

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

TAINÁ KRAMEL

AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS MECÂNICOS DE COMPRESSÃO E FLEXÃO EM
TUBOS DE PVC

Joinville

2022

TAINÁ KRAMEL

AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS MECÂNICOS DE COMPRESSÃO E FLEXÃO EM
TUBOS DE PVC

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Mikowski

Joinville

2022

TAINÁ KRAMEL

AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS MECÂNICOS DE COMPRESSÃO E FLEXÃO EM
TUBOS DE PVC

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 16 de março de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Mikowski
Orientador / Presidente

Prof. Dr. Breno Salgado Barra
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª. Dr. Derce, de Oliveira Souza Recouvreux
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a meus pais, Renaldo e Liamar Kramel, meus irmãos e, não menos importante, meu noivo Giovanni F. Weiss.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a esta universidade, aos docentes que passaram pela minha jornada durante a graduação, em especial ao meu querido orientador Professor Dr. Alexandre Mikowski, por acreditar em mim e me ajudar a crescer academicamente, me oportunizando a participar de diversas colaborações acadêmicas e científicas.

Dedico e agradeço ao Laboratório de Modelagem e Análise de Dados (LabMAD), aos colegas e professores que fazem parte do mesmo, por serem fiéis aos seus interesses científicos e entusiasmos.

Agradeço meus pais, Renaldo Kramel e Liamar R. S. Kramel, pelo suporte, paciência, amor e, principalmente, por acreditar em mim. Aos meus irmãos, Ruan, Ramon e Vitor Kramel, por ser quem eles são, presentes, prestativos e amorosos. Agradeço meus avós e cunhada por sempre torcerem por mim.

A Giovanni F. Weiss, agradeço pelo amor, carinho, companheirismo e paciência, obrigada por estar ao meu lado. A Jorge, Mirian, Vinícius e Michael Weiss por serem uma segunda família para mim.

A Busa Engenharia Ltda, ao engenheiro Murilo Busarello e ao arquiteto Julian R. Constantino por me aceitarem como estagiária, me auxiliando e ensinando conhecimentos práticos da vivência da engenharia em obra.

Agradeço ao Dr. Milton Domingos Michél, técnico do Laboratório de Ensaios Mecânicos, do Departamento de Engenharia dos Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

Gratidão aos colegas de jornada e todos que direta ou indiretamente me auxiliaram durante minha graduação.

"Ama-se mais o que se conquista com esforço"

(Benjamin Disraeli)

RESUMO

O policloreto de vinila é um polímero amplamente empregado na construção civil, principalmente nos sistemas hidrossanitários, como em tubulações. Nesse contexto, os tubos de PVC são utilizados no transporte de água e esgoto em edificações e, como para qualquer material na engenharia, é interessante ter-se uma caracterização mecânica para garantir confiabilidade e economia de recursos na aplicação dos mesmos em projetos. Realizou-se uma pesquisa nessa área e verificou-se uma falta significativa de trabalhos explorando a temática, dessa forma, apresenta-se neste estudo uma pesquisa que se propôs a sanar, até certo grau, tal deficiência com experimentos explorando os esforços mecânicos de tubos de PVC de 50 mm de diâmetro teórico por meio de ensaios de compressão diametral e flexão por três pontos. Os testes foram realizados em laboratório em corpos de provas de 150 mm e 127 mm de comprimento normatizados pelas normas NBR 14272 e ASTM D790, bem como, a verificação das grandezas físicas, como: massa, comprimento, diâmetro interno, diâmetro externo, volume e densidade. Empregou-se a estatística descritiva para análise dos resultados constatando baixa dispersão entre os dados obtidos. Para a compressão diametral, força e deslocamento máximo foram atingidos, bem como a curva que descreve o comportamento elástico e elástico-plástico do material, resultando em deformações permanentes mesmo que os corpos de provas tiveram uma restituição elástica de 86,68%. Na flexão por três pontos a tensão e deformação máxima ficaram na ordem de 7,783 MPa e 0,959 mm/mm, respectivamente.

Palavras-chave: Tubo de Policloreto de Vinila. Ensaio de Compressão Diametral. Ensaio de Flexão por Três Pontos. Esforço Mecânico.

ABSTRACT

Polyvinyl chloride is a polymer widely used in civil construction, especially in hydrosanitary systems, such as in piping. In this context, PVC pipes are used to transport water and sewage in buildings and, as for any other material in engineering, it is advantageous to have a mechanical characterization to ensure reliability and resource savings in their application in projects. A research was carried out in this area and there was a significant lack of works exploring the theme, thus, it is presented in this work a research that proposed to remedy, to a certain degree, such deficiency with experiments exploring the mechanical stresses of tubes. of 50 mm theoretical diameter PVC by means of diametric compression and three-point bending tests. The tests were carried out in the laboratory on specimens of 150 mm and 127 mm in length standardized by the NBR 14272 and ASTM D790 standards, as well as the verification of physical quantities, such as: mass, length, internal diameter, external diameter, volume and density. Descriptive statistics were used to analyze the results, noting low dispersion between the data obtained. For diametral compression, maximum force and displacement were reached, as well as the curve that describes the elastic and plastic-elastic behavior of the material, resulting in permanent deformations even though the specimens had an elastic restitution of 86.68%. In three-point bending, the maximum stress and strain were in the order of 7.783 MPa and 0.959 mm/mm, respectively.

Keywords: Polyvinyl Chloride Tube. Diameter Compression Test. Three Point Flexural Test. Mechanical Strain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura molecular do PVC.....	20
Figura 2 – Tempo aproximado de vida em serviço de produtos de PVC em função do percentual de aplicação.....	21
Figura 3 – Aplicação de piso vinílico numa sala de estar.....	22
Figura 4 – Tubo de PVC para transporte de água.....	23
Figura 5 – Compressão e tração sobre uma peça.....	24
Figura 6 – Gráfico típico para ensaio de compressão e de tração.....	25
Figura 7 – Tipos de ensaio de flexão, com (a) o ensaio de flexão em 3 pontos, (B) o ensaio de flexão em 4 pontos e (c) o método de engaste.....	27
Figura 8 – Curva característica para diferentes seções transversais de corpo de prova.....	28
Figura 09 – Publicações por ano na plataforma SciELO no tema PVC.....	29
Figura 10 – Conferência do diâmetro externo após ensaio de compressão diametral em tubos de PVC sem e com orientação molecular.....	31
Figura 11 – Resultado gráfico do ensaio de compressão diametral em tubos de PVC com e sem orientação molecular.....	31
Figura 12 – Ensaio mecânico de flexão para um corpo anelar.....	32
Figura 13 – Comparativo entre ensaio de flexão e simulação numérica para um corpo anelar de PVC ao longo do tempo.....	33
Figura 14 – Corte em torno mecânico dos tubos para ensaio, sendo em (A) a preparação para o corte, no (B) o processo de corte e em (C) as amostras dos corpos de provas prontas.....	35
Figura 15 – Lixas d'água usadas no lixamento das extremidades dos corpos de provas.....	35
Figura 16 – Averiguação do nível em um corpo de prova.....	36
Figura 17 – Conferência da massa dos corpos de provas, no qual (A) tem-se o erro do aparelho e (B) a massa padronizada Ohaus de 200 g.....	37
Figura 18 – Corpos de prova acondicionados.....	37
Figura 19 – Paquímetro digital utilizado para conferência do comprimento e diâmetros dos corpos de prova.....	38
Figura 20 – Máquina de ensaios universais Shimadzu AG-I Autograph.....	46
Figura 21 – Sequência do ensaio de compressão diametral. (A) Aproximação dos pratos rígidos ao corpo de prova. (B) Corpos de provas presos entre os pratos com força menor que 5 kN e na	

eminência da compressão. (C) Compressão do corpo de prova próximo a deformação máxima, e (D) deformação máxima atingida ao final do ensaio conforme norma NBR 14272.....	47
Figura 22 – Gráfico típico da força aplicada (kN) pelo deslocamento (mm).....	49
Figura 23 – Corpo de prova após 22 dias de ensaio. (A) Linhas de estiramento (linhas brancas) no corpo de prova. (B) Vista lateral do tubo com destaque a deformação diametral visível. (C) Vista frontal com ovalização do tubo.....	51
Figura 24 – Corpo de prova preso pela ponteira na eminência do ensaio de flexão por três.....	52
Figura 25 – Sequência do ensaio de flexão por três pontos. (A) Início do ensaio com apresentação das primeiras deformações aparentes no corpo de prova. (B) Efeito <i>Whitening</i> na região da aplicação da força. (C) Deformação máxima atingida no ensaio, vista frontal. (D) Vista diagonal da deformação máxima atingida no corpo de prova.....	53
Figura 26 – Força aplicada pelo deslocamento no ensaio de flexão por três pontos.....	55
Figura 27 – Representação esquemática das variáveis da análise da tensão e deformação na força máxima.....	56
Figura 28 – Corpo de prova após 22 dias de ensaio de flexão por três pontos. (A) Vista superior do corpo de prova. (B) Vista lateral do corpo de prova.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das massas dos corpos de provas...	42
Tabela 2 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do comprimento dos corpos de provas.....	43
Tabela 3 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do diâmetro externo e interno dos corpos de provas.....	43
Tabela 4 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do volume dos corpos de provas....	44
Tabela 5 – Densidade média, desvio padrão, coeficiente de variação e densidade máxima e mínima para os corpos de prova de 127 e 150 mm.....	44
Tabela 6 – Densidade máxima e mínima dos corpos de provas comparados a literatura.....	45
Tabela 7 – Força máxima atingida no ensaio de compressão diametral.....	48
Tabela 8 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação para a força máxima no ensaio de compressão diametral.....	48
Tabela 9 – Comparação dos diâmetros externos após o ensaio e com 22 dias.....	50
Tabela 10 – Força máxima e deslocamento máximo do ensaio de flexão por três pontos, com valores da média (\bar{x}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (cv) destes dados.....	54
Tabela 11 – Tensão (σ) e deformação (ε) na força máxima no ensaio de flexão por três pontos, com valores média (\bar{x}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (cv) destes dados.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – área

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

BDTD – Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações

CP – Corpo de prova

CRE – Coeficiente de restituição elástica

CTJ – Centro Tecnológico de Joinville

cv – Coeficiente de variação

D – Diâmetro maior

d – Diâmetro menor

D_e – Diâmetro maior imediatamente após o ensaio

D_{22} – Diâmetro maior após 22 dias de ensaio

Δl – Deflexão máxima

ε – Tensão na força máxima

F – Força

h – Altura do cilindro

h_o – Diâmetro inicial do tubo

h_f – Diâmetro final do tubo

L – Distância

L_s – Distância entre suportes

LabMAD – Laboratório de Modelagem e Análise de Dados

m – Massa

n – Número de observações

NBR – Norma Técnica Brasileira

P – Carga

ρ – Densidade

PVC – Policloreto de Vinila

s – Desvio padrão

σ/ε – Deformação na força máxima

UEPG – Universidade Estadual de Ponta Grossa

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

V – Volume

x – Variáveis

\bar{x} – Média

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. Objetivo Geral.....	16
1.1.2. Objetivos Específicos.....	16
1.2. PROCEDIMENTO PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	16
1.3. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA	17
1.4. RELEVÂNCIA DO TEMA.....	17
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1. POLICLORETO DE VINILA - PVC.....	20
2.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS DE PVC	23
2.2.1. Esforço Mecânico de Compressão.....	24
2.2.2. Esforço Mecânico de Flexão	26
2.3. PESQUISA DE ESTUDOS RELACIONADOS.....	28
2.3.1 Análise Bibliométrica e Pesquisa Bibliográfica	28
2.3.2 Síntese dos Estudos Relacionados	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1. TUBOS DE PVC	34
3.2. PREPARO DOS CORPOS DE PROVA.....	34
3.4. ENSAIOS MECÂNICOS.....	38
3.4.1 Compressão Diametral.....	39
3.4.2 Flexão por Três Pontos.....	39
3.5. TRATAMENTO DE DADOS.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1. MASSAS DOS CORPOS DE PROVAS	42
4.2. COMPRIMENTOS E DIÂMETROS DOS CORPOS DE PROVAS	42
4.3. DENSIDADE DO PVC.....	44
4.4. COMPRESSÃO.....	45
4.5. FLEXÃO	52
5. CONCLUSÃO.....	58
5.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

O policloreto de vinila, mais comumente conhecido como PVC, é uma importante classe de polímeros que, tendo altas forças intermoleculares advindo da polaridade do átomo de cloro, tende a melhores propriedades mecânicas (CANEVAROLO JÚNIOR, 2013). O PVC é amplamente empregado na construção civil, desde tubos para instalações hidrossanitárias a revestimentos, estima-se que 70% da produção do PVC é consumida pela construção civil no Brasil (CARLOS, 2007).

Um tubo de PVC é uma estrutura que, quando submetida a esforços mecânicos, pode apresentar comportamento elástico, plástico e fratura, sendo analisado, estudado e testado parâmetros similares aos usados em materiais metálicos (CALLISTER JÚNIOR, 2002). Para estudar o comportamento mecânico de tubos de PVC, ensaios mecânicos devem ser realizados em corpos de prova normatizados.

Conhecer a propriedade mecânica de um material é um importante recurso classificatório dos limites de tensão e exposição que o mesmo pode estar sujeito. Os ensaios mecânicos de flexão e compressão são métodos que empregam uma energia mecânica suficiente para provocar deformações elásticas, plásticas e que podem levar à ruptura, ambos permitem conhecer resistências máximas sobre o corpo de prova (CALLISTER JÚNIOR, 2002).

A escassez de literatura sobre as especificidades limite das propriedades mecânicas de compressão diametral e de flexão por três pontos e em tubos de PVC, motivou o estudo do tema. Além do que, na América Latina, usando como base a plataforma SciELO, SciELO Books, Portal Domínio Público, Latindex, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações e Catálogo de Teses e Dissertações, não se encontrou um estudo que reúna a aplicação dos ensaios de compressão e flexão para estudo dos esforços mecânicos de tubos de PVC.

Visando preencher essa lacuna, este trabalho apresenta uma pesquisa experimental que realizou ensaios mecânicos de compressão diametral e flexão por três pontos em corpos de prova de tubo de PVC sem orientação molecular de 50 mm de diâmetro, seguindo a norma ASTM D790 e NBR 14272, sendo ensaiados no Laboratório de Ensaios Mecânicos, do Departamento de Engenharia dos Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática da carência de estudos do comportamento mecânico de tubos do PVC, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral é avaliar os esforços mecânicos de corpos de prova de tubos de policloreto de vinila (PVC) de 50 mm de diâmetro externo, quando submetidos aos ensaios mecânicos de compressão diametral e flexão por três pontos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Preparar os corpos de provas em tubos de PVC sem orientação molecular, conforme norma ABNT NBR 14272 e ASTM D790, para realizar ensaios mecânicos de compressão e flexão;
- Mensurar os corpos de provas em tubos de PVC pelas grandezas físicas: massa, comprimento, diâmetro externo e interno, volume e densidade;
- Realizar ensaios mecânicos de compressão diametral e flexão por três pontos em corpos de prova de tubos de PVC, mensurando os esforços mecânicos máximos atuantes, assim como calculando o coeficiente de restituição no esforço de compressão e a tensão e deformação máxima no esforço de flexão.

1.2. PROCEDIMENTO PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Nesta pesquisa, o material para ensaio foi adquirido em loja de materiais de construção, buscando avaliar o típico material aplicado na realidade da construção civil. O corte dos corpos de provas foi realizado em uma empresa de tornearia mecânica na cidade de Pouso Redondo (SC), visando garantir precisão nos comprimentos e paralelismo das faces dos corpos de prova.

Dois ensaios serão realizados, de compressão diametral e flexão por três pontos, no qual o primeiro ensaio, os corpos de provas terão 150 mm de comprimento e no segundo, terão 127 mm de comprimento, sendo para ambos o diâmetro externo de 50 mm, esses valores foram adotados seguindo os parâmetros das normas NBR 14272 e ASTM D790.

No preparo para os ensaios, realizou-se a mensuração dos corpos de provas quanto seu comprimento, diâmetro interno e externo, massa e nível das faces, utilizando paquímetro digital,

balança de precisão e nível de bolhas, no Laboratório Multidisciplinar e Laboratório de Modelagem e Análise de Dados (LabMAD) do Campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Com os dados dos corpos de provas, foram calculados a média, desvio padrão e coeficiente de variação, das grandezas físicas.

Seguiu-se os procedimentos descritos nas normas NBR 14272 e ASTM D790 para os ensaios mecânicos de compressão diametral e flexão por três pontos, respectivamente, dos quais foram ensaiados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia dos Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Analisou-se graficamente as relações de força por deslocamento, determinando os regimes elásticos e plásticos, bem como a avaliação estatística de média, desvio padrão e coeficiente de variação para as forças e deslocamentos máximos obtidos durante o ensaio.

Em compressão diametral verificou-se a restituição elástica do tubo, determinando o coeficiente de restituição elástica, e a presença de linhas de estiramento. Na flexão por três pontos, o efeito *whitening* e estiramento foram observados no corpo de prova, bem como, determinado a tensão e deformação máxima para o ponto de força e deslocamento máximo atingido no ensaio.

1.3. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

Na realização deste trabalho de conclusão de curso, limitou-se na execução e interpretação dos resultados obtidos em laboratório, sendo válidas para condições aplicadas neste trabalho. O desenvolvimento desta pesquisa foi dado em quatro ambientes diferentes, sendo a primeira da compra do material em uma loja de materiais de construção, segundo numa empresa de tornearia mecânica na cidade de Pouso Redondo (SC), terceira nos Laboratório Multidisciplinar e Laboratório de Modelagem e Análise de Dados (LabMAD) no Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e a última no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia dos Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

1.4. RELEVÂNCIA DO TEMA

A presença massiva do plástico está atrelada a descoberta de um produto residual da indústria petroquímica na metade do século XX, na qual poderia ser usado para fazer PVC, estimando-se que entre 1950 a 2017, 9,2 bilhões de toneladas de plástico foram produzidas

(FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL, 2020). Dos produtos fabricados de PVC, até 40% são de tubos para condução de água e esgoto no sistema hidrossanitário, deste modo torna-se inegável sua importância para a construção civil (LIMA JÚNIOR, 2016). Os resíduos de PVC representam 0,8% do peso total do lixo domiciliar, sendo possível sua reciclagem (HIPOLITO; HIPOLITO; LOPES, 2013).

Os tubos de PVC para finalidade hidrossanitária apresentam características que superam tubos de outros materiais, como o de metal, sendo estas: menor custo, maior resistência à corrosão, parede interna com menor rugosidade aumentando a velocidade do fluxo, não são condutores de eletricidade e menor densidade em comparação aos tubos cerâmicos e de ferro galvanizado (HIPOLITO; HIPOLITO; LOPES, 2013).

Desta forma, o estudo das propriedades mecânicas dos tubos de PVC se mostram de suma relevância, como o caso do ensaio de compressão diametral e ensaio de flexão por três pontos, sendo o primeiro um importante indicativo do comportamento do tubo de PVC em situações de colapso por vácuo interno ou tensões externas, já o segundo, para análise da deformação do tubo mediante a aplicação de tensão de flexão (LIMA JÚNIOR, 2016).

Na literatura, uma escassez de estudos nesta área foi encontrada, principalmente quando aplicado a tubos de PVC com diâmetro específico, desta forma, este trabalho visa o auxílio do entendimento do comportamento mecânico de tubos de PVC para instalação hidrossanitária de água fria com 50 mm de diâmetro aplicados a ensaios de compressão diametral e de flexão de três pontos.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura e organização do presente trabalho seguirá conforme o indicado abaixo.

Capítulo 1: introdução e contextualização geral, descrevendo os objetivos, procedimentos para o alcance dos objetivos, delimitação da pesquisa e a relevância do tema.

Capítulo 2: fundamentação teórica do tema, abordando as propriedades e aplicações do PVC e sintetizando estudos relacionados.

Capítulo 3: aborda os materiais e métodos empregados para realização do estudo, descrevendo o preparo dos corpos de provas e a metodologia de tratamento de dados.

Capítulo 4: discute e apresenta os resultados obtidos dos ensaios mecânicos de compressão diametral e flexão por três pontos.

Capítulo 5: apresenta as conclusões da pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

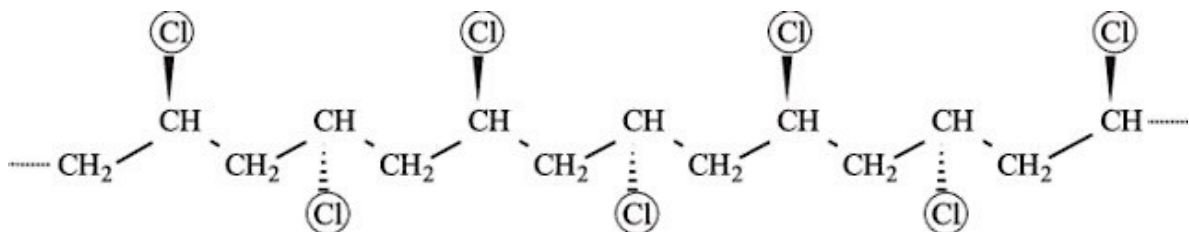
Nesta seção serão apresentados os fundamentos teóricos sobre o policloreto de vinila (PVC), do comportamento mecânico de tubos de PVC e de aspectos técnicos e teóricos da temática envolvida. Para tanto, foi realizada uma pesquisa documental e bibliográfica, sendo a primeira advinda de fontes de órgãos públicos e instituições privadas. Já a pesquisa bibliográfica é realizada com base em livros e artigos científicos (GIL, 2009).

2.1. POLICLORETO DE VINILA - PVC

O Policloreto de Vinila (PVC) é um material amplamente usado na engenharia civil, do que se trata de tubos e conexões, forros, esquadrias e pisos, passando a ser fabricado a partir de 1954 no Brasil pela Indústrias Químicas Materazzo (FORINI, 2008 apud SOUZA, 2015). A composição química do PVC é dividida em 57% de cloro e 43% de origem petrolífera. É um polímero com macromoléculas de derivados naturais ou sintéticos, das quais, são obtidas por meio de reações químicas de polimerização, formando estruturas moleculares a partir de repetição de pequenas unidades (SOUZA, 2015).

Por apresentar monômeros clorados, tem boas propriedades mecânicas dadas pelas forças intermoleculares por conta da polaridade do cloro, bem como resistência à propagação de chamas (CANEVAROLO JÚNIOR, 2013). A Figura 1 ilustra a estrutura molecular do PVC, observando-se as moléculas de cloro (Cl), hidrogênio (H) e carbono (C).

Figura 1 – Estrutura molecular do PVC



Fonte: Alves e Rodolfo Junior (2006, p. 166).

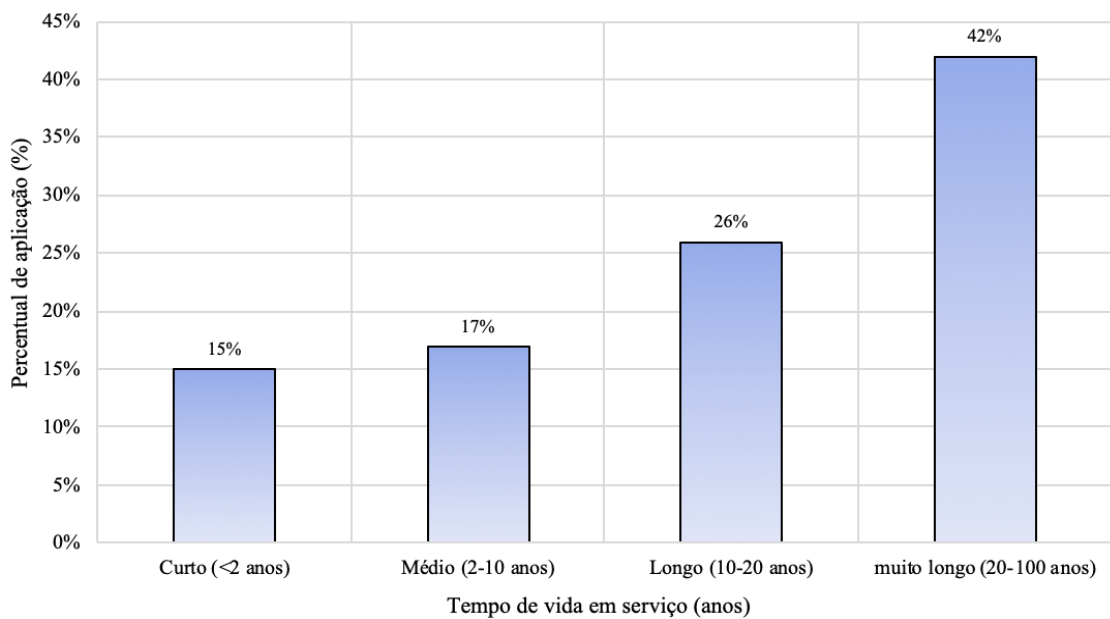
Tubos de PVC com orientação molecular, possuem propriedades mecânicas melhoradas, tal como uma elevada resistência à tração e ao impacto (MEDEIROS; WIEBECK, 2013). A orientação ocorre pelo alinhamento das cadeias macromoleculares numa direção ou

plano determinado, para obter esse efeito deve-se aquecer o polímero acima de 75°C (temperatura vítrea) para as cadeias amorfas adquirirem mobilidade, sendo deformadas e estiradas, resfriando-as rapidamente (LIMA JÚNIOR, 2016). Comercialmente, para instalações hidrossanitárias, tubos de PVC sem orientação molecular são os mais empregados.

Na construção civil, tubos de alta pressão interna tem sua resistência mecânica ampliada, conseqüentemente, possuem maior custo. De modo geral, o PVC é um material de baixo custo, exceto no caso citado anteriormente, com condições de ser reaproveitado e reciclado, podendo chegar a uma vida útil de mais de 40 anos, dependendo das circunstâncias que está submetido (SOUZA, 2015).

Martins (2003), descreve a relação do tempo de vida em serviço do PVC de acordo com sua aplicação, sendo que, para embalagens, artigos médico-hospitalares, materiais de escritórios e frascos, tem-se uma vida útil curta; para brinquedos, calçados e estofados, um tempo de vida médio; e um longo tempo de vida em serviço para laminados, chapas, fios, cabos, pisos e aplicações automobilísticas. Já um tempo de vida muito longo, encontra-se os tubos, conexões, mangueiras, perfis e cabos. Na Figura 2, Martins (2003) ilustra o tempo da vida útil de cada grupo com seu respectivo percentual de duração.

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



Fonte: adaptado de Martins (2003, p. 13).

Na engenharia civil, de modo geral, os tubos de PVC estão amplamente presentes, representando um total de 70% do consumo exclusivo para esse setor (CARLOS, 2007). A aplicação do PVC mais conhecida são os tubos e conexões para água e esgoto, porém, outras aplicações ganham cada vez mais espaço, como janelas e portas, eletrodutos, forros, pisos e fios. A Figura 3 mostra um piso vinílico aplicado numa sala de estar.

Figura 3 - Aplicação de piso vinílico numa sala de estar



Fonte: Autora (2022).

Os tubos, conexões e dutos para água e esgoto representam de 30% a 40% do PVC fabricado no Brasil (CARLOS, 2007). Dentro desse setor, também constam rufos e calhas para transporte de água pluvial. Sua fabricação por extrusão dá a possibilidade de peças longas, sem a necessidade de juntas, diminuindo o risco de vazamentos (CARLOS, 2007). A Figura 4, ilustra um tubo de PVC na sua aplicação mais usual, para transporte de água.

Figura 4 – Tubo de PVC para transporte de água



Fonte: Autora (2022).

2.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS DE PVC

Conforme Canevarolo Júnior (2013), classificam-se os polímeros de acordo com seu comportamento mecânico, sendo esses: plástico, termoplástico, termorrígidos, baroplásticos, elastômeros e fibras. O PVC se enquadra no grupo dos termoplásticos, dos quais, com o aumento da temperatura e pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados. Esse processo pode ser realizado repetidas vezes, fazendo que seja reciclado, sendo que a partir de 68°C ocorre a deflexão térmica e 75°C para transição vítrea (LIMA JÚNIOR, 2016).

Os tubos finos apresentam menor resistência a impactos e a transientes hidráulicos, requerendo atenção principalmente quando aplicados em adutoras de água sob pressão e travessias de vias com tráfego intenso (LIMA JÚNIOR, 2016). Além dessas características específicas citadas, tem-se as propriedades mecânicas das quais todos os materiais estão sujeitos, sendo elas: tensão e deformação.

Em linhas gerais, tensão é dada por uma força aplicada sobre uma determinada área, porém, a origem desse conceito é extensamente maior, sendo que em um determinado corpo pode ser submetido a aplicação de cargas externas, podendo ser de superfície ou de corpo. A força de superfície é dada pelo contato de um corpo com a superfície de outro, distribuída pela a área de contato, se for uma força pontual, então tem-se uma força concentrada, caso a força seja aplicada ao longo de uma área, então chama-se carga distribuída, como explica Hibbeler (2010).

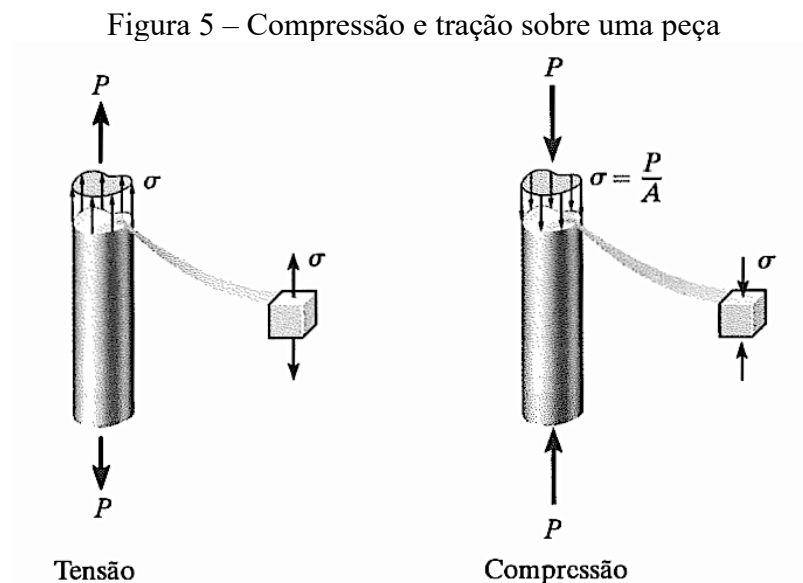
Souza (2015) descreve que as forças de superfícies também geram forças de reação nos apoios e de contato na superfície, das quais, as de contato impedem a rotação ou translação do corpo, desse fenômeno, surge o equilíbrio de forças, onde as resultantes das componentes da força e o somatório dos momentos se igualam a zero. A tensão pode ser decomposta em vários componentes, de acordo com o plano de atuação, sendo definida com uma força normal

(F) atuante perpendicularmente a uma determinada área (A), se essa força atua tangente ou paralela a um apoio, então está sujeito a cisalhamento, dado pela Equação 1 (SOUZA, 2015).

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1)$$

2.2.1. Esforço Mecânico de Compressão

A aplicação de uma tensão sobre um corpo pode gerar uma compressão ou tração, sendo a primeira devido a atuação de forças agindo em sentidos opostos com direção ao interior do corpo, já a tração ocorre quando as forças têm o mesmo sentido, mas direcionadas para o exterior do corpo (SOUZA, 2015). A Figura 5 ilustra a atuação da força de tração e compressão sobre uma peça.

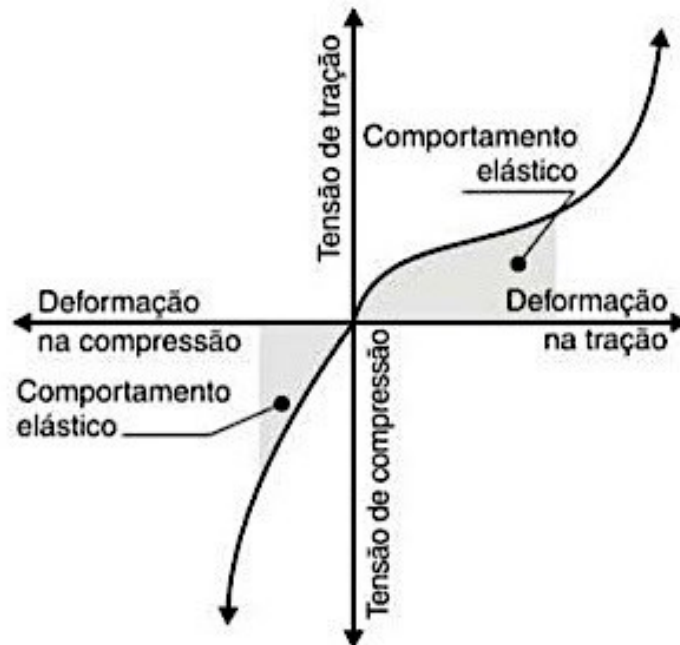


Fonte: Hibbeler (2010, p. 17).

No ensaio de compressão, a tensão de escoamento define o comportamento elástico do material, aplicando a lei de Hooke, acima desse valor, as deformações são permanentes, atingindo o regime plástico, gerando endurecimento devido ao encruamento, no caso de materiais metálicos (GARCIA; SPIM; SOUZA, 2012). Uma deformação é gerada num corpo quando este tende a mudar de tamanho e forma, sendo visíveis ou imperceptíveis (HIBBELER, 2010), essa mudança não será uniforme em todo seu volume, variando ao longo do seu comprimento (GARCIA; SPIM; SOUZA, 2012).

A curva típica do ensaio de compressão, fornece informações da tensão *versus* deformação, que para o caso de materiais poliméricos apresentam um comportamento elástico não-linear, revelando uma resistência elevada na compressão, na qual graficamente, a curva tensão-deformação tende a aumentar a inclinação rapidamente à medida que a deformação expande (GARCIA; SPIM; SOUZA, 2012). Na Figura 6, tem-se o gráfico típico para o comportamento de polímeros num ensaio de compressão, neste faz-se o comparativo com gráfico de tensão-deformação na compressão com o gráfico tensão-deformação na tração, com as respectivas zonas de comportamento elástico apontadas.

Figura 6 – Gráfico típico para ensaio de compressão e de tração



Fonte: Garcia; Spim; Souza (2012, p. 84).

O estado elástico em polímeros termoplástico, como o caso do PVC, sob tensão é descrito como a modificação geométrica das cadeias poliméricas em razão ao desequilíbrio dos átomos devido a retirada destes, tendo o equilíbrio restaurado com a remoção do carregamento. Já para o estado plástico, as deformações são permanentes causadas pela movimentação dos átomos entre regiões lamelares e amorfas intermediárias (BIANCHI, 2011).

O teste de compressão diametral de um corpo de prova é um instrumento de estudo para avaliação do comportamento mecânico para casos onde a tubulação possa sofrer colapso devido a vácuo interno ou pressão externa, na qual ocorrem quando tubos são assentados sob água ou em solo saturado, sendo submetidos a uma pressão externa maior que a pressão interna

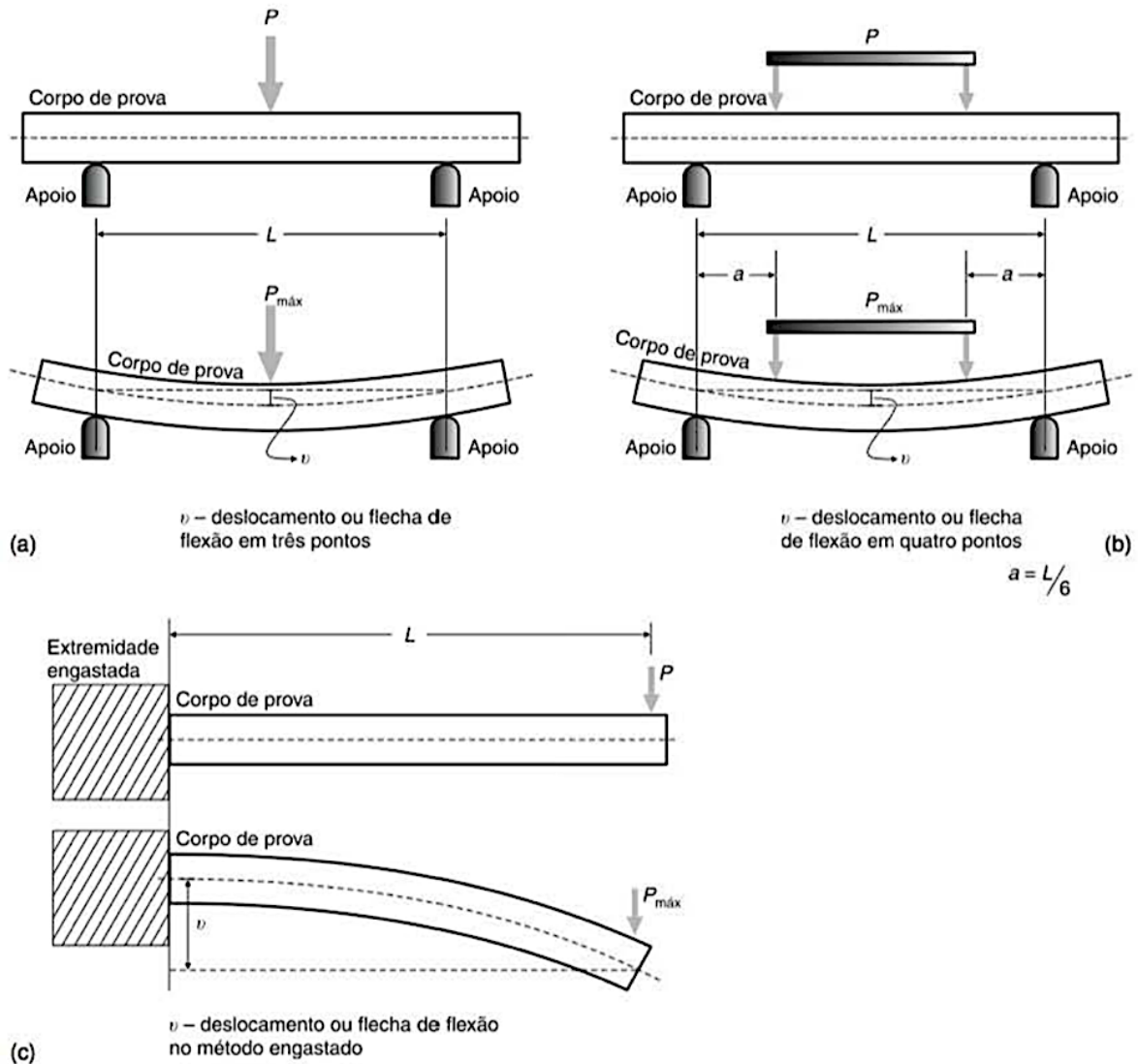
(LIMA JÚNIOR, 2016). Para realização do ensaio, utiliza-se uma máquina de ensaio propícia na qual possua pratos rígidos que exercerão a tensão de compressão sobre o corpo de prova.

2.2.2. Esforço Mecânico de Flexão

O ensaio de flexão é dado pela aplicação de uma carga crescente em determinado ponto de uma barra, sendo ela biapoada ou engastada em uma das extremidades (GARCIA; SPIM; SOUZA, 2012). Corpos longitudinais sofrem deformações sob ação de carregamentos aplicados em seu comprimento, desenvolvendo cisalhamento interno, levando ao fenômeno de flexão. A resistência à flexão será dada pela máxima tensão aplicada na fibra externa de um corpo de prova, no momento da ruptura, quando submetido à flexão (BRASKEM, 2002).

Existem três métodos de ensaio de flexão, a diferença está no tipo de apoio e forma de aplicação de carga. No ensaio de flexão em três pontos, tem-se um biapoio com a carga aplicada no centro longitudinal do corpo de prova, já para o ensaio de flexão em quatro pontos, tem-se a seção biapoada e com aplicação de carga em dois pontos equidistantes do apoio. O último caso é o método engastado, sendo que neste uma das extremidades está presas e aplicação de carga na extremidade oposta. A Figura 7 ilustra os três métodos de ensaio de flexão.

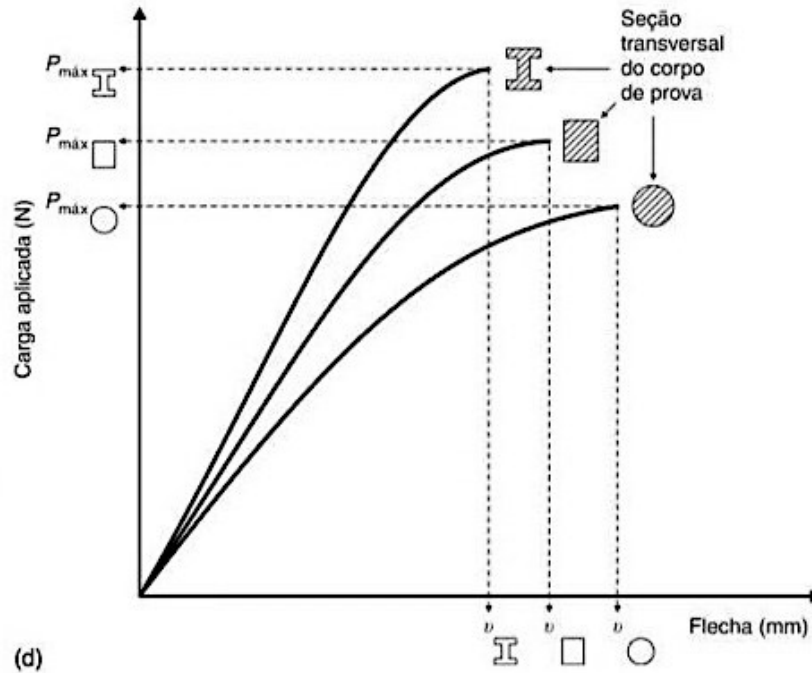
Figura 7 - Tipos de ensaio de flexão, com (a) o ensaio de flexão em 3 pontos, (B) o ensaio de flexão em 4 pontos e (c) o método de engaste



Fonte: Garcia; Spim; Souza (2012, p. 173).

Este ensaio resulta num gráfico de força (kN) *versus* deslocamento (mm), que por meio deste, é possível analisar a máxima carga que o corpo de prova suporta antes de iniciar o processo de colapso (SOUZA et al., 2014). Garcia; Spim e Souza (2012) realizaram um comparativo entre as diferentes geometrias de corpos de provas em relação a deformação (flecha) e a carga aplicada, inferindo graficamente que seções transversais circulares tendem a ter maiores deformações com menores cargas em paralelo a outras seções, como apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Curva característica para diferentes seções transversais de corpo de prova



(d)

Fonte: Garcia; Spim; Souza (2012, p. 173).

2.3. PESQUISA DE ESTUDOS RELACIONADOS

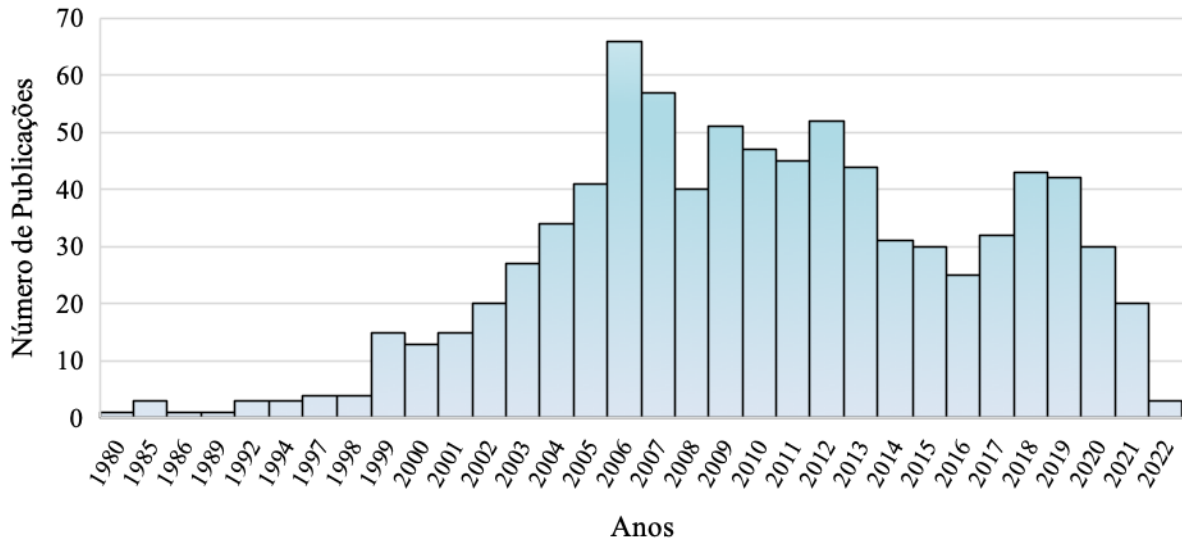
Para reafirmar a relevância do estudo dessa temática, realizou-se um breve estudo bibliométrico na plataforma SciELO, SciELO Books, Catálogo de Teses e Dissertações, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), Portal Domínio Público e Latindex. Usou-se determinadas palavras-chave para tal, sendo estas: *Tubos de PVC*, *PVC*, *PVC e Flexão*, *PVC e Compressão*, *PVC e Propriedades Mecânicas*.

2.3.1 Análise Bibliométrica e Pesquisa Bibliográfica

Na plataforma SciELO, com a palavra-chave mais generalizada, *PVC*, obteve-se um total de 843 artigos científicos para pesquisa no dia 02 de março de 2022, distribuídos em: 656 no Brasil, 31 na Colômbia, 31 no Chile, 27 no México, 21 em Portugal, 15 na Argentina e os demais entre América Latina, Europa e África. Dentre esse número, 469 artigos estão voltados para Ciências Agrárias, 123 da Ciências da Saúde, 113 na Engenharia e os demais artigos estão distribuídos em outros campos científicos. Além dos países nos quais se concentram as publicações, pode-se verificar o número de artigos por ano. No Figura 9, pode-se analisar que os anos de 2006, 2009 e 2012 tiveram os maiores números de publicações. Observa-se o

crescimento de artigos nesse campo a partir de 1999, chegando ao seu auge nos anos 2006 a 2013. Esse crescimento denota o interesse acadêmico e suas aplicações.

Figura 9 – Publicações por ano na plataforma SciELO no tema PVC



Fonte: Autora (2022).

Para a temática *Tubos de PVC*, tem-se um total de 113 artigos, dos quais, 95 pesquisas estão no Brasil, 6 no México e 5 na Colômbia e demais países da América Latina. Sendo 85 artigos no campo da Ciência da Agricultura e 10 na Engenharia. Quando pesquisado *PVC* e *Flexão*, encontra-se 4 artigos, sendo 3 voltados para Engenharia e 1 para Ciência Rural. Nos artigos de engenharia, identificou-se 2 estudos voltados para aplicações no campo da engenharia civil, sendo que ambos estudam compósitos de PVC reforçados com fibra de vidro.

No tópico *PVC* e *Compressão* tem-se 7 artigos, todos do Brasil e distribuídos em 3 na Engenharia, 3 nas Ciências da Agricultura e 1 na Ciência da Saúde. Dentre os estudos publicados, os 3 publicados na área da engenharia, são direcionados para engenharia civil, porém, nenhum com similaridade na proposta de estudo em questão.

Além da plataforma SciELO, em Catálogo de Teses e Dissertações, buscando pela palavra *PVC*, obteve-se 2427 resultados, com apenas 338 na área de conhecimento da engenharia. Com *PVC* e *compressão*, 12.363 foram os resultados, destes, 1.453 foram qualificados como da área de conhecimento da engenharia civil. Em *PVC* e *flexão*, teve-se 9.123 resultados, com 1.505 sendo da área de engenharia civil, já em *Tubo PVC*, 217 foram obtidos para a área de engenharia civil. Na busca por *PVC* e *propriedades mecânicas*, 84.853 foram os resultados obtidos, para tanto, analisando todas as palavras buscadas, não se encontrou um estudo com as mesmas características de estudo como o proposto neste trabalho.

Na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), a busca por *PVC* gerou 1.284 resultados, com *PVC e Flexão*, encontrou-se 23 resultados e 30 para *PVC e Compressão*. Obteve 113 resultados para *PVC e Propriedades mecânicas*, e 291 resultados para *Tubo PVC*. Analisando os resultados obtidos, 2 trabalhos apresentaram tópico de similaridade proposta neste trabalho, sendo de estudo do comportamento de flexão em PVC por Medeiros (2006) e de compressão diametral por Lima Júnior (2016).

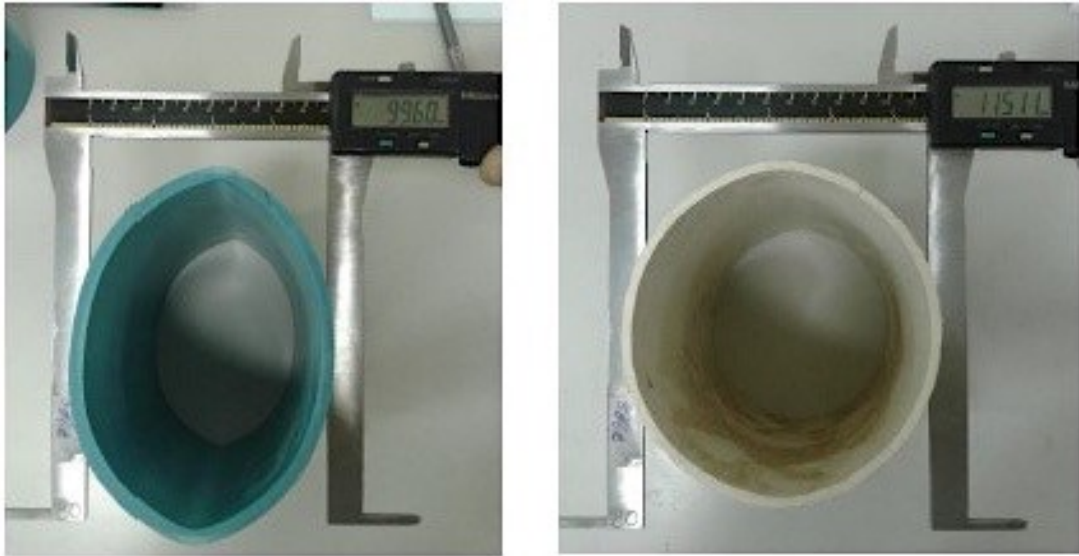
No Portal Domínio Público, na busca pela palavra *PVC*, gerou-se 11 resultados, *Tubo PVC*, *PVC e Compressão*, *PVC e Flexão* e *PVC e Propriedades mecânicas*, não se obteve resultado para tais palavras-chave. Dentre os 11 resultados obtidos, não se verificou similaridade com o estudo proposto no presente trabalho de conclusão de curso. A plataforma Latindex fornece resultados de revistas científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal e SciELO Books, na qual é uma plataforma de livros *online*, aplicou-se às mesmas palavras-chave propostas inicialmente, não se obteve nenhum resultado. Pesquisando por *Policloreto de vinila*, o mesmo ocorreu.

2.3.2 Síntese dos Estudos Relacionados

Dos estudos selecionados, dois que se aproximaram do estudo proposto, sendo o primeiro de Lima Júnior (2016), no qual, em sua dissertação intitulada “Estudo do Efeito da Orientação Molecular nas Propriedades Mecânicas de Tubos em Policloreto de Vinila (PVC)”, explora propriedades mecânicas de tubos de PVC com efeito da orientação molecular, comparando-o com o tubo de PVC sem esta propriedade. Esse estudo, realizou ensaios de inspeção, performance e controle de qualidade, mais especificamente: resistência ao impacto, resistência à pressão hidrostática interna, grau de gelificação e resistência ao cloreto de metileno, resistência à compressão diametral, estabilidade dimensional, classe de rigidez e resistência ao achatamento, resistência o prolongamento da fissura e grau de orientação molecular.

Dentre os ensaios mencionados, é de interesse para essa pesquisa o ensaio de compressão diametral, no qual, o autor seguiu o procedimento e norma adotado de forma similar, com diferença em que os tubos tinham diâmetro de 100 mm e um conjunto de 4 amostras. Lima Júnior (2016) observou que durante e após o ensaio teve ocorrências de trincas, rasgos e delaminações, realizando a conferência do diâmetro externo após ensaio, verificando a ocorrência de deformações plásticas, conforme Figura 10.

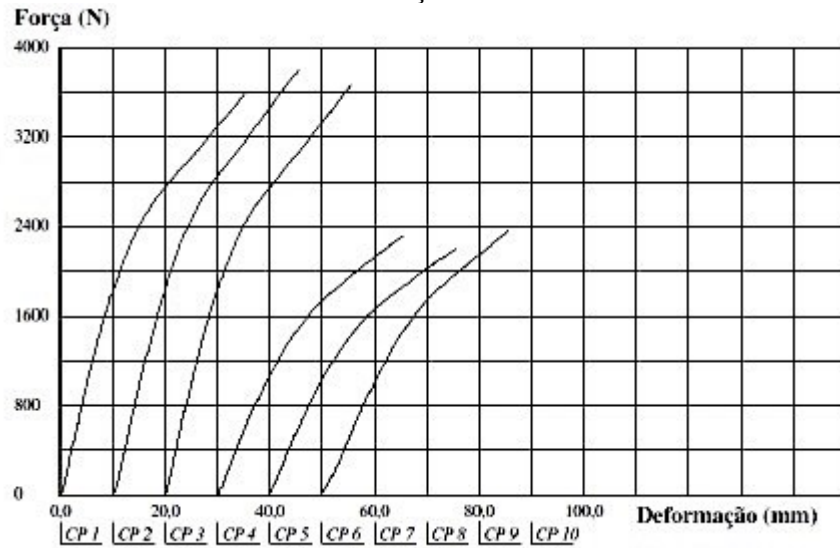
Figura 10 – Conferência do diâmetro externo após ensaio de compressão diametral em tubos de PVC sem e com orientação molecular



Fonte: Lima Júnior (2016, p. 152).

Os resultados do ensaio demonstraram que os tubos de PVC orientados possuem menores níveis de achatamento residual em comparativo a tubos de PVC sem orientação, cerca de 81%, bem com os maiores níveis de resistência à pressão crítica de colapso iminente, cerca de 18%. Na Figura 11 tem-se o gráfico do resultado do ensaio de compressão diametral, no qual, os CPs 1, 2 e 3 denotam corpos de prova de tubo de PVC com orientação molecular, enquanto os CPs 4, 5 e 6 são pertencentes ao grupo de tubos de PVC sem orientação molecular, observa-se que os tubos de PVC com orientação requerem maior força para gerar deformação, diferentemente dos tubos de PVC não orientados molecularmente.

Figura 11 – Resultado gráfico do ensaio de compressão diametral em tubos de PVC com e sem orientação molecular

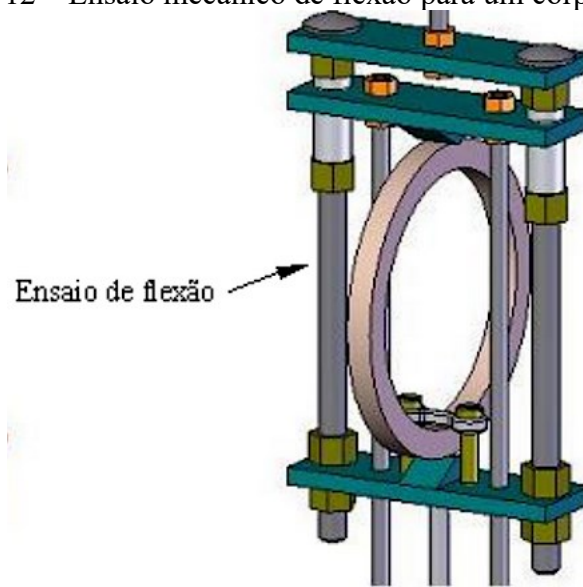


Fonte: Lima Júnior (2016, p. 154).

O segundo estudo selecionado, pertencente a Medeiros (2006), na sua dissertação intitulada “Determinação Experimental e Simulação Numérica do Comportamento Viscoelástico de Polímeros: Estudo em PVC”, com foco em estudar o comportamento viscoelástico do PVC por meio de ensaios de tração e flexão variando a temperatura. O autor descreve que materiais com comportamento viscoelástico exibem duas características, sendo elas: deformação ao longo do tempo por causa de carregamento constante e decréscimo das tensões quando sujeito a deformação e temperatura constante (MEDEIROS, 2006).

Foi realizado dois ensaios, um de tração e outro de flexão, sendo o segundo de interesse, no qual, fez-se o ensaio num corpo de prova anelar sob um apoio fixo conforme norma ASTM D4065-01, no qual é submetido a um carregamento senoidal variando de 1 a 90 Hz. Com este ensaio, Medeiros (2006) obtém o módulo dinâmico de armazenamento e o módulo dinâmico de dissipação do material em função da frequência. A Figura 12 denota o aparato usado durante o ensaio de flexão para um corpo anelar.

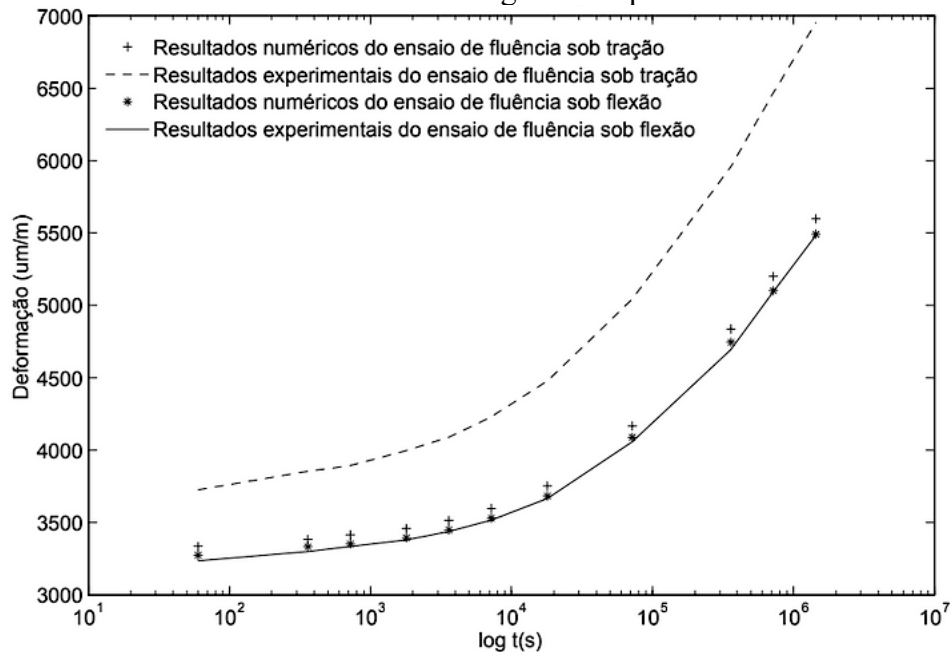
Figura 12 – Ensaio mecânico de flexão para um corpo anelar



Fonte: adaptado de Medeiros (2006, p. 42).

Além do ensaio mecânico, o autor realizou a simulação numérica considerando diferentes temperaturas, chegando-se em um modelo matemático próximo ao real em caso de baixos níveis de tensão aplicados, com exatidão no tempo de duração, conforme demonstra a Figura 13 num gráfico comparativo entre o resultado do ensaio de fluência sob flexão do corpo anelar de PVC à 40°C e a simulação numérica.

Figura 13 – Comparativo entre ensaio de flexão e simulação numérica para um corpo anelar de PVC ao longo do tempo



Fonte: Medeiros (2006, p. 65).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos a respeito dos ensaios mecânicos e as diretrizes regentes para realização do mesmo, bem como as especificações do tubo de PVC escolhido, o local dos ensaios mecânicos de compressão diametral e flexão por três pontos, e o método de tratamento e análise de dados.

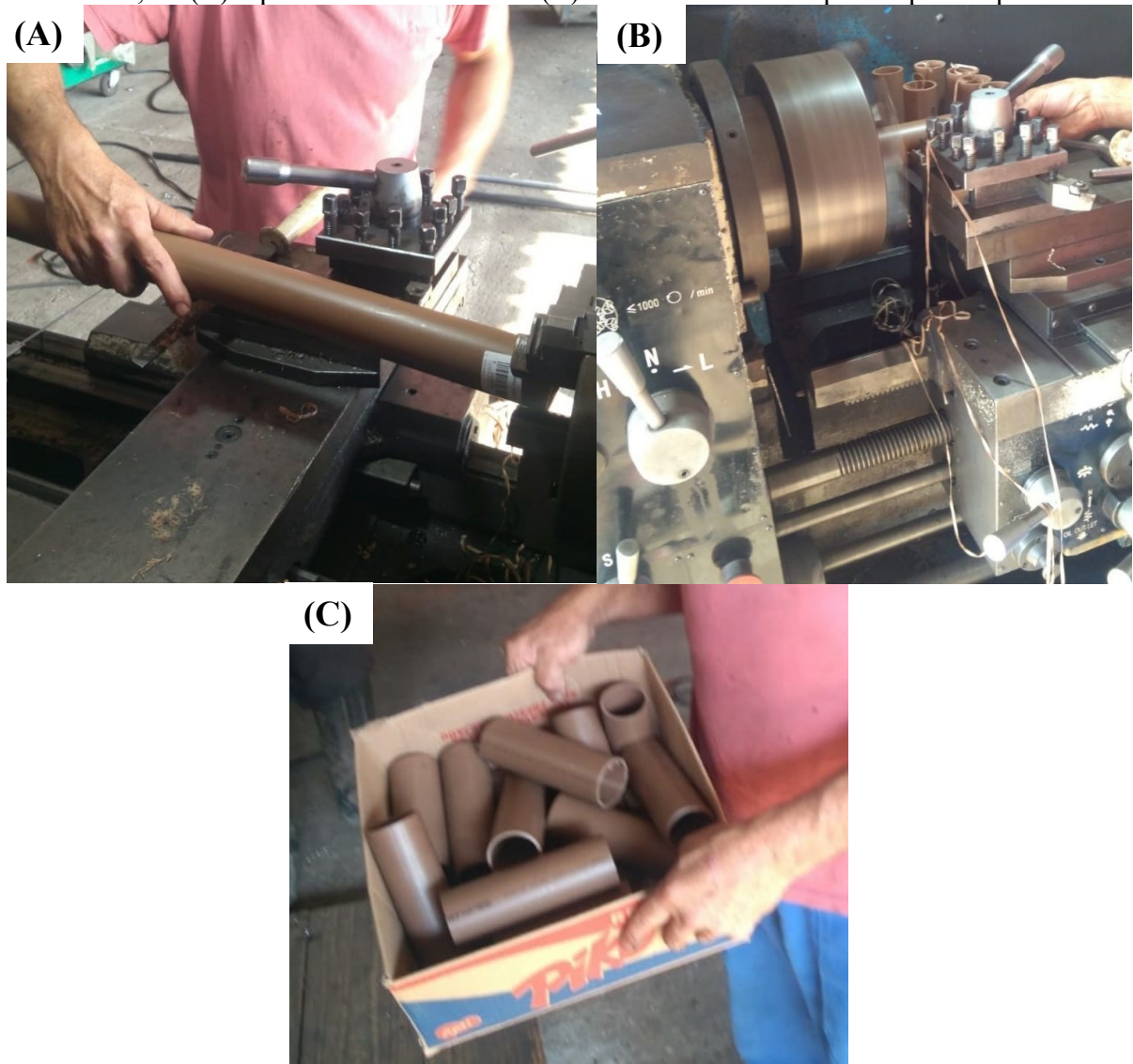
3.1. TUBOS DE PVC

Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizados tubos de PVC de aproximadamente 3 metros de comprimento, adquiridos em loja de materiais de construção, destinado para instalações hidrossanitárias de água fria, na cor marrom e de diâmetro teórico de 50 mm. Conforme as especificações do fabricante da marca TIGRE®, o modelo de tubo de PVC de 50 mm de diâmetro suporta uma pressão de serviço de 75 metros de coluna d'água (m.c.a.), respeitando as normas NBR 5648 de sistemas prediais de água fria e NBR 5626 de instalação predial de água fria (TIGRE, 2021).

3.2. PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

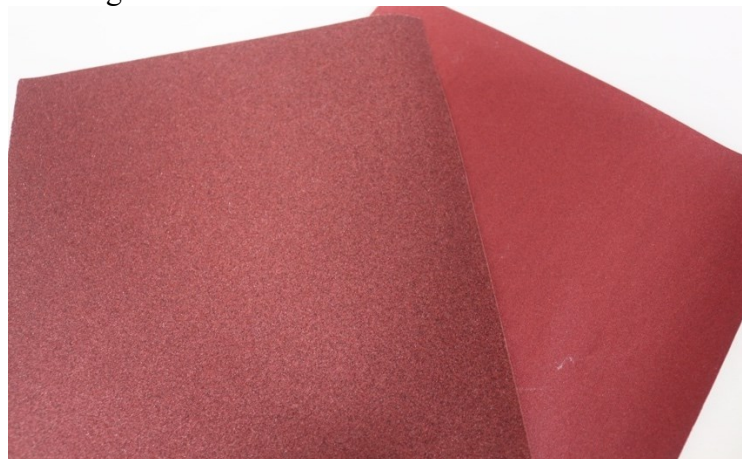
Os ensaios mecânicos de compressão diametral e flexão por três pontos, foram realizados em 5 corpos de provas, para cada tipo de ensaio, com 150 mm e 127 mm de comprimento respectivamente, de acordo com o que está previsto nas normas NBR 14272 e ASTM D790. Os corpos de prova foram cortados utilizando um torno mecânico para obter precisão no corte, no qual, o operador programou a máquina para realizar o procedimento com as medidas fornecidas, realizando a conferência com paquímetro. Realizou-se o lixamento das extremidades para a retirada de qualquer irregularidade e imperfeição que possa ocorrer devido processo de corte, utilizando as lixas d'água GR220 e GR100. Na Figura 14 tem-se o processo de corte do tubo em torno mecânico e na Figura 15 as lixas utilizadas para o lixamento das extremidades, sendo a da direita a GR220 e da esquerda GR100.

Figura 14 – Corte em torno mecânico dos tubos para ensaio, sendo em (A) a preparação para o corte, no (B) o processo de corte e em (C) as amostras dos corpos de provas prontas



Fonte: Autora (2022).

Figura 15 – Lixas d'água usadas no lixamento das extremidades dos corpos de provas



Fonte: Autora (2022).

No Laboratório Multidisciplinar e, também, no Laboratório de Modelagem e Análise de Dados (LabMAD) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no Centro Tecnológico de Joinville, fez-se o preparo das amostras, no qual, realizou-se a mensuração da massa, nível, comprimento, diâmetro interno e externo, utilizando instrumentos apropriados. Primeiramente, realizou-se a verificação do nível de cada corpo de prova, utilizando um nível de 3 bolhas. Certificou-se que todas as amostras estavam dentro da margem esperada, caso estas não estivessem, lixaria-se até atingir o nível. Na Figura 16 representa-se o procedimento de mensuração do nível do corpo de prova.

Figura 16 – Averiguação do nível em um corpo de prova

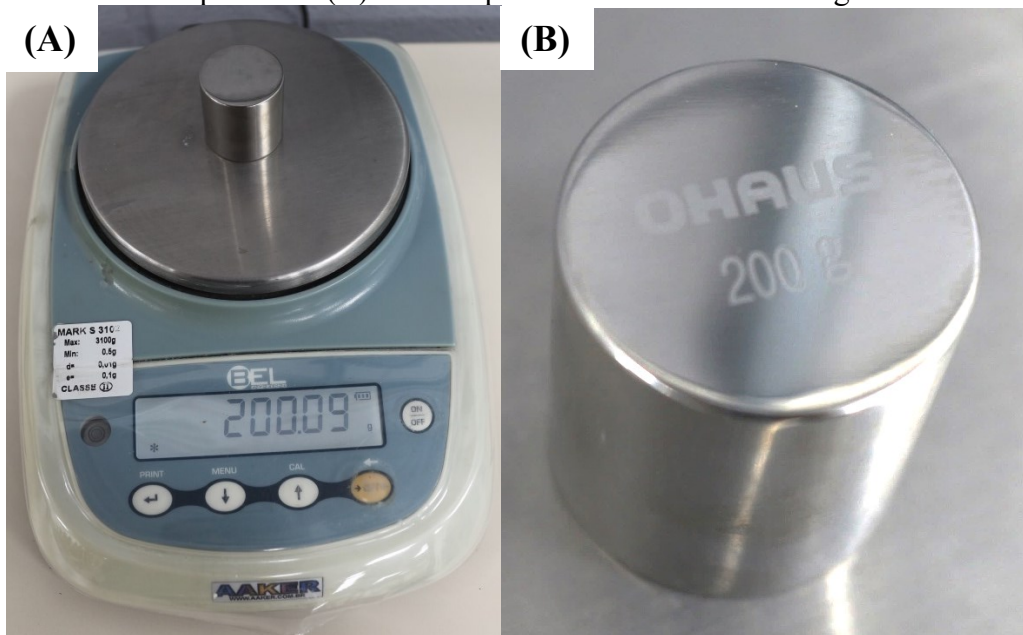


Fonte: Autora (2022).

3.3. DETERMINAÇÕES DAS MASSAS E DIMENSIONAIS DOS TUBOS

Para estimar as massas dos corpos de provas de tubos de PVC, uma balança de precisão com duas casas decimais do modelo Mark 5 3102 foi utilizada. Com uma massa padronizada de 200 g, fez-se a conferência do grau de incerteza do aparelho, no qual a mesma apontou um erro sistemático de 0,09 g, conforme a Figura 17 (A). Registrou-se em planilha o valor da massa de cada corpo de prova para os grupos de 127 mm e 150 mm (ver os corpos de provas na Figura 18).

Figura 17 – Conferência da massa dos corpos de provas, no qual (A) tem-se o erro do aparelho e (B) a massa padronizada Ohaus de 200 g



Fonte: Autora (2022).

Figura 18 – Corpos de prova acondicionados



Fonte: Autora (2022).

Com um paquímetro digital da marca Digimess, mensurou-se os diâmetros internos e externos, bem como, o comprimento de cada corpo de prova, sendo todos os valores devidamente registrados em planilha. Para o comprimento da amostra, pegou-se dois pontos opostos para mensuração e no diâmetro externo, aferiu-se no ponto de máximo diâmetro. Na Figura 19 tem-se o paquímetro digital utilizado. Após essa etapa, cada corpo de prova foi

acondicionado em saco plástico individualmente, anotando-se o número do CP e o ensaio mecânico, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Paquímetro digital utilizado para conferência do comprimento e diâmetros dos corpos de prova



Fonte: Autora (2022).

Por se tratar de um cilindro oco, o volume será calculado pela Equação 2, na qual, D é dado pelo diâmetro maior (diâmetro externo), d é o diâmetro menor (diâmetro interno) e h a altura do cilindro (MSPC, 2018).

$$V = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) h \quad (2)$$

A densidade é descrita pela massa (m) dividido pelo volume (V), com unidade dada por g/cm^3 , como representado pela Equação 3 (FOGAÇA, 2022).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

3.4. ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos de compressão e flexão foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânico do Departamento de Engenharia dos Materiais, na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), por um técnico de ensino superior do laboratório e supervisionado pelo orientador. Os testes foram executados em uma máquina universal de ensaios mecânicos, a qual possibilita a realização de ensaios mecânicos de compressão diametral e flexão, por meio de acessórios de fixadores de corpos de prova.

Durante a realização dos ensaios, fotografias do equipamento e dos corpos de prova, antes e após aos ensaios mecânicos, foram tiradas para a realização da análise visual. Os corpos

de provas serão previamente enumerados com pincel atômico para materiais poliméricos, para que haja o controle da amostragem ensaiada.

3.4.1 Compressão Diametral

O ensaio mecânico de compressão diametral é usado para verificar a compressão ao longo do diâmetro de um tubo PVC e é regido pela norma NBR 14272:1999, para tal, utiliza-se uma máquina universal de ensaios com pratos rígidos paralelos com força de aplicação até 5 kN e uma velocidade constante de 12 mm/min. As amostras devem possuir 150 mm de comprimento e estarem livres de imperfeições, sendo presas entre os pratos rígidos com uma força menor que 5 N, ajustando o deslocamento para zero, seguindo pelo achatamento do corpo de prova numa velocidade constante de 12 mm/min até atingir deflexão de 30% do diâmetro externo inicial (h_0), sendo que o diâmetro final (h_f) para parada do ensaio pode ser calculada pela Equação 4, na qual, para este ensaio será de 35 mm, ou seja, o corpo de prova foram deformados até 15 mm (ABNT, 1999).

$$h_f = 0,7h_0 \quad (4)$$

A máquina universal é instrumentada com *software*, no qual, os dados são registrados ponto a ponto até obter 30% da deflexão, sendo eles: força empregada, deslocamentos e do tempo. Todos os dados obtidos no *software* estarão sem tratamento, ou seja, os dados brutos obtidos nos ensaios.

3.4.2 Flexão por Três Pontos

O ensaio mecânico de flexão por três pontos, consiste na aplicação de uma força no ponto central de um corpo de prova que esteja apoiado nas extremidades de modo a obter a ruptura, a norma regente para este ensaio é a ASTM D790, visto que não há uma norma brasileira para esse segmento. Pela norma, o corpo de prova deve ser retangular e possuir 127 mm de comprimento, 3,2 mm de espessura e 12,7 mm de largura, porém, adaptou-se o corpo de prova, sendo este tubular com comprimento de 127 mm e espessura e largura para as medidas encontradas no tubo de PVC de 50 mm de diâmetro para água fria (ASTM, 2017).

São requeridos 5 corpos de prova, sendo testados em equipamento para ensaio de flexão em 3 pontos, dividindo-se em dois procedimentos de ensaio, sendo o primeiro quando a

ruptura do material é gerada de pequena deflexão, usado para mensurar propriedades de flexão, e o segundo quando o material não rompe ou escoam na superfície externa dentro do limite de ruptura quando as condições do primeiro procedimento são usadas (ASTM, 2017).

A taxa de deformação pela ponteira é de 0,01 mm/mm/min, porém, adotou-se a mesma velocidade que no ensaio mecânico de compressão diametral no valor de 12 mm/min. Os suportes devem estar afastados 12,7 mm a 6,4 mm de distância das extremidades, sendo a condição de parada se dá quando se atinge a deformação máxima ou a fratura do material (ASTM, 2017).

3.5. TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento estatístico dos dados brutos gerados pelo preparo das amostras e dos ensaios mecânicos de compressão diametral e flexão por três pontos, foram realizados por meio de análises estatísticas e pela confecção de gráficos que relacionam as grandezas força, deslocamento, tensão e deformação. Para o registro dos dados, cálculos matemáticos e gráficos, utilizou-se a ferramenta Excel, pois esta confere maior precisão e rapidez.

Os cálculos da média aritmética simples e do desvio padrão, conforme a distribuição Gaussiana, foram utilizados na análise das propriedades mecânicas determinadas dos ensaios mecânicos. A média aritmética simples é dada pelo somatório das variáveis (x) divididas pelo número de observações (n), conforme a Equação 5 (BARBETTA et al., 2009).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

Já o desvio padrão avalia a dispersão do conjunto de valores da análise, ou seja, o quão distante do valor médio as demais variáveis encontram-se. É dado pela raiz quadrada da variância, sendo o somatório das variáveis (x_i) menos a média (\bar{x}), elevado ao quadrado, dividido pelo número de observações (n), como descrito na Equação 6 (BARBETTA et al., 2009).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

O coeficiente de variação mede a dispersão dos dados em termos relativos, sendo um termo adimensional e útil para realizar comparativos em diferentes unidades de medidas, sendo

definida pela Equação 7, na qual o desvio padrão (s) é dividido pela média (\bar{x}) do conjunto de valores (BARBETTA et al., 2009).

$$cv = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (7)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânicas realizados, bem como as grandezas obtidas. Os ensaios e as aferições das grandezas físicas foram realizados em ambientes com temperatura controlada de 23°C.

4.1. MASSAS DOS CORPOS DE PROVAS

Para todos os corpos de provas utilizados nos ensaios, fez-se a coleta das massas com uma balança de precisão Mark 5 3102 e o registro em planilha. De posse dos dados, realizou-se a média (\bar{x}), desvio padrão (s) e o coeficiente de variação (cv) conforme as Equações 5, 6 e 7, respectivamente, e descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das massas dos corpos de provas.

CP	Massa (g)		
	\bar{x}	s	cv (%)
127 mm	87,30	0,75	0,90
150 mm	102,23	0,19	0,20

Fonte: Autora (2022).

Verifica-se que a média para os corpos de prova de 127 mm ficou em 87,40 g e para de 150 mm em 102,23 g, ambos os resultados apresentaram um baixo desvio padrão e coeficiente de variação, indicando pouca dispersão entre os corpos de prova e confiabilidade nos resultados.

4.2. COMPRIMENTOS E DIÂMETROS DOS CORPOS DE PROVAS

De forma similar aos dados de massa dos corpos de prova, realizou-se a média, desvio padrão e coeficiente de variação do comprimento e diâmetros internos e externos dos corpos de provas. Para o comprimento, utilizou-se um paquímetro digital para leitura, no qual, mensurou-se dois pontos opostos ao outro no tubo PVC de 127 e 150 mm, identificados como h_1 e h_2 , para verificar perpendicularidade do corte nas extremidades do tubo. Na Tabela 2, tem-se os

parâmetros de média, desvio padrão e coeficiente de variação do comprimento dos corpos de provas.

Tabela 2 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação do comprimento dos corpos de provas

CP	Comprimento (mm)					
	\bar{x}_{h1}	s_{h1}	cv_{h1} (%)	\bar{x}_{h2}	s_{h2}	cv_{h2} (%)
127 mm	127,00	0,18	0,10	126,90	0,15	0,10
150 mm	150,00	0,15	0,10	150,03	0,14	0,10

Fonte: Autora (2022).

Pelo coeficiente de variação de ambos corpos de provas, infere-se que os cortes dos tubos tiveram elevada precisão e confiabilidade. Os desvios-padrão ficaram abaixo de 0,2 mm, indicando grande similaridade entre as alturas mensuradas. De acordo com a tolerância geométrica de paralelismo requerida pela norma ASTM D790, pode-se inferir pelo desvio padrão que ambos grupos de corpos de provas estão dentro da margem de $\pm 0,2$ mm (ASTM, 2017).

Os diâmetros internos e externos também foram mensurados com paquímetro digital, sendo o diâmetro externo identificado por D e o diâmetro interno por d . Efetuou-se a média, desvio padrão e coeficiente de variação para os diâmetros como exposto na Tabela 3.

Tabela 3- Média, desvio padrão e coeficiente de variação do diâmetro externo e interno dos corpos de provas

CP	Diâmetro Externo (D) e Diâmetro Interno (d)					
	\bar{x}_D	s_D	cv_D (%)	\bar{x}_d	s_d	cv_d (%)
127 mm	49,98	0,03	0,10	43,71	0,07	0,20
150 mm	49,93	0,09	0,20	43,39	0,09	0,20

Fonte: Autora (2022).

Percebe-se consistência entre os corpos de prova, com um coeficiente de variação de 0,2% para ambos os tamanhos a respeito do diâmetro interno e 0,1% a 0,2% no diâmetro externo, para o menor e o maior respectivamente. Verificando o limite tolerância para diâmetros externos para tubos de PVC pela norma NBR 5680, tem-se que para diâmetro externo nominal

de 50 mm a tolerância aceitável é de 0,3 mm, sendo assim, ambos corpos de provas são aceitáveis (ABNT, 1977).

Com os valores dos diâmetros dos corpos de provas de 127 mm e 150 mm, calculou-se o volume de um cilindro oco, conforme Equação 2, aplicando média (\bar{x}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (cv), de acordo com as Equações 5, 6 e 7, apresentando os valores na Tabela 4.

Tabela 4 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do volume dos corpos de provas

CP	Volume (cm ³)		
	\bar{x}	s	cv (%)
127 mm	58,61	0,56	0,90
150 mm	71,82	1,28	1,80

Fonte: Autora (2022).

Como o volume é calculado por meio de uma equação utilizando-se dos valores obtidos anteriormente, que já tinham uma margem de diferença entre si, é de se esperar que o desvio padrão dos volumes seja maior como resultado. Sobretudo, a diferença ainda é pequena, na ordem de 0,56 cm³ para o corpo de prova de 127 mm e 1,28 cm³ para o de 150 mm.

4.3. DENSIDADE DO PVC

Para o cálculo da densidade, fez-se a média da densidade de cada corpo de prova com as respectivas massas e volumes, e após, obteve-se a densidade média (\bar{x}), desvio padrão (s), coeficiente de variação (cv) e a densidade máxima e mínima (para um intervalo considerando duas vezes o desvio padrão), na qual somou-se/subtraiu-se o desvio padrão da densidade média, para os corpos de provas de 125 mm e 150 mm de comprimento, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Densidade média, desvio padrão, coeficiente de variação e densidade máxima e mínima para os corpos de prova de 127 e 150 mm

CP	Densidade (g/cm ³)				
	\bar{x}	s	cv (%)	$\bar{x} + 2s$	$\bar{x} - 2s$
127 mm	1,49	0,02	1,29	1,53	1,45
150 mm	1,42	0,02	1,28	1,45	1,38

Fonte: Autora (2022).

Comparou-se os intervalos da densidade máxima e mínima com resultados da literatura, sendo estes Callister Júnior (2002, p. 329) e Braskem (2002, p. 1), apresentando os resultados na Tabela 6.

Tabela 6 – Densidade máxima e mínima dos corpos de provas comparados a literatura

CP	Densidade (g/cm ³)		
	Autora (2022)	Callister Júnior (2002, p. 329)	Braskem (2002, p. 1)
127 mm	1,45 – 1,53	1,30 – 1,58	1,40 – 1,45
150 mm	1,38 – 1,45		

Fonte: Autora (2022).

Verifica-se que para os corpos de provas de 127 mm e 150 mm de comprimento, encontram-se dentro da margem descrita por Callister (2002, p. 329) e de Braskem (2002, p. 1). A confiabilidade deste resultado se dá pelo baixo valor de desvio padrão e coeficiente de variação obtidos da média das densidades dos corpos de provas de 127 e 150 mm.

4.4. COMPRESSÃO

O ensaio de compressão diametral foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos, do Departamento de Engenharia dos Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), utilizando-se de uma máquina de ensaios universais Shimadzu AG-I Autograph com capacidade de 10 kN e pratos rígidos, conforme requisitado na norma NBR 14272 e apresentado na Figura 20.

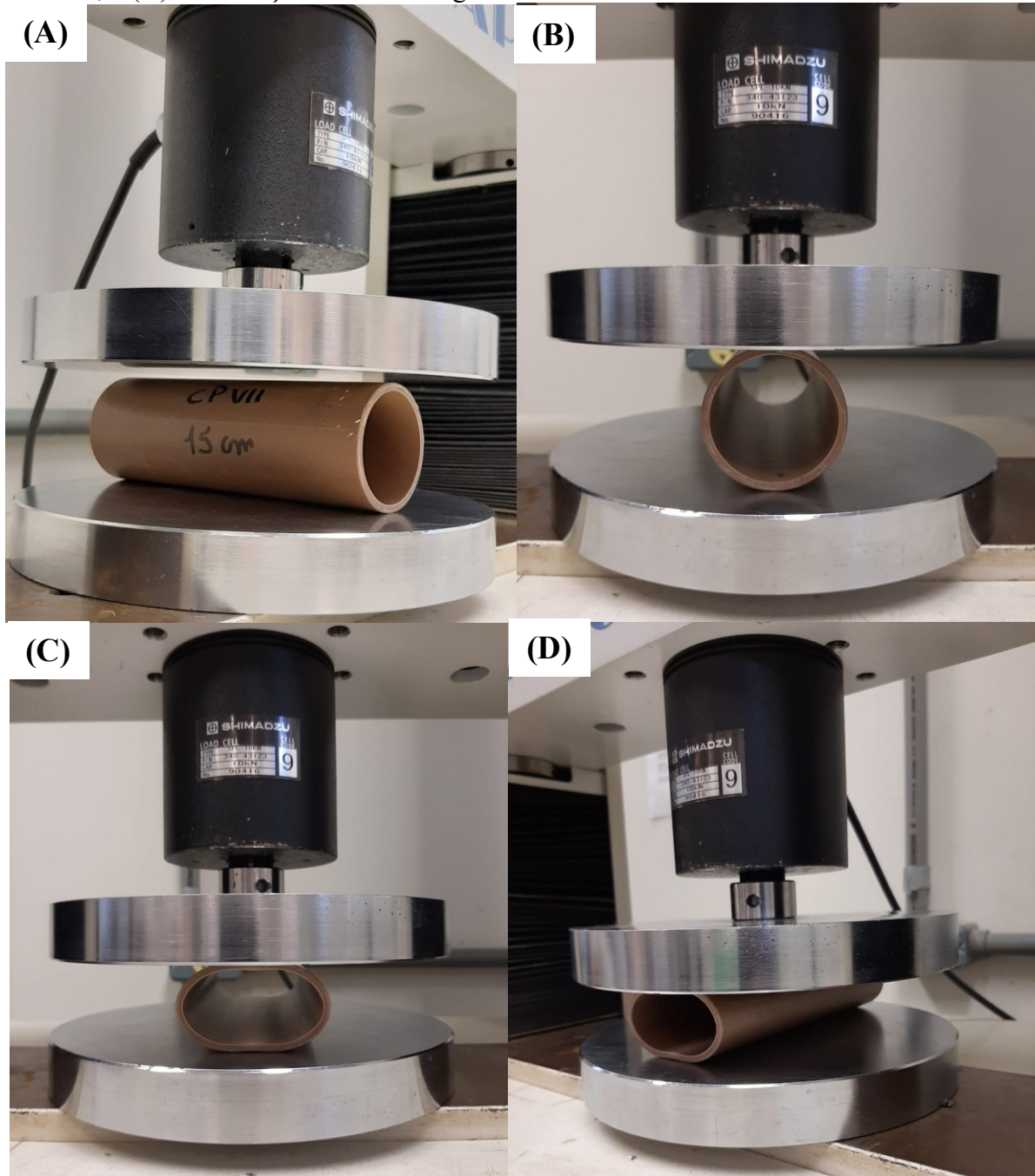
Figura 20 – Máquina de ensaios universais Shimadzu AG-I Autograph



Fonte: Autora (2022).

Fez-se a aproximação lenta dos pratos até prender os corpos de provas a uma força menor que 5 N, ajustando o indicador de deslocamento vertical para zero. A compressão se deu a uma velocidade constante de 12 mm/min até que o diâmetro externo passe de 50 mm para 35 mm, ou seja, deslocando 15 mm (valor teórico, norma NBR 14272), conforme apresentado na sequência da Figura 21. Durante o ensaio, mensurou-se o diâmetro externo do corpo de prova pela subtração do diâmetro externo antes da compressão pelo deslocamento do CP conforme norma NBR 14272.

Figura 21 – Sequência do ensaio de compressão diametral. (A) Aproximação dos pratos rígidos ao corpo de prova. (B) Corpos de provas presos entre os pratos com força menor que 5 kN na eminência da compressão. (C) Compressão do corpo de prova próximo a deformação máxima, e (D) deformação máxima atingida ao final do ensaio conforme norma NBR 14272



Fonte: Autora (2022).

Por a máquina de ensaios universais ser instrumentada, dados da força aplicada, em kN, e o deslocamento, em mm, foram registrados em *software*, com isso, as forças máximas para o deslocamento máximo teórico de 15 mm estão apresentadas na Tabela 7 para os 5 corpos de provas, identificados de CP I a CP V.

Tabela 7 – Força máxima atingida no ensaio de compressão diametral

CP	Força (kN)	Deslocamento (mm)
1	3,662	14,997
2	3,669	14,997
3	3,607	14,998
4	3,677	14,996
5	3,717	14,997

Fonte: Autora (2022).

Realizando a média, desvio padrão e coeficiente de variação das forças máximas apresentadas, permite analisar a variação de força aplicada entre os corpos de provas para atingir o deslocamento proposto. Na Tabela 8, o desvio padrão indica que a dispersão dos valores médios da força máxima encontra-se na ordem de centésimos de Newton, indicando consistência no valor máximo de força para atingir o deslocamento de 15 mm teórico.

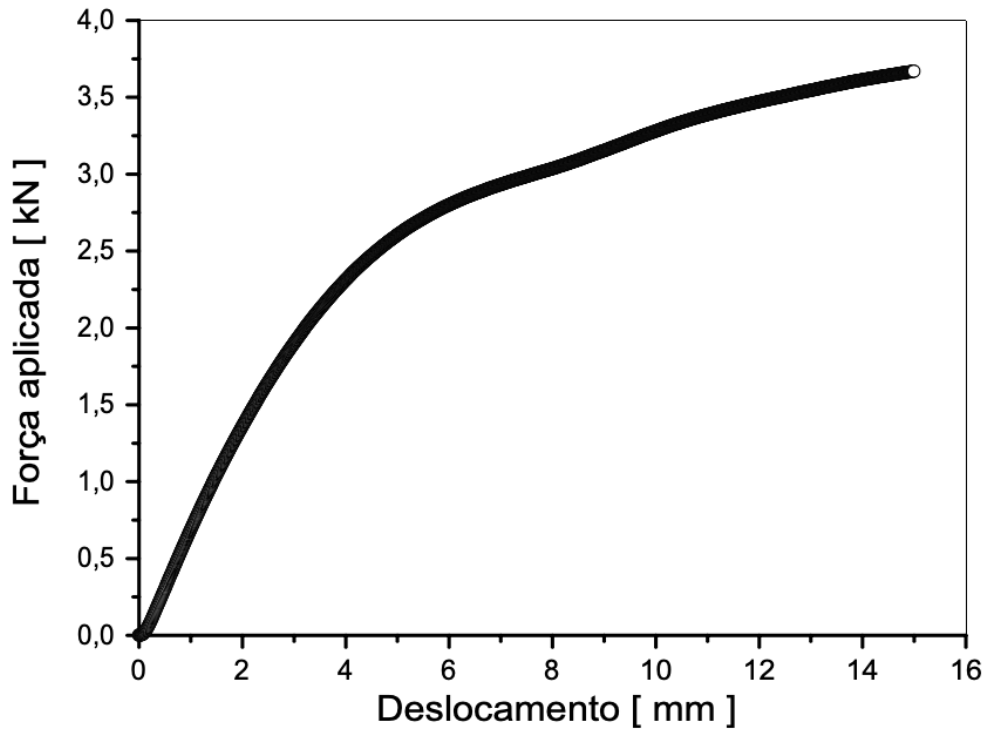
Tabela 8 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação para a força máxima no ensaio de compressão diametral

CP	\bar{x} (kN)	s	cv (%)	$\bar{x} + s$ (kN)	$\bar{x} - s$ (kN)
150 mm	3,666	0,039	1,07	3,706	3,627

Fonte: Autora (2022).

A norma NBR 14272 (ASTM, 1999) não possui valores comparativos e/ou valores de tolerância, pois, esta norma trata-se de uma verificação, ressaltando-se a necessidade de mais estudos para realizar um confronto de resultados entre literaturas, no entanto, como o coeficiente de variação está próximo de 1%, entende-se que o resultado é confiável. Um gráfico típico do comportamento da força por deslocamento do ensaio foi plotado, com este pode-se analisar o comportamento atingido durante o ensaio de compressão mecânica do tubo de PVC (Figura 22).

Figura 22 – Gráfico típico da força aplicada (kN) pelo deslocamento (mm)



Fonte: Autora (2022).

Denota-se pelo gráfico que a parte linear indica um comportamento elástico-linear do polímero (até 1 kN aproximadamente), sendo que quando começa a diminuir a inclinação da curva, o comportamento mecânico elástico-plástico é atingido e segue até o final do ensaio mecânico. Pela análise visual dos corpos de provas, não foram observados fraturas, trincas e outros defeitos nos corpos de prova devido a compressão diametral.

Desta análise, a deformação causada pelo deslocamento de 15 mm das prensas rígidas no ensaio de compressão diametral em tubos de PVC de 50 mm de diâmetro, já é suficiente para causar deformações permanentes. Numa situação da prática da engenharia, na qual o tubo com esta deformação esteja alocado sob pressões externas de forte influência, o tubo poderia sofrer uma redução acentuada do fluxo de água e/ou maiores deformações gradativamente.

Pela literatura, o estudo de Lima Júnior (2016) obtém um gráfico (Figura 11) correlacionando Força (N) por deslocamento (mm), no qual os resultados obtidos se aproximam em grandeza aos representados na Figura 22, sendo que para Lima Júnior (2016) a força máxima foi de 3,600 kN e no presente trabalho foi de 3,750 kN no máximo. Ressalta-se, entretanto, que o diâmetro externo de Lima Júnior (2016) era de 100 mm e a espessura da parede era mais fina.

Após 22 dias do ensaio de compressão diametral realizado, fez-se a verificação do diâmetro dos corpos de provas ensaiados para comparar com o diâmetro imediatamente após ensaio. Essa averiguação permite conhecer se o corpo de prova teve restituição elástica do

material. Determinou-se um coeficiente de restituição elástica devido ao tempo pós ensaio, dado pela Equação 8, na qual fez-se a diferença do diâmetro externo após 22 dias (D_{22}) com o diâmetro externo imediatamente após o ensaio (D_e), dividido pelo deslocamento máximo da prensa (h_p), multiplicando o valor por 100% para obter uma expressão percentual.

$$CRE = \left(\frac{D_{22} - D_e}{h_p} \right) \times 100\% \quad (8)$$

A Tabela 9 apresenta os valores do diâmetro externo antes do ensaio (D), imediatamente após o ensaio (D_e) e posterior a 22 dias de ensaio (D_{22}), bem como o coeficiente de restituição elástica (CRE), seguindo da média (\bar{x}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (cv).

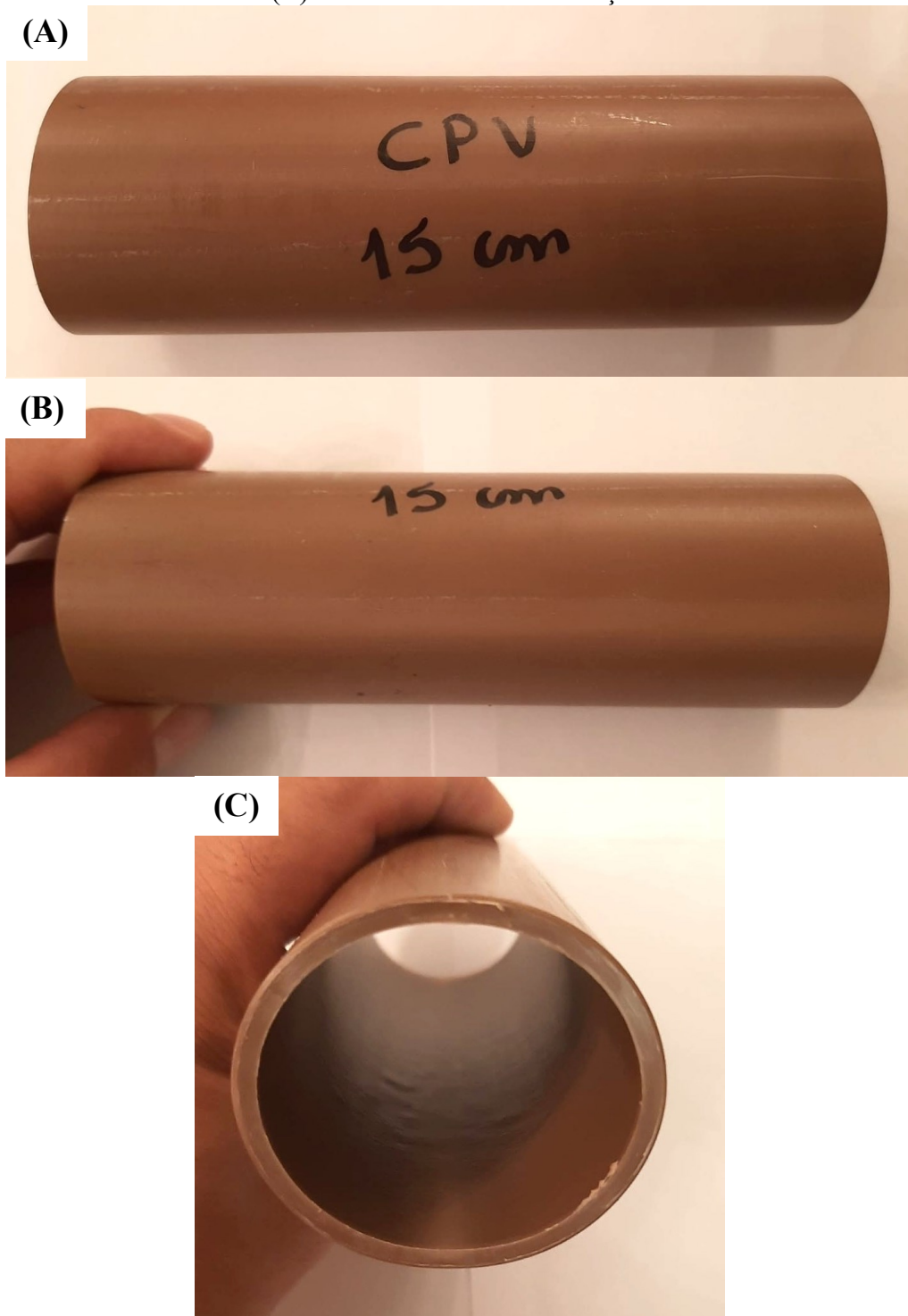
Tabela 9 – Comparação dos diâmetros externos após o ensaio e com 22 dias

CP	D (mm)	D_e (mm)	D_{22} (mm)	CRE (%)
1	50,09	35,09	47,73	84,26
2	59,87	34,87	47,51	84,26
3	49,90	34,90	48,05	87,67
4	49,99	34,99	48,23	88,26
5	49,91	34,91	48,25	88,93
\bar{x} (mm)		34,96	47,95	86,68
s		0,09	0,32	2,25
cv (%)		0,26	0,68	2,49

Fonte: Autora (2022).

Infere-se pela Tabela 9 que os corpos de prova recuperaram em média 86,68% do seu diâmetro, apresentando aproximadamente 2,05 cm de deformação plástica permanente no momento. Na Figura 23, tem-se o corpo de prova após 22 dias de ensaio de compressão diametral, sendo que em (B) e (C) são possíveis a visualização da ovalização (formato elipsoidal) do corpo de prova.

Figura 23 – Corpo de prova após 22 dias de ensaio. (A) Linhas de estiramento (linhas brancas) no corpo de prova. (B) Vista lateral do tubo com destaque a deformação diametral visível. (C) Vista frontal com ovalização do tubo



Fonte: Autora (2022).

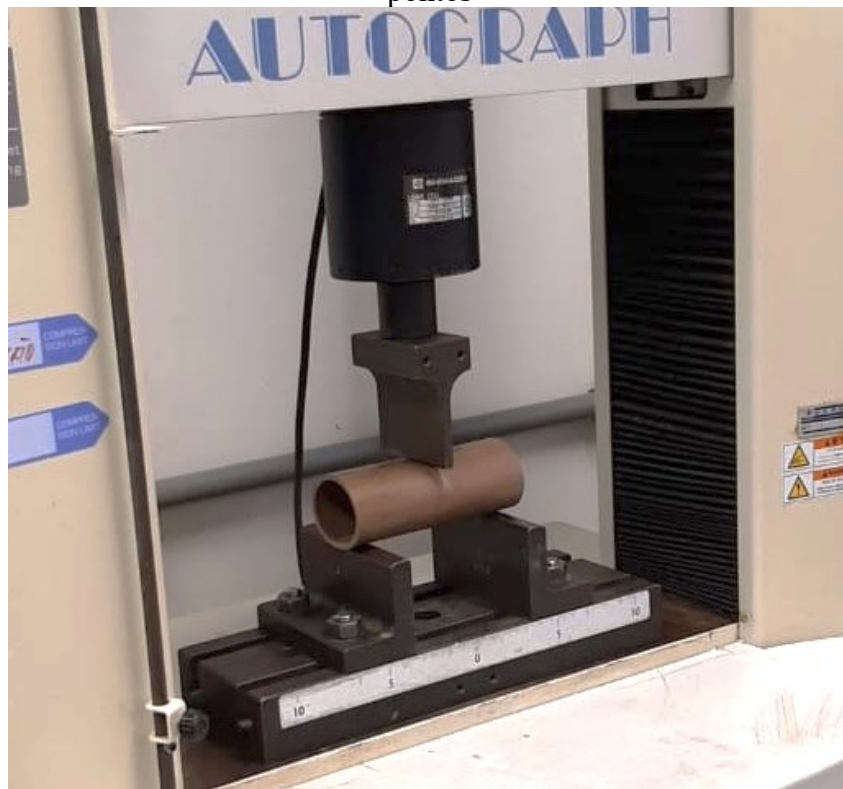
O efeito de estiramento, visualizado na Figura 23 (A) é dado pelo alinhamento das cadeias poliméricas que compõe o PVC na direção da aplicação da carga, porém, no ensaio de compressão, visto que a aplicação da força é perpendicular ao corpo de prova, estimasse que o

estiramento é devido ao alongamento sofrido no processo de achatamento do tubo de PVC (SALES et al, 2017).

4.5. FLEXÃO

No ensaio de flexão, utilizou-se a mesma máquina do ensaio de compressão diametral apenas mudando o aparato, alterando-a para ensaio de flexão por três pontos. Centralizou-se a ponteira no ponto médio do comprimento do corpo de prova, fez-se a conferência das distâncias para cada lado da ponteira com paquímetro digital, afim de garantir essa centralidade. Os apoios foram alocados 15,85 mm de distância de cada extremidade externa, adaptando-se do pedido na norma ASTM D790. Aproximou-se lentamente a ponteira do corpo de prova, até que este estava preso sob uma força menor que 5 N, e zerou-se o deslocamento para dar início no ensaio, conforme Figura 24.

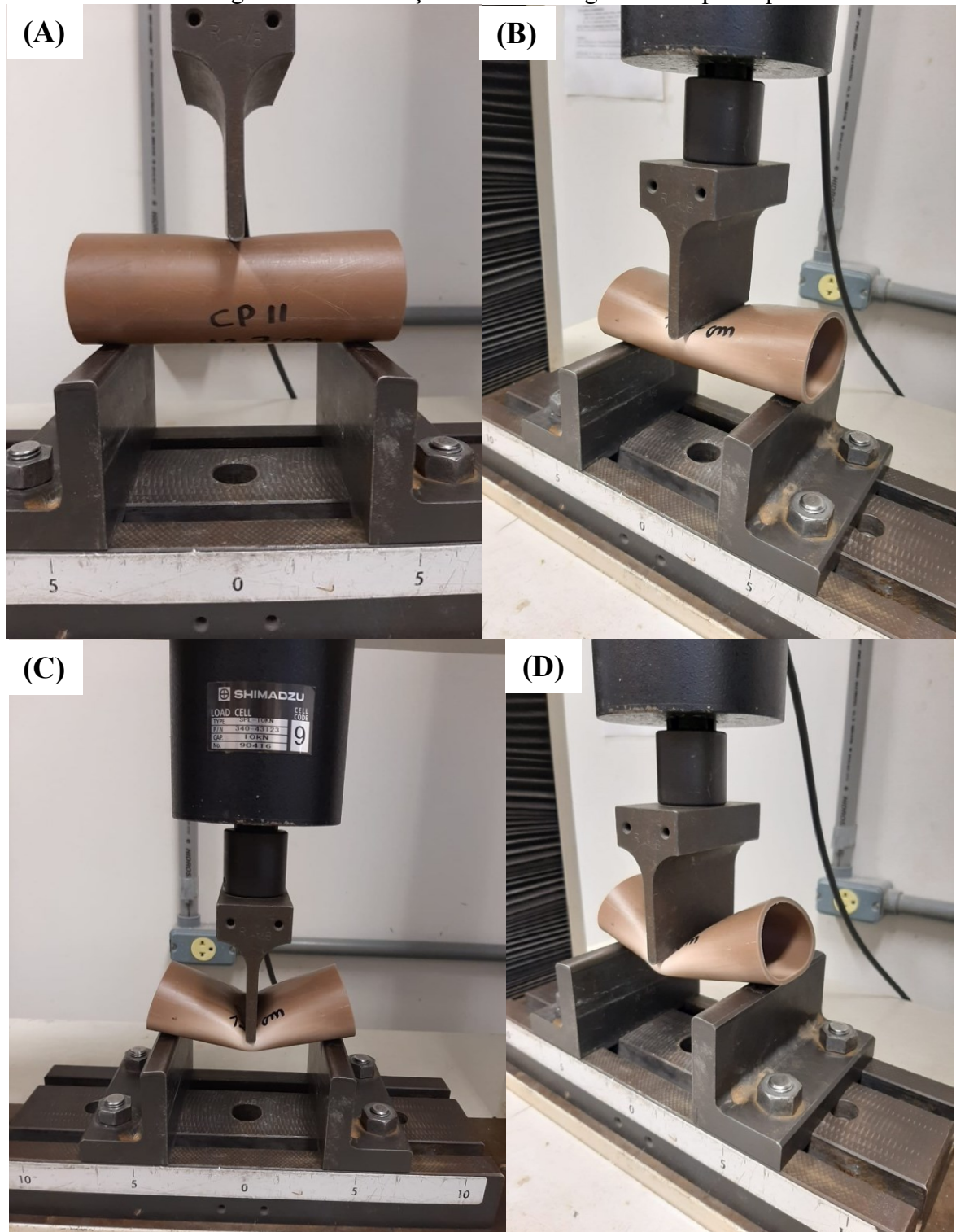
Figura 24 – Corpo de prova preso pela ponteira na eminência do ensaio de flexão por três pontos



Fonte: Autora (2022).

A flexão se deu a uma velocidade constante de 12 mm/min até que ocorra a deformação máxima ou ruptura do corpo de prova. A Figura 25 ilustra a sequência do ensaio.

Figura 25 – Sequência do ensaio de flexão por três pontos. (A) Início do ensaio com apresentação das primeiras deformações aparentes no corpo de prova. (B) Efeito *Whitening* na região da aplicação da força. (C) Deformação máxima atingida no ensaio, vista frontal. (D) Vista diagonal da deformação máxima atingida no corpo de prova



Fonte: Autora (2022).

O Efeito *Whitening*, ou branqueamento, indicado na Figura 25 (B), se dá devido a esforços mecânicos sofridos pelo corpo de prova, formando manchas brancas na região de

deformação plástica (SILVA, 2014). Para Laiarinandrasana et al (2009) apud Silva (2014), este efeito gera nucleação e crescimento de cavidades no corpo de prova, aumentando a porosidade do material. Relata-se também, que não ocorreu ruptura do corpo de prova, apenas deformação máxima, como dado na Figura 25 (D).

Os dados de força e deslocamento no ensaio de flexão foram registrados pelo *software* da máquina de ensaios universais, sendo estes no momento de deformação máxima do corpo de prova, fez-se a análise estatística da média, desvio padrão e coeficiente de variação destes dados, denotados na Tabela 10.

Tabela 10 – Força máxima e deslocamento máximo do ensaio de flexão por três pontos, com valores da média (\bar{x}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (cv) destes dados

CP	Força máxima (kN)	Deslocamento na força máxima (mm)
1	3,237	29,890
2	3,241	29,270
3	3,321	25,620
4	3,251	29,850
5	3,294	29,790
\bar{x} (kN)	3,269	28,884
s	0,040	1,840
cv (%)	1,130	6,380

Fonte: Autora (2022).

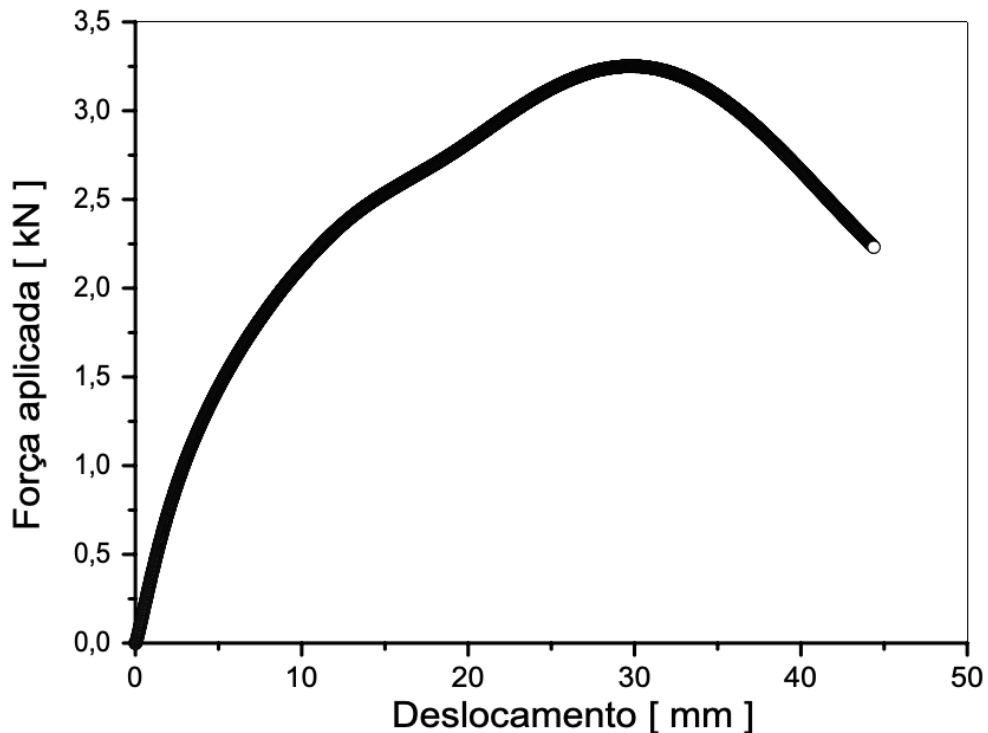
A média da força máxima ficou em 3,28 kN e desvio padrão de 0,04 kN, indicando baixa dispersão dos valores, diferindo-se do deslocamento na força máxima, no qual o coeficiente de variação e desvio padrão indicam maior oscilação entre o deslocamento. Essa dispersão apresentada pela análise, atribui-se do efeito *Whitening* sofrido durante o ensaio, pois o mesmo não ocorre de forma homogênea ao longo do corpo de prova, observando que no ponto de aplicação da força, o branqueamento ocorre de forma generalizada, já imediatamente ao lado deste ponto, tem-se uma menor severidade do efeito.

Um segundo fator que pode, também, influenciar essa dispersão dada pelo coeficiente de variação, pela Figura 25 (C) e (D) observa-se o deslocamento vertical das extremidades dos corpos de provas causados pela aplicação da força de flexão no ponto central, na qual, o comportamento de cada extremidade pode variar em relação ao outro, causando uma diferença

entre valores obtidos de cada corpo de prova. Por menor que seja o erro cometido no posicionamento do corpo de prova nos dois apoios fixos, o coeficiente de variação do deslocamento máximo (deflexão máxima) refletirá o erro acumulado.

Um gráfico característico da força aplicada (kN) pelo deslocamento (mm) foi plotado para o ensaio de flexão por três pontos a partir dos resultados obtidos, apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Força aplicada pelo deslocamento no ensaio de flexão por três pontos



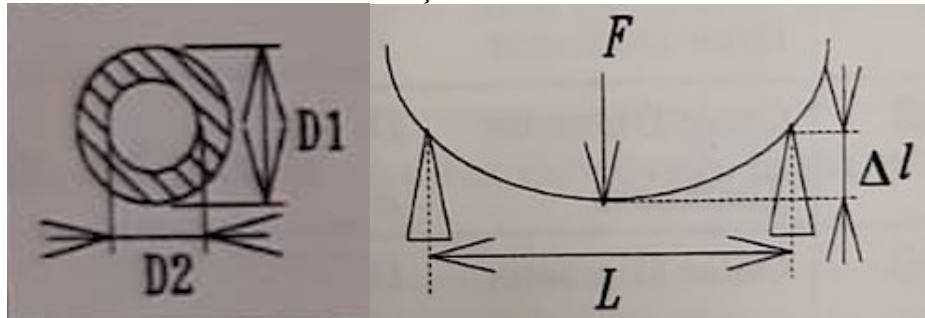
Fonte: Autora (2022).

Pela Figura 26, verifica-se a ocorrência do comportamento elástico na parte linear (até 0,5 kN aproximadamente), alterando-se para elástico-plástico com a curvatura seguindo até o final do ensaio. A força máxima seguida pelo declínio da curva indica a perda de resistência mecânica do corpo de prova quando submetido ao esforço mecânico de flexão. A parede superior do tubo deformou-se plasticamente, após um severo estiramento de cadeias poliméricas, comprometendo-se a estrutura tubular.

A tensão na força máxima (σ) e deformação na força máxima (ε) aplicados para tubos no ensaio de flexão por três pontos são descritos pelas Equações 9 e 10, respectivamente, sendo D o diâmetro externo do tubo (definido como D_1 na Figura 27), d o diâmetro interno do tubo PVC (descrito como D_2 na Figura 27), L_s a distância entre os suportes que neste caso foi de 95,25 mm (dado como L na Figura 27), F a carga aplicada pela ponteira no centro do corpo de

prova, Δl a deflexão máxima (ou deslocamento máximo) devido a carga aplicada, de acordo com a Figura 27 (SHIMADZU CORPORATION, 2002).

Figura 27 – Representação esquemática das variáveis da análise da tensão e deformação na força máxima



Fonte: Shimadzu Corporation (2002, p. 118).

$$\sigma = \frac{8L_sDF}{\pi(D^4-d^4)} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{6D}{L_s^2} \times \Delta l \quad (10)$$

Aplicou-se os conceitos de tensão (σ) e deformação (ε) na força máxima para os corpos de provas testados, avaliando média, desvio padrão e coeficiente de variação destes dados, de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11 – Tensão (σ) e deformação (ε) na força máxima no ensaio de flexão por três pontos, com valores média (\bar{x}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (cv) destes dados

CP	σ (MPa)	ε
1	7,696	0,994
2	7,730	0,972
3	7,892	0,851
4	7,764	0,991
5	7,833	0,990
\bar{x} (MPa)	7,783	0,959
s	0,080	0,060
cv (%)	1,020	6,380

Fonte: Autora (2022).

A tensão e deformação na força máxima tiveram média de 7,78 MPa e 0,96, respectivamente, como desvio padrão na ordem de centésimos, indicando baixa dispersão entre os valores, assim como o coeficiente de variação. Por a norma ASTM D790 abranger polímeros de maneira geral, não possui valores de referência para comparativo, citando apenas para alguns materiais que não são relevantes para o estudo presente, desta forma, reafirma-se a necessidade de mais estudos nessa temática (ASTM, 2017).

Após 22 dias de ensaio de flexão por 3 pontos, verificou-se por inspeção visual que as deformações ocorridas nos corpos de prova tiveram uma restituição elástica (deformação elástica dependente do tempo) após o ensaio, porém com deformação plástica permanente, conforme Figura 28. Além destas, o efeito *whitening* ainda é visível, mas com menor intensidade que durante o ensaio, também ocorrendo linhas de estiramento devido a carga central aplicada.

Figura 28 – Corpo de prova após 22 dias de ensaio de flexão por três pontos. (A) Vista superior do corpo de prova. (B) Vista lateral do corpo de prova



Fonte: Autora (2022).

5. CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho, pôde-se explorar diversas características a respeito de tubos de PVC com 50 mm de diâmetro, por meio das propriedades físicas, como: massa, comprimento, diâmetro externo e interno, volume e densidade, bem como com os ensaios de compressão diametral e flexão por três pontos. Pesquisas de estudos relacionados ao tema foram realizadas e ressalta-se a escassez na abordagem e relação direta com o estudo deste trabalho.

Na análise das massas dos corpos de provas de 127 mm e 150 mm, o desvio padrão e o coeficiente de variação apontam baixa dispersão entre as massas, denotando consistência e precisão no corte dos corpos de prova. Para o comprimento, aferiu-se dois pontos opostos do tubo para verificar equidade nas mesmas, revelando-se uma baixa diferença no comprimento, sendo na grandeza de - 0,10 mm e + 0,03 mm para corpos de prova de 127 e 150 mm, respectivamente.

Os diâmetros externo e interno dos corpos de prova são provenientes do processo de fabricação, no qual a mensuração via paquímetro digital indicou baixa variabilidade por parte do fabricante. Com os dados de diâmetros externo e interno e comprimento, calculou-se o volume do cilindro oco, diferindo-se na ordem de 0,56 cm³ para o corpo de prova de 127 mm e 1,28 cm³ para o de 150 mm para o desvio padrão.

Determinou-se por meio da razão dentre a massa e o volume a densidade dos corpos de prova, definindo um intervalo da soma e subtração da média com duas vezes o desvio padrão, comparando-os com a literatura, na qual para ambos os corpos de prova obteve-se resultados coerentes com os autores consultados.

Nos ensaios de compressão, observou-se a ocorrência da deformação elástica seguida pela plástica nos corpos de prova, causando efeito de estiramento na superfície do material, indicando alteração na microestrutura do tubo. Os resultados dos ensaios foram precisos, e acredita-se que sejam representativos do esforço mecânico deste material no regime obtido, salientando-se a restituição elástica do material, que após 22 dias recuperou-se 86,68% do diâmetro externo.

Para o ensaio de flexão por três pontos, não ocorreu a ruptura do material, porém uma força e deslocamento máximo foram atingidos, indicando que a carga máxima no regime plástico do material. Por estes pontos de máximas, a tensão e deformação máxima foram obtidas, sendo na ordem de 7,783 MPa e 0,956, respectivamente. Em uma análise visual, ocorreu formação de efeito *whitening* e de estiramento nos corpos de prova, no qual essa

alteração gerada pelo regime plástico desconfigura o arranjo das cadeias poliméricas, sendo ainda presente após 22 dias de ensaio.

Todas as análises estatísticas de média, desvio padrão e coeficiente de variação indicaram elevada confiabilidade nos resultados obtidos, denotando a seriedade do estudo.

5.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Realização de ensaio mecânico de compressão diametral explorando corpos de provas com 50, 100 e 150 mm de comprimento para um tubo com diâmetro externo de 50 mm, analisando a relação do comprimento do corpo de prova com a com a força máxima suportada no ensaio e restituição elástica após ensaio;
- Realização de ensaio mecânico de compressão diametral explorando corpos de provas com 50, 100 e 150 mm de diâmetro para um comprimento de 150 mm, analisando a relação do diâmetro do corpo de prova com a tensão e deformação exercida no ensaio;
- Realização de ensaio mecânico de flexão por três pontos para corpos de provas com 50, 127 e 150 mm de comprimento para um tubo com diâmetro externo de 50 mm, analisando a relação do comprimento do corpo de prova com a tensão e deformação exercida no ensaio;
- Realização de ensaio mecânico flexão por três pontos para corpos de provas com 50, 100 e 150 mm de diâmetro para um comprimento de 127 mm, analisando a relação do diâmetro do corpo de prova com a tensão e deformação exercida no ensaio.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Juliana P. D.; RODOLFO JUNIOR, Antonio. Análise do processo de gelificação de resinas e compostos de PVC suspenso. **Polímeros**, v. 16, n. 2, p. 165-173, jun. 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D790-17**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken: ASTM, 2017. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5680**: Dimensões de tubos de PVC rígido. Rio de Janeiro: ABNT 1977.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14272**: Tubos de PVC - Verificação da compressão diametral. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.
- BARBETTA, Pedro A.; REIS, Marcelo M.; BORNIA, Antônio C. **Estatística para curso de engenharia e informática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- BIANCHI, Marcos. **Desbalanceamento de Resistência Mecânica em Materiais Poliméricos**: caracterização experimental e aplicação exploratória para projeto. 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2011.
- BRASKEM (org.). **Propriedades de referência dos compostos de PVC**. 2002. 12 p. Boletim Técnico. Disponível em: <https://bitly.com/1ZHU7>. Acesso em: 09 abr. 2021.
- CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- CARLOS, Edison. Aplicação do PVC na construção civil. **Instituto Brasileiro do PVC**. 2007. Disponível em: <https://bitlybr.com/gwEdwXX>. Acesso em: 08 abr. 2021.
- FIGUEREDO, Antônio Domingues de; CHAMA NETO, Pedro Jorge. Avaliação de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçado com fibras de aço. **Revista DAE**, São Paulo, v. 178, p. 34-39, jan. 2008.
- FOGAÇA, Jennifer. Manual da Química. **Densidade**. 2022. Disponível em: <https://bitly.com/iYTBj>. Acesso em: 07 fev. 2022.
- FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL. **Atlas do Plástico**: fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll, 2020. 64 p. Disponível em: <https://bitlybr.com/TOiNk2l>. Acesso em: 28 fev. 2022.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HIPOLITO, Israel da Silva; HIPOLITO, Rafael da Silva; LOPES, Gean de Almeida. Polímeros na Construção Civil. In: X SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 10., 2013, Rio de Janeiro. **Simpósio**. Rio de Janeiro: AEDB, 2013. p. 1-16. Disponível em: <https://bitlybr.com/XMcg9gJO>. Acesso em: 28 fev. 2022.

LIMA JÚNIOR, Francisco Alves de. **Estudo do efeito da orientação molecular nas propriedades mecânicas de tubos em policloreto de vinila (PVC)**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MARTINS, Gilson Silvestre. **Preparação e caracterização de compósitos de Poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MEDEIROS, F. A.; WIEBECK, H. PVC Orientado: avaliação de processo de orientação e das propriedades mecânicas em função da razão de estiramento. **Polímeros**, v. 23, p. 636–643, 2013.

MEDEIROS, Pablo Rodrigo. **Determinação experimental e simulação numérica do comportamento viscoelástico de polímeros: estudos em PVC**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MSPC. **Volumes de Sólidos Comuns I**. 2018. Disponível em: <https://www.mspc.eng.br/dir10/vol10.php>. Acesso em: 07 fev. 2022.

SALES, Diego Henrique de Oliveira *et al.* Estudo da cristalinidade induzida por deformação plástica no Policarbonato. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 3, p. 26-28, jun. 2017.

SHIMADZU CORPORATION. **Reference Manual**. 1 ed. Columbia: Shimadzu Corporation, 2002.

SILVA, Marlon Deumauir Cozine. **Geração do Efeito Whitening em Polifluoreto De Vinilideno (PVDF) sob Carregamento Cíclico**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SOUZA, Leandro Rodrigues da Silva. **Desenvolvimento de estrutura veicular do tipo space frame construída com tubos de PVC**. 2015. Dissertação (Mestrado em Gestão Organizacional) - Regional Catalão, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2015.

SOUZA, Leandro Rodrigues da Silva *et al.* Simulação computacional por elementos finitos e validação experimental de tubos de PVC solicitados à flexão. *In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria*, 1., 2014, Caldas Novas. Anais [...]. Caldas Novas: CNMAI, 2014. p. 1-9. Disponível em: <https://bityli.com/LiIaR>. Acesso em: 15 mar. 2021.

TIGRE. **Tubo soldável 3 m**. 2021. Disponível em: <https://www.tigre.com.br/tubo-soldavel-3-m>. Acesso em: 03 maio 2021.