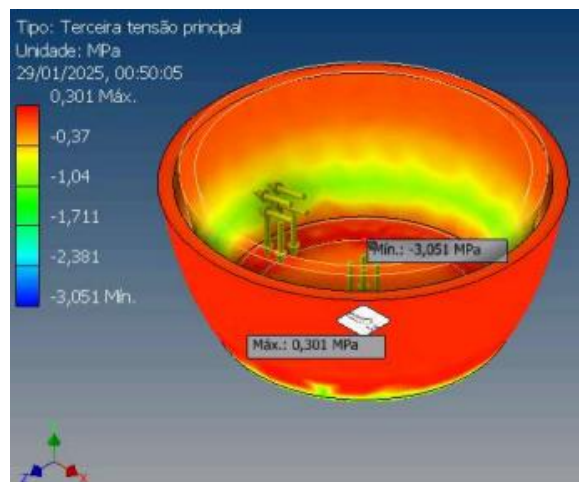
Figura 22. Resultados gráficos da espessura 45 mm.



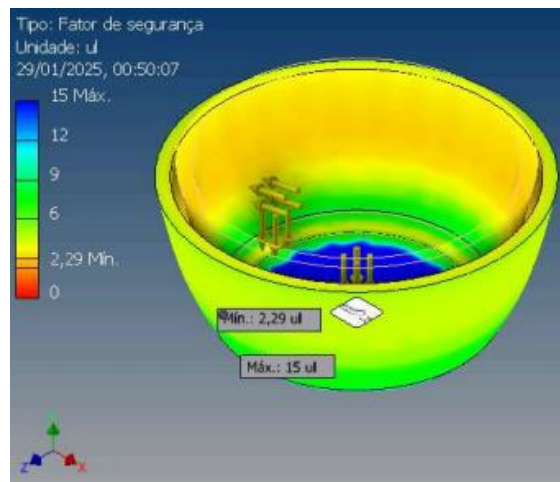
Tensões de Von Mises



Tensão de escoamento



Tensão máxima



Fator de segurança

Fonte - acervo próprio.

Para a espessura de 5 mm (comercial), o fator de segurança foi de 0,30, ficando abaixo de 1,0. Comparando as tensões combinadas, normal máxima e de cisalhamento, todas ficaram acima da tensão de escoamento do polímero. Sendo assim, essa espessura para caixa d'água não apresenta segurança alguma, sendo que de toda a forma a caixa d'água se romperia. Para a espessura de 24 mm, o fator de segurança ficou em 1,10 e sua tensão de Von Misses abaixo da tensão de escoamento, porém, a tensão normal máxima indica que o corpo possa apresentar rupturas (deformações plásticas). Para a espessura de 45 mm, o fator de segurança foi de 2,29 e as tensões de Von Misses, normal máxima e de cisalhamento indicam que o corpo de prova não se rompe.

Os resultados obtidos das medições de pH estão apresentados na Tabela 3. A tabela mostra os valores de pH registrados tanto para a água contida na amostra produzida quanto para o béquer utilizado como controle. As medições foram realizadas inicialmente e após um intervalo de quinze minutos, permitindo a análise comparativa das alterações no pH.

Tabela 3. Resultados do pH.

	Controle	Amostra produzida
pH inicial	6,810	6,750
pH final	6,230	6,250

Fonte - acervo próprio.

Utilizando as espessuras definidas na simulação, o peso da caixa d'água de 24 mm foi de 36 kg aproximadamente, e de 64 kg para a espessura de 45 mm. Com base no custo do material utilizado, estipulado em R\$ 12,00 por quilograma, e comparando com o preço de referência de uma caixa d'água de 310 litros da marca TIGRE, comercializada a R\$ 249,80, foi possível calcular os custos aproximados de produção para as caixas d'água projetadas nas diferentes simulações. Para realizar essa análise, foram considerados os valores de massa obtidos para cada espessura simulada. A Tabela 4 indica os valores comerciais das caixas d'água comercial e de material reciclado.

Tabela 4. Preço das caixas de água.

	Caixa d'água comercial		
	Espessura 5 mm	Espessura 24 mm	Espessura 45 mm
Preço (reais)	249,8	433,44	778,80

Fonte - acervo próprio.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando os dados de propriedades mecânicas, Coutinho, Mello e Santa Maria (2003) indicam que para o PEAD e o PEBD, a tensão de resistência ao escoamento varia de aproximadamente 25,0 a 40,0 MPa e de 6,2 a 11,5 MPa, respectivamente. Na mesma linha de análise, a resistência à tração máxima é de 45 MPa para PEAD e de 6,9 a 16 MPa para o PEBD. Da mesma forma, a densidade gira em torno de 0,95 a 0,97 g/cm³ para o PEAD e de 0,912 a 0,925 g/cm³ para o PEBD. O módulo de elasticidade gira em torno de 0,102 a 0,24 GPa para o PEBD e de 0,9 a 1,55 GPa para o PEAD. Os

autores afirmam que essa variação é dependente do processo de formação e da ramificação da cadeia polimérica. Comparando-se com os valores característicos obtidos nos ensaios, nota-se que seus índices característicos físicos e mecânicos ficaram abaixo dos materiais comerciais. Pisanu (2008) afirma que no processo de reciclagem feito por rotomoldagem, há a ocorrência da perda de qualidade das propriedades do material reciclado. Excesso de calor, reconfiguração das cadeias poliméricas no processo de cristalização formando regiões com maior índice de cadeias amorfas do que cristalizadas explicam esse efeito redutor (CALLISTER, 2006; COUTINHO, MELLO E SANTA MARIA, 2003; PISANU, 2008).

Nesse trabalho, a densidade do polímero foi de $0,76 \text{ g/cm}^3$, a tensão de escoamento ficou na casa de $3,47 \text{ MPa}$, a tensão máxima à tração foi de $7,56 \text{ MPa}$ e o módulo de elasticidade obtido foi de $0,14 \text{ GPa}$. Comparando os valores obtidos nos ensaios com os valores de literatura, nota-se que a densidade do material reciclado foi menor que a densidade do PEBD, bem como, as tensões de escoamento máximas e de tração máxima. O módulo de elasticidade ficou em um valor intermediário entre o PEAD e o PEBD. Além das explicações apresentadas pelos autores, há de se salientar problemas ocorridos nos ensaios experimentais que possam ter reduzido as constantes do material analisado. Em termos de condução experimental, a conformação dos corpos de prova para o ensaio de tração possa da forma como foi feito, possa ter provocado regiões com tensão residual, o que diminui sua resistência. Além disso, outro fato que possa ter influenciado nos resultados de caracterização pode estar concentrado na matéria prima plástica (*pellets*) reciclada utilizada para se fazer o corpo de prova, onde o mesmo possa apresentar uma grande variação de condição material, bem como sua qualidade. Mesmo com esses problemas apresentados, o uso da média dos valores das foi considerado satisfatório para ser aplicado na simulação computacional devido ao fato de que a dispersão dos dados estar entre 7% e 11% para as tensões máximas a tração e de escoamento, por se tratar de um material com características viscoelásticas. O módulo de elasticidade teve uma dispersão alta, cerca de 30%, porém, seu valor ficou próximo aos valores obtidos por literatura.

Com relação a simulação computacional, as representações gráficas permitiram observar as diferenças de desempenho entre as simulações e visualizar o comportamento estrutural da caixa d'água em resposta às condições aplicadas. Os resultados mostraram que as dimensões comerciais não permitiram que o material reciclado pudesse ser aplicado, exigindo maior robustez que, nesse caso, foi feito

através do aumento da espessura. A espessura de 24 mm apresentou valores adequados para suportar as tensões combinadas de Von Mises, representando uma possibilidade mais otimizada com um fator de segurança superior a 1, indicando que a configuração é estruturalmente viável e dentro dos limites de segurança do projeto, porém, para essa espessura, quando analisada a tensão máxima, o valor foi inferior, o que causaria rupturas. Salienta-se que esse tipo de análise de coeficiente de segurança representa uma solução equilibrada para projetos estruturais. Nesse caso, sempre é sugerido que se faça testes físicos reais para garantir a segurança do produto. Por outro lado, a espessura de 45 mm apresentou um comportamento ainda mais seguro, com todos os parâmetros analisados permanecendo dentro dos limites tolerados pelo polietileno reciclado. Embora essa opção utilize maior quantidade de material, ela oferece uma margem de segurança adicional, tornando-a ideal e mais segura.

Com base nos dados de pH obtidos, constatou-se que não houveram variações significativas nos valores, já que analisando os valores obtidos do controle e da amostra, após os 15 minutos iniciais, ambos os valores apresentaram variações entre 9% e 8%, respectivamente, o que indica que o material não causará alterações químicas no fluido armazenado, ou seja, pode ser uma escolha viável e segura para projeto de reservatório de água. Isso é importante, pois materiais que alteram o pH podem comprometer a potabilidade da água, tornando-a inadequada para consumo.

Ainda na determinação do peso do produto, obtido por dados de simulação, notou-se que o aumento de massa foi muito superior ao peso das caixas convencionais, em mais de 400%. Apesar desse aumento, o seu uso não compromete projetos estruturais onde possam estar instalados. Embora a espessura de 24 mm seja mais econômica, ela pode comprometer a resistência do produto. No entanto, essa espessura ainda pode ser considerada adequada para as condições normais de uso. Dessa forma, a espessura intermediária é viável, permitindo a produção de um produto acessível financeiramente, sem comprometer drasticamente a qualidade e a funcionalidade do reservatório. As características mecânicas do polietileno reciclado também indicaram que o material tem resistência suficiente para ser utilizado na fabricação de caixas d'água, atendendo aos requisitos de durabilidade e resistência a impactos, fatores essenciais para garantir a duração e segurança do produto. A combinação desses resultados demonstra que o polietileno reciclado é uma opção viável, do ponto de vista técnico, para a produção de reservatórios de água.

6. CONCLUSÃO

Conclui-se que o uso do polietileno reciclado obtido nesse trabalho de pesquisa representou uma solução sustentável, econômica e tecnicamente adequada para a produção de caixas d'água, porém, economicamente não é tão atrativo devido ao custo final do produto, um material reciclado. A robustez necessária para se garantir a segurança do produto aumentou em 4 vezes o seu peso em comparação com as caixas d'água convencionais. O produto não influencia na qualidade da água armazenada. Porém, devido a processos de reciclagem em que a mão de obra e os processos não são bem definidos, deve-se criar protocolo para se obter um material reciclado com melhor qualidade e, assim, diminuir a espessura do produto. Visto isso, na situação atual, a robustez do material não permite obter um produto competitivo com as caixas d'água convencionais. Essa abordagem deve alinhar a eficiência estrutural com viabilidade financeira, ao mesmo tempo em que promove a valorização de materiais recicláveis, contribuindo para a redução do impacto ambiental.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO E MINERAÇÃO – ABREMA. Panorama: informações e atualizações sobre o setor. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 02 jan. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D638-10: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.

CALLISTER, W. D., JR. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Cap. 7.13, 7.14 e 15.1 a 15.5.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos. *Acta Scientiarum Technology*, v. 24, n. 6, p. 1599-1602, 2002. DOI: 10.4025/actascitechnol.v24i0.2462.

CARDOSO, K. C.; ALBIERO, D.; BIASI, A. R.; GAZZOLA, J.; DAL FABBRO, I. M. Analysis of laser triangulation technique applied to experimental deformation of farm machinery elements. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 56, e202391780, 2025. DOI: 10.5935/1806-6690.20250006.

CERQUEIRA, V. Reciclagem de Polímeros: Questões Sócio-ambientais em Relação ao Desenvolvimento de Produtos. Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design-P&D DESIGN, 2010.

CHIERRITO-ARRUDA, Eduardo; ROSA, Ana Luisa Martins; PACCOLA, Edneia Aparecida de Souza; MACUCH, Regiane da Silva; GROSSI-MILANI, Rute. Pro-environmental behavior and recycling: literature review and policy considerations. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 21, 2018, e02093. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0209r3vu18L4AO>. Acesso em: 5 jan. 2025.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2003.

GANDHI, N.; FARFARAS, N.; WANG, N.-H. L.; CHEN, W.-T. Life Cycle Assessment of Recycling High-Density Polyethylene Plastic Waste. *Journal of Renewable Materials*, v. 9, n. 8, p. 1463-1483, 2021. Disponível em: <https://www.techscience.com/jrm/v9n8/42123/html>. Acesso em: 2 jan. 2025.

HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. Disponível em: <https://archive.org/details/resistencia-dos-materiais-r-c-hibbeler-7/page/65/mode/2up>. Acesso em: 02 jan. 2025.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 527: Plastics — Determination of tensile properties. 2019.

MARQUES, Matheus Diego. Comparação entre os processos de fabricação: rotomoldagem e sopro. 2015. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2015.

MEES, Edimilson Fabricio. Projeto de pia urbana desenvolvida por rotomoldagem. 2015. Monografia (Bacharelado em Design) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2015.

MELLO, L. M. R.; ARTAXO, P.; MOREIRA, L. L. Interação entre saúde e meio ambiente: reflexões e propostas de políticas públicas intersetoriais para o Brasil. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 41-64, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/rzWM4SZG9B4Xx7SCqZQnvmb/>. Acesso em: 2 jan. 2025.

PISANU, L. Influência do polietileno reciclado nas propriedades de peças obtidas pelo processo de rotomoldagem. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SARAIVA, Ana Paula de Souza. Reciclagem do polietileno: um estudo de caso da implementação de melhorias no processo industrial de uma empresa na região de Joanópolis - SP. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) - Centro Universitário Campo Limpo Paulista, Campo Limpo Paulista, 2020. Disponível em: <https://www.unifaccamp.edu.br/repository/artigo/arquivo/05042024063422.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2025.

SILVA, E. A.; MOITA NETO, J. M. Possibilidades de melhorias ambientais no processo de reciclagem do polietileno. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v. 26, n. especial, p. 49-54, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1954>.

TIGRE. Ficha técnica: caixa d'água. 2021. Disponível em: https://tigrecombr-prod.s3.amazonaws.com/default/files/produtos/ficha-tecnica/FT_Caixa%20D%27%20A%CC%81gua_2021.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024

ZANIN, M.; MANCINI, S. D. Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia. SciELO-EdUFSCar, 2015. ISBN 8576004577.

WWF. Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização. Gland, Suíça: WWF - Fundo Mundial para a Natureza, 2019. Disponível em: <www.panda.org>. Acesso em: 2 nov. 2024