

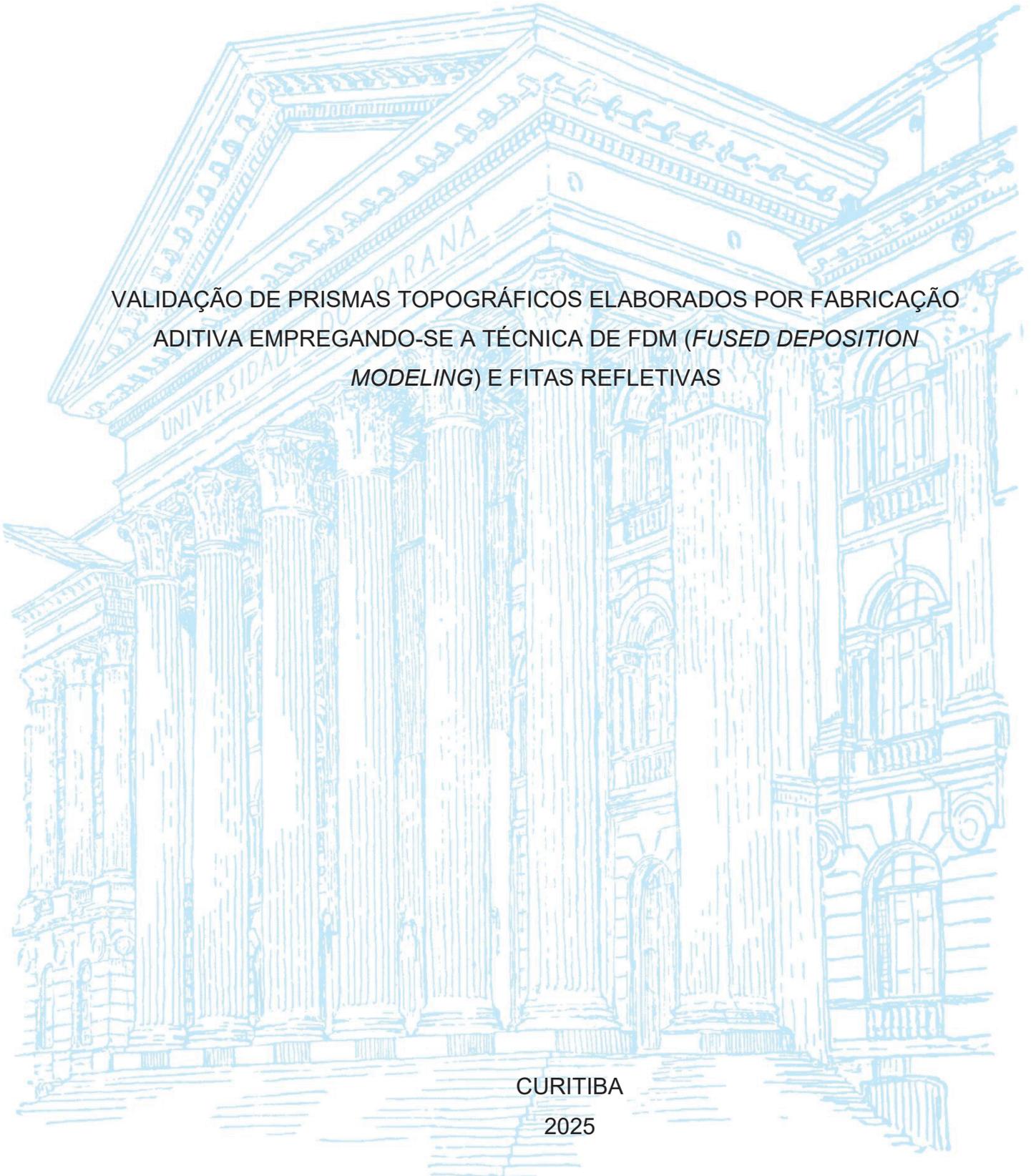
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINÍCIUS ANDRÉ BOESE

VALIDAÇÃO DE PRISMAS TOPOGRÁFICOS ELABORADOS POR FABRICAÇÃO
ADITIVA EMPREGANDO-SE A TÉCNICA DE FDM (*FUSED DEPOSITION
MODELING*) E FITAS REFLETIVAS

CURITIBA

2025



VINÍCIUS ANDRÉ BOESE

VALIDAÇÃO DE PRISMAS TOPOGRÁFICOS ELABORADOS POR FABRICAÇÃO
ADITIVA EMPREGANDO-SE A TÉCNICA DE FDM (*FUSED DEPOSITION
MODELING*) E FITAS REFLETIVAS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

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

Boese, Vinícius André

Validação de prismas topográficos elaborados por fabricação aditiva empregando-se a técnica de FDM (Fused Deposition Modeling) e fitas refletivas / Vinícius André Boese. – 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. Geodésia. 2. Manufatura Aditiva. 3. Impressão tridimensional. 4. Levantamentos Topográficos. 5. Prismas topográficos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Veiga, Luis Augusto Koenig. IV. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E 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 **VINICIUS ANDRE BOESE** intitulada: **Validação de prismas topográficos elaborados por fabricação aditiva empregando-se a técnica de FDM (Fused Deposition Modeling) e fitas refletivas.**, sob orientação do Prof. Dr. LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre 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, 16 de Janeiro de 2025.

Assinatura Eletrônica

22/01/2025 11:00:50.0

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

20/01/2025 11:48:31.0

PEDRO LUIS FAGGION

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

21/01/2025 14:18:14.0

SAMIR DE SOUZA OLIVEIRA ALVES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO DE JANEIRO)

Dedico este trabalho a minha Família,

Por terem sido minha inspiração e meu apoio em todos os momentos.

Aos colegas e professores, por me ensinarem a importância da resiliência, paciência e dedicação.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação e crescimento, oferecendo suporte, palavras de incentivo ou compartilhando conhecimento ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio incondicional, e à minha companheira, Flavia Oyadomari, pelo suporte, paciência e compreensão ao longo de todo o processo.

Ao meu orientador, prof. Dr. Luis Augusto Köenig Veiga, por sua dedicação, apoio constante, entusiasmo e inestimável colaboração ao longo deste trabalho, bem como por sua disposição em promover e incentivar o desenvolvimento desta linha de pesquisa em Geodésia aplicada.

Ao colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) da Universidade Federal do Paraná, pelo acolhimento no programa e pela concessão da prorrogação quando foi necessário.

Aos colegas do Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia (GEENG), com destaque para Alan Salomão, pelo apoio essencial nos testes de campo e na escrita deste trabalho, e Rubens Benevides, pelos ensinamentos em programação e pelo suporte durante experimentos e testes em campo.

Aos colegas Nathan Damas, Lisandra Blanco e Gabriele Gardin, pelas conversas enriquecedoras, pela companhia durante o café e pelo apoio constante.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pela oportunidade de realizar e desenvolver esta pesquisa.

Às técnicas Marinei e Tânia, do Laboratório de Topografia (LABTOPO), e à Dayane, do Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG), pela sempre pronta disposição em ajudar com equipamentos e suporte técnico.

Aos demais colegas, professores, técnicos e a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta pesquisa, minha sincera gratidão.

“If you wish to make an apple pie from scratch, you must first invent the universe”. (Carl Sagan)

RESUMO

Este trabalho investiga a validação de prismas refletores topográficos produzidos por manufatura aditiva utilizando a técnica de FDM (*Fused Deposition Modeling*) e revestimentos com fitas refletivas. O objetivo principal é desenvolver prismas de baixo custo que sejam compatíveis com estações totais robotizadas, otimizando sua aplicação em levantamentos topográficos e ampliando o acesso a tecnologias avançadas no campo das Ciências Geodésicas. A pesquisa explora o uso de impressão 3D para criar equipamentos auxiliares personalizados, atendendo a diferentes condições de campo e promovendo a inovação no design desses dispositivos. Prismas refletores tridimensionais foram projetados e fabricados com materiais acessíveis, como materiais plásticos, sendo testados quanto à refletividade e desempenho em comparação com prismas convencionais. Além disso, foram conduzidos experimentos em laboratório e em campo para avaliar a precisão das medições e a capacidade dos novos prismas em condições reais de uso. Os resultados indicam que os prismas produzidos com a técnica FDM, associados a fitas refletivas, apresentam desempenho satisfatório em medições de curta e média distância (até 300 metros), proporcionando bom retorno de sinal e baixo desvio-padrão. Todos os prismas testados apresentam um ótimo desempenho na determinação de distâncias relativas, com as maiores diferenças não superando 1,0 mm em relação a medida padrão da distância calculada. Além de contribuir para a redução de custos na fabricação e na prototipagem de equipamentos, os alvos desenvolvidos oferecem maior flexibilidade para adaptações específicas e apresentam potencial para inovação tecnológica e geração de patentes. Por fim, a dissertação ressalta a relevância de incorporar soluções sustentáveis e acessíveis às práticas geodésicas, fortalecendo a autonomia tecnológica e promovendo o avanço científico na área.

Palavras-chave: Geodésia Aplicada 1; Manufatura Aditiva 2; Prismas Topográficos 3; Impressão 3D (FDM) 4; Levantamentos Topográficos 5.

ABSTRACT

This study investigates the validation of topographic retroreflective prisms produced by additive manufacturing using the FDM (Fused Deposition Modeling) technique and coatings with reflective tapes. The main objective is to develop low-cost prisms that are compatible with robotic total stations, optimizing their application in topographic surveys and expanding access to advanced technologies in the field of Geodetic Sciences. The research explores the use of 3D printing to create customized auxiliary equipment, catering to different field conditions and promoting innovation in the design of these devices. Three-dimensional retroreflective prisms were designed and manufactured with accessible materials, such as plastic materials, and tested for reflectivity and performance compared to conventional prisms. Furthermore, laboratory and field experiments were conducted to evaluate the accuracy of measurements and the capability of the new prisms in real-world conditions. The results indicate that the prisms produced with the FDM technique, combined with reflective tapes, exhibit satisfactory performance in short and medium-distance measurements (up to 300 meters), providing good signal return and low standard deviation. All tested prisms demonstrate excellent performance in determining relative distances, with the largest differences not exceeding 1.0 mm compared to the standard calculated distance measurement. In addition to contributing to cost reduction in equipment manufacturing and prototyping, the developed targets offer greater flexibility for specific adaptations and show potential for technological innovation and patent generation. Finally, the dissertation highlights the relevance of incorporating sustainable and accessible solutions into geodetic practices, strengthening technological autonomy and promoting scientific advancement in the area.

Keywords: Applied Geodesy; Additive Manufacturing; Topographic Prisms; 3D Printing (FDM); Topographic Surveys.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: COMPONENTES BÁSICOS DE UMA ESTAÇÃO TOTAL.	17
FIGURA 2: EIXOS DE UMA ESTAÇÃO TOTAL.	19
FIGURA 3: ELEMENTOS DE UMA ETR.....	20
FIGURA 4: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ATR.....	21
FIGURA 5: ERRO DE COLIMAÇÃO.	23
FIGURA 6: ERRO DO EIXO SECUNDÁRIO.....	24
FIGURA 7: ERRO DE VERTICALIDADE.	25
FIGURA 8: POSICÕES DA ESTAÇÃO TOTAL PARA VERIFICAÇÃO DO ERRO DE VERTICALIDADE.....	26
FIGURA 9: PARAFUSOS DE RETIFICAÇÃO DA BOLHA.....	27
FIGURA 10: REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA.	28
FIGURA 11: PRIMEIROS MODELOS DE MED.	30
FIGURA 12: DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DE UM MED.....	31
FIGURA 13: MEDIDA PELO MÉTO DE PULSO.....	34
FIGURA 14 DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DE UM MED PELO MÉTODO DE PULSO.....	34
FIGURA 15: MÉTODO DE MEDIÇÃO POR FASE.	35
FIGURA 16: PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA PORTADORA.....	37
FIGURA 17: MODULAÇÃO DE UMA PORTADORA.	38
FIGURA 18: DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DE UM MED MODERNO.	40
FIGURA 19: ILUSTRAÇÃO DA REFLEXÃO TOTAL.	41
FIGURA 20: REFLEXÃO DIFUSA.....	42
FIGURA 21: DIVERGÊNCIA DO SINAL EMITIDO.....	45
FIGURA 22: DIVERGÊNCIA DO SINAL REFLETIDO.	45
FIGURA 23: CORREÇÃO DA SEGUNDA VELOCIDADE (K").	50
FIGURA 24: TIPOS DE PRISMA.	52
FIGURA 25: GEOMETRIA DE UM PRISMA CIRCULAR.....	53
FIGURA 26: PRISMA 360°.....	55
FIGURA 27: MINIPRISMAS.	56
FIGURA 28: ALVOS DE FITA REFLETIVA.....	57
FIGURA 29: GEOMETRIA DA CONSTANTE DO PRISMA.	59

FIGURA 30: MÉTODO DOS TRÊS TRIPÉS PARA DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DO SISTEMA (ESTAÇÃO EM CONJUNTO COM O PRISMA).	61
FIGURA 31: DIFERENÇA ENTRE CONSTANTE NEGATIVA, POSITIVA E NULA. .62	
FIGURA 32: EXEMPLO DE IMPRESSORAS 3D.....64	
FIGURA 33: ALVOS IMPRESSOS EM 3D PARA DENSIFICAÇÃO DE REDE.67	
FIGURA 34: PEÇA IMPRESSA PARA ESTABILIZAÇÃO DE SMARTPHONE EM UMA ETR.68	
FIGURA 35: COMPONENTES DA ETR LEICA TS-15.....71	
FIGURA 36: TRIPÉS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS E TESTES EM CAMPO.72	
FIGURA 37: CONJUNTO BIPÉ E BASTÃO.....73	
FIGURA 38: PRISMAS LEICA UTILIZADOS.74	
FIGURA 39: TERMO-HIGRÔMETRO ICEL HT-4010.75	
FIGURA 40: BASE NIVELANTE E EXTENSOR.76	
FIGURA 41: FITA REFLETIVA GRAU DIAMANTE 3M.....77	
FIGURA 42: PRISMAS PROJETADOS PARA OS EXPERIMENTOS.78	
FIGURA 43: SEQUÊNCIA DE MODELAGEM E IMPRESSÃO.....80	
FIGURA 44: ALVO ESFERA.80	
FIGURA 45: ALVO ESFERA DE GOLFE.....81	
FIGURA 46: ALVO POLIEDRO P3.82	
FIGURA 47: ALVO POLIEDRO P4.83	
FIGURA 48: ALVO POLIEDRO P5.84	
FIGURA 49: ALVO CILINDRO.85	
FIGURA 50: ALVO H6.....86	
FIGURA 51: ALVO H10.....87	
FIGURA 52: PARAFUSO UTILIZADO PARA FIXAÇÃO.88	
FIGURA 53: ADAPTADOR PARA MINIPRISMA.....88	
FIGURA 54: PORCA DE FIXAÇÃO DO ADAPTADOR.....89	
FIGURA 55: ADAPTADOR PARA ANTEPARO E PRANCHETA.....90	
FIGURA 56: FLUXOGRAMA DE PRISMAS IMPRESSOS, EXPERIMENTOS E TESTES DE CAMPO REALIZADOS.91	
FIGURA 57: LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS CONTROLADOS. .92	
FIGURA 58: DISPOSIÇÃO DOS PONTOS A, B E C.94	

FIGURA 59: BASE NIVELANTE E EXTENSOR.	94
FIGURA 60: EXEMPLO DOS PRISMAS UTILIZADOS.....	95
FIGURA 61: HASTE DE 20,0 cm E ALINHAMENTO.	99
FIGURA 62: CROQUI DO POSICIONAMENTO DOS PONTOS.....	100
FIGURA 63: FEIXE DE LASER VISÍVEL INCIDINDO SOBRE O PRISMA.....	102
FIGURA 64: ANTEPARO PARA MEDIDAS DE DIVERGÊNCIA DO INFRAVERMELHO.	103
FIGURA 65: LOCAL DO PRIMEIRO TESTE EM CAMPO.	104
FIGURA 66: PRISMA CIRCULAR POSICIONADO.....	105
FIGURA 67: EXEMPLO DE PRISMAS E ALVOS UTILIZADOS E VISADA PELA ETR.....	106
FIGURA 68: PRISMAS UTILIZADOS.....	107
FIGURA 69: LOCAL SEGUNDO TESTE EM CAMPO.....	107
FIGURA 70: VISADA DOS PRISMAS PELA LUNETAS DA ETR.....	108
FIGURA 71: PASSOS PARA INCLUSÃO DE NOVO ALVO NA TS-15.	111

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: DISTÂNCIAS MEDIDAS E DESVIO-PADRÃO	112
GRÁFICO 2: GRÁFICO DA FUNÇÃO GERADA.....	116
GRÁFICO 3: GRÁFICO DA FUNÇÃO COM OS DADOS DO FABRICANTE.....	117
GRÁFICO 4: COMPARAÇÃO DAS FUNÇÕES DE DIVERGÊNCIA DO FEIXE.	118

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: RESULTADOS DAS CONSTANTES DOS PRISMAS CALCULADA.	109
QUADRO 2: RESULTADO DO CÁLCULO DA DISTÂNCIA DA HASTE.....	112
QUADRO 3: DIFERENÇA ENTRE OS VALORES DE DISTÂNCIA UTILIZANDO OS PRISMAS E O PRISMA CIRCULAR E O VALOR FIXO DA HASTE.	113
QUADRO 4: ACURÁCIA APRESENTADA NAS MEDIDAS REALIZADAS COM OS PRISMAS NA DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA DE 20,0 cm.	114
QUADRO 5: RESULTADOS DAS DISTÂNCIAS.....	119
QUADRO 6: DIFERENÇA ENTRE MEDIDAS COM O PRISMA CIRCULAR E COM OS PRISMAS DESENVOLVIDOS.	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE DISTÂNCIA.	36
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DA REFLEXÃO TOTAL E REFLEXÃO DIFUSA. .	42
TABELA 3: CARACTERÍSTICAS DOS FILAMENTOS.	65
TABELA 4: DADOS DO TERMO-HIGRÔMETRO ICAL HT-4010.	75

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

*.STL	– <i>STereoLithography</i>
3D	– Três Dimensões
ABS	- Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	- <i>Additive Manufacturing</i>
AM	- Modulação em Amplitude
ATR	– <i>Automatic Target Recognition</i>
BIM	- <i>Building Information Modelling</i>
CAD	- <i>Computer Aided Design</i>
CAM	- <i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CMOS	- <i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CONTRAN	- Conselho Nacional de Trânsito
DMP	- <i>Dynamic Motion Processing</i>
EALT	- Equipamentos Auxiliares de Levantamento Topográfico
EDM	– <i>Eletronic Distance Measurement</i>
ETR	– Estação Total Robotizada
FDM	- <i>Fused Deposition Modeling</i>
FIG	- Federação Internacional de Geômetras
FM	- Modulação em Frequência
GEENG	– Laboratório de Geodésia Aplica à Engenharia
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i>
IAG	– Associação Internacional de Geodésia
IMU	- Unidade de Medição Inercial
IR	– Infravermelho
LABTOPO	- Laboratório de Topografia
LAIG	– Laboratório de Instrumentação Geodésica
LCD	– Leitura Contínua de Distância
LLR	– <i>Lunar Laser Range</i>
MED	– Medidor Eletrônico de Distância
MHz	– Mega Hertz
NC	– Controle Numérico
PD	- Posição Direta da Luneta
PI	- Posição Indireta da Luneta

PLA	- Ácido Poliláctico
PM	- Modulação em Fase
PPGCG	- Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
PS	– <i>PowerSearch</i>
REDM	– <i>Reflectorless Eletronic Distance Measurement</i>
RFID	- <i>Radio-Frequency Identification</i>
RMSE	– <i>Root Mean Square Error</i>
SLR	– <i>Satellite Laser Range</i>
SLS	- <i>Selective Laser Sintering</i>
™	- <i>Trademark</i>
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
VHF	- <i>Very High Frequency</i>
VSCoDe	– <i>Visual Studio Code</i>
WFD	- <i>Waveform Digitizing</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ_D	- Diferença em relação valor fixo da haste
ΔD_1	- Correção atmosférica
Δ_{PC}	- Diferença em relação ao prisma circular
D_e	- Tamanho da área luminescente captada pela lente
F_r	- Potência luminosa que atinge o alvo
h	- Umidade relativa do ar
θ_0	- Ângulo específico
θ_e	- Ângulo máximo de divergência
$\Sigma_{\hat{x}}$	- Matriz de variância e covariância
ω_l	- Ângulo sólido da fonte de emissão do feixe
ω_{r1}	- Ângulo sólido do feixe quando atinge o alvo
D_{obj}	- Diâmetro da lente do receptor
D_{ref}	- Diâmetro do prisma refletor
F_{in}	- Potência luminosa efetiva
F_{ob}	- Potência luminosa observada
F_{out}	- Potência luminosa na saída do objeto
F_t	- Potência luminosa que incide sobre o alvo
K'	- Correção da primeira velocidade
K_A	- Constante aditiva
N_{Ref}	- Índice de refração de referência
N_g	- Grupo do índice de refração
R	- Raio do círculo
X_c	- Coordenada X do centro do círculo
Y_c	- Coordenada Y do centro do círculo
d'	- Distância eletrônica
n	- Número inteiro de comprimentos de onda na onda portadora;
\hat{v}	- Resíduos ajustados
v_i	- Resíduos das observações
\hat{x}	- Parâmetros ajustados
λ_m	- Comprimento de onda da onda de medição e
σ	- Desvio-padrão

- σ_0^2 - Variância a posteriori
- σ^2 - Variância
- ϕ_1° - Valor de fase de emissão da onda
- ϕ_2° - Valor de fase de retorno da onda
- $^\circ$ - Graus
- $A(d)$ - Área em mm^2 em função da distância
- d - Distância entre a face frontal do prisma e o ponto de intersecção dos raios refletidos
- e - Distância entre o ponto central simétrico do prisma e sua face frontal
- K - Constante do sistema de medida
- K'' - Correção da segunda velocidade
- K_p - Constante do prisma
- n - Índice de refração do vidro do prisma
- R - Raio médio
- α - Coeficiente de albedo
- $\Delta\lambda_m$ - Fração de comprimento de onda contida na onda de medição
- Δt - Intervalo de tempo da emissão da energia eletromagnética até seu retorno
- ω - Ângulo sólido
- A - Matriz design
- D - Distância medida entre os dois pontos
- N - Matriz normal
- S - Alcance máximo do MED
- S - Distância até o alvo
- V - Velocidade de propagação da onda
- W - Matriz dos pesos
- c - Velocidade de propagação da luz na atmosfera
- e - Umidade relativa
- f - Frequência da onda
- f - Distância focal da lente
- n - Número de prismas no refletor
- p - Pressão
- t - Temperatura
- x - Coordenada x do ponto

- x – Vetor dos parâmetros
- y – Coordenada y do ponto
- y – Vetor das observações
- δx - Vetor de correções
- λ - Comprimento de onda
- π - Constante igual a 3,14
- τ - Transmitância atmosférica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA	18
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 ESTAÇÕES TOTAIS	16
2.1.1 Componentes principais de uma estação total	17
2.1.2 Estações totais robotizadas (ETR)	19
2.1.3 Principais erros associados as estações totais	22
2.1.3.1 Erro de colimação ou erro de linha de visada.....	23
2.1.3.2 Erro do eixo secundário	24
2.1.3.3 Erro de verticalidade do eixo principal	24
2.1.3.4 Refração atmosférica.....	27
2.1.3.5 Erro da primeira velocidade (K')	28
2.2 MEDIDAS ELETRÔNICAS DE DISTÂNCIA.....	30
2.2.1 Princípios das medidas eletrônicas de distância	32
2.2.2 Método de Pulso e Método de Fase.....	33
2.2.3 Modulação da onda	37
2.2.4 Influências nas medidas eletrônicas de distância.....	40
2.2.4.1 Reflexão total e reflexão difusa	40
2.2.4.2 Divergência do feixe emitido.....	42
2.2.4.3 Influência da atmosfera nas medidas eletrônicas de distância.....	46
2.2.4.3.1 Correções atmosféricas	47
2.3 PRISMAS REFLETORES	50
2.3.1 Geometria dos prismas	52
2.3.1.1 Prismas circulares	53
2.3.1.2 Prismas 360°	54
2.3.1.3 Miniprisma	56
2.3.1.4 Prismas com fitas refletivas	57
2.3.2 Constante do prisma	58

2.3.2.1	Constante do sistema de medida	60
2.4	IMPRESSÃO 3D	62
2.4.1	Filamentos usuais adotados nos processos AM	64
2.4.2	Geração de componentes e equipamentos auxiliares para mensuração	66
3	MATERIAIS E MÉTODOS	68
3.1	MATERIAIS	68
3.1.1	Estação total Leica Viva TS-15	68
3.1.2	Acessórios	71
3.1.3	Fitas refletivas	76
3.2	MÉTODOS	77
3.2.1	Desenvolvimento dos alvos	77
3.2.1.1	Projetos de modelagem e impressão 3D	79
3.2.1.1.1	Esfera	80
3.2.1.1.2	Esfera com textura de bola de golfe	81
3.2.1.1.3	Poliedro P3	81
3.2.1.1.4	Poliedro P4	82
3.2.1.1.5	Poliedro P5	83
3.2.1.1.6	Cilindro base circular	84
3.2.1.1.7	Cilindro base dodecaedro H6.....	85
3.2.1.1.8	Cilindro base dodecaedro H10.....	86
3.2.2	Projetos dos adaptadores.....	87
3.2.2.1	Adaptador para miniprisma.....	87
3.2.2.2	Adaptador para prancheta	89
3.2.3	Experimentos	90
3.2.3.1	Experimento 1: Definição das constantes dos alvos.....	92
3.2.3.2	Experimento 2: Verificação da capacidade dos prismas desenvolvidos na determinação de distâncias.....	98
3.2.3.3	Experimento 3: Divergência do feixe de infravermelho.....	101
3.2.4	Testes em campo	103
4	RESULTADOS.....	108
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTO 1 – DEFINIÇÃO DAS CONSTANTES DOS PRISMAS	109
4.2	RESULTADOS EXPERIMENTO 2 – VERIFICAÇÃO DA ACURÁCIA DOS PRISMAS NA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS	111

4.3 RESULTADOS EXPERIMENTO 4 – DIVERGÊNCIA DO FEIXE DE INFRAVERMELHO	115
4.4 RESULTADOS TESTE EM CAMPO	118
4.5 PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS	120
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	121
5.1 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	122
REFERÊNCIAS.....	124

1 INTRODUÇÃO

No contexto das Ciências Geodésicas, o desenvolvimento de novos modelos tridimensionais voltados à impressão 3D representa não apenas uma solução rápida e econômica para a reposição de peças e componentes danificados, mas também uma oportunidade para a criação de designs inovadores aplicados aos Equipamentos Auxiliares de Levantamentos Topográficos e Geodésicos (EALT).

De acordo com Graça *et al.* (2021) a manufatura aditiva, comumente denominada impressão 3D, configura-se como um processo de fabricação avançado capaz de produzir geometrias complexas de forma automatizada. Esse processo é viabilizado a partir de um modelo tridimensional previamente elaborado por meio de softwares de desenho assistido por computador (CAD). Essas inovações proporcionam maior flexibilidade operacional, permitindo a adaptação de alvos e prismas a diferentes condições de campo e à integração com múltiplos sensores presentes nos equipamentos modernos. Além disso, o desenvolvimento de novos produtos tem o potencial de gerar patentes, promovendo a independência tecnológica e o avanço científico na área.

Diante desse panorama, esta dissertação tem como objetivo investigar a viabilidade técnica da utilização de prismas refletores de baixo custo, desenvolvidos por meio de manufatura aditiva, em levantamentos topográficos realizados com estações totais robotizadas. Padronizar o termo “alvo” nesta pesquisa como o conjunto impresso com FDM (*Fused Deposition Modeling*), que, quando revestido com as fitas refletoras, caracterizará o conjunto “prisma refletor”. Por meio de experimentos e análises comparativas, pretende-se demonstrar o potencial dessas soluções para otimizar o desempenho dos EALT, reduzir custos associados à prototipagem e, conseqüentemente, proporcionar ganhos significativos à comunidade técnica e científica de Topografia e Geodésia.

Os avanços recentes em tecnologias de impressão 3D têm ampliado significativamente o potencial para inovações na engenharia. A capacidade de fabricar componentes personalizados com materiais acessíveis permite maior versatilidade no desenvolvimento de dispositivos auxiliares. No contexto dos levantamentos topográficos, alvos tridimensionais fabricados com a técnica FDM podem ser produzidos com relativa facilidade e baixo custo. A utilização de filamentos como PLA (Ácido Poliláctico) e ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) na impressão 3D não

apenas reduz o custo de produção, mas também promove soluções sustentáveis, já que muitos desses materiais são recicláveis ou possuem menor impacto ambiental comparado a componentes tradicionais.

Além disso, os experimentos realizados com alvos revestidos com fitas refletivas demonstraram desempenho satisfatório em medições de curta e média distância (com uso da portadora laser e portadora infravermelho). Essas fitas, amplamente utilizadas em aplicações de sinalização, oferecem um bom índice de retrorrefletividade. A combinação desses revestimentos com peças impressas permite a criação de prismas adaptáveis a diferentes ângulos de incidência e distâncias variáveis, promovendo maior eficácia nos levantamentos.

Equipamentos auxiliares convencionais frequentemente apresentam alto custo de aquisição (variando entre R\$ 590,00 a R\$ 2500,00 no modelos mais comuns, como o prisma circular de acrílico) e dependência de fornecedores especializados, o que limita seu uso em regiões economicamente desfavorecidas. A possibilidade de fabricar alvos personalizados diretamente em laboratórios ou escritórios técnicos não apenas reduz os custos logísticos, mas também promove maior autonomia na adaptação de equipamentos para condições específicas de trabalho.

Por fim, o impacto potencial dessas inovações não se limita à esfera técnica. A criação de designs patenteáveis e o incentivo à produção local desses equipamentos podem contribuir significativamente para o avanço tecnológico e a geração de novas oportunidades no campo da geodésia aplicada. A pesquisa destaca, assim, a relevância de soluções acessíveis e sustentáveis para fortalecer a autonomia científica e promover o progresso social e econômico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver e validar um conjunto de prismas refletores e equipamentos auxiliares visando o apoio à levantamentos topográficos.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Projetar e construir alvos tridimensionais utilizando o processo de Fabricação com Filamento Fundido;
- Estudar revestimentos com superfícies refletivas para aplicação nos alvos impressos;
- Avaliar a refletividade e a divergência de sinal do MED em relação a diferentes revestimentos aplicados aos alvos (fita refletora e pintura acrílica);
- Comparar, para fins de validação, os resultados de levantamentos realizados com equipamentos auxiliares convencionais e aqueles obtidos com os prismas projetados nesta pesquisa.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), pioneiro no Brasil no estudo das Ciências Geodésicas, possui um vasto histórico de desenvolvimento de equipamentos e tecnologias aplicadas a levantamentos topográficos e geodésicos, ao longo de seus 50 anos de existência. Dentre as pesquisas desenvolvidas no âmbito da geodésia aplicada à engenharia, destacam-se estudos voltados à automação e aprimoramento de técnicas de medição e monitoramento geodésico, como o uso de fitas refletivas em alvos topográficos (Martini, 2005), controle remoto de estações totais robotizadas e desenvolvimento de plataformas semiautônomas para transporte de prismas 360° (Friedmann, 2013), desenvolvimento de um sistema automático para operação de níveis digitais (Tedeschi, 2015), o uso de sensores de baixo custo, da plataforma Arduino para a determinação dos parâmetros atmosféricos para correção da primeira velocidade (Rodriguez, 2018), e o emprego de smartphones para o apoio do monitoramento de estruturas (Sampaio, 2024).

O PPGCG, com sua tradição em desenvolver novas tecnologias para o aprimoramento de práticas na topografia e na geodésia, abre caminho para a exploração de novas alternativas, como o uso da manufatura aditiva para a criação de alvos de baixo custo. Este tipo de inovação, ao integrar tecnologias emergentes, como a impressão 3D, alinha-se com a proposta do PPGCG de expandir as fronteiras da

pesquisa na geodésia, oferecendo possibilidades de aprimoramento na precisão e na acessibilidade dos levantamentos topográficos.

O uso de estações totais robotizadas em levantamentos topográficos proporciona elevada precisão e eficiência na determinação de coordenadas para diversos fins, como o monitoramento de estruturas e medições no terreno. No entanto, os prismas refletivos convencionais utilizados nesses equipamentos são geralmente fabricados com materiais e técnicas que elevam os custos e restringem a flexibilidade de aplicações, especialmente em levantamentos que demandam um grande número de prismas, como o monitoramento de estruturas. Ademais, a dependência de fornecedores e de padrões preestabelecidos pode limitar as adaptações necessárias para diferentes condições de levantamento e cenários operacionais específicos.

Neste contexto, o desenvolvimento de alvos de baixo custo, confeccionados por manufatura aditiva (impressão 3D), apresenta-se como uma alternativa viável para democratizar o acesso a tecnologias avançadas em topografia. A manufatura aditiva possibilita a criação de designs personalizados que otimizam os processos de detecção automatizada realizados pelos sistemas de reconhecimento das estações totais, além de reduzir custos logísticos e de produção. Essa abordagem possui um grande potencial inovador, permitindo o desenvolvimento de novas patentes e promovendo avanços tecnológicos na área de Geociências.

Dessa forma, a validação da eficácia desses novos alvos em condições reais de campo pode resultar em uma solução técnica e economicamente viável, mais acessível e prática para profissionais e pesquisadores envolvidos em levantamentos topográficos. Assim, a continuidade das pesquisas no PPGCG reafirma seu compromisso com a inovação e a melhoria das práticas geodésicas, contribuindo para o avanço do conhecimento científico e tecnológico na área.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1: Apresenta a introdução ao tema, os objetivos, a justificativa e a estrutura da dissertação.
- Capítulo 2: Consiste em uma revisão teórica dos principais conceitos e fundamentos que norteiam a pesquisa.

- Capítulo 3: Detalha os materiais utilizados na pesquisa, bem como os métodos e procedimentos adotados para o desenvolvimento e teste dos equipamentos auxiliares.
- Capítulo 4: Apresenta os resultados obtidos nos experimentos realizados em laboratório e em campo, seguidos das análises comparativas e discussões pertinentes.
- Capítulo 5: Contêm as considerações finais da pesquisa, destacando os principais resultados, as limitações encontradas e sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ESTAÇÕES TOTAIS

O avanço tecnológico na área de geodésia e topografia transformou os métodos de coleta e processamento de dados geoespaciais, introduzindo ferramentas cada vez mais eficientes e autônomas. Entre esses avanços, a evolução das estações totais se destaca como um marco essencial, com um percurso que vai desde sua criação na década de 1980 até as modernas multiestações que integram capacidade de varredura tridimensional e posicionamento por (*Global Navigation Satellite System*) GNSS. Também se destaca o uso da portadora laser para medidas sem prismas que ampliou as possibilidades de medida em campo.

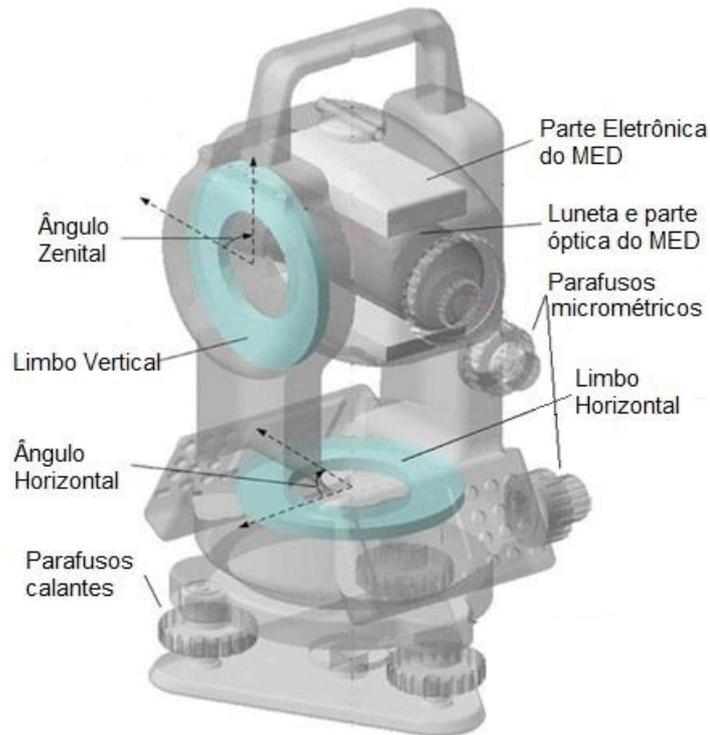
Os primeiros modelos de estações totais surgiram na década de 1980, resultado da miniaturização dos medidores eletrônicos de distância (MED). Esses dispositivos foram integrados aos teodolitos, formando um instrumento capaz de medir direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas. Além disso, incluíam microprocessadores para realizar cálculos essenciais diretamente no equipamento, otimizando o trabalho em campo.

O próximo grande avanço foi o desenvolvimento das estações motorizadas, que introduziram funcionalidades semiautônomas, como o *autolock*. Essa tecnologia permitiu que a estação acompanhasse o movimento de um alvo de forma automática, simplificando tarefas em campo e a diminuição dos riscos associados ao processo de coleta em campo pelos operadores (Medeiros et al., 2020).

Logo depois, as estações robotizadas marcaram uma nova era. Equipadas com servomotores (servomecanismos) ou motores piezoelétricos, os quais permitem a realização de movimentos de rotação do instrumento entorno do seu eixo principal e da luneta em relação ao eixo secundário (Levin et al., 2017). Elas não apenas rastreiam o alvo, mas também realizam a pontaria de maneira totalmente automática (Silva; Sagantine, 2015). Outra inovação foi a introdução da comunicação via rádio, permitindo que todo o trabalho fosse realizado por apenas um operador, controlando a estação a partir de um controlador remoto.

A FIGURA 1 ilustra a estrutura básica de uma estação total:

FIGURA 1: COMPONENTES BÁSICOS DE UMA ESTAÇÃO TOTAL.



FONTE: Adaptado de Levin et al. (2017).

As estações mais recentes ampliaram ainda mais suas capacidades com a integração de antenas GNSS. Essas estações combinam medições convencionais e dados GNSS em um único sistema. O progresso mais recente, as multiestações, não apenas integram GNSS, mas também operam como um laser escâner, proporcionando versatilidade sem precedentes no levantamento topográfico.

Maiores detalhes sobre o desenvolvimento histórico das estações totais consultar Levin et al. (2017) e Friedmann (2013).

2.1.1 Componentes principais de uma estação total

As estações totais são instrumentos indispensáveis nos levantamentos topográficos e geodésicos contemporâneos, combinando um medidor eletrônico de distância (MED), um teodolito eletrônico e um microprocessador em uma única unidade (Miranda, 2012).

Para garantir a precisão das medições realizadas, é essencial compreender seus componentes fundamentais e as principais fontes de erro que podem comprometer a qualidade dos dados obtidos.

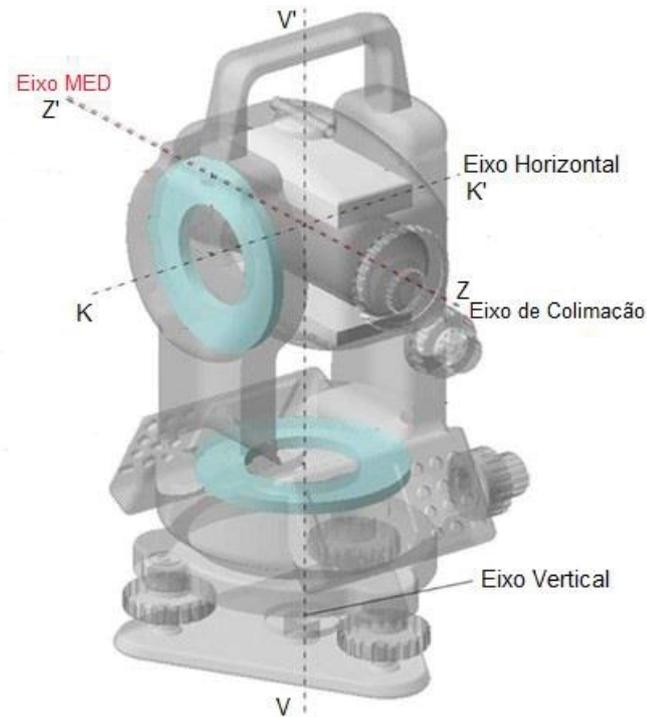
Os principais componentes de uma estação total são (FIGURA 1):

- Limbo Horizontal: Um círculo graduado, usado para a leitura de ângulos horizontais, permite a medição da rotação da estação total em torno do eixo vertical, facilitando a coleta de dados angulares com alta precisão.
- Limbo Vertical: Similar ao limbo horizontal, o limbo vertical é um círculo graduado utilizado para a leitura de ângulos verticais, medindo a inclinação da luneta em relação ao plano horizontal (Ghiliani et al., 2015).
- Medidor Eletrônico de Distância (MED): Também chamado de EDM (*Electronic Distance Measurement*), é um componente eletrônico da estação total, mede distâncias entre a estação total e o alvo (geralmente um prisma refletor) utilizando feixes de luz infravermelha ou laser.
- Microprocessador: O núcleo computacional da estação total, realiza cálculos automáticos de ângulos, distâncias e coordenadas. Também armazena os dados medidos e permite a interação com o operador por meio da interface de usuário. Em estações modernas, o microprocessador suporta integração com software e exportação de dados.
- Luneta: Permite ao operador alinhar visualmente a estação com o alvo, como o prisma ou um ponto específico no terreno. A luneta é ajustável para foco e ampliação, garantindo precisão na medição angular e de alinhamento.

Associados aos componentes (limbo horizontal, limbo vertical, luneta e MED) estão definidos os seguintes eixos da estação total (FIGURA 2):

- Eixo Vertical (VV'): Também denominado eixo principal ou de rotação, é o eixo em torno do qual a estação total realiza sua rotação horizontal.
- Eixo Horizontal (KK'): O eixo de rotação da luneta, perpendicular ao eixo vertical, é responsável pela medição de ângulos horizontais, permitindo a movimentação do instrumento ao longo do plano horizontal.
- Eixo de Colimação ou Linha de Visada (ZZ'): Trata-se da linha imaginária que passa pelo centro da objetiva da luneta e pelo centro do retículo, definindo a direção da visada.

FIGURA 2: EIXOS DE UMA ESTAÇÃO TOTAL.



FONTE: Adaptado Levin et al. (2017).

2.1.2 Estações totais robotizadas (ETR)

As estações totais robóticas ou robotizadas (ETRs) destacam-se como instrumentos empregados em levantamentos topográficos e geodésicos, devido à sua capacidade de realizar medições precisas e automatizadas (Sakimura; Mruyama, 2007). A automação constitui um elemento central no desenvolvimento dessas tecnologias, promovendo maior eficiência e reduzindo a necessidade de intervenção humana. Entre suas aplicações mais relevantes, destacam-se o monitoramento de estruturas como pontes e barragens, além do controle em tempo real de máquinas utilizadas em operações de terraplenagem e mineração (Kirschner; Stempfhuber, 2008). Inovações como o rastreamento automático de alvos e o uso de prismas 360° eliminam a necessidade de alinhamento exato com a linha de visada, proporcionando maior produtividade, precisão e redução de custos operacionais, além de minimizar erros durante o levantamento (França et al., 2024).

A integração de softwares às ETRs amplia ainda mais sua funcionalidade, permitindo que esses instrumentos se ajustem às características específicas dos objetos medidos, otimizando tanto a coleta quanto o processamento de dados (Medeiros et al., 2020). Sistemas de reconhecimento automático de alvos também são

incorporados, aumentando a praticidade e a precisão das operações. Tais avanços consolidam as ETRs como ferramentas essenciais nas áreas de topografia e geodésia, fornecendo soluções tecnológicas que aliam automação, versatilidade e confiabilidade, atendendo a uma ampla variedade de aplicações (Ferreira; Chaves, 2017).

As ETRs são caracterizadas por diversos recursos que aprimoram a precisão e a eficiência dos levantamentos (FIGURA 3). Primeiramente, elas são controladas remotamente por meio de dispositivos como computadores ou tablets, permitindo que o operador realize o monitoramento a uma distância segura da estrutura monitorada (Medeiros, 2020). Seu emprego na aquisição de observações visa minimizar a ocorrência de erros inerentes ao processo de medição (Ferreira; Chaves, 2017).

FIGURA 3: ELEMENTOS DE UMA ETR.

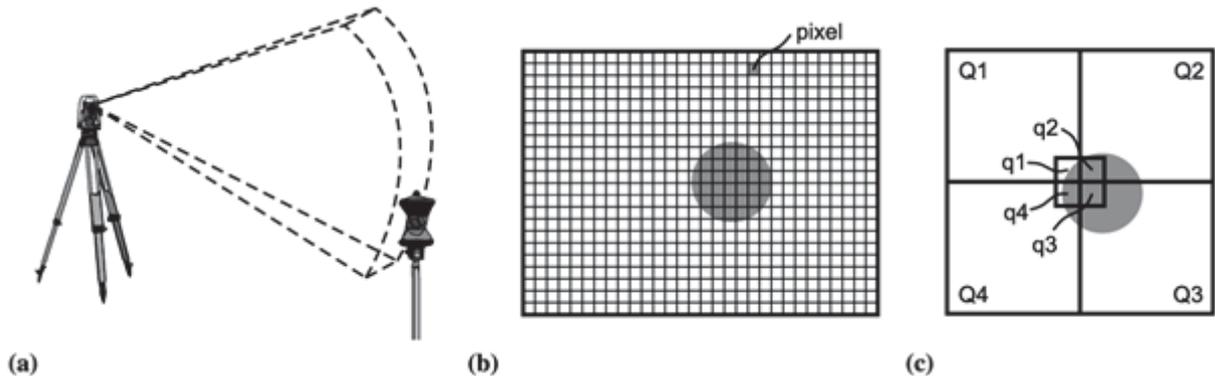


FONTE: Levin et al. (2017).

As ETRs também são equipadas com sistemas que permitem identificar a posição do alvo e permanecer apontado para este, mesmo que esteja em movimento. Termos como ATR (*Automatic Target Recognition*), ou "Lock" (FIGURA 4a) os dois registrados pela empresa Leica, ou *Autolock* da empresa Trimble e *Auto-Tracking* da empresa Topcon. Nas estações totais atuais, o ponto luminoso do MED sobre o alvo é captado por um sensor de imagem (FIGURA 4b) ou por um detector de quadrantes

(FIGURA 4c) e, as informações obtidas a partir do processamento desse ponto luminoso podem ser utilizadas para direcionar a luneta do equipamento em direção ao prisma ou para calcular os ângulos precisos da luneta em relação ao centro do prisma (Ehrhart; Lienhart, 2017).

FIGURA 4: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ATR.



FONTE: Adaptado de Ehrhart; Lienhart (2017).

Outra característica importante é a utilização da técnica de Leitura Contínua de Direções (LCD), adaptada da irradiação topográfica, que possibilita a coleta de dados angulares de alvos em movimento, permitindo calcular seus deslocamentos com base na projeção dos ângulos e numa distância horizontal predefinida (Medeiros, 2020).

Além disso, as ETRs podem ser integradas a sistemas GNSS, aproveitando as vantagens combinadas de ambos os sistemas para fornecer um posicionamento globalmente referenciado. As aplicações dessas tecnologias são diversas, abrangendo áreas como o monitoramento de estruturas, controle de obras, levantamentos topográficos e agricultura de precisão (Friedmann, 2013).

Uma ETR é equipada com sistemas de segmentação automatizados, sensores e motores que permitem localizar e rastrear alvos (FIGURA 3), como os prismas. De acordo com Lienhart et al. (2016), esses sistemas fazem uso de princípios de fotogrametria e sensoriamento remoto para a localização automática dos alvos. Para realizar essa tarefa, a ETR emite um feixe infravermelho (IR), que ao retornar é interpretado por um *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) (Ehrhart; Lienhart, 2015), proporcionando a localização e rastreamento precisos dos alvos.

2.1.3 Principais erros associados as estações totais

A precisão das medições realizadas com as estações totais pode ser afetada por uma série de fatores, que geram erros sistemáticos. Estes erros podem ser classificados em três categorias principais: erros instrumentais, naturais e pessoais.

Aqui são apresentados os erros mais comuns associados a uma estação total, mais detalhes sobre erros podem ser verificados em Ghiliani et al. (2015).

Erros Instrumentais:

- Erro de Colimação ou Erro de Linha de Visada: Esse erro ocorre quando o eixo de colimação não é perpendicular ao eixo horizontal, gerando imprecisões nas leituras de ângulos horizontais e verticais. Para minimizar esse erro, recomenda-se o uso de procedimentos de visada em dois pontos (pontaria direta e pontaria inversa).
- Erro do Eixo Secundário: Esse erro ocorre quando o eixo horizontal não é perpendicular ao eixo vertical, levando a imprecisões nas medições de ângulos verticais.
- Erro de Verticalidade do Equipamento: Este erro surge quando a estação total não está perfeitamente nivelada, afetando as medições de ângulos e distâncias. Embora instrumentos modernos sejam equipados com compensadores para corrigir pequenas inclinações automaticamente, erros residuais podem surgir, principalmente quando o desalinhamento ultrapassa a capacidade de correção do compensador (Martini, 2005).

Erros Naturais:

- Refração Atmosférica: A refração da luz causada pela variação na densidade do ar ao longo da linha de visada pode distorcer as medições de distância. A correção desse efeito é fundamental, especialmente em levantamentos que envolvem grandes distâncias, para garantir a precisão dos resultados (Martini, 2005).
- Efeitos da temperatura: A temperatura é um parâmetro crítico para determinar o índice de refração, influenciando diretamente a precisão das medições. Um erro de 1°C na temperatura resulta em uma alteração de aproximadamente 1 ppm no índice de refração e, conseqüentemente, na distância medida. Além disso, a variação de temperatura ao longo do trajeto da onda pode comprometer a exatidão das medições (Rüguer, 1996).

- Efeitos da pressão: A pressão atmosférica também afeta o índice de refração e, conseqüentemente, a precisão das medições, um erro de 1 mb (milibar) na pressão resulta em uma variação de cerca de 0,3 ppm. Por exemplo, uma diferença de 100 metros na elevação entre o instrumento e o refletor pode causar um erro de aproximadamente 1,6 ppm (Rüguer, 1996).

Erros Pessoais:

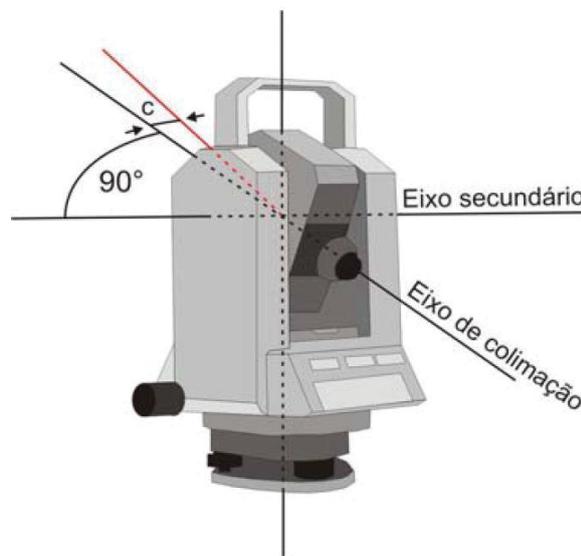
- Erro de Pontaria: Este erro está relacionado à precisão do operador na centralização da luneta no alvo e na visualização do refletor no ponto de interesse.

2.1.3.1 Erro de colimação ou erro de linha de visada

O erro de colimação (c), também denominado erro na linha de visada, ocorre quando o eixo de colimação não apresenta perpendicularidade em relação ao eixo horizontal. Conforme Ghiliani et al. (2015), a ausência dessa perpendicularidade resulta na formação de um cone gerado pela linha de visada, cujo eixo coincide com o eixo horizontal.

Tal erro impacta diretamente a precisão das medições de ângulos horizontais, introduzindo desvios nos resultados obtidos. A FIGURA 5 ilustra, de forma gráfica, o comportamento do erro de colimação e seus efeitos sobre as medições.

FIGURA 5: ERRO DE COLIMAÇÃO.



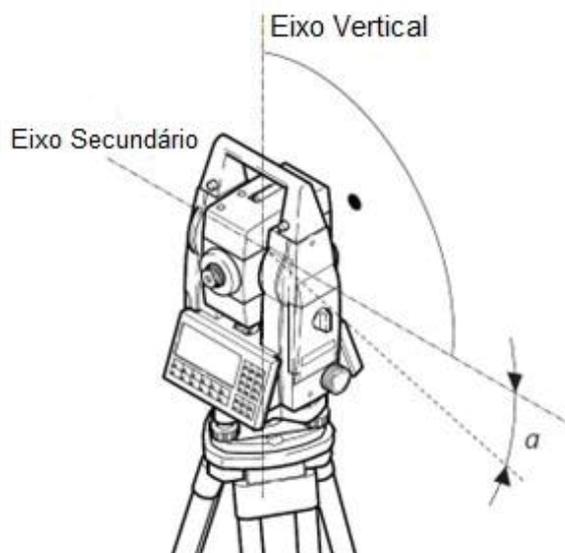
FONTE: Filho (2005).

2.1.3.2 Erro do eixo secundário

O erro do eixo secundário ocorre quando o eixo horizontal do equipamento não é perpendicular ao eixo vertical. De acordo com Uren; Price (2010) “*Isto não tem efeito nas observações feitas quando o telescópio está na horizontal, mas introduz erros nas leituras do círculo horizontal quando o telescópio é inclinado*”.

Dessa forma, o erro do eixo secundário afeta indiretamente a precisão das medições dos ângulos horizontais, comprometendo a confiabilidade dos resultados obtidos em determinadas condições de inclinação do telescópio. A FIGURA 6 apresenta uma representação gráfica desse erro, ilustrando seu impacto sobre as medições. Esse erro pode ser eliminado por meio de medições em posição direta e posição inversa da luneta, no caso de medições de uma única face, o erro do eixo de inclinação (a) (conforme ilustrado na FIGURA 6) é determinado em um procedimento de calibração, sendo posteriormente aplicada uma correção a todas as leituras do círculo horizontal (Uren; Price, 2010).

FIGURA 6: ERRO DO EIXO SECUNDÁRIO.



FONTE: Uren; Price (2010).

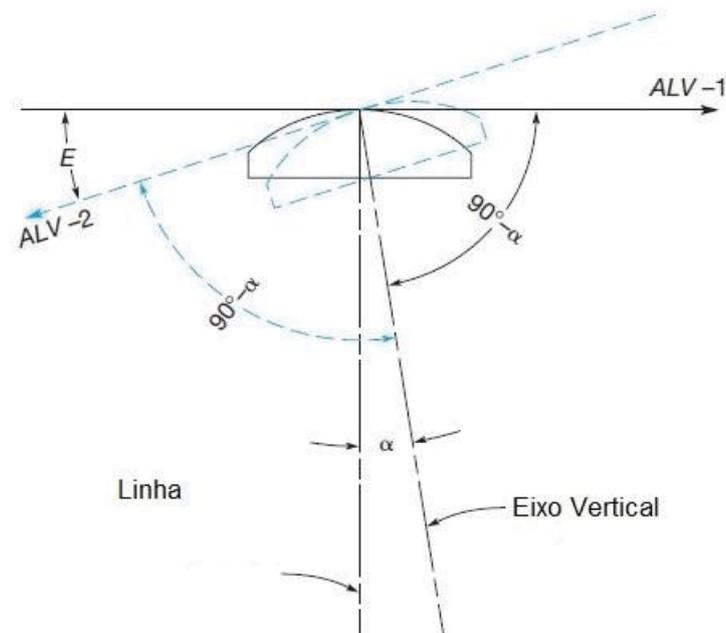
2.1.3.3 Erro de verticalidade do eixo principal

O erro de verticalidade em uma estação total ocorre quando o eixo vertical do instrumento não está perfeitamente alinhado com a linha vertical real, afetando a

precisão das medições de ângulos e distâncias. Esse desalinhamento pode ser causado por instalação inadequada, desgaste de componentes ou falhas na verificação do equipamento, e não pode ser completamente corrigido por meio de observações alternadas (Ghiliani et al., 2015).

Um dos principais fatores que contribuem para esse erro é o desalinhamento da placa do nível de bolha. Quando o eixo da bolha não é perpendicular ao eixo vertical, este não fica verdadeiramente vertical ao centralizar a bolha. Esse desalinhamento é evidenciado quando a bolha se desloca ao girar o instrumento 180° no azimute. Inicialmente, com a luneta apontada para a direita, o eixo do nível forma um ângulo de $90^\circ - \alpha$ com o eixo vertical. Após o giro, o eixo do nível assume uma nova posição, mas o ângulo permanece $90^\circ - \alpha$. O deslocamento da bolha (E), conhecido como "corrida da bolha", é $E = 2\alpha$, ou seja, o dobro do desalinhamento (Ghiliani et al., 2015). A FIGURA 7 ilustra esse erro.

FIGURA 7: ERRO DE VERTICALIDADE.

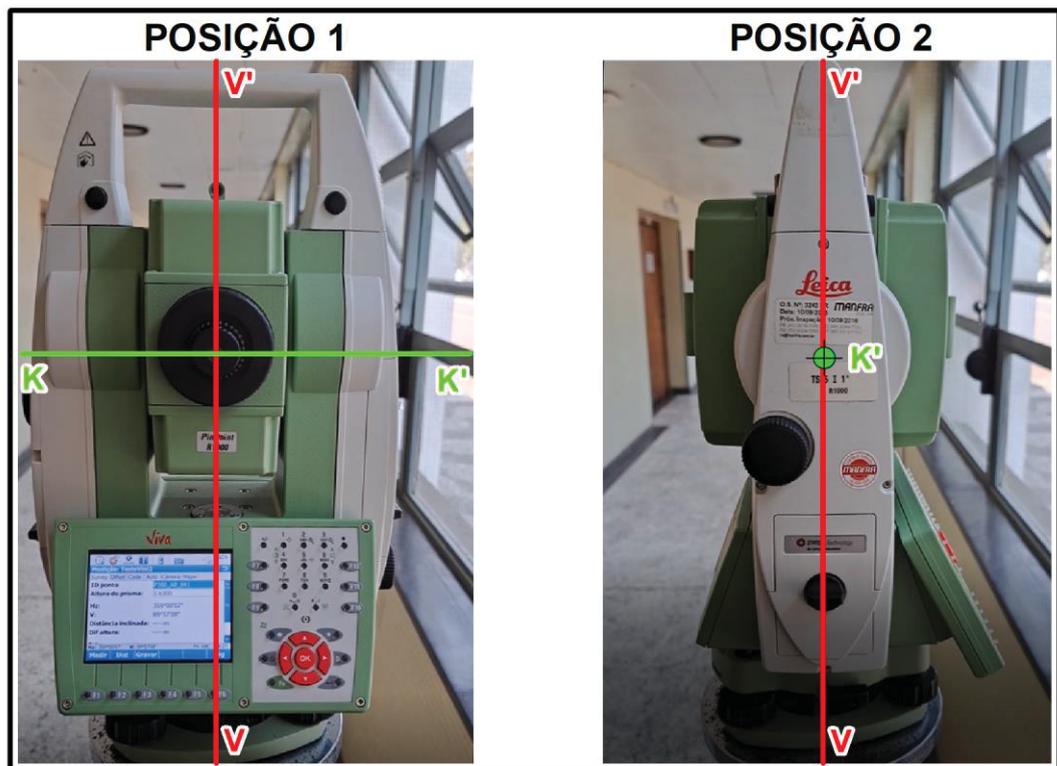


FONTE: Ghiliani et al. (2015).

Como não é possível realizar nenhum procedimento em campo para a mitigação ou correção desse erro, é necessário que se faça a verificação e correção do erro, atuando-se no prato da bolha.

Conforme descrito por Faggion (2010), a verificação e correção do erro de verticalidade devem seguir um procedimento específico. Inicialmente, após a calagem do equipamento, este deve ser rotacionado em 90° em torno do eixo principal, de modo que o eixo secundário se posicione ortogonalmente à sua orientação anterior, conforme ilustrado na FIGURA 8.

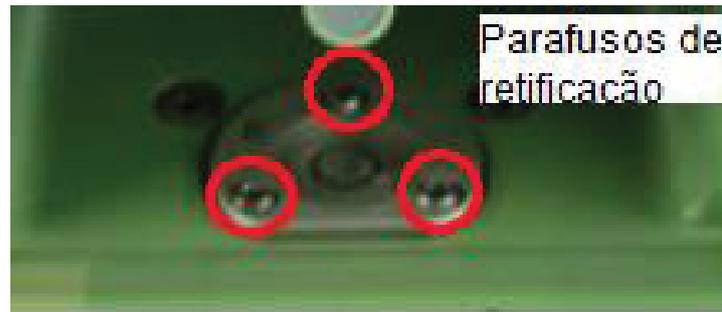
FIGURA 8: POSIÇÕES DA ESTAÇÃO TOTAL PARA VERIFICAÇÃO DO ERRO DE VERTICALIDADE.



FONTE: O autor (2024).

Ajusta-se um único parafuso calante para recentralizar a bolha de nível. Esse procedimento deve ser repetido até que, ao girar o equipamento, este permaneça nivelado. Caso ocorra desnivelamento após a rotação, procede-se à verificação da verticalidade do eixo secundário, realizando uma rotação de 180° em torno do eixo principal. Se a bolha de nível não permanecer centralizada, torna-se necessária a retificação do equipamento. Esse ajuste deve ser efetuado por meio da atuação em um parafuso calante perpendicular a bolha, corrigindo metade do deslocamento da bolha, enquanto a outra metade deve ser ajustada pelos parafusos de retificação, conforme ilustrado na FIGURA 9.

FIGURA 9: PARAFUSOS DE RETIFICAÇÃO DA BOLHA.



FONTE: O autor (2024).

O processo deve ser repetido quantas vezes forem necessárias até que o equipamento se mantenha nivelado ao ser rotacionado em 180° ao redor do eixo principal (Faggion, 2010).

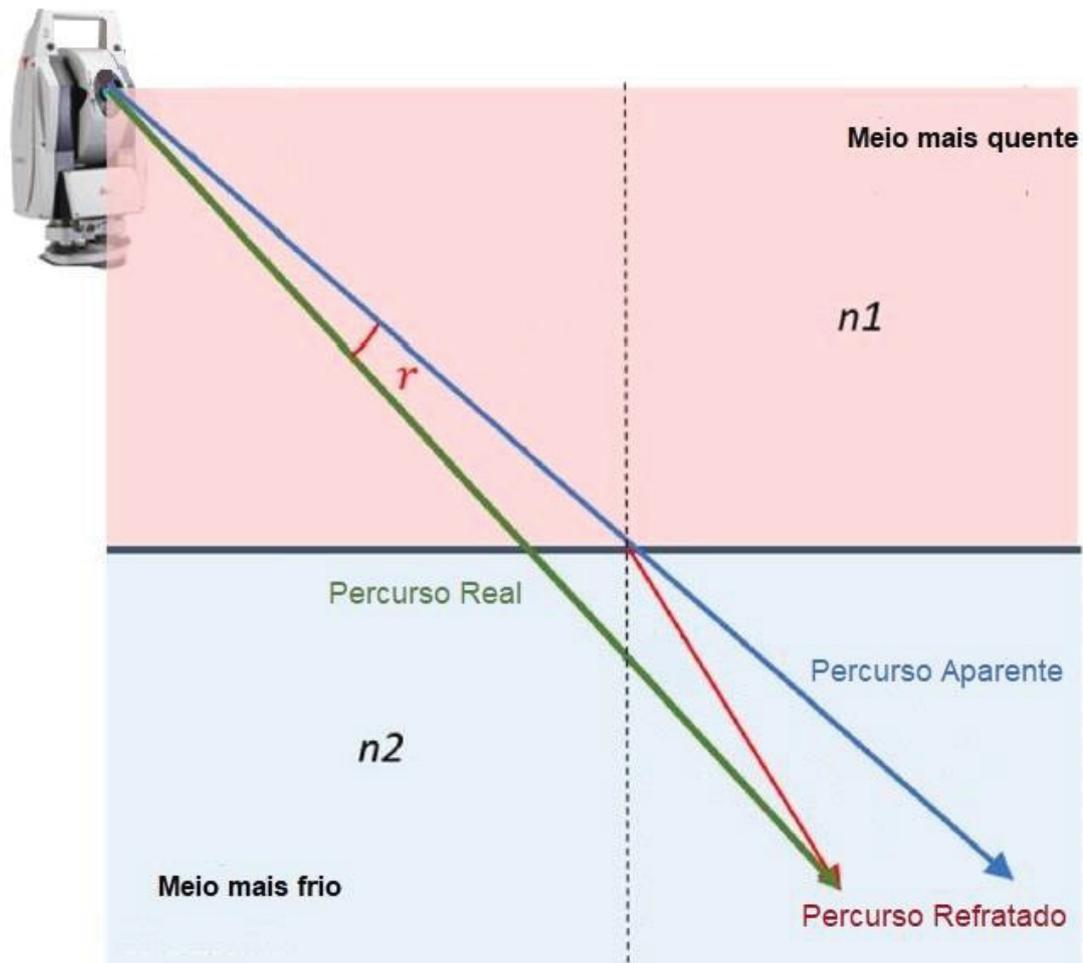
2.1.3.4 Refração atmosférica

De acordo com Ghiliani et al. (2015) "*a refração desigual curva a linha de visada e pode causar um aparente tremor do objeto observado. É desejável manter as linhas de visada bem acima do solo e evitar visadas próximas a edifícios, chaminés, veículos e até grandes objetos individuais em espaços geralmente abertos*". Essa recomendação reflete a importância de minimizar os efeitos da refração atmosférica em medições topográficas, especialmente em condições ambientais adversas.

Uren; Price (2010) complementam essa análise ao afirmarem que, embora as distâncias relativamente curtas medidas em campo apresentem erros insignificantes causados por variações nas condições atmosféricas, os efeitos da refração tornam-se significativos em condições climáticas extremas e em medições de longas distâncias. Ainda segundo os autores, os erros instrumentais e de centralização possuem maior relevância em medições de curta distância, enquanto os efeitos atmosféricos são sempre críticos em linhas extensas.

A FIGURA 10 ilustra o comportamento de uma onda eletromagnética ao passar de um meio com temperatura mais elevada (n_1) para outro com temperatura mais baixa (n_2), evidenciando o desvio em seu percurso natural causado pela refração. A diferença entre o percurso real e o percurso aparente é definido como (r).

FIGURA 10: REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA.



FONTE: Adaptado de Nikolitsas; Lambrou (2020).

Portanto, a refração atmosférica exerce um impacto direto nas Medidas Eletrônicas de Distância (MED), conhecidas em inglês como *Electronic Distance Measurements* (EDM). Para uma análise detalhada de demais erros instrumentais e seus fundamentos teóricos, recomenda-se a consulta à obra de (Gomes, 2006).

2.1.3.5 Erro da primeira velocidade (K')

O "erro da primeira velocidade" é uma correção fundamental em medições de distância realizadas com instrumentos de MEDs. Essa correção é necessária devido à variação na velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na atmosfera, que não é constante e depende de fatores como temperatura, pressão, composição gasosa e quantidade de vapor d'água presentes no ambiente (Rodriguez et al., 2021).

Esse erro surge da diferença entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade com que ela se propaga na atmosfera, que possui um índice de refração distinto do vácuo. Os MEDs determinam distâncias com base no tempo que um sinal eletromagnético leva para percorrer o trajeto de ida e volta entre o instrumento e um refletor. Cada instrumento é calibrado para operar sob um índice de refração de referência (n_{REF}), que reflete condições atmosféricas padrão. A correção de primeira velocidade (K') é então aplicada para compensar a discrepância entre o índice de refração real da atmosfera (n) e o índice de referência, garantindo a precisão nas medições (Zrinjski et al., 2019).

A correção de primeira velocidade é particularmente importante em medições de alta precisão, pois variações nas condições atmosféricas podem afetar significativamente a velocidade da luz na atmosfera. Por exemplo, uma variação de 1°C na temperatura pode causar um erro de aproximadamente 1 ppm. Além disso, o impacto do erro de primeira velocidade aumenta proporcionalmente à distância medida, tornando a correção ainda mais crítica para longas distâncias (Rodriguez et al., 2021).

Essa correção pode ser aplicada de diferentes formas, dependendo do nível de precisão desejado. Muitos instrumentos modernos permitem a inserção de dados atmosféricos, como temperatura, pressão e, em alguns casos, umidade, para calcular a correção em tempo real durante a medição. Em situações que exigem maior precisão, os dados atmosféricos são coletados em campo e a correção é aplicada posteriormente, durante o processamento dos dados no escritório. O cálculo do índice de refração real (n) é realizado com base em equações específicas que consideram os parâmetros atmosféricos medidos (Rüguer, 1996).

Por fim, é importante ressaltar que a eficácia da correção de primeira velocidade depende diretamente da precisão com que os parâmetros atmosféricos são medidos. Portanto, para obter resultados confiáveis, é essencial utilizar instrumentos adequados e calibrados para medir temperatura, pressão e umidade, especialmente em condições atmosféricas variáveis. Essa abordagem sistemática assegura medições mais precisas e minimiza os impactos do erro de primeira velocidade em levantamentos topográficos e geodésicos.

Para maiores detalhes sobre os erros associados à MED ver Ruguer (1996), Matini (2005), Faggion (2001), Gomes (2006).

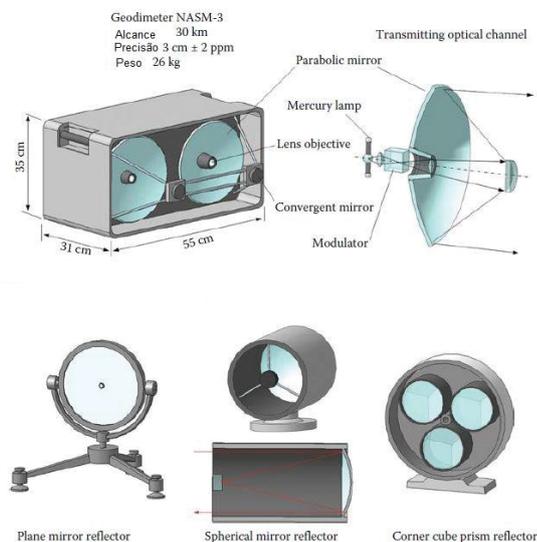
2.2 MEDIDAS ELETRÔNICAS DE DISTÂNCIA

A utilização de medidas eletrônicas de distância (MED) é atualmente a forma mais confiável para determinar a distância entre dois pontos em campo, sendo amplamente empregada em levantamentos topográficos e geodésicos. O desenvolvimento dessa tecnologia teve início no final da década de 1950, porém os primeiros dispositivos apresentavam limitações significativas, como peso elevado e dimensões consideráveis, chegando a pesar até 200 kg com todos os acessórios necessários para seu funcionamento (Levin et al., 2017).

Conforme descrito por Levin et al. (2017), os primeiros MEDs conseguiam alcançar a precisão e o alcance necessários apenas com o uso de refletores ópticos. Essa limitação se devia às fontes de luz disponíveis na época, que eram imperfeitas e compostas por diferentes tipos de lâmpadas com corpos luminosos grandes, baixa velocidade de operação e sensibilidade limitada dos detectores ópticos. Essas fontes de luz, embora potentes, exigiam o uso de moduladores de luz externos de alta velocidade. Além disso, para garantir uma divergência aceitável dos feixes luminosos, era necessário empregar sistemas ópticos volumosos com foco longo.

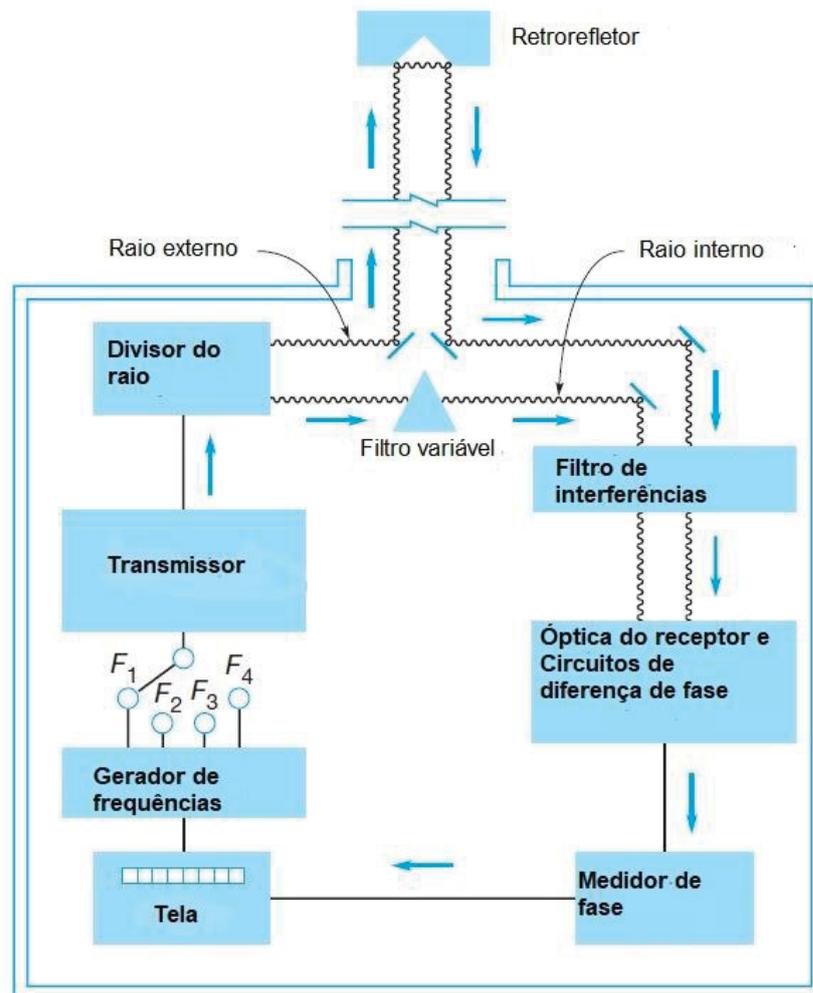
A FIGURA 11 ilustra alguns dos modelos pioneiros de MEDs utilizados no início dessa tecnologia, enquanto a FIGURA 12 apresenta um diagrama geral do funcionamento dos dispositivos modernos.

FIGURA 11: PRIMEIROS MODELOS DE MED.



FONTE: Levin et al. (2017).

FIGURA 12: DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DE UM MED.



FONTE: Adaptado de Ghiliani et al. (2015).

O transmissor utiliza um diodo para emitir luz infravermelha modulada em amplitude (AM), cuja frequência é controlada com precisão por um oscilador de cristal. Essa modulação garante que a luz seja emitida em ciclos regulares, permitindo a medição precisa das distâncias. O divisor de feixe mostrado, separa a luz emitida em dois sinais distintos: um feixe externo de medição e um feixe interno de referência. O feixe externo é direcionado, por meio de um telescópio montado no instrumento MED (Ghilani et al., 2015).

O feixe interno, por sua vez, passa por um filtro de densidade variável que ajusta sua intensidade para igualá-la à do feixe retornado, melhorando a precisão das medições. Ambos os feixes, interno e externo, atravessam um filtro de interferência que elimina luz indesejada antes de serem convertidos em energia elétrica. Durante esse processo, a diferença de fase entre os dois feixes, causada pelos diferentes

comprimentos de seus caminhos, é preservada. Essa diferença de fase é convertida em uma corrente contínua, medida por um medidor de fase, que ajusta os valores até zerar a corrente. O comprimento de onda fracionário resultante é então convertido em distância e exibido (Ghiliani et al., 2015).

Essa técnica, fundamentada na separação e modulação dos feixes, assegura a precisão das medições realizadas pelos instrumentos EDM, mesmo em condições desafiadoras.

Com o avanço dos microchips e a miniaturização de componentes eletrônicos, foi possível reduzir significativamente o tamanho e o peso dos MEDs. Desde a década de 1990, surgiram modelos portáteis e manuais que utilizam lasers vermelhos como fonte de luz. Esses dispositivos são capazes de medir distâncias no modo de reflexão direta de até 200 metros, com precisão variando entre 1 e 5 mm, sem a necessidade de prismas. Essa inovação democratizou o uso dos MEDs e aumentou sua aplicabilidade em diferentes contextos de medição (Copley, 2019).

Para uma revisão histórica mais detalhada sobre a evolução dos Medidores Eletrônicos de Distância, recomenda-se a consulta à tese de (Friedmann, 2013).

2.2.1 Princípios das medidas eletrônicas de distância

Os medidores eletrônicos de distância (MEDs) operam por meio da emissão de uma fonte de luz ou onda eletromagnética, que é direcionada a um alvo. Esse alvo reflete o feixe ou pulso emitido, permitindo que o sinal retorne à fonte emissora, onde é captado por um receptor que processa o sinal recebido (Martini, 2005).

O princípio básico de funcionamento dos MEDs baseia-se na propagação de energia através de um meio, que, no caso dos levantamentos topográficos, é a atmosfera. A velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio é definida pela equação 1.0:

$$V = \lambda \cdot f \quad (1.0)$$

Onde:

V : Velocidade de propagação da onda;

λ : Comprimento de onda e

f : Frequência da onda.

A distância entre o equipamento e o alvo é calculada utilizando-se o intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do sinal eletromagnético, conforme descrito pela equação 2.0:

$$D = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2.0)$$

Onde:

D : Distância medida entre os dois pontos;

c : Velocidade de propagação da luz na atmosfera;

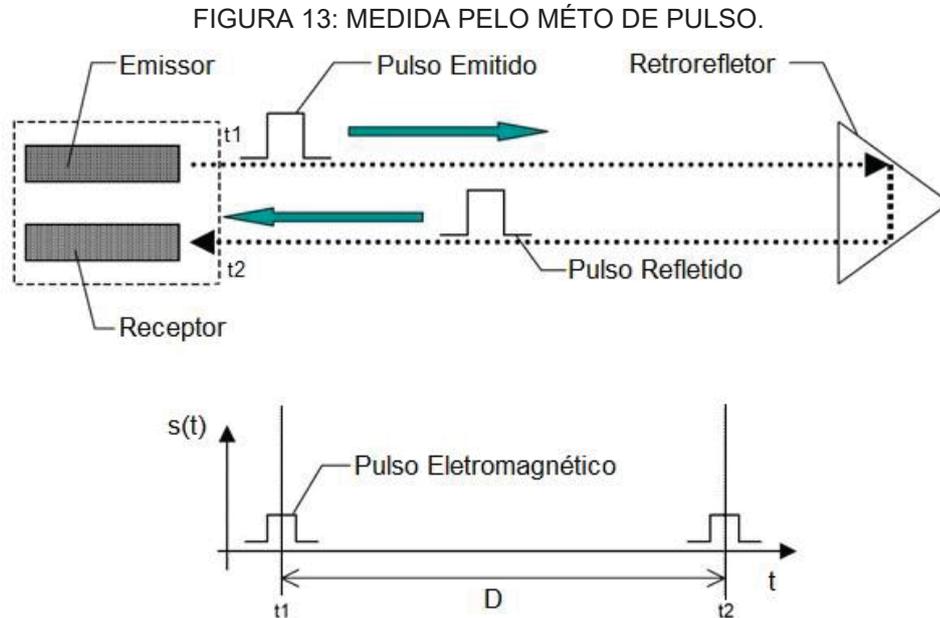
Δt : Intervalo de tempo da emissão da energia eletromagnética até seu retorno.

2.2.2 Método de Pulso e Método de Fase

O método de pulso, também conhecido como *time-of-flight*, baseia-se na emissão de pulsos eletromagnéticos que viajam até um alvo e retornam ao instrumento de medição. A FIGURA 13 demonstra o funcionamento de um MED por pulso, onde é emitido um pulso eletromagnético pelo emissor (t_1), atinge o retrorrefletor e retorna para o receptor (t_2), como $\Delta t = t_2 - t_1$, aplicando-se a equação 2.0 é obtido o valor da distância (D). Para alcançar maior precisão, o instrumento realiza medições consecutivas em uma sequência curta, calculando a média dos tempos registrados. Esse procedimento reduz as incertezas provocadas por flutuações ou ruídos que possam interferir na propagação dos pulsos (Uren; Price, 2010). O método de pulso é amplamente utilizado em aplicações que demandam grande alcance, como *Satellite Laser Ranging* (SLR) e *Lunar Laser Ranging* (LLR), em que a precisão em distâncias extremamente longas é crucial.

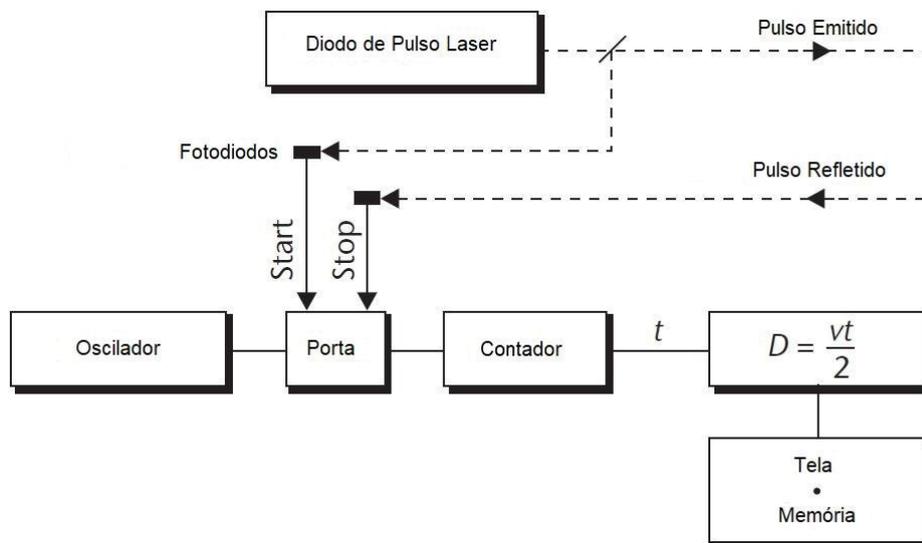
A FIGURA 14 demonstra o diagrama de funcionamento de um MED por pulso cronometrado. O sistema de medição utiliza um diodo laser para gerar pulsos de luz que são transmitidos até um prisma ou alvo e refletidos de volta ao instrumento. Um divisor de feixe desvia parte do pulso para um fotodiodo, que aciona um dispositivo de temporização. Esse dispositivo registra os ciclos entre o pulso transmitido e o

retornado, e técnicas de processamento digital convertem esses dados no tempo de trânsito (t), permitindo o cálculo da distância (Uren; Price, 2010).



FONTE: Adaptado de Bayoud (2006).

FIGURA 14 DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DE UM MED PELO MÉTODO DE PULSO.

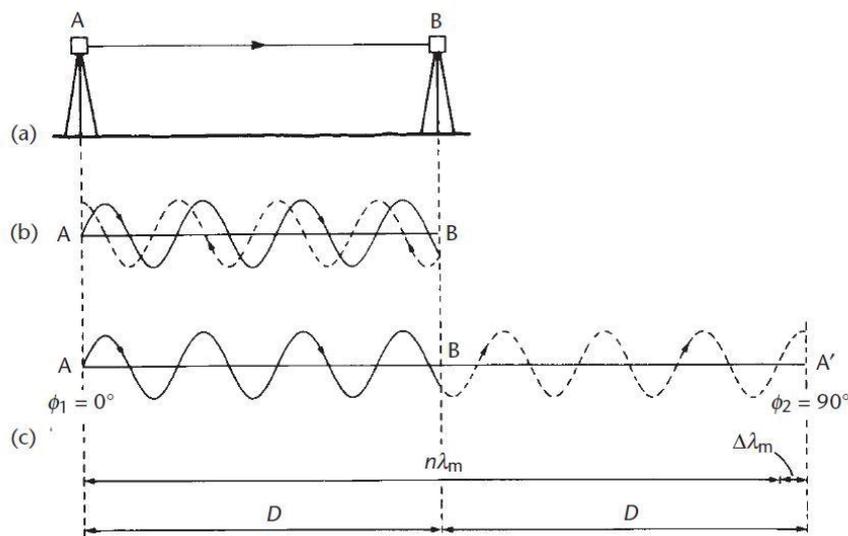


FONTE: Adaptado de Uren; Price (2010).

O método de medição por diferença de fase mede a distância (D) ao determinar a diferença no ângulo de fase entre os sinais transmitidos e refletidos. Essa

diferença de fase, geralmente expressa como uma fração de um ciclo, é convertida em distância quando a frequência e a velocidade da onda são conhecidas. A FIGURA 15 exemplifica o princípio do método de medição de fase (Martini, 2005). Na FIGURA 15a, uma estação total é configurada no ponto A e um prisma refletor no ponto B, onde a distância $AB = D$ é medida. Na FIGURA 15b, o trajeto da onda é representado: o sinal é transmitido de A para B, refletido e retornado à A. Para maior clareza, a FIGURA 15c apresenta o trajeto expandido, mostrando que a onda cobre o percurso $2D$, sendo composta de múltiplos $n\lambda_m$ e uma fração $\Delta\lambda_m$ (Uren; Price, 2010).

FIGURA 15: MÉTODO DE MEDIÇÃO POR FASE.



FONTE: Uren; Price (2010)

A distância (D) é calculada pela equação 3.0:

$$2D = n\lambda_m + \Delta\lambda_m \quad (3.0)$$

Onde:

D : Distância calculada entre os pontos;

n : Número inteiro de comprimentos de onda na onda portadora;

λ_m : Comprimento de onda da onda de medição e

$\Delta\lambda_m$: Fração de comprimento de onda contida na onda de medição.

A distância total é composta por duas partes obtidas por processos distintos. O primeiro processo envolve a medição da fase, que determina $\Delta\lambda_m$. Considerando que a onda parte do ponto A com fase ϕ_1° e retorna ao receptor no ponto A' com fase ϕ_2° , $\Delta\lambda_m$ é calculada pela equação 3.1:

$$\Delta\lambda_m = \frac{(\phi_2^\circ - \phi_1^\circ)}{360} \cdot \lambda_m \quad (3.1)$$

No entanto, como o valor de fase ϕ_2° pode ser atribuído a qualquer comprimento de onda recebido no ponto A' , a medição de fase só pode determinar a fração de comprimento de onda percorrida além de um número inteiro (n) de comprimentos de onda. Portanto, é necessário resolver a ambiguidade da medição de fase para determinar $n\lambda_m$, a outra parte desconhecida da distância.

Esse problema pode ser solucionado de duas formas:

1. Variando o comprimento de onda de medição em múltiplos de 10 até obter uma aproximação suficiente de D ;
2. Realizando medições com diferentes comprimentos de onda relacionados, formando um sistema de equações simultâneas baseadas na fórmula $2D = n\lambda_m + \Delta\lambda_m$ (Uren; Price, 2010).

O método de medição por diferença de fase é amplamente utilizado devido ao seu maior alcance em medições, possibilitando visadas longas com alta precisão (Medeiros, 2020).

No método de medida eletrônica de distância por fase, a modulação da onda é um processo fundamental que permite a medição precisa da distância através da análise da diferença de fase entre as ondas emitidas e recebidas (Rüguer, 1996).

A TABELA 1 compara os dois métodos.

TABELA 1: COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE DISTÂNCIA.

Características	Método de Pulso	Método de Fase
Princípio	Tempo de voo (time-of-flight)	Diferença de fase, modulação da onda
Precisão	Menor em curtas distâncias	Maior, especialmente em curtas distâncias

Complexidade	Instrumentação simples	mais	Instrumentação mais complexa
Aplicações típicas	Longas distâncias, sem prisma	sem	Curtas e médias distâncias, com prisma

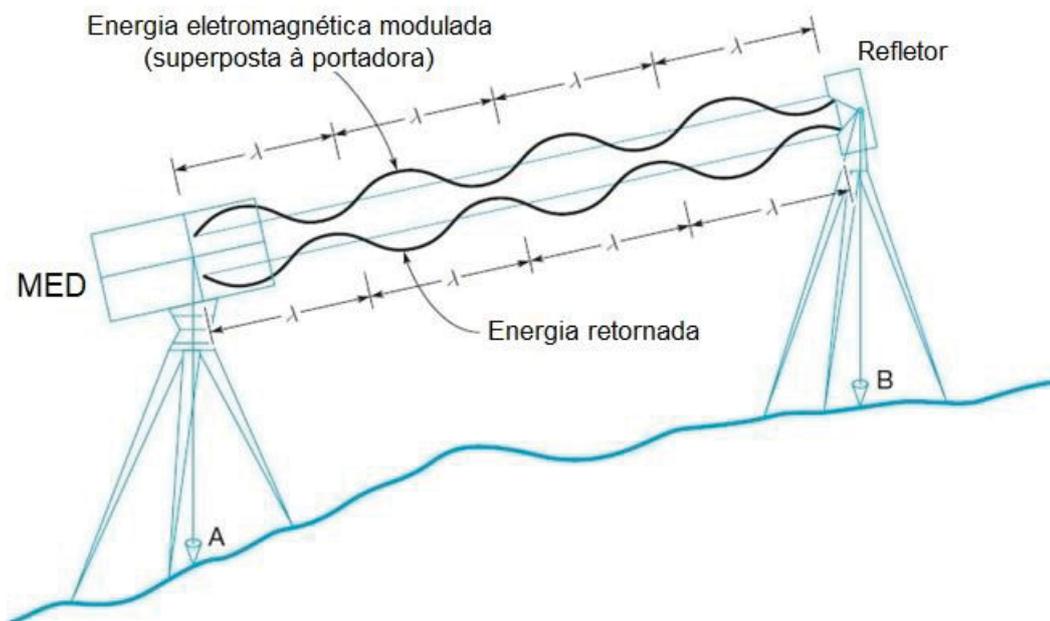
FONTE: O autor (2024).

2.2.3 Modulação da onda

A estabilidade da frequência da onda portadora é essencial para garantir a precisão nas medições realizadas por medidores eletrônicos de distância (MED). A relação entre o comprimento de onda (λ), a velocidade (v) e a frequência (f), expressa pela equação $\lambda = \frac{v}{f}$, determina a exatidão dos resultados obtidos (Ghiliani et al., 2015).

Para garantir alta precisão, os MEDs utilizam ondas portadoras moduladas, geradas por lasers infravermelhos ou visíveis, que são transmitidas como feixes de baixa amplitude e baixa divergência angular (FIGURA 16), possibilitando maior alcance e ampliando as aplicações do instrumento (Medeiros, 2020).

FIGURA 16: PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA PORTADORA.



FONTE: Adaptado de Ghiliani et al. (2015).

A modulação de onda é um componente essencial no funcionamento dos MEDs. Essa técnica permite a medição precisa de distâncias ao modificar características específicas da onda portadora, como amplitude, frequência ou fase,

para transportar informações necessárias ao cálculo da distância (Ghiliani et al., 2015). A modulação é amplamente utilizada para superar desafios associados à propagação atmosférica e à medição de distâncias com alta precisão (Uren; Price, 2010). Existem três tipos principais de modulação:

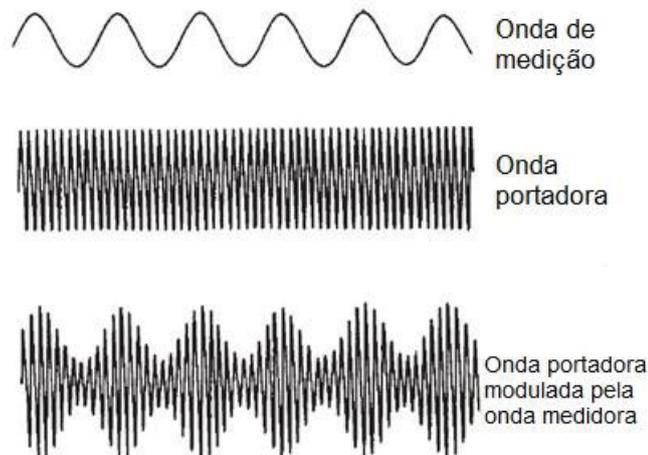
- Modulação em Amplitude (AM): A amplitude da onda portadora varia conforme o sinal modulador.
- Modulação em Frequência (FM): A frequência da onda portadora é alterada pelo sinal modulador.
- Modulação em Fase (PM): A fase da onda portadora é ajustada de acordo com o sinal modulador.

A Modulação de Fase é amplamente empregada no método da diferença de fase, essa técnica utiliza ondas eletromagnéticas emitidas com fases moduladas, permitindo determinar a diferença de fase entre a onda emitida e a refletida. Essa diferença é proporcional à distância percorrida. Essa abordagem é ideal para medições de alta precisão, superando as limitações de comprimentos de onda curtos, como o infravermelho (Martini, 2005).

A Modulação de Amplitude é usada principalmente em estações totais, a amplitude da onda portadora, geralmente um laser vermelho ou infravermelho, é modulada conforme o sinal de medição. Isso permite o uso de frequências mais altas, reduzindo interferências atmosféricas e garantindo propagação estável do sinal (Levin et al., 2017).

A FIGURA 17 ilustra o princípio da modulação por amplitude, destacando como a onda de medição é utilizada para variar a amplitude da onda portadora.

FIGURA 17: MODULAÇÃO DE UMA PORTADORA.



FONTE: Adaptado de Uren; Price (2010).

Para garantir a precisão das medições, a frequência da onda portadora e o comprimento de onda de medição (λ_m) desempenham papéis importantes. Um valor típico para λ_m é de 10 metros, correspondente a uma frequência de 30 MHz, que se situa na faixa VHF (*Very High Frequency*) do espectro eletromagnético (Ghiliani et al., 2015).

Embora essa frequência seja facilmente gerada, ela está sujeita a interferências atmosféricas. Para mitigar esses efeitos e manter a propagação eficiente pela atmosfera, a modulação é aplicada.

De acordo com Uren; Price (2010), a modulação permite o uso de $\lambda_m = 10$ metros sem perda significativa de sinal, ao modular a onda de medição com uma onda portadora de frequência mais alta.

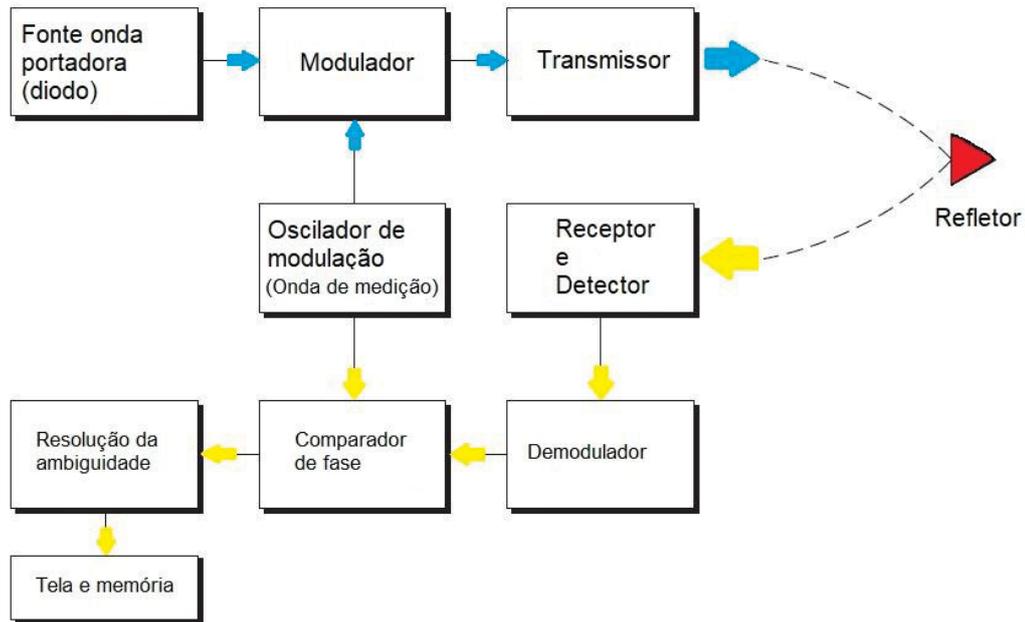
Essa abordagem também facilita a identificação do número de comprimentos de onda inteiros percorridos pela onda refletida, resolvendo a ambiguidade na medição de fase.

Segundo Uren; Price (2010) a modulação de ondas nos MEDs oferece vantagens significativas:

- Aumento da Precisão: A modulação de fase permite medições precisas da diferença de fase, mesmo em longas distâncias.
- Robustez contra Interferências: A modulação estabiliza a propagação do sinal, reduzindo os efeitos de ruído e variações atmosféricas.
- Versatilidade Operacional: A modulação de amplitude facilita o uso de lasers em frequências elevadas, que são mais adequadas para aplicações modernas.

A modulação de ondas, especialmente as técnicas de modulação de fase e amplitude, é um elemento essencial no funcionamento dos MEDs. Essa tecnologia permite superar os desafios impostos pelas condições atmosféricas e pelas características físicas das ondas eletromagnéticas, garantindo medições confiáveis e precisas em diversos contextos. A FIGURA 18 apresenta um diagrama geral do funcionamento dessas técnicas em MEDs modernos.

FIGURA 18: DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DE UM MED MODERNO.



FONTE: Adaptado de Uren; Price (2010)

2.2.4 Influências nas medidas eletrônicas de distância

As medições eletrônicas de distância estão sujeitas a uma série de fatores que podem influenciar tanto o sinal emitido quanto o sinal refletido, retornando ao equipamento de medição. Dentre esses fatores, destacam-se o tipo de reflexão gerado pela superfície, a divergência do feixe emitido e as condições atmosféricas, que podem interferir diretamente na precisão e confiabilidade dos resultados obtidos.

2.2.4.1 Reflexão total e reflexão difusa

As medições de distância realizadas por equipamentos de medição eletrônica de distância (MED) requerem que o sinal emitido retorne ao equipamento, o que é possível por meio de dois métodos principais: reflexão total e reflexão difusa. A escolha entre esses métodos depende da aplicação e das características do ambiente.

A reflexão total ocorre quando o feixe de luz incidente sobre uma superfície retorna paralelo ao feixe original, devido à utilização de dispositivos ópticos específicos, como os prismas retrorrefletores. Esses prismas são compostos por três superfícies ortogonais que garantem o retorno do feixe com um desvio de 180°,

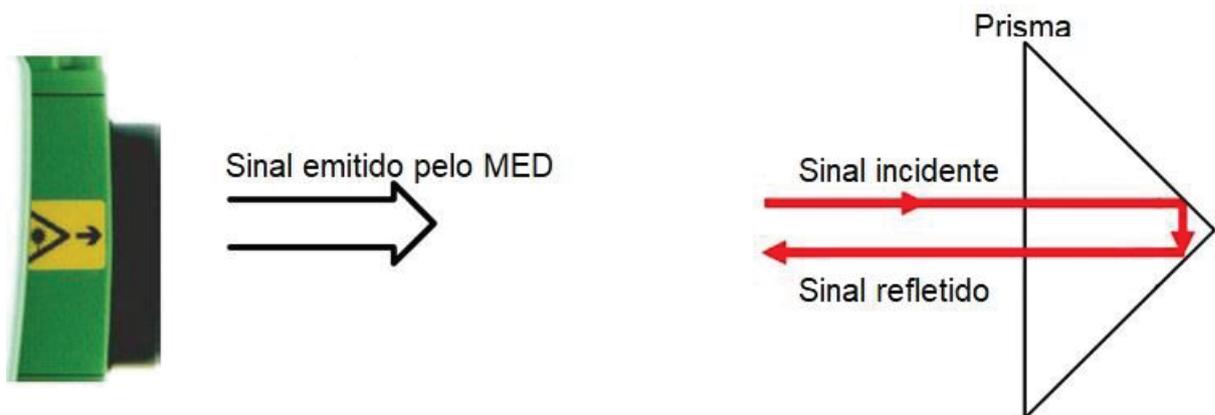
independente do ângulo de incidência. A geometria do prisma assegura alta eficiência na devolução do sinal, sendo amplamente utilizado em aplicações que requerem medições de alta precisão e longas distâncias (Martini, 2005).

Exemplos de aplicação:

- Prismas refletores de vidro, comuns em medições de precisão.
- Fitas adesivas retro refletivas, como as utilizadas em rodovias para sinalização.

A principal vantagem desse método é o retorno (reflexão) quase integral do sinal ao equipamento, resultando em medições confiáveis mesmo em grandes distâncias. Contudo, exige a presença de refletores especializados, limitando sua aplicação a situações em que esses dispositivos possam ser instalados.

FIGURA 19: ILUSTRAÇÃO DA REFLEXÃO TOTAL.



FONTE: Adaptado de Leica (2020).

A reflexão difusa (FIGURA 20) ocorre quando o feixe de luz incide sobre uma superfície irregular, sendo disperso em várias direções. Apenas uma parte do sinal refletido retorna ao MED, o que torna esse método menos eficiente para medições em longas distâncias. Contudo, sua grande vantagem é a capacidade de realizar medições sem a necessidade de refletores específicos, possibilitando a medição direta em superfícies naturais ou artificiais (Martini, 2005).

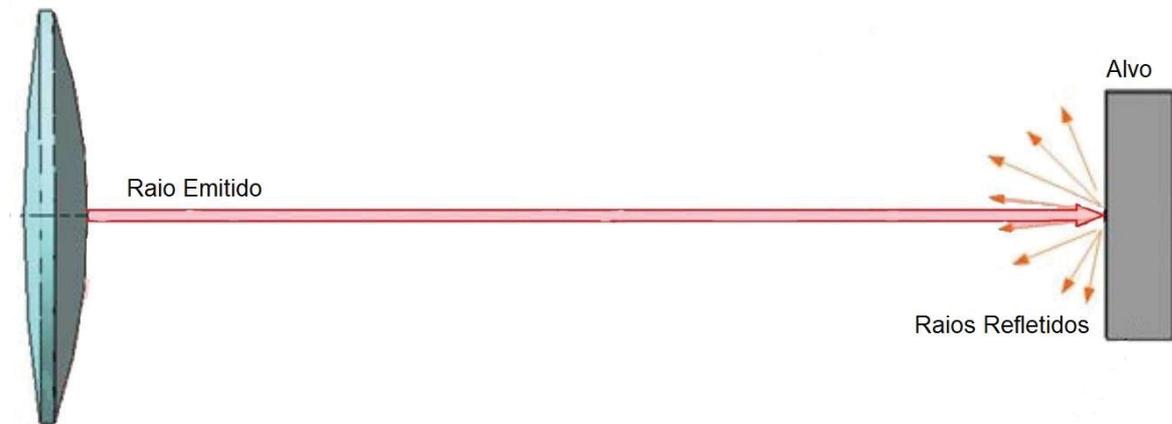
A intensidade do sinal refletido pode ser calculada com base na Lei de Lambert, que descreve como a energia luminosa é distribuída sobre uma superfície. Fatores como rugosidade, cor e o ângulo de incidência da superfície afetam diretamente o desempenho desse método. Equipamentos modernos, como algumas

estações totais e trenas a laser, utilizam fontes de luz coerente, como lasers, para melhorar a eficiência da reflexão difusa, mesmo em condições menos favoráveis (Martini, 2005).

Exemplos de aplicação:

- Medição de superfícies sem retrorefletores, como paredes ou terrenos.
- Instrumentos portáteis para medições rápidas e em curtas distâncias.

FIGURA 20: REFLEXÃO DIFUSA.



FONTE: Adaptado de Levin et al. (2017).

A TABELA 2 demonstra as características de cada tipo de reflexão.

TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DA REFLEXÃO TOTAL E REFLEXÃO DIFUSA.

Característica	Reflexão Total	Reflexão Difusa
Necessidade de alvo	Requer prismas retrorefletores	Não requer alvos específicos
Eficiência do sinal	Alta eficiência em longas distâncias	Baixa eficiência, limitada a curtas distâncias
Aplicações	Medições precisas em grandes distâncias	Medições em superfícies naturais ou irregulares

FONTE: O autor (2024).

2.2.4.2 Divergência do feixe emitido

Segundo Levin et al. (2017) a divergência do feixe emitido por um equipamento de medição eletrônica de distância (MED) é um fator crítico que afeta o alcance, a

precisão e a intensidade do sinal de retorno. Este fenômeno, essencial para o funcionamento dos MEDs, está relacionado à expansão do feixe de luz conforme ele se propaga a partir da fonte emissora.

A divergência do feixe é definida como o ângulo subtendido pelos pontos onde o perfil de potência do feixe atinge 50% de sua intensidade máxima. Em termos mais práticos, trata-se da medida de quão espalhado o feixe de luz se torna à medida que se afasta da fonte. Em equipamentos de laser semicondutor, a área de emissão do laser tem dimensões típicas de cerca de $1,5 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$, com ângulos máximos de divergência (θ_e) que variam entre 6° e 60° , dependendo do plano (Levin et al., 2017).

Quando a área luminescente está posicionada no foco de uma lente condensadora, os feixes centrais tornam-se paralelos, enquanto os das extremidades divergem em um ângulo específico (θ_0), que pode ser calculado pela equação 4.0.

$$\theta_0 = \frac{D_e}{f} \quad (4.0)$$

Onde:

D_e : Tamanho da área luminescente captada pela lente e

f : Distância focal da lente.

A divergência do feixe tem implicações diretas no desempenho dos MEDs:

- Alcance: Uma maior divergência reduz a intensidade do sinal que atinge o refletor, limitando o alcance máximo do MED, especialmente em aplicações de reflexão difusa (Friedmann, 2013).
- Intensidade do Sinal: À medida que o feixe se expande, a energia é distribuída por uma área maior, resultando em uma intensidade menor no ponto de impacto (Martini, 2005).
- Precisão: Feixes altamente divergentes podem gerar medições menos precisas devido à dispersão do sinal de retorno (Rüguer, 1996).

Quando prismas refletores são usados, a potência luminosa (F_r) que atinge o alvo é determinada pela equação 5.1.

$$F_r = \frac{\tau^S F_{out} \omega_{r1}}{\omega_l} \quad (4.1)$$

Onde:

F_r : Potência luminosa que atinge o alvo;

τ^S : Transmitância atmosférica ao longo da distância S;

ω_l : Ângulo sólido da fonte de emissão do feixe;

ω_{r1} : Ângulo sólido do feixe quando atinge o alvo.

Considerando as perdas de sinal devido à divergência, a potência luminosa observada (F_{ob}) no receptor pode ser expressa pela equação 5.2:

$$F_{ob} = \frac{\tau^S 0,8 F_r \theta_{obj}^2}{\theta_l^2} = \frac{\tau^{2S} 0,8 F_{out} D_{ref}^2 D_{obj}^2}{S^4 \theta_l^4} \quad (4.2)$$

Para determinar o alcance máximo de um MED, considerando a divergência do feixe emitido, a equação 4.3 é utilizada:

$$S = \frac{0,8}{\theta_l^4 \sqrt{\frac{n F_{out} \tau^{2S} D_{ref}^2 D_{obj}^2}{F_{in}}}} \quad (4.3)$$

Onde:

S: Alcance máximo do MED;

n: Número de prismas no refletor;

D_{ref} : Diâmetro do prisma refletor;

D_{obj} : Diâmetro da lente do receptor;

F_{in} : Potência luminosa incidente, definida como $F_{in} = 0,5 \cdot F_{ob}$.

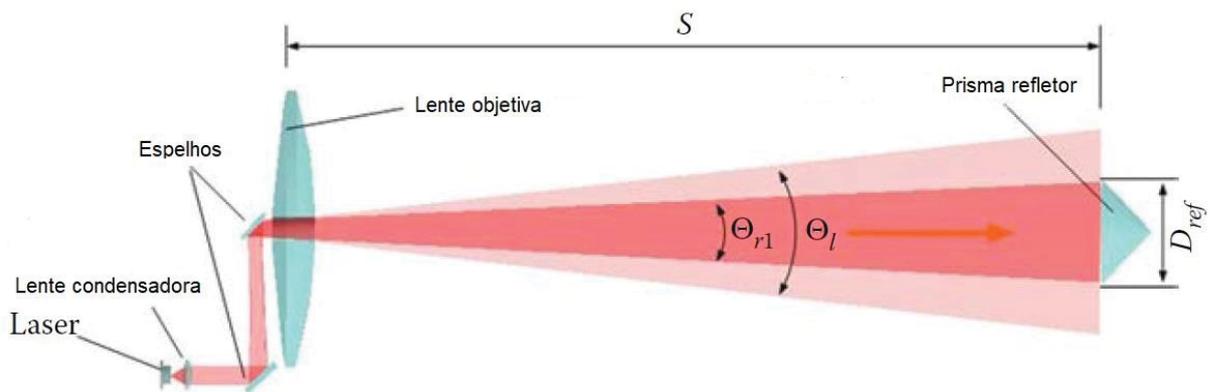
Levin et al. (2017) faz as seguintes considerações práticas sobre a divergência do feixe emitido.

- Escolha do MED: Para medições a longas distâncias, é preferível um equipamento com baixa divergência de feixe, garantindo maior intensidade de retorno e precisão.

- Influência do Comprimento de Onda: Comprimentos de onda menores, como os usados em lasers, tendem a apresentar menor divergência, o que melhora o desempenho em distâncias maiores.
- Reflexão Direta vs. Refletiva: Em MEDs com reflexão direta, o alcance varia de acordo com o tipo de superfície medida, desde 110 m (papel preto) até 670 m (placas refletoras especiais). Já com prismas refletoras, o alcance pode chegar a 2000 m, especialmente em equipamentos com tecnologia de digitalização de forma de onda, ou *waveform digitizing* (WFD).

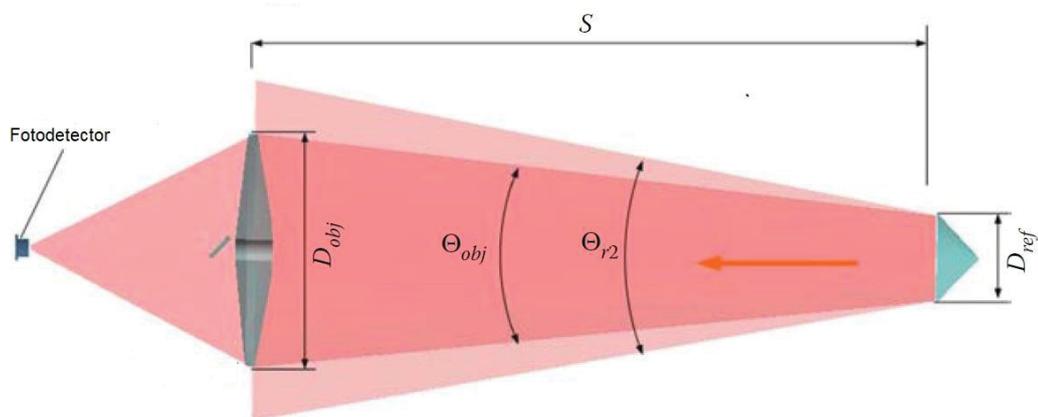
A FIGURA 21 e a FIGURA 22 demonstram a divergência do raio a partir do emissor e a partir do prisma refletor, respectivamente.

FIGURA 21: DIVERGÊNCIA DO SINAL EMITIDO.



FONTE: Adaptado de Levin et al. (2017).

FIGURA 22: DIVERGÊNCIA DO SINAL REFLETIDO.



FONTE: Adaptado de Levin et al. (2017).

2.2.4.3 Influência da atmosfera nas medidas eletrônicas de distância

A propagação de ondas eletromagnéticas utilizadas em medições eletrônicas de distância (MED) é influenciada pelas condições atmosféricas. Parâmetros como temperatura, pressão e umidade do ar afetam a velocidade de propagação, a intensidade do feixe e o percurso ideal da onda, resultando em potenciais desvios e erros nas medições.

A temperatura é o parâmetro mais significativo no impacto às medições de distância. À medida que a temperatura aumenta, a densidade do ar diminui, o que acelera a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. Esse fenômeno pode resultar em leituras de distância menores que a real, especialmente em medições de alta precisão (Rodriguez, 2018).

A pressão atmosférica altera a densidade do ar de maneira inversa à temperatura. Um aumento na pressão eleva a densidade do ar, reduzindo a velocidade de propagação da onda e provocando medições ligeiramente maiores. Embora o efeito da pressão seja menor que o da temperatura, ele não deve ser desconsiderado em aplicações críticas (Silva, 2012).

A umidade relativa afeta a propagação das ondas eletromagnéticas devido ao vapor d'água presente na atmosfera. Em geral, o impacto da umidade é menos pronunciado, mas sua influência pode ser relevante em condições extremas, como em climas tropicais ou úmidos (Rodriguez et al., 2021).

A absorção ocorre quando moléculas de vapor d'água reduzem a intensidade do feixe eletromagnético durante sua propagação. Para os comprimentos de onda frequentemente usados em MEDs, este efeito é considerado pequeno, mas em condições específicas, como alta umidade, ele pode tornar-se relevante (Garrido-Villén et al., 2015).

A dispersão é causada pela interação de fótons com partículas ou moléculas na atmosfera, resultando na redistribuição angular da radiação. Pode ser classificada em:

- Dispersão de Rayleigh: Ocorre quando a luz interage com moléculas de gás, sendo mais significativa para comprimentos de onda curtos, como na névoa.
- Dispersão de Mie: Resulta da interação com aerossóis, cujas partículas têm tamanho comparável ao comprimento de onda da luz. Sua

intensidade varia de acordo com a concentração e composição dos aerossóis, que apresentam grande variabilidade espacial e temporal (Garrido-Villén et al., 2015).

A cintilação atmosférica é o resultado de flutuações aleatórias no índice de refração do ar, causadas pela turbulência térmica. Esse fenômeno cria uma distribuição aleatória de células de ar de diferentes tamanhos (10 cm–1 km), que afetam a amplitude e a frequência do feixe laser. A amplitude da cintilação é proporcional ao grau de turbulência no meio de propagação (Sivasligil et al., 2013).

A refração atmosférica é caracterizada pelo desvio do feixe de luz em função de gradientes no índice de refração do ar, especialmente em ambientes adversos, como minas ou áreas com grandes variações térmicas. Esse desvio altera o percurso do feixe, impactando diretamente a distância medida. Para minimizar esse efeito, é essencial conhecer as condições atmosféricas locais no momento da medição (Levin et al., 2017).

Aplicações Práticas e Impactos dos efeitos atmosféricos nas medidas eletrônicas de distância:

Ambientes Complexos: Em locais como minas, a presença de vibrações, poeira e variabilidade atmosférica aumenta a complexidade da propagação do feixe, exigindo maior atenção para garantir a confiabilidade das medições (Garrido-Villén et al., 2015).

Condições Extremas: Em climas severos, como desérticos ou tropicais, fenômenos como dispersão e absorção atmosférica tornam-se mais intensos, reduzindo o alcance efetivo do MED (Garrido-Villén et al., 2015).

Impacto no Alcance: O alcance máximo dos MEDs depende da interação entre os parâmetros atmosféricos e o tipo de feixe utilizado. Por exemplo, a dispersão e a absorção limitam a propagação de feixes em condições de alta turbidez ou umidade (Afeni, 2011).

2.2.4.3.1 Correções atmosféricas

As correções atmosféricas para medições eletrônicas de distância (MED) incluem três componentes principais: correção da primeira velocidade, correção da segunda velocidade e correção de curvatura da linha de visada. Essas correções são

necessárias para compensar os efeitos da variação do índice de refração da atmosfera, que impacta diretamente a precisão das medições.

A correção da primeira velocidade (K') ajusta as distâncias medidas com base no índice de refração, levando em consideração os parâmetros atmosféricos: pressão (p), temperatura (t) e umidade relativa (e) (Rodriguez, 2018). Qualquer desvio em relação às condições padrão especificadas pelo fabricante da estação total gera erros nas distâncias medidas, que devem ser corrigidos conforme indicado na equação 5.0 (Rüguer, 1996)

$$C = (n_{Ref} - 1) \cdot 10^6 = N_{Ref}$$

$$D = (n_g - 1) \cdot 10^6 \cdot \frac{273,15}{1013,25} = \frac{273,15}{1013,25} \cdot N_g$$

$$K' = \left[C - \frac{D \cdot p}{(273,15+t)} + \frac{11,27 \cdot e}{(273,15+t)} \right] \cdot 10^6 \quad (5.0)$$

Onde:

N_{Ref} : Índice de refração de referência,

N_g : Grupo do índice de refração,

p : Pressão atmosférica medida em milibar (mb),

e : Umidade relativa do ar medida em % e

t : Temperatura seca do ambiente medida em graus Célsius (°C)

A correção no ponto de emissão do sinal (K_1) e no alvo (K_2) pode ser combinada para calcular K' com a média dos valores:

$$K' = \frac{(K_1 + K_2)}{2} \quad (5.1)$$

Como o índice de refração varia com o comprimento de onda, cada equipamento possui valores específicos fornecidos pelo fabricante. Por exemplo, a

Leica define em seu manual a correção da primeira velocidade conforme a equação 5.3:

$$\alpha = \frac{1}{273,15}$$

$$x = \frac{7,5 \cdot t}{273,15 + t} + 0,7857$$

$$\Delta D_1 = 286,338 - \left[\frac{0,29535 \cdot p}{(1 + \alpha \cdot t)} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{(1 + \alpha \cdot t)} \cdot 10^x \right] \quad (5.3)$$

Variáveis:

ΔD_1 : Correção atmosférica (ppm),

p : Pressão atmosférica (mb),

h : Umidade relativa do ar (%) e

t : Temperatura seca do ambiente (°C).

A correção da segunda velocidade (K'') é necessária para ajustar discrepâncias adicionais causadas pela variação vertical do índice de refração em uma atmosfera estratificada (Afeni, 2011). Para um caminho curvado com raio médio R e distância eletrônica d' (FIGURA 23), a correção é dada pela equação 5.5.

$$K'' = -(k - k^2) \cdot \frac{d'^3}{12 \cdot R} \quad (5.5)$$

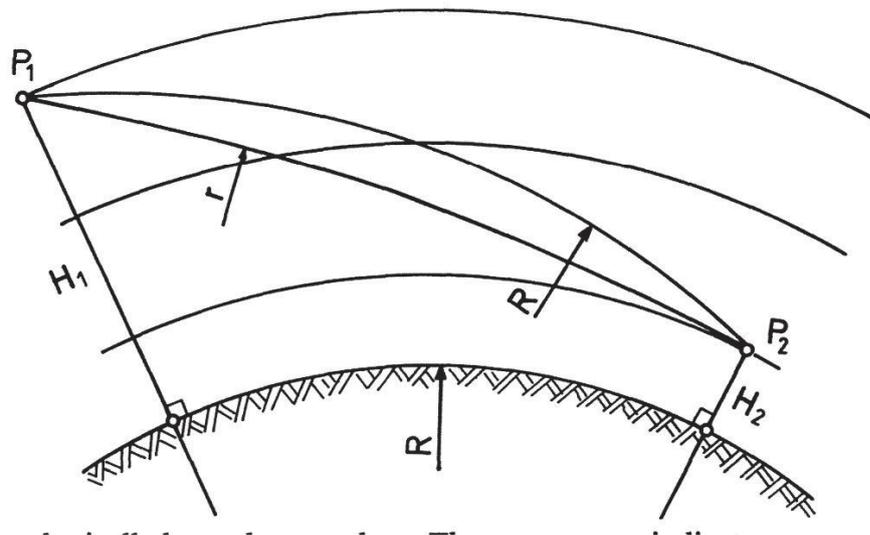
Onde:

k : Coeficiente de refração,

d' : Distância eletrônica e

R : Raio médio de curvatura, geralmente adotado o valor de 6730 km.

FIGURA 23: CORREÇÃO DA SEGUNDA VELOCIDADE (K").



FONTE: Rügner (1996).

Durante medições de distância entre dois pontos (P_1 e P_2), as ondas de luz propagadas pelo módulo EDM da estação total não seguem uma trajetória linear. O gradiente vertical no índice de refração gera um caminho curvado, exigindo a redução do comprimento do arco para o comprimento da corda. Esse ajuste é conhecido como correção de curvatura da linha de visada (Rügner, 1996).

Por exemplo, considerando o raio da Terra (R) conhecido e assumindo $d_1 = 1000,00 \text{ m}$, a correção para curvatura resulta em aproximadamente $0,77 \mu\text{m}$ (Afeni, 2011). A variação de k entre $-0,4$ e $+0,4$ causa correções de 1 a $3 \cdot 10^{-3} \text{ ppm}$, sendo a primeira correção de velocidade mais relevante em distâncias curtas (até 1 km).

As correções atmosféricas, incluindo a primeira e a segunda velocidades e a curvatura da linha de visada, são indispensáveis para medições de alta precisão em levantamentos geodésicos e topográficos. As fórmulas apresentadas, além de métodos específicos fornecidos por fabricantes, auxiliam na mitigação de erros causados pela variabilidade atmosférica. Para maior aprofundamento, recomenda-se consultar a tese de doutorado de (Rodríguez, 2018).

2.3 PRISMAS REFLETORES

Em topografia, o uso de alvos para pontaria é utilizado para realizar medições de distâncias e ângulos. Esses alvos servem como pontos de referência bem

definidos, permitindo que instrumentos como estações totais calculem as coordenadas espaciais de pontos de interesse no terreno ou objeto medido. Prismas refletores servem também como alvos e permitem o retorno do sinal de medição para determinação da distância.

As estações totais emitem um sinal eletromagnético que precisa ser refletido de volta ao instrumento para que a medição seja concluída (Friedmann, 2013). Os prismas são projetados para maximizar a retroreflexão, ou seja, retornar o sinal na mesma direção de sua origem, assegurando maior precisão nas medições (Martini, 2005).

Conforme Martini (2005), existem diferentes tipos de prismas, cada um com características específicas que os tornam mais adequados para aplicações distintas, como:

- Prismas de vidro: São os mais eficientes, oferecendo alta retroreflexão. São ideais para medições de alta precisão, especialmente em longas distâncias.
- Refletores de acrílico: Alternativa mais econômica, composta por microrefletores de canto. São eficazes em distâncias menores e amplamente utilizados no monitoramento de estruturas.
- Fitas adesivas refletoras: Opção de baixo custo indicada para curtas distâncias, comumente empregada no monitoramento estrutural.

A escolha do tipo depende da aplicação. Em levantamentos topográficos convencionais, os prismas de vidro são frequentemente preferidos devido à sua alta precisão. Para o monitoramento estrutural em curtas distâncias, refletores de acrílico ou fitas adesivas são opções mais acessíveis, permitindo a instalação de múltiplos alvos para acompanhar movimentações ao longo do tempo.

Características como forma, material e constante do prisma afetam diretamente a precisão das medições. A constante do prisma, por exemplo, refere-se ao deslocamento do sinal dentro do prisma e deve ser considerada para assegurar a exatidão no cálculo da distância.

Portanto, a seleção do prisma deve levar em conta as necessidades específicas de cada projeto, considerando fatores como precisão requerida, distâncias a serem medidas, condições do terreno e o tipo de instrumento utilizado.

2.3.1 Geometria dos prismas

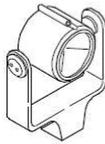
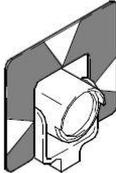
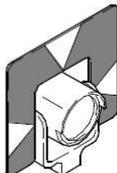
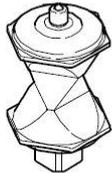
A geometria dos prismas tem influência na qualidade e precisão das medições topográficas. Formas, tamanhos e materiais distintos influenciam diretamente a forma como o sinal é refletido de volta ao instrumento, impactando a exatidão das medições.

Conforme Ribeiro et al. (2020), os principais formatos de prismas incluem:

- Prismas de Canto de Cubo: A configuração mais comum em prismas de vidro, projetada para garantir retroreflexão eficiente, direcionando o sinal diretamente de volta à sua origem.
- Prismas 360°: Compostos por múltiplos prismas de canto de cubo dispostos em um arranjo circular, esses alvos são ideais para situações em que o alinhamento preciso é desafiador, refletindo o sinal independentemente da orientação.
- Refletores Planos: Formados por microrefletores de canto, oferecem uma solução econômica, porém limitada a medições de curta distância.
- Alvos Hexagonais: Comumente utilizados em escaneamento a laser, sua simetria hexagonal facilita a determinação precisa do centro, essencial para levantamentos tridimensionais.

A FIGURA 24 ilustra diferentes tipos de prisma da marca Leica.

FIGURA 24: TIPOS DE PRISMA.

Model:	GPH1P	GPR121	GPR1+GPH1	Mini GMP101	GRZ122	GMP111
Image:						
Material:	Metal	Metal	Plastic	Metal	Metal	Metal
Centering Accuracy:	0,3 mm	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm	2,0 mm	2,0 mm
Leica Constant	0	0	0	+17,5 mm	+23,1 mm	+17,5 mm

FONTE: Leica (2017).

A geometria dos alvos também influencia a eficiência da retroreflexão em função do ângulo de incidência. Por exemplo: prismas de vidro e fitas adesivas podem sofrer perda de eficiência quando o ângulo de incidência excede 50°. Refletores de

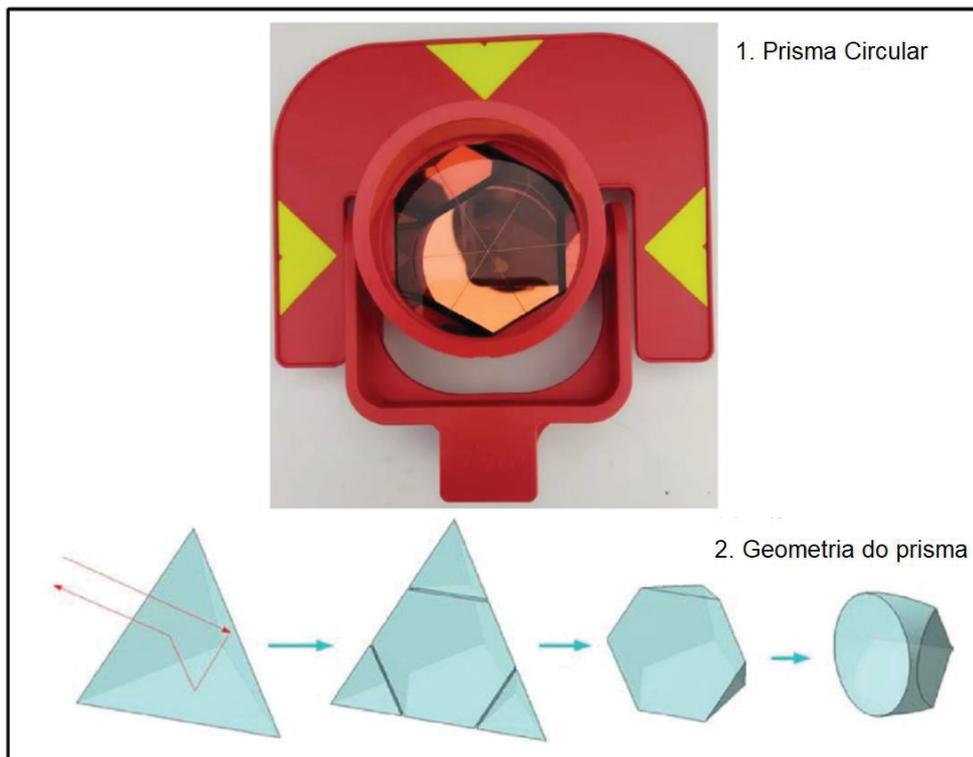
acrílico apresentam limitações a partir de ângulos superiores a 25° (Zrinjski et al., 2019).

2.3.1.1 Prismas circulares

Os prismas circulares representam uma ferramenta comum em levantamentos topográficos, sendo amplamente utilizados em conjunto com estações totais.

Sua construção geométrica, composta por três prismas triangulares dispostos em um canto de cubo encapsulados em uma carcaça circular, permite refletir a luz incidente de volta à fonte, independentemente do ângulo de incidência, dentro de determinados limites FIGURA 25. Essa funcionalidade é particularmente útil para garantir confiabilidade e precisão em aplicações diversas (Leica, 2017).

FIGURA 25: GEOMETRIA DE UM PRISMA CIRCULAR.



FONTE: 1. O autor (2024) e 2. Adaptado de Levin et al. (2017).

Os prismas circulares geralmente possuem um diâmetro entre 62 mm e 65 mm, com algumas marcas utilizando prismas menores com 50 mm. Essa dimensão é

projetada para maximizar a eficiência na recepção do sinal pela estação total. As faces refletoras desses prismas são frequentemente revestidas com materiais como prata, cobre ou ouro, o que aumenta a refletividade, particularmente em comprimentos de onda infravermelhos, garantindo medições consistentes (Leica, 2017).

Um aspecto crítico na performance dos prismas circulares é o revestimento antirreflexo aplicado na face frontal do prisma. Esse revestimento minimiza as perdas de sinal por reflexão indesejada, um fator que, caso negligenciado, pode introduzir erros de medição de até 3 mm (Rüguer, 1996). Assim, a escolha de prismas com revestimento adequado ao comprimento de onda do sinal utilizado é indispensável para alcançar alta precisão.

A principal vantagem dos prismas circulares reside em sua exatidão nas medições, o que os torna adequados para tarefas que exigem rigor metrológico, como levantamentos topográficos detalhados, monitoramento de deslocamentos em estruturas e a instalação de marcos geodésicos (Friedmann, 2013).

Entretanto, há limitações a serem consideradas, a necessidade de alinhamento com a linha de visada da estação total, pois desalinhamentos podem introduzir erros (Martini, 2005).

Quando comparados as demais alternativas, como os prismas 360° ou as fitas refletivas, os prismas circulares se destacam em precisão e alcance.

2.3.1.2 Prismas 360°

Os prismas 360°, também chamados de prismas robóticos ou omnidirecionais, são utilizados em levantamentos topográficos, especialmente com estações totais robotizadas.

Projetados para refletir sinais de forma omnidirecional, sua construção geralmente envolve seis prismas circulares ou de canto de cubo dispostos radialmente, permitindo a reflexão contínua do sinal independentemente da orientação horizontal (FIGURA 26). Essa configuração é ideal para aplicações dinâmicas que exigem flexibilidade e rastreamento automático (Leica, 2017).¹

¹ Omnidirecional ou onidirecional é algo que possui as mesmas propriedades em todas as direções.

FIGURA 26: PRISMA 360°.



FONTE: 1: O autor (2024); 2, 3 e 4: Adaptado de [geomatics.cc/wiki/survey-prisms](https://www.geomatics.cc/wiki/survey-prisms). Acessado em: 26/12/2024.

Uma das principais vantagens dos prismas 360° é sua eficiência em levantamentos robotizados, onde eliminam a necessidade de alinhamento manual constante, aumentando a produtividade. Esse recurso é especialmente útil em cenários de movimentação contínua, como no monitoramento estrutural ou no controle de máquinas em obras e mineração (Friedmann, 2013).

Comparados aos prismas circulares convencionais, eles podem introduzir erros em medições angulares devido à refração da luz nos prismas internos e à dificuldade de localização exata do centro pelo sistema de reconhecimento automático de alvos (ATR) (Kirschner; Stempfhuber, 2008).

Outra característica importante é a possibilidade de operar em diferentes modos: ativo, passivo e semiativo. No modo ativo, o prisma emite luz infravermelha para facilitar o rastreamento em condições adversas, mas pode apresentar variações angulares mais significativas (Lackner; Lienhart, 2016).

Já no modo passivo, o prisma reflete a luz emitida pela estação total, oferecendo maior estabilidade nas medições e no modo semiativo, LEDs ajudam a identificar o prisma, combinando benefícios dos dois modos anteriores (Lackner; Lienhart, 2016).

Sua escolha depende das exigências específicas do projeto: enquanto oferecem flexibilidade e eficiência, podem não ser ideais para tarefas que demandem alta precisão angular.

2.3.1.3 Miniprisma

Miniprismas, uma variação compacta dos prismas refletores de vidro usados em levantamentos topográficos, são projetados para atender a situações em que portabilidade e praticidade são essenciais. Suas dimensões reduzidas, aliadas à capacidade de oferecer precisão em condições específicas, os tornam ideais para projetos em espaços confinados ou aplicações que demandam mobilidade. Entretanto, sua escolha deve considerar limitações de alcance e compatibilidade com os instrumentos utilizados.

Um dos principais atrativos dos miniprismas é sua precisão. Estudos demonstram que, em medições angulares, sua performance é comparável à dos prismas convencionais, com desvios mínimos geralmente inferiores a 0,5 mm (Braun, (2015). Essa característica permite que os miniprismas sejam usados em tarefas que requerem alta precisão, especialmente em aplicações de curto alcance.

Comparados a prismas padrão, que podem atingir até 3500 metros em condições ideais, os miniprismas, têm um alcance reduzido, geralmente limitado a cerca de 2000 metros (Leica, 2015).

Os miniprismas podem ser circulares ou 360° e quando bem aplicados, os miniprismas oferecem uma combinação valiosa de portabilidade e desempenho, a FIGURA 27 demonstra alguns dos modelos de miniprisma disponíveis para os usuários.

FIGURA 27: MINIPRISMAS.



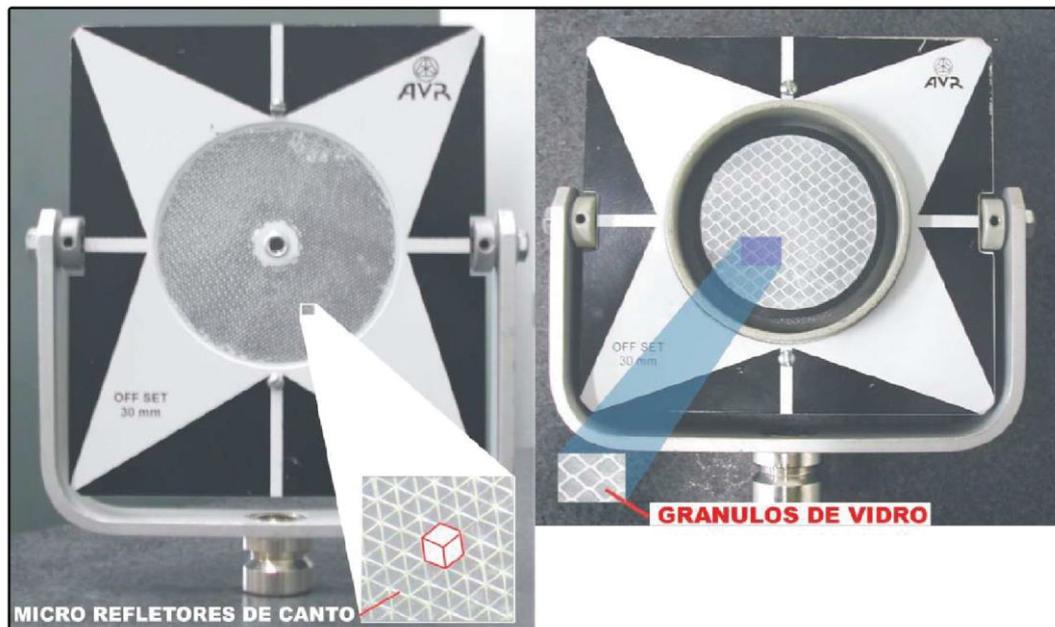
FONTE: 1. O autor (2024); 2, 3 e 4: Adaptado de [geomatics.cc/wiki/survey-prisms](https://www.geomatics.cc/wiki/survey-prisms). Acessado em: 26/12/2024.

2.3.1.4 Prismas com fitas refletivas

As fitas refletivas podem ser utilizadas para a realização de medições eletrônicas de distância (MED), por exemplo no monitoramento de estruturas. São películas que apresentam características específicas que as tornam uma alternativa aos prismas convencionais, especialmente em aplicações que requerem múltiplos alvos ou em situações que demandam soluções de baixo custo.

Essas fitas são compostas por microesferas de vidro embutidas em uma resina sintética, recobertas por um filme plástico transparente e dotadas de adesivo sensível à pressão para facilitar a fixação (FIGURA 28) (Martini, 2005).

FIGURA 28: ALVOS DE FITA REFLETIVA.



FONTE: Adaptado de Martini (2005).

Funcionam como retrorrefletores, permitindo a reflexão da luz incidente à fonte emissora. Um dos principais atrativos das fitas refletivas é seu baixo custo (em torno de R\$ 5,00 a peça ou R\$ 90,00 o rolo), que representa apenas uma fração do valor de um prisma de vidro (Variando entre R\$ 2.000,00 a R\$ 4.500,00). Essa economia as torna uma escolha atrativa em projetos que envolvem a instalação de diversos alvos, como no monitoramento estrutural (Friedmann, 2013).

A refletividade é inferior à dos prismas de vidro devido ao tamanho reduzido das microesferas, o que restringe seu alcance a distâncias curtas. Além disso, testes

indicam que o ângulo máximo de incidência que ainda permite reflexão eficiente é de 50°. Ângulos superiores resultam em sinais fracos ou inexistentes, limitando sua aplicação em situações com geometria complexa (Martini, 2005).

No monitoramento de estruturas, as fitas refletivas são amplamente utilizadas como marcas de referência para medições de deslocamento. Sua durabilidade varia de acordo com a qualidade do material, o método de fixação e as condições ambientais (França, 2023).

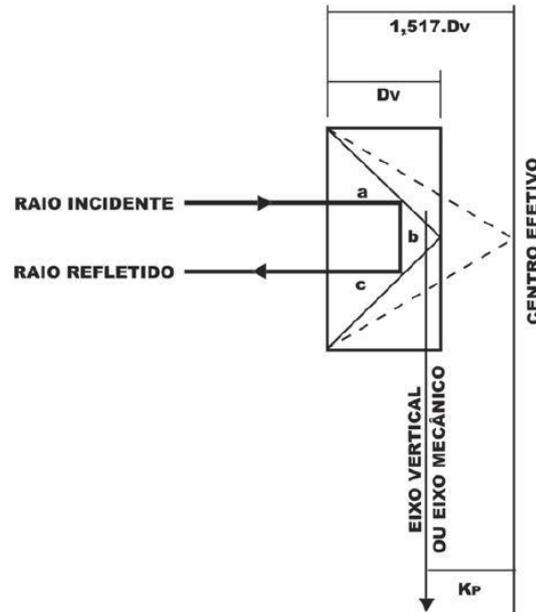
Estudos sugerem que, sob condições favoráveis, as fitas podem manter até 80% de sua refletividade inicial por até 7 anos, com possibilidade de estender esse período a 10 anos (Martini, 2005).

Outro aspecto é a calibração das fitas refletivas. Esse procedimento assegura que os valores medidos sejam corrigidos com base na constante do refletor, compensando o deslocamento entre o centro de fase e o centro geométrico da fita.

2.3.2 Constante do prisma

A constante do prisma é um conceito essencial nas medições de distância realizadas com estações totais. Ela representa a diferença entre o centro efetivo, onde ocorre a reflexão do sinal emitido pela estação total, e o centro mecânico, que é o ponto de referência físico para a medição da distância como demonstrado na FIGURA 29. Essa discrepância ocorre devido ao comportamento do sinal ao penetrar no prisma, sofrendo refração no interior do material vítreo, o que desloca o ponto efetivo de reflexão em relação à superfície externa (Uren; Price, 2010).

FIGURA 29: GEOMETRIA DA CONSTANTE DO PRISMA.



FONTE: Adaptado de Ghiliani et al. (2015).

A ausência de consideração dessa constante nas medições pode introduzir erros sistemáticos, impactando diretamente a precisão dos resultados. A constante do prisma geralmente apresenta valores entre -30 mm e -40 mm, mas pode ser nula em prismas projetados especificamente para evitar essa necessidade de correção (Uren; Price, 2010).

A maioria das estações totais modernas permite a inserção da constante diretamente no equipamento, que aplica a correção de forma automática a cada medição. Essa funcionalidade é essencial em contextos que exigem alta precisão, pois valores incorretos ou a omissão da constante podem comprometer significativamente os resultados (Martini, 2005).

Matematicamente, a constante do prisma (K_p) é definida pela equação 6.0:

$$K_p = e - n \cdot d \quad (6.0)$$

Onde:

e : Distância entre o ponto central simétrico do prisma e sua face frontal;

n : Índice de refração do vidro do prisma;

d : Distância entre a face frontal do prisma e o ponto de intersecção dos raios refletidos, frequentemente denominado S_0 (Leica, 2017).

É importante destacar que fabricantes diferentes podem adotar definições específicas para a constante do prisma. Por isso, é indispensável que o operador configure o equipamento corretamente para o tipo de prisma utilizado, especialmente em projetos que envolvam equipamentos de diferentes fabricantes.

A constante do prisma pode ser influenciada por diversos fatores. Entre eles estão o tipo de vidro utilizado no prisma, cujo índice de refração varia com o comprimento de onda do sinal MED, afetando a interação óptica no interior do prisma. Além disso, o design do prisma também desempenha um papel crucial. Prismas projetados com maior precisão geométrica e óptica frequentemente apresentam constantes mais consistentes e, em alguns casos, nulas, eliminando a necessidade de ajustes (Martini, 2005).

Para minimizar erros, boas práticas incluem o uso de prismas adequados e compatíveis com a estação total, bem como a consulta aos manuais técnicos para assegurar que a constante correta seja inserida no equipamento. É igualmente recomendável manter a consistência no uso de prismas dentro de um mesmo projeto, a fim de evitar variações indesejadas.

2.3.2.1 Constante do sistema de medida

Todas as distâncias medidas por uma combinação específica de MED/refletor estão sujeitas a um erro constante causado por vários fatores. Esses fatores incluem atrasos elétricos, desvios geométricos e excentricidades no MED, diferenças entre o centro eletrônico e o centro mecânico do MED, bem como diferenças entre o centro óptico e o centro mecânico do refletor. Para corrigir essas discrepâncias, a constante aditiva, também conhecida como correção de zero ou índice, é aplicada às distâncias medidas (*Electronic Distance Measurement Calibration Baseline, 2015*).

De acordo com Martini (2005) a constante aditiva é definida como:

$$K = K_A + K_P \quad (6.1)$$

Onde:

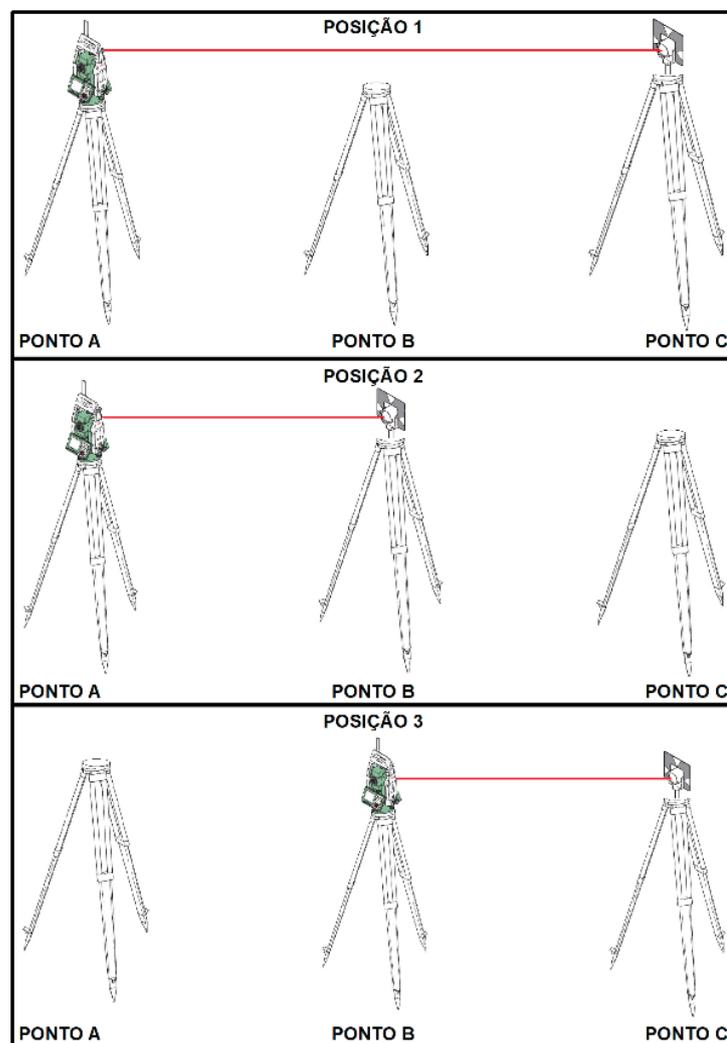
K : Constante do sistema de medida;

K_A : Constante aditiva;

K_p : Constante do prisma.

A constante do prisma pode ser determinada por meio da medição de três distâncias conhecidas, todas alinhadas. Para isso, mede-se a distância entre os pontos A e C, entre os pontos A e B, e entre os pontos B e C, conforme ilustrado na FIGURA 30.

FIGURA 30: MÉTODO DOS TRÊS TRIPÉS PARA DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DO SISTEMA (ESTAÇÃO EM CONJUNTO COM O PRISMA).



FONTE: O autor (2024).

Sendo:

$$AC + K = (AB + K) + (BC + K) \quad (6.2)$$

$$K = AC - (AB + BC) \quad (6.3)$$

$$K = K_A + K_P$$

Portanto a partir da equação (6.1) é possível determinar o valor da constante do prisma (K_P):

$$K_P = K - K_A \quad (6.4)$$

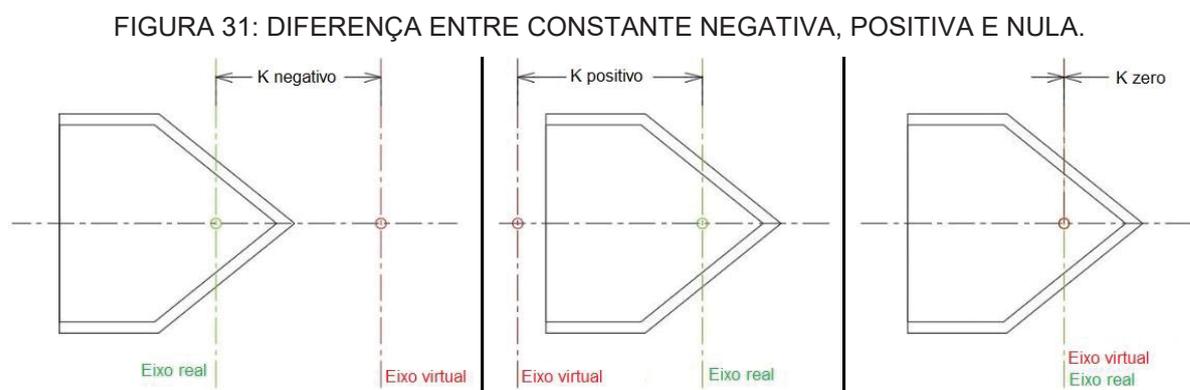
Onde:

AC: Distância entre os pontos A e C,

AB: Distância entre os pontos A e B e

BC: Distância entre os pontos B e C.

A FIGURA 31 demonstra a diferença entre as Constantes, positiva ($K_p > 0$), negativa ($K_p < 0$) e nula ($K_p = 0$).



FONTE: Adaptado de geomatics.cc/articles/prism-constants-in-survey-targets-explained-259. Acessado em 10/12/2024.

2.4 IMPRESSÃO 3D

A impressão 3D está transformando a indústria manufatureira, especialmente no campo da engenharia, ao permitir a criação rápida de protótipos e produtos personalizados. No atual campo da Indústria 4.0, apresentam-se inovações para uma produção mais robusta, confiável e sustentável. Oferecendo vantagens e

desempenhando tarefas para a engenharia reversa, o desenvolvimento de próteses funcionais, a previsão de defeitos em mecanismos, o desenvolvimento de protótipos de baixo custo ou a produção de peças com formatos complexos (Tamir et al., 2022; Graça et al., 2021).

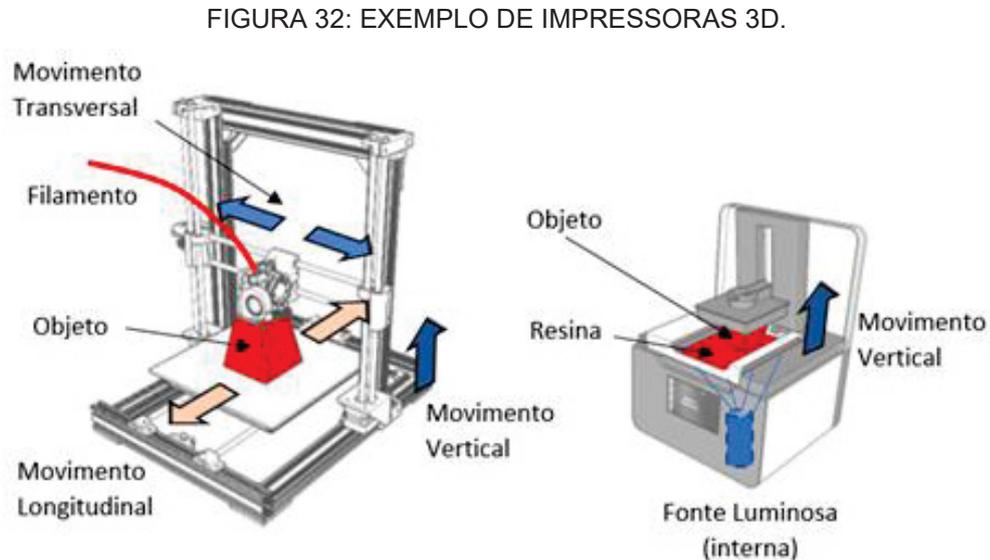
As tecnologias de Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing* - AM) ou prototipagem rápida, surgiram na década de 80, como uma técnica produtiva descrita em registro intelectual de patente por Charles Hull (1986). Os processos AM envolvem diferentes tipos de materiais usados na produção do objeto tridimensional, a partir de dados modelados em 3D em camadas progressivas (Munhoz et al., 2017). Trata-se de um processo de fabricação avançado, que pode produzir geometrias de formas complexas automaticamente a partir de um modelo 3D. Usualmente esse modelo vem sendo gerado por desenho assistido por computador (*Computer Aided Design* - CAD), fabricação auxiliada por computador (*Computer-Aided Manufacturing* - CAM) *Building Information Modelling* (BIM) ou por *firmwares* específicos para modelagem paramétrica, como *SolidWorks*, *Autodesk Fusion 360* e *SketchUp*, por exemplo (Terminanto et al., 2023).

Segundo Borille (2010), formas mais baratas e acessíveis de AM tornaram-se disponíveis, como as atuais impressoras 3D. A ISO/ASTM 52900:2015 (2015) define que:

“Impressão 3D é a fabricação de objetos por meio da deposição de um material usando uma cabeça de impressão, bocal ou outra tecnologia de impressão e o termo é frequentemente usado em um contexto não técnico como sinônimo de AD e atualmente este termo tem sido associado em particular a máquinas que são de baixo custo e/ou capacidade geral”
Tradução dos autores” (ISO/ASTM 52900:2015, 2015).

Originalmente a tecnologia manufatura aditiva foi desenvolvida em torno de materiais poliméricos, ceras e laminados de papel. Posteriormente, houve a introdução de compósitos, metais e cerâmica (Gibson et al., 2010). Borille (2010) diz que os polímeros foram os primeiros materiais processados, surgindo em seguida os processos chamados de Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS) e Fabricação com Filamento Fundido (*Fused Deposition Modeling* - FDM), além de outras tecnologias, como a fusão a laser de metais. Como discutem Graça et al.

(2021), a FIGURA 32 apresenta um exemplo de impressora que utiliza o princípio do FDM à esquerda e apresenta um exemplo de impressora que utiliza o princípio do SLA à direita.



FONTE: Graça et al. (2021)

O FDM é o método popular e bem difundido para imprimir protótipos funcionais, modelos conceituais, acessórios em geral e designs auxiliares de fabricação em linhas de produção, principalmente devido à simplicidade desse processo de impressão (Pecho et al., 2019). As impressoras 3D que empregam esse método, trabalham com os princípios de extrusão e deposição do material a ser empregado na impressão (Wang et al., 2016). A extrusão empurra o material armazenado no cabeçote de impressão, através do bocal aquecido, até a plataforma móvel que se desloca em um no plano com as translações em X, Y, Z, onde o material é depositado por camadas sucessivas durante os movimentos transversal e vertical do cabeçote de impressão sobre o plano x, y descrito pela barra deslizante (Tamir et al., 2022). O eixo z é à direção de construção do objeto sobre a plataforma durante os movimentos verticais.

2.4.1 Filamentos usuais adotados nos processos AM

Entre os materiais mais utilizados nesse contexto estão o PLA (Ácido Poliláctico) e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), ambos com propriedades que

atendem a diferentes requisitos de aplicação. Os filamentos PLA e ABS estão disponíveis em várias cores e o diâmetro do filamento está disponível em dois tamanhos padronizados: 1,75 ou 2,85 mm. A TABELA 3 apresenta algumas características gerais de ambos os filamentos.

TABELA 3: CARACTERÍSTICAS DOS FILAMENTOS.

Propriedades	PLA	ABS
Composto Ecológico	alto	baixo
Brilho	médio	baixo
Transparência	médio	baixo
Rigidez/Dureza	médio	alto
Resistência/Impacto	baixo	médio
Flexibilidade	baixo	médio
Contração	baixo	alto
Precisão/Detalhes	alto	baixo
Resistência/Atritos	baixo	médio
Resistência Química	médio	baixo
Resistência Térmica	baixo	alto
Densidade	baixo	médio
Tempo de Impressão	médio	alto
Preço por m3/grama	baixo	médio

FONTE: Besko et al. (2017)

O PLA, derivado de recursos renováveis como amido de milho e cana-de-açúcar, sendo biodegradável e biocompatível. Além disso, seu ponto de fusão entre 190°C e 220°C, associado à baixa contração durante o resfriamento, facilita o processo de impressão e reduz os custos operacionais, tornando-o ideal para iniciantes. Contudo, devido à baixa resistência ao impacto e à fadiga, bem como à sensibilidade às temperaturas superiores a 60°C, seu uso fica limitado em aplicações que demandam alta resistência mecânica ou exposição a ambientes mais quentes (Bürge et al., 2020).

Por outro lado, o ABS destaca-se pela elevada resistência mecânica e durabilidade, suportando temperaturas de até 100°C antes de amolecer. Sua versatilidade permite maior resistência a produtos químicos e a realização de pós-processamentos, como lixamento e pintura. Apesar disso, o ABS requer temperaturas de extrusão mais altas, entre 220°C e 250°C, e uma mesa aquecida para evitar

deformidades durante o resfriamento, o que pode dificultar seu uso por iniciantes. Além disso, o material não é biodegradável (Mirzaee et al., 2015).

No campo da engenharia, o PLA é amplamente utilizado na prototipagem rápida, em modelos conceituais de alta precisão dimensional e em aplicações biomédicas, como implantes temporários, devido à sua biocompatibilidade (Mandal, 2021).

Já o ABS é preferido para aplicações que demandam resistência mecânica superior, como a produção de peças funcionais, carcaças e suportes, bem como protótipos avançados que requerem testes em condições reais de operação (Mirzaee et al., 2015).

Portanto, a escolha entre PLA e ABS deve considerar os requisitos específicos de cada projeto. Enquanto o PLA oferece vantagens em termos de sustentabilidade e facilidade de processamento, o ABS é mais indicado para aplicações que exigem maior resistência e robustez. Essa análise criteriosa contribui para o uso eficiente dos materiais na impressão 3D aplicada à engenharia, otimizando o desempenho e a sustentabilidade dos produtos.

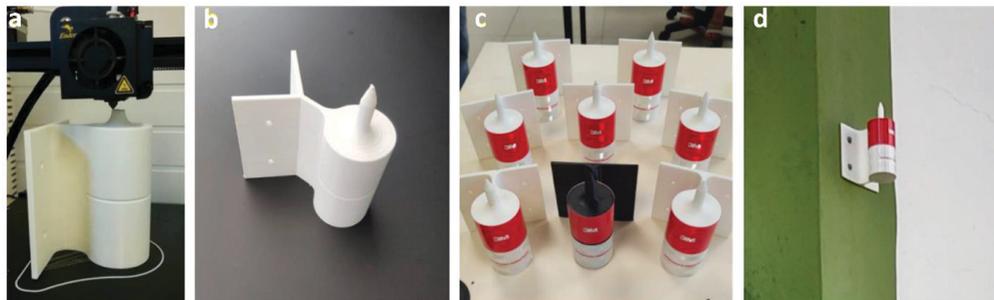
2.4.2 Geração de componentes e equipamentos auxiliares para mensuração

Para a aquisição de observações acuradas, de forma que os dados geoespaciais expressem o aspecto físico dos objetos mensurados. Para tanto, faz-se necessário utilizar instrumentos adequados para acoplar sensores a sistemas, integrar diferentes dispositivos em um único equipamento de mensuração, ou mesmo gerar periféricos auxiliares para os processos de calibração instrumental, como está sendo proposto nessa pesquisa. A reposição de peças e componentes danificados, em um curto espaço de tempo e a custos acessíveis, vem a ser outra contribuição do processo de impressão 3D para as Ciências Geodésicas.

No caso específico das Ciências Geodésicas, algumas inovações recentes foram projetadas para impressão em AM, visando baratear os custos com equipamentos auxiliares de levantamentos ou mesmo fornecer designs inovadores para a execução de práticas em Geodésia e Topografia. Na pesquisa de França (2023), para cumprir com a finalidade de densificação de uma rede geodésica, aplicando o método de múltiplas estações livres, o autor propôs o design tridimensional de um alvo refletivo cilíndrico, para afixá-lo com parafusos em muros e

nas fachadas de edificações (França et al., 2024). A modelagem do dispositivo foi realizada em ambiente CAD, em dimensões cilíndricas de 100 mm de altura, 50 mm de diâmetro, haste para colimação com 40 mm de altura e 10 mm de diâmetro. Para o retorno do sinal da estação total na medição linear foi aplicado um adesivo refletivo utilizado no mercado para sinalização em caminhões, conforme resoluções 128/316 do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito). O modelo adotado foi a faixa refletiva 3M Grau Diamante TM Conspicuity 983-326 constituída de uma película microprismática (França, 2023). As características desse produto impresso e afixado como mostra a FIGURA 33.

FIGURA 33: ALVOS IMPRESSOS EM 3D PARA DENSIFICAÇÃO DE REDE.



FONTE: França (2023)

Para estabilizar um *smartphone*, de forma que esse acompanhe os movimentos automáticos em torno do eixo do secundário (luneta) de uma ETR, Sampaio et al. (2023) desenvolveram uma plataforma de encaixe para adaptá-la aos movimentos verticais da luneta do equipamento. Nessa plataforma, impressa em PLA, as dimensões foram coletadas com uso de um paquímetro, gerou-se um orifício acoplável com o modelo de luneta da ETR Leica TS15, e parafusos rosqueáveis são usados para travar o *smartphone* em suas laterais, a fim de verificar os ângulos de orientação medidos com a estação total, e os ângulos medidos com o *smartphone*, como pode ser observado na FIGURA 34.

FIGURA 34: PEÇA IMPRESSA PARA ESTABILIZAÇÃO DE SMARTPHONE EM UMA ETR.



FONTE: Sampaio et al. (2023)

Esses experimentos recentes desenvolvidos no âmbito da Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, trouxeram resultados satisfatórios para a área de Levantamentos. A eficácia desses equipamentos auxiliares, motivo a busca por novos designs de objetos tridimensionais que otimizem os processos de coletas de observações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Estação total Leica Viva TS-15

Foi empregada para os testes a Estação Total Robotizada, Leica Viva TS-15.

A estação total Leica TS15 integra a série Leica Viva e destaca-se por sua capacidade de medir, calcular e capturar dados com alta precisão. Essa estação apresenta modelos com diferentes classes de precisão e permite o uso em conjunto com um sistema GNSS adicional, tornando-a versátil para aplicações no setor de georreferenciamento e construção civil, como no caso de monitoramento de estruturas e *as built*.

A TS15 possui três tipos distintos de laser incorporados, cada um com funções específicas (Leica, 2015):

- Classe 1: Utilizados para medição padrão de distância eletrônica (EDM), PowerSearch (PS) e reconhecimento automático de alvo (ATR).
- Classe 2: Empregado para funções de prumo a laser.
- Classe 3R: Utilizado em medições de distância eletrônica sem refletor (REDM), com uma emissão de potência de 5W. Vale ressaltar que o laser Classe 3R é a classe mais alta permitida para uso no setor de construção, sendo imprescindível o manuseio cuidadoso para evitar danos decorrentes de uso inadequado.

De acordo com o fabricante a divergência do feixe da Leica TS15 é de 0,2 miliradianos (mrad) x 0,3 mrad, o que corresponde a 20 mm x 30 mm a uma distância de 100 metros.

A TS15 oferece três modos distintos de EDM, que influenciam diretamente a precisão da medição de distância:

1. EDM padrão com GPR1: Precisão de 1 mm + 1,5 ppm, tempo de medição 2,4 segundos.
2. EDM padrão com fita: Precisão de 3 mm + 2 ppm, tempo de medição 2,4 segundos.
3. REDM: Precisão de 3 mm + 1,5 ppm, tempo de medição 3 a 6 segundos.

A precisão da medição de distância varia conforme o modo selecionado, proporcionando flexibilidade para diferentes condições de trabalho.

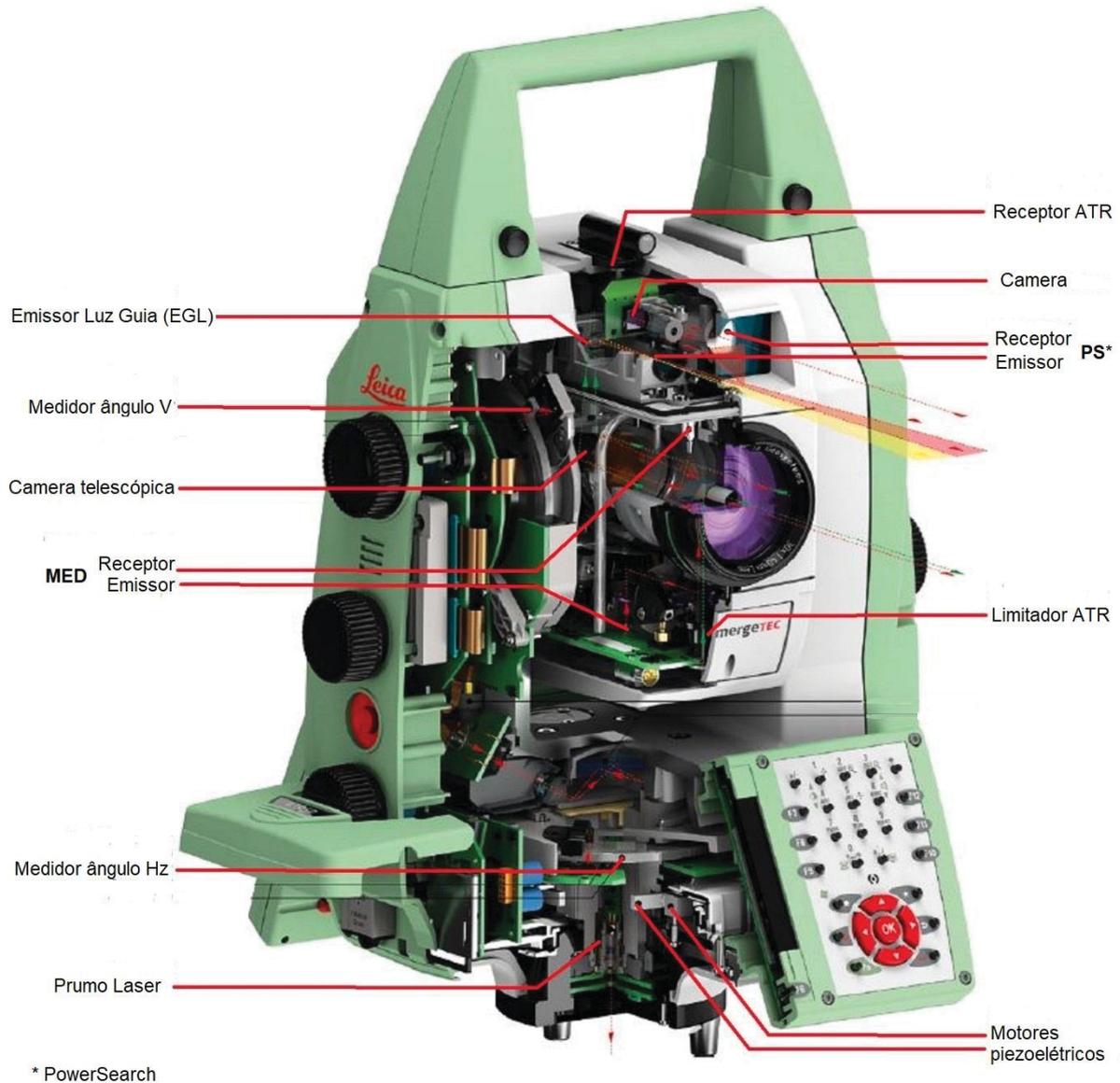
As demais especificações de acordo com o fabricante, disponibilizados no manual Leica (2015):

- Especificações Técnicas do ATR (Reconhecimento Automático de Alvo):
- Precisão ATR: ± 3 mm;
- Tempo típico de busca no campo de visão: 1,5 segundos;
- Campo de visão: $1^{\circ}25'$ / 1,55 gon;
- Janelas de busca definíveis: Sim;
- Princípio de funcionamento: Processamento digital de imagem;
- Tipo de laser: Infravermelho.
- Especificações Técnicas do PowerSearch (PS):
- Alcance com prisma padrão (GPR1): 300 m

- Alcance para prisma de 360° (GRZ4, GRZ122): 300 m
- Alcance para miniprisma (GMP101): 100 m
- Especificações Técnicas Adicionais
- Tipo de laser: Visível, vermelho, Classe 3R.
- Comprimento de onda: 657 nm.
- Ângulo do feixe: 0,09 mrad.

A Leica TS15 exige um tempo de ajuste térmico ao ser removida de uma temperatura de armazenamento para condições ambientais. Recomenda-se deixar o equipamento exposto à temperatura ambiente por, no mínimo, 15 minutos antes do uso (Leica, 2015). A FIGURA 35 demonstra os principais componentes da Leica TS 15.

FIGURA 35: COMPONENTES DA ETR LEICA TS-15.



FONTE: Adaptado de Leica (2015).

3.1.2 Acessórios

Os acessórios utilizados para a realização dos testes consistiram em:

1. Tripés:

- Dois tripés industriais com sistema de elevação do solo;
- Um tripé industrial com sistema de absorção de vibrações;
- Dois tripés comuns de alumínio, utilizados especificamente para os testes em campo (FIGURA 36).

FIGURA 36: TRIPÉS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS E TESTES EM CAMPO.



FONTE: O autor (2024).

2. Bipé e Bastão de Alumínio:

Para eliminar os efeitos da interferência do operador durante o posicionamento do prisma, utilizou-se um bipé em conjunto com um bastão de alumínio convencional, amplamente empregado em levantamentos topográficos (FIGURA 37).

FIGURA 37: CONJUNTO BIPÉ E BASTÃO.



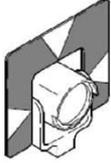
FONTE: O autor (2024).

3. Prismas Leica:

Foram empregados três prismas do fabricante Leica, cada um com características distintas, conforme descrito abaixo e ilustrado na FIGURA 38:

- Prisma circular padrão (GR111);
- Prisma 360°;
- Miniprisma circular.

FIGURA 38: PRISMAS LEICA UTILIZADOS.

Model:	GPR1+GPH1		
Image:			
Material:	Plastic		
Centering Accuracy:	1,0 mm		
Leica Constant	0		
Model:	GRZ122		
Image:			
Material:	Metal		
Centering Accuracy:	2,0 mm		
Leica Constant	+23,1 mm		
Model:	GMP111		
Image:			
Material:	Metal		
Centering Accuracy:	2,0 mm		
Leica Constant	+17,5 mm		

FONTE: Adaptado de Leica (2017).

4. Termo-higrômetros digitais:

Para as medições de temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar, foram utilizados dois termo-higrômetros digitais modelo ICEL HT-4010. A FIGURA 39 apresenta os dispositivos utilizados, enquanto suas especificações técnicas são detalhadas na TABELA 4.

TABELA 4: DADOS DO TERMO-HIGRÔMETRO ICAL HT-4010.

Função	Escala	Resolução	Exatidão
Temperatura	-40 °C a 105 °C	0,1 °C	1 °C
Umidade relativa	0%RH a 100%RH	0,1 %RH	3%RH
Ponto de orvalho (DP)	0 °C a 40 °C	0,1 °C	1 °C
Pressão atmosférica	10 mbar a 1200 mbar	13 mbar	1,5 mbar

FONTE: Icel Manaus (2017).

FIGURA 39: TERMO-HIGRÔMETRO ICAL HT-4010.



FONTE: Icel Manaus (2017).

5. Base nivelante e extensor:

Para assegurar a uniformidade nas condições de centragem e nivelamento de todos os prismas, foram empregadas três bases nivelantes em conjunto com um extensor utilizado para facilitar a transferência dos prismas entre tripés. Esse sistema eliminou a necessidade de demonstrar a base do tripé a cada reposicionamento. O processo consistiu apenas em destravar o extensor e realocá-lo para o ponto subsequente. A FIGURA 40 ilustra umas das bases nivelantes utilizadas, bem como o extensor aplicado no experimento.

FIGURA 40: BASE NIVELANTE E EXTENSOR.



FONTE: O autor (2024).

3.1.3 Fitas refletivas

Para a montagem dos prismas refletores, foram utilizadas fitas automotivas refletivas, grau diamante, conhecidas por sua alta refletividade e durabilidade. Essas fitas são compostas por uma película microprismática projetada especificamente para aumentar a visibilidade e a detecção, sendo amplamente empregadas na marcação lateral e traseira de veículos de carga e passageiros.

A composição da fita inclui:

- Lentes prismáticas: Formadas em uma resina sintética transparente, proporcionando alta refletividade.
- Adesivo sensível à pressão: Selado com um revestimento de plástico removível, permitindo facilmente a aplicação e aderência segura em superfícies preparadas (3M, 2023).

Esta fita está ilustrada na FIGURA 41.

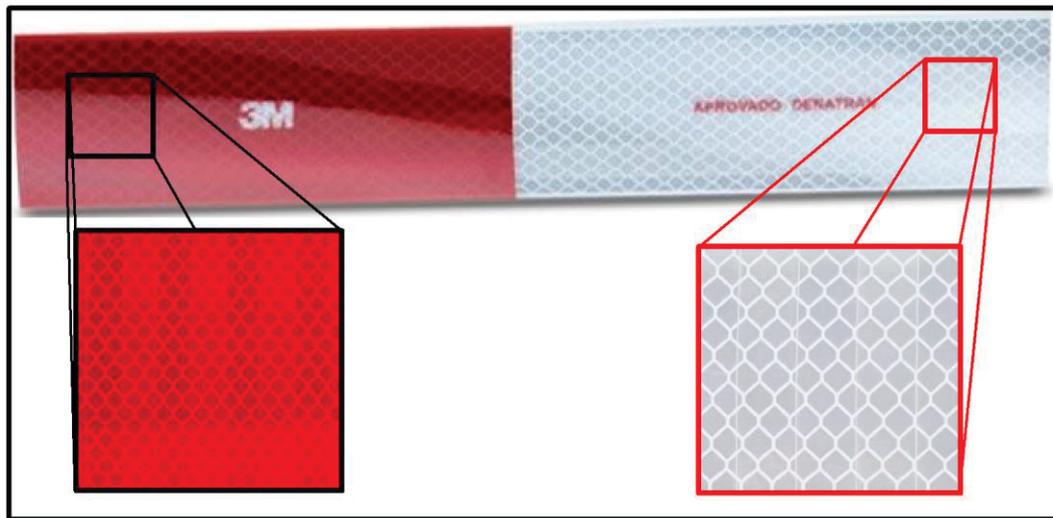
Quando aplicadas corretamente, seguindo as orientações do fabricante, essas fitas oferecem desempenho confiável por até dois anos, mantendo sua funcionalidade mesmo em condições adversas. Além disso, apresentam alto brilho e angularidade, refletindo luz de forma eficiente em ângulos de até quase 90° em relação à perpendicular.

As fitas refletivas são uma alternativa econômica em relação aos prismas de vidro, estando disponíveis em três versões básicas. Apesar disso, o alcance utilizável pode ser limitado por:

- Redução da refletividade: Intrínseca ao pequeno tamanho das microesferas de vidro, com diâmetro típico de cerca de 0,25 mm.
- Tamanho das lentes: Que influencia diretamente a capacidade de reflexão e o alcance prático.

Para instrumentos com a portadora laser, foram reportados alcances máximos de aproximadamente 200 metros (Martini, 2005).

FIGURA 41: FITA REFLETIVA GRAU DIAMANTE 3M.



FONTE: O autor (2024).

3.2 MÉTODOS

Esta é uma pesquisa quantitativa aplicada, buscando atender os objetivos estabelecidos definidos no início deste trabalho. A seguir serão apresentados os métodos utilizados na mesma.

3.2.1 Desenvolvimento dos alvos

Nesta pesquisa, foram desenvolvidos prismas específicos com o objetivo de avaliar a influência de diferentes geometrias na determinação de distâncias obtida pelo uso de MEDs, bem como na precisão das medições realizadas. A diversidade de

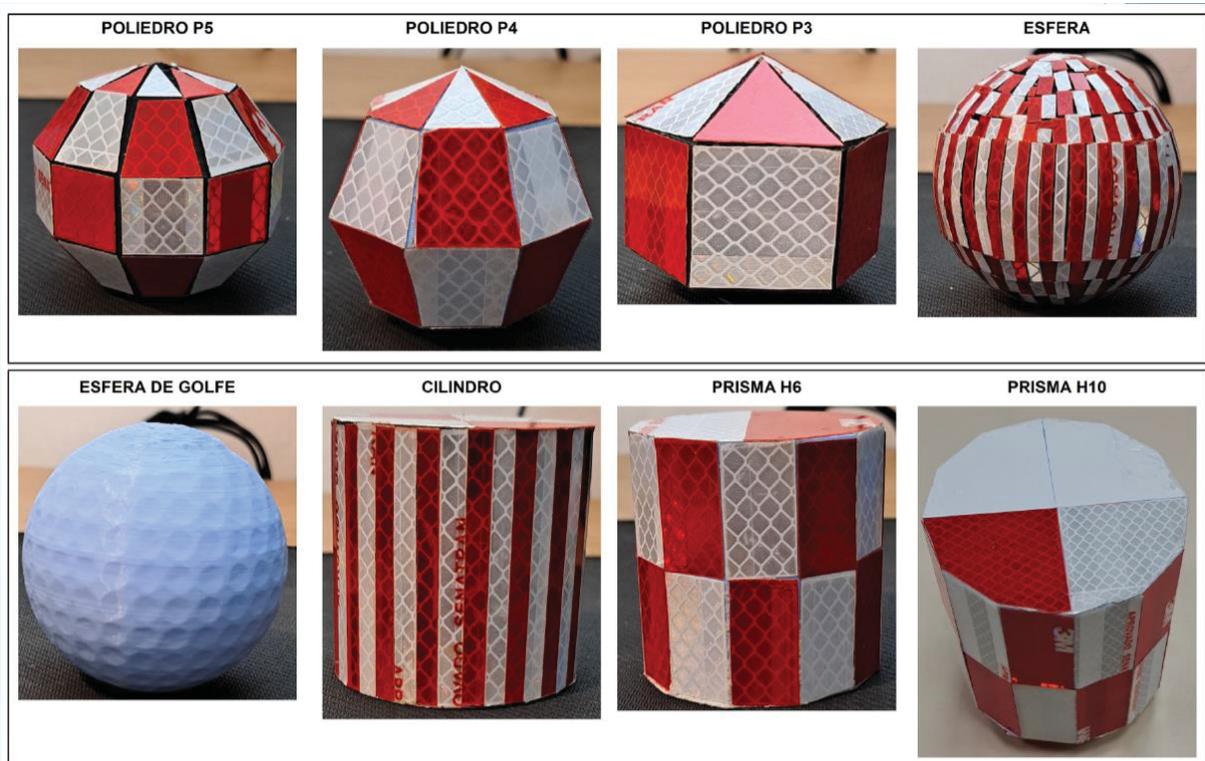
geometrias visa compreender como a forma dos prismas pode impactar a qualidade e confiabilidade dos resultados.

Foram projetados e confeccionados oito alvos, cada um com geometria distinta, sendo:

- Uma esfera;
- Uma esfera com textura de bola de golfe;
- Um polígono com 18 faces (poliedro P3);
- Um polígono com 32 faces (poliedro P4);
- Um polígono com 50 faces (poliedro P5);
- Um cilindro com base circular;
- Um cilindro com base de dodecaedro com diâmetro de 6,0 cm (H6);
- Um cilindro com base de dodecaedro com diâmetro de 10,0 cm e altura proporcional (H10).

A FIGURA 42 demonstra todos os prismas produzidos.

FIGURA 42: PRISMAS PROJETADOS PARA OS EXPERIMENTOS.



FONTE: O autor (2024).

Para padronizar os experimentos, foi adotado um diâmetro padrão de 6,0 cm para a maioria dos alvos. Essa escolha baseou-se na proximidade com o diâmetro de 6,2 cm, frequentemente utilizado em prismas circulares convencionais. Tal padronização também considerou a posterior aplicação de fitas refletivas nas faces dos alvos, bem como a espessura do material utilizado na impressão 3D.

Os alvos foram projetados para equilibrar a praticidade na manipulação e a compatibilidade com a estação total utilizada nos experimentos, por exemplo a dimensão do polígono P3 com 18 faces e um diâmetro de 6,0 cm. A seleção dos materiais e das dimensões foi cuidadosamente ajustada para assegurar a representatividade dos resultados e a validade dos dados obtidos nas medições.

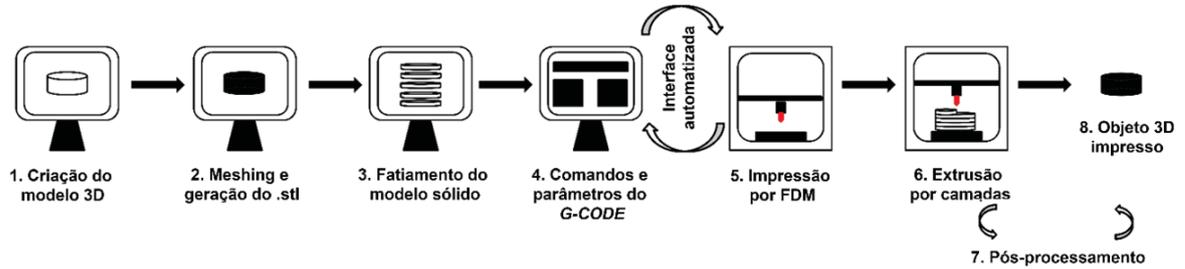
3.2.1.1 Projetos de modelagem e impressão 3D

Na metodologia proposta, os modelos foram desenvolvidos e dimensionados em CAD por meio do software gratuito Tinkercad. O processo de *mesh* foi utilizado para transformar o design do arquivo vetorial volumétrico em um sólido tridimensional, exportado no formato .STL. Em seguida, o arquivo .STL foi importado para o software Ultimaker Cura, que realiza o fatiamento (*slicing*) do modelo utilizando rotinas e algoritmos específicos. Esse procedimento converte o modelo tridimensional em camadas horizontais e gera um arquivo em linguagem de máquina baseada em controle numérico (NC), conhecido como G-CODE (Graça et al., 2021).

O arquivo G-CODE foi processado em uma interface computacional dedicada à manufatura aditiva (AM), onde foram aplicados os parâmetros e comandos necessários para configuração da máquina e automação do processo de impressão (Siddique *et al.*, 2019). A técnica empregada foi a Fused Deposition Modeling (FDM), que utiliza a extrusão e deposição sucessiva de filamentos fundidos em camadas. A impressão foi realizada utilizando a impressora 3D Creality CR-10 v2, disponível no Laboratório Geeng.

A FIGURA 43 apresenta, de forma esquemática e sucinta, as etapas do processo de modelagem e impressão descrito.

FIGURA 43: SEQUÊNCIA DE MODELAGEM E IMPRESSÃO.

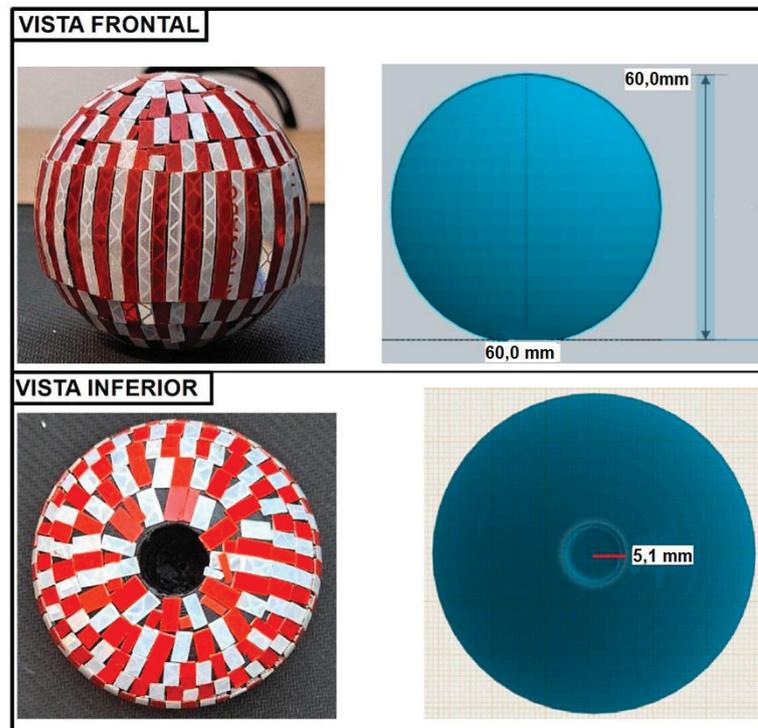


FONTE: Graça et al. (2021)

3.2.1.1.1 Esfera

A esfera possui diâmetro de 60,00 mm e, em seu eixo, uma perfuração com diâmetro de 10,2 mm, compatível com o pino baioneta. A superfície da esfera foi revestida com fita refletiva adesiva (branca e vermelha), conforme ilustrado na FIGURA 44.

FIGURA 44: ALVO ESFERA.

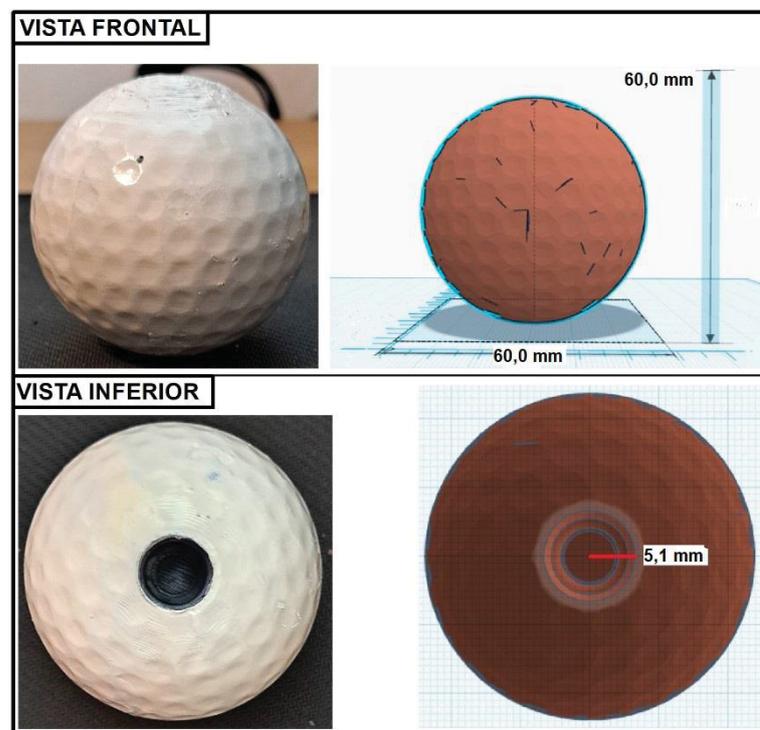


FONTE: O autor (2024).

3.2.1.1.2 Esfera com textura de bola de golfe

A esfera com textura de bola de golfe apresenta diâmetro de 60,00 mm e uma perfuração axial de 10,2 mm compatível com o pino baioneta. Foram desenvolvidas duas versões: uma confeccionada exclusivamente com o material de impressão 3D e outra pintada com tinta spray acrílica branca. A configuração das esferas é ilustrada na FIGURA 45.

FIGURA 45: ALVO ESFERA DE GOLFE.

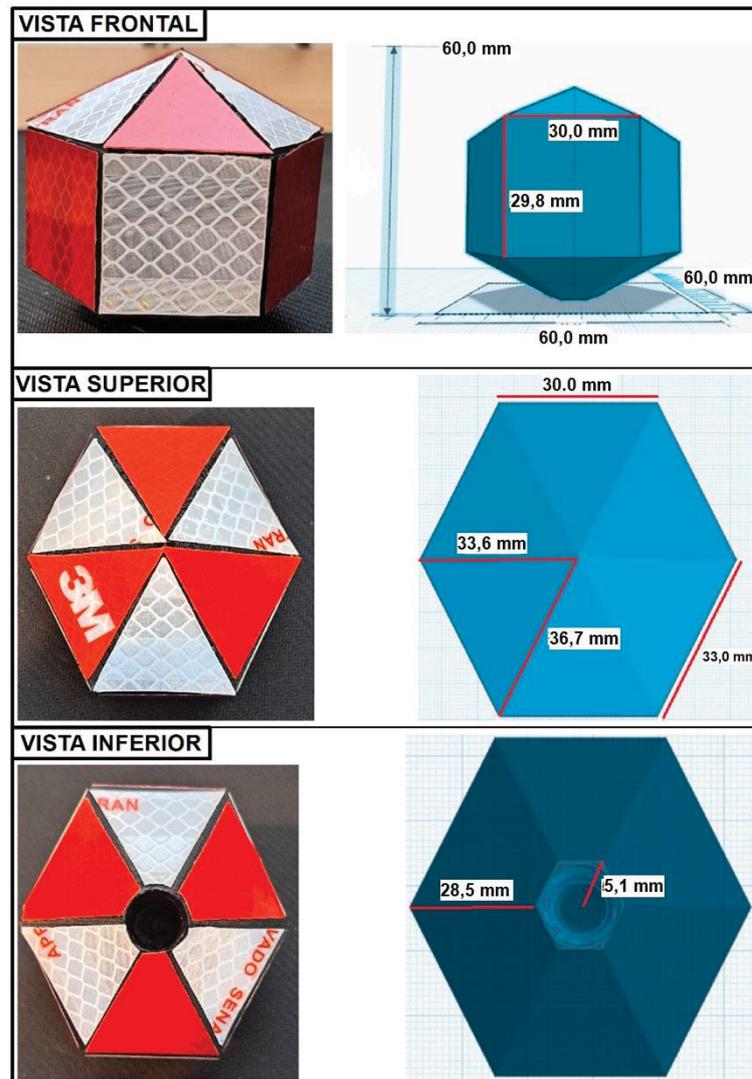


FONTE: O autor (2024).

3.2.1.1.3 Poliedro P3

O poliedro P3 é composto por 18 (dezoito) faces, das quais no mínimo 3 (três) ficam voltadas para o equipamento. Suas dimensões são 60,00 mm de comprimento, largura e altura. No eixo central, foi feita uma perfuração de 10,2 mm compatível com o pino baioneta. O revestimento foi realizado com fita adesiva refletiva, como mostrado na FIGURA 46.

FIGURA 46: ALVO POLIEDRO P3.

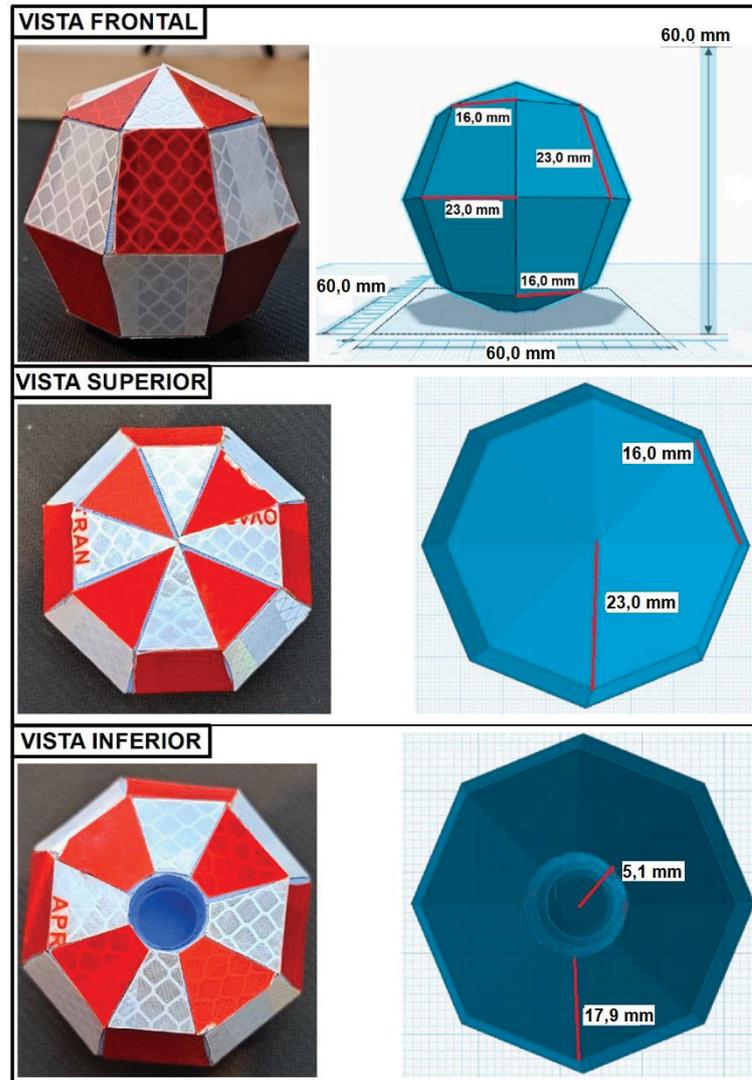


FONTE: O autor (2024).

3.2.1.1.4 Poliedro P4

O poliedro P4 apresenta 32 (trinta e duas) faces, sendo no mínimo 4 (quatro) voltadas para o equipamento. Suas dimensões também são de 60,00 mm de comprimento, largura e altura, com uma perfuração axial de 10,2 mm compatível com o pino baioneta. A superfície foi revestida com fita adesiva refletiva, conforme mostrado na FIGURA 47.

FIGURA 47: ALVO POLIEDRO P4.

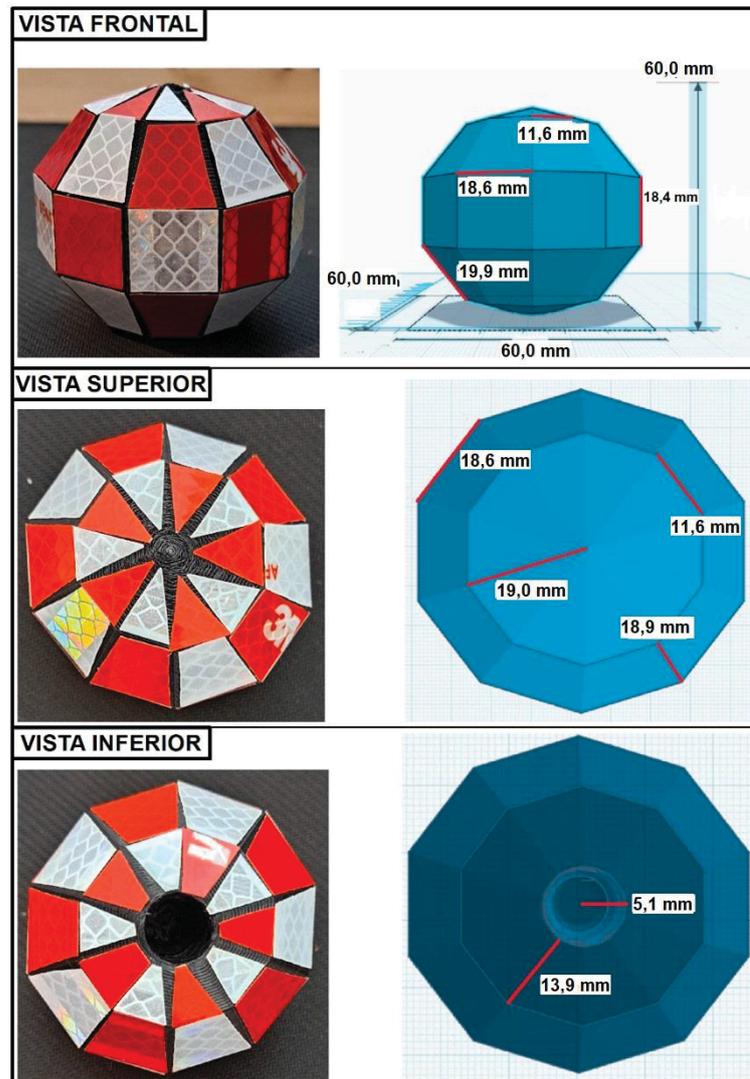


FONTE: O autor (2024).

3.2.1.1.5 Poliedro P5

O poliedro P5 é composto por 50 (cinquenta) faces, sendo no mínimo 5 (cinco) voltadas para o equipamento. Suas dimensões seguem o padrão de 60,00 mm de comprimento, largura e altura, com uma perfuração axial de 10,2 mm compatível com o pino baioneta. A superfície foi revestida com fita adesiva refletiva, como ilustrado na FIGURA 48.

FIGURA 48: ALVO POLIEDRO P5.

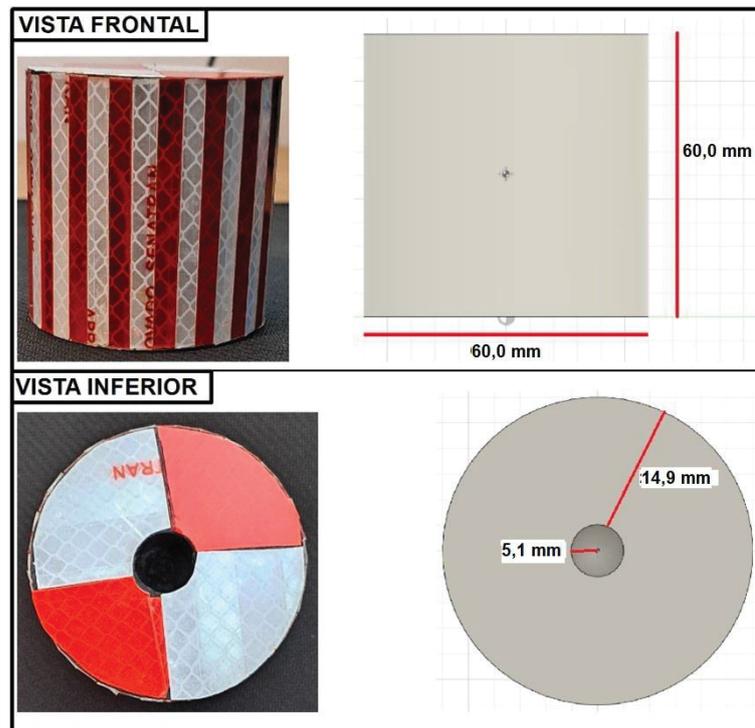


FONTE: O autor (2024).

3.2.1.1.6 Cilindro base circular

O cilindro base circular apresenta raio e altura de 60,00 mm, além de uma perfuração axial de 10,2 mm compatível com o pino baioneta. A superfície foi revestida com fita adesiva refletiva de 1,0 mm de largura, possibilitando um ajuste mais refinado para a mira, conforme apresentado na FIGURA 49.

FIGURA 49: ALVO CILINDRO.

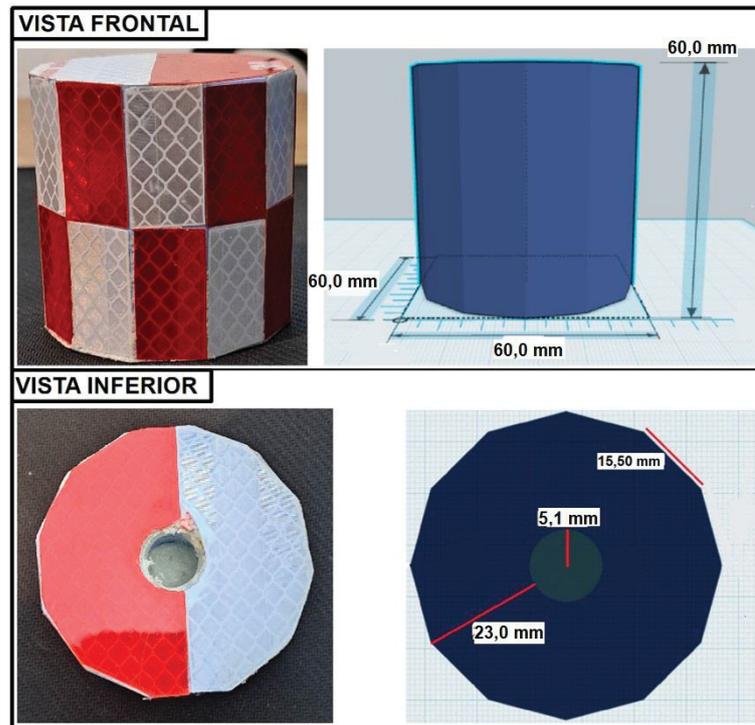


FONTE: O autor (2024).

3.2.1.1.7 Cilindro base dodecaedro H6

O cilindro base dodecaedro H6 possui base com 12 (doze) faces e diâmetro de 60,00 mm, além de altura também de 60,00 mm. Em seu eixo central, foi realizada uma perfuração de 10,2 mm compatível com o pino baioneta. O revestimento da superfície foi feito com fita adesiva refletiva, como demonstrado na FIGURA 50.

FIGURA 50: ALVO H6.

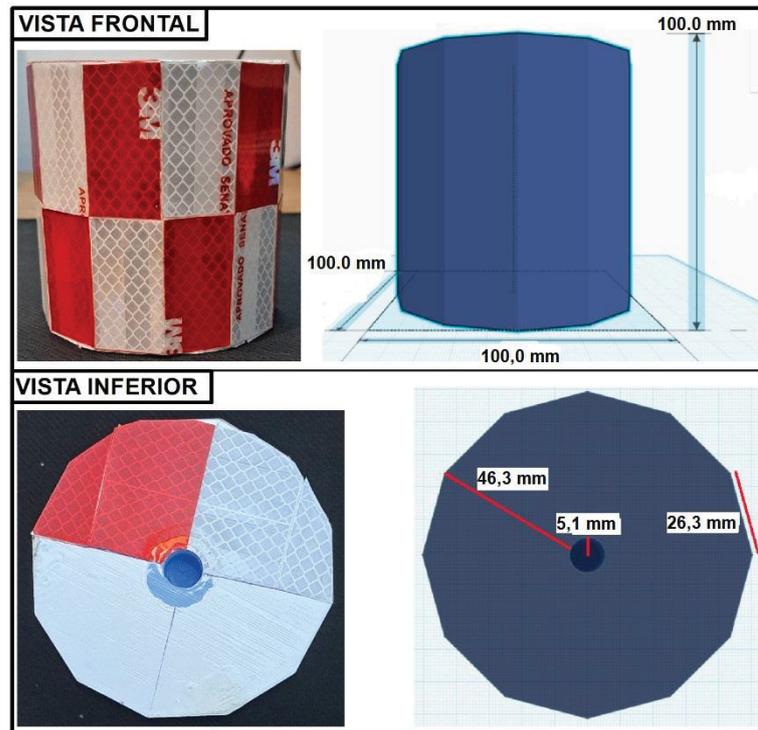


FONTE: O autor (2024).

3.2.1.1.8 Cilindro base dodecaedro H10

O cilindro base dodecaedro H10 apresenta uma base composta por 12 (doze) faces, com diâmetro de 100,00 mm e altura de 100,00 mm. A perfuração axial possui 10,2 mm de diâmetro, compatível com o pino baioneta. Este modelo foi revestido de maneira híbrida: 6 (seis) faces receberam fita adesiva refletiva, enquanto as demais 6 (seis) foram pintadas com tinta spray acrílica branca. Essa configuração permite investigar possíveis diferenças na constante calculada do alvo e na capacidade de reflexão do sinal, como ilustrado na FIGURA 51.

FIGURA 51: ALVO H10.



FONTE: O autor (2024).

3.2.2 Projetos dos adaptadores

Para viabilizar a utilização do miniprisma e do sistema para a medição da divergência do feixe foram projetados dois adaptadores, um para a adaptação do mini prisma ao pino baioneta e o segundo adaptador que permite prender o anteparo ou a prancheta ao extensor da base nivelante.

3.2.2.1 Adaptador para miniprisma

Para viabilizar o uso do miniprisma, foi projetado um adaptador que ajusta o parafuso de dimensões adequadas ao miniprisma e um encaixe para o pino baioneta,

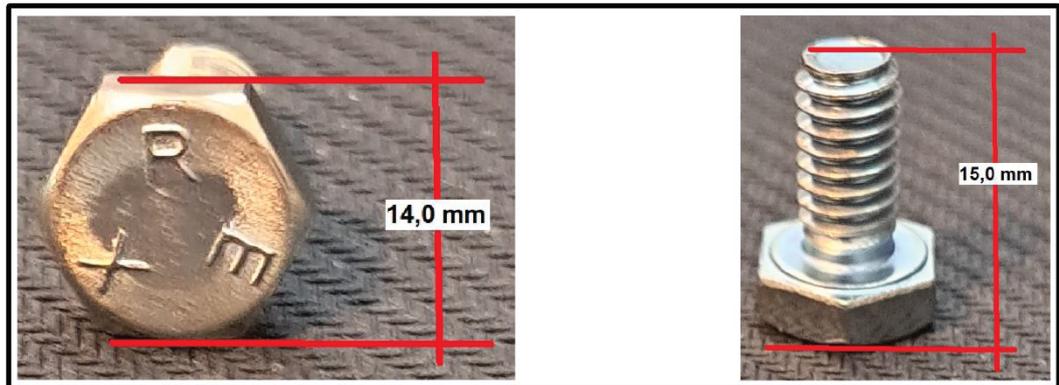
As especificações do adaptador são:

- Base: 30,0 mm x 30,0 mm;
- Altura (sem o parafuso): 37,0 mm;
- Furo inferior: Diâmetro de 10,2 mm, adaptado ao encaixe do pino baioneta.
- Encaixe superior: 14,0 mm de comprimento.
- Parafuso para o miniprisma:

- Rosca: 6,0 mm de diâmetro;
- Comprimento: 15,0 mm;
- Cabeça: 14,0 mm.

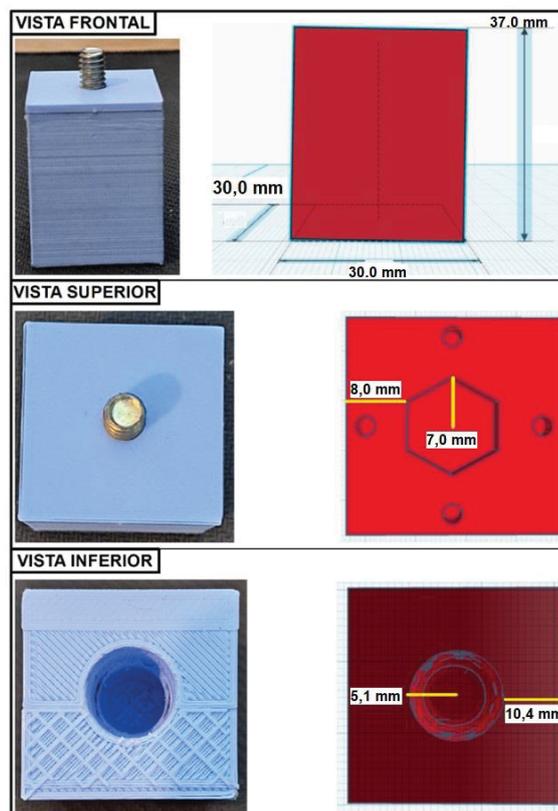
A FIGURA 53 apresenta o projeto do adaptador e a FIGURA 52 as dimensões do parafuso.

FIGURA 52: PARAFUSO UTILIZADO PARA FIXAÇÃO.



FONTE: O autor (2024).

FIGURA 53: ADAPTADOR PARA MINIPRISMA.



FONTE: O autor (2024).

3.2.2.2 Adaptador para prancheta

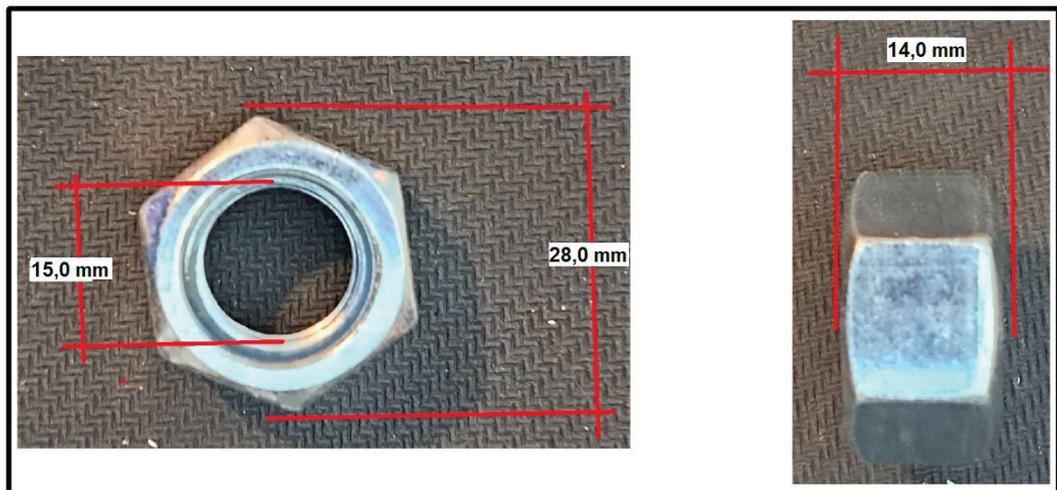
O último adaptador foi desenvolvido para o estudo da divergência do feixe infravermelho da estação total. Esse dispositivo foi projetado para suportar um anteparo com uma folha milimetrada e permitir o encaixe de uma prancheta, caso a divergência ultrapassasse os limites do anteparo — situação que, de fato, ocorreu.

As dimensões do adaptador são:

- Base: 30,0 mm x 30,0 mm;
- Altura: 40,0 mm (sem o anteparo ou a prancheta).
- Encaixe inferior: Porca com 28,0 mm de comprimento e rosca de 15,0 mm de diâmetro (FIGURA 54).
- Encaixe superior vasado: 30,0 mm de comprimento, 3,2 mm de largura e 5,0 mm de altura.

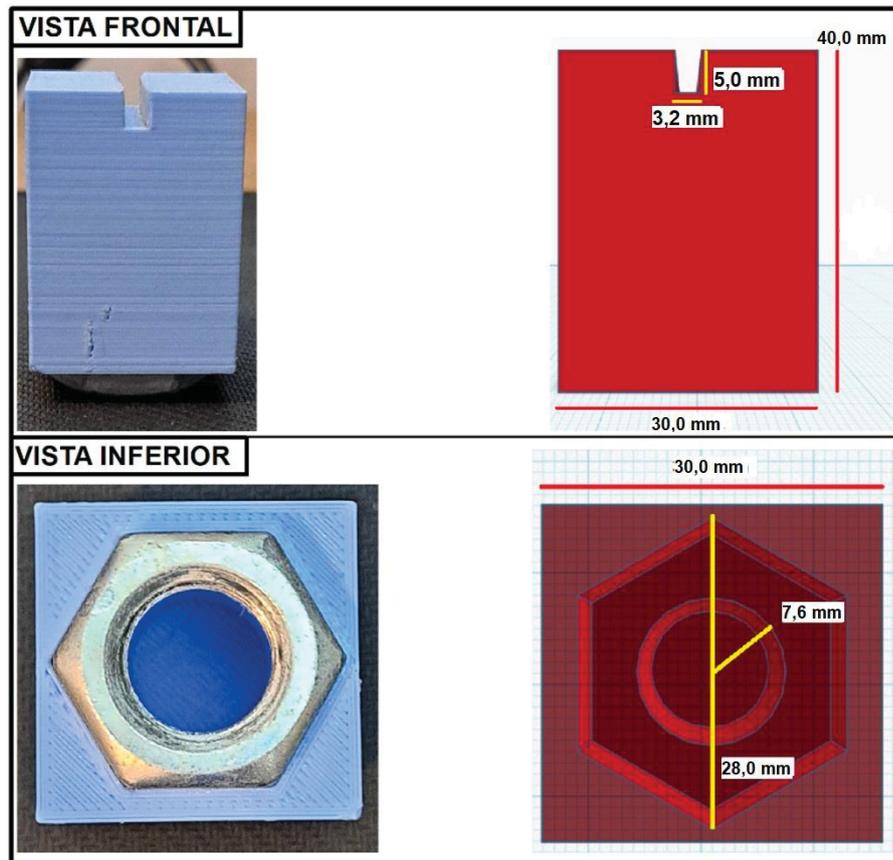
A FIGURA 55 ilustra o projeto do adaptador.

FIGURA 54: PORCA DE FIXAÇÃO DO ADAPTADOR.



FONTE: O autor (2024).

FIGURA 55: ADAPTADOR PARA ANTEPARO E PRANCHETA.



FONTE: O autor (2024).

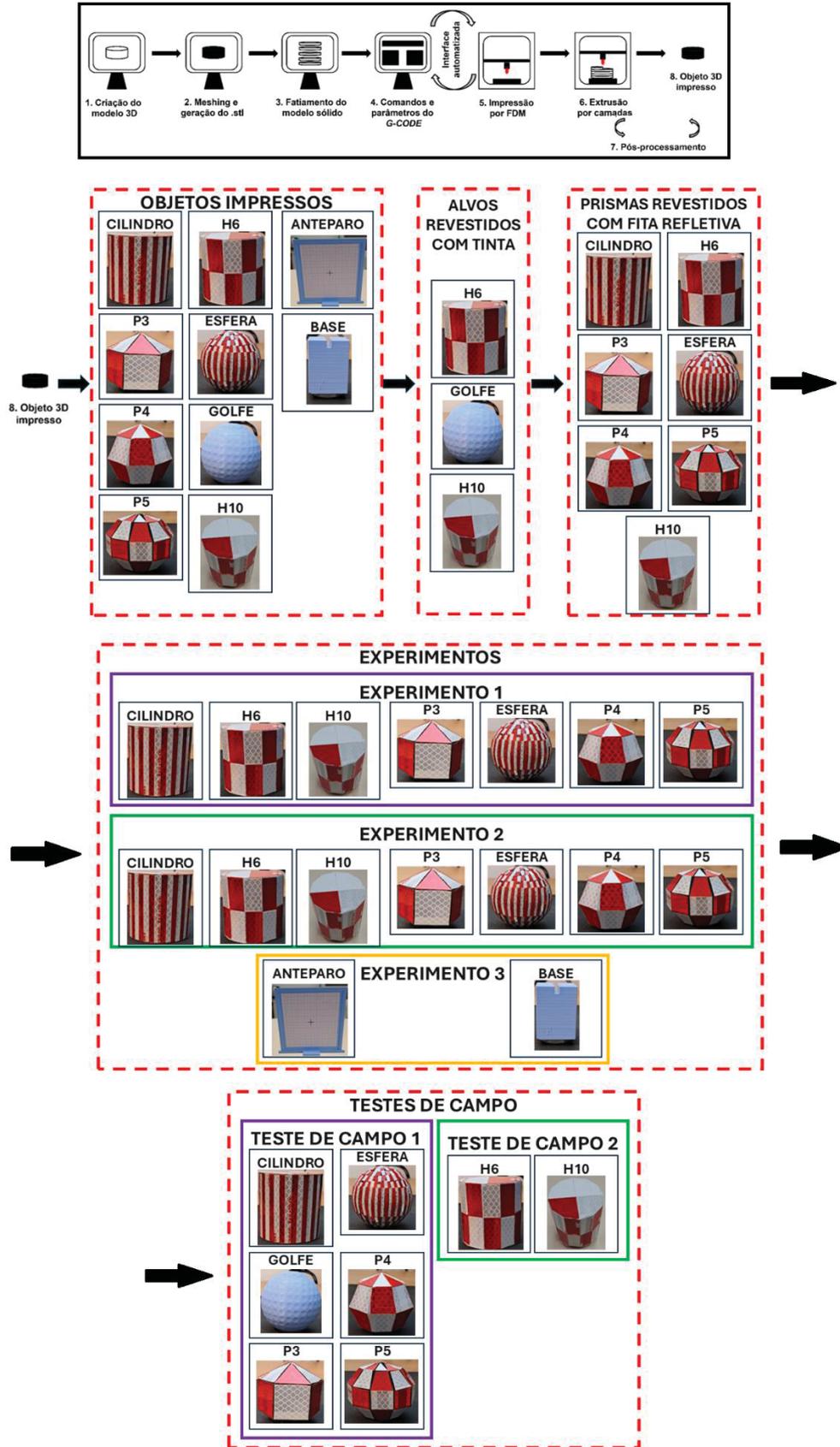
3.2.3 Experimentos

Foram realizados três experimentos, um para a determinação das constantes dos prismas desenvolvidos, um para a verificação da acurácia dos prismas e um experimento para a conferência da divergência do feixe.

Para a averiguação do desempenho dos alvos em campo, foram realizados dois testes de campo, um para determinação da capacidade dos prismas para retorno do sinal em diferentes posicionamentos e o segundo teste determinou se um prisma maior conseguiria aumentar o alcance efetivo do retorno do sinal para a estação total.

A FIGURA 56 apresenta o fluxograma com os alvos impressos em 3D e os experimentos e testes realizados.

FIGURA 56: FLUXOGRAMA DE PRISMAS IMPRESSOS, EXPERIMENTOS E TESTES DE CAMPO REALIZADOS.

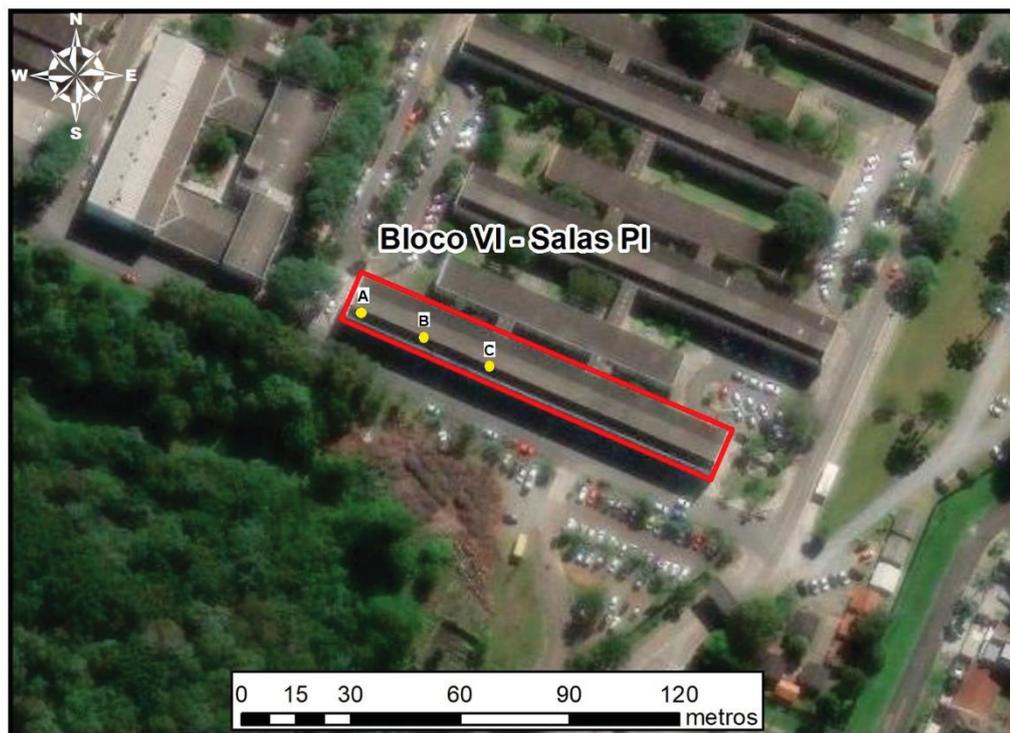


FONTE: O autor (2024).

3.2.3.1 Experimento 1: Definição das constantes dos alvos

Para a definição das constantes dos alvos, os três tripés industriais foram posicionados nos corredores do bloco VI do Centro Politécnico, ao longo do corredor das salas identificadas como PI (FIGURA 57).

FIGURA 57: LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS CONTROLADOS.



FONTE: O autor (2024).

Durante o experimento:

Temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa foram monitoradas em tempo real utilizando dois termo-higrômetros digitais, sendo um posicionado próximo ao equipamento (estação total) e o outro próximo ao prisma.

a) Procedimento de Medição:

A estação total foi posicionada no ponto A e medidas foram realizadas para o prisma situado no ponto C.

O prisma foi transferido para o ponto B, e medidas foram realizadas entre A e B.

Por fim, a estação total foi reposicionada no ponto B, e medidas foram realizadas entre B e C.

Foram utilizados os seguintes prismas:

- Prisma circular;
- Prisma 360°;
- Miniprisma circular;
- Prismas impressos.

b) Alinhamento e Orientação:

Para realizar o alinhamento dos tripés a estação total foi posicionada no ponto A e orientada em direção ao ponto C.

Com a estação orientada, realizou-se o alinhamento do tripé posicionado no ponto B.

As distâncias entre os pontos foram definidas o mais próximas possível (20,0 metros), facilitando os cálculos subsequentes, como demonstrado na FIGURA 58.

Para não haver erro durante a mudança do equipamento e dos prismas de um ponto para outro, as bases nivelantes não são retiradas, apenas destrava-se o equipamento e o muda para o próximo ponto, sem correr o risco de mover o ponto.

Por esse motivo foi utilizado o adaptador com extensor (FIGURA 59) para posicionar os prismas.

FIGURA 58: DISPOSIÇÃO DOS PONTOS A, B E C.



FONTE: O autor (2024).

FIGURA 59: BASE NIVELANTE E EXTENSOR.



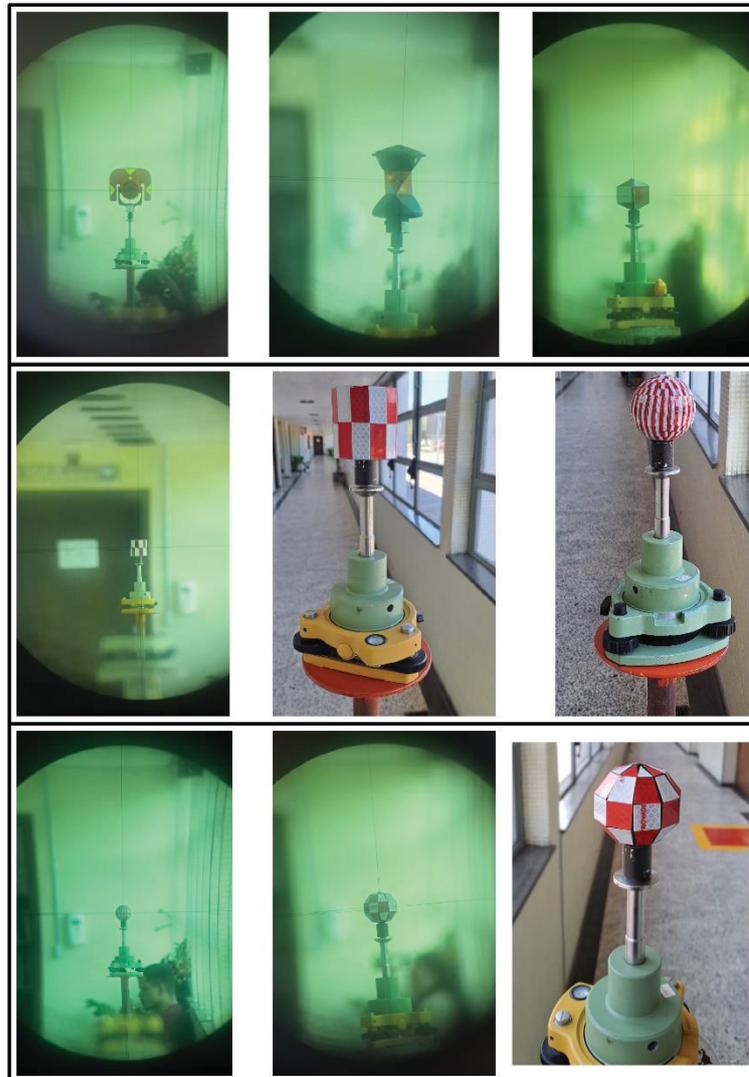
FONTE: O autor (2024).

c) Determinação das Constantes dos Prismas:

Para determinar uma distância conhecida, utilizou-se o prisma circular na primeira série de medidas. Em seguida, a constante do prisma circular foi definida no equipamento, ajustando-a em 0,0 mm e posteriormente configurou-se um novo prisma na estação com a constante igual a -34,4 mm, verificando dessa maneira se o resultado obtido para a constante calculada coincide com a constante do prisma circular do fabricante.

O mesmo procedimento foi realizado para os demais prismas (FIGURA 60), ajustando-se apenas o tipo de alvo selecionado no equipamento, conforme a superfície de reflexão (prisma, fita ou indeterminado).

FIGURA 60: EXEMPLO DOS PRISMAS UTILIZADOS.



FONTE: O autor (2024).

d) Ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados:

O método dos mínimos quadrados (MMQ) foi aplicado utilizando um modelo paramétrico para determinar a constante dos prismas e sua precisão. Além disso, foi utilizado o modelo paramétrico para calcular o valor de K_p , utilizando a equação (6.3) e substituindo K por K_p , tem-se:

$$K_p = AC - (AB + BC) \quad (7.0)$$

Onde:

K_p – Constante do prisma;

AC – Distância medida entre o ponto A e ponto C;

AB – Distância medida entre o ponto A e ponto B;

BC – Distância medida entre o ponto B e ponto C.

A equação paramétrica pode ser reorganizada para representar os resíduos (v_i) entre as observações e o modelo:

$$v_i = K_p - (AC_i - AB_i - BC_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Na forma matricial, tem-se:

$$v = A \cdot x - y \quad (8.0)$$

Onde:

v – Vetor dos resíduos;

A – Matriz design;

x – Vetor dos parâmetros;

y – Vetor das observações.

As matrizes são definidas da seguinte forma:

Matriz dos coeficientes ou matriz design (A):

$$A_{11} = \frac{\partial(K_p - AC_1 + AB_1 + BC_1)}{\partial K_p}$$

$$A_{21} = \frac{\partial(K_p - AC_2 + AB_2 + BC_2)}{\partial K_p}$$

$$A_{31} = \frac{\partial(K_p - AC_3 + AB_3 + BC_3)}{\partial K_p}$$

$$A_{n1} = \frac{\partial(K_p - AC_n + AB_n + BC_n)}{\partial K_p}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{nx1}$$

Vetor das observações (y):

$$y = \begin{bmatrix} AC_1 - AB_1 - BC_1 \\ AC_2 - AB_2 - BC_2 \\ \vdots \\ AC_n - AB_n - BC_n \end{bmatrix}_{nx1}$$

Matriz de pesos P : considerando todos os pesos iguais a precisão nominal do equipamento (σ^2) para medida do prisma específico, no caso 1 mm + 1,5 ppm para os prismas convencionais (circular, 360° e miniprisma) e 3 mm + 2 ppm para os prismas com fitas refletivas, de acordo com manual da estação total utilizada.

$$W = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma^2 \end{bmatrix}_{nxn}$$

A matriz normal é calculada como:

$$N = A^T \cdot W \cdot A \quad (8.1)$$

O vetor de correções é:

$$\delta x = N^{-1} . A^T . W . l \quad (8.2)$$

Parâmetros Ajustados (\hat{x}):

$$\hat{x} = x_0 + \delta x \quad (8.3)$$

Resíduos Ajustados (\hat{v}):

$$\hat{v} = y - (A . \delta x + y_0) \quad (8.4)$$

Precisões dos Parâmetros

Variância a Posteriori (σ_0^2):

$$\sigma_0^2 = \frac{v^T . W . v}{n-u} \quad (8.5)$$

Onde n é o número de observações e u o número de parâmetros ajustados.

Matriz de Variância e Covariância ($\Sigma_{\hat{x}}$):

$$\Sigma_{\hat{x}} = \sigma_0^2 . N^{-1} \quad (8.6)$$

Precisão da constante do prisma (σ_{K_p}):

$$\sigma_{K_p} = \sqrt{(\Sigma_{\hat{x}_{11}})} \quad (8.7)$$

3.2.3.2 Experimento 2: Verificação da capacidade dos prismas desenvolvidos na determinação de distâncias

Após a determinação das constantes de cada prisma, foi conduzido um teste experimental com o objetivo de avaliar o nível de precisão e acurácia alcançado para cada um dos prismas utilizados. Para tal, foi empregada uma haste metálica equipada

com dois pinos de encaixe, posicionados a uma distância fixa de 20,00 cm entre si (FIGURA 61). A haste foi instalada sobre uma base nivelante, garantindo sua horizontalidade durante todo o experimento, fator essencial para a obtenção de resultados confiáveis.

FIGURA 61: HASTE DE 20,0 cm E ALINHAMENTO.

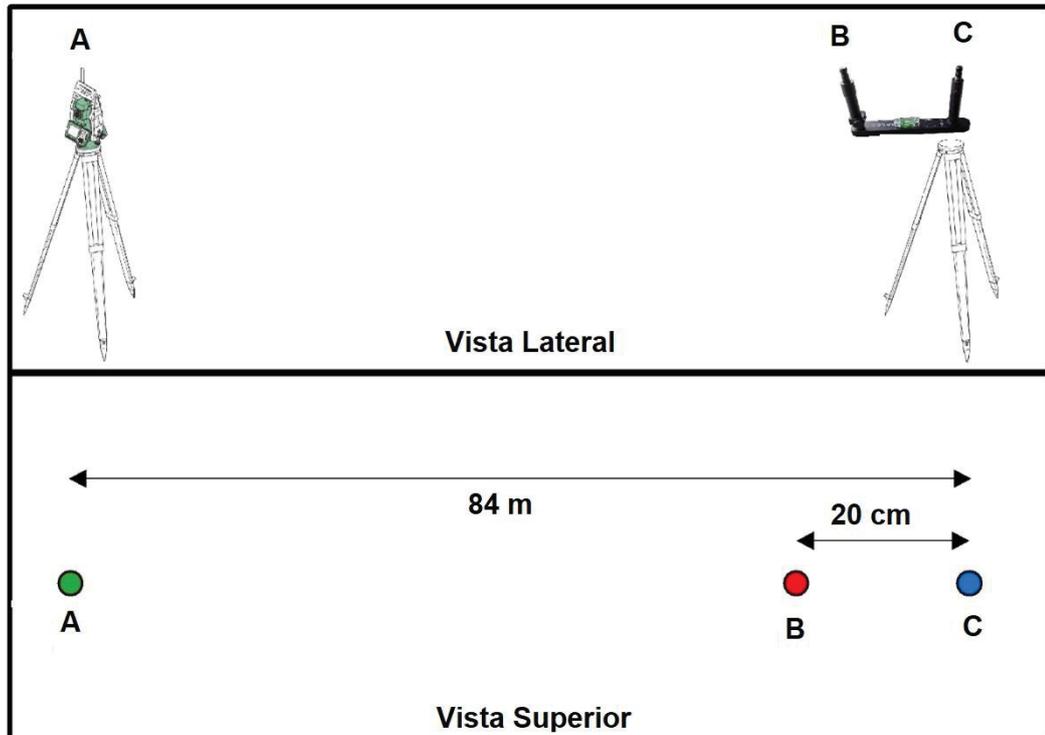


FONTE: O autor (2024).

A estação total foi instalada no ponto A, enquanto a haste foi posicionada, a aproximadamente 84 metros de distância, sobre um segundo tripé. O alinhamento foi ajustado cuidadosamente para que os pinos da haste permanecessem no mesmo eixo da linha de visada da estação total, como ilustra pelo croqui apresentado na FIGURA

62. Para fins de referência, definiu-se que o primeiro pino da haste corresponde ao ponto B, e o segundo pino corresponde ao ponto C.

FIGURA 62: CROQUI DO POSICIONAMENTO DOS PONTOS.



FONTE: O autor (2024).

Inicialmente, foi utilizado o prisma circular padrão para estabelecer as medidas de referência que serviriam como base para o experimento. Em seguida, cada prisma foi submetido a uma série de 30 medições consecutivas, realizadas em pontaria direta para os pontos B e C. As medições foram repetidas para cada tipo de prisma, assegurando que os dados fossem redundantes e permitissem uma análise estatística robusta. Durante todo o processo, foram monitoradas as condições atmosféricas, tais como temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar, com registros realizados de forma contínua em intervalos regulares. Para isso, foram utilizados dois termo-higrômetros digitais, posicionados de modo a monitorar tanto o ponto do equipamento quanto o ponto do prisma.

O alinhamento adequado da estação total e a estabilidade oferecida pela base nivelante e pelo tripé contribuíram significativamente para o controle das variáveis experimentais. O posicionamento da haste e a fixação rígida dos pinos garantiram que

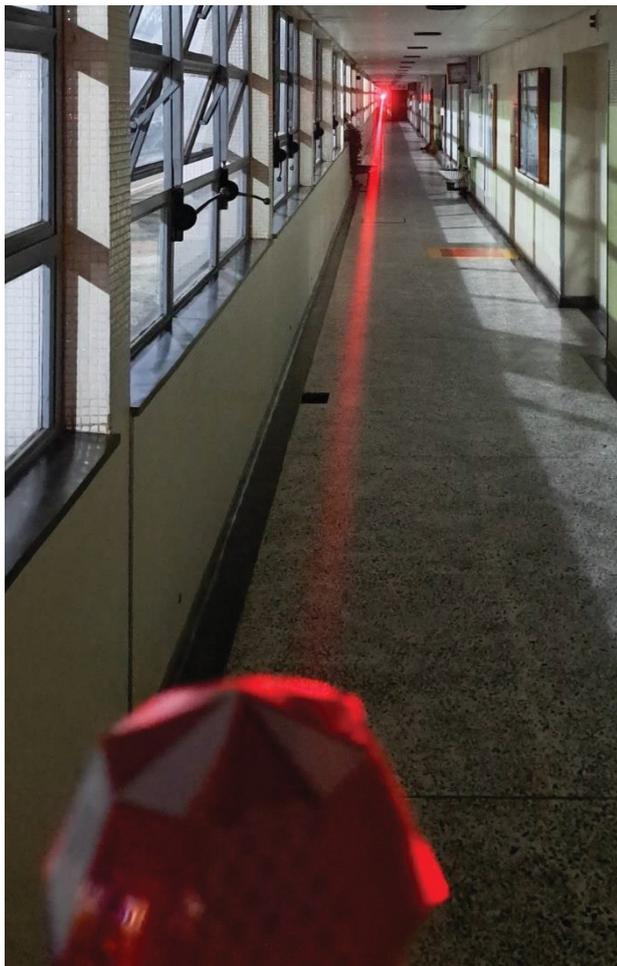
o alinhamento dos pontos B e C se mantivesse constante durante as medições. A precisão e a acurácia de cada prisma foram determinados com base nas distâncias registradas, utilizando-se como referência as medidas obtidas com o prisma circular padrão. O registro repetido das medições possibilitou a análise estatística dos dados, viabilizando a determinação do desvio-padrão das observações, associado à precisão, e a verificação da acurácia em relação aos valores de referência.

O rigor na execução do experimento, com o controle das condições ambientais e a repetição das medições, garantiu a obtenção de dados confiáveis.

3.2.3.3 Experimento 3: Divergência do feixe de infravermelho

Para verificar se a divergência do feixe de infravermelho utilizado pelo sistema de Medição Eletrônica de Distâncias (MED) da estação total atende às especificações preconizadas pelo fabricante, foi desenvolvido e conduzido um experimento específico. Este foi realizado durante o período noturno para minimizar interferências de luz ambiente e garantir condições ideais para a observação e registro do feixe, a FIGURA 63 demonstra o feixe laser visível da estação total. Devido a configuração da câmera para fotos noturnas, que aumenta o tempo de exposição, a iluminação noturna do campus ficou similar a iluminação solar, dando a impressão de ser período diurno.

FIGURA 63: FEIXE DE LASER VISÍVEL INCIDINDO SOBRE O PRISMA.

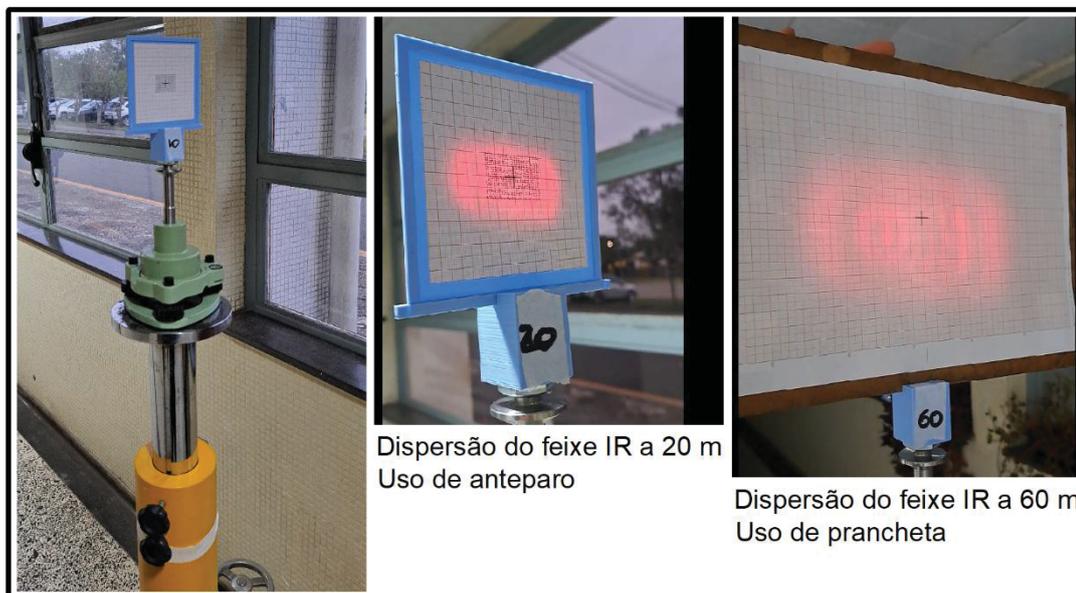


FONTE: O autor (2024).

O experimento consistiu na instalação de um adaptador para prancheta em uma base nivelante com extensor, posicionada sobre um tripé industrial. A estação total foi instalada no extremo oposto de um corredor, utilizando outro tripé industrial para assegurar a estabilidade e alinhamento. Uma folha milimetrada foi fixada sobre uma prancheta de material opaco, formando o anteparo necessário para a observação da divergência do feixe.

As medições foram realizadas em distâncias crescentes de 10 metros, 20 metros, 30 metros, 40 metros, 50 metros, 60 metros e 70 metros. Cada distância foi previamente conferida com o auxílio de um prisma circular, garantindo a precisão das distâncias envolvidas. Após essa verificação, o prisma foi substituído pelo adaptador contendo o anteparo com a folha milimetrada (FIGURA 64).

FIGURA 64: ANTEPARO PARA MEDIDAS DE DIVERGÊNCIA DO INFRAVERMELHO.



FONTE: O autor (2024).

Durante a realização de cada medida, foi utilizada uma câmera de celular para registrar o espalhamento do feixe infravermelho na folha milimetrada. Esse registro visual permitiu a análise da divergência do feixe e sua comparação com os valores especificados pelo fabricante. O uso da folha milimetrada, além de fornecer uma base clara para a detecção do feixe, facilitou a quantificação da divergência ao longo das diferentes distâncias testadas.

Para a definição da função que melhor representa os valores obtidos, realizou-se uma regressão linear, utilizando biblioteca específica da linguagem python.

A execução cuidadosa do experimento, com o controle rigoroso das condições de medição, possibilitou uma análise detalhada da divergência do feixe.

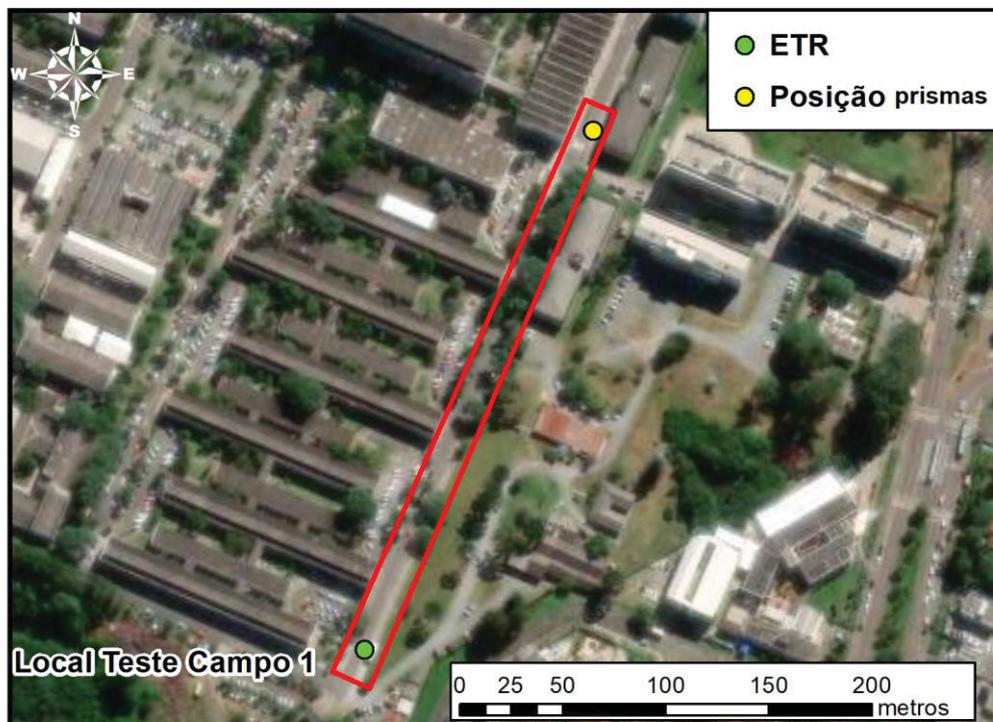
Este teste não foi realizado com a portadora laser, na FIGURA 63 demonstrase o laser visível.

3.2.4 Testes em campo

Foram realizados três testes em campo em dias distintos, todos conduzidos nas dependências do Campus 3 – Centro Politécnico da UFPR, com o objetivo de avaliar o desempenho de diferentes tipos de prismas e sistemas de medição com a ETR.

O primeiro teste em campo foi realizado na rua principal do campus (FIGURA 65).

FIGURA 65: LOCAL DO PRIMEIRO TESTE EM CAMPO.



FONTE: O autor (2024).

Para a realização do teste os prismas foram instalados em um bastão equipado com um bipé, posicionado a uma distância de 290,00 metros da estação total. Inicialmente, foram realizadas medições utilizando o prisma circular padrão, com o intuito de estabelecer um parâmetro inicial para comparações (FIGURA 66).

FIGURA 66: PRISMA CIRCULAR POSICIONADO.



FONTE: O autor (2024).

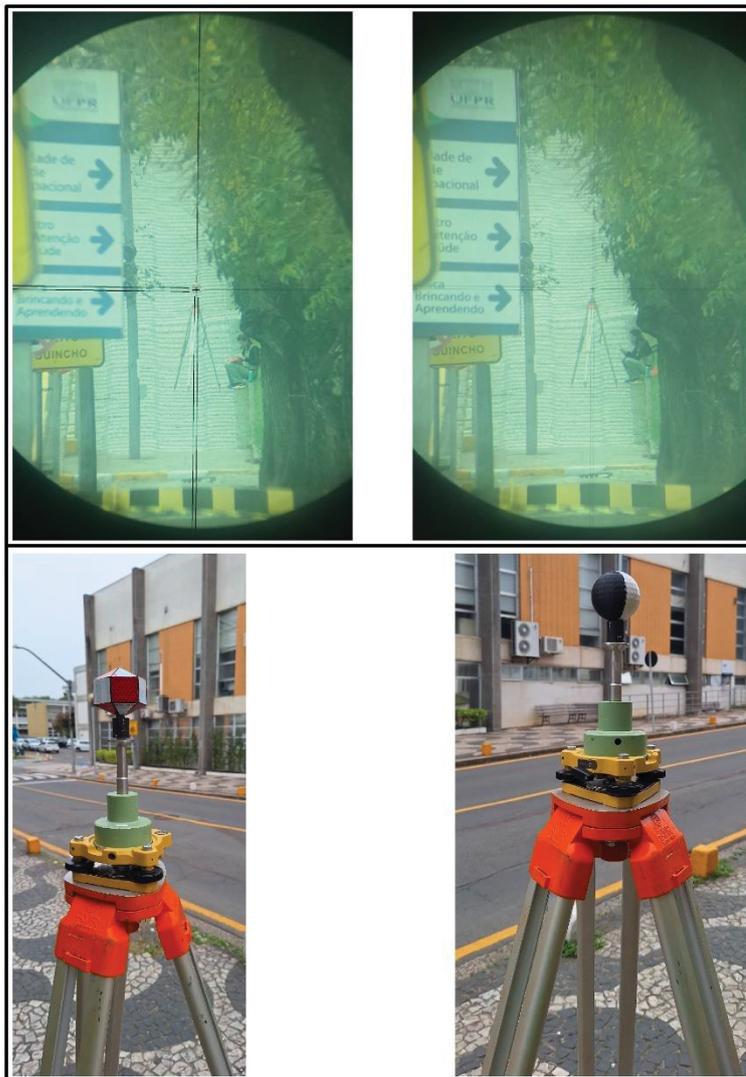
Em seguida, os prismas foram testados para avaliar a capacidade de leitura e a influência da geometria no retorno de sinal para o MED, tanto com o infravermelho quanto com a portadora laser a exceção foram os prismas apenas com a pintura, os quais foram medidos apenas com o laser.

Para verificar as possíveis variações nas medições causadas pela orientação do prisma, este foi rotacionado em intervalos regulares de 10 segundos (a cada 10 segundos, intervalo de medição registrado pela estação total) os prismas eram rotacionados, de forma a expor diferentes faces à linha de visada da estação total.

Em cada posicionamento do prisma foi realizada uma medida, quando utilizando a portadora infravermelho, com um total de dez medidas e duas medidas para cada posição do prisma, quando utilizada a portadora laser, com um total de vinte medidas, ou seja, um total de trinta medidas por prisma.

A FIGURA 67 e FIGURA 68 demonstram os prismas utilizados.

FIGURA 67: EXEMPLO DE PRISMAS E ALVOS UTILIZADOS E VISADA PELA ETR.



FONTE: O autor (2024).

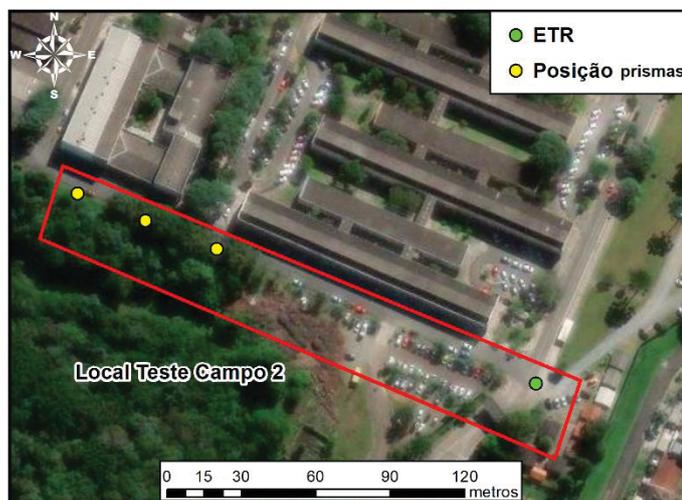
FIGURA 68: PRISMAS UTILIZADOS.



FONTE: O autor (2024).

O segundo teste em campo foi projetado para avaliar a influência do tamanho do prisma no retorno do sinal medido pela estação total e foi realizado ao lado do bloco VI, como demonstra a FIGURA 69. Para isso, foram utilizados prismas cilíndricos com base dodecaédrica de dois tamanhos distintos o prisma H6 e o prisma H10.

FIGURA 69: LOCAL SEGUNDO TESTE EM CAMPO.

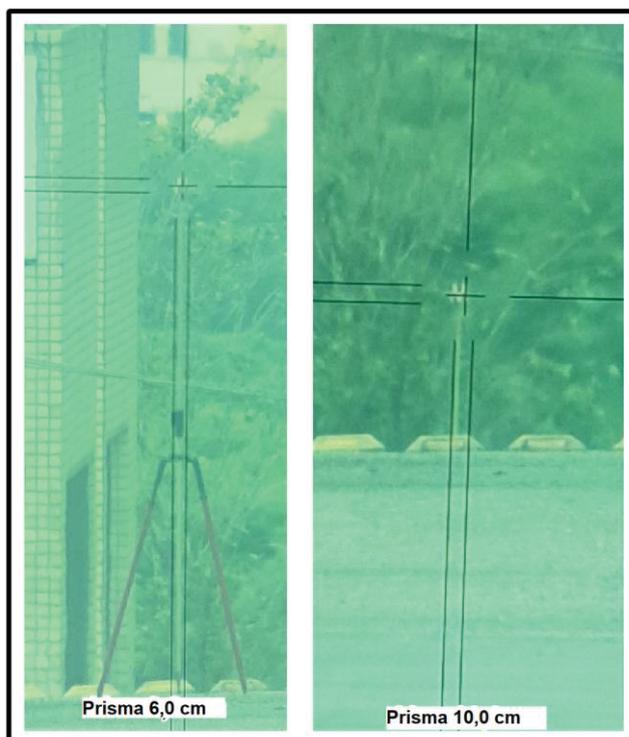


FONTE: O autor (2024).

As medições foram realizadas inicialmente com o prisma menor, até o ponto em que não fosse mais detectado o retorno do sinal. Em seguida, o prisma menor foi substituído pelo maior, de 10,0 cm de diâmetro, para verificar se o alcance da medição seria ampliado em função do aumento da área do prisma.

A FIGURA 70 demonstra as visadas realizadas com a estação total no prisma de 6,0 centímetros e no de 10,0 centímetros.

FIGURA 70: VISADA DOS PRISMAS PELA LUNETETA DA ETR.



FONTE: O autor (2024).

4 RESULTADOS

Para a realização dos cálculos, utilizou-se a linguagem de programação Python para elaborar os programas de cálculo, utilizando o ambiente de programação *Visual Studio Code* (VSCoDe). Este editor, de código aberto, lançado pela Microsoft em 2015, é amplamente reconhecido por sua versatilidade e suporte a diversas linguagens de programação. Destaca-se pela configuração intuitiva de ambientes virtuais, especialmente para Python, o que facilita a gestão de dependências e bibliotecas. Sua abordagem modular, associada à possibilidade de personalização por meio de

extensões, permite sua adaptação a projetos variados, enquanto sua compatibilidade com múltiplos sistemas operacionais o posiciona como uma ferramenta robusta e amplamente utilizada tanto no meio acadêmico quanto no profissional.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTO 1 – DEFINIÇÃO DAS CONSTANTES DOS PRISMAS

A determinação das constantes dos prismas foi conduzida a partir do cálculo da constante aditiva (K_A) obtida pela aplicação da equação 6.3, resultando em $K_A = 0,58 \text{ mm}$. Essa constante foi então relacionada à constante do prisma (K_p) calculada por meio da equação 6.4, sendo os resultados apresentados no QUADRO 1

QUADRO 1: RESULTADOS DAS CONSTANTES DOS PRISMAS CALCULADA.

Prisma	Constante do prisma (K_p)	Desvio-padrão da constante determinada (σ_{K_p})
Prisma Circular Constante Leica (0,00 mm)	0,00 mm	$\pm 0,01 \text{ mm}$
Prisma Circular Constante Absoluta (34,4 mm)	33,77 mm	$\pm 0,01 \text{ mm}$
Esfera (R = 30,0 mm)	-24,93 mm	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Poliedro P3 (R = 30,62 mm)	-20,57 mm	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Poliedro P4 (R = 29,3 mm)	-23,40 mm	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Poliedro P5 (R = 30,0 mm)	-24,17 mm	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Cilindro (R = 30,0 mm)	-26,57 mm	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Prisma H6 (R = 29,5 mm)	-26,39 mm	$\pm 0,4 \text{ mm}$
Prisma H10 com fita refletiva (R = 49,15 mm)	-48,20 mm	$\pm 0,4 \text{ mm}$
Alvo H10 com tinta (R = 49,15 mm)	-49,26 mm	$\pm 0,4 \text{ mm}$

FONTE: O autor (2024).

Notou-se uma diferença de 0,63 mm entre o valor calculado para o prisma circular 33,77 mm e a constante determinada pelo fabricante de 34,4 mm. As constantes dos demais alvos apresentaram desvio-padrão inferiores a 0,5 mm, evidenciando a consistência dos resultados e demonstrando que as determinações foram satisfatórias. Após a definição das constantes, os dados foram inseridos no sistema ETR TS-15 para condução dos demais experimentos (FIGURA 71).

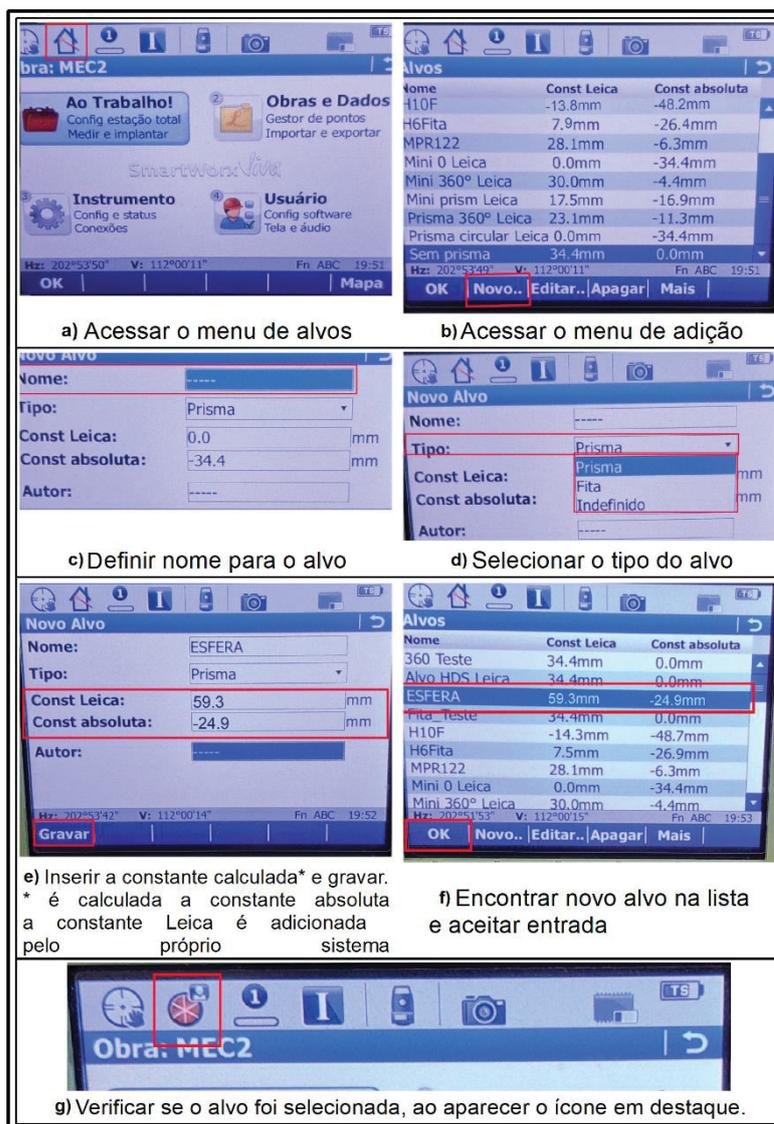
Para adicionar um novo alvo no equipamento ETR TS-15, inicialmente deve-se ligar o dispositivo e acessar a tela inicial. Em seguida, deve-se selecionar o menu de alvos e prismas, conforme destacado na FIGURA 71a. Na tela de seleção de prismas e alvos, deve-se acessar a aba destinada à adição de um novo componente, conforme indicado na FIGURA 71b.

Na tela de adição, o primeiro passo é inserir o nome do novo prisma, como ilustrado na Figura 71c. Após isso, é necessário selecionar o tipo de componente entre as opções disponíveis: prisma, fita ou indefinido (FIGURA 71d). Posteriormente, deve-se inserir o valor da constante do prisma. No caso de uma constante calculada, como as utilizadas neste trabalho, o valor deve ser inserido no campo designado como "Constante Absoluta" (FIGURA 71e). Este campo também deve ser utilizado quando forem adicionados prismas de fabricantes distintos. Após a inserção do valor da constante absoluta, o sistema calcula e define automaticamente a "Constante Leica". A inclusão do nome do autor é facultativa. Concluídas essas etapas, os dados devem ser salvos.

Após salvar o novo prisma ou alvo, o sistema retorna para a tela de seleção, onde o prisma recém-adicionado estará listado. Para utilizar o novo prisma, deve-se selecioná-lo na lista e confirmar a escolha, conforme indicado na FIGURA 71f.

Ao confirmar o novo prisma, o sistema retorna à tela inicial. Nesse momento, o ícone indicativo do alvo será atualizado para o correspondente ao novo prisma, conforme apresentado na FIGURA 71g.

FIGURA 71: PASSOS PARA INCLUSÃO DE NOVO ALVO NA TS-15.



FONTE: O autor (2024).

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTO 2 – VERIFICAÇÃO DA ACURÁCIA DOS PRISMAS NA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS

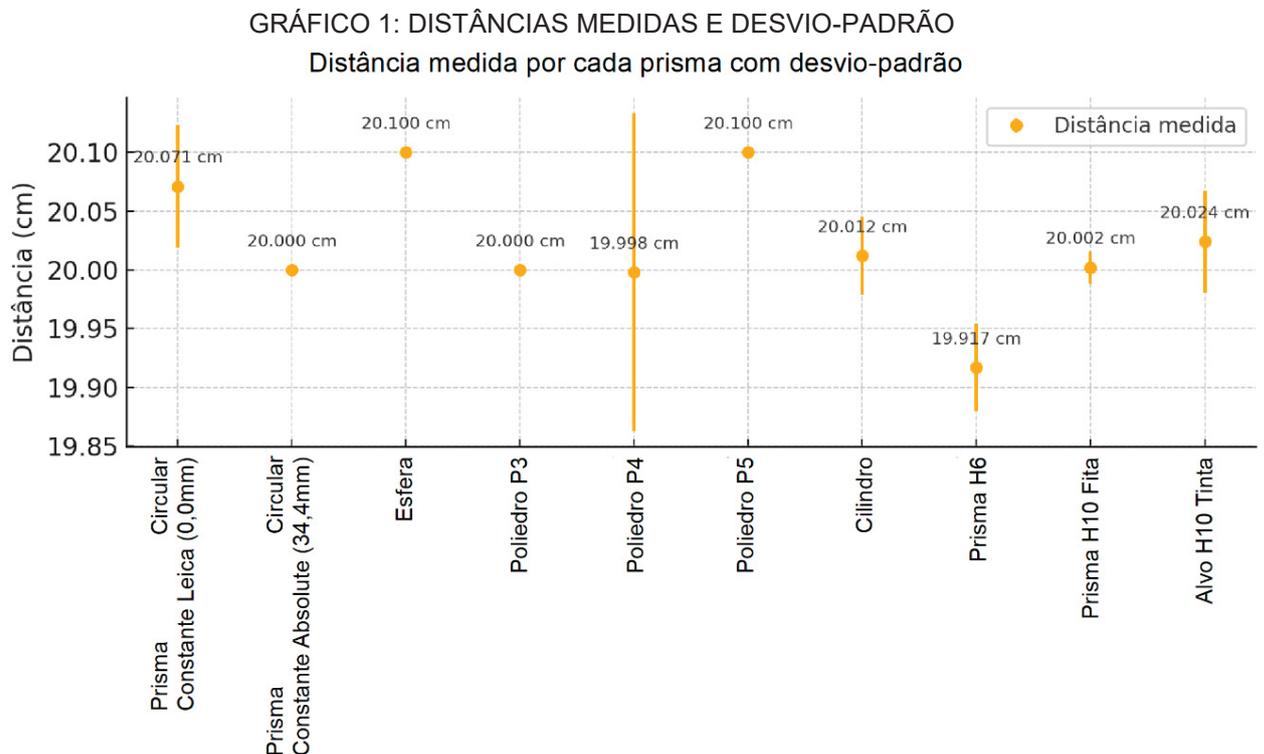
Este experimento avaliou a confiabilidade dos prismas desenvolvidos para medições de distâncias fixas, utilizando uma haste de alumínio de 20,0 cm. Os resultados obtidos, apresentados no QUADRO 2, indicam alta precisão, com desvios-padrão baixos para a maioria dos alvos. Para a obtenção dos resultados do QUADRO 2 e 3 foram realizadas 50 medidas com cada prisma.

QUADRO 2: RESULTADO DO CÁLCULO DA DISTÂNCIA DA HASTE.

Alvos	Distância medida (D)	Desvio-padrão da distância (σ_D)
Prisma Circular Constante Leica (0,0 mm)	20,071 cm	$\pm 0,520$ mm
Prisma Circular Constante Absoluta (34,4 mm)	20,000 cm	$\pm 0,010$ mm
Esfera	20,100 cm	$\pm 0,010$ mm
Poliedro P3	20,000 cm	$\pm 0,010$ mm
Poliedro P4	19,998 cm	$\pm 1,350$ mm
Poliedro P5	20,100 cm	$\pm 0,010$ mm
Cilindro	20,012 cm	$\pm 0,330$ mm
Prisma H6	19,917 cm	$\pm 0,370$ mm
Prisma H10 Fita	20,002 cm	$\pm 0,140$ mm
Alvo H10 Tinta	20,024 cm	$\pm 0,430$ mm

FONTE: O autor (2024).

O GRÁFICO 1 demonstra o valor da distância calculada com cada alvo e seu desvio-padrão.



FONTE: O autor (2024).

Destacaram-se o Poliedro P4, com maior desvio-padrão ($\pm 1,35$ mm), e o prisma H6, que apresentou a maior diferença em relação ao prisma circular (1,54 mm), mas manteve um desvio-padrão inferior a 2,0 mm. Adicionalmente, foi avaliada a capacidade dos prismas de retornar sinais ao MED da estação total. Prismas revestidos com tinta acrílica branca mostraram limitações em condições de alta luminosidade, enquanto a esfera de golfe não apresentou resultados consistentes mesmo com ajustes no equipamento.

A diferença em relação ao prisma circular (Δ_{PC}) e ao valor fixo da haste (Δ_D) foi detalhada no QUADRO 3.

QUADRO 3: DIFERENÇA ENTRE OS VALORES DE DISTÂNCIA UTILIZANDO OS PRISMAS E O PRISMA CIRCULAR E O VALOR FIXO DA HASTE.

Alvos	Diferença no comprimento da haste (pontos BC) em comparação com a distância determinada com prisma circular (Δ_{PC})	Diferença ente o valor medido entre os pontos BC e o valor conhecido (20 cm) (Δ_D)
Prisma Circular Constante Leica (0,0 mm)	0,00 mm	- 0,71 mm
Prisma Circular Constante Absoluta (34,4 mm)	0,71 mm	0,00 mm
Esfera	- 0,29 mm	- 1,00 mm
Poliedro P3	0,71 mm	0,00 mm
Poliedro P4	0,73 mm	0,02 mm
Poliedro P5	0,71 mm	- 1,00 mm
Cilindro	0,59 mm	- 0,12 mm
Prisma H6	1,54 mm	0,83 mm
Prisma H10 Fita	0,69 mm	- 0,02 mm
Alvo H10 Tinta	0,47 mm	- 0,24 mm

FONTE: O autor (2024).

Portanto, considerando os valores determinados para a distância padrão (20,0 cm) , ou seja, a capacidade de medir o valor real, ou no caso o valor de referência de 20,0 cm, pode-se considerar que todos os prismas possuem uma acurácia significativa quando considerada uma medida relativa, no caso a determinação dos 20,0 cm entre

os pontos B e C (\overline{BC}) fixos da haste e não a distância entre a estação total (Ponto A) e os cada um dos pontos da haste, no caso, as distâncias \overline{AC} e \overline{AB} .

O QUADRO 4 destaca as diferenças apresentadas entre a distância relativa calculada com o uso dos prismas e a distância de referência de 20,0 centímetros.

QUADRO 4: ACURÁCIA APRESENTADA NAS MEDIDAS REALIZADAS COM OS PRISMAS NA DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA DE 20,0 cm.

Alvos	Diferença do valor fixo da haste (Δ_D)
Esfera	- 1,00 mm
Poliedro P3	0,00 mm
Poliedro P4	0,02 mm
Poliedro P5	- 1,00 mm
Cilindro	- 0,12 mm
Prisma H6	0,83 mm
Prisma H10 Fita	- 0,02 mm
Alvo H10 Tinta	- 0,24 mm

FONTE: O autor (2024).

Todos os prismas apresentaram para a determinação da distância relativa entre os pontos BC da haste, inferiores a 1 mm. Considerando-se também o erro de centragem dos prismas como igual ao prisma circular esta diferença estaria embutida no erro de centragem.

Com base nos resultados obtidos nos testes, é possível avaliar as características de precisão e acurácia dos prismas analisados na determinação de distâncias relativas. Dessa forma, podem ser identificados prismas que são simultaneamente precisos e acurados, ou seja, apresentam baixa dispersão em relação ao valor central e conseguem medir o valor real de forma fidedigna. Também podem ser observados prismas que são apenas precisos, caracterizados por uma baixa dispersão entre os valores medidos, mas que não se aproximam do valor real. Além disso, existem prismas que são exclusivamente acurados, cujas medições estão próximas do valor real, mas apresentam alta dispersão. Por fim, há prismas que não são nem precisos nem acurados, evidenciando medições com alta dispersão e que também não se aproximam do valor real.

O QUADRO 5 demonstra as características de cada prisma.

QUADRO 5: CARACTERÍSTICA DOS PRISMAS QUANTO A PRECISÃO E ACURÁCIA.

Alvos	Característica
Esfera	Preciso
Poliedro P3	Preciso e Acurado
Poliedro P4	Acurado
Poliedro P5	Preciso
Cilindro	Preciso e Acurado
Prisma H6	Sem precisão e sem acurácia
Prisma H10 Fita	Preciso e Acurado
Alvo H10 Tinta	Acurado

FONTE: O autor (2024).

4.3 RESULTADOS EXPERIMENTO 4 – DIVERGÊNCIA DO FEIXE DE INFRAVERMELHO

A análise da dispersão do feixe de infravermelho em função da distância foi conduzida por meio de regressão linear, resultando na equação (10.0).

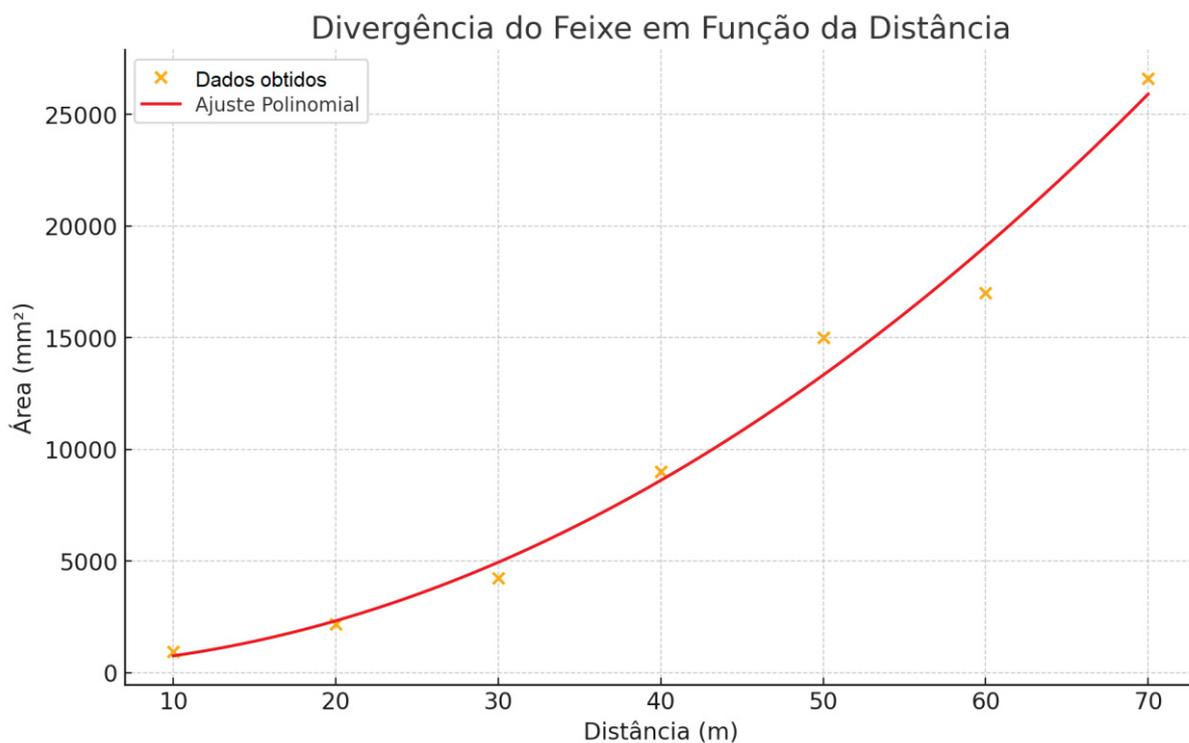
$$A(d) = 242,86 - 0,488 \cdot d + 5,244 \cdot d^2 \quad (10.0)$$

Onde:

$A(d)$ – Área em mm² em função da distância;

d – Distância em metros.

GRÁFICO 2: GRÁFICO DA FUNÇÃO GERADA.



FONTE: O autor (2024).

QUADRO 6: VALORES DE DIVERGÊNCIA DO FEIXE INFRAVERMELHO.

Distância (m)	Valor do fabricante	Valor do teste
10,0	450,00 mm ²	960,00 mm ²
20,0	1080,00 mm ²	2170,00 mm ²
30,0	4050,00 mm ²	4250,00 mm ²
40,0	7200,00 mm ²	9000,00 mm ²
50,0	11250,00 mm ²	15000,00 mm ²
60,0	16200,00 mm ²	17000,00 mm ²
70,0	22050,00 mm ²	26600,00 mm ²

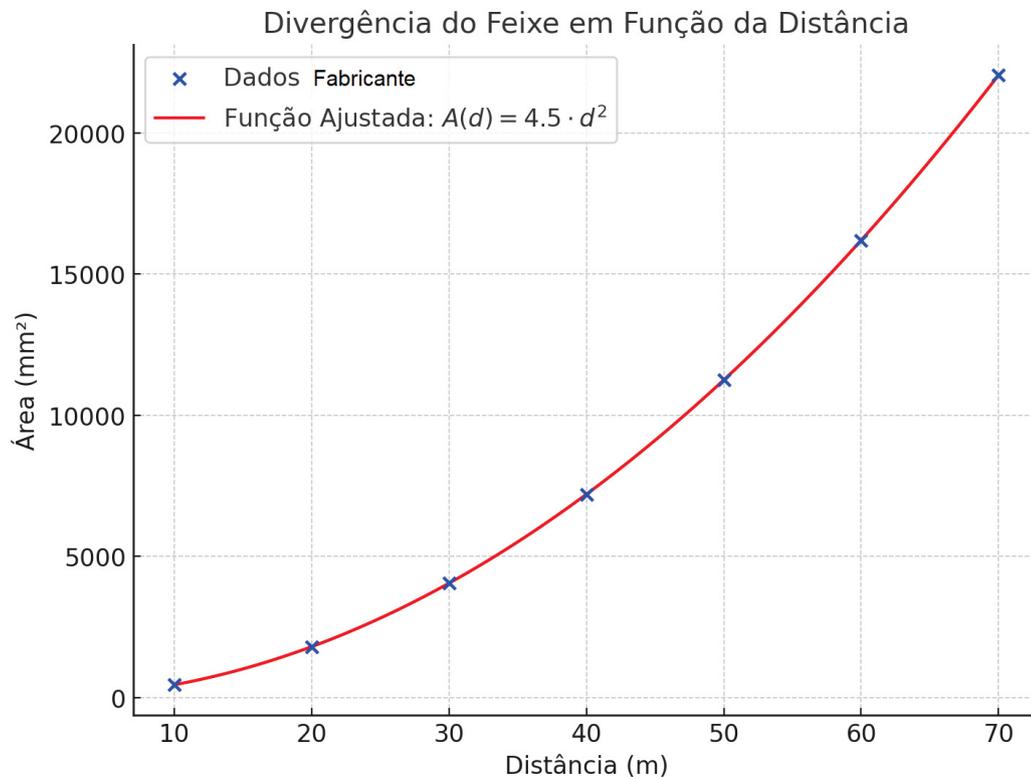
FONTE: O autor (2024).

Aplicando apenas os valores fornecidos pelo fabricante chega-se a seguinte função:

$$A(d) = 4,5 \cdot d^2 \quad (10.1)$$

E o seguinte gráfico resultante (GRÁFICO 3):

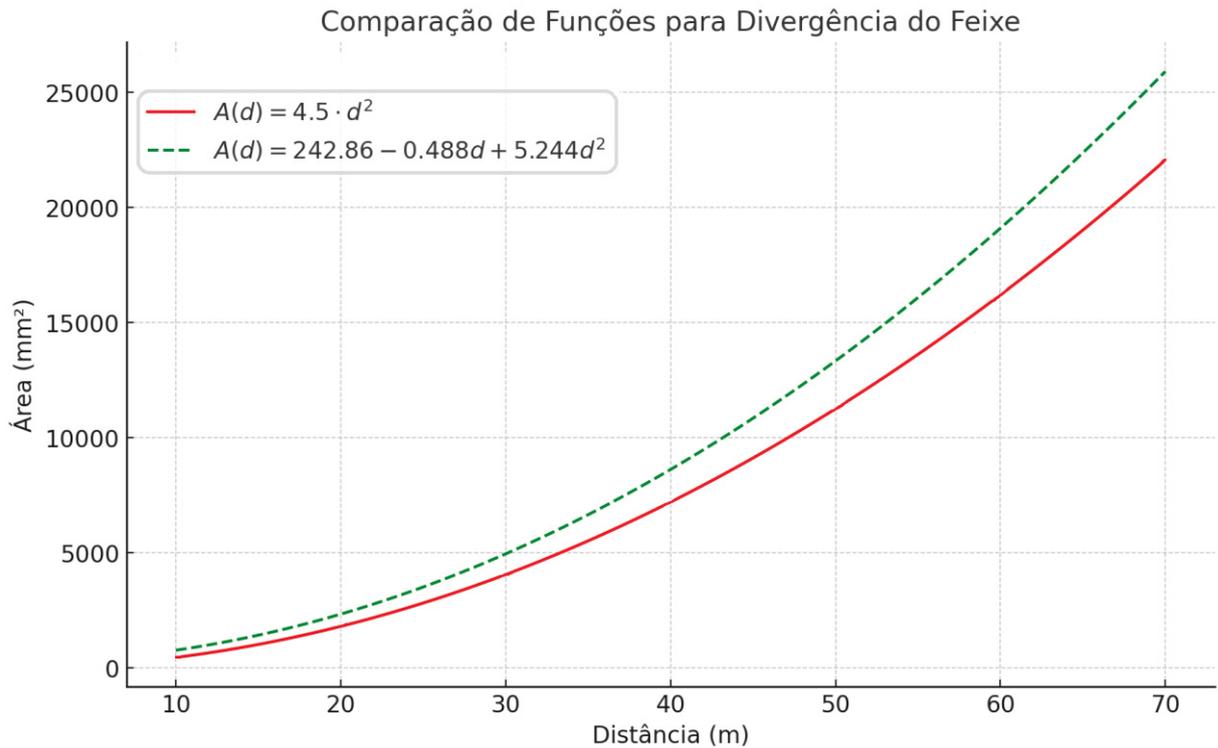
GRÁFICO 3: GRÁFICO DA FUNÇÃO COM OS DADOS DO FABRICANTE.



FONTE: O autor (2024).

Comparando as duas curvas geradas:

GRÁFICO 4: COMPARAÇÃO DAS FUNÇÕES DE DIVERGÊNCIA DO FEIXE.



FONTE: O autor (2024).

Apesar de diferenças em relação aos valores fornecidos pelo fabricante (QUADRO 6), as curvas geradas demonstraram comportamentos semelhantes, evidenciando que a dispersão calculada foi impactada pela acuidade visual do observador, introduzindo incertezas ao modelo.

4.4 RESULTADOS TESTE EM CAMPO

O primeiro teste em campo teve como objetivo avaliar se a geometria do prisma influenciaria nos resultados das medições de distância. Para isso os prismas foram posicionados a aproximadamente 290,0 metros da estação total e a cada 10 segundos era realizada a rotação do prisma, possibilitando uma medida em cada face. Ao todo foram realizadas 30 medidas em cada prisma. Os valores obtidos estão apresentados no QUADRO 5, que resume as distâncias medidas e seus respectivos desvios-padrão. Observa-se que o prisma circular retrorrefletor, utilizado como referência, apresentou o menor desvio-padrão ($\sigma_d = 0,18 \text{ mm}$), enquanto os prismas alternativos, como cilindro e poliedros, exibiram maior variabilidade.

QUADRO 5: RESULTADOS DAS DISTÂNCIAS.

Alvo	Distância (d)	Desvio-padrão (σ_d)
Prisma Circular	292,4260 m	0,18 mm
Cilindro	292,4064 m	0,91 mm
Poliedro P3	292,4165 m	1,28 mm
Poliedro P4	292,4070 m	4,66 mm
Poliedro P5	292,4143 m	1,83 mm

FONTE: O autor (2024).

O QUADRO 6 apresenta as diferenças entre as distâncias medidas em relação ao prisma circular (Δ_{PC}) e os respectivos desvios-padrão dessas diferenças. Apesar de o cilindro apresentar a maior discrepância em relação ao prisma circular ($\Delta_{PC} = -19,5 \text{ mm}$), foi também o prisma que exibiu o menor desvio-padrão ($\sigma_{\Delta_{PC}} = 0,9 \text{ mm}$), o que demonstra sua estabilidade.

QUADRO 6: DIFERENÇA ENTRE MEDIDAS COM O PRISMA CIRCULAR E COM OS PRISMAS DESENVOLVIDOS.

Alvo	Diferença para PC (Δ_{PC})	Desvio-padrão da diferença ($\sigma_{\Delta_{PC}}$)
Cilindro	-1,95 cm	0.9 mm
Poliedro P3	-0,94 cm	1,2 mm
Poliedro P4	-1,89 cm	4,6 mm
Poliedro P5	-1,16 cm	1,8 mm

FONTE: O autor (2024).

Embora os prismas tridimensionais, como os poliedros P3, P4 e P5, tenham sofrido rotação durante as séries de medições, o que gerou maior desvio-padrão, seus valores permaneceram dentro de limites aceitáveis para levantamentos topográficos. Prismas com maior excentricidade, como o Poliedro P4, apresentaram maior variabilidade ($\sigma_{\Delta_{PC}} = 4,6 \text{ mm}$), mas ainda assim apresentou resultado satisfatório.

Adicionalmente, a esfera de golfe foi testada, porém não apresentou consistência nos dados. O sinal de retorno variou consideravelmente, impossibilitando a conclusão de medições precisas. Foram realizadas tentativas com a opção de medições sem prisma na ETR, mas os resultados também foram inconsistentes, apresentando múltiplos retornos ou, em alguns casos, ausência completa de sinal.

Esse comportamento destaca a influência da geometria e dos materiais dos prismas na qualidade das medições, evidenciando que prismas projetados com geometria estável, como o cilindro, tendem a oferecer maior confiabilidade nas medidas obtidas.

Com base nos resultados obtidos no primeiro teste, decidiu-se desenvolver um prisma com geometria mais simples que a do cilindro, mas que mantivesse características próximas em termos de estabilidade e capacidade reflexiva. Assim, foram projetados e impressos dois novos prismas com base na geometria de um dodecaedro: os prismas H6 e H10.

Para avaliar o desempenho dos novos prismas, foi realizado um teste de alcance do sinal. O prisma H6 atingiu uma distância máxima de 326,614 metros antes de perder a capacidade de retorno do sinal. Em seguida, o prisma H10 foi testado, alcançando 348,018 metros, superando o alcance do H6. O prisma H10 continuava fornecendo medições consistentes além dessa distância, mas a continuidade do teste foi limitada pela falta de visada livre para distâncias superiores. Esses resultados destacam o potencial dos prismas H6 e H10 como alternativas viáveis em levantamentos topográficos, combinando simplicidade geométrica com alta eficiência na reflexão do sinal.

4.5 PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver novas alternativas de acessórios para uso em levantamentos topográficos, com foco principal, embora não exclusivo, na aplicação com MEDs (Medições Eletrônicas de Distâncias). Durante o processo, a escolha de uma geometria apropriada que permitisse a adesão eficiente de fitas refletivas representou um desafio significativo. Isso deve-se à rigidez inerente das fitas, que dificulta sua aplicação em superfícies altamente curvas, como as esféricas, comprometendo a aderência e a funcionalidade do revestimento.

A qualidade da impressão 3D revelou-se diretamente dependente da escolha do filamento e da utilização de softwares adequados para o projeto dos objetos. Esses fatores influenciaram tanto a precisão dimensional quanto a durabilidade das peças impressas, destacando a importância de selecionar insumos e ferramentas apropriados para alcançar resultados consistentes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver e validar um conjunto de prismas refletores e equipamentos auxiliares visando o apoio à levantamentos topográficos. Para tanto foram projetados e construídos 8 prismas refletores e desenvolvidos e realizados 5 experimentos de campo.

Os experimentos realizados neste estudo de caso permitiram avaliar o desempenho de diferentes prismas e configurações em levantamentos topográficos, destacando-se o desenvolvimento e a aplicação dos prismas poliedro P3, Cilindro e H10. As análises realizadas abordaram aspectos como precisão das medições, estabilidade geométrica, alcance do sinal e consistência em situações de campo. A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas:

Precisão e Confiabilidade dos prismas:

Os resultados dos experimentos indicaram que os prismas, poliedro P3, Cilindro e H10 apresentam características confiáveis para levantamentos topográficos, demonstrando precisão e acurácia.

Influência da Geometria:

A geometria dos prismas mostrou-se um importante fator para a qualidade das medições. Prismas mais estáveis, como o cilindro e o H6, apresentaram menor desvio-padrão e maior consistência nos dados. Em contrapartida, prismas com maior excentricidade, como os poliedros P4 e P5, sofreram com maiores desvios, principalmente em situações de rotação.

Alvos como a esfera de golfe, que possuem menor área refletiva efetiva, apresentaram limitações significativas, incluindo inconsistência no retorno de sinal.

Alcance e Capacidade Refletiva:

O H6 alcançou 326,614 metros em condições de campo, enquanto o H10 superou essa marca, destacando-se como uma solução possível de aplicação para levantamentos de longo alcance. Essa superioridade reflete a maior área refletiva e o aprimoramento na geometria do H10, atingindo até 348,018 metros, superando o prisma H6 e tornando-se como uma opção para medições em maiores distâncias.

Alvos com revestimentos de tinta acrílica branca demonstraram limitações em ambientes com alta luminosidade, ressaltando a importância de materiais refletivos adequados para assegurar medições consistentes.

Dispersão do Feixe de Infravermelho:

A análise da dispersão do feixe de infravermelho mostrou que as medições realizadas diferiram dos valores fornecidos pelo fabricante, especialmente em distâncias maiores. Apesar disso, a similaridade entre as curvas geradas sugere que os métodos utilizados foram eficazes, embora passíveis de melhorias, especialmente na redução de erros visuais.

Conclusão Geral:

Os resultados dos experimentos confirmam que os prismas desenvolvidos são alternativas viáveis aos prismas padrão em levantamentos topográficos, destacando-se pela simplicidade de fabricação, precisão, principalmente na determinação de distâncias relativas, e alcance do sinal.

Por fim, a análise da geometria dos alvos e sua interação com o equipamento evidenciou a importância de um design otimizado e materiais refletivos de alta qualidade. A adoção de prismas personalizados, como o cilindro, apresenta vantagens operacionais e econômicas, tornando-os uma opção atraente para aplicações acadêmicas e profissionais em levantamentos geodésicos e topográficos.

5.1 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Testes em Condições Ambientais Adversas

Realizar experimentos em ambientes com alta luminosidade, neblina, chuva ou poeira, a fim de avaliar o desempenho dos alvos revestidos com fitas refletivas em situações desafiadoras.

Investigar o comportamento dos alvos em temperaturas extremas, para verificar possíveis alterações no desempenho devido à dilatação térmica ou deformações do material impresso em 3D.

Exploração de Novas Geometrias

Desenvolver e testar alvos com outras formas geométricas, buscando designs que combinem simplicidade de fabricação, estabilidade e eficiência refletiva, como o uso do anteparo impresso em 3D para a determinação da divergência do feixe, porém revesti-lo com a fita refletiva para utiliza-lo como um prisma refletor.

Avaliar a relação entre a geometria e o desempenho em diferentes ângulos de incidência do feixe de medição.

Comparar o desempenho dos alvos 3D revestidos com fitas refletivas a tecnologias emergentes, como sistemas de medição a laser sem prisma, para identificar vantagens e limitações específicas.

Testar o uso de materiais compostos ou híbridos na fabricação dos alvos, como polímeros reforçados com fibras para melhorar a resistência mecânica.

Automação e Integração com Sistemas Avançados

Investigar a possibilidade de integrar alvos 3D a sistemas autonivelantes e estações totais automatizadas, avaliando a compatibilidade com fluxos de trabalho digitais.

Desenvolver soluções inteligentes, como alvos equipados com sensores ou etiquetas RFID (*Radio-Frequency Identification*).

A utilização de etiquetas RFID em alvos topográficos representa uma inovação que pode agregar benefícios significativos em termos de rastreabilidade, automação e eficiência no processo de levantamentos

Testar melhorias nos alvos para aumentar o alcance de sinal em distâncias superiores a 350 metros, ampliando sua aplicação em projetos de grande escala.

Analisar a dispersão do feixe de infravermelho em distâncias muito longas, correlacionando os resultados com diferentes geometrias e materiais reflexivos.

Validação Estatística e Modelagem

Ampliar a base de dados dos experimentos para validar estatisticamente os resultados obtidos, assegurando maior robustez nas conclusões.

Aplicar modelagem e simulações computacionais para prever o desempenho dos alvos em diferentes condições antes da fabricação.

REFERÊNCIAS

3M™ Grau Diamante™ Conspicuity Série 983. ., 2023. 3M. Disponível em: <https://www.3m.com.br/3M/pt_BR/transportes/>. .

AFENI, T. B. ***An Approach to Eradicate the Effects of Atmospheric Variations on Total Station Distance Measurement in a Surface Mine Environment. the Impact of Taking Measurement Through a Glass Medium***, 2011.

BAYOUD, F. A. ***Leica's Pinpoint EDM Technology with Modified Signal Processing and Novel Optomechanical Features***. XXIII FIG Congress, 2006.

BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Gestão, Tecnologia e Inovação, 2017.

BORILLE, A. V. **Prototipagem rápida ou manufatura aditiva? Aplicações na indústria de moldes**. Ferramental: Revista Brasileira da Indústria de Ferramentas, 2010.

BRAUN, J. ***Testing of the automatic targeting of total station trimble S8 on reflective targets***. 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM2015 Section Geodesy and Mine Surveying, 2015.

BÜRGE, G.; AYTAÇ, E.; EVCIL, A.; SAVAS, M. A. ***An Investigation on Mechanical Properties of PLA Produced by 3D Printing as an Implant Material***. 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 2020.

COPLEY, M. K. ***Comparison between robotic total station reflector-less measurement and terrestrial laser scanning for building modelling***, 2019.

EHRHART, M.; LIENHART, W. ***Monitoring of Civil Engineering Structures using a State-of-the-art Image Assisted Total Station***. Journal of Applied Geodesy, 2015.

EHRHART, M.; LIENHART, W. ***Object tracking with robotic total stations: Current technologies and improvements based on image data***. Journal of Applied Geodesy, v. 11, 2017.

Electronic Distance Measurement Calibration Baseline., 2015. National Land Commission Secretariat.

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

FAGGION, P. L. **Considerações Sobre a Instrumentação Topográfica**, 2010.

FERREIRA, N. R. A.; CHAVES, J. C. **Análise da acurácia de observações com uma estação total robótica em ensaio controlado de deslocamento**. Revista Brasileira de Cartografia, 2017.

FILHO, C. A. Z. **Utilização De Técnicas De Poligonação De Precisão Para O Monitoramento De Pontos Localizados Em Galerias De Inspeção: Estudo De Caso Da U. H. De Salto Caxias**, 2005.

FRANÇA, R. M. DE. **Redes Geodésicas Horizontais em Áreas Urbanas**, 2023.

FRANÇA, R. M. DE; KLEIN, I.; VEIGA, L. A. K. **Densificação de RRCM a baixo custo e sem erros de centragem**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 76, 2024.

FRIEDMANN, R. M. P. **Desenvolvimento de Sistema de Levantamentos Semi-Autonômico Empregando Estação Total Robotizada e Veículo Terrestre Não Tripulado**, 2013.

GARRIDO-VILLÉN, N.; ANTÓN-MERINO, A.; VALERO, J. L. B.; MATA, R.; RABOSO, D. **Atmospheric Attenuation and Scintillation Effects on the Range of EDM Instruments**. *Journal of Surveying Engineering*, v. 141, 2015.

GHILIANI, C. D.; WOLF, P. R.; GIDUDU, A. **Elementary Surveying An Introduction to Geomatics**. 14^o ed. Boston, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**, 2010.

GOMES, J. P. **Determinação de Desníveis de Precisão Utilizando Estação Total**, 2006.

GOMEZ, J. A. G. **Desarrollo De Técnicas Avanzadas De Control Para La Estabilización De Un Gimbal (2DOF)**, 2020.

GRAÇA, A. J. S.; FOSSE, J. M.; VEIGA, L. A. K.; BOTELHO, M. F. **A Impressão 3D no Âmbito das Representações Cartográficas**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 73, 2021.

ISO/ASTM 52900:2015 - **Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology1,2**, 2015. ISO/ASTM.

KIRSCHNER, H.; STEMPFHUBER, W. **The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations A State of the Art Report on the Leica TPS1200+**. 1st International Conference on Machine Control & Guidance 2008, 2008.

LACKNER, S.; LIENHART, W. ***Impact of Prism Type and Prism Orientation on the Accuracy of Automated Total Station Measurements.*** *Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems (IGMS)*, 2016.

Leica TS15 User Manual., 2015. Leica Geosystem. Disponível em: <leica-geosystems.com>. .

Leica Nova TM60 Fiche technique., 2020. Leica Geosystem. Disponível em: <leica-geosystems.com>. .

LEVIN, E.; NADOLINETS, L.; AKHMEDOV, D. ***Surveying Instruments and Technology.*** Boca Raton, 2017.

LIENHART, W.; EHRHART, M.; GRICK, M. ***High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations.*** *Journal of Applied Geodesy*, 2016.

MANDAL, N. K. ***3D printed models to enhance engineering student engagement and learning.*** *Global Journal of Engineering Education*, 2021.

MARTINI, L. ***Calibração de Prismas de Reflexão Total em forma de Fita Adesiva, em Acrílico e sua Aplicação no Controle de Deslocamentos de Estruturas,*** 2005.

MEDEIROS, L. I. B. DE. ***Monitoramento Dinâmico De Estruturas Por Diferentes Técnicas Geodésicas Simultaneamente: Estudo De Caso De Um Ponto Da Passarela Politécnico-Botânico Da Ufpr,*** 2020.

MEDEIROS, L. I. B. DE; FAGGION, P. L.; ALVES, S. DE S. O. ***Análise do Desempenho de ETR no Monitoramento Dinâmico de Estrutura Metálica por Leitura Contínua de Direções.*** *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, 2020.

MIRANDA, F. DAS D. A. ***Monitoramento Topográfico em Tempo-Real com a Utilização de um Sistema Semi-Automatizado,*** 2012.

MIRZAEI, M.; NOGHANIAN, S.; WIEST, L.; CHANG, I. ***Developing Flexible 3D Printed Antenna Using Conductive ABS Materials.*** *International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2015.

MUNHOZ, A. L. J.; COSTA, C. A.; AHRENS, C. H.; et al. ***Manufatura Aditiva Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D.*** 5º ed. São Paulo, 2017.

NIKOLITSAS, K.; LAMBROU, E. ***Comparison of two different methodologies for correcting refraction in vertical angles.*** *Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia (SIFET)*, v. 13, 2020.

PECHO, P.; AZALTOVIC, V.; KANDERA, B.; BUGAJA, M. **Introduction study of design and layout of UAVs 3D printed wings in relation to optimal lightweight and load distribution**. Transportation Research Procedia, v. 40, 2019.

RIBEIRO, L. G.; SUOMINEN, O. J.; DURMUSH, A.; et al. **Retro-Reflective-Marker-Aided Target Pose Estimation in a Safety-Critical Environment**. Applied Sciences MDPI, v. 11, 2020.

RODRIGUEZ, F. A. C. **Automação da Correção da Primeira Velocidade em Medidas Eletrônicas de Distância com Base em Rede de Observação de Parâmetros Ambientais Multi-Estações**, 2018.

RODRIGUEZ, F. A. C.; VEIGA, L. A. K.; SOARES, W. A. **Temperature Acquisition System for Real Time Application of First Velocity Correction by EDM (Electronic Distance Measurement)**. Journal of Geomatics and Planning, v. 8, 2021.

RÜGUER, J. M. **Electronic Distance Measurement An Introduction**. 4^o ed. Austrália, 1996.

SAMPAIO, L. F.; VEIGA, L. A. K.; ALVES, S. DE S. O. **Using Smartphones as a Measurement Platform in Geoscience Applications**. Anuario do Instituto de Geociencias, v. 46, 2023.

SILVA, I. DA; SAGANTINE, P. C. L. **Topografia para engenharia : teoria e prática de geomática**. 1^o ed. Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, R. N. F. **Avaliação do Método de Nivelamento Trigonométrico, Técnica Leap-Frog, na Determinação de Recalque em Grandes Estruturas: Eestudo de Caso para a UHE Mauá**, 2012.

SIVASLIGIL, M.; EROL, C. B.; POLAT, Ö. M.; SARI, H. **Validation of refractive index structure parameter estimation for certain infrared bands**. Applied Optics, v. 52, 2013.

Surveying Reflectors White Paper Characteristics and Influences., 2017. Leica Geosystem. Disponível em: <leica-geosystems.com>. .

TAMIR, T. S.; XIONG, G.; FANG, Q.; et al. **A Feedback-based Print Quality Improving Strategy for FDM 3D Printing: An Optimal Design Approach**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.

TERMINANTO, A.; RESWATI, R.; PUTRA, V. D. **Studi Kelayakan dan Implementasi Perangkat Lunak ComputerAidedDesign**

OpensourceFreecadSebagai Pengganti Autocaddan SolidWorksdalam Kuliah Di Teknik Industri Universitas Pancasila. *Journal Of Social Science Research*, 2023.

UREN, J.; PRICE, B. ***Surveying for Engineers***. 5^o ed. Brighton, 2010.

WANG, K.; ZHAO, Y.; CHANG, Y. H.; et al. **Controlando o comportamento mecânico de metamateriais impressos em 3D de material duplo para fantasmas que imitam tecidos específicos do paciente. *Materiais e Design*, v. 90, p. 8, 2016.**

XIN, Z.; KONG, S.; WU, Y.; ZHAN, G.; YU, J. ***A Hierarchical Stabilization Control Method for a Three-Axis Gimbal Based on Sea–Sky-Line Detection***. *Sensors*, 2022.

ZRINJSKI, M.; BARKOVI, D.; BARICEVIC, S. ***Precise Determination of Calibration Baseline Distances***. *Journal of Surveying Engineering*, v. 145, 2019.