

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KARLA MARIA JULIANO NADAL

MÉTODO DE ARQUEAÇÃO DE TANQUES CILÍNDRICOS – ESTUDO DE
NOVA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO VOLUMÉTRICA COM O
USO DE VARREDURA À LASER

CURITIBA

2025

KARLA MARIA JULIANO NADAL

MÉTODO DE ARQUEAÇÃO DE TANQUES CILÍNDRICOS – ESTUDO DE
NOVA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO VOLUMÉTRICA COM O
USO DE VARREDURA À LASER

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Nadal, Karla Maria Juliano

Método de arqueação de tanques cilíndricos – estudo de nova metodologia para determinação volumétrica com o uso de varredura à laser / Karla Maria Juliano Nadal. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Luis Augusto Koenig Veiga

1. Arqueação. 2. Topografia. 3. Tanques. 4. Laser - Indústria. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Veiga, Luis Augusto Koenig. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **KARLA MARIA JULIANO NADAL**, intitulada: **MÉTODO DE ARQUEAÇÃO DE TANQUES CILÍNDRICOS - ESTUDO DE NOVA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO VOLUMÉTRICA COM O USO DE VARREDURA À LASER**, sob orientação do Prof. Dr. LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 24 de Fevereiro de 2025.

Assinatura Eletrônica

08/04/2025 15:57:59.0

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

09/04/2025 08:44:00.0

ÉRICA SANTOS MATOS BALUTA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

09/04/2025 15:52:48.0

SAMIR DE SOUZA OLIVEIRA ALVES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica

08/04/2025 15:55:07.0

PEDRO LUIS FAGGION
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico essa dissertação aos meus pais, os
engenheiros Carlos e Katia, meus
maiores apoiadores, incentivadores,
sem eles eu nada seria. Com amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu agradecimento eterno, porque sem Ele nada seria possível.

A toda minha família que me apoia incondicionalmente sempre, especialmente a meus pais Carlos e Katia, minha irmã Laura Beatriz, minha avó Maria Nazaré, meus irmãos Marco e Mateus, agradeço a compreensão, o amor e o carinho.

Ao Matheus Taurino por todo o apoio, dedicação, carinho e amor.

Em memória da minha madrinha e tia amada, a Professora Thaisa Maria Nadal, que sempre me incentivou tanto.

Aos meus amigos queridos, que sempre estiveram presentes comigo nessa caminhada, sempre tinham uma palavra amiga e o companheirismo presente, ao Minás, Rafaela, Raul, Pedro, Ana Paula, Olivia, Priscila, Tchela, Robson, Priscilla Mara, José Henrique e Matheus Lincoln. Meu agradecimento eterno pelos momentos compartilhados nesse período.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga, pelas valiosas contribuições, os ensinamentos, todo o auxílio com os ensaios, toda a compreensão e dedicação empenhada nesse projeto, minha eterna gratidão mestre.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro através da concessão de bolsa de mestrado.

Aos Laboratórios na Universidade Federal do Paraná, o GEENG - Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia, o LAIG – Laboratório de Instrumentação Geodésica e o LABTOPO – Laboratório de Topografia, meu agradecimento pelo auxílio nos ensaios com o fornecimento de instrumentos, equipamentos e espaço para os experimentos.

Aos meus colegas de Pós-graduação, aos meus colegas de laboratório, a todo o pessoal do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pelo auxílio com as disciplinas e os ensinamentos. Especialmente a minha amiga Vic por compartilhar os momentos difíceis nas disciplinas.

A minha banca examinadora, Prof. Dr. Pedro Luis Faggion, Prof. Dra. Érica Santos Matos Baluta e Prof. Dr. Samir Souza Oliveira Alves, por aceitarem o convite e pelas valiosas contribuições.

À Universidade Federal do Paraná e ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, meu agradecimento por ter tido a oportunidade de ter sido, mais uma vez, aluna na Universidade que tanto me orgulho. Imensurável.

“Encilho o cavalo manso
mas boto o laço nos tentos
Se força falta no braço
Na coragem me sustento

Se lembra o tempo de quebra
A vida volta prá trás
Sou bagual que não se entrega
Assim no mais”

Veterano

Letra e Melodia de Tocaio Ferreira e Ewerton Ferreira,

Conhecidos pela interpretação do saudoso Leopoldo
Rassier e Os Serranos na 10ª Califórnia da Canção Nativa.

Nativistas Gaúchos

RESUMO

Este estudo é uma proposta e avaliação da aplicação de uma metodologia para verificação de capacidade volumétrica de tanques armazenadores de líquidos ou graneis (arqueação) empregando-se a técnica de varredura à laser, tomando como base a Norma do Inmetro NIE-DIMEL-021 Procedimentos gerais para arqueação de tanques, a qual baseia-se na Norma Técnica ISO 7507-1-1993 (*Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks – Part 1: Strapping method*) adaptada para os ensaios realizados. A proposta busca apresentar uma metodologia alternativa ao processo atual de mensuração, mais rápida e precisa comparativamente a técnica tradicional. Nesse trabalho, são demonstradas técnicas topográficas industriais de mensuração na realização de dois ensaios, utilizando a técnica tradicional do método de arqueação e a técnica alternativa por varredura à Laser. O Ensaio em laboratório numa tubulação de água apresentou um comparativo entre o método tradicional e o método alternativo em laboratório utilizando um modelo reduzido. O Ensaio no reservatório de água, demonstrou a eficácia do método alternativo em um modelo ideal. O desenvolvimento da técnica alternativa, sua viabilidade e demais considerações são o cerne desse estudo, que propõe a possibilidade de sua execução em um modelo real, um tanque de petróleo. Os estudos realizados demonstraram a eficácia da aplicação da metodologia de varredura à laser para os estudos de caso realizados.

Palavras-chave: Método de Arqueação; Topografia Industrial; Método de varredura à laser, LiDAR.

ABSTRACT

This study proposes and evaluates the application of a methodology for verifying the volumetric capacity of liquid or bulk storage tanks (gauging) using laser scanning technology, based on the Inmetro standard NIE-DIMEL-021 General procedures for gauging tanks, which is based on the ISO 7507-1-1993 Technical Standard (Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks – Part 1: Strapping method) adapted for the tests performed. The proposal seeks to present an alternative methodology to the current measurement process, which is both faster and more accurate compared to the traditional technique. In this work, industrial topographic measurement techniques are demonstrated in the performance of two tests, using the traditional gauging method and the alternative laser scanning technique. A laboratory test on a water pipe presented a comparison between the traditional method and the alternative method in the laboratory using a reduced model. The test in the water reservoir demonstrated the effectiveness of the alternative method in an ideal model. The development of the alternative technique, its viability and other considerations are the core of this study, which proposes the possibility of its execution in a real model, an oil tank. The studies carried out demonstrated the effectiveness of the application of the laser scanning methodology for the case studies carried out.

Keywords: Tank calibration method, Manual strapping method, Industrial topography, Laser scanning method, LiDAR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Metrologia Industrial.....	25
Figura 02 - Verificação de Radar Fixo	33
Figura 03 - Verificação de Balanças dinâmicas	34
Figura 04 - Verificação de Hidrômetros em Bancada	34
Figura 05 - Verificação de Bombas medidoras para combustíveis líquidos	35
Figura 06 - Estrutura Geral da Metrologia no Brasil.....	38
Figura 07 - Arqueação de Tanques, detalhe para as plataformas de trabalho e andaimes, equipamentos previstos pela norma ISO 7507-1.....	43
Figura 08 - Verificação de Arqueação de Tanques.....	43
Figura 09 - Geometria de Amostragem do Laser Scanner Terrestre	56
Figura 10 - Coleta de coordenadas Polares do Sistema Laser	57
Figura 11 - Nuvem de pontos reconstruindo a Tubulação DN300 no Software CloudCompare	58
Figura 12 - O registro em duas posições distintas	60
Figura 13 - Tubulação DN300	74
Figura 14 - Trena convencional com estojo	75
Figura 15 - Trena com suporte.....	76
Figura 16 - Trens de fita e metro padrão posicionados em seu início	77
Figura 17 - Diferenças na posição 50 cm	78
Figura 18 - Reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal	80
Figura 19 - Localização do Reservatório de água e do Bloco de Engenharia Florestal	81
Figura 20 - Laser Scanner de Classe 1	82
Figura 21 - Componentes do sistema BLK360	82
Figura 22 - Componentes do Instrumento Laser Scanner.....	83
Figura 23 - Campo de varredura Laser	84
Figura 24 - Seção de Referência materializada com o barbante e os alvos	86
Figura 25 - Visada no alvo ponto P1 na materialização da Seção de Referência.....	87
Figura 26 - Nível Geodésico Leica DNA03 instalado no tripé industrial visando a Seção de Referência implantada na tubulação DN300	87
Figura 27 - A autora implantando a seção superior	89

Figura 28 - Localização dos Pontos onde foram mensuradas as espessuras	90
Figura 29 - Discrepância e irregularidades nas espessuras na Tubulação indicadas pelas setas	90
Figura 30 - Tubulação DN300 e suas seções.....	92
Figura 31 - Trena Métrica de PVC devidamente horizontalizada materializando um curso passando sobre uma seção	93
Figura 32 - Trena Métrica de PVC devidamente horizontalizada materializando um curso passando sobre uma seção	94
Figura 33 - Mensuração de um curso com o uso de Fita Métrica de PVC pelo Método de Arqueação	94
Figura 34 - Mensuração de um curso com o uso de Trena Métrica de Fita de PVC pelo Método de Arqueação	95
Figura 35 - Laser Scanner em funcionamento (Luz acesa indicando operação)	96
Figura 36 - Formação matemática para o posicionamento das estações	97
Figura 37 - Disposição das estações no terreno pós planejamento, visto no software Leica Cyclone Register 360	100
Figura 38 - Estações Locadas em formação circular entorno do objeto (indicado por setas)..	101
Figura 39 - Levantamento com o Laser Scanner.....	102
Figura 40 - Levantamento com o Laser Scanner, vista 2	103
Figura 41 - Vista do reservatório de água e a varredura à laser em uma estação.....	103
Figura 42 - A estação deslocada pela presença de uma árvore	104
Figura 43 - Realizando a segmentação manual na tubulação DN300 do ensaio do LAIG utilizando a ferramenta segment. A seta indica um conjunto de pontos removido	117
Figura 44 - Resultado da segmentação manual na tubulação DN300	118
Figura 45 – Segmentação manual no reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal utilizando a ferramenta segment	118
Figura 46 - Presença da porta no reservatório de água, posteriormente filtrada	119
Figura 47 - Resultado da segmentação manual no reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal.....	119
Figura 48 - A ferramenta SOR no CloudCompare	120
Figura 49 - Resultado da filtragem automática na tubulação DN300 no Ensaio do LAIG	121
Figura 50 - Resultado da filtragem automática no reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal.....	121

Figura 51 - Seções de 1 em 1 metro no reservatório de água	123
Figura 52 - Seções de 0,10 em 0,10 metros na tubulação DN300	123
Figura 53 - Tubulação DN300 com 6 seções.....	124
Figura 54 - Tubulação DN300 com 3 seções.....	125
Figura 55 - Vista das 07 seções definidas e selecionadas no reservatório de água.....	126
Figura 56 - Vista da seção 06 incompleta no software AutoCAD	126
Figura 57 - Vista da seção 01 incompleta no software AutoCAD	127
Figura 58 - Vista da seção 04 completa no software AutoCAD	127
Figura 59 - Vista das seções consideradas para o cálculo volumétrico no reservatório de água	128
Figura 60 - Obtenção da área da seção 04 do reservatório de água com o uso do software AutoCAD.....	129
Figura 61 - Tentativa de obter-se a área em seção 01 do reservatório de água, que estava com o perímetro incompleto.....	130
Figura 62 - Distância entre seções no software CloudCompare	131
Figura 63 - Distância entre seção à borda no software CloudCompare	131
Figura 64 - Cilindro detectado com o uso da ferramenta RANSAC na nuvem de pontos do Ensaio do Reservatório de água	135
Figura 65 - Cilindro detectado com o uso da ferramenta RANSAC na nuvem de pontos do Ensaio do LAIG	136
Figura 66 - Seleção de Parâmetros para a ferramenta RANSAC no Ensaio do Reservatório de água.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Tolerâncias.....	51
Tabela 02 - Seções na Tubulação DN300	88
Tabela 03 - Espessura da Tubulação DN300	89
Tabela 04 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 1 – Comprimentos da Circunferência	106
Tabela 05 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 2 – Altura das seções.....	106
Tabela 06 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 3 – Espessuras.....	106
Tabela 07 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 4 – Média e desvio padrão da espessura	107
Tabela 08 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 5.....	107
Tabela 09 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 6.....	107
Tabela 10 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 7.....	108
Tabela 11 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 8.....	108
Tabela 12 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 1 – Comprimentos da circunferência	109
Tabela 13 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 2 – Altura das seções.....	109
Tabela 14 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 3 – Espessuras.....	109
Tabela 15 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 4 – Média e desvio padrão da espessura	110
Tabela 16 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 5.....	110
Tabela 17 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 6.....	110
Tabela 18 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 7.....	111
Tabela 19 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 8.....	111
Tabela 20 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 1 – Comprimentos da circunferência	112
Tabela 21 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 2 – Altura das seções	112
Tabela 22 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 3 – Espessuras.....	112
Tabela 23 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 4 – Média e desvio padrão da espessura	113
Tabela 24 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 5.....	113

Tabela 25 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 6	113
Tabela 26 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 7	114
Tabela 27 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 8	114
Tabela 28 - Erros nos Registros - Ensaio no LAIG	115
Tabela 29 - Erros nos Registros - Ensaio no reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal	116
Tabela 30 - Cálculo do volume – Ensaio do LAIG com 3 seções	132
Tabela 31 - Cálculo do volume – Ensaio do LAIG com 5 seções	133
Tabela 32 - Cálculo do volume – Ensaio do Reservatório de água com 4 seções.	133
Tabela 33 - Cilindro RANSAC para Ensaio do LAIG	137
Tabela 34 - Cilindro RANSAC para Ensaio do Reservatório de água	137
Tabela 35 - Método de Arqueação - Resultados - Ensaio LAIG	138
Tabela 36 - Tabela de resultados dos experimentos do Ensaio LAIG	139
Tabela 37 - Resultado volumétrico - comparação entre métodos	140

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIPM	Bureau Internacional de Pesos e Medidas
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
CONMETRO	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
DIMEL	Diretoria de Metrologia Legal no Brasil
GEENG	Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia
GUM	Guia Para a Expressão de Incerteza de Medição
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IPEM	Instituto de Pesos e Medidas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IUGG	<i>International Union of Geodesy and Geophysics</i>
LAIG	Laboratório de Instrumentação Geodésica
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LST	Laser Scanner Terrestre
MDT	Modelo Digital de Terreno
MNE	Modelo Numérico de Elevação
MSM	<i>Manual Strapping Method</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NIE	Normas Inmetro Específicas
OIML	Organização Internacional de Metrologia Legal
PBQP	Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade
RANSAC	<i>Random Sample Consensus</i>
RBC	Rede Brasileira de Laboratórios de Calibração
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
SINMETRO	Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
SOR	<i>Statistical Outlier Removal</i>

TCM	<i>Tolerance Compliance Measurement</i>
TOF	<i>Time of Flight</i>
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
2.	OBJETIVOS	21
2.1.	OBJETIVO GERAL	21
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3.	JUSTIFICATIVA.....	22
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
4.1.	INTRODUÇÃO À METROLOGIA E A NORMALIZAÇÃO.....	23
4.1.1.	HISTÓRICO DA METROLOGIA E DAS MEDIÇÕES	27
4.1.2.	NORMALIZAÇÃO	38
4.2.	MÉTODO DE ARQUEAÇÃO E A NORMA ISO 7507 – 1 – 1993	40
4.2.1.	PRECAUÇÕES GERAIS CONFORME A NORMA ISO 7507 PARA A ARQUEAÇÃO	44
4.2.2.	PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA CONFORME A NORMA ISO 7507 PARA A ARQUEAÇÃO	45
4.2.3.	EQUIPAMENTOS ADEQUADOS CONFORME A NORMA ISO 7507	46
4.2.4.	EXIGÊNCIAS GERAIS	47
4.2.5.	METODOLOGIA DE ARQUEAÇÃO DE TANQUES	48
4.2.6.	PROCEDIMENTO DE ARQUEAÇÃO	50
4.2.7.	REPETIÇÃO DE MEDIÇÃO	50
4.2.8.	TOLERÂNCIA.....	51
4.3.	TOPOGRAFIA INDUSTRIAL	51
4.4.	LEVANTAMENTO POR VARREDURA À LASER.....	54
4.5.	PRINCÍPIOS DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO APLICADOS A GEODÉSIA E A METROLOGIA.....	62
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	72
5.1.	TUBULAÇÃO DN300	73
5.2.	TRENA MÉTRICA PARA O MÉTODO DE ARQUEAÇÃO	74
5.3.	RESERVATÓRIO NO BLOCO DA ENGENHARIA FLORESTAL	79
5.4.	LASER SCANNER LEICA BLK 360	81
5.5.	ENSAIO NO LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO GEODÉSICA – LAIG	84
5.5.1.	MÉTODO DE ARQUEAÇÃO NO ENSAIO NO LAIG	85
5.5.2.	MÉTODO VOLUMÉTRICO UTILIZANDO O LASER SCANNER NO LAIG.....	95

5.6.	ENSAIO NO RESERVATÓRIO DE ÁGUA DO BLOCO DA ENGENHARIA FLORESTAL.....	96
5.6.1.	PLANEJAMENTO DE CAMPO	97
5.6.2.	LOCAÇÃO DAS SEÇÕES E COLETA DOS DADOS	100
6.	RESULTADOS E ANÁLISES	105
6.1.	PROCESSAMENTO DE DADOS DO MÉTODO DE ARQUEAÇÃO NO ENSAIO DO LAIG.....	105
6.1.1.	CÁLCULOS REFERENTES A PRIMEIRA MEDIÇÃO – UTILIZANDO A TRENA MÉTRICA DE FITA DE PVC DE 30 METROS, E A ORIGEM ESTÁ FIXA.	106
6.1.2.	CÁLCULOS REFERENTES A SEGUNDA MEDIÇÃO – UTILIZANDO A FITA MÉTRICA DE PVC DE 1,50 METROS, E A ORIGEM DA LEITURA NA TRENA ESTÁ VARIÁVEL.....	109
6.1.3.	CÁLCULOS REFERENTES A TERCEIRA MEDIÇÃO – UTILIZANDO A TRENA MÉTRICA DE FITA DE PVC DE 30 METROS, E A ORIGEM DA LEITURA NA TRENA ESTÁ VARIÁVEL.	112
6.2.	PROCESSAMENTO DE DADOS COM A METODOLOGIA DE VARREDURA À LASER.....	115
6.2.1.	PROCESSAMENTO DA SEGMENTAÇÃO E FILTRAGEM	117
6.2.2.	PROCESSAMENTO DAS SEÇÕES	122
6.2.3.	PROCESSAMENTO DOS CÁLCULOS DA METODOLOGIA DE VOLUMETRIA COM VARREDURA À LASER COM O USO DE SEÇÕES.....	132
6.2.4.	PROCESSAMENTO COM O USO DO ALGORITMO RANSAC	134
6.3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES FINAIS	138
7.	PROPOSTA DE NORMA À NORMA ISO 7507	141
8.	CONCLUSÃO	145
8.1.	RECOMENDAÇÕES FUTURAS	148
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	149

1. INTRODUÇÃO

Na metrologia ou ciência da medição, define-se medição, que segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM, 2012) é o conjunto de operações que tem por objetivo determinar o valor de uma grandeza. Associada a este tema está a Topografia de Precisão voltada à ambientes Industriais, que segundo Nadal (2000) é a Topografia aplicada a trabalhos com finalidades produtivas industriais e controle de qualidade de produtos, contexto dentro da realidade da engenharia de precisão.

A topografia industrial está sujeita a particularidades decorrentes do ambiente e precisões almejadas no posicionamento, onde se empregam os mesmos procedimentos e técnicas, porém em ambiente industrial, empregando-se equipamentos de precisão. Esta área de estudo aplica-se a diferentes tipos de trabalhos, dentre os quais a determinação de volume de cilindros e tanques, ou também o denominado processo de determinação volumétrica, o Método de Arqueação (*Manual Strapping Method*).

Dentro dos conceitos na engenharia de precisão, o método de arqueação é abordado, segundo a Norma Internacional ISO 7507 – 1 – 1993 (*Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks – Part 1: Strapping method*) utilizada para Calibragem de Tanques Cilíndricos Verticais, através de ensaios, com base nos modelos cilíndricos aproximados. O método de arqueação é atividade compulsória realizada no Brasil pelo Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, e empresas que possuem autorização. E é com base em normas metrológicas vigentes que o desenvolvimento deste trabalho foi realizado.

Os ensaios realizados nesta pesquisa foram baseados no método de arqueação de seções segundo a Norma ISO 7507- 1- 1993 e adaptados para os objetos de estudo definidos e os ambientes em que foram executados. Foi realizado um ensaio em ambiente confinado e controlado, em laboratório, com uma tubulação de água DN300, um modelo reduzido. Também foi realizado um ensaio em ambiente externo, com condições adversas, com um modelo ideal, um reservatório de água.

De acordo com Dos Santos, De Rezende e Lazari (2004) o método de arqueação de seções é um conjunto de operações que visa determinar a capacidade volumétrica de um tanque ou reservatório até um ou vários níveis de enchimento. O método empregado atualmente é indicado pela norma já é consagrado e baseia-se em medidas do comprimento da circunferência do tanque para aferições por curso, efetuando-se em níveis, para o cálculo do volume e posterior desenvolvimento de uma tabela volumétrica. Esta pesquisa é a proposta e a avaliação de um método alternativo de obtenção de dados para o cálculo de volume e modelagem dos objetos estudados. Foi realizado o levantamento através de varredura à laser empregando-se um Laser Scanner Terrestre (LST) dos objetos de estudo, e através dos resultados desse levantamento, juntamente com o processamento e extração de feições da nuvem de pontos, o cálculo do volume também pode ser obtido.

Apresentou-se conceitos fundamentais de Topografia Industrial, Metrologia Industrial, Metrologia Legal, e conceitos de medição, recomendação, condições para realização e procedimentos gerais do método de arqueação, teoricamente e na prática demonstrados em um ensaio segundo a Norma ISO 7507 – 1 – 1993 e, ainda, segundo a Norma NBR14787 - Espaço confinado - Prevenção de acidentes, procedimentos e medidas de proteção (2001).

Com essa pesquisa a metodologia tradicional do arqueamento e a metodologia de varedura à laser para a obtenção de volumetria foram comparadas com o objetivo de investigar a eficácia da metodologia por varredura à laser como método alternativo para a obtenção de valores precisos de volume de tanques cilíndricos. Essa metodologia ainda não está prevista como uma alternativa para as mensurações da Norma ISO 7507 e o objetivo central dessa pesquisa é demonstrar que seu emprego como técnica atualmente é viável. A relevância dessa metodologia nos dias atuais é a praticidade e economia com que se obtém o mapeamento dentro da precisão necessária do objeto em questão.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Propor e avaliar uma metodologia para verificação de capacidade volumétrica de tanques armazenadores de líquidos ou graneis (arqueação) empregando-se a técnica de varredura à laser, tomando com base a Norma do Inmetro NIE-DIMEL-021 Procedimentos gerais para arqueação de tanques, a qual baseia-se na Norma Técnica ISO 7507-1 adaptada para os objetos de estudo selecionados.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar a fundamentação teórica sobre os assuntos inerentes à compreensão do projeto.
- Efetuar a arqueação de um tanque ou objeto cilíndrico.
- Realizar ensaios em campo para avaliar as metodologias propostas, comparar os resultados obtidos com o Método de Arqueação tradicional e método volumétrico obtido por Laser Scanner.
- Apresentar considerações e recomendações sobre as aplicações efetuadas nos experimentos.
- Proposta de inclusão à norma técnica.

3. JUSTIFICATIVA

A proposição deste trabalho baseia-se na necessidade de novas metodologias e técnicas, e buscando-se maior agilidade, rapidez e economia comparativamente com os métodos tradicionais. O método de varredura à laser empregando-se um Laser Scanner Terrestre (LST) está se tornando uma prática comum na engenharia de precisão, que oferece confiança aos resultados, e comparado ao método de arqueação é um método mais simples e rápido de ser efetuado. Neste trabalho a proposta é a comparação da qualidade das técnicas, e a possibilidade da aplicação desta nova técnica disponível no mercado de arqueação de tanques cilíndricos, e para isso utilizam-se modelos de estudo (simulações).

Apresenta-se nessa pesquisa um método que possa vir ser acrescentado às normas atuais em vigência, visto que o Inmetro utiliza a Portaria Inmetro N° 103, de 24 de março de 2022 que aprova o regulamento técnico metrológico consolidado para tanques fixos e prevê o método de arqueação de tanques, que é recomendado pela norma R-71 da OIML – *International Organization of Legal Metrology*. Ainda é vigente também a ISO 7507 que prevê o método de arqueação tradicional e ainda o método com o uso de estações totais para a determinação de volumes em tanques. Porém não há ainda normativa que venha a prever o uso da metodologia de varredura à laser como mostra-se neste trabalho.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. INTRODUÇÃO À METROLOGIA E A NORMALIZAÇÃO

Metrologia é de acordo com o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM (2012), a “Ciência da medição” e ainda pode-se dizer acerca dela que esta abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, em qualquer incerteza, em todos os campos da ciência ou tecnologia, são domínio da metrologia. O VIM (2012) ainda caracteriza a medição como um conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza, e ainda sugere que as operações podem ser feitas de forma automática.

A Metrologia é ferramenta para o desenvolvimento tecnológico, comercial e industrial de uma nação. Para a aferição de peças e componentes industriais, desenvolvimento de técnicas, instrumentos, atividades de medição, a metrologia se faz presente, junto a conhecimentos matemáticos e estatísticos empregados.

Segundo Pauli e Uliana (1996, p.5), “A Metrologia aplica-se a todas as grandezas determinadas e, em particular, às dimensões lineares e angulares das peças mecânicas. Nenhum processo de usinagem permite que se obtenha rigorosamente uma dimensão prefixada”. Dessa forma o conhecimento da dimensão do erro admissível torna-se essencial antes de escolherem-se os meios de fabricação e controle de produção. A uniformização de produtos industriais para finalidade de controle não tem apenas a função de reter ou rejeitar produtos fora das normas, mas destina-se a orientação na fabricação dos mesmos, para evitar erros na produção. O estabelecimento da normalização e fixação de condições para cálculos e projetos, para padronização e uniformização de produtos industriais para a finalidade do controle diminui custos e aumenta a produção. Metrologia é para a indústria uma ferramenta extremamente útil.

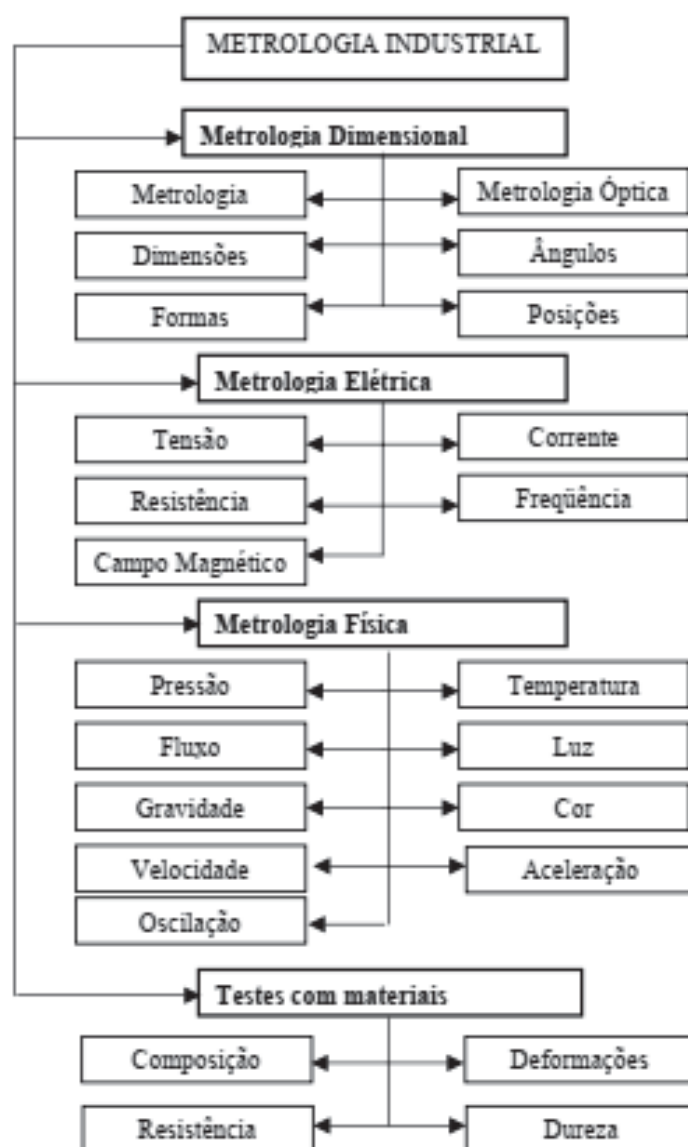
Metrologia agrega todos os aspectos práticos e teóricos da medição, tendo como campo de estudo principal a incerteza de medição e o seu campo de aplicação. Metrologia foi desenvolvida para padronização de unidades de

medida, e ainda sustenta um acordo universal destes padrões, que implica em uma estrutura metrológica internacional e nacional para garantir que instrumentos de medição sejam mantidos e aplicados operacionalmente padronizados, o que é de grande relevância em transações comerciais (Mendes e Rosário, 2020).

A Metrologia é dividida em: Científica, Industrial e a Legal. No presente trabalho, é estudado a Industrial e a Legal. De acordo com Nadal (2000, p. 33), “denomina-se Metrologia Industrial o conjunto de técnicas da área de metrologia, aplicando às medições de características físicas e dimensionais dos materiais e produtos”. A Metrologia Industrial em países industrializados torna-se importante para a redução de despesas na fabricação de produtos industriais e despesas gerais, além dos acréscimos na produtividade. Um controle eficaz, não somente das peças fabricadas, mas dos instrumentos e aparelhos verificadores, além de ferramentas, acessórios e máquinas-ferramentas utilizadas na indústria permite que o processo seja controlado e com qualidade industrial. Instrumentos de medição com funcionamento adequado na utilização industrial, tanto na produção, como nos ensaios, dependem do processo de calibração. De acordo com Mendes e Rosário (2022) a Metrologia Industrial é responsável pelo controle dos processos produtivos e pela garantia da qualidade dos produtos e serviços ofertados ao mercado.

A Metrologia Industrial pode ser dividida em: dimensional, elétrica, física e de materiais (figura 01). Neste trabalho, estudamos a dimensional. Segundo Nadal (2000) na Metrologia dimensional aplicam-se, analisam-se e tratam-se medidas de distâncias, ângulos, formas (áreas, volumes e superfícies) e posicionamento tridimensional. E ainda, as operações que compõem a Metrologia dimensional utilizam-se de aplicações métricas da mecânica e da óptica. Segundo Santos Jr. e Irigoyen (1985) é possível também trabalhar com controle de peças por amostragem (ajustes e tolerâncias), determinações de incertezas de resultados e de aplicações de instrumentos comuns, e o controle de instrumentos de medição.

Figura 01 - Metrologia Industrial



Fonte: Nadal (2000).

A Metrologia Legal, de acordo com Mendes e Rosário (2020) é a área mais próxima da população, e sua principal função é garantir a proteção dos produtos e serviços que envolvam ou necessitem de algum tipo de medição. Ainda, a *International Organization of Legal Metrology* (OIML) define como a “aplicação de requisitos legais para medidas e instrumentos de medição”. O Controle metrológico é aplicável não apenas às atividades comerciais e aos produtos, mas também aos instrumentos de medição utilizados em atividades oficiais, área médica, fabricação de remédios, área ambiental, da radiação e entre outros. O controle metrológico é importante em relação aos efeitos

negativos que medidas erradas podem resultar à saúde humana, por exemplo, em muitos casos como estes abordados (Mendes e Rosário, 2020).

Pode-se afirmar que metrologia legal é abordada junto à exatidão em medições onde há a influência desses valores em fatores relacionados à economia, saúde, segurança e ao meio ambiente. De acordo com Reché (2008) a definição internacional para a metrologia legal é “parte da metrologia relacionada às atividades resultados de exigências obrigatórias, referentes às medições, unidades de medida, instrumentos de medição e métodos de medição, e que são desenvolvidas por organismos competentes”. Dessa forma, o Estado intervém em operações de medição e calibragem. O papel do Estado na Metrologia Legal é relevante no estabelecimento da legislação metrológica, que é a base legal vigente e obedecida, além de prover a infraestrutura necessária para a rastreabilidade das medições e dos instrumentos de medição regulamentados.

No Brasil, o Estado se faz presente nesta área através de diferentes órgãos como o Inmetro, o Instituto de Pesos e Medidas do Paraná (IPEM – PR), demais IPEM de cada estado. A Metrologia Legal é uma atividade exclusiva do Estado. O Estado também supervisiona os produtos e atividades regulamentadas, controla e avalia a conformidade de produtos.

A metrologia Legal, na sua essência, é uma função exclusiva do Estado. Consiste em um conjunto de procedimentos técnicos, legais e administrativos, estabelecidos por meio de dispositivos legais, pelas autoridades públicas, visando garantir a qualidade das medições realizadas nas operações comerciais e nos controles públicos relativos à saúde, meio ambiente, segurança, proteção ao consumidor, entre outros. (Reché, 2008, p. 10)

Um conceito importante é a Garantia Metrológica, que é o conjunto de regulamentos, meios técnicos e operações realizadas para garantir a credibilidade dos resultados da medição em Metrologia Legal (Reché, 2008).

Para introduzir melhor o conceito de metrologia iniciar-se-à pelo conceito de medição. Medição de acordo com o VIM (2012) é o conjunto de operações que tem por objetivo determinar o valor de uma grandeza, e ainda destaca-se

que essas operações podem ser realizadas automaticamente, como é o caso da varredura à laser.

As medições podem ser realizadas de forma direta ou indireta, relacionadas ao objeto de estudo. De acordo com Mendes e Rosário (2020) a medição pode ser entendida como o “processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser atribuídos a uma grandeza”. Podem ser influenciadas por agentes metrológicos tais como o método de medição, a amostra, o analista que realiza a medida e o instrumento de medição, além das condições ambientais, a rastreabilidade do instrumento e os padrões de medição (Mendes e Rosário, 2020).

Pode-se ainda conceituar a diferença entre medição e medida, que pode ser entendida como o resultado do processo de medição e sua qualidade depende diretamente do como o processo é gerenciado e realizado. O Método de medição de acordo com Mendes e Rosário (2020) é a descrição genérica de uma organização lógica de operações utilizadas na realização de uma medição e nas condições ideais este deve estar contido em uma norma técnica, mas pode estar também presente em uma instrução de trabalho, num procedimento operacional, fluxograma, ou em outra forma de organização que leve a realização plena e completa do método. Deve ser desenvolvido sempre por profissionais com capacitação nas técnicas definidas pelo método.

4.1.1. HISTÓRICO DA METROLOGIA E DAS MEDIÇÕES

Medições sempre se fizeram necessárias no cotidiano da sociedade, e no princípio as medidas eram realizadas com base nas partes do corpo humano como referência. Unidades estas como a polegada, passo, braça, pé e o palmo eram usuais. No antigo testamento da Bíblia, um dos registros mais antigos da história, é possível observar que em Gênesis o Criador mandou Noé construir uma arca com dimensões muito específicas, em côvados, que era uma medida padrão da região onde morava, equivalente a três palmos, aproximadamente 66 cm (Secco, Vieira e Gordo, 2020). Houve padrões na história também como uma barra de granito, que era o cúbito padrão, que se trata de um dos ossos do

antebraço, uma unidade utilizada pelos Egípcios, adotada para a construção da pirâmide do Faraó Khufu. Além de um padrão no século XVII na França, uma unidade de medida linear em uma barra de ferro com dois pinos extremos que era considerada uma Toesa, que era uma unidade, a barra ficava chumbada na parede externa do Le Grand Châtelet. Em ambos os casos, esses padrões de unidade de medida poderiam ser utilizados para conferir instrumentos, e sistemas de unidades de medida baseados no corpo humano foram utilizados até o fim do século XVIII (Mendes e Rosário, 2020).

Na Revolução Francesa consideraram que um conjunto de medidas fundamentadas na anatomia dos reis não possuía nenhum fundamento científico, e desta forma um novo sistema de medição que valorizava a ciência e que pudesse ser adotado com a mesma precisão por todos, em todo mundo e em todas as transações comerciais deveria ser concebido. Os membros da academia francesa discutiram a melhor maneira de implementar um sistema métrico em maio de 1790, e Charles-Maurice Talleyrand-Périgord idealizou e apresentou uma proposta de unidade única. Foi adotado então o metro para a unidade básica do comprimento, que equivalia a um décimo de milionésimo da distância entre o Polo Norte e a Linha do Equador, ao longo do meridiano que ia de Dunquerque a Barcelona (Mendes e Rosário, 2020).

O metro seria estabelecido pelos seguintes procedimentos para a completa proposta de sistema de medidas: determinação da diferença de latitude entre Dunquerque e Barcelona; fixação da extensão do pendulo que bate o segundo; observação do peso de um volume conhecido de água destilada a 0° e o estabelecimento de relações entre antigas e novas medidas (Dias, 1998).

A Academia de Ciências foi autorizada pela Assembléia Nacional a nomear comissões para prosseguir com o projeto. O diretor do Observatório de Paris, Cassini, os astrônomos Legendre e Méchain foram incumbidos de realizar a triangulação e determinação de latitudes; Monge e De Meusnier pelas medidas das bases; e Borda e Coulomb pelo estabelecimento do comprimento do pêndulo. Este meridiano foi escolhido, pois sua medição anteriormente já havia sido realizada, necessitando apenas sua verificação (Dias, 1998).

Em 1889 aconteceu a 1ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), e adotou como padrão do metro um protótipo materializado em uma barra de platina com 10% de irídio, que está guardada até os dias de hoje no BIPM, com sede próxima a Paris (Mendes e Rosário, 2020). Esse metro, transformado em barra de platina foi denominado de metro dos arquivos, e definido como “Metro é a décima milionésima parte de um quarto do meridiano terrestre” (Secco, Vieira e Gordo, 2020).

E assim, as unidades de volume, comprimento e massa estavam interligadas a um sistema inteiro, derivado de um padrão único, universal e invariável que é o metro, que foi aprovado em 30 de março de 1791 (Mendes e Rosário, 2020).

Com o desenvolvimento da ciência e da tecnologia da época, verificou-se que uma medição mais precisa do meridiano daria um metro um pouco diferente, agora realizada pelos astrônomos Méchain e Delambre, em 1799, sendo a segunda definição “Metro é a distância entre os dois extremos da barra de platina depositada nos Arquivos da França e apoiada nos pontos de mínima flexão na temperatura de zero graus Celcius”. O Celcius foi adotado na época por ser facilmente obtido com gelo fundente (Secco, Vieira e Gordo, 2020 e Dias, 1998).

O Metro havia sido adotado por diversos países já no século XIX, e no Brasil, o sistema métrico foi implantado pela Lei Imperial nº 1.157, de 26 de Junho de 1862, estabelecendo um prazo de 10 anos para que padrões antigos fossem sendo substituídos (Secco, Vieira e Gordo, 2020).

Os argumentos científicos e técnicos para a adoção do sistema métrico difundiram internacionalmente com sucesso o metro, e após isso, uma Comissão Internacional foi formada e instituída em 8 de agosto de 1870, e propôs o estabelecimento de uma organização financiada pelos países membros, sendo estes em número de 30 países, sendo onze do continente americano, a atribuição desta comissão era de definir e manter novos padrões que fossem solicitados, além de verificar estes padrões, realizar comparações periódicas, ainda ficaria encarregado da conservação dos protótipos internacionais e também de desenvolver instrumentos. E em 20 de maio de 1875, conhecido como o Dia Internacional da Metrologia, 17 países, incluindo o Brasil, criaram o

Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) durante a última sessão da Conferência Diplomática do Metro. (Mendes e Rosário, 2020 e Dias, 1998).

Em 1921, a 6ª CGPM emendou o Tratado do Metro, o sistema métrico incorporou o segundo e o ampere e se chamou MKSA (metro, quilograma, segundo e ampere). Mas apenas em 14 de outubro de 1960 na 11ª CGPM foi revisado o sistema métrico, e instituído o Sistema Internacional de Unidades (SI). (Mendes e Rosário, 2020). Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2012) “O sistema de unidades, baseado no Sistema Internacional de Grandezas, com os nomes e os símbolos das unidades, incluindo uma série de prefixos com seus nomes e símbolos, em conjunto com regras de utilização, adotado pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM)”. O Sistema de unidades de medidas padrão internacionalmente reconhecido é administrado pela CGPM e utilizado até os dias atuais para quantificar medições em uma linguagem padrão, promovendo precisão e consistência, além de compreensão nas mensurações. O Responsável por publicar o SI desde 1970 é o BIPM, e a regra da grafia das unidades do SI são adotadas pela ISO 31.

Atualmente, o metro é definido no SI como unidade de comprimento, onde ao fixar valor numérico da velocidade na luz no vácuo c , em 299 792 458, quando expressa a unidade em ms^{-1} , onde o segundo é definido em função da frequência do cézio (SBM, 2019). No Brasil, a história da adoção do sistema métrico se dá na década de 1850, nesse período, o imperador Dom Pedro II começa a manifestar grande interesse por estudos e discussões científicas, reunindo ao seu redor um grupo de professores de ciências naturais da Escola Central. Nesse tempo inicia-se uma correspondência, que se estenderia por décadas, com institutos de pesquisa e cientistas europeus. Dentre o círculo mais próximo estava Cândido Baptista de Oliveira, seu antigo professor de matemática e Guilherme Schuh de Capanema, filho de seu bibliotecário. A adoção do sistema métrico começou certamente nesse círculo de cientistas (Dias, 1998).

A história da ciência da medição segue-se com a consolidação dos estados e o desenvolvimento da indústria e do comércio, tornando necessária a uniformização dos padrões de mensuração utilizados e a definição de um sistema de unidades internacional e que contivesse múltiplos e submúltiplos da unidade tomada como padrão, devido a intensa troca comercial que era

procedida, e dessa forma surgem em seguida os laboratórios e institutos tecnológicos nacionais em todo o mundo para padronização e ensaios regulares. Pode-se citar um dos primeiros criados após a instalação do BIPM o *Physikalische-Technische Reichsanstalt/ PTR* ou Instituto Técnico do Reich fundado em 1887 na Alemanha, e ainda o National Bureau of Standards / NBS nos Estados Unidos em 1901.

No Brasil, não poderia ser diferente, e dentre os marcos iniciais que merecem registro, de acordo com Dias (1998) estão as primeiras tentativas de padronização e realização de ensaios regulares de materiais de construção no Brasil, conduzidas pelo Gabinete de Resistência de Materiais da Escola Politécnica de São Paulo onde foi publicado em 1905 o Manual de Resistência dos Materiais, e o emprego deste logo seria demonstrado em várias construções públicas e privadas. E em 1926 este Gabinete, seria transformado em Laboratório de Ensaio de Materiais e forneceria assistência a terceiros, sendo assim um elemento importante na difusão da tecnologia do concreto armado no Brasil, e provavelmente o único laboratório no Brasil a tratar de aspectos de metrologia aplicada na época. Em 1934 ele tornaria-se Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), uma autarquia estadual, com atribuições de pesquisas científicas mais amplas, e neste mesmo ano criaria-se lá uma seção de metrologia. Ainda tinham como pretensão a fiscalização de pesos e medidas junto ao governo de São Paulo, e ainda colaborar com a criação de empresas nacionais produtoras de equipamentos de medição.

Ainda de acordo com Dias (1998) em 1933 criou-se o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) onde após diversos tramites a legislação metrológica finalmente seria promulgada em 30 de julho de 1938 através do Decreto-lei nº592 no governo Vargas. O Decreto-lei estabelecia como sistema legal de medidas no Brasil aquele definido pelas Conferências Gerais de Pesos e Medidas. E os órgãos executivos da política metrológica nesta época seriam o Instituto Nacional de Tecnologia (INT), a Comissão de Metrologia e o Observatório Nacional do Rio de Janeiro, tendo como colaboradores órgãos metrológicos estaduais e municipais, fabricantes nacionais de instrumentos de medição e empresas de serviços de utilidade pública que preenchessem requisitos específicos. E a partir deste momento o INT estaria com suas

atribuições fixadas por lei, devendo adquirir e conservar padrões. Dessa forma, o órgão regulador de metrologia no Brasil, seria o INT.

O próximo marco importante seria a regulamentação do Decreto-lei, que assumiria a forma do decreto nº 4.257 de 6 de Junho de 1939, que definia o sistema métrico decimal e os tipos padrões legais de unidades de medida, de acordo com as normas internacionais, e deste momento em diante a aprovação de instrumentos e medidas estavam sujeitas aos padrões do INT. Marco muito relevante ao Brasil.

Desse momento histórico em diante, era notável que as atividades metrológicas no Brasil até 1960 concentravam-se limitadas ao Rio de Janeiro e São Paulo quando tratava-se da conservação de Padrões, e careciam de um ente fiscalizador eficiente nos estados. O Primeiro órgão fiscalizador do Estado do Paraná foi o Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas de 1947. Nessa época apenas os abusos mais evidentes eram controlados (Dias, 1998)

Contra a vontade do INT, resistência essa fundamentada com relação nos recursos obtidos pelas atividades fiscalizadoras metrológicas, em 1961 o INPM – Instituto Nacional de Pesos e Medidas foi criado, diretamente subordinado ao ministro de Estado da Indústria e Comércio no Governo de Juscelino Kubitschek, para cumprir funções metrológicas independentes, e promover a execução da legislação metrológica vigente, artigo 9º do Decreto-lei nº592.

Logo, surgiria a necessidade da criação de órgãos metrológicos estaduais. O INPM implantou a Rede Brasileira de Metrologia Legal e Qualidade, os atuais IPEM em todo o território nacional. O IPEM – PR foi criado pela Lei nº 5.652 de 06 de outubro de 1967 e é o responsável pela metrologia legal do Estado do Paraná, sendo uma autarquia estadual, regida pelo direito público. O IPEM-PR é um órgão autônomo administrativamente e financeiramente, vinculado ao Governo do Estado do Paraná, através da Secretaria de Indústria e Comércio, e ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia — Inmetro, através de convênio, pelo qual recebe a delegação para o exercício de atividades relativas à Avaliação da Conformidade, Verificação Metrológica, Calibração e Ensaios, no âmbito nacional (IPEM – PR, 2024).

No Paraná, o Instituto de Pesos e Medidas do Estado do Paraná é responsável pelas atividades de medição e verificação metrológica do estado, como por exemplo Radares fixos e móveis (figura 02), barreira eletrônica, verificação de caminhões e vagões tanque, verificações de medidas de grandes volumes, verificação de balanças dinâmicas (figura 03), verificação de hidrômetros em bancada (figura 04) e balanças comerciais, ajuste e calibração de massas padrão, verificação de bombas medidoras para combustíveis líquidos (figura 05), verificação de metros comerciais, verificação de taxímetro, verificação de medidas de grandes volumes, entre outros. O IPEM – PR ainda é responsável pela arqueação de tanques, que é o objeto de estudo do presente trabalho.

Figura 02 - Verificação de Radar Fixo



Fonte: IPEM – PR (2008).

Figura 03 - Verificação de Balanças dinâmicas



Fonte: IPEM – PR (2008).

Figura 04 - Verificação de Hidrômetros em Bancada



Fonte: IPEM – PR (2008).

Figura 05 - Verificação de Bombas medidoras para combustíveis líquidos



Fonte: IPEM – PR (2008).

E sobre a metrologia nacional, foi então que em 1971 propôs-se em um relatório a reorganização do Instituto Nacional de Pesos e Medidas, a estruturação definitiva da Metrologia Científica no país, com a criação de um laboratório de pesquisa de alto nível, manter padrões de medida e ainda propiciar infraestrutura para treinamento de pessoal. Ainda era proposto o firmamento da Metrologia Industrial no país, com a prestação de serviços e pesquisas contratadas. No quesito da Metrologia Legal, rompia-se a ideia proposta em 1938, e então unidades regionais deveriam ser implantadas para a execução destas tarefas de autoridades metrológicas. Este seria o Centro Nacional de Metrologia. E a instalação do Centro Nacional de Metrologia coincidiu com a transferência do Instituto para Xerém (Dias, 1998).

Por fim, com a aproximação da indústria da metrologia para finalidades de controle de qualidade, em 1973 através da Lei nº 5.966 de 11 de Dezembro de 1973 nasce o Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Sinmetro), com a finalidade de formular e executar a política nacional de metrologia, normalização industrial e certificação de qualidade de produtos industriais, além de conformidade através de uma infraestrutura de serviços

tecnológicos, uma rede de laboratórios de ensaio e de calibração, organismos de treinamento, entre outros, certificados pelo Inmetro. Sinmetro atende principalmente a indústria brasileira, o comércio e o governo brasileiro. Ele está envolvido em atividades relacionadas ao Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade – PBQP, voltado para a melhoria da qualidade de produtos, processos e serviços na indústria, comércio e administração federal (Inmetro, 2024).

E a cúpula do novo sistema, é o Conselho Nacional de Metrologia (Conmetro), o qual as atribuições eram formular, coordenar e supervisionar a política nacional de metrologia, normalização e qualidade industrial. O Conmetro é um colegiado interministerial que normatiza o Sinmetro, e que tem o Inmetro como sua secretaria executiva (Inmetro, 2024).

E como órgão executor das políticas, era criado o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial/ Inmetro, uma autarquia federal vinculada ao ministério da Indústria e Comércio, com personalidade jurídica e patrimônios próprios, além de sede na capital federal. Suas atribuições executivas incluíam também credenciar, mediante autorização do Conmetro, entidades públicas ou privadas para a execução de suas competências, exceto as de metrologia legal. O INPM seria extinto por decreto do poder executivo, e absorvido pelo Inmetro (Dias, 1998).

A implantação definitiva do Inmetro ocorre pela Resolução nº3, de março de 1980 da Secretaria de Tecnologia Industrial – STI, transferindo-lhe as atribuições do INPM. A seguir, a resolução nº8/80 criou a Rede Nacional de Calibração/ RNC, formada pelos laboratórios credenciados pelo Inmetro, através das normas internacionais, para calibração de padrões e de instrumentos de medição para o âmbito da metrologia legal. De acordo com esta resolução, apenas os instrumentos e os padrões aferidos pelos laboratórios credenciados junto a RNC, de acordo com os padrões metrológicos e com a devida rastreabilidade seriam considerados calibrados. Ainda, o Inmetro era autorizado a assegurar a rastreabilidade desses instrumentos de medição e padrões usados em ensaios realizados pelas instituições do sistema de certificação de qualidade industrial. (Dias, 1998).

O Inmetro hoje é vinculado ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, atua como Secretaria Executiva do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro), colegiado interministerial, que é o órgão normativo do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Sinmetro). Substituiu o INPM, e ampliou seu raio de atuação em todo o Brasil. O Inmetro fortalece a indústria brasileira, aumentando sua produtividade, por meio da melhoria da qualidade através da metrologia (Inmetro, 2024).

O Inmetro é responsável por fortalecer a participação do país em atividades internacionais de metrologia, prestar suporte técnico e administrativo ao Conmetro, planejar executar atividades de acreditação de laboratórios de calibração e ensaios de provedores de ensaios de proficiência, de Organismos de Avaliação da Conformidade, e outros. Também desenvolve atividades de prestação de serviços e transferência de tecnologia e cooperação técnica, quando voltadas à inovação e à pesquisa científica e tecnológica em Metrologia e Avaliação da Conformidade. Além disso coordena o Sinmetro nas atividades de Avaliação da Conformidade, voluntária e compulsória de produtos, serviços, processos e pessoas. A lei nº9933/1999 dá as devidas competências do Inmetro, assim como as resoluções do Conmetro (Inmetro, 2024).

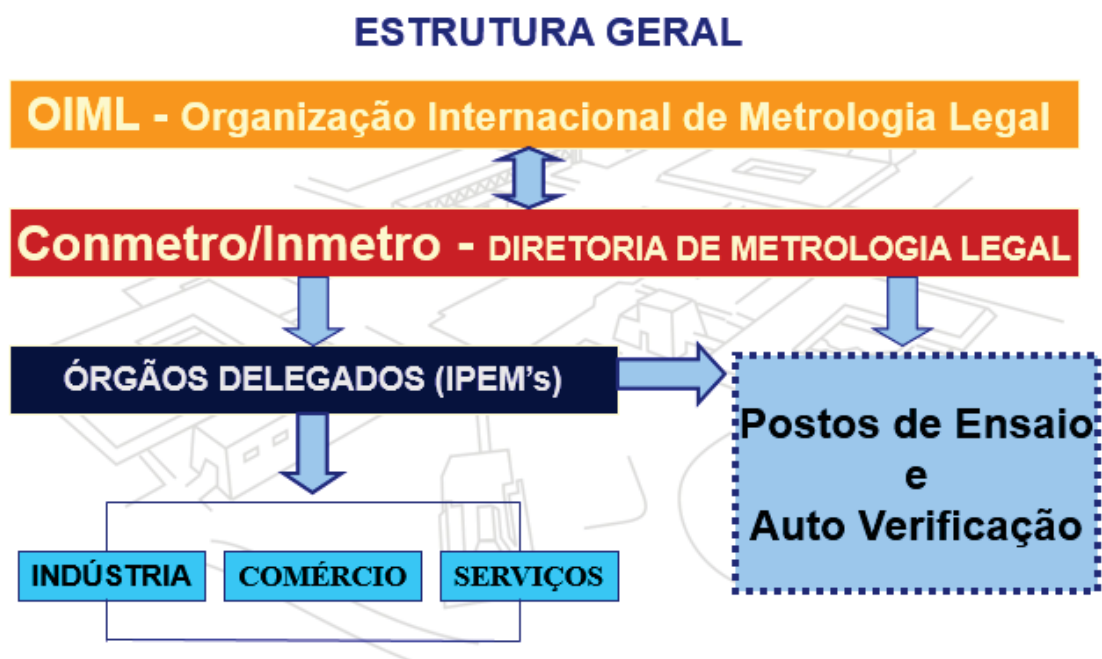
Destaca-se também a DIMEL – Diretoria de Metrologia Legal no Brasil, onde através dela o Inmetro organiza e executa as atividades metrológicas legais no país, sendo essas a elaboração de regulamentos técnicos metrológicos, o controle metrológico legal dos instrumentos, participação em fóruns internacionais, e controle de produtos pré-medidos. A DIMEL expede portarias e normas como as Normas Inmetro Específicas – NIE, as Normas Inmetro Técnicas (NIT), os Documentos Orientativos da Qualidade (DOQ) e a lista geral de Formulários Dimel (FOR-Dimel). Nesse trabalho utilizamos a ISO 7507, que é uma norma *InmetroNIE-Dimel*, trata-se de uma Norma ISO vinda da Suíça aceita pelo Inmetro no Brasil.

Existe ainda a Organização Internacional de Metrologia Legal – OIML que é um fórum internacional de Metrologia Legal, agregando mais de 100 países, que emite documentos e recomendações acerca de metrologia e aprovados pelos membros. A OIML ainda auxilia os países na elaboração de legislação metrológica adequada, além de orientar sobre requisitos de certificação e

calibração. O Brasil aderiu a OIML em 1983, e o Inmetro é o órgão que representa o país, como Estado Membro e com direito a voto para todos os regulamentos técnicos em pauta para o nível internacional da metrologia (Inmetro, 2024).

A Estrutura organizacional da Metrologia no Brasil utiliza de todas estas entidades para seu pleno funcionamento e para a ordem. Estes meios técnicos e as operações necessárias para a calibração de instrumentos, controle de produtos, de padrões e outros tem relação direta com a organização institucional do país em termos de metrologia como é mostrado na figura 06.

Figura 06 - Estrutura Geral da Metrologia no Brasil



Fonte: Reché (2008).

4.1.2. NORMALIZAÇÃO

Um conceito importante no contexto desta pesquisa é a Normalização, que fixa condições para cálculos e projetos, para o emprego de materiais, produtos industriais, para a segurança na execução ou uso em obras, equipamentos e instalações, condições básicas para aceitação ou recebimento de matéria-prima, métodos de ensaio, padronizações, entre outros,

contendo implicações políticas e sociais. Trata-se da padronização de produtos e processos industriais, nos países industrializados, que é o que tratamos nesse trabalho.

A Normalização e regulamentação técnica no Brasil foi fixada pela Resolução nº 9/1980 com o reconhecimento formal da ABNT como o fórum de normalização industrial através dessa resolução: adequação de sua Secretaria Executiva, reestruturação dos Comitês de Normalização e a formulação do Plano Quadrienal de Normalização (Dias, 1998).

A ABNT que é a Associação Brasileira de Normas Técnicas tem a responsabilidade no Sinmetro, e também autoridade para credenciar organismos de Normalização setoriais para o desempenho da regulamentação técnica. Ela representa o Brasil nos fóruns de normalização internacionais como a ISO e a IEC, e nos fóruns regionais. As atividades de avaliação de conformidade e acreditação são baseadas em normas e guias ABNT, ISO e IEC, tal como é utilizado nos ensaios deste trabalho. A ABNT é uma organização não governamental mantida através de seus associados e do Governo Federal (Mendes e Rosário, 2020).

A *International Organization for Standardization* (ISO) é uma organização internacional independente e não governamental, que tem a adesão de 170 organismos de normalização desde 1946. Através dos seus membros, produzem normas internacionais voluntariamente ao mercado voltadas à inovação, desde a fabricação de produtos, até o gerenciamento de processos (Iso, 2024). Neste trabalho utilizamos uma norma ISO para o arqueação de tanques, a ISO 7507-1-1993.

Outro conceito importante é a Acreditação, que no sentido internacional, apenas um órgão por país é responsável por ser organismo acreditador, no caso do Brasil, este é o Inmetro. De acordo com Mendes e Rosário (2020) as normas e guias da ABNT, Copant, AMN (Mercosul), orientações IAF, ILAC e IAAC estabelecem critérios de acreditação que são então adotados pelo Sinmetro. Então, o Inmetro, acredita organismos de certificação, de inspeção, de treinamento, de ensaios de proficiência, laboratórios de calibração e laboratórios de ensaios.

4.2. MÉTODO DE ARQUEAÇÃO E A NORMA ISO 7507 – 1 – 1993

A Norma Técnica que se refere ao método de arqueação de Tanques Cilíndricos Verticais de Petróleo, para controle metrológico no segmento de Petróleo e Gás, é norma central de estudo do presente trabalho. Ela é utilizada para a calibração e metrologia de tanques, tanto como os utilizados em refinarias da Petrobras, como nos presentes na REPAR - Refinaria Presidente Getúlio Vargas, localizada no município de Araucária no Estado do Paraná, que podem ser dimensionados por essa Norma, por exemplo. O método denomina-se método de arqueação ou método de arqueamento. A Norma ISO-7507, para desenvolvimento e implementação de procedimentos e regulamentos técnicos, onde o público alvo segundo Lazari (2008) são “operadoras, transportadoras, concessionárias, distribuidoras de Petróleo e Gás; Inmetro e demais órgãos delegados da Rede Brasileira de Metrologia Legal e Qualidade (RBMLQ-I) e os laboratórios acreditados da Rede Brasileira de Laboratórios de Calibração (RBC)”.

A primeira Parte da Norma trata do Método de Arqueação, “*Manual Strapping Method*” – MSM, o Método de Arqueação para a calibragem dos tanques cilíndricos. Este é um método reconhecido para determinar-se a capacidade dos tanques de armazenagem a partir de medições da circunferência de um tanque em diversas alturas, além de também ser utilizado para determinar uma circunferência de referência em determinada altura selecionada para ser utilizada como referência em outros métodos de calibragem de tanque. Esta norma é dividida em 6 partes, sendo a primeira referente ao método de arqueação. Sua atualização mais recente foi no ano de 2003.

No conceito básico, arqueação segundo Dos Santos, De Rezende e Lazari (2004, p.5) é “Conjunto de operações, efetuadas com vistas a determinar a capacidade de um tanque ou reservatório até um ou vários níveis de enchimento”.

Ainda pode-se citar a definição de Franceschini (2019), onde segundo o autor a arqueação é o processo que tem por objetivo a determinação da capacidade volumétrica de reservatórios através da realização de medições

externas e internas resultando-se em uma tabela volumétrica contendo o volume de líquido para vários níveis de enchimento de um tanque.

A partir disso, é possível começar a discutir definições da norma, precauções, equipamentos, exigências, medição da circunferência, o procedimento do arqueamento, a repetição da medição, a definição de tanque e outros aspectos relevantes. As atividades em campo são desenvolvidas visando atender refinarias, bases, terminais, indústrias petroquímicas e indústrias alimentícias, também podendo ser efetuadas em embarcações.

O Tanque, objeto de estudo da Norma ISO 7507, é o reservatório destinado a armazenar produtos à granel. De acordo com Franceschini (2019) o Tanque de armazenamento é um reservatório destinado a armazenar fluidos à pressão atmosférica e a pressões superiores à atmosférica, e pode ser usado também para medir quantidades desses produtos. Diferentes modelos possíveis de tanques são, de acordo com a Norma R-71 da OIML:

- Tanque de embarcação: Tanque localizado em uma embarcação destinado ao transporte e/ou comercialização de produtos à granel.
- Tanque cilíndrico vertical: Tanque cilíndrico de eixo vertical com fundo plano, cônico, tronco-cônico, semiesférico ou de meridiano elíptico.
- Tanque cilíndrico horizontal: Tanque cilíndrico de eixo horizontal, com ou sem inclinação, com as extremidades fechadas por calotas ou seção plana.
- Tanque esférico ou esferoidal: Reservatório de forma esférica.
- Tanque paralelepípedo: Reservatório de forma paralelepípeda.
- Tanque especial: Reservatório sem forma geométrica definida.

A tabela volumétrica é definida conforme Dos Santos, De Rezende e Lazari (2004) como expressão, sob forma de escala, da função matemática $v(h)$

que representa a relação entre a altura h (variável independente) e o volume v (variável dependente).

Outro importante item a ser definido é o certificado de arqueação, que é o documento de caráter oficial que acompanha a tabela volumétrica, certificando que a arqueação de um tanque/reservatório foi procedida, visando atender exigências legais. Segundo Franceschini (2019) a validação do certificado de arqueação é dependente das condições das medições realizadas, e varia de 5 à 10 anos.

Em relação às condições para realizar-se o método de arqueação (figura 07), temos também a NORMA NBR 14787 - Espaço confinado – Prevenção de acidentes, procedimentos e medidas de proteção (2001), que define o estado dos tanques e o espaço que será submetido ao método.

O tanque deve estar vazio, limpo e desgaseificado. O ambiente em que está inserido deve seguir os rígidos procedimentos sugeridos de acordo com a norma NBR 14787 e ainda, o tanque deve ter sido devidamente testado quanto à sua estanqueidade para permitir o método de arqueação (figura 08).

Figura 07 - Arqueação de Tanques, detalhe para as plataformas de trabalho e andaimes, equipamentos previstos pela norma ISO 7507-1



Fonte: Réche - Inmetro (2008).

Figura 08 - Verificação de Arqueação de Tanques



Fonte: IPEM -PR (2008).

De acordo com Franceschini (2019) a atividade de arqueação de tanques no Brasil é realizada pelo Inmetro ou por empresas por ele autorizadas. Desta forma, todas as empresas que possuem tanques de armazenamento de produtos derivados de petróleo em suas instalações devem solicitar o serviço ao órgão executor ligado ao Inmetro no seu respectivo Estado ou a qualquer empresa que possua a autorização para efetuar este serviço.

A legislação prevê a arqueação de tanques como uma atividade compulsória dentro do escopo da metrologia legal, executada pelo Inmetro, com base na recomendação R-71 da OIML. Está em vigor atualmente a Portaria Inmetro N° 103, de 24 de março de 2022 que aprovou o regulamento técnico metrológico consolidado para tanques fixos e prevê o método de arqueação de tanques. De acordo com esta portaria arqueação é “conjunto de operações efetuadas num tanque para determinar a sua capacidade até um ou vários níveis de enchimento, o que pode ser chamado de rearqueação, quando o tanque já foi arqueado anteriormente”. Esta é a vigência metrológica utilizada no Brasil atualmente, além da Norma ISO 7507.

4.2.1. PRECAUÇÕES GERAIS CONFORME A NORMA ISO 7507 PARA A ARQUEAÇÃO

A Norma Técnica ISO 7507-1 especifica que deve-se atentar ao máximo de detalhes na hora de se efetuar a calibração de tanques de armazenagem. Para tanto, as seguintes precauções devem ser atendidas:

Todas as medições devem ser observadas e registradas como lidas. As correções necessárias devem ser registradas separadamente. Eventuais anormalidades que possam ocorrer durante as operações devem ser documentadas e a calibragem deve ser repetida caso necessário.

Se houver deformações no tanque, medições adicionais devem ser efetuadas para permitir um cálculo satisfatório da tabela de capacidade.

Para leituras precisas e com repetição, há a necessidade de remoção de bolhas de tinta, incrustações e outras imperfeições que podem interferir com as medições ou com a posição que o equipamento de medição deve ser ajustado.

Se houver disponível o projeto original do tanque, suas medições devem ser comparadas às medidas mais relevantes correspondentes. Qualquer medição que demonstre discrepância nesta comparação deve ser relatada.

Caso a calibragem de um tanque seja interrompida, ela poderá ser continuada numa data posterior, contanto que siga as normas especificadas (Conforme o item 4.2.6 da Norma).

4.2.2. PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA CONFORME A NORMA ISO 7507 PARA A ARQUEAÇÃO

Nesta etapa da Norma Técnica ISO 7507-1 1993, definem-se as precauções adequadas para quando o tanque estiver sendo calibrado, garantindo a segurança do operador na hora das mensurações.

Todos os regulamentos que cobrem a entrada em áreas perigosas devem ser rigorosamente observados. Quando um tanque que contiver produto de petróleo estiver sendo calibrado, deve-se atentar às precauções de segurança que se aplicam a tais tanques.

Para entrar num tanque que já esteve em uso, deve-se obter um certificado de entrada segura, emitido em conformidade com os regulamentos locais ou nacionais. Todas as tubulações que entram no tanque devem ser desconectadas ou lacradas. Os regulamentos sobre entradas em tanques que contenham combustíveis ou chumbo devem ser observados com cautela.

As luzes manuais utilizadas na operação devem ser do tipo adequado para uso em atmosfera explosiva. Além disso, o Laser Scanner pode ser também empregado neste caso.

A segurança do pessoal operacional deve ser observada com atenção rigorosa. Escadas, berços de pintores, cadeiras de trabalho, andaimes feitos de estruturas de aço ou madeira, não se devendo construir estruturas de tijolos, tambores ou caixas para formar plataformas. É preciso observar que, quem estiver trabalhando acima do solo deve estar utilizando cinto de segurança.

4.2.3. EQUIPAMENTOS ADEQUADOS CONFORME A NORMA ISO 7507

Para a realização do método de arqueação os seguintes equipamentos são necessários (ISO 7507-1):

- Fita de Arqueação, segundo as recomendações: De aço de carbono duro ou de outro material, calibrada, uma peça contínua com graduação em apenas uma face e engraxada antes do uso;
- Balança com mola (Dinamômetro);
- Plataforma de Trabalho, de madeira ou metal, de construção rígida;
- Posicionadores e cordas de fita;
- Empunhadura Littlejohn, para segurar a fita, sem dobrar, para a aplicação de tensão necessária na fita de aferição. Este é um dispositivo usado para afixar um punho tensionador em posições intermediárias numa fita;
- Aparelho para medir espessura, sendo este uma régua de aço com tamanho conveniente, algum outro instrumento como um medidor eletrônico de espessura, ou até um paquímetro, para medir a espessura da chapa do tanque;
- Medidor de espessura de tinta, sendo este um parafuso micrométrico de profundidade;
- Fita de mergulho e contrapeso de mergulho. A fita de mergulho deve ser fabricada com aço de carbono duro e deve ter sido calibrada. Deve ter comprimento suficiente para ir desde o ponto de referência de mergulho do teto do tanque até o ponto de mergulho no fundo do tanque. O contrapeso de mergulho deve ser feito de latão ou outro material que não produza faíscas e possua densidade similar. Deve ser usado em conjunto com a fita;
- Régua inteira, com 1 metro de comprimento, com graduações em cm e mm, deve ser fornecida para medir espaços mortos, etc;
- Escadas, plataformas de trabalho e andaimes;
- Aparelho para medir densidade e temperatura. Aparelhos descritos conforme a ISO 3675, densímetro medidor de condições ambientais (temperatura, umidade e pressão atmosférica).

4.2.4. EXIGÊNCIAS GERAIS

As medições devem ser comparadas as dimensões correspondentes em projetos de tanques pré-existent, de sua construção. A cilindridade do tanque deve ser verificada também. Outras considerações (ISO 7507-1):

- Antes da calibragem, o tanque deve ser enchido até a capacidade normal de trabalho, pelo menos uma vez e deixado em repouso por pelo menos 24hs até a calibragem;
- Se o tanque for calibrado com líquido dentro, deve-se registrar a profundidade, temperatura e densidade do líquido na hora da calibragem. Não devem ser efetuadas transferências de líquidos na hora da calibragem;
- Atentar-se para todas as exigências da norma com relação as mensurações de temperatura na hora da calibragem do tanque. A temperatura ambiente deve ser medida antes e depois da calibragem;
- Se o tanque for calibrado com líquido dentro, se a temperatura da superfície da parede for maior que 10°C entre a parte vazia e a parte cheia do tanque, o tanque deve estar completamente cheio ou vazio;
- Há um número de medições externas de circunferência, adicionado as medições subsidiárias necessárias e convenientes para corrigir os desvios da fita devido a obstruções. Estas devem ser seguidas conforme descrito na norma para permitir que uma tabela de capacidades seja criada. Caso sejam necessárias, medições adicionais exigidas e os procedimentos para obtê-las também são descritos pela norma;
- Todos os mergulhos de tanque devem ser referidos ao ponto de mergulho, que podem ser numa posição diferente do ponto de referência. Deve-se verificar se a placa de mergulho está montada numa posição estável, de forma que não seja afetada pelo movimento do fundo do tanque ou das paredes. Devem ser determinadas e registradas diferenças entre o nível do ponto de mergulho e o ponto de referência, se houver;

- Deve ser mensurada e registrada a altura total do ponto de referência superior acima do ponto de mergulho usando a fita de mergulho e o peso, nas condições vazio e cheio.

4.2.5. METODOLOGIA DE ARQUEAÇÃO DE TANQUES

A metodologia aqui apresentada é a descrita através da Norma ISO 7507 – 1 – 1993 para Calibragem de Tanques Cilíndricos que descreve com detalhes e complexidade adequada o Manual Strapping Method que será posteriormente aplicado nos ensaios realizados neste trabalho.

4.2.5.1. MEDIÇÕES DE CIRCUNFERÊNCIA

Há três formas de se obter a mensuração da circunferência de um tanque. Primeiramente, para propósitos de apuração, obtém-se com três aferições por curso; secundamente, se a calibragem for para o método de trabalho, obtém-se com duas aferições por curso; e finalmente, se a calibragem for para propósito de referência, obtém-se a circunferência em somente um nível. Segundo a Norma ISO 7507-1-1993 deve-se proceder:

4.2.5.2. AFERIÇÃO DE NÍVEL PARA PROPÓSITOS DE APURAÇÃO

Para efetuar a aferição de nível para propósitos de apuração, diferem-se os tanques em arrebitados e soldados, esses termos provém da indústria, onde arrebitados seriam os tanques referidos no processo de união dos materiais por rebite, e os soldados referem-se a fabricação a partir da união de chapas de metal por meio do processo de soldagem. Nestes casos, deve-se mensurar a circunferência do tanque com três aferições por curso, nos níveis:

a) Para Tanques Arrebitados:

- 1) 100 mm a 150 mm acima do nível do topo do ângulo inferior do tanque, e 100 mm a 150 mm acima da borda superior de cada sobreposição horizontal entre os cursos;
- 2) Na posição central de cada curso;
- 3) 100 mm a 150 mm abaixo da borda inferior de cada sobreposição horizontal entre os cursos e 100 mm a 150 mm abaixo do nível da parte mais baixa do ângulo superior do tanque;

b) Para Tanques Soldados:

Três níveis como acima, mas os níveis superiores e inferiores devem estar a 270 mm e 300 mm do ângulo inferior, ângulo superior ou costuras horizontais.

4.2.5.3. AFERIÇÃO DE NÍVEL PARA PROPÓSITOS DE TRABALHO

Para efetuar a aferição de nível para propósitos de trabalho deve-se mensurar a circunferência do tanque com duas aferições por curso, efetuando uma em cada um dos níveis: 1/5 a 1/4 acima da costura horizontal inferior e 1/5 a 1/4 abaixo da costura horizontal superior.

4.2.5.4. AFERIÇÃO DE NÍVEL PARA PROPÓSITOS DE REFERÊNCIA

Nesse caso, deve-se medir a circunferência em somente um nível, como é especificado no método de calibragem do tanque, para o qual se exige apenas uma circunferência de referência.

4.2.5.5. RECOMENDAÇÃO

Caso não seja possível, mesmo com o uso de uma plataforma de trabalho, efetuar um arqueamento em um nível normal e recomendado, o arqueamento

deve ser levado o mais próximo possível deste nível, mas não próximo ao ângulo do fundo, do topo, ou de alguma costura. Sempre deve-se registrar onde a nova circunferência foi mensurada e o motivo pelo qual abandonou-se o nível normal e recomendado. E ainda, caso a fita de arqueação não esteja em contato próximo com a superfície do tanque em todo o seu curso, deve-se aplicar uma plataforma de trabalho para que uma correção possa ser calculada.

4.2.6. PROCEDIMENTO DE ARQUEAÇÃO

O procedimento de arqueação consiste em envolver o tanque com a fita na seção indicada. A tensão de calibragem especificada na fita deve ser aplicada com o auxílio dos cabos tensionadores e da balança de mola, e deve ser transmitida por toda a extensão da fita. Na norma recomenda-se que um leve movimento de serra seja aplicado na fita, ou a mesma pode ser passada em volta do tanque, puxando-se para fora do casco do tanque, com as cordas amarradas aos posicionadores de fita, deslizando-os ao longo da fita, conforme é exigido. É importante salientar que se a fita não for suficientemente longa para o percurso de dar a volta completa no tanque, deve-se medir a circunferência em seções. Este método está descrito na norma. Já se a fita for suficientemente longa para o percurso da volta completa no tanque, selecione o nível do caminho da fita e então passe a fita em volta da circunferência e prenda a fita de forma que a graduação zero não esteja mais próxima do que aproximadamente um terço do comprimento de uma chapa de uma costura vertical. A outra extremidade da fita deve ser levada até o lado, assim aplicando a tensão à balança de mola e certificando-se que seja transmitida por toda a extensão da fita. A leitura deve ser efetuada diretamente da fita oposta à marca zero quando a tensão estiver correta. A leitura então deve ser registrada.

4.2.7. REPETIÇÃO DE MEDIÇÃO

Deve-se medir a circunferência na seção indicada como descrito nos procedimentos anteriores, mas para finalidade de cálculo faz-se necessária a

repetição da medida. Para isso deve-se liberar a tensão e trazer a fita novamente ao nível e tensão indicados conforme o método utilizado, repetir e registrar as leituras.

4.2.8. TOLERÂNCIA

As medições são lidas no milímetro mais próximo e devem ser consideradas satisfatórias se a repetição mostrar concordância dentro das seguintes tolerâncias (tabela 01):

Tabela 01 - Tolerâncias

Medição Circunferencial em metros	Tolerância em mm
Até 25	± 2
Acima de 25, até 50	± 3
Acima de 50, até 100	± 5
Acima de 100, até 200	± 6
Acima de 200	± 8

FONTE: A autora (2025).

Se não houver concordância entre a tolerância e as medidas obtidas, deve-se repetir e registrar mais medições até que se obtenha a concordância em duas leituras consecutivas. A média destas duas leituras deve ser usada como a circunferência. Caso as medições consecutivas não concordem, as razões para a diferença devem ser determinadas e o procedimento de calibragem deve ser repetido.

4.3. TOPOGRAFIA INDUSTRIAL

A representação do meio em que vivemos sempre foi uma questão importante para a sobrevivência do homem, e a etimologia da palavra TOPOS vem do grego e significa lugar, e GRAPHEN a descrição, e de uma forma bastante simples Topografia é a descrição do lugar.

De acordo com Espartel (1982) a Topografia é uma ciência que tem por finalidade determinar o contorno, dimensão e posição relativa de uma porção limitada da superfície terrestre. Esta é uma ciência baseada na Trigonometria e na Geometria, sendo aplicada e restrita, formando um capítulo da Geodésia, que tem por objeto o estudo da forma e dimensão da Terra, porém ao contrário desta, a Topografia não leva em conta a curvatura resultante da esferecidade terrestre. Num conceito mais atual também se difere da Geodésia por não determinar os parâmetros definidores do campo da gravidade e ainda não levar em consideração as deformações decorrentes da atuação de forças externas que nos levam a encarar as coordenadas de um ponto como variáveis com o tempo como na Geodésia (Gemael, 2012).

Conforme Comastri e Gripp Junior (1998, p. 22) os Levantamentos Topográficos podem ser divididos em:

- Levantamento Expedito: Uso de instrumentos de escassa precisão e portáteis. Sua execução é fácil e rápida;
- Levantamento Comum: Uso de recurso instrumental mais aprimorado e de métodos de medições mais rigorosos;
- Levantamento de Precisão: Uso de instrumentos de alta precisão, propiciando maior aperfeiçoamento nas medições das distâncias e dos ângulos, elementos básicos da determinação.

Ao considerar problemas teóricos e aplicados que exijam grande acurácia, técnicas de medições, processamentos de dados e modelagens associados com levantamentos de ambientes especiais e até de grandes estruturas, surgiu em 1991 a especialidade denominada “Engenharia de Precisão” criada pela *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) através de uma Comissão Especial de “Aplicações da Geodésia à Engenharia” (Nadal, 2000).

A IUGG ao definir a Engenharia de Precisão, destaca a importância da alta acurácia nas medidas, das técnicas de medição avançadas, do processamento de dados sofisticado e da modelagem precisa para atender aos projetos que exigem um nível de precisão muito elevado.

Conceituada a Topografia quando realizada com alta precisão, desta forma, podemos definir para o uso em estudos de Engenharia de precisão, o termo “Topografia Industrial” para todas as partes da topografia que se referem à ambientes industriais ou confinados, e que fazem uso de técnicas precisas, como citado em Nadal (2000).

Topografia aplicada a trabalhos com finalidades produtiva industrial, controle de qualidade de produtos, controle de estabilidade de máquinas, equipamentos e instalações industriais, posicionamento, locações de alta precisão, determinação de deslocamentos, etc. (NADAL, 2000, p.35)

Segundo Matos (2017) a Topografia Industrial seria a aplicação das técnicas topográficas para o desenvolvimento de obras de engenharia de grande porte ou de maquinários industriais e ainda a análise de comportamento geométrico temporal aplicado no monitoramento de estruturas.

As particularidades que cercam a Topografia Industrial se diferem pela aplicação de métodos topográficos com características específicas, com diferença na precisão e acurácia necessária. Geralmente esta é efetivada em locais restritos, confinados, sujeitos às vibrações, com emissão de calor, com deslocamentos aleatórios, etc. Sendo assim, um ramo específico da Topografia com particularidades e características próprias (Nadal, 2000). Ainda é possível citar interferências no levantamento como falta de visibilidade ao objeto a ser levantado e vibrações do equipamento a ser mensurado, fatores que interferem nos resultados (Gonçalves et al. 2007).

A necessidade de grande acurácia e precisão, e logo a minimização destes efeitos que interferem no levantamento e na qualidade das observações torna essencial a realização de ajustamento de observações. Ajustá-las juntamente a parâmetros, a um modelo matemático, e este, em algumas circunstâncias que possa conter injunções particulares (Gemael, Machado, Wandresen, 2015).

Problemas complexos de engenharia envolvem soluções complexas, e na Topografia Industrial o controle de qualidade métrico dos produtos, e a adaptação às normas internacionais de qualidade e produtividade exigem

aferições das mensurações lineares e angulares, aplicação de metodologia específica e controle de qualidade de medidas (Nadal, 2000). Esta modalidade da Topografia torna-se assim, objeto de estudo da Metrologia Industrial.

4.4. LEVANTAMENTO POR VARREDURA À LASER

Segundo Tommaselli (2003) o levantamento tridimensional de pontos em terrenos é um problema clássico, que pode ser determinado através de diferentes metodologias. Com o levantamento de distâncias sem a necessidade de refletores, que nos permite determinar coordenadas remotamente sem tocar no objeto, isso devido a melhora significativa dos medidores laser, a tecnologia envolvida nos levantamentos de objetos nos dias atuais remonta termos como estações robotizadas e varredura a laser.

Ainda de acordo com o autor, o amadurecimento e o aperfeiçoamento dos princípios tecnológicos dos medidores laser são o que permitem a tecnologia de controle de servo-mecanismos, aplicada a instrumentos topográficos, que asseguraram o desenvolvimento da estação total robotizada, que permite a medição programada de pontos, mesmo sem o operador. A varredura à laser é um aperfeiçoamento destes princípios.

De acordo com Wutke (2006, p. 5) “os sistemas de varredura laser são um aprimoramento das estações totais robotizadas, com maior velocidade de coleta e recursos de automação mais avançados”.

“O equipamento de laser scanner é um dispositivo de levantamento topográfico terrestre preparado para fornecer informações em três perspectivas de qualquer lugar, mesmo que haja nocividade no local e alto risco a integridade física do operador, em uma excelente escala, de forma proficiente. Essa metodologia indica com precisão a localização e as propriedades de superfícies em áreas de mineração, de indústrias e urbanas, tanto de superfície quanto de subsolo”. (Rabelo, Silva E Silva, 2020, p. 186)

Os efeitos de perspectiva causado pela geometria das fotos, sombras e altura das edificações, entre outros, não permitem a correta modelagem dos objetos presentes na superfície através de algoritmos de correlação automática

de imagens. Neste sentido, produtos como as ortofotos digitais para projetos urbanos não podem ser utilizados na restituição direta de edificações (Dalmolin e Santos, 2004). E o sistema Laser Scanner vem emergindo e suprimindo essa necessidade, entrando em cena, nesta e em outras muitas aplicações. De acordo com Rabelo, Silva e Silva (2020) o escaneamento ou varredura à laser é uma nova tecnologia, resultado de grande investimento técnico e tecnológico, e traz ganho de tempo e segurança aos trabalhos, além de qualidade aos resultados que proporciona, visto proporcionar a medição de milhões de pontos em alguns poucos minutos.

O sistema Laser Scanner também é conhecido como LIDAR – *Light Detection and Ranging*, e possui um sistema de varredura óptico-mecânico que emite pulsos laser, que são emitidos e recebidos, e utilizados para medir a distância entre o sensor e o objeto iluminado. Ressalta-se que a precisão e a acurácia estão relacionadas diretamente com as componentes que compõem o sistema (Dalmolin e Santos, 2004).

Com o uso da tecnologia Laser Scanner o detalhamento do objeto mapeado é superior em relação a outras tecnologias, porém atualmente em termos de precisão, esta tecnologia ainda não pode ser comparada às estações totais voltadas para trabalhos como monitoramento ou levantamentos industriais, visto a mesma ser inferior a desses equipamentos.

Nos últimos anos, a tecnologia de varredura à laser tem sido utilizada em vários tipos de levantamentos terrestres. Neste caso, não há a necessidade do uso de refletores e as medidas não são efetuadas em feições específicas, mas em todo o objeto, dessa forma gerando uma nuvem densa de pontos com coordenadas 3D (Tommaselli, 2003).

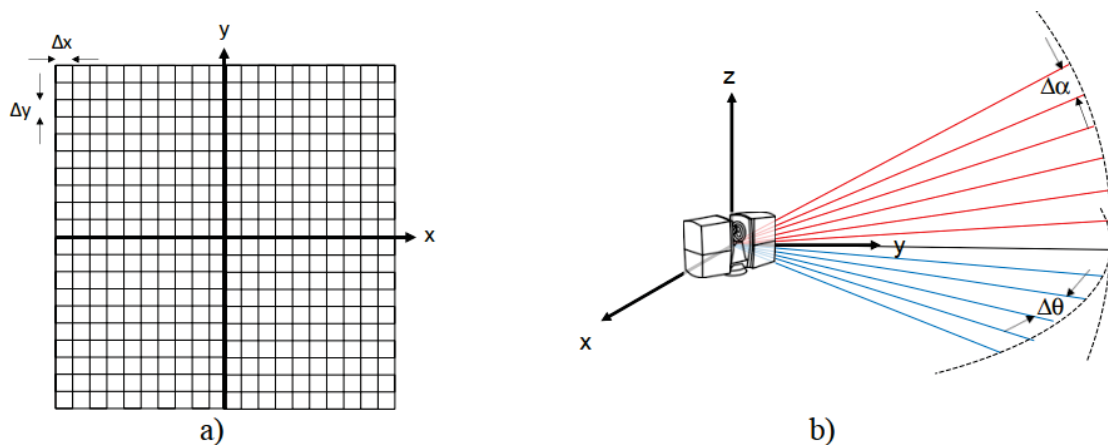
De acordo com Dalmolin e Santos (2004) o princípio de funcionamento do sistema Laser Scanner é gerar coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície num curto período de tempo. Os pulsos de laser são gerados e emitidos pelo sistema com o auxílio de um espelho de varredura atingindo os objetos, e os objetos atingidos refletem o pulso emitido e parte de sua energia volta para o sistema. Desta forma a medida da distância entre o sensor e o objeto

é determinada através do intervalo de tempo entre emissão e reflexão do pulso, que é o retorno.

No Laser Scanner Terrestre as coordenadas são geradas indiretamente através das medidas de direções e distâncias, assim como nas estações totais robotizadas, de acordo com Wutke (2006) pois são um aprimoramento deste sistema, com maior velocidade de coleta e recursos de automação mais avançados. Ainda segundo Wutke (2006) “os recursos de varredura são implementados por meio de espelhos controlados por servomotores encarregados de redirecionar o feixe emitido. O resultado final do processo de medição e processamento é um conjunto de dados, coordenadas tridimensionais, correspondentes aos pontos na superfície do objeto”.

De acordo com Linchti (2022) um instrumento Laser Scanner Terrestre coleta medições de alcance em incrementos angulares discretos, $\Delta\theta$ e $\Delta\alpha$ (figura 09) por meio de mecanismos de deflexão de feixe ortogonais.

Figura 09 - Geometria de Amostragem do Laser Scanner Terrestre



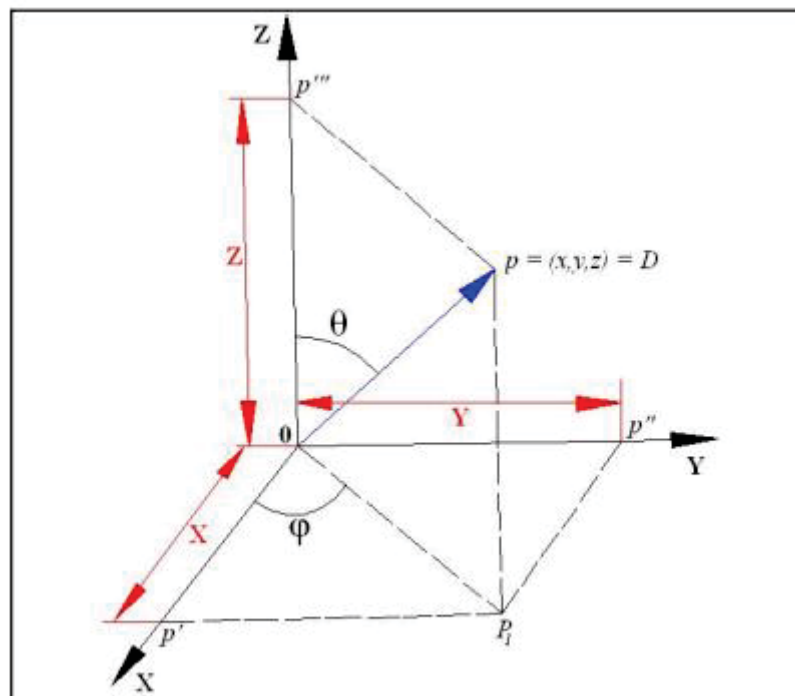
Fonte: Lichiti (2022).

A obtenção de coordenadas com o uso do equipamento, de acordo com Tommaselli (2003) vem do princípio onde o instrumento mede as distancias e a intensidade de energia refletidas pelo objeto, além dos parâmetros de atitude do feixe, que são o azimute e a elevação, em relação ao referencial do equipamento. E as medições são realizadas pelo princípio do tempo de retorno do sinal – *Time of Flight* – TOF que fazem com que o pulso eletromagnético seja emitido pelo transmissor ao mesmo tempo em que um contador eletrônico é

iniciado. Neste caso, o pulso é refletido pelo objeto e retorna ao receptor, momento este em que o contador interrompe a contagem.

Ainda de acordo com Tommaselli (2003), obtém-se as coordenadas esféricas do ponto em relação ao referencial do laser a partir das distancias, intensidade da energia refletida pelo objeto e dos parâmetros de atitude do laser (azimute e elevação). E a partir disto, calculam-se as coordenadas cartesianas 3D a partir das coordenadas polares de cada ponto (figura 10).

Figura 10 - Coleta de coordenadas Polares do Sistema Laser



Fonte: Gonçalves (2007).

De acordo com Gonçalves (2007), as coordenadas esféricas do ponto P são obtidas através da medição dos ângulos θ (Elevação) e φ (Azimute) e da distância do equipamento até o ponto D e desta forma as coordenadas cartesianas 3D (X,Y,Z) são obtidas com as equações trigonométricas.

$$X = D \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{cos}\varphi \quad (01)$$

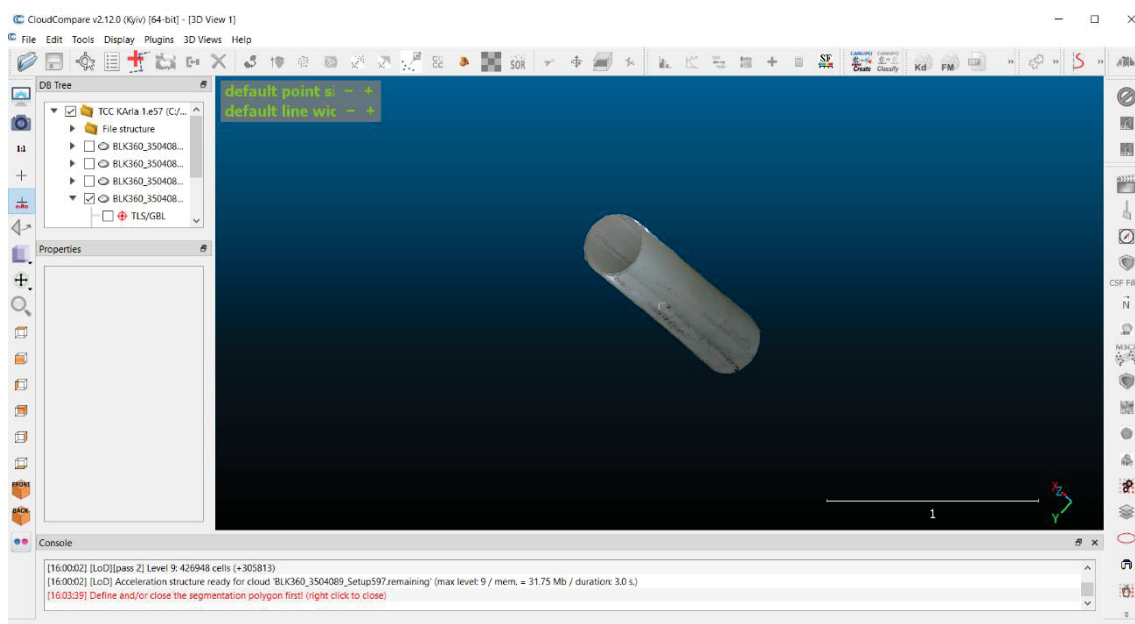
$$Y = D \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\varphi \quad (02)$$

$$Z = D \cdot \text{cos}\theta \quad (03)$$

Estas coordenadas formam a nuvem de pontos, e segundo Gonçalves (2007) se esta for de baixa densidade talvez os objetos escaneados não sejam bem definidos em seus detalhes. Mas por outro lado, se for de grande densidade, o trabalho de campo pode tornar-se muito demorado e o arquivo gerado por estes pontos pode ficar muito grande, e dificultar sua manipulação.

A nuvem de pontos é o resultado deste processo e pode ser manipulada em softwares como o Cloudcompare. Processos como renderização, texturização, intensidade e níveis de cinza podem ser utilizados para a visualização do produto final como é apresentado na figura 11.

Figura 11 - Nuvem de pontos reconstruindo a Tubulação DN300 no Software CloudCompare



Fonte: Nadal (2022).

A utilização da varredura à laser como tecnologia para a determinação volumétrica promove maior detalhamento, e um ganho de tempo e segurança aos trabalhos, além da melhoria de qualidade nos resultados. No quesito precisão, a tecnologia é superior aos mapeamentos típicos aplicados para esta finalidade. A correção e a precisão nas informações oferecidas pelos dispositivos laser scanner são de importância para que haja uma satisfatória interpretação nos dados obtidos e mais qualidade nos levantamentos (Rabelo, Silva e Silva, 2020).

A metodologia de varredura à laser permite determinar com precisão a localização e as propriedades de superfícies em áreas de mineração, de indústrias e ainda urbanas. A aplicação no contexto deste trabalho em peças industriais é relevante no sentido de que este conhecimento permite avaliar a geometria do objeto de estudo. O equipamento possibilita o posicionamento em três dimensões, X, Y e Z, e constitui-se por meio de cor natural e intensidade dos reflexos de luz sem a necessidade dos equipamentos refletivos, e desta forma coletando coordenadas tridimensionais dos objetos e estruturas (Rabelo, Silva e Silva, 2020).

De acordo com Rabelo, Silva e Silva (2020, p.192) “o levantamento topográfico com equipamento laser scanner permite a obtenção de milhares de pontos com precisão milimétrica que detalham os pontos estruturais dos sólidos referente à estrutura tridimensional e os seus parâmetros determinados”. Nesse sentido, a varredura à laser é uma forma de levantamento que permite determinar informações 3D em grande escala, de modo rápido e direto, com precisão, de maneira inovadora.

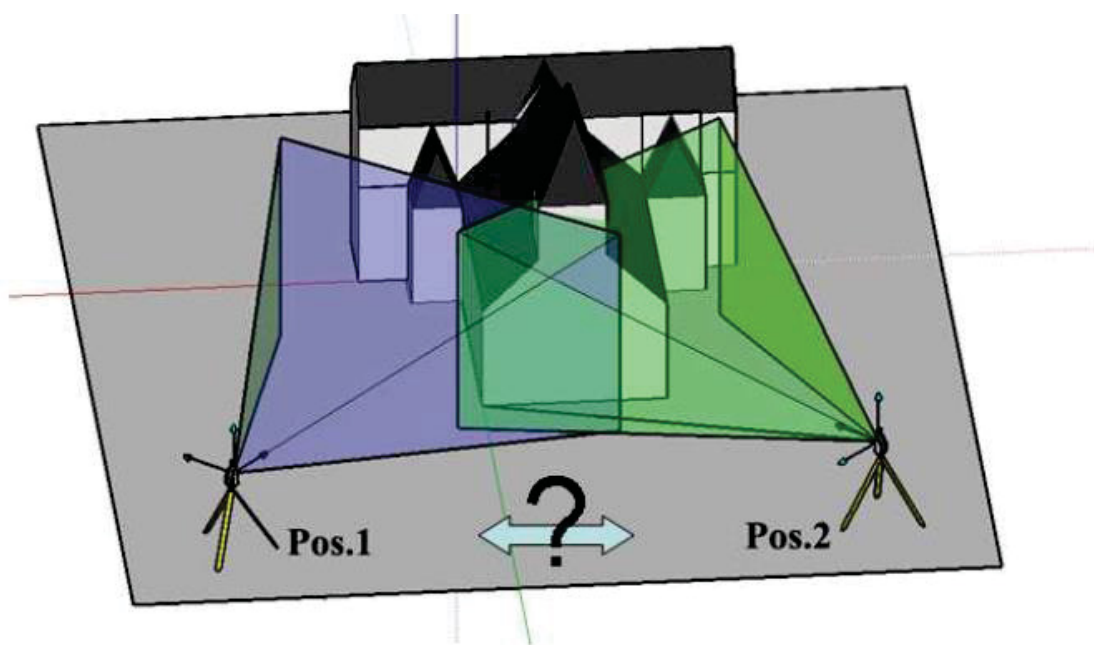
A aplicação dos lasers scanners exige rapidez, fluidez de forma eficiente, controlável e fácil de utilizar, e está sendo empregado de forma ampla na engenharia por gerar dados de forma econômica. Porém há algumas questões a serem discutidas ainda como a qualidade dos dados no quesito de precisão e usabilidade. Neste caso uma descrição completa do objeto exige uma nuvem de alta densidade de pontos, para a correta identificação das linhas de quebra, o que pode levar a problemas de armazenamento e processamento (Bornaz, Lingua e Rinaudo, 2003).

De acordo com os autores Bornaz, Lingua e Rinaudo (2003) na aquisição de dados por laser scanner terrestre o registo de um sistema local para a verificação de uma precisão métrica declarada pelo fabricante são essenciais. Além das posições das aquisições de dados individuais, que devem ser escolhidas de modo a evitar-se perda de detalhes importantes e zonas ocultas, a criação de grandes sobreposições entre as varreduras adjuntas para a visualização de quaisquer erros sistemáticos durante sua união. O local onde instala-se o equipamento para a aquisição dos dados é crucial para a qualidade do levantamento. A usabilidade pode ser definida como potencial dos pontos

adquiridos para a descrição correta do objeto e a adequada resolução angular e da divergência do feixe.

O registro é uma importante etapa na aquisição de dados à laser, o objeto pode necessitar de múltiplas posições do scanner para ser imageado corretamente. Uma das formas de registro com o Laser Scanner é o registro indireto, onde se pressupõe a utilização de elementos como alvos, sejam estes artificiais ou naturais, presentes na própria cena para alinhar o conjunto de dados. Com o georreferenciamento, os alvos devem ser registrados e transformados em um sistema de coordenadas topográfico local. Para que este registro ocorra, são necessárias no mínimo três correspondências de alvos entre duas varreduras, como na figura 12. Mas o indicado são mais de três varreduras para que erros possam ser minimizados pelo método dos mínimos quadrados (Leonardo Da Vinci Agentschap, 2008).

Figura 12 - O registro em duas posições distintas



Fonte: Leonardo Da Vinci Agentschap (2008).

Outra forma de registro é o direto, onde utiliza-se um receptor GNSS no scanner, ou ainda posiciona-se o equipamento laser scanner sobre um ponto conhecido, e utiliza-se um prumo laser, tal como estações totais. Dessa forma a orientação pode ser determinada escaneando apenas um alvo na próxima posição do laser scanner. Nesse método as varreduras não precisam se

sobrepôr, sendo uma técnica mais rápida que o registro indireto. O registro direto significa que a posição e a orientação do scanner são calculadas diretamente (Leonardo Da Vinci Agentschap, 2008).

Após o registro, as próximas etapas de processamento dos dados são muito relevantes para a qualidade do produto gerado. A etapa do processamento da nuvem de pontos é o processo de se transformar a nuvem de pontos bruta registrada no produto final. Esse processo, na realidade, é demorado e principalmente manual dependendo de sua finalidade. Os produtos finais podem ser extraídos diretamente da nuvem de pontos sem processamento adicional ou criando primeiro um modelo de superfície 3D a partir da nuvem de pontos e extraíndo os produtos finais desse modelo de superfície.

Existem ferramentas nos softwares para a manipulação da nuvem bruta de pontos, onde pode-se extrair seções por exemplo. Mas um processo fundamental dentro destes softwares é a filtragem, de acordo com Leonardo Da Vinci Agentschap (2008) é o primeiro procedimento realizado, onde removem-se dados ruidosos da nuvem de pontos. Os ruídos podem ser introduzidos por diversos motivos como a má reflexão da superfície, o vento, entre outros. Dessa forma, a malha conterá triângulos conectando pontos ruidosos a pontos corretos, o que indica a importância da remoção desses ruídos antes de iniciar outras etapas.

Existem duas formas de realizar a filtragem, ainda de acordo com o autor, sendo a primeira manual, onde o operador pode facilmente identificar partes que foram escaneadas, mas não são necessárias no produto final. Portanto, é aconselhável que esse operador faça uma primeira análise da nuvem de pontos e remova todos os pontos desnecessários do conjunto de dados manualmente.

Ainda é possível realizar filtrações automáticas, como são o caso dos algoritmos automáticos que removem pontos ruidosos que são baseados no princípio de que pontos que têm poucos ou nenhum outro ponto em seus arredores diretos são considerados *outliers*. Provavelmente, eles se originam de pessoas ou outros obstáculos que se movem na frente do scanner enquanto o escaneamento está em progresso e não fazem parte do objeto a ser escaneado. Esses pontos podem ser facilmente identificados usando um número limitado de

configurações de parâmetros e, em seguida, removidos da nuvem de pontos. A partir disso é possível realizar, por exemplo, a extração de seções na nuvem de pontos.

O uso do Laser Scanner Terrestre tem sido amplamente explorado no levantamento de precisão atualmente, e está se tornando uma prática comum. Os autores Talebi, Koskela e Tzortzopoulos (2018) em seu trabalho demonstram um método denominado *Tolerance Compliance Measurement* – TCM utilizando o método de varredura à laser scanner terrestre que obtém precisão com variação geométrica de superfícies, empregando-se a pradroneização do processo. Os autores demonstram a possibilidade de um *As-Built* com o uso de um laser scanner terrestre, uma técnica de levantamento de precisão muito usual na engenharia de precisão, e mostram sua possibilidade. Nesta dissertação, a aplicação é o método de arqueação, outra modalidade da engenharia de precisão.

No caso de determinações da verticalidade de estrutura por nuvem de pontos, Alves (2022) utilizou um LST para este objetivo no mesmo objeto proposto no segundo ensaio deste trabalho, o reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal, mostrando precisão e resultado obtidos com metodologia de varredura à Laser.

4.5. PRINCÍPIOS DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO APLICADOS A GEODÉSIA E A METROLOGIA

O conceito fundamental quando se trata de incertezas aplicadas à Metrologia ou a Geodésia é definitivamente conectado a definição de Calibração e erro que serão explorados nesse capítulo, tanto no contexto metrológico quanto em contexto de ciências geodésicas. Ainda na Metrologia há também a conexão a outras definições importantes reconhecidas no Guia Para a Expressão de Incerteza de Medição – GUM e no Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM como será apresentado nesse capítulo.

Conceitos importantes reconhecidos segundo o VIM (2012) são dispostos a seguir para análise e compreensão desse trabalho:

a) Princípio de Medição

Fenômeno que serve como base para uma medição, sendo este de natureza física, química ou biológica.

b) Método de Medição

Descrição genérica duma organização lógica de operações utilizadas na realização duma medição.

c) Procedimento de Medição

Descrição detalhada duma medição de acordo com um ou mais princípios de medição e com um dado método de medição, baseada num modelo de medição e incluindo todo cálculo destinado à obtenção dum resultado de medição. Este procedimento deve ser documentado com detalhes.

d) Resultado de Medição

Conjunto de valores atribuídos a um mensurando, juntamente com toda outra informação pertinente disponível.

VIM (2012) define grandeza como: “propriedade dum fenômeno dum corpo ou duma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma dum número e duma referência”.

e) Valor Medido duma Grandeza

Valor duma grandeza que representa um resultado de medição. É apresentada geralmente sob a forma de uma unidade de medida multiplicada por um número.

No GUM (2008), os termos “resultado de medição” e “estimativa do valor do mensurando” ou apenas “estimativa do mensurando” são utilizados para “valor medido duma grandeza”.

f) Valor Verdadeiro duma Grandeza

Valor duma grandeza compatível com a definição da grandeza.

g) Valor Convencional duma Grandeza

Valor atribuído a uma grandeza por um acordo, para um dado propósito. Como por exemplo, Valor convencional da aceleração da gravidade, $g_n = 9,806\,65 \text{ m.s}^{-2}$.

O VIM (2012) comunica que o Valor Verdadeiro Convencional é valor atribuído a uma grandeza específica e aceito, às vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada para uma dada finalidade.

A definição de Incerteza de Medição, segundo VIM (2012) é o “parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”.

De acordo com o GUM (2008) Incerteza de Medição é parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. E o parâmetro pode ser por exemplo, um desvio padrão, a metade de um intervalo, entre outros.

Outra definição que cabe o contexto é a Medida Materializada, de acordo com o VIM (1995) é o dispositivo destinado a reproduzir ou fornecer, de maneira permanente durante seu uso, um ou mais valores conhecidos de uma dada grandeza.

Ainda é possível definir o Padrão segundo o VIM (1995) como a medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.

Com essas definições apresentadas, o conceito de Calibração de acordo com o VIM (2012) pode ser introduzido, que é uma definição metrológica do termo. Calibração é “operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas

associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação”.

As observações pertinentes de acordo com o VIM (2012):

- 1) A Calibração pode ser expressa por meio de uma declaração, função de calibração, diagrama, ou curva de calibração, ou uma tabela de calibração. Pode consistir em uma correção aditiva ou multiplicativa da indicação com uma incerteza de medição associada.
- 2) Não se deve confundir calibração com ajuste, e nem com verificação.

Com isto, define-se então o termo Ajuste, que vem a ser de acordo com o VIM (2012): “conjunto de operações efetuadas num sistema de medição, de modo que ele forneça indicações prescritas correspondentes a determinados valores duma grandeza a ser medida”.

Segundo Chacon (2008) a necessidade do ajuste é definida pelo usuário, e os laboratórios não são acreditados para realizar o ajuste, mas sim a calibração. A autora ainda destaca a importância de Calibração para se conhecer o instrumento, para o critério de seleção e a confiabilidade. A especificação técnica do instrumento não garante seu desempenho, deve haver uma manutenção das características ao longo do tempo.

E a partir disso pode-se definir a Verificação de acordo com o VIM (2012) como “fornecimento de evidência objetiva de que um dado item satisfaz requisitos especificados”. Este pode ser um procedimento de medição, por exemplo, um processo, e deste processo os requisitos especificados podem ser obedecidos. O VIM ainda comenta que no caso da Metrologia Legal, conforme é definido no VIML, a avaliação da conformidade compreende o exame e marcação, ou emissão de um certificado de verificação do sistema de medição. E desde termo surge a Validação, que de acordo com o VIM é a “verificação na qual os requisitos especificados são adequados para um uso pretendido”.

Da validação, surge outro termo que é a Certificação, que de acordo com Faggion (2001) é o procedimento pelo qual um organismo imparcial credenciado atesta por escrito que o sistema ou pessoas são competentes para realizar tarefas específicas.

Num conceito de aplicações Geodésicas, Faggion (2001) definiu Verificação como sendo o conjunto de operações que compreende o exame, a marcação ou selagem ou a emissão de um certificado que constate que o instrumento de medir ou a medida materializada satisfaz às exigências regulamentares. O autor ainda traz o conceito de Aferição que é pertinente à área das Ciências Geodésicas e da Instrumentação, que consiste num conjunto de operações que estabelecem em devidas condições, a correspondência entre os valores indicados por um instrumento de medir, ou por um sistema de medição, ou ainda por uma medida materializada e os verdadeiros convencionais da grandeza medida. Importante salientar que o resultado de uma aferição nos permite determinar os erros de indicação de um instrumento de medir, e que através de ensaios outras propriedades metrológicas surgem a partir da aferição. Os resultados da aferição são registrados em um documento chamado certificado de aferição, ou ainda relatório de aferição.

Em Faggion (2001) ainda se discutem em visões Geodésicas outros termos relevantes como o termo Classificação, que é pertinente às observações de dados como realizado neste trabalho. Classificar, de acordo com Faggion (2001) é a distribuição em classes ou grupos distintos segundo um sistema de classificação. A Norma Brasileira NBR13133 de Execução de Levantamentos Topográficos (2021) define as classes que devem ser enquadrados os instrumentos, baseando-se no desvio padrão de um conjunto de observações obtidas, seguindo um método aplicado.

Ainda em Faggion (2001) encontram-se várias definições de Calibração para as ciências geodésicas, mas uma é extremamente pertinente quando das aplicações em instrumentação geodésica, que é o termo Calibração encontrado em Möser, et al. (2000) apud Fagion (2001) onde entende-se por Calibração o exame, o “Check-up”, de aparelhos de medição e a determinação de desvios desde o valor nominal (ou teórico), ou então a observância das fronteiras de erro. Deve-se destacar que não se efetua junto a calibração nenhuma intervenção e nenhuma alteração no aparelho de medição, porém, eventualmente a possibilidade de eliminar os desvios mediante a fixação dos valores de correção existe.

De acordo com Smith (2016) Calibração é o que define a acurácia, precisão e ainda a qualidade das medidas com determinado equipamento. Calibração minimiza potenciais incertezas nas medidas.

O VIM (2012) com vistas a metrologia, define que Exatidão de Medição é o grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando. E é importante verificar que não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico. Uma medição é dita mais exata quando esta fornece um erro de medição menor. Faggion (2001) tem como visão vinculada a termos geodésicos onde a Exatidão é um termo descritivo de resultados de operações exatas, portanto desvinculadas as observações. Então de acordo com Faggion (2001) o termo Acurácia pode ser definido vinculado à palavra precisão ou exatidão, mesmo que em português suas definições sejam diferentes, e então Acurácia pode ser definida como o grau de conformidade de um valor medido ou calculado à sua definição ou com respeito a uma referência padrão.

No entanto, é definido no VIM (2012) o termo Precisão que é o “grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas”. É geralmente expressa numericamente através do desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições especificadas de medição. Muito utilizado nas Ciências Geodésicas, principalmente em Ajustamento de Observações, a precisão é um termo fundamental para a compreensão do desenvolvimento deste trabalho, visto que são apresentadas tabelas com os valores das medições junto as suas respectivas precisões.

Do surgimento das Precisoões e do Método de Medir, o VIM (2012) apresenta uma definição apresentada como a Condição de Repetibilidade de Medição, que é a condição de medição num conjunto de processos, os quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo. Esta definição é importante, porque através dela, estipula-se a necessidade da repetição do método de medir para que as

precisões surjam nas medidas e então hajam discrepâncias e correções, quando necessárias ou cabíveis.

O VIM (2012) ainda se apropria de outro termo interessante que é a Veracidade de Medição ou Justeza de Medição que se trata do grau de concordância entre a média dum número infinito de valores medidos repetidos e um valor de referência. Este não é expresso numericamente e a norma ISO 5725 apresenta as características para o grau de concordância.

Do termo Precisão, surge então a Resolução, que de acordo com o VIM (2012) é a “Menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente” isto na visão metrológica, já numa visão geodésica instrumental, Faggion (2001) indica que a Resolução é o algarismo menos significativo que pode ser medido, e ainda depende do instrumento utilizado para realizar a medida. Como exemplo o autor cita a medida de deslocamentos lineares feitos com um interferômetro laser que pode ter resolução de 1 μ m.

Os instrumentos de medição são outro item importante à esta pesquisa, e são definidos pelo VIM (2012) como “dispositivos utilizados para realizar medições, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares”. E quando um instrumento de medição pode ser utilizado individualmente este é um sistema de medição.

E outro termo metrológico aplicado é a Deriva Instrumental, o “Drift”, que é a variação ao longo do tempo, que pode ser contínua ou incremental, devida as variações das propriedades metrológicas de um instrumento de medição. Este item não está relacionado a uma variação na grandeza medida e nem a uma variação de qualquer grandeza de influência identificada.

Termos relevantes ainda a essa pesquisa são os Erros, e no VIM (2012) encontramos em quatro modalidades pertinentes a essa pesquisa:

1) Erro de Medição

Diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência.

2) Erro Sistemático

Componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. Suas causas podem ser conhecidas ou desconhecidas. Pode aplicar-se uma correção para compensar o erro sistemático conhecido.

3) Erro Aleatório

Componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível.

4) Erro Máximo Admissível

Valor extremo do erro de medição, com respeito a um valor de referência conhecido, admitido por especificações ou regulamentos para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição.

De acordo com Faggion (2001) num processo de Calibração, é possível determinar alguns erros para a correção em distanciômetros óptico-eletrônicos, como os utilizados em Geodésia, que apresentam um grande número de fontes de erros instrumentais, de origem óptica ou eletrônica. Normalmente a magnitude destes erros é pequena, e a partir de um processo de calibração efetuado pelo fabricante eles são determinados para que a devida correção seja feita.

De acordo com Mezian et al. (2016), em relação aos instrumentos de laser scanner existem três incertezas relacionadas ao uso do Laser Scanner, neste caso o autor trabalha com sistemas dinâmicos, que são as Incertezas de Navegação, as Incertezas de Calibração (entre o sistema de eixo do equipamento laser e os demais aplicados a navegação) e as Incertezas da Varredura Laser. Os dois primeiros são voltados a sistemas de varredura à laser dinâmicos, desta forma serão abordados nesta revisão.

As incertezas do sistema de varredura à laser, segundo Mezian et al. (2016), como este sistema consiste-se em dois ângulos e uma distância, os fatores que afetam a precisão da posição do alvo do feixe laser são numerosos. Pode-se citar as condições ambientais (tanto a umidade, quanto a temperatura

e pressão), as propriedades da superfície escaneada (seja a rugosidade, refletividade), a geometria de varredura (o ângulo de incidência na superfície), e ainda o mecanismo do scanner (o deslocamento do centro do espelho). Todas essas incertezas são determinadas e avaliadas pelos fabricantes do sistema (Mezian et al., 2016). Mais informações sobre erros em equipamentos laser scanner podem ser obtidos em Mezian et al. (2016) e Moreno et al. (2014).

Em metrologia, o resultado de uma calibração é a relação entre as leituras de um instrumento de medição, e os valores indicados pelo padrão. Calibrar é confrontar o comportamento metrológico de um instrumento de medição com o padrão de referência (Mendes e Rosário, 2020). Um método de Calibração muito empregado na metrologia é o uso de Interferômetros Laser, como cita Smith (2016) no qual afirma que a calibração do interferômetro a laser confirma a rastreabilidade da cadeia de medição ao padrão absoluto para o metro, e ainda que a operação precisa e rastreável de um interferômetro a Laser requer calibrações e verificações de vários fatores específicos.

O Termo Rastreabilidade entra em cena neste momento, que de acordo com o VIM (2012) é a Propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através duma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição. E nesta definição, referência pode ser uma unidade de medida.

A Norma Técnica ISO 7507-1 recomenda a calibração de trenas para seu uso no método de arqueação de tanques. Para estes métodos pode-se utilizar a calibração pelo método tradicional de laboratórios de metrologia como citado em Motta et al. (2012) onde a calibração é feita comparando a trena com uma régua digital padrão ou com o emprego de um microscópio digital. Os autores citam os dois métodos e discutem, o tradicional com o uso da régua digital e o com o microscópio e apontam que a incerteza utilizando o método de Calibração com o microscópio é menor, devido a sua alta resolução principalmente, além da eliminação do erro de paralaxe e a facilidade de obtenção da superposição entre os traços, que melhora a repetitividade dos resultados.

Ainda é importante comentar sobre o controle do processo de calibração sob o olhar da metrologia dimensional, onde é importante discutir a rastreabilidade de medições ainda, que refere-se a capacidade de rastreio dos resultados de medições até sua referência padrão reconhecida, garantindo assim a confiabilidade no processo, além da precisão. Nesse aspecto de acordo com Smith (2016) uma menor incerteza é normalmente atingida com melhores instrumentos e equipamentos superiores, melhor controle do ambiente e inspeção, garantido o desempenho consistente do procedimento correto feito com aquele equipamento.

Ainda de acordo com Smith (2016) para avaliar as observações de um procedimento de inspeção e determinar se um controle de processo adequado foi estabelecido, geralmente são adotadas medidas estatísticas. Se o processo metrológico não é influenciado por erros sistemáticos ou aleatórios, então considera-se que o processo está se comportando normalmente e quaisquer dados de saída do processo de produção são válidos. Duas expressões matemáticas derivadas estatisticamente são geralmente necessárias para definir se um processo metrológico está se comportando corretamente, que são a média aritmética e seu desvio padrão correspondente.

Existem inúmeros aspectos que podem contribuir para, medidas em peças ou produtos industriais, por exemplo terem suas incertezas facilmente detectadas, entretanto outros aspectos permanecem mais difíceis de serem estabelecidos. A redução destas incertezas se dá através da Calibração dos instrumentos e equipamentos, compensação por quaisquer correções, garantir que as medições sejam rastreáveis em nível nacional, selecionar equipamentos de ponta metrologicamente para empregar nos procedimentos, repetir e checar as medidas, repetir e checar as transcrições dos resultados, utilizar tabelas das incertezas (desvios padrão), e finalmente ter consciência dos problemas da cadeia de calibração, ou seja dos incrementos de incertezas potenciais que se tem no processo, que a cada passo que se é dado acontecem (Smith, 2016).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, utilizou-se o método de arqueação de tanques – Manual Strapping Method e o método de arqueação de tanques com o uso de uma nuvem de pontos obtida a partir de um levantamento através de varredura à laser, empregando-se um Laser Scanner. Nestes ensaios foram utilizados os materiais e instrumentos a seguir, para que pudessem ser realizados os levantamentos na Tubulação DN300 e no Reservatório de água do Bloco de Engenharia Florestal, os objetos deste estudo.

Cada ensaio teve um objetivo distinto. No caso do ensaio de laboratório foram usados três diferentes tipos de equipamentos para a medição pelo método tradicional para a devida comparação com o método por varredura à laser.

No ensaio em campo o objetivo era avaliar como pode ser realizada a medição da arqueação em campo empregando-se a varredura à laser em um objeto de dimensões maiores. Aqui não buscou-se a comparação entre a técnica tradicional e a varredura, mas sim a aplicação da varredura em situações de campo.

Foram utilizados para os ensaios:

ENSAIO NO LAIG – Laboratório de Instrumentação Geodésica

- Trena métrica de aço com trava de 10,00 metros;
- Fita métrica de PVC com 1,50 metros;
- Trena métrica de fita de PVC com 30,00 metros;
- Régua graduada métrica de aço com 2,00 metros, metro padrão;
- Barbante para materializar o topo horizontalizado;
- Alvos auto-colantes;
- Termômetro;
- Calculadora científica;
- Paquímetro;
- Nível Geodésico Digital Leica DNA03;

- Tripé industrial;
- Laser Scanner Leica BLK360;
- Tubulação de água DN300;
- Ipad conectado ao Laser Scanner para operação e controle.

ENSAIO NO RESERVATÓRIO DE ÁGUA NO BLOCO DA ENGENHARIA FLORESTAL

- Piquetes;
- Trena métrica de fita de PVC com 30,00 metros;
- Laser Scanner Leica BLK360;
- Tablet conectado ao Laser Scanner para operação e controle;
- Notebook para os cálculos da locação das estações.

5.1. TUBULAÇÃO DN300

Para o Ensaio no LAIG no ano de 2022 foi empregado como objeto de estudo uma tubulação tipo DN300 de PVC (figura 13), que de acordo com a nota técnica NT-07 da Sanepar segue a norma NBR 7665 - Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos. Parte 1: Requisitos gerais: Home. (Comercialmente PVC Infraestrutura para água) – 1999.

Este objeto é aplicado segundo a NBR 12218 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – 1994, que fixa as condições exigíveis na elaboração de um projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Ainda de acordo com a NBR 7560 o diâmetro nominal DN é o número que classifica, em dimensão, os elementos de tubulações (tubos, conexões, etc) e que corresponde aproximadamente ao diâmetro interno da tubulação, em milímetros. O diâmetro nominal não deve ser objeto de medição, e nem utilizado para fins de cálculo.

Figura 13 - Tubulação DN300



Fonte: Nadal (2022).

5.2. TRENA MÉTRICA PARA O MÉTODO DE ARQUEAÇÃO

A utilização da trena ou diastímetro é um método de mensuração direta de medida de distâncias. É dividida, geralmente, de um lado em metros, decímetros e centímetros, e do outro em pés e polegadas inglesas. Seu comprimento pode variar de 3 a 50 metros. É conveniente aferir periodicamente a trena, com um metro padrão, e levar em conta a correção, quando houver, nas medições. A trena de aço por sua vez oferece maior precisão nas medidas, pois é constituída de uma lâmina de aço inoxidável ou não, de 10 a 12mm de largura, e com divisão métrica de um lado e em polegadas do outro. Seu comprimento normal é de 10, 15 ou 20 metros.

A trena métrica empregada em nossa metodologia foi a fita de PVC com 30,00 metros de comprimento, dividida em um lado em medidas métricas, lado esse empregado nas mensurações. Outro instrumento utilizado foi uma trena

métrica de aço com trava de 10,00 metros de comprimento, e ainda uma fita métrica de PVC com 1,50 metros de comprimento. Foi empregado para um método de comparação com o metro padrão, uma Régua graduada métrica de aço com 2,00 metros como metro padrão.

A norma empregada para essa mensuração é a NBR 10124 – Trena de Fita – Fibra natural ou sintética – 1987 que trata das suas condições gerais como classificação, classe de precisão, dimensões, material, graduação, tolerância de precisão, resistência à tração, deformação elástica, entre outros. A seguir as figuras 14 e 15 mostram exemplos de trenas utilizadas convencionalmente segundo a Norma NBR 10124.

Figura 14 - Trena convencional com estojo

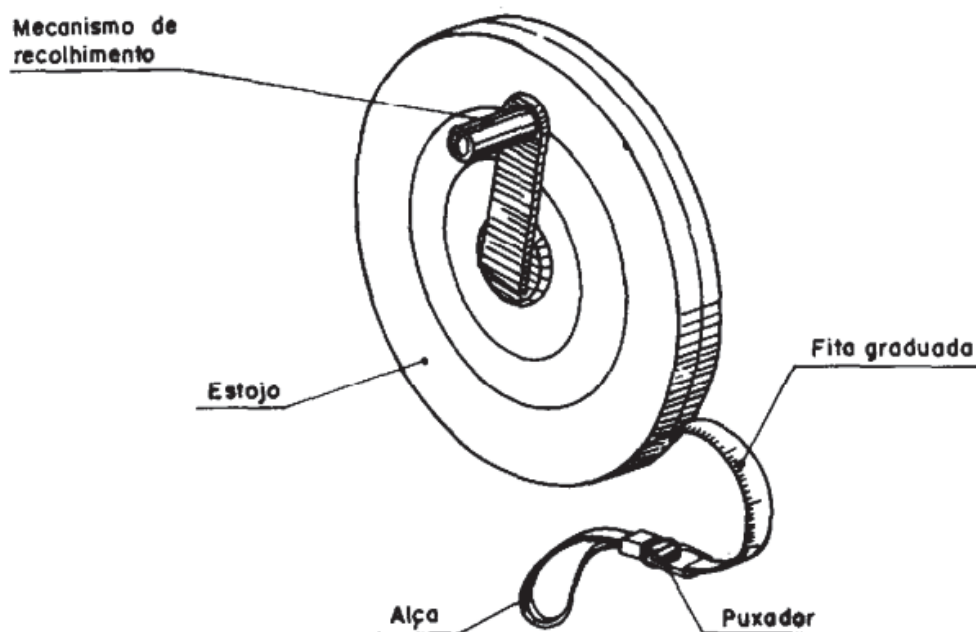


FIGURA 1 – Trena convencional com estojo

Fonte: Norma NBR 10124.

Figura 15 - Trena com suporte

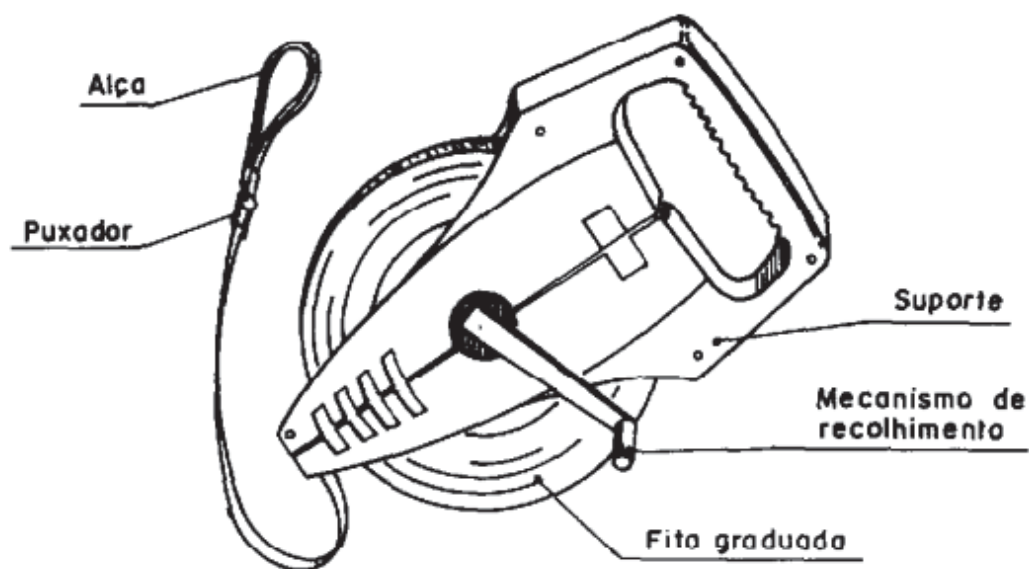


FIGURA 2 – Trena com suporte

Fonte: Norma NBR 10124.

No Ensaio do Laboratório de Instrumentação Geodésica – LAIG, procedeu-se a comparação da trena de fita e da fita métrica com o metro padrão de aço. Primeiramente posicionou-se o início de todos os instrumentos a serem comparados em conjunto, conforme ilustra a figura 16.

Figura 16 - Trena de fita e metro padrão posicionados em seu início



Fonte: Nadal (2022).

A seguir foram comparadas as discrepâncias entre os valores entre os instrumentos de mensuração. Existe uma visível diferença entre os instrumentos de medida, o que nos ensaios significará uma diferença entre os valores encontrados nas medições (figura 17).

Figura 17 - Diferenças na posição 50 cm



Fonte: Nadal (2022).

A Norma Técnica ISO 7507-1 -1993 recomenda a calibração de trenas para seu uso no método de arqueação de tanques. Para estes métodos pode-se utilizar a calibração pelo método tradicional de laboratórios de metrologia como citado em MOTTA, et al. (2012) onde a calibração é feita comparando a trena com uma régua digital padrão. É importante salientar, que ainda segundo os autores, trata-se de um grande desafio a calibração de trenas pois é um processo demorado, onde um técnico experiente leva aproximadamente 2 horas para a calibração de uma trena de 20m, e o processo devido as suas características particulares exige que a trena seja calibrada no máximo de metro em metro. Para tanto, os autores sugerem a calibração utilizando um microscópio digital como alternativa, para agilizar a calibração de trenas.

5.3. RESERVATÓRIO NO BLOCO DA ENGENHARIA FLORESTAL

Para o levantamento no ano de 2024, foi empregado como objeto de estudo um reservatório cilíndrico construído em concreto armado de acordo com os padrões da Norma Técnica NBR 5626 – Instalação Predial de Água Fria – 1998. Esta norma estabelece exigências e recomendações relativas ao projeto, execução e manutenção da instalação predial de água fria, como é o caso deste reservatório localizado próximo a um edifício público de educação. Sua dimensão é observada por essa normativa. Existe ainda a Norma Técnica NBR 13194 – Reservatório de Fibrocimento para água potável – Estocagem, montagem e manutenção que também trata sobre especificações de caixas d'água (reservatórios). Outra norma a ser citada é Norma Técnica NBR 6118 – Projeto de Estruturas em Concreto – Procedimento – 2004. A Norma fixa os requisitos básicos exigíveis para projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, e ainda fixa exigências mínimas para o projeto. O objeto de estudo armazena água e é utilizado para abastecimento dos prédios da Engenharia Florestal, no campus Botânico da Universidade Federal do Paraná e pode ser visto na figura 18.

Figura 18 - Reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal



Fonte: A autora (2025).

Sua localização no campus do Botânico da Universidade Federal do Paraná pode ser vista na figura 19.

Figura 19 - Localização do Reservatório de água e do Bloco de Engenharia Florestal

Localização do Reservatório de Água no Campus Jardim Botânico da Universidade Federal do Paraná



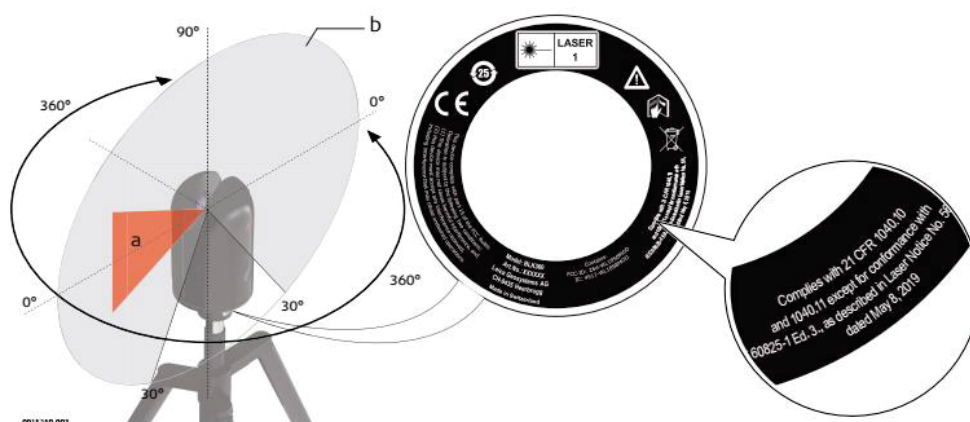
Fonte: A autora (2025).

5.4. LASER SCANNER LEICA BLK 360

O Laser Scanner Leica BLK360 é fabricado pela Leica Geosystems na Suíça, e é um equipamento de scanner de imagens a Laser, e com apenas um botão é possível operá-lo como o realizado em ambos os ensaios, com o uso de um tablete Android com o uso do aplicativo móvel Leica Cyclone Field. Após a captura, utiliza-se o software Cyclone Register 360 para a transferência dos dados e primeiros manejos. De acordo com a Norma Técnica Internacional IEC 60825-1 (2014-05) e relatório técnico IEC TR 60825-14 (2004-02), o Laser empregado neste equipamento é de classe 1, como mostra a figura 20, e ainda podemos visualizar os componentes do sistema na figura 21, e os componentes do instrumento na figura 22.

Figura 20 - Laser Scanner de Classe 1

Produto Laser Classe 1
de acordo com IEC 60825-1
(2014-05)



- a Raio laser
- b Varredura do raio laser

Fonte: Manual Técnico Leica BLK360 (2018).

Figura 21 - Componentes do sistema BLK360

Componentes do
sistema BLK360



- a Instrumento e cobertura com suporte de piso do BLK360
- b Baterias GEB212
- c Estação de carregamento GKL312
- d Fonte de alimentação CA/CC GEV192-9 para GKL312
- e Bolsa de transporte do BLK360
- f Adaptador de tripé BLK360
- g Tripé

Fonte: Manual Técnico Leica BLK360 (2018).

Componentes do Instrumento

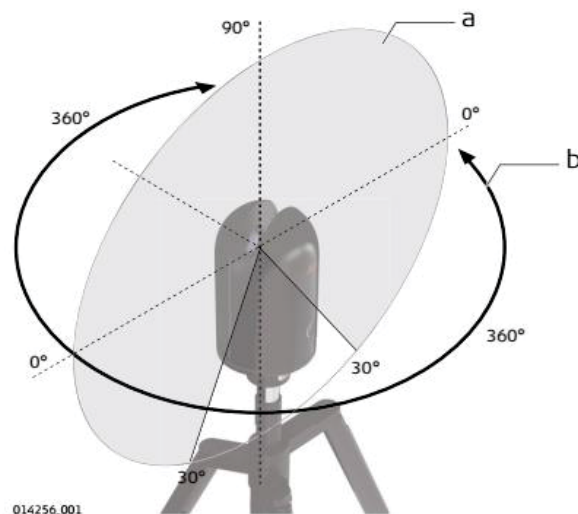


Fonte: Manual Técnico Leica BLK360 (2018).

83

Figura 23 - Campo de varredura Laser

Varredura do laser - campo de visão



- a Campo de visão vertical: 300°
- b Campo de visão horizontal: 360°

Fonte: Manual Técnico Leica BLK360 (2018).

5.5. ENSAIO NO LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO GEODÉSICA – LAIG

Nos dias 29 e 30 de Março de 2022 no Laboratório de Instrumentação Geodésica – LAIG o registro do ensaio de Método de Arqueação tradicional proposto foi efetuado em nosso objeto de estudo, acrescido do mensuração de dados após uma varredura à laser, sendo utilizada neste experimento, como simulador de um tanque vertical, uma tubulação de água DN300. Este ensaio efetuado no ano de 2022 foi posteriormente, em 2024, reutilizado para os resultados desta dissertação. Nesse capítulo será discutido a metodologia empregada, além de serem apresentados os dados obtidos em campo através do método de arqueação proposto e do levantamento por varredura à laser respectivamente.

O ensaio do método de arqueação é inteiramente baseado na Norma Técnica ISO 7507-1-1993. No ensaio utilizou-se como objeto de estudo uma tubulação de água modelo DN300, com forma aproximadamente cilíndrica,

colocado na posição vertical. Conseguiu-se aplicar os pressupostos da norma técnica, com cálculo de área de seções, para o cálculo de volume do objeto em estudo, para calcular as denominadas capacidades volumétricas.

De acordo com a Norma Técnica ISO 7507-1-1993 A metodologia de arqueação de tanques escolhida para aferição nesse ensaio foi a de nível para propósitos de trabalho, onde mensura-se a circunferência do tanque com duas aferições por curso, efetuando uma em cada um dos níveis:

- 1/5 a 1/4 acima da costura horizontal inferior;
- 1/5 a 1/4 abaixo da costura horizontal superior.

5.5.1. MÉTODO DE ARQUEAÇÃO NO ENSAIO NO LAIG

5.5.1.1. LOCAÇÃO DA SEÇÃO DE REFERÊNCIA

A primeira etapa para o desenvolvimento do método de arqueação foi a demarcação de uma seção de referência, da qual viu-se a necessidade da existência a partir da constatação de que a tubulação DN300 utilizada havia sido serrada no seu topo e estava desnivelada, apresentando-se diferente da norma padrão utilizada para sua construção. Segundo a Norma NBR7665 - Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos. Parte 1: Requisitos gerais: Home. (Comercialmente PVC Infraestrutura para água) – 1999 a tubulação DN300 deveria ter, de comprimento 5,72 metros e nosso objeto de estudo não tinha esse comprimento e era irregular.

Essa irregularidade traria consequências para o cálculo das alturas das seções implantadas no modelo. Então, para solucionar essa questão, decidiu-se implantar uma seção de referência como topo da tubulação, a qual foi devidamente horizontalizada com o auxílio de um nível geodésico digital Leica DNA03 devidamente instalado em um tripé industrial, de forma que o fio horizontal do retículo estivesse na altura que estipulou-se para essa seção.

O primeiro movimento realizado para iniciar essa etapa foi calçar a tubulação de água DN300 para que esta mantivesse verticalidade e ficasse estabilizada nesta posição. Nesta etapa a solução encontrada foi a utilização de um galão de água colocado no interior da tubulação para a sua verticalização. Então foi aceita a locação do objeto de estudo no laboratório, pois este deveria manter-se em local fixo e imóvel ao longo do experimento.

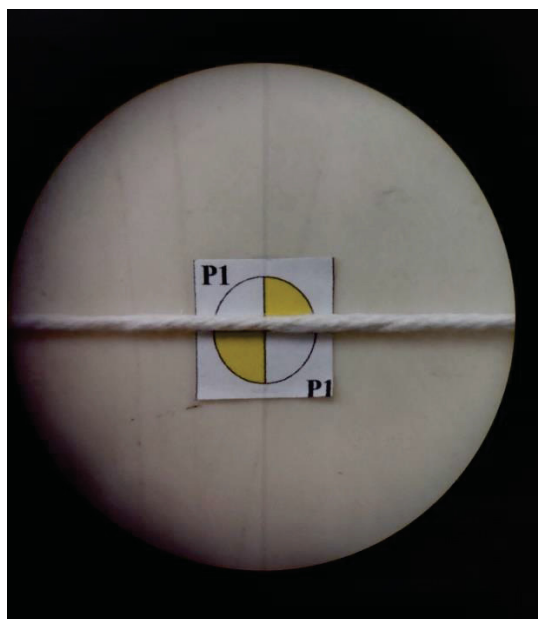
Inicialmente foram implantados 4 alvos na seção de referência, sendo eles P1, P2, P3 e P4, distribuídos de forma homogênea em torno da tubulação materializando a seção. Esses alvos estavam a 1,50 metros do chão, mensurados com trena métrica de aço. Para a implantação da seção de referência, por fim, e não apenas dos alvos, mas de uma linha que a prolongasse, utilizou-se um artifício que se movimentava com facilidade, um barbante, e com o uso do Nível Geodésico percorreu-se pouco mais da metade da tubulação envolvida pelo barbante naquela seção há 1,50 metros do chão, e horizontalizou-se e materializou-se a seção. A parte de trás do nosso objeto de estudo apenas mensurou-se sua distância do barbante até o chão de 1,50 metros e atribui-se como horizontalizado. Pode-se visualizar o procedimento através das figuras 24, 25 e 26.

Figura 24 - Seção de Referência materializada com o barbante e os alvos



Fonte: Nadal (2022).

Figura 25 - Visada no alvo ponto P1 na materialização da Seção de Referência



Fonte: Nadal (2022).

Figura 26 - Nível Geodésico Leica DNA03 instalado no tripé industrial visando a Seção de Referência implantada na tubulação DN300



Fonte: Nadal (2022).

5.5.1.2. LOCAÇÃO DOS ALVOS PARA MATERIALIZAÇÃO DAS SEÇÕES NA TUBULAÇÃO DN300

Após a implantação da seção de referência, a implantação de alvos tornou-se necessária para que as seções inferior e superior fossem implantadas. Isso foi realizado através do uso de alvos auto-colantes, desta maneira materializando as seções. Como é descrito na norma, para a metodologia escolhida para o cálculo do método de arqueação de nível para propósitos de trabalho era necessário demarcar duas seções, a 1/5 da borda inferior e superior respectivamente cada uma, sendo que o comprimento total de nossa tubulação com a seção de referência ficou determinado como 1,50 metros, então as seções (tabela 02) ficaram dispostas a:

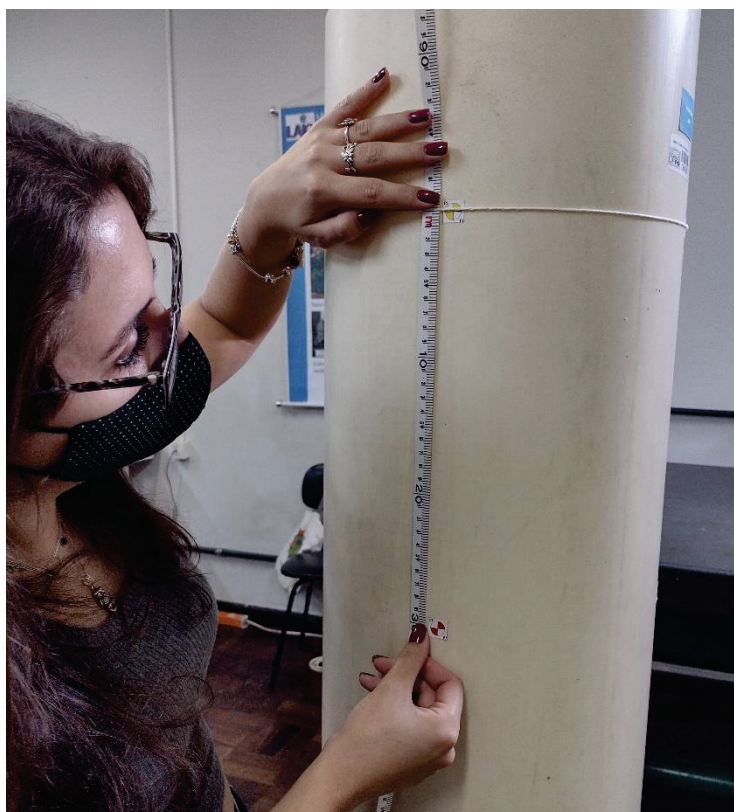
Tabela 02 - Seções na Tubulação DN300

Seção	Locação
Seção Superior	1,20 m
Seção Inferior	0,30 m

FONTE: A autora (2025).

As seções Superior e Inferior foram implantadas e referenciadas na tubulação com o uso da trena métrica de aço e trena métrica de fita de PVC para mensurar corretamente a altura dos alvos, a partir do solo, em que deveriam ser posicionados, exatamente no alinhamento dos alvos P1, P2, P3 e P4 da seção de referência, sendo implantados (figura 27), assim, respectivamente quatro alvos para materializar cada seção da mesma forma.

Figura 27 - A autora implantando a seção superior



Fonte: Nadal (2022).

5.5.1.3. MEDIÇÃO DA ESPESSURA DA TUBULAÇÃO DN300

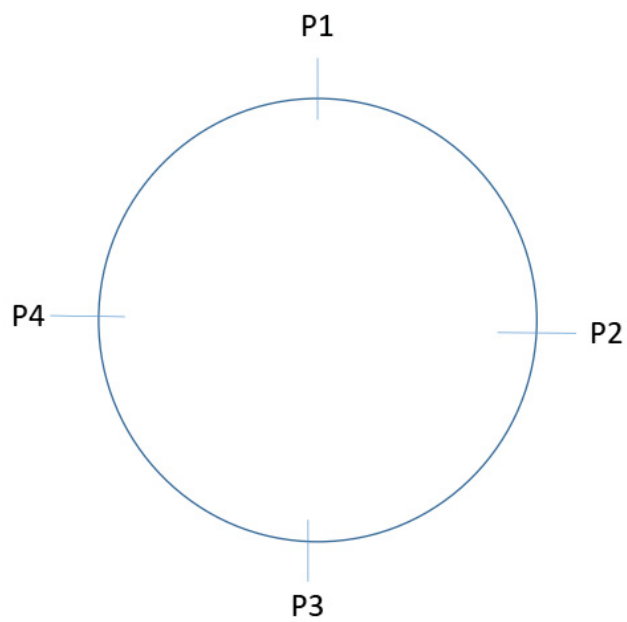
Ainda na norma, outra etapa importante é a medição da espessura do objeto, e desta forma foi realizada a mensuração da espessura com uso de um paquímetro da tubulação DN300 em quatro pontos, alinhados aos pontos P1, P2, P3 e P4 da seção de referência (figura 28), observou-se a fabricação desigual da espessura, as irregularidades (figura 29), e obteve-se os resultados da tabela 03:

Tabela 03 - Espessura da Tubulação DN300

Pontos	Espessura com Paquímetro (mm)
P1	3,60 mm
P2	4,30 mm
P3	3,35 mm
P4	2,45 mm

FONTE: A autora (2025).

Figura 28 - Localização dos Pontos onde foram mensuradas as espessuras



Fonte: A autora (2025).

Figura 29 - Discrepância e irregularidades nas espessuras na Tubulação indicadas pelas setas



Fonte: Nadal (2022).

5.5.1.4. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO DO MÉTODO DE ARQUEAÇÃO NO LAIG

Neste experimento, toda a base de sua realização provém da Norma Técnica ISO 7507-1-1993 adaptada para esse ensaio. O método de aferição recomendado pela norma escolhido para o ensaio foi a de nível para propósitos de trabalho, onde mensuramos a circunferência da tubulação DN300 em nosso ensaio em 3 cursos na Seção Superior e na Seção Inferior, utilizando dois instrumentos diferentes para a mensuração da circunferência.

A adaptação da norma ao ensaio foi necessária pela ausência de recursos idênticos aos propostos. Não foram utilizados alguns instrumentos descritos na norma que não eram necessários nesse ambiente com esse modelo menor em tamanho comparado a um tanque de petróleo. Não foi utilizada primeiramente a fita de Arqueação de aço, que necessitaria de luvas para seu manuseio, posicionadores e cordas de fita, empunhaduras *littlejohn*, balança de mola. Todos esses instrumentos puderam ser substituídos por trena de fita de PVC nesse modelo em escala diminuída. Também não foi necessário o medidor de espessura de tinta, nesse caso, pois nosso modelo não era pintado. Não foram necessários andaimes ou plataformas de trabalho, visto que nosso modelo tinha apenas 1,50 metros de comprimento.

Não foram necessários aparelhos para medição de densidade de líquido, fita de mergulho e contrapeso de mergulho, visto que o modelo não estava cheio de líquido algum, e da mesma forma não haviam espaços mortos para serem mensurados por uma régua destinada especialmente para isso.

Então, para o ensaio de método de arqueação, bastou o aparelho de medição de espessura, que no caso foi o paquímetro, a trena métrica de fita de PVC para efetuar as medições de circunferências que conferem o arqueamento de seções e o aparelho para medir temperatura, que no caso utilizamos um termômetro já presente no laboratório. Porém, o ensaio seguiu todas as exigências do procedimento de arqueação da norma, recomendações, procedimento, a relação com a repetição, seguiu a forma como a medição da circunferência deve ser efetuada, tudo isso pode ser encontrado na fundamentação teórica do presente trabalho.

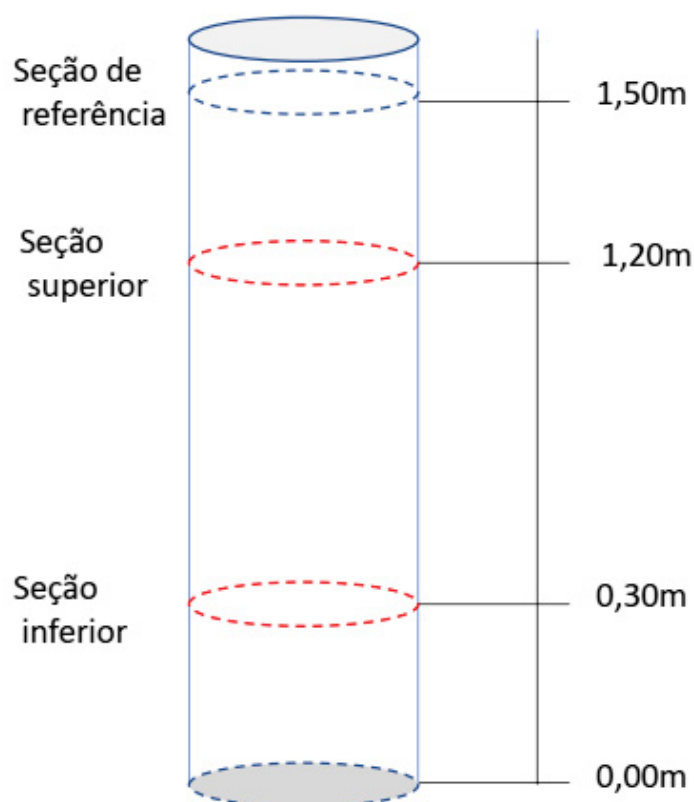
Ao início do método de arqueação verificou-se a temperatura do laboratório, que no dia 30/03/2022 era de 24,6°C.

Para a realização do ensaio utilizou-se dois instrumentos de medição da circunferência da tubulação DN300, a trena métrica de fita de PVC de 30 metros e uma fita métrica de PVC de 1,50 metros. Foram feitas 3 sequencias de observações, uma com origem fixa e outras duas com origens variáveis. Variou-se as origens, afim de eliminar-se possíveis erros de marcação nas fitas.

As resoluções dos instrumentos empregados são satisfatórias, visto que para a trena métrica de PVC a resolução é de 2mm, e a fita métrica de PVC possui a resolução de 1mm.

Na figura 30, um modelo demonstrativo das nossas seções de arqueação mensuradas na tubulação DN300.

Figura 30 - Tubulação DN300 e suas seções



Fonte: A autora (2025).

O método de arqueação consiste da mensuração das seções para posterior cálculo volumétrico, e nessa etapa da mensuração de cada curso do método posicionou-se a fita de arqueação abaixo da marcação de cada alvo que materializa as seções superior e inferior, materializando assim o curso com a fita de arqueação, tomando o devido cuidado para que essa estivesse devidamente horizontalizada, passando por cada alvo, formando um arco horizontal, envolvendo a tubulação, e fazendo-se assim a leitura da medição com cautela, voltando-se ao ponto de origem para a leitura. Era necessário mais de um operador no equipamento para essa operação se realizar com sucesso e manter a horizontalidade da fita de arqueação. As figuras 31, 32, 33 e 34 ilustram o procedimento realizado.

Figura 31 - Trena Métrica de PVC devidamente horizontalizada materializando um curso passando sobre uma seção



Fonte: Nadal (2022).

Figura 32 - Trena Métrica de PVC devidamente horizontalizada materializando um curso passando sobre uma seção



Fonte: Nadal (2022).

Figura 33 - Mensuração de um curso com o uso de Fita Métrica de PVC pelo Método de Arqueação



Fonte: Nadal (2022).

Figura 34 - Mensuração de um curso com o uso de Trena Métrica de Fita de PVC pelo Método de Arqueação



Fonte: Nadal (2022).

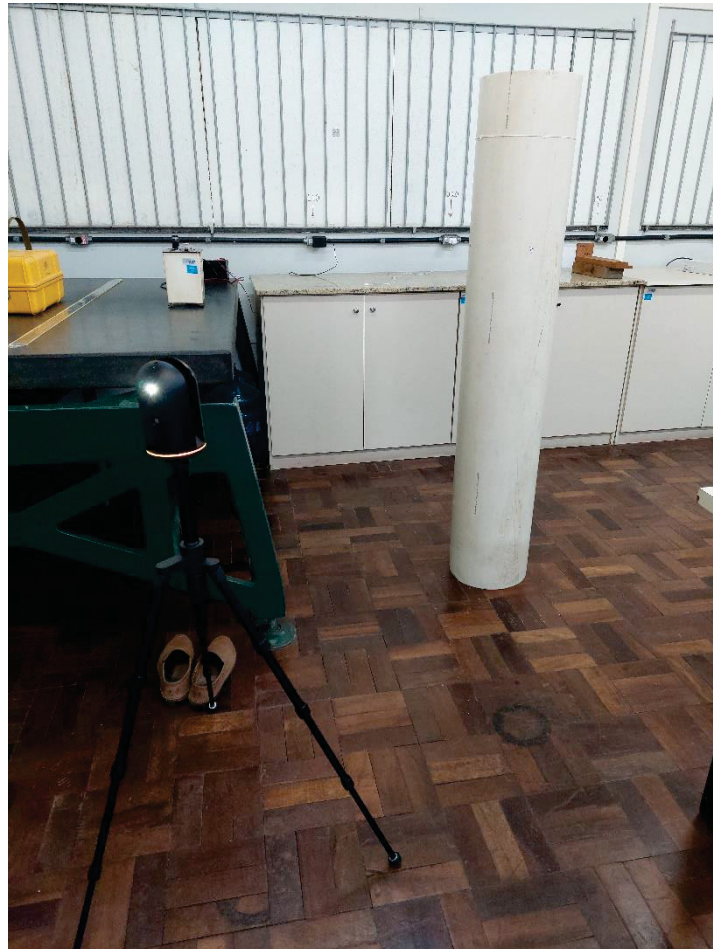
5.5.2. MÉTODO VOLUMÉTRICO UTILIZANDO O LASER SCANNER NO LAIG

Efetou-se um levantamento de varredura à laser com o equipamento da Leica BLK360 também no Ensaio do LAIG. Para isso, instalou-se o equipamento em 4 posições utilizando-se o tripé dentro do laboratório externamente a tubulação, em distância superior a mínima recomendada pelo fabricante do objeto (0,6 metros). Utilizou-se um *lpad* para operar remotamente o laser scanner e atribuir as definições, para realizar o levantamento (figura 35).

O levantamento foi executado em alta resolução e gerou 6 nuvens de pontos da tubulação. Os dados foram posteriormente, em 2024, processados no laboratório GEENG – Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia da Universidade Federal do Paraná no Software Cyclone Register 360. Em seguida utilizou-se o Software CloudCompare para realizar a modelagem, o recorte das

seções e o cálculo do volume com os dados laser, que também são apresentados neste trabalho.

Figura 35 - Laser Scanner em funcionamento (Luz acesa indicando operação)



Fonte: Nadal (2022).

5.6. ENSAIO NO RESERVATÓRIO DE ÁGUA DO BLOCO DA ENGENHARIA FLORESTAL

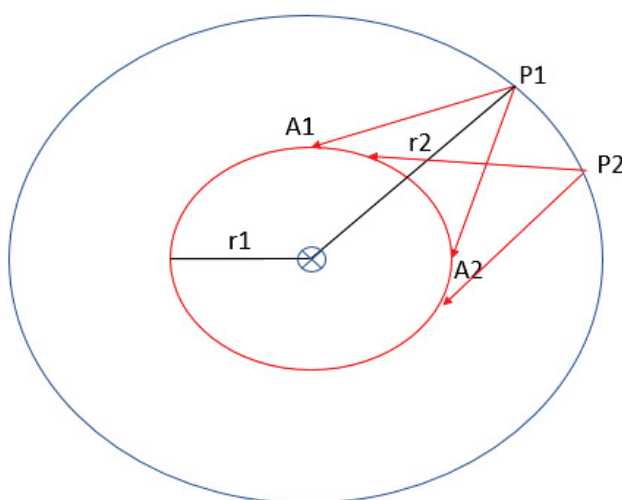
No dia 03 de setembro de 2024 realizou-se o levantamento por varredura à laser sobre o reservatório de água do bloco da Engenharia Florestal. A tecnologia Laser Scanner foi efetivada para obtenção do volume do objeto. Este objeto é o Reservatório de água, que simula um tanque vertical cilíndrico, como os descritos na Norma Técnica ISO 7507-1-1993, a qual trata do método de arqueação e calibragem de tanques cilíndricos verticais, para determinação de

capacidade de tanques de armazenagem a partir de medições de seções horizontais em forma de circunferências de um tanque em diversas alturas. Mas para contrapor o método tradicional, utilizou-se da tecnologia da varredura à laser para obtenção de resultados.

5.6.1. PLANEJAMENTO DE CAMPO

Para a realização deste ensaio foi realizado um planejamento de campo, onde definiu-se matematicamente a locação do equipamento laser scanner, utilizando-se um formulário aplicado nesta dissertação baseado na teoria dos círculos dilatados e semelhantes, onde posicionam-se as estações em círculo em torno do objeto, e o deslocamento entre as posições de cada estação estaria sobrepondo a 60% o recobrimento no objeto pela próxima estação. Então, são calculadas as distâncias entre as estações a partir da distância da primeira estação ao objeto, o raio. As estações posteriores estarão a uma mesma distância do objeto também, e todas elas estarão a uma mesma distância entre si. Formando assim uma circunferência em torno do objeto, com o mesmo raio de afastamento nas direções necessárias para esta formação, com sobreposição desejada, conforme observado na figura 36.

Figura 36 - Formação matemática para o posicionamento das estações



Fonte: A autora (2025).

Onde P_1P_2 são a distância entre as estações, e A_1A_2 são o recobrimento. Matematicamente, a partir da teoria dos círculos dilatados e semelhantes, apresenta-se o formulário empregado para a locação das estações, sendo o fator de escala k definido a partir dos raios r_1 e r_2 das circunferências conforme a figura 36.

Se o fator de escala do círculo 1 ao círculo 2 é k , então

$$r_2 = k \cdot r_1 \quad (04)$$

Logo o fator de escala k ,

$$k = \frac{r_2}{r_1} \quad (05)$$

E ainda, o comprimento de arco no círculo 1 é l_1

$$l_1 = \frac{\theta}{360} \cdot 2\pi r_1 \quad (06)$$

$$l_1 = \frac{\theta}{360} \cdot 2\pi r_2 \quad (07)$$

E a partir disto, o comprimento do arco no círculo 2 é l_2

$$l_2 = k \cdot l_1 \quad (08)$$

No caso deste estudo, precisamos do deslocamento onde,

$$l_1 = A_1A_2 \quad (09)$$

E para deslocar com 60% de recobrimento, temos então,

$$P_1P_2 = 0,4 \cdot A_1A_2 \cdot k \quad (10)$$

Definiu-se para esse ensaio uma distância de 10 metros como o raio maior levando em consideração da presença de edificações e árvores ao redor do reservatório.

A partir da informação de que o raio do cilindro a ser levantado equivale a 1,6 metros. Aplicando-se esta fórmula para o ensaio a uma distância de 10 metros (raio maior, entorno do cilindro a ser levantado) obtém-se a distância à deslocar as estações de 5,740 metros. Realizando os cálculos:

Onde r_2 equivale aos 10 metros somados a 1,6 metros para que possa ser o raio total da circunferência em torno do objeto,

$$k = \frac{11,6}{1,6} = 7,25 \quad (11)$$

Deste valor, aplicando os valores de $A1A2$ que é a sobreposição que equivale a 10 metros

$$P1P2 = 0,4 \cdot 10 \cdot 7,25 = 5,740 \text{ metros} \quad (12)$$

Logo, cada estação em círculo deveria estar a 10 metros do objeto e a 5,740 metros da próxima estação.

Obtendo essa informação, sabendo que o comprimento da maior circunferência é:

$$\text{Comprimento} = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (13)$$

$$\text{Comprimento} = 2 \cdot \pi \cdot 11,6 = 72,884 \text{ metros} \quad (14)$$

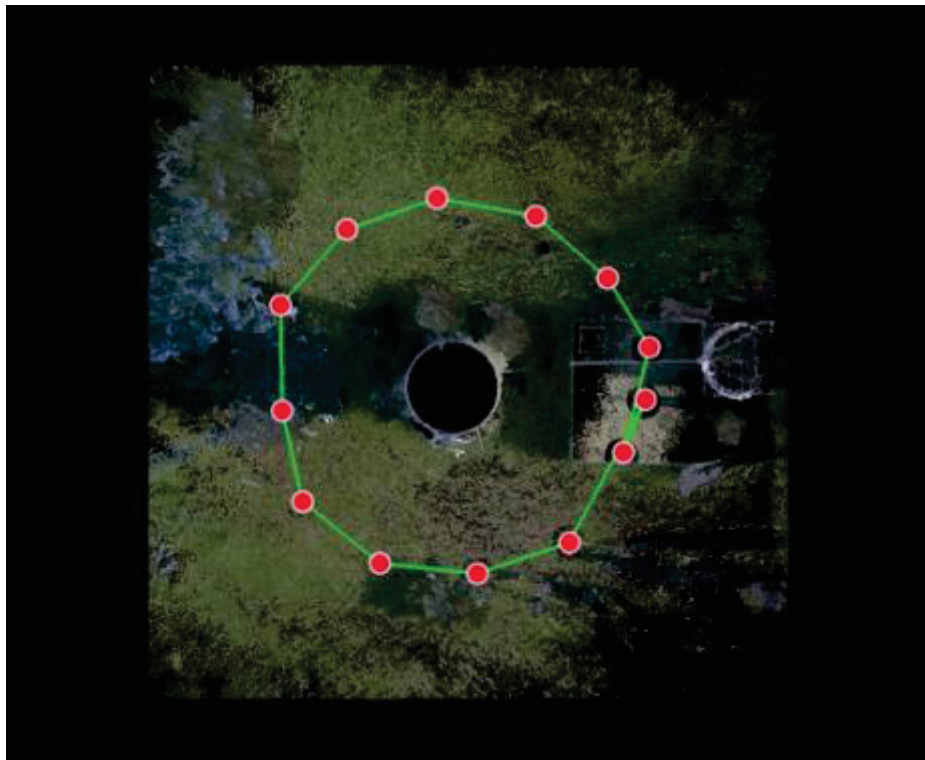
Possuindo esse valor e dividindo pelo valor da distância entre cada estação tem-se:

$$72,884 \div 5,740 = 12,69 \quad (15)$$

Logo, necessita-se de 13 posicionamentos do laser scanner a partir deste cálculo, todos a 5,740 metros entre si em uma circunferência entorno do objeto, estando cada estação a 10 metros do objeto a ser mapeado.

Na prática foram encontrados obstáculos como árvores e edificações para o posicionamento do LST conforme o planejado. Acima da edificação colocou-se as estações mais próximas entre si, e com relação a estação próxima a árvore, deslocou-se o ponto para uma distância inferior a 10 metros. A posição real das estações pós planejamento e implantação pode ser vista na figura 37.

Figura 37 - Disposição das estações no terreno pós planejamento, visto no software Leica Cyclone Register 360



Fonte: A autora (2025).

Neste levantamento foram realizadas 13 coletas de cenas entorno do objeto, garantindo a sobreposição ideal entre elas.

5.6.2. LOCAÇÃO DAS SEÇÕES E COLETA DOS DADOS

Pós planejamento, foi necessário locar as estações, e para isso utilizamos duas trenas métricas de fita de PVC com 30,00 metros. Desta forma mediu-se a distância de 10 metros ao objeto, e demarcada a primeira estação com o uso de

piquetes, e mediu-se simultaneamente a distância à segunda estação e a distância da segunda estação ao objeto, de 10 metros, para locar as estações. Esse procedimento foi feito em cada uma das estações locadas, como pode ser visualizado pós locação na figura 38.

Figura 38 - Estações Locadas em formação circular entorno do objeto (indicado por setas)



Fonte: A Autora (2025).

A seguir, a coleta de dados foi realizada a partir da instalação do Laser Scanner BLK360 em cada uma das estações, e o devido levantamento por varredura à laser realizado em cada estação. Não foram empregados alvos artificiais nesse levantamento, apenas utilizaram-se alvos naturais.

Para o levantamento utilizou-se um tablet com o software Leica Cyclone Field, onde dispunha-se das ferramentas de comando do Laser Scanner,

realizando a varredura no modo de resolução de alta densidade. Enquanto as varreduras eram efetuadas, já podia-se visualizar o resultado no tablet. Imagens das diversas etapas do levantamento podem ser vistas nas figuras 39, 40, 41 e 42.

Figura 39 - Levantamento com o Laser Scanner



Fonte: A Autora (2025).

Figura 40 - Levantamento com o Laser Scanner, vista 2



Fonte: A Autora (2025).

Figura 41 - Vista do reservatório de água e a varredura à laser em uma estação



Fonte: A Autora (2025).

Figura 42 - A estação deslocada pela presença de uma árvore



Fonte: A Autora (2025).

6. RESULTADOS E ANÁLISES

6.1. PROCESSAMENTO DE DADOS DO MÉTODO DE ARQUEAÇÃO NO ENSAIO DO LAIG

Após a metodologia de campo aplicada, obtendo-se os dados brutos do método de arqueação, foram efetuados os métodos de cálculo conforme a Norma Técnica ISO 7507-1-1993 para a tabela de capacidades, com valores sempre expressos com uma precisão de cinco figuras significativas, também conforme a normativa. Todos os cálculos foram efetuados no Software Microsoft Excel. Utilizou-se as fórmulas de área de uma circunferência, raio de uma circunferência, e volume para um cilindro.

Sendo C , o comprimento da circunferência, que é o que mensuramos, da expressão obtém-se o valor de r o raio da seção.

$$C = 2\pi r \quad (16)$$

e,

$$r = \frac{C}{2\pi} \quad (17)$$

A área da circunferência A é obtida pela expressão:

$$A = \pi r^2 \quad (18)$$

O volume é calculado pela multiplicação da altura do tanque h pelas áreas média A_m das seções:

$$V = A_m h \quad (19)$$

Foram realizados três ensaios do método de arqueação, e seus respectivos cálculos estão demonstrados a seguir. O Volume denominado Externo refere-se ao cálculo sem levar em consideração a espessura. O Volume interno levou em consideração o dado de espessura.

Foram realizados os seguintes experimentos:

6.1.1. CÁLCULOS REFERENTES A PRIMEIRA MEDIÇÃO – UTILIZANDO A TRENA MÉTRICA DE FITA DE PVC DE 30 METROS, E A ORIGEM ESTÁ FIXA.

- 1) Medida dos comprimentos das circunferências da Seção Superior, Inferior, Média e Desvio Padrão em metros (tabela 04).

Tabela 04 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 1 – Comprimentos da Circunferência

Seção	1° Curso	2° Curso	3° Curso	Média	Desvio Padrão
Superior	0,948 m	0,946 m	0,947 m	0,947 m	0,001 m
Inferior	0,946 m	0,946 m	0,946 m	0,946 m	0,000 m

FONTE: A autora (2025).

- 2) Alturas medidas das Seções (tabela 05).

Tabela 05 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 2 – Altura das seções

Seção de Referência	1,500 m
Seção Superior	1,200 m
Seção Inferior	0,300 m

FONTE: A autora (2025).

- 3) Medidas das espessuras da parede do tanque na seção de topo, média e desvio padrão em milímetros (tabelas 06 e 07).

Tabela 06 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 3 – Espessuras

Pontos	Espessura com Paquímetro
P1	3,60 mm
P2	4,30 mm

P3	3,35 mm
P4	2,45 mm

FONTE: A autora (2025).

Tabela 07 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 4 – Média e desvio padrão da espessura

Média	3,4 mm
Desvio Padrão	0,764 mm

Fonte: A autora (2025).

4) Cálculo do Volume.

a) Área da seção superior externa (tabela 08).

Tabela 08 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 5

Raio	0,1507 m
Área	0,0714 m ²

FONTE: A autora (2025).

b) Área da seção inferior externa (tabela 09).

Tabela 09 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 6

Raio	0,1506 m
Área	0,0712 m ²

FONTE: A autora (2025).

c) Área média em metros quadrados¹.

$$\text{Área média} = 0,07129 \text{ m}^2$$

¹ A Norma 7507 retrata a importância de expor os resultados com cinco figuras normativas.

d) Volume Externo Calculado em metros cúbicos.

$$\text{Volume Externo} = 0,10694 \text{ m}^3$$

e) Área da seção superior interna (tabela 10)

Tabela 10 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 7

Raio	0,1473 m
Área	0,0682 m ²

FONTE: A autora (2025).

f) Área da seção inferior interna (tabela 11).

Tabela 11 - Ensaio LAIG - Primeira Medição - Cálculos - Parte 8

Raio	0,1471m
Área	0,0680 m ²

FONTE: A autora (2025).

g) Área média da seção interna em metros quadrados.

$$\text{Área média} = 0,06808 \text{ m}^2$$

h) Volume Interno Calculado em metros cúbicos.

$$\text{Volume Interno} = 0,10213 \text{ m}^3$$

6.1.2. CÁLCULOS REFERENTES A SEGUNDA MEDIÇÃO – UTILIZANDO A FITA MÉTRICA DE PVC DE 1,50 METROS, E A ORIGEM DA LEITURA NA TRENA ESTÁ VARIÁVEL.

- 1) Medida dos comprimentos das circunferências da Seção Superior, Inferior, Média e Desvio Padrão em metros (tabela 12).

Tabela 12 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 1 – Comprimentos da circunferência

Seção	1° Curso	2° Curso	3° Curso	Média	Desvio Padrão
Superior	0,945 m	0,945 m	0,946 m	0,9453 m	0,001 m
Inferior	0,946 m	0,944 m	0,945 m	0,9450 m	0,001 m

FONTE: A autora (2025).

- 2) Alturas medidas das Seções (tabela 13).

Tabela 13 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 2 – Altura das seções

Seção de Referência	1,500 m
Seção Superior	1,200 m
Seção Inferior	0,300 m

FONTE: A autora (2025).

- 3) Medidas das espessuras da parede do tanque na seção de topo, média e desvio padrão em milímetros (tabelas 14 e 15).

Tabela 14 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 3 – Espessuras

Pontos	Espessura com Paquímetro
P1	3,60 mm
P2	4,30 mm
P3	3,35 mm
P4	2,45 mm

FONTE: A autora (2025).

Tabela 15 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 4 – Média e desvio padrão da espessura

Média	3,4 mm
Desvio Padrão	0,764 mm

FONTE: A autora (2025).

4) Cálculo do Volume.

a) Área da seção superior externa (tabela 16).

Tabela 16 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 5

Raio	0,1505 m
Área	0,0711 m ²

FONTE: A autora (2025).

b) Área da seção inferior externa (tabela 17).

Tabela 17 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 6

Raio	0,1504 m
Área	0,0711 m ²

FONTE: A autora (2025).

c) Área média em metros quadrados.

$$\text{Área média} = 0,07109 \text{ m}^2$$

d) Volume Externo Calculado em metros cúbicos.

$$\text{Volume Externo} = 0,10663 \text{ m}^3$$

e) Área da seção superior interna (tabela 18).

Tabela 18 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 7

Raio	0,1470 m
Área	0,0679 m ²

FONTE: A autora (2025).

f) Área da seção inferior interna (tabela 19).

Tabela 19 - Ensaio LAIG - Segunda Medição - Cálculos - Parte 8

Raio	0,1470m
Área	0,0679 m ²

FONTE: A autora (2025).

g) Área média da seção interna em metros quadrados.

$$\text{Área média} = 0,06788 \text{ m}^2$$

h) Volume Interno Calculado em metros cúbicos.

$$\text{Volume Interno} = 0,10183 \text{ m}^3$$

6.1.3. CÁLCULOS REFERENTES A TERCEIRA MEDIÇÃO – UTILIZANDO A TRENA MÉTRICA DE FITA DE PVC DE 30 METROS, E A ORIGEM DA LEITURA NA TRENA ESTÁ VARIÁVEL.

- 1) Medida dos comprimentos das circunferências da Seção Superior, Inferior, Média e Desvio Padrão em metros (tabela 20).

Tabela 20 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 1 – Comprimentos da circunferência

Seção	1° Curso	2° Curso	3° Curso	Média	Desvio Padrão
Superior	0,945 m	0,944 m	0,945 m	0,9447 m	0,001 m
Inferior	0,945 m	0,945 m	0,944 m	0,9447 m	0,001 m

FONTE: A autora (2025).

- 2) Alturas medidas das Seções (tabela 21).

Tabela 21 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 2 – Altura das seções

Seção de Referência	1,500 m
Seção Superior	1,200 m
Seção Inferior	0,300 m

FONTE: A autora (2025).

- 3) Medidas das espessuras da parede do tanque na seção de topo, média e desvio padrão em milímetros (tabelas 22 e 23).

Tabela 22 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 3 – Espessuras

Pontos	Espessura com Paquímetro
P1	3,60 mm
P2	4,30 mm
P3	3,35 mm
P4	2,45 mm

FONTE: A autora (2025).

Tabela 23 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 4 – Média e desvio padrão da espessura

Média	3,4 mm
Desvio Padrão	0,764 mm

FONTE: A autora (2025).

4) Cálculo do Volume.

a) Área da seção superior externa (tabela 24).

Tabela 24 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 5

Raio	0,1503 m
Área	0,0710 m ²

FONTE: A autora (2025).

b) Área da seção inferior externa (tabela 25).

Tabela 25 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 6

Raio	0,1503 m
Área	0,0710 m ²

FONTE: A autora (2025).

c) Área média em metros quadrados.

$$\text{Área média} = 0,07101 \text{ m}^2$$

d) Volume Externo Calculado em metros cúbicos.

$$\text{Volume Externo} = 0,10652 \text{ m}^3$$

e) Área da seção superior interna (tabela 26).

Tabela 26 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 7

Raio	0,1469 m
Área	0,0678 m ²

FONTE: A autora (2025).

f) Área da seção inferior interna (tabela 27).

Tabela 27 - Ensaio LAIG - Terceira Medição - Cálculos - Parte 8

Raio	0,1469m
Área	0,0678 m ²

FONTE: A autora (2025).

g) Área média da seção interna em metros quadrados.

$$\text{Área média} = 0,06781 \text{ m}^2$$

h) Volume Interno Calculado em metros cúbicos.

$$\text{Volume Interno} = 0,10172 \text{ m}^3$$

6.2. PROCESSAMENTO DE DADOS COM A METODOLOGIA DE VARREDURA À LASER

Primeiramente, os dados foram processados no laboratório GEENG – Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia da Universidade Federal do Paraná no Software Leica Cyclone Register 360. Neste software, foram transformadas as nuvem de pontos no formato .E57 para posteriormente serem manipuladas no Software CloudCompare, além disso as nuvens passaram pelo processo de registro e foram referenciadas no sistema de referência local. Ainda no software da Leica, os resultados do erros nos registros das nuvens e do ajustamento interno são apresentados a seguir para ambos os ensaios.

As nuvens são registradas em pares, criando-se os chamados registros. A sobreposição entre as nuvens e os erros médios no processo de registro são apresentados nas tabelas 28 e 29.

O erro no ajustamento realizado pelo programa no Ensaio do LAIG foi de 4mm.

1) Erros nos registros entre as nuvens no Ensaio do LAIG (tabela 28).

Tabela 28 - Erros nos Registros - Ensaio no LAIG

Registro	Sobreposição	Erro médio
1	76%	0,004 m
2	75%	0,005 m
3	80%	0,004 m
4	75%	0,004 m
5	76%	0,005 m
6	82%	0,005 m
7	91%	0,004 m

FONTE: A autora (2025).

O erro no ajustamento realizado pelo programa no Ensaio do reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal foi de 6mm.

2) Erros nos registros entre as nuvens no Ensaio no reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal (tabela 29).

Tabela 29 - Erros nos Registros - Ensaio no reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal

Registro	Sobreposição	Erro médio
1	42%	0,007 m
2	63%	0,005 m
3	58%	0,005 m
4	66%	0,004 m
5	70%	0,004 m
6	29%	0,008 m
7	67%	0,005 m
8	67%	0,006 m
9	66%	0,006 m
10	65%	0,007 m
11	49%	0,007 m
12	50%	0,007 m
13	69%	0,007 m

FONTE: A autora (2025).

Após esta etapa, já possuindo as nuvens de pontos referenciadas e no formato .E57, ambos os ensaios foram processados pelo Software CloudCompare, nos meses de agosto e setembro de 2024.

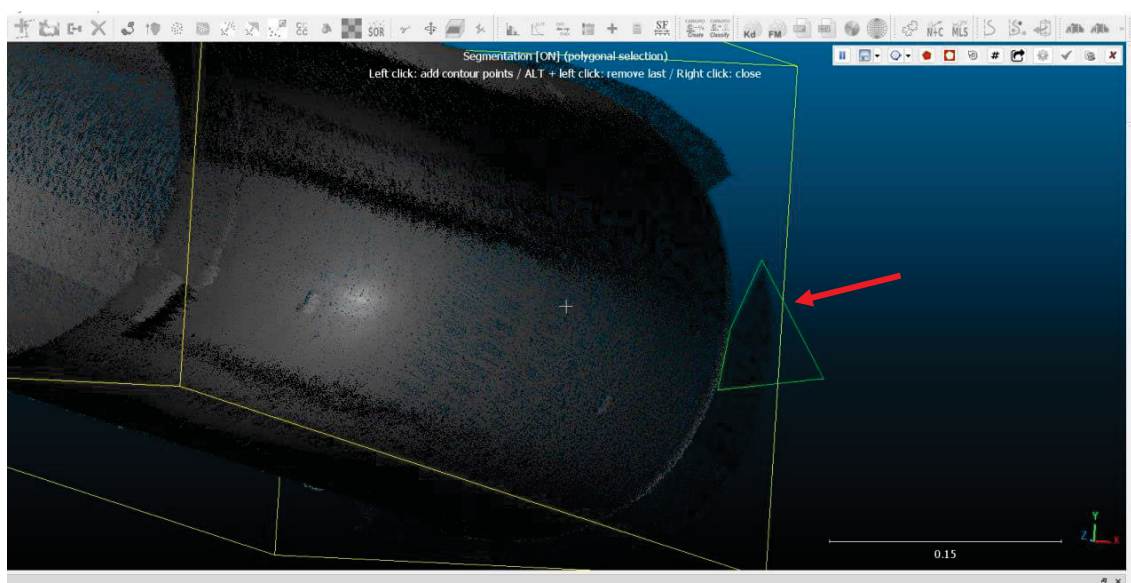
O processamento teve o objetivo de segmentar e filtrar as nuvens de pontos para que os métodos de análises volumétricas com o uso da varredura à laser pudessem ser implementados.

6.2.1. PROCESSAMENTO DA SEGMENTAÇÃO E FILTRAGEM

Para a etapa de processamento foi necessária uma máquina com 32GB de RAM, SSD e 400 Gb para armazenamento das nuvens. As nuvens brutas dos ensaios tinham quase 7 milhões de pontos no Ensaio do LAIG e quase 98 milhões de pontos no Ensaio do Reservatório.

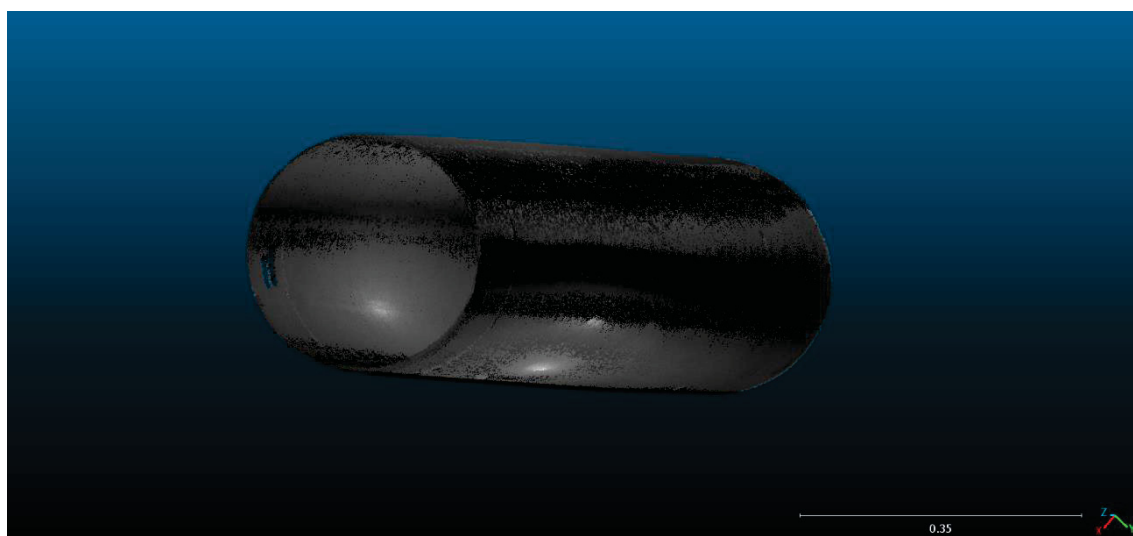
No software CloudCompare, a primeira etapa realizada foi a segmentação manual dos cilindros, excluindo-se toda a cena ao redor do objeto e ruídos mais destacados no entorno dos cilindros, como móveis no caso do LAIG e árvores no caso do reservatório de água, isso é retirar-se os pontos não necessários ao processamento. Nas figuras 43, 44 e 45 podemos visualizar a limpeza nos segmentos sendo realizada manualmente. A ferramenta utilizada nessa etapa foi a *Segment* para a retirada desses itens. A ferramenta *Segment*, presente no software CloudCompare, é uma funcionalidade projetada para realizar a segmentação de nuvens de pontos. Essa segmentação consiste na divisão da nuvem de pontos em regiões de interesse, permitindo a análise e o processamento de partes específicas da geometria 3D, dessa forma apenas os cilindros permaneceram na cena.

Figura 43 - Realizando a segmentação manual na tubulação DN300 do ensaio do LAIG utilizando a ferramenta segment. A seta indica um conjunto de pontos removido



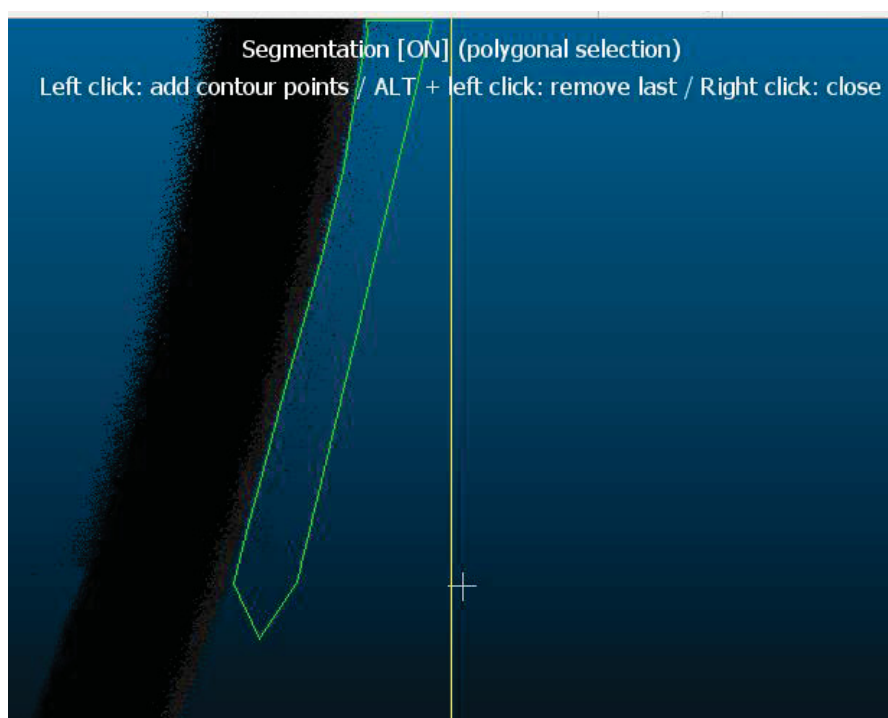
Fonte: A autora (2025).

Figura 44 - Resultado da segmentação manual na tubulação DN300



Fonte: A autora (2025).

Figura 45 – Segmentação manual no reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal utilizando a ferramenta segment

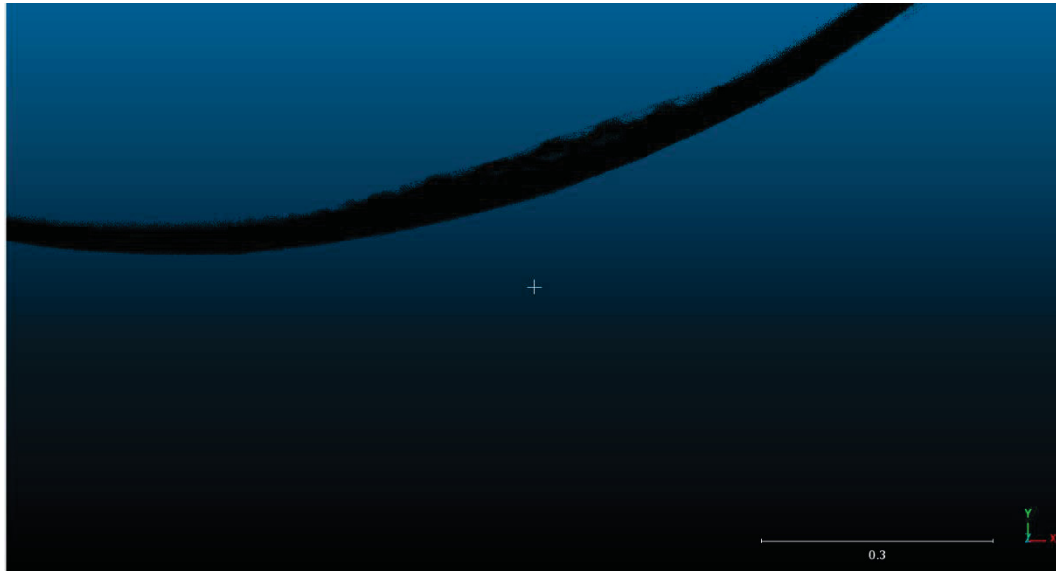


Fonte: A autora (2025).

No Reservatório de água, como não tratava-se de um ensaio confinado em laboratório como foi o caso da tubulação DN300, e sim de uma estrutura de concreto, encontrou-se maiores desafios para a segmentação. Presença de árvores, de uma escada e até de uma porta. O elemento porta sendo eliminado

pode ser visto na figura 46. Esse elemento, assim como os demais, foram eliminados nessa etapa.

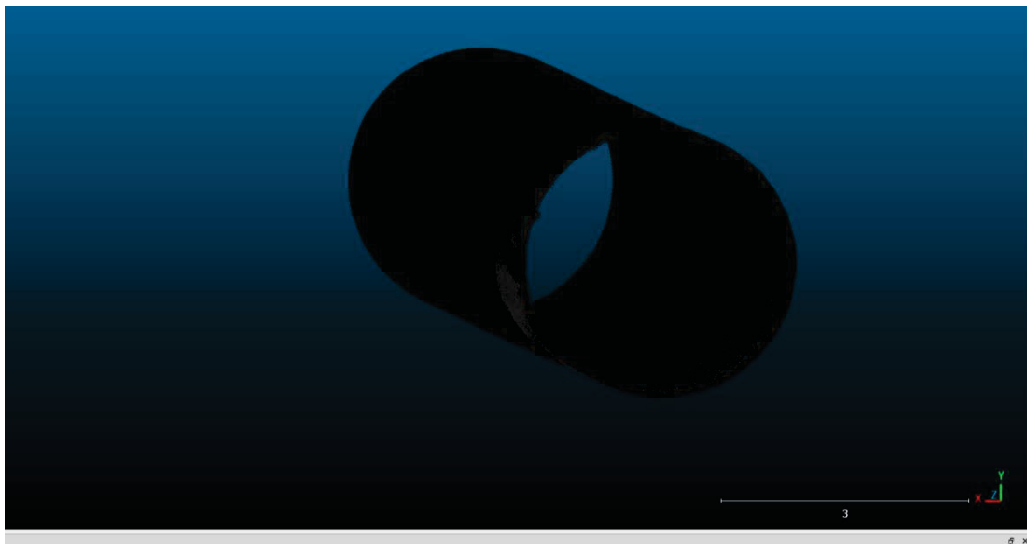
Figura 46 - Presença da porta no reservatório de água, posteriormente filtrada



Fonte: A autora (2025).

Pode-se visualizar o resultado final da segmentação do reservatório na figura 47.

Figura 47 - Resultado da segmentação manual no reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal



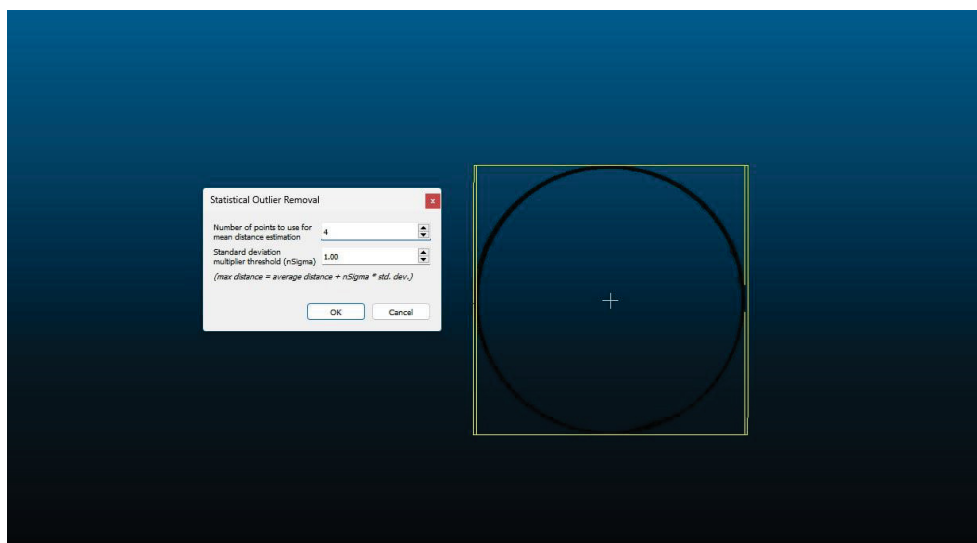
Fonte: A autora (2025).

Após a etapa da segmentação manual, foram realizadas filtragens automáticas em ambos os objetos de estudo, de forma a eliminar pontos espúrios na superfície dos mesmos. A filtragem automática foi realizada pela

ferramenta *Statistical Outlier Removal* – SOR, que é uma ferramenta essencial para a limpeza de nuvens de pontos. Esta ferramenta remove pontos que são considerados *outliers* estatísticos, ou seja, pontos que se desviam significativamente da distribuição dos demais pontos na nuvem. A remoção de ruídos pela SOR é excelente nesse caso, e retira ruídos causados por sensores, reflexões ou outros objetos presentes na cena.

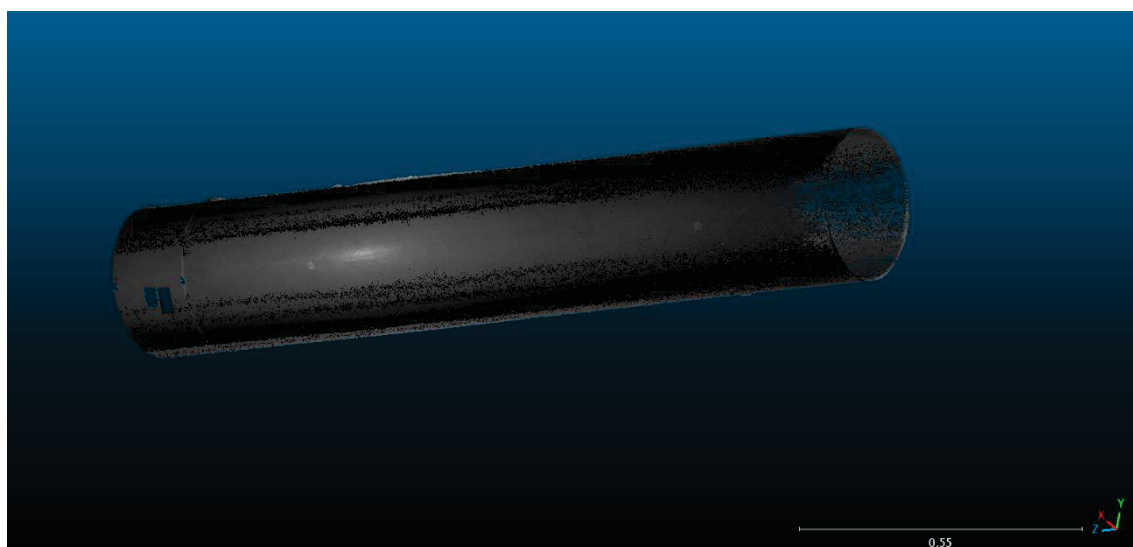
Essa ferramenta utiliza a distância média e o desvio padrão entre cada ponto e seus vizinhos mais próximos, delimitando um limite máximo de distância com base nesses valores, e qualquer ponto que exceda esse limite é considerado outlier e removido da nuvem. Em ambos os objetos utilizou-se para esse processamento a medida de distância entre os valores de 4 pontos medidos na superfície para a distância e 1 para o desvio padrão. Na figura 48 é apresentada a ferramenta, e nas figuras 49 e 50 o resultado dessa filtragem.

Figura 48 - A ferramenta SOR no CloudCompare



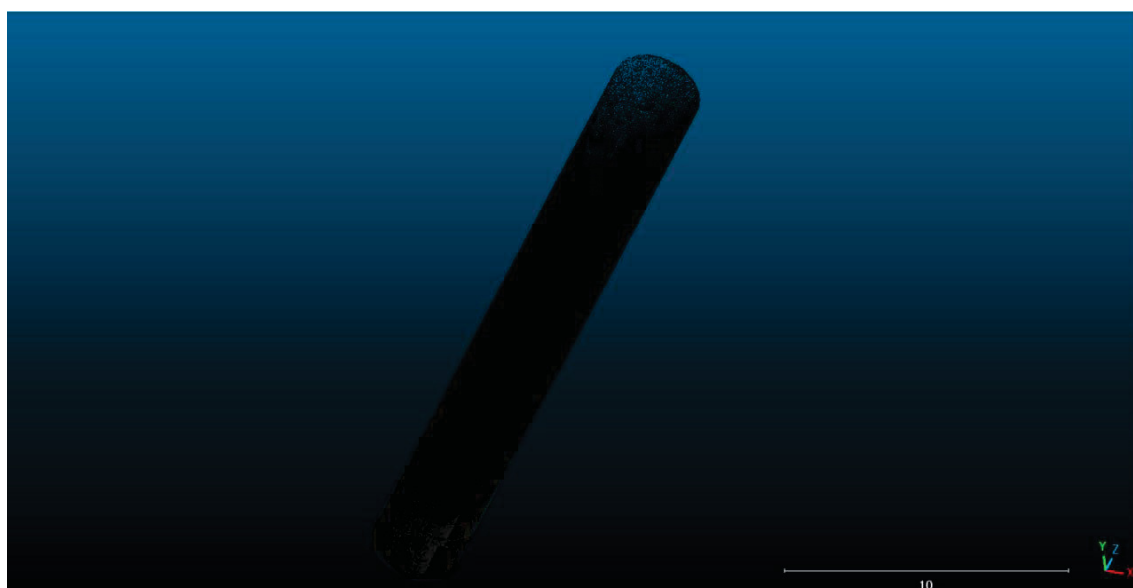
Fonte: A autora (2025).

Figura 49 - Resultado da filtragem automática na tubulação DN300 no Ensaio do LAIG



Fonte: A autora (2025).

Figura 50 - Resultado da filtragem automática no reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal



Fonte: A autora (2025).

A menor quantidade de pontos presentes no topo da estrutura do reservatório de água após a filtragem automática deve-se ao fenômeno da diminuição da densidade de pontos em varreduras à laser terrestre conforme a altura dos objetos. Esse é um fenômeno de combinação de fatores físicos e

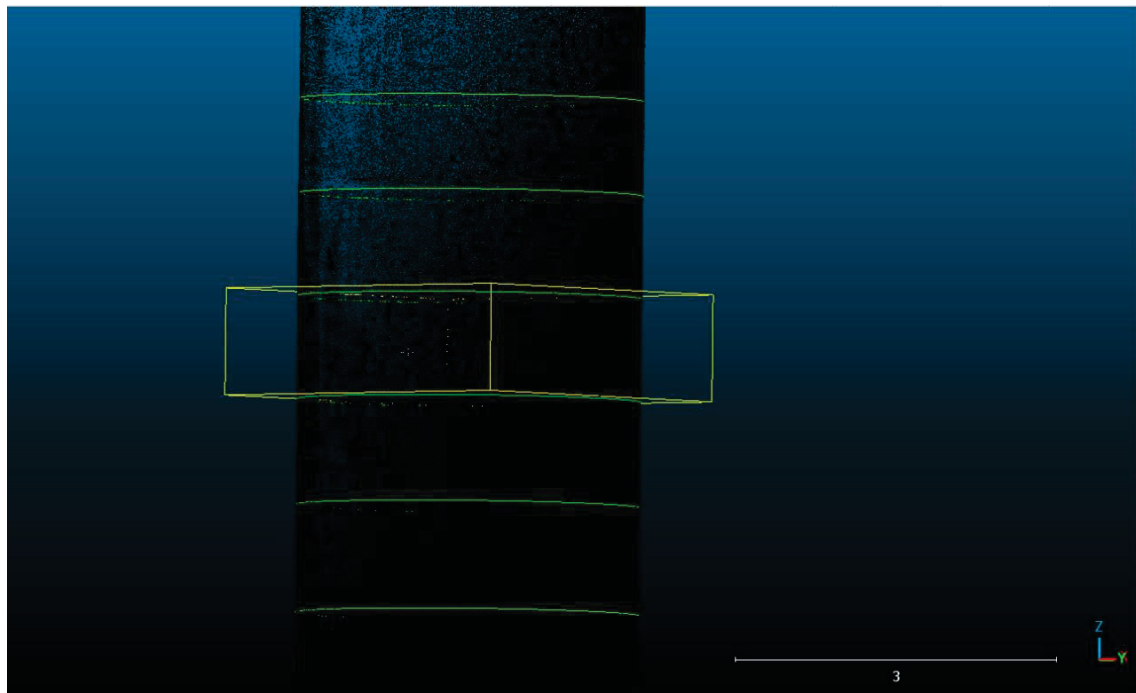
geométricos inerentes ao processo de aquisição de dados. A divergência do feixe laser faz com que o feixe se expanda à medida que se afasta da fonte, então quanto maior a distância entre o laser scanner e o objeto, maior a área que cada feixe irá iluminar, resultando então em uma menor densidade de pontos sob a superfície do objeto. A resolução angular do laser scanner determina o tamanho do feixe laser e a distância mínima entre dois pontos adjacentes. Um laser scanner de menor resolução tende a gerar nuvens com menor densidade, e essa densidade diminui com o afastamento do objeto ao laser scanner, como é o fato observado da maior distância entre o topo do reservatório comparado à sua base.

6.2.2. PROCESSAMENTO DAS SEÇÕES

Para a estruturação do método e a retirada do valor de volume dos objetos, fez-se necessário distribuir de seções nos objetos de estudo, para através delas, como no método de arqueação tradicional, pudesse-se obter áreas para multiplicar com a altura e obter-se o volume. Mas o início dessa metodologia dá-se pela definição de seções nos objetos, e para isso utilizou-se a ferramenta *Cross-section* no software CloudCompare. Cross Section é uma funcionalidade para a análise detalhada de nuvens de pontos. Essa ferramenta cria cortes transversais da nuvem, gerando uma visão em 2D de uma seção específica da sua geometria 3D. Através das seções obtidas nos cilindros em estudo, aplicando-se este dado ao método podemos obter o volume.

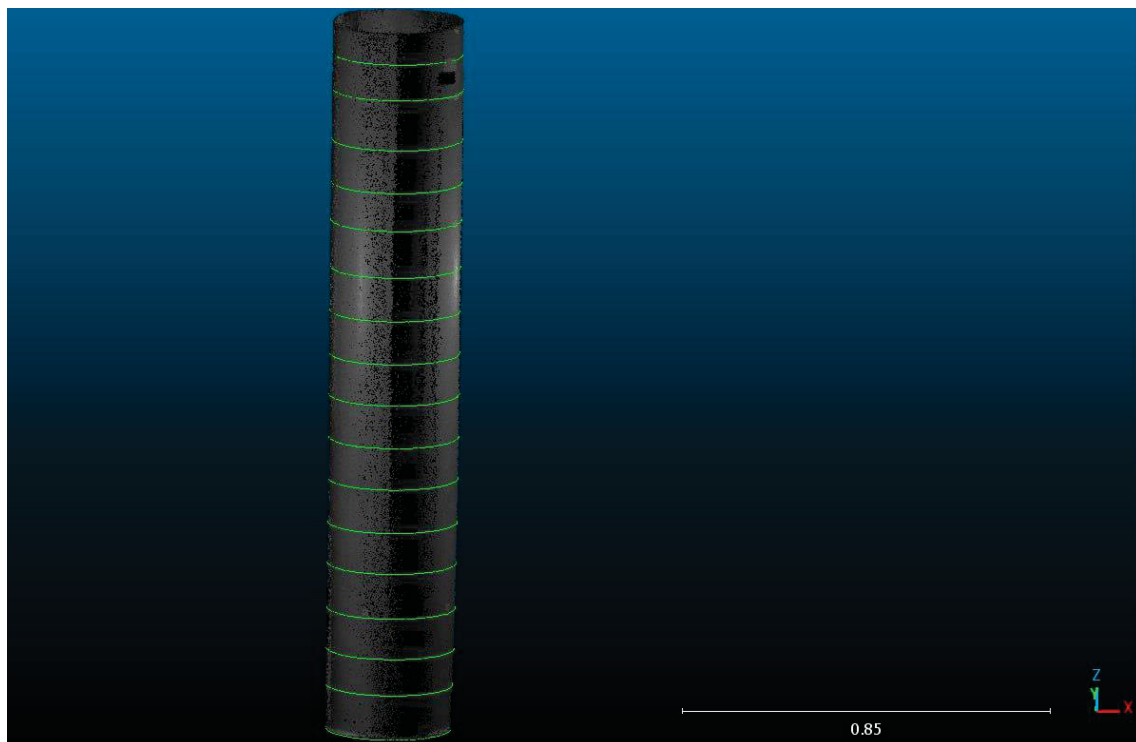
Com o uso dessa ferramenta, decidiu-se por obter uma seção a cada 1 metro da estrutura da nuvem de pontos do reservatório de água. Já no caso do processamento da nuvem do ensaio no LAIG optou-se por obter seções a cada 0,10 metros considerando que esta estrutura é muito menor. Nas figuras 51 e 52 podemos visualizar esse processo.

Figura 51 - Seções de 1 em 1 metro no reservatório de água



Fonte: A autora (2025).

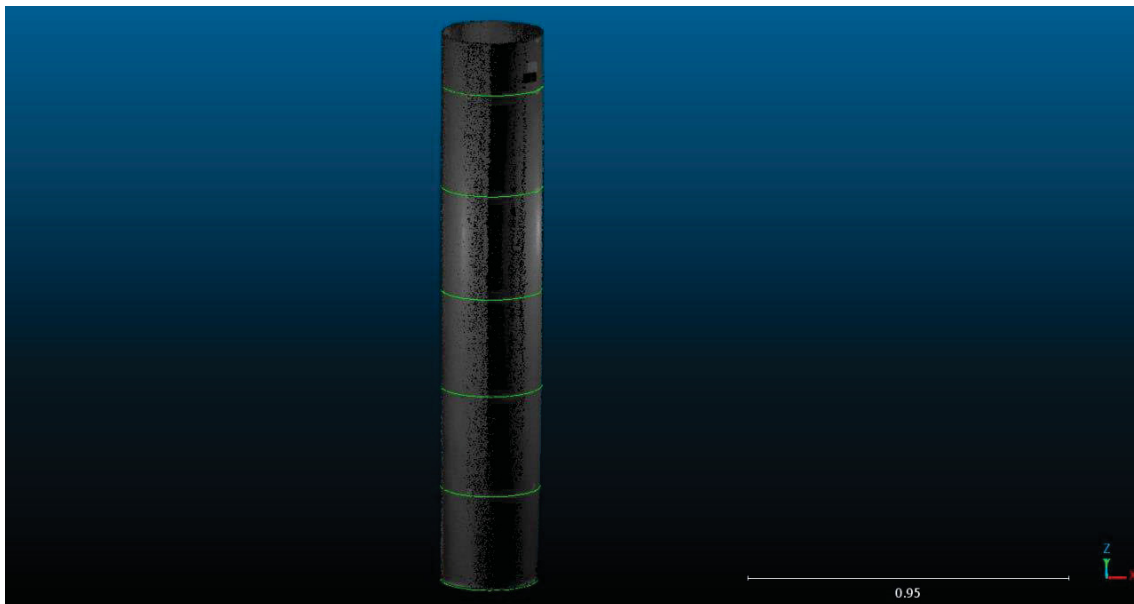
Figura 52 - Seções de 0,10 em 0,10 metros na tubulação DN300



Fonte: A autora (2025).

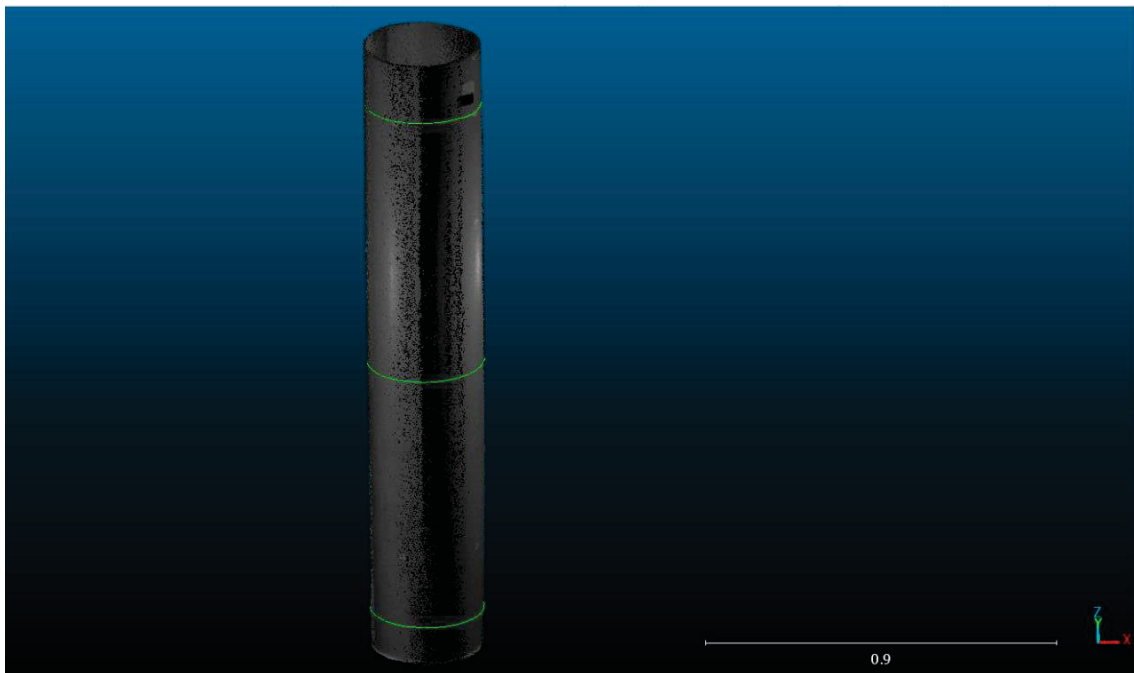
Após a obtenção dessas seções, filtrou-se apenas as seções de interesse para os cálculos. No ensaio do LAIG primeiro foram selecionadas 6 seções para os cálculos (figura 53), após isso selecionou-se outras 3 seções para comparar os resultados (figura 54). Em ambos os casos, a seção de referência, que foi determinada por um barbante para o ensaio do método de arqueação está materializada como a última seção ao topo. Isso quer dizer que os cálculos volumétricos, assim como no método de arqueação, levaram em consideração a seção de referência como o final da tubulação.

Figura 53 - Tubulação DN300 com 6 seções



Fonte: A autora (2025).

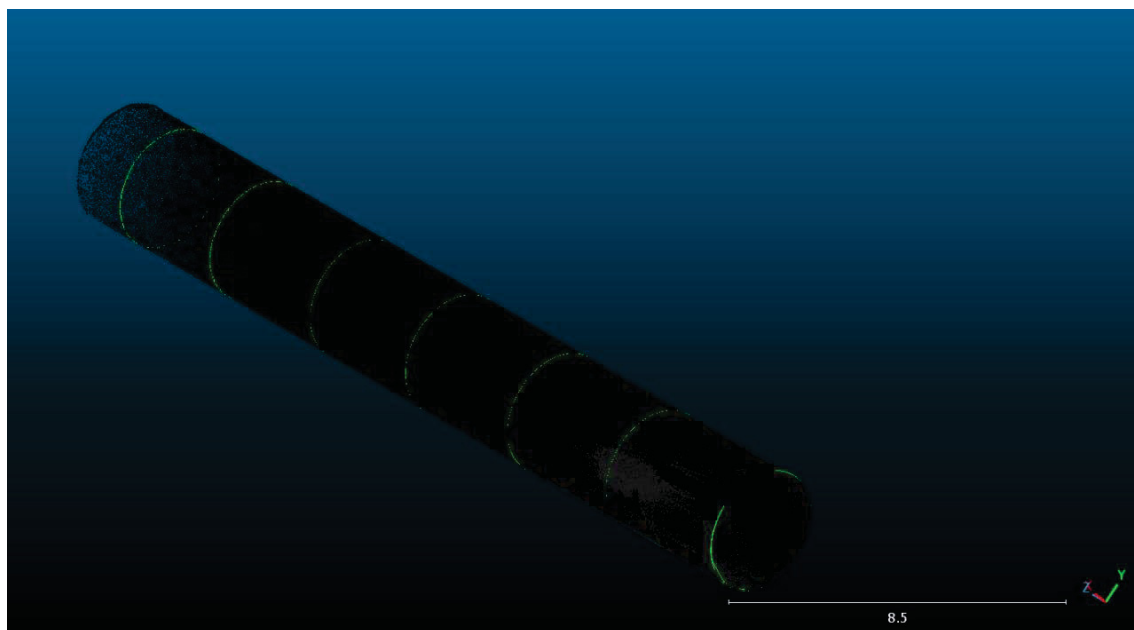
Figura 54 - Tubulação DN300 com 3 seções



Fonte: A autora (2025).

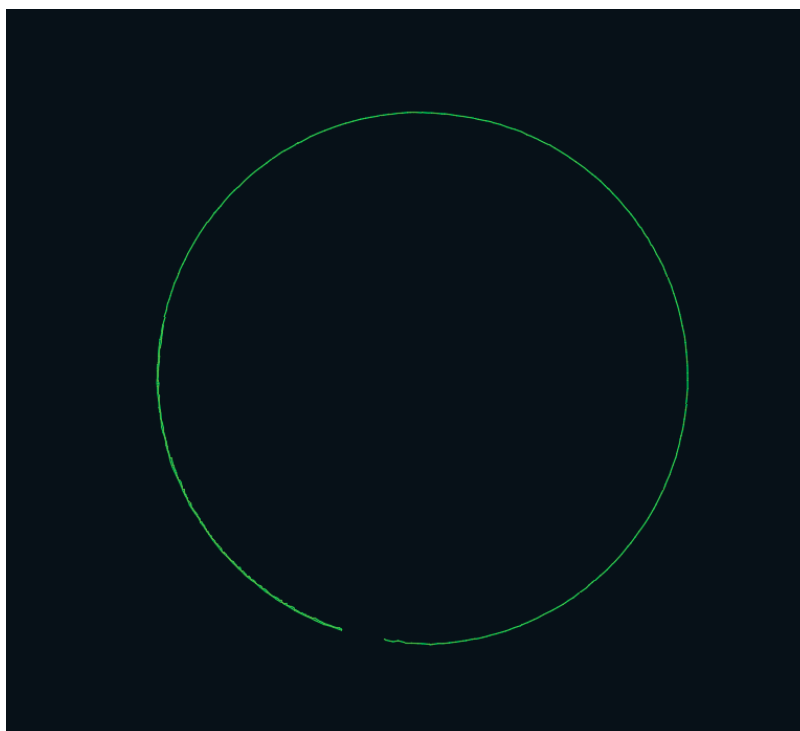
Já o caso do reservatório de água, foram selecionadas 7 seções, que podem ser vistas na figura 55, e após isso, destas seções, apenas 4 estavam completas na análise realizada no Software AutoCAD para a confecção dos cálculos. As incompletas não permitiam a obtenção da área. As seções no software AutoCAD podem ser vistas nas figuras 56, 57 e 58.

Figura 55 - Vista das 07 seções definidas e selecionadas no reservatório de água



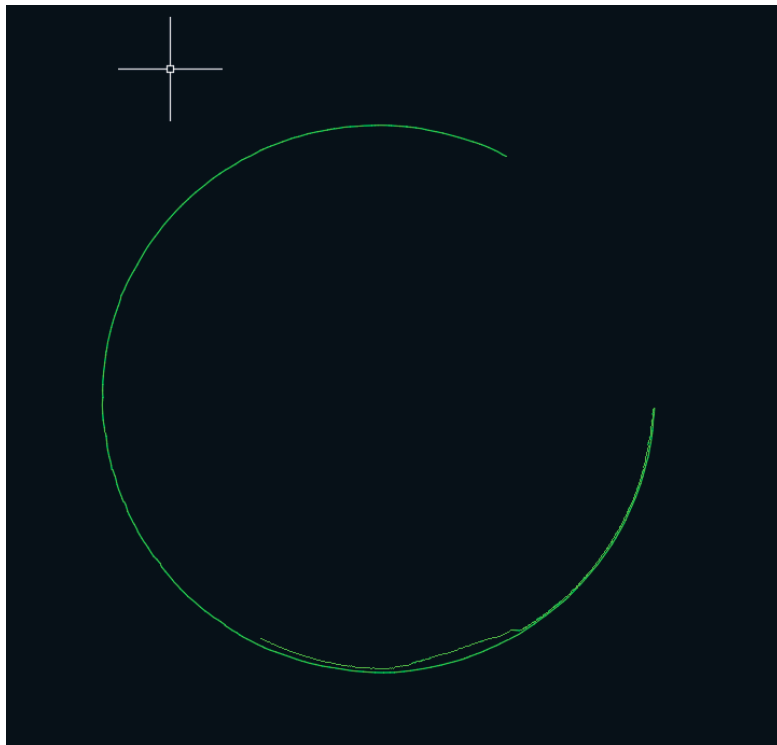
Fonte: A autora (2025).

Figura 56 - Vista da seção 06 incompleta no software AutoCAD



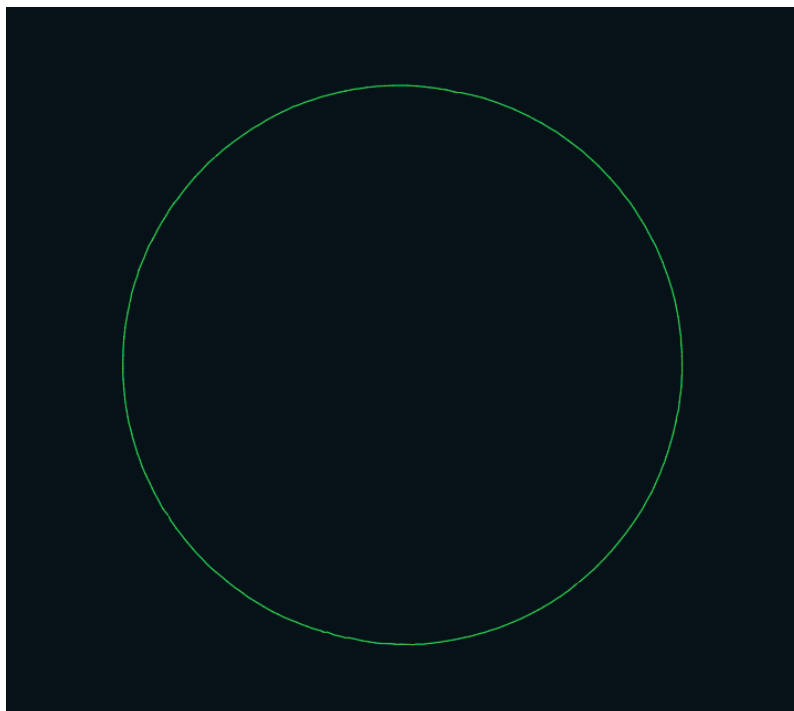
Fonte: A autora (2025).

Figura 57 - Vista da seção 01 incompleta no software AutoCAD



Fonte: A autora (2025).

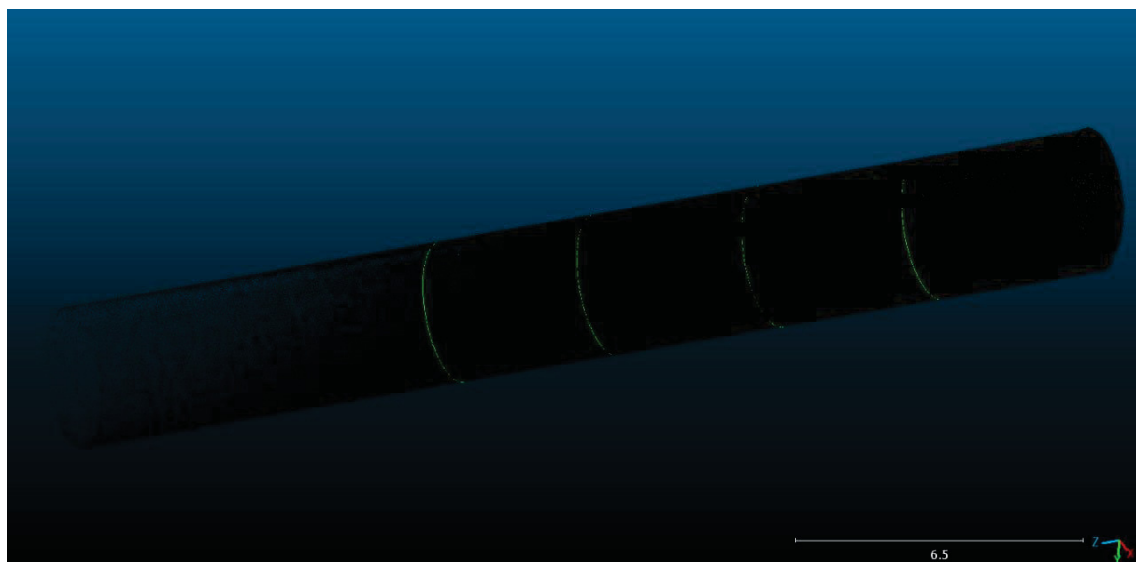
Figura 58 - Vista da seção 04 completa no software AutoCAD



Fonte: A autora (2025).

As seções aparecem incompletas pois são formadas pelos pontos contidos no plano de corte da seção. Nesse caso, não haviam pontos onde o plano de corte intersectou a nuvem de pontos. Dessa forma, apenas 4 seções foram consideradas para os cálculos no ensaio do reservatório de água, que podem ser vistas na figura 59. Na imagem, pode-se ver também a densidade menor de pontos na área onde não foi possível obter-se seção completa. Esse problema só foi relatado neste ensaio, que não foi realizado em ambiente laboratorial, e sim com condições ambientais comuns para a realização do método. Pode-se utilizar para os cálculos apenas as seções completas e descartar as incompletas quando houver.

Figura 59 - Vista das seções consideradas para o cálculo volumétrico no reservatório de água

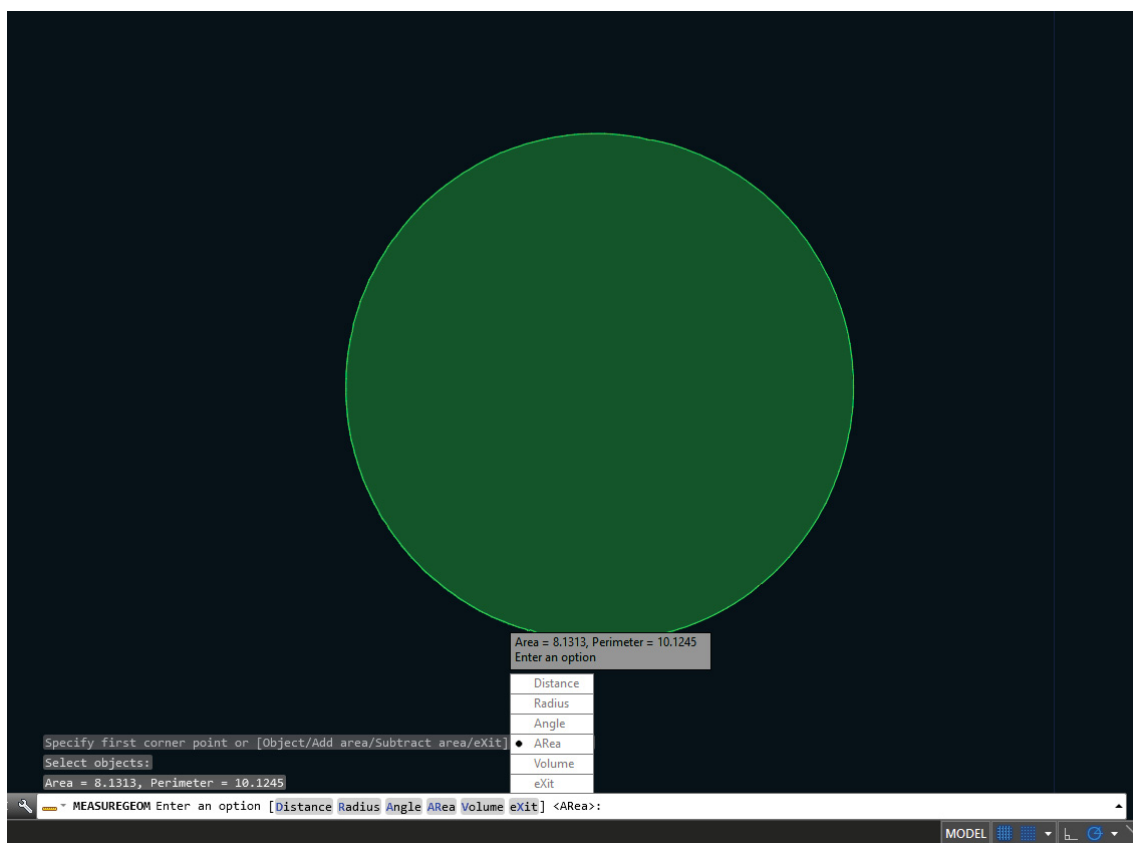


Fonte: A autora (2025).

Em ambos os ensaios, no software CloudCompare, as seções foram salvas no formato .dxf para posteriormente serem manipuladas no software AutoCAD.

No software AutoCAD as seções de ambos os ensaios foram observadas e pode-se obter a área interna a seção através da ferramenta *Measure* – área, onde obtêm-se a área de um objeto como é demonstrado na figura 60.

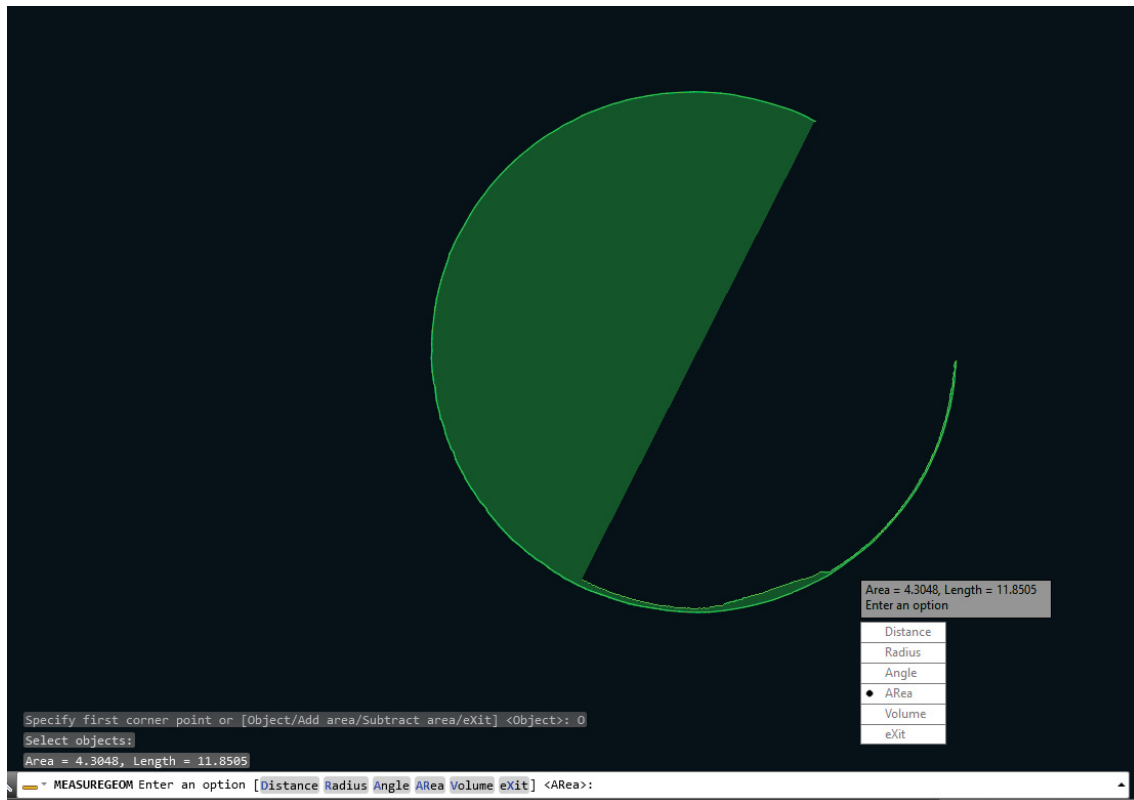
Figura 60 - Obtenção da área da seção 04 do reservatório de água com o uso do software AutoCAD



Fonte: A autora (2025).

As seções que foram excluídas do ensaio do reservatório de água não conseguiam apresentar a área completa, pelo fato de estarem com seu perímetro incompleto, e no software AutoCAD não foi possível realizar esta análise como pode ser visto na figura 61.

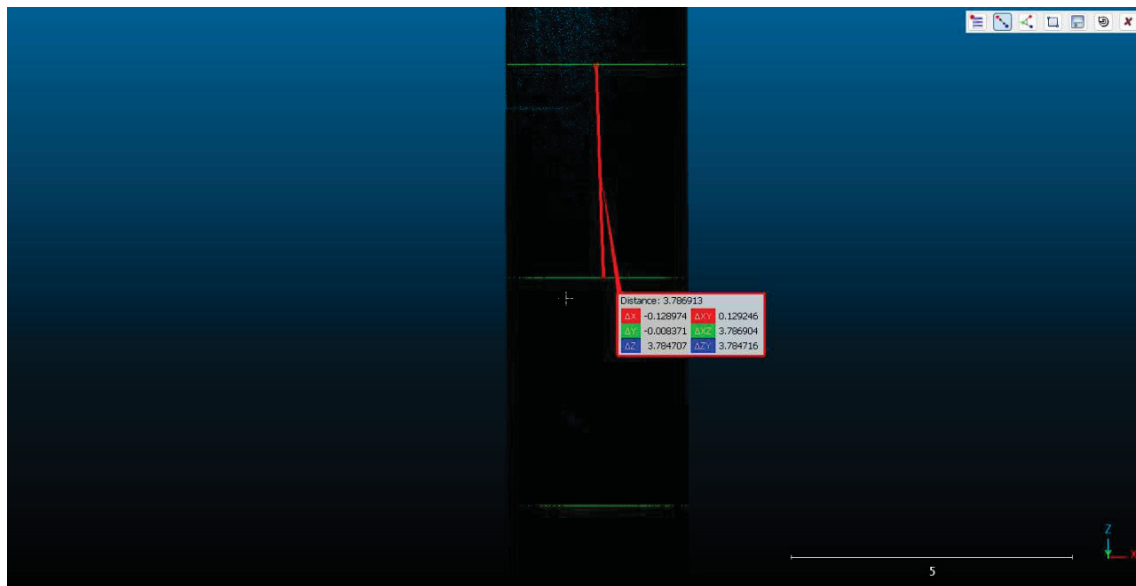
Figura 61 - Tentativa de obter-se a área em seção 01 do reservatório de água, que estava com o perímetro incompleto



Fonte: A autora (2025).

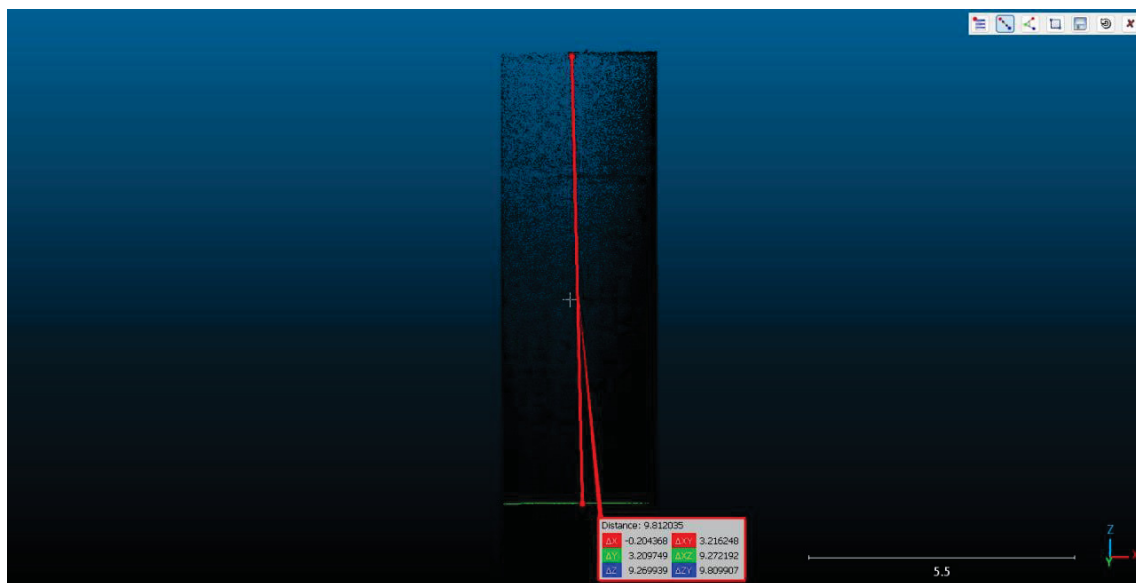
Obtidas as áreas das seções, procedeu-se com a obtenção da distância entre as seções, no software CloudCompare, com o uso da ferramenta Point Picking, selecionando-se dois pontos sobre diferentes seções para obter-se a distância entre eles como é mostrado na figura 62. Dessa maneira, obteve-se a distância também das seções às bordas finais superiores e inferiores dos objetos, mesmo que não estejam estes caracterizados por seções, como é o caso da borda superior do reservatório de água, que pode ser visualizado na figura 63.

Figura 62 - Distância entre seções no software CloudCompare



Fonte: A autora (2025).

Figura 63 - Distância entre seção à borda no software CloudCompare



Fonte: A autora (2025).

6.2.3. PROCESSAMENTO DOS CÁLCULOS DA METODOLOGIA DE VOLUMETRIA COM VARREDURA À LASER COM O USO DE SEÇÕES

Com os valores das áreas das seções e os valores das distâncias entre seções ou bordas tornou-se possível o cálculo do volume dos objetos. O cálculo do volume, nesse caso da metodologia de varredura à laser utilizou os mesmos princípios e fórmulas que o método de arqueação tradicional, empregando-se a área da seção multiplicada pela distância como pode ser visto na equação a seguir.

O volume é calculado pelo somatório da multiplicação das alturas (distâncias) dos objetos (h) pelas suas respectivas áreas de seção (A):

$$V = \sum A \cdot h \quad (20)$$

6.2.3.1. CÁLCULO VOLUMÉTRICO ENSAIO DO LAIG

No ensaio do LAIG na tubulação DN300 realizou-se dois cálculos para o volume, um contendo 3 seções apenas, que pode ser visualizado na tabela 30, e o outro contendo 5 seções, que está na tabela 31. As últimas seções de ambos os experimentos que se referem a seção de referência utilizada pelo método de arqueação

Tabela 30 - Cálculo do volume – Ensaio do LAIG com 3 seções.

Seções	Área da seção	Distância entre seções	Área X Distância
1	0,0690 m ²	0,10383 m	0,00716 m ³
2	0,0701 m ²	0,68057 m	0,04770 m ³
3	0,0717 m ²	0,71837 m	0,05150 m ³

FONTE: A autora (2025).

Volume Externo: 0,10637 m³

Tabela 31 - Cálculo do volume – Ensaio do LAIG com 5 seções.

Seções	Área da seção	Distância entre seções	Área X Distância
1	0,0699 m ²	0,2823 m	0,01973 m ³
2	0,0701 m ²	0,3020 m	0,02117m ³
3	0,0700m ²	0,2962 m	0,02073m ³
4	0,0703 m ²	0,3128 m	0,02198 m ³
5	0,0707 m ²	0,3088 m	0,02183 m ³

FONTE: A autora (2025).

Volume Externo: 0,10545 m³

6.2.3.2. CÁLCULO VOLUMÉTRICO ENSAIO DO RESERVATÓRIO DE ÁGUA

No ensaio do Reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal os cálculos foram realizados apenas com 4 seções e podem ser observados na tabela 32.

Tabela 32 - Cálculo do volume – Ensaio do Reservatório de água com 4 seções.

Seções	Área da seção	Distância entre seções	Área X Distância
1	8,1760 m ²	8,076 m	66,02937 m ³
2	8,1673 m ²	4,060 m	33,15923 m ³
3	8,1478 m ²	3,773 m	30,74164 m ³
4	8,1313 m ²	9,262 m	75,31210 m ³

FONTE: A autora (2025).

Volume Externo: 205,24236 m³

6.2.4. PROCESSAMENTO COM O USO DO ALGORITMO RANSAC

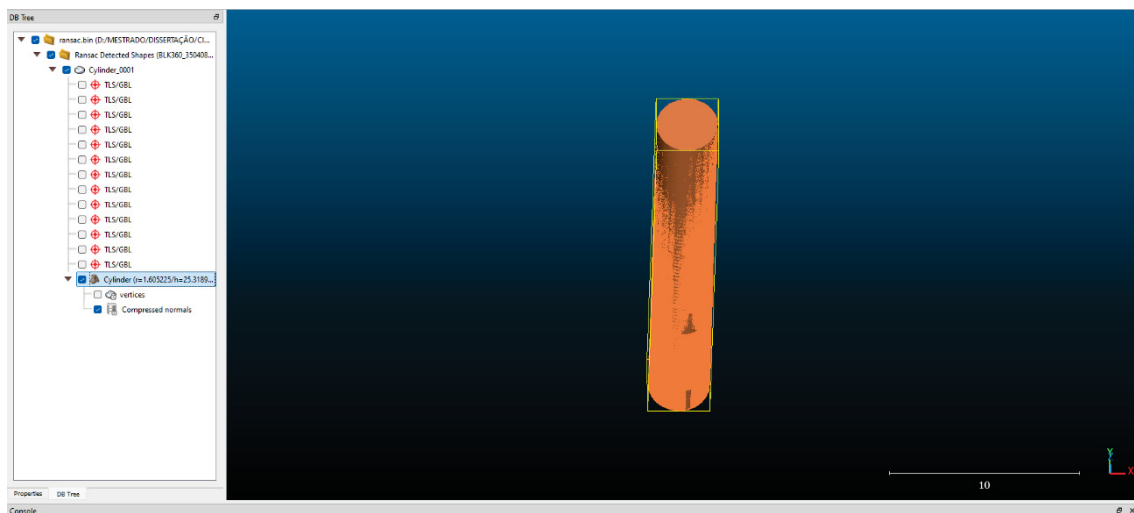
Outra possibilidade de processamento da nuvem de pontos para a obtenção de volume é com o uso de uma ferramenta no CloudCompare, o algoritmo RANSAC (Random Sample Consensus) *Shape Detection*. Este algoritmo trata-se de uma estimação de parâmetros de um modelo matemático, a partir de um conjunto de dados que contém *outliers*. É um dos métodos de segmentação de planos mais comuns, o RANSAC padrão é frequentemente usado para detectar planos continuamente, um após o outro. Ele é capaz de encontrar o melhor modelo possível para um conjunto de dados, mesmo que parte desse conjunto esteja ruidoso (Li et al., 2017). Com essa ferramenta é possível identificar formas simples como planos, esferas e até mesmo cilindros, que é a forma geométrica de busca desse trabalho. Essa ferramenta segmenta a nuvem de pontos em diferentes regiões com base na primitiva geométrica detectada. Ou seja, um cilindro foi encontrado automaticamente por essa ferramenta nas aplicações deste algoritmo nesse trabalho.

De acordo com Li et al. (2017) o RANSAC envolve principalmente a execução de duas etapas repetidas iterativamente em uma determinada nuvem de pontos: geração de uma hipótese e verificação. As formas de hipótese são geradas selecionando-se aleatoriamente um subconjunto mínimo de n pontos e estimando os parâmetros correspondentes do modelo de forma. Um subconjunto mínimo contém o menor número de pontos necessários para estimar exclusivamente um modelo, que nesse caso será o cilindro. Após um determinado número de iterações, a forma que possui a maior porcentagem de *inliers* é extraída e o algoritmo continua a processar os dados restantes. O ajuste é realizado pelo método dos mínimos quadrados.

Neste trabalho o algoritmo foi empregado para a detecção de cilindros na nuvem de pontos já segmentada e filtrada. Este algoritmo detectou automaticamente um cilindro em cada nuvem, e determinou o raio e a altura deste cilindro. E com estes dados foi realizado o cálculo do volume dos objetos. Dessa forma, o uso das seções por este método não é necessário.

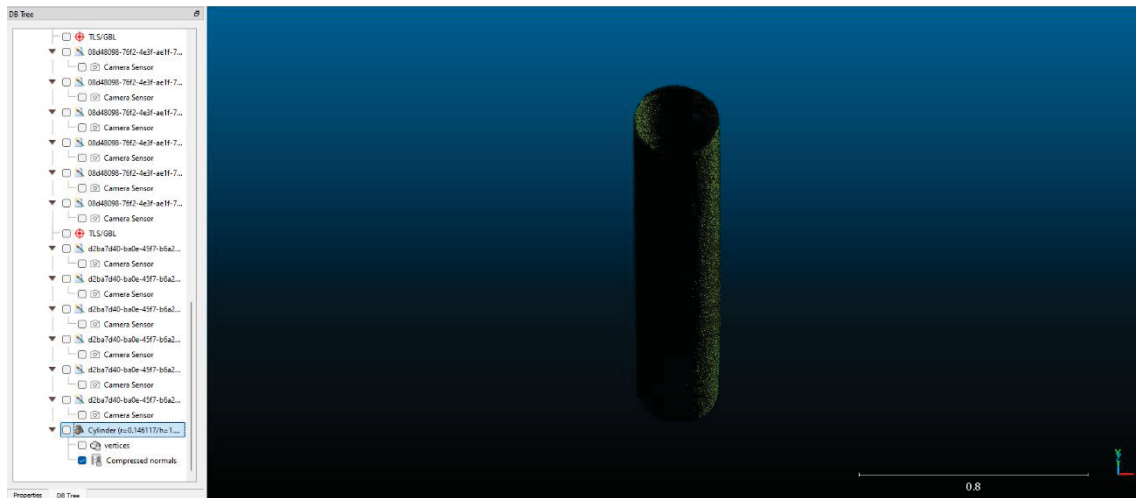
Na figura 64 pode-se observar o algoritmo aplicado na nuvem de pontos do Ensaio do reservatório de água do Bloco da Engenharia Florestal, e na figura 65 tem-se o algoritmo aplicado na nuvem de pontos do ensaio no LAIG com a tubulação DN300. Em ambas as figuras é possível notar os resultados de altura e raio fornecidos pelo algoritmo no canto esquerdo inferior. Em ambos os casos, para a aplicação do algoritmo foram definidos os parâmetros para o algoritmo de acordo com o número de pontos presente em cada uma das nuvens. Na figura 66 observa-se esses parâmetros para a nuvem de pontos do ensaio do Reservatório de água, que é muito maior que o número de pontos do objeto menor, estudado no ensaio do LAIG. Enquanto o valor mínimo dos pontos suportados por primitiva foi de 500.000 no Ensaio do reservatório de água, o ensaio do LAIG este valor foi de 50.000.

Figura 64 - Cilindro detectado com o uso da ferramenta RANSAC na nuvem de pontos do Ensaio do Reservatório de água



Fonte: A autora (2025).

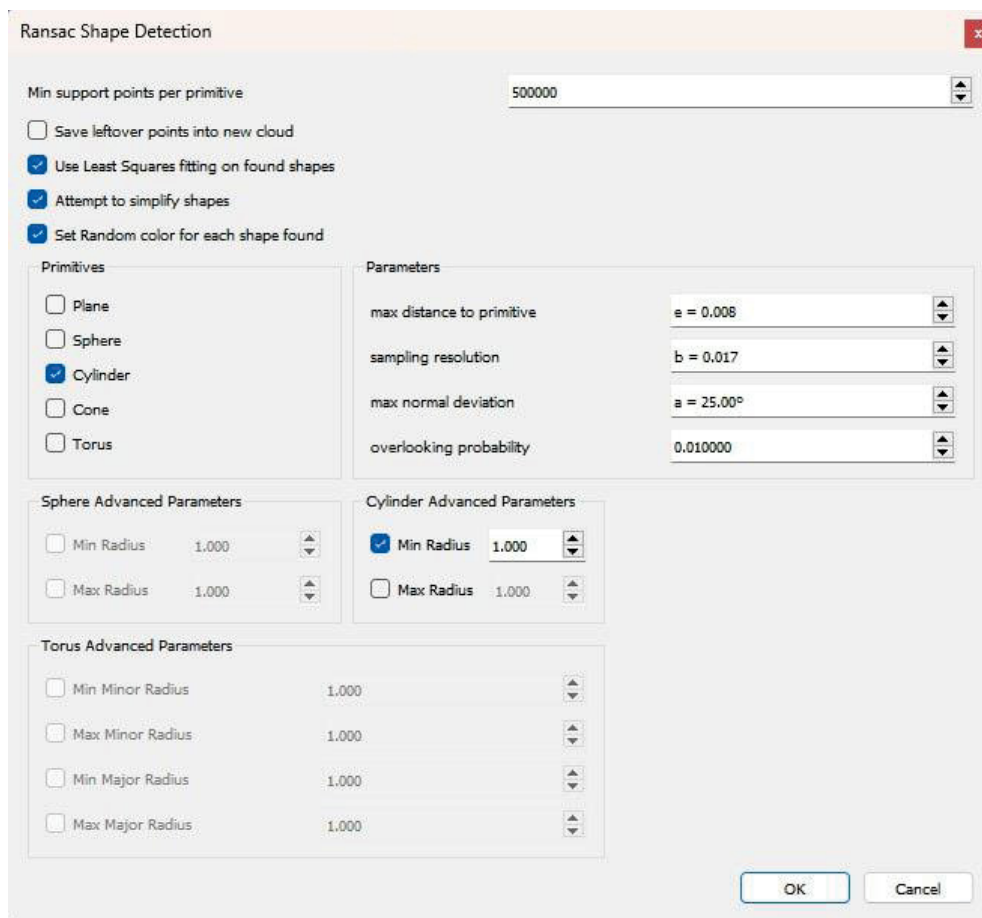
Figura 65 - Cilindro detectado com o uso da ferramenta RANSAC na nuvem de pontos do Ensaio do LAIG



Fonte: A autora (2025).

Os parâmetros empregados nos processamentos podem ser visto na figura 66, que representa a tela de configuração para a aplicação do algoritmo.

Figura 66 - Seleção de Parâmetros para a ferramenta RANSAC no Ensaio do Reservatório de água



Fonte: A autora (2025).

A partir dessa aplicação, os resultados de raio e altura foram obtidos, e a partir do raio pode-se obter a área através da equação 21 a seguir, onde r é o raio.

$$\text{Área} = \pi \cdot r^2 \quad (21)$$

E então o volume é obtido pela equação 22.

$$\text{Volume} = \text{Área} \cdot \text{Altura} (h) \quad (22)$$

Os resultados para o ensaio do LAIG estão demonstrados na tabela 33. Porém, para comparações volumétricas com os valores obtidos em outros experimentos, a altura utilizada para os cálculos foi obtida manualmente no software CloudCompare como exemplificado no capítulo 5.5.1.1. deste trabalho, para que se faça o uso apenas da altura até a seção de referência, e não a altura total do objeto.

Tabela 33 - Cilindro RANSAC para Ensaio do LAIG

Raio	0,14612 m
Altura até seção de referência	1,49045 m
Área	0,06707 m ²
Volume externo	0,09997 m ³

FONTE: A autora (2025).

Os resultados obtidos para o Ensaio do Reservatório de água estão descritos na tabela 34.

Tabela 34 - Cilindro RANSAC para Ensaio do Reservatório de água

Raio	1,60522 m
Altura	25,31895 m
Área	8,09509 m ²
Volume externo	204,95920 m ³

FONTE: A autora (2025).

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES FINAIS

Os resultados obtidos pelas metodologias no ensaio do LAIG foram bastante satisfatórios, dentro da tolerância permitida pela Norma Técnica ISO 7507 - 1 - 1993 e o valor do volume encontrado foi bastante próximo em ambos os métodos.

Método de Arqueação Resultados – Volume Externo e Interno (tabela 35).

Tabela 35 - Método de Arqueação - Resultados - Ensaio LAIG

Experimento	1	2	3
Volume Externo	0,10694 m ³	0,10663 m ³	0,10652 m ³
Volume Interno	0,10213 m ³	0,10183 m ³	0,10172 m ³

FONTE: A autora (2025).

Método de varredura à Laser com 3 seções no Ensaio do LAIG – Volume Externo:

0,10637 m³

Método de varredura à Laser com 5 seções no Ensaio do LAIG – Volume Externo:

0,10545 m³

Método de varredura à Laser com o algoritmo RANSAC – Volume Externo:

0,09997 m³

Analisando os valores do ensaio do LAIG obtemos as médias e o desvio padrão, que pode ser visualizado na tabela 36. Não há desvio padrão possível para duas observações, que é o caso da metodologia à laser.

Tabela 36 - Tabela de resultados dos experimentos do Ensaio LAIG

Experimento	Volume Externo Método de Arqueação	Volume Externo Método de varredura à Laser
1	0,10694 m ³	0,10637 m ³
2	0,10663 m ³	0,10545 m ³
3	0,10652 m ³	
Média	0,10669 m³	0,10591 m³
Desvio Padrão	0,00021 m	

FONTE: A Autora (2025).

De acordo com a Norma, para menos de 25 metros de circunferência, o que é o caso desse ensaio no LAIG, pode-se obter até ± 2 mm de erro admissível na mensuração da seção. Os valores encontrados não possuem discrepância maior que esta tolerância. Esses valores indicam que o ensaio do método de arqueação é confiável e aceito.

Os valores da média dos resultados se aproximaram muito com ambas as técnicas, mostrando assim, em valores, a utilidade e a eficácia do método com a varredura à laser. Obtiveram-se valores muito próximos a metodologia tradicional, porém com maior rapidez e agilidade em campo.

O ensaio do Reservatório de água do Bloco de Engenharia Florestal foi realizado para comprovar a possibilidade da realização do método de varredura à laser fora do ambiente laboratorial, e conduzindo o experimento à realidade usual, onde o objeto em estudo é de maior proporção, onde existem fatores ambientais, climáticos, obstruções por objetos e entre outros fatores. Nessa metodologia encontramos um volume externo de 205,24236 m³, muito superior aos valores obtidos em laboratório.

Com relação às técnicas de metodologia de varredura à laser, os valores entre o método por seções e o método RANSAC tem resultados próximos. Porém no caso do Ensaio em campo a discrepância entre os resultados é menor que 1 m³, provando ser possível a aplicação desta metodologia também, como mostra a tabela 37.

Tabela 37 - Resultado volumétrico - comparação entre métodos

Experimento	Volume Externo método de Arqueação - média	Volume Externo método de varredura à Laser por seções - média	Volume Externo método de varredura à Laser RANSAC
Ensaio Laboratório	0,10669 m³	0,10591 m³	0,09997 m³
Ensaio Campo		205,24236 m³	204,95920 m³

Fonte: A autora (2025).

Observa-se na comparação entre os ensaios as dificuldades encontradas na realização da metodologia de varredura à laser fora do ambiente laboratorial. Como um fator diferencial da técnica pode-se citar a agilidade em campo da obtenção dos dados, a rapidez e a necessidade de menos pessoas envolvidas na obtenção destes dados. Porém o tempo gasto com a aplicação do processamento do método de varredura à laser é superior ao tempo gasto com os cálculos do método de arqueação tradicional.

Para o método de arqueação, em laboratório, foram necessárias 3 pessoas para sua realização, enquanto o método laser no laboratório, com o mesmo objeto de estudo, necessitou apenas de 1 operador. No método Laser em campo, necessitou-se de 2 operadores para a locação do sensor e operação do mesmo. No processamento de ambos os métodos, necessitou-se de apenas 1 pessoa.

A utilização da metodologia de varredura à laser é possível, aplicável e principalmente viável com relação a gastos com pessoal, por mais que o equipamento utilizado, Laser Scanner, seja caro, quando comparado a fita de invar, andaimes e outros itens utilizados no método tradicional.

A possibilidade da aplicação desse método alternativo ao tradicional amplia os horizontes da Norma ISO 7507. Estes experimentos provam a possibilidade da aplicação do método de varredura à laser.

7. PROPOSTA DE NORMA À NORMA ISO 7507

Através dos estudos promovidos por essa dissertação, uma proposta de normativa à Norma ISO 7507 é sugerida. A seguir detalha-se as etapas desta futura norma.

NORMA ISO 7507 – PARTE 7 – Método de varredura à Laser

1. Escopo

Esta parte de ISO 7507 especifica um método para a calibragem de tanques cilíndricos verticais através da medição do tanque através do método de varredura à laser utilizando um Laser Scanner.

2. Referências Normativas

As seguintes normas contêm dispositivos que constituem parte dessa ISO, são elas:

ISO 17123-9:2018 – Óptica e Instrumentos Ópticos - Procedimentos de Campo para Testes de Instrumentos Geodésicos e Topográficos - Parte 9: Laser Scanners Terrestres;

IEC 60825-1 – Norma Internacional para segurança de produtos laser.

3. Definições

Para os propósitos dessa norma as seguintes definições se aplicam.

- Laser Scanner Terrestre: Equipamento que utiliza emissão de pulsos laser para capturar dados tridimensionais de objetos e ambientes com alta precisão;
- Trena Métrica: Ferramenta de medição linear, utilizada para determinar distâncias em diversas aplicações. Compostas por uma fita flexível e graduadas em cm, mm e metros;

- Método de varredura à laser aplicado ao Arqueamento: Método de calibragem de tanque onde as capacidades são calculadas a partir da medição de seções externas ao objeto.

4. Precauções

As precauções gerais e de segurança contidas na ISO 7507 – 1 devem se aplicar a essa norma.

Além disso, o laser scanner deve estar de acordo com a IEC 60825-1, que é a norma internacional que estabelece requisitos de segurança para produtos à laser e classifica os lasers em diferentes classes de acordo com seu potencial de causar danos a olhos ou a pele (Brandalize e Philips, 2019).

5. Equipamento

- O equipamento Laser Scanner deve conter todas as peças indicadas pelo fabricante, o tripé, além disso o equipamento deverá estar calibrado;
- O equipamento Trena Métrica deverá estar devidamente calibrado.

6. Considerações Gerais

- O equipamento laser scanner deve estar de acordo com a ISO 17123-9:2018;
- A calibragem deve ser executada sem interrupções;
- O instrumento Laser Scanner deve ser verificado antes das operações;
- O tanque deve estar livre de vibrações, pois isso interfere na calibragem.

7. Procedimentos Preliminares

- No levantamento por varredura à laser deve-se primeiramente realizar os cálculos para a disposição das estações, de forma que a sobreposição mínima das cenas deve ser de 60%, sendo recomendado valores superiores, como descrito no capítulo 5.6.1. desta dissertação, para que não existam oclusões na captura dos dados;
- Já em campo, com o uso de piquetes, no caso do levantamento estar em solo que seja possível seu uso, ou outro equipamento como fitas adesivas ou tinta, deve-se demarcar com o uso destes equipamentos e com o auxílio de trenas métricas o local exato do posicionamento do equipamento laser scanner. As trenas são utilizadas para mensurar as distâncias entre as estações e entre uma estação e o objeto calibrado;
- Após isso deve-se instalar o equipamento laser scanner na primeira estação para a calibragem do tanque;
- O equipamento não pode ser posicionado a distância menor de que 1 metro do tanque;
- Deve-se garantir que sejam obtidos pontos em toda a face do tanque.

8. Procedimento de Calibragem

É necessário registrar as nuvens de pontos estação por estação, percorrendo o círculo formado pela locação do equipamento. É necessário que o equipamento esteja no tripé e imóvel para a obtenção destes dados. Deve-se completar a medição em cada estação antes de prosseguir para a próxima estação. O registro deve ser realizado e armazenado, efetuando-se todas as medições sem interrupções.

9. Tolerâncias

Durante o registro, o erro global do mesmo não pode ser superior a precisão nominal do equipamento de varredura à laser.

10. Processamento dos dados

- Deve-se utilizar um software compatível com os dados obtidos;
- No software realiza-se primeiramente a segmentação manual da nuvem registrada, onde toda a cena ao redor do tanque e ruídos mais grossos são removidos;
- Em seguida, realiza-se uma filtragem sobre o objeto de forma a eliminar *outliers*, deve ser utilizado um filtro estatístico (por desvio padrão, quartis, densidade ou distância). A escolha deve ser de acordo com as características do levantamento. Neste momento o objeto tanque poderá ser visualizado como nuvem de pontos pronta para manipulação;
- Devem ser retiradas no mínimo duas seções como está descrito na ISO 7507 – 1 na aferição de nível para propósitos de trabalho do tanque, se não isso, mais seções deverão ser obtidas;
- Pode-se também aplicar o algoritmo de RANSAC para a determinação das dimensões do cilindro, neste caso usando todos os pontos da nuvem registradas após a filtragem e segmentação da mesma.

8. CONCLUSÃO

Nessa dissertação, demonstrou-se e avaliou-se a aplicação de uma metodologia para a verificação de capacidade volumétrica de tanques armazenadores de líquidos ou graneis (arqueação) empregando-se a técnica de varredura à laser, com base na Norma do Inmetro NIE-DIMEL-021 Procedimentos gerais para arqueação de tanques, a qual baseia-se na Norma Técnica ISO 7507-1 1993 adaptada para os modelos de estudo selecionados.

Primeiramente apresentou-se e aplicou-se a fundamentação teórica sobre os assuntos inerentes ao projeto. Nessa etapa foi possível compreender o método e desenvolver o método alternativo de arqueação, utilizando a técnica de varredura à laser.

A seguir aplicou-se a um dos objetos de estudo a técnica tradicional de arqueação, adaptada ao laboratório, o ensaio no LAIG. E depois, foram efetuados dois ensaios efetuando-se a técnica alternativa, o Ensaio no LAIG e o Ensaio no reservatório de água. O primeiro Ensaio, no LAIG, apresentou um comparativo entre o método tradicional e o método alternativo em laboratório utilizando um modelo reduzido. O segundo Ensaio, no reservatório de água, demonstrou a eficácia do método alternativo em um modelo ideal.

Notou-se nesse estudo, ao desenvolver o Método de Arqueação tradicional para calibragem de tanques cilíndricos, seguindo a Norma Técnica ISO 7507-1 – 1993 adaptada e também Normas NBR vigentes que o método de arqueação é complexo, trabalhoso, demorado e principalmente demanda uma mobilização de uma equipe de trabalho, o que acarreta em custos no processo, até mesmo quando trata-se de um modelo reduzido, como foi o caso do ensaio no LAIG retratado nessa dissertação.

Quando se necessita de uma equipe de 3 pessoas para desenvolver uma metodologia em um modelo reduzido, como foi o caso da tubulação DN300, tem-se que para um tanque de petróleo, isso significa que o gasto envolvido para aplicar o método de arqueação de calibragem de tanques cilíndricos verticais demanda uma equipe composta por um maior número de pessoas quando aplicado no modelo real, no caso de um tanque de petróleo.

A calibragem do tanque é a forma mais sublime de se obter rendimentos na indústria petrolífera, não havendo assim desperdícios, pois quando sabe-se a capacidade volumétrica de um tanque de petróleo, pode estimar-se seu valor monetário, e isso é relevante. Quando trata-se de transações comerciais do petróleo, pequenos desvios podem significar perdas significativas.

Em contraponto, foram realizados dois ensaios para o método alternativo, o método de obtenção volumétrica por varredura à laser, o Ensaio no LAIG e o Ensaio no Reservatório de água do bloco de Engenharia Florestal. O primeiro ensaio foi realizado numa tubulação de água DN300, que é um modelo reduzido de tanque. O segundo ensaio foi realizado num Reservatório de água, que possui dimensões muito maiores e pode ser considerado um modelo ideal.

Então, se a calibragem representa economia, um método alternativo a esse método de arqueação tradicional que necessita de uma maior quantidade de pessoal envolvido, além de estruturas mais complexas para sua realização, pode representar uma maior economia no processo real. O método alternativo utilizou apenas um operador para a sua realização em comparação ao mesmo ensaio no modelo reduzido. E ainda, no método alternativo, não há a necessidade de uma estrutura e vários equipamentos relacionados a execução do método, apenas o laser scanner e trenas métricas.

O método utilizando a varredura à laser foi extremamente ágil e rápido em campo, até mesmo no maior modelo. A única questão é que o processamento das nuvens geradas e o processamento em escritório deste método é mais demorado que o método tradicional.

Acerca dos resultados obtidos nesse trabalho, os levantamentos por varredura à laser estavam dentro da precisão nominal do laser prescrita em seu manual, que é de 6mm. E o método de arqueação tradicional realizado estava também dentro da precisão exigida pela Norma vigente ISO 7507 – 1 – 1993, dentro da tolerância mínima de $\pm 2\text{mm}$ em até 25 metros de medição circunferencial. Isso tornou os resultados dos ensaios dentro da Norma Técnica, apesar de metodologicamente adaptados.

Foram comparados no capítulo de resultados e discussões os valores das médias de volume encontrados no Ensaio do LAIG em comparação às duas

técnicas, método de arqueação tradicional, e método de obtenção volumétrica por varredura à laser. A discrepância entre os resultados é de menos de 1% do valor, ou ainda 0,00078 m³. Já o ensaio no Reservatório de água mostra a possibilidade deste experimento em um modelo maior e compatível com a realidade.

Esta dissertação apresenta ainda uma proposta de ampliação da norma técnica ISO 7507 que atualmente não contém um capítulo do uso do laser scanner como metodologia indicada. Nesse trabalho, mostrou-se a possibilidade dessa técnica alternativa, e uma metodologia para a técnica foi criada. Foram desenvolvidos planejamentos de campo e métodos em escritório para o cálculo do volume do tanque. Acredita-se que a metodologia descrita nessa dissertação para a obtenção volumétrica a partir da varredura à laser seja possível. E não apenas isso, mas que também seja uma alternativa menos custosa. Estes experimentos ampliam os horizontes da Norma Técnica ISO 7507 e apresentam uma nova possibilidade.

8.1. RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Para aplicações em futuros trabalhos a autora recomenda:

- Aplicação da metodologia com o uso da varredura à laser em um tanque de petróleo com certificado de arqueação;
- Uso de laser aerotransportado (Vant) para modelagem de tanques mais altos;
- Automatização do processo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. L. **Terminologia. Apresentação de Seminário Técnico de Metrologia.** Inmetro. Curitiba. 2008.

ALVES, S.S.O. **Proposta De Algoritmo Para Automação Na Determinação Da Linha Do Eixo Vertical De Estruturas Por Nuvens De Pontos.** Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2022.

AGENTSCHAP, V.L.V. **3D Risk Mapping – Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning.** Agency of the European Leonardo DaVinci programme, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10124: **Trena de Fita – Fibra natural ou sintética.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218: **Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13133: **Execução de Levantamento Topográfico.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14787: **Espaço Confinado – Prevenção de acidentes, procedimentos e medidas de proteção.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14787: **Espaço Confinado – Prevenção de acidentes, procedimentos e medidas de proteção.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7560: **Tubo de ferro fundido dúctil centrifugado, com flanges roscados ou soldados – Especificação.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7665: **Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos.** Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7665: **Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5626: **Instalação Predial de Água Fria**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13194: **Reservatório de Fibrocimento para água potável – Estocagem, montagem e manutenção**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estruturas em Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

BORNAZ, L.; LINGUA, A.; RINAUDO, F. **Terrestrial Laser Scanner**. Italy. Politecnico di Torino, 2003.

BRANDALIZE, M.C.B. ; PHILIPS, I.J. **Padrões de Classificação de Equipamentos Laser Utilizados em Levantamentos Terrestres e Aéreos**. Esteio Engenharia. Curitiba, 2019.

BRASIL. **Lei N°5.966, de 11 de Dezembro de 1973. Institui o Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, e dá outras providências**. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l5966.htm Acesso em: 26 mar. 2024

CHACON, I. T. **Princípios da Incerteza de Medição Aplicáveis a Metrologia Legal. Apresentação de Seminário Técnico de Metrologia**. Inmetro. Curitiba, 2008.

COMASTRI, J. A.; GRIPP JUNIOR, J. **Topografia Aplicada: Medição, Divisão e Demarcação**. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 1998.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laser scanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. 3ª Edição. Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2004.

DIAS, J. L. De. M. **Medida Normalização e Qualidade - Aspectos da História da Metrologia no Brasil**. Inmetro. Rio de Janeiro, 1998.

DOS SANTOS, J.A.N.; DE REZENDE, R.A.; LAZARI, R.F. **Gestão De Arqueação De Tanques – Uma Nova Proposta**. Niterói. UFF, 2004.

ESPARTEL, L. **Curso de Topografia**. 9ª edição. Rio de Janeiro, Globo, 1987

FAGGION, P.L. **Obtenção dos Elementos de Calibração e Certificação de Medidores Eletrônicos de Distância em Campo e Laboratório**. Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2001.

FRANCESCHINI, J. **A atuação do Inmetro nas atividades de arqueação de tanques de armazenamento no Brasil**. Inmetro. Brasil, 2019.

GARCÍA-MORENO, A.I.; HERNANDEZ-GARCÍA, D.E.; GONZALEZ-BARBOSA, J.J.; HURTADO-RAMOS, J.B.; ORNELAS-RODRIGUEZ, F.J. **Error Propagation and Uncertainty Analysis between 3D laser scanner and Camera**. Robotics and Autonomous Systems. Mexico, 2014.

GEMAEL, C. **Introdução a Geodésia Física**. Edição atualizada. Curitiba, Editora UFPR, 2012. 340p.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao Ajustamento de Observações**. 2. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2015. 430p

GONÇALVES, M.L.A.M.; NADAL, C.A.; LOPES, C.R.; MATOS, E.S.; FAGGION, P.L. **Posicionamento de Pontos Inacessíveis Utilizando Técnicas de Topografia Industrial**. V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (V CBCG). Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2007.

GONÇALES, R. **Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na engenharia, com ênfase em túneis**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

GUANDALINI. **Laser Scanner Leica BLK360**. Disponível em: <https://www.guandalinibr.com/produto/laser-scanner-leica-blk360/> Acesso em: 13 abr. 2022.

INMETRO. **Articulação Internacional**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/barreirastecnicas/organismosRelacionados.asp> Acesso em: 03 abr. 2024

INMETRO. **Competências**. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/aceso-a-formacao/institucional/competencias> Acesso em: 12 abr. 2022.

INMETRO. **Guia para a Expressão de Incerteza de Medição – GUM – Avaliação de dados de medição**. 1º edição brasileira da 1º edição do BIPM de 2008, Rio de Janeiro, 2012.

INMETRO. **Laboratórios do Inmetro**. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rble/detalhe_laboratorio.asp?nom_apelido=LANM Acesso em: 01 abr. 2024

INMETRO. **Sinmetro**. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/sinmetro> Acesso em: 01 abr.2024

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – Portaria INMETRO nº 029 de 1995**. 5º edição. Editora SENAI. Rio de Janeiro, 2007.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – Portaria INMETRO nº 029 de 1995**. Editora SENAI. Rio de Janeiro, 2012.

INMETRO NIE-DIMEL-021; ISO - **7507-1 1993 (Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks – Part 1: Strapping method)**. Switzerland – ISO, Rio de Janeiro – Inmetro, 1993.

INMETRO; ISO - **17123 – 9 2018 – Óptica e Instrumentos Ópticos - Procedimentos de Campo para Testes de Instrumentos Geodésicos e Topográficos - Parte 9: Laser Scanners Terrestres**. Switzerland – ISO, Rio de Janeiro – Inmetro, 2018.

Instituto de Pesos e Medidas do Paraná. **Apresentação de Seminário Técnico de Metrologia**. Inmetro Curitiba, 2008

Instituto de Pesos e Medidas do Paraná. **IPEM – PR** . Disponível em: <https://www.ipem.pr.gov.br/> Acesso em: 26 mar. 2024

ISO. **International organization for standardization**. Disponível em: <https://www.iso.org/about-us.html> Acesso em 09 abr. 2024

LAZARI, R. F. **Apresentação de Seminário Técnico de Metrologia Legal.** DIMEL/DIFLU. Curitiba, 2008

LEICA. LeicaGeosystems. **Leica BLK360:** Manual do Usuário. 2 ed. Brasil, 2018. 42 p.

LI, L.; YANG, F.; ZHU, H.; LI, D.; LI, Y.; TANG, L. **An Improved RANSAC for 3D Point Cloud Plane Segmentation Based on Normal Distribution Transformation Cells.** Wuhan University. China, 2017.

LINCHTI, D.D. **Closed- Form Modelling of a Vertical Cylinder Quality in Support of a Laser Scanner Network Design.** Canada, 2022.

MATOS, E.S. **Modelagem Matemática Para A Determinação De Coordenadas Tridimensionais De Pontos Ocultos Em Topografia.** Curitiba. Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2017.

MEZIAN, M.; VALLET, B.; SOHEILIAN, B.; PAPARODITIS, N. **Uncertainty Propagation For Terrestrial Mobile Laser Scanner.** France. Universite Paris-Est, 2016.

MENDES, A.; ROSÁRIO, P.P.N. **Metrologia e Incerteza de Medição: Conceitos e Aplicações.** Rio de Janeiro, 2020.

Ministério da Economia/ Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Portaria N°103, de 24 de março de 2022.** Disponível em: http://inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=2951

MOTTA, E.P.; MOTTA, H.P.; SILVA, K.V. Da.; CESAR, A.L.; LINK, W.; ARAÚJO, L.P. De. **Otimização Do Método Tradicional De Calibração De Trenas Através De Um Microscópio Digital.** CONEM. Maranhão, 2012.

NADAL, C.A. **Método da Interseção Óptica Tridimensional Aplicado À Engenharia de Precisão.** Curitiba. Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2000.

NADAL, K.M.J. **Método de Arqueação de Tanques Cilíndricos – Estudo de Caso de Tubulações Utilizadas em Redes Públicas de Saneamento.** Curitiba.

Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura. Universidade Federal do Paraná, 2022.

OIML. **International organization of legal metrology – R-71**, 2008. Disponível em: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r071-e08.pdf Acesso em: 28 de mai. 2024.

OLIVEIRA, R.M. **Estudo Comparativo Entre Diversos Métodos De Arqueação De Tanques**. Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2010.

PAULI, E.A de.; ULIANA, F.S. **Mecânica – Metrologia: Apostila**. SENAI. Espírito Santo, 1996.

RABELO, G. H. de S.; SILVA, L. G. G.; SILVA, E. P. **Execução De Levantamento Volumétrico Com Laser Scanner**. Anais do 2º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsona, 2020.

RÉCHE, M. M. **Metrologia Legal no Brasil. Apresentação de Seminário Técnico de Metrologia**. Inmetro. Curitiba, 2008.

SANTOS JR., M.J. Dos.; IRIGOYEN, E.R.C. **Metrologia Dimensional- Teoria e Prática**. 2º edição. Porto alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

SECCO, A.R.; VIEIRA, E.; GORDO, N. **Apostila de Metrologia**. Salvador. Centro Universitário Senai Cimatec, 2020.

SMITH, G.T. **Machine Tool Metrology – An Industrial Handbook**. Hampshire, England. Southampton Solent University, 2016.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA; SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA. **O Novo Sistema Internacional de Unidades (SI)**. Rio de Janeiro, 2019.

TALEBI, S.; KOSKELA, L.; TZORTZOPOULOS, P. **Tolerance Compliance Measurement Using Terrestrial Laser Scanner**. 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. India, 2018.

TOMMASELLI, A. M. G. **Um Estudo Sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a Curta Distância**. GEODÉSIA Online –Revista da Comissão Brasileira de Geodésia, 2003.

VEIGA, L.A.K.; ZANETTI, M.A.Z.; FAGGION, P.L. **Fundamentos De Topografia**. Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2012.

WUTKE, J.D. **Métodos Para Avaliação De Um Sistema Laser Scanner Terrestre**. Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2006.