

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÉSAR AUGUSTO ARIAS DURÁN

**ESTUDO DO USO DE CINEMETRIA PARA A ANÁLISE DO
DESLOCAMENTO DE MACIÇO EM OBRAS
SUBTERRÂNEAS**

Porto Alegre

2014

CÉSAR AUGUSTO ARIAS DURÁN

**ESTUDO DO USO DE CINEMETRIA PARA A ANÁLISE DO
DESLOCAMENTO DE MACIÇO EM OBRAS
SUBTERRÂNEAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Controle e Automação.

Linhas de Pesquisa: Sistemas de Automação e Instrumentação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

Porto Alegre

2014

CÉSAR AUGUSTO ARIAS DURÁN

**ESTUDO DO USO DE CINEMETRIA PARA A ANÁLISE DO
DESLOCAMENTO DE MACIÇO EM OBRAS
SUBTERRÂNEAS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e
aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela
Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Technische Universitat Stuttgart – Stuttgart,
Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Cezar Zingano, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dra. Danúbia Bueno Espíndola, FURG

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Agosto de 2014.

DEDICATÓRIA

A Deus, por ter permitido meus pais se conhecer, e posteriormente me dado a vida, por dar ao meu espírito a capacidade para ter fé e possuir a vontade de ajudar às pessoas que precisam.

Aos meus pais Rosa e Leonidas, pelo enorme esforço que tem feito durante todos os meus anos de vida, oferecendo-me carinho incondicional, amor, fraternidade, oportunidades para estudar. Eles que dia a dia me ensinam o porque de continuar lutando mesmo com dificuldades. Para eles que não tiveram oportunidade de estudar e entregaram todo para que os seus filhos pudéssemos realizar o que eles não conseguiram.

Ao meu grande irmão Carlos Arias, que além de ser parte do meu sangue é o meu grande amigo, aquele que escuta, que dá força quando é necessário. Sendo aquela pessoa que sabe lembrar as coisas boas compartilhadas e vividas de quando fomos crianças, aumentam o tamanho da alegria do meu coração e me estimulando para continuar com os meus objetivos.

À minha esposa Camila, pela sua entrega durante esta fase de dias difíceis e dedicação total ao filho, por compreender e ser paciente nos momentos de não ter uma pessoa para compartilhar um café da manhã, um almoço e outras ocasiões, pelo seu amor e paciência para suportar os dias de estresse.

Ao meu filho Arthur, que ainda pequeno, este logro será um acontecimento para se sentir orgulhoso do pai e sirva como exemplo para que futuramente ele seja melhor que o pai. Para ele, que durante seus 9 meses não conseguiu ter toda a atenção dos pais, nem quando nasceu, mas que isto, permitira que daqui para a frente seja uma criança forte e sempre cheio do amor dos pais.

Ao Brasil e os meus amigos brasileiros, pela sua amizade fraternidade, pelas alegrias compartilhadas ao correr destes dois anos, pela oportunidade de poder conhecer uma cultura diferente e ser parte dela.

À minha Colômbia, que me criou com humildade, com honestidade e com alegria, essa terra que me ensinou como disfrutar cada momento da vida, essa terra que possui algo desconhecido no sangue das pessoas, o qual faz de um colombiano um “berraco”.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

Ao professor Carlos Eduardo Pereira, pelo seu apoio e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq pelo primeiro ano de bolsa.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado no segundo ano do curso.

Ao Rodolfo Dresch, o Lucas Walantus, o Robert Cabral, o Jean Winter, o Ivan Muller, o César Orozco, o Mauricio Longhi, o André Michel, o Sergio Martínez, o Aquiles Rossoni, o Sergio Braunstein, Viyils Soto, pela sua honesta amizade, pelos seus abraços de força quando mais o precisei, pela ajuda na realização nos testes necessários para esta dissertação, pelos seus conselhos, pelos almoços compartilhados no RU, os quais não teriam o mesmo gosto sem a presença deles.

Aos colegas do LASCAR, pela sua ajuda e amizade incondicional.

Aos colegas do LASEP, pelos incontáveis churrascos e aceitação de parte da cultura colombiana, pelos debates e colocações políticas que em algumas oportunidades se geraram, pelos chimas compartilhados para deixar de um lado o pesado sono que invadi o corpo do estudante, a vocês um muito obrigado, e sou gaúcho na tradição.

Ao IEE, pelo apoio e a facilidade para acessar aos instrumentos que ajudaram no processo de validação experimental do meu trabalho.

Em geral, ao grupo de professores do PPGEE, dos quais consegui aprender coisas que tornam-se importante na vida de uma pessoa. Também agradeço de forma especial ao pessoal da secretaria do PPGEE, pela sua disponibilidade, ajuda e orientação durante todo o curso de mestrado.

RESUMO

As escavações subterrâneas têm estado sempre afetadas pelas condições dos maciços, os quais apresentam diferentes características e comportamentos frente a deformações ocasionadas após a escavação de uma galeria ou túnel. Em virtude disto, torna-se necessário uma análise dos parâmetros que permitam estabelecer as condições de segurança do túnel e propõe-se o uso de um sistema estéreo de rastreamento ótico para analisar o deslocamento de artefatos (conjunto de marcadores) instalados sobre o contorno das faces do túnel, a fim de detectarem-se deslocamentos do maciço em pontos estabelecidos com precisão menor a ± 1 mm. O sistema proposto opera na região espectral do infravermelho, permitindo assim uma operação em ambientes com baixa luminosidade e com inserção de ruído ótico. Adicionalmente o trabalho inclui resultados de validação e desenvolvimento do sistema de visão estéreo baixo condições de dois cenários de diferente volume espacial, assim como o procedimento realizado para a calibração dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos dos sensores do sistema (câmeras monocromáticas). Os resultados obtidos apresentam uma precisão de $\pm 0,1881$ mm para artefatos com três marcadores e uma precisão de $\pm 0,4952$ para artefatos com quatro marcadores. Finalmente, o sistema opera com uma sensibilidade de 0,99 mm na determinação da posição de um artefato associado a um ponto do perfil do túnel, e desta forma, podem-se definir as condições de estabilidade do maciço rochoso e os requisitos para auxílio as decisões de métodos de tratamento e aumento da segurança.

Palavras-chave: Sistemas óticos de rastreamento, Escavações Subterrâneas, Correspondência de Imagens, Reconstrução em 3D, Artefatos.

ABSTRACT

Underground excavations have always been affected by the conditions of mass, which have different characteristics and behaviors against deformation caused after excavation of a gallery or tunnel. Because of this, it is necessary an analysis of the parameters needed to establish the safety conditions of the tunnel and it is proposed the use of a stereo optical tracking to analyze the displacement of artifacts (set of markers) installed on the contour of tunnels' faces in order to detect displacements of the mass points established with a precision lower than ± 1 mm. This system operates in the infrared spectral region to take advantage of the low light and reduce the optical noise in environments with grace. Further work includes validation results and development of low stereo vision conditions of two different scenarios spatial volume, as well as the procedure carried out to calibrate the intrinsic and extrinsic parameters of the system sensors (monochrome camera) system. The results show an accuracy of $\pm 0,1881$ mm for artifacts with three markers and an accuracy of $\pm 0,4952$ for artifacts with four markers. Finally, the system operates with a sensitivity of 0,99 mm in the determination of an artifact associated with a point in the tunnel profile position, and thus, one can define the conditions for stability of the rock mass and assistance requirements for the decisions of treatment methods and increased

Keywords: Optical Tracking Systems, Underground Excavations, Correspondence Images, 3D Reconstruction, Artifacts.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	17
1.2	OBJETIVO GERAL	19
1.3	OBJETIVO ESPECÍFICO	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE SISTEMAS DE RASTREAMENTO ÓTICO	21
2.1.1	Conceitos básicos de Câmeras	21
2.1.2	Calibração das Câmeras	28
2.1.3	Estimação da Posição em 3D a partir de visão estéreo	39
2.2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE MACIÇOS	47
2.2.1	Termos usuais	47
2.2.2	Categorias dos Colapsos	47
2.2.3	Principais Causas de Colapso	53
2.2.4	Mecanismos de colapso	54
2.2.5	Mecanismos de monitoramento	56
3	REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA PARA A ESTIMATIVA E MONITORAMENTO DO DESLOCAMENTO DE MACIÇOS	58
3.1	ESTIMATIVA DO DESLOCAMENTO COM BASE EM SIMULAÇÕES	58
3.2	ESTIMATIVA E MAPEAMENTO DO DESLOCAMENTO BASEADO EM MEDIÇÕES	60
3.2.1	Medições com o uso de extensômetros	60
3.2.2	Medição com acelerômetros	61
3.2.3	Medição com tecnologia laser	62
3.2.4	Medição com o uso de imagens	64
3.3	ANÁLISE COMPARATIVA DOS TRABALHOS RELACIONADOS	65
4	PROPOSTA PARA O MAPEAMENTO DO DESLOCAMENTO DE MACIÇO EM TÚNEIS	68
4.1	TÉCNICAS USUAIS PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS	69
4.2	ABORDAGENS PARA A DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	71
4.3	ESCOLHA DA TÉCNICA DE MEDIÇÃO E ESTIMAÇÃO DO DESLOCAMENTO DE MACIÇO	72
4.4	CARACTERÍSTICAS E LIMITAÇÕES DO SISTEMA	75
4.5	ESTRUTURA DO SISTEMA DE VISÃO ESTÉREO	77
4.5.1	Módulos de Hardware	78
4.5.2	Módulos de Software	85
4.6	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA	88
4.7	ESPAÇO DE TRABALHO	91
4.8	CADASTRAMENTO E RECONHECIMENTO DE ARTEFATOS	93
4.9	REGISTRO E RASTREAMENTO DE ARTEFATOS	95
4.9.1	Geometria dos Artefatos utilizados	96
4.9.2	Janela para Visualizar o Rastreamento	97
4.10	INCREMENTO DA ÁREA DE RASTREAMENTO COM MÚLTIPLAS CÂMERAS	99
4.11	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	99
5	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	101

5.1 REQUISITOS	101
5.2 EXPERIMENTOS	102
5.2.1 Deslocamento no eixo “Y” de artefato com três marcadores	102
5.2.2 Deslocamento no eixo “X” e “Y” de dois artefatos respectivamente	102
5.2.3 Comportamento do sistema frente à luminosidade completa e baixa luminosidade	102
5.3 CENÁRIOS DE INSTALAÇÃO DAS CÂMERAS	103
5.3.1 Cenário 1.....	104
5.3.2 Cenário 2.....	104
5.4 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA	105
5.4.1 Calibração Intrínseca das câmeras	105
5.4.2 Calibração dos parâmetros extrínsecos das câmeras	106
5.5 ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DOS ARTEFATOS.....	109
5.5.1 Análise da precisão no deslocamento	109
5.5.1 Deslocamento no eixo “Y” de artefato com três marcadores	114
5.5.2 Deslocamento no eixo “X” e “Y” para cada um dos artefatos.....	115
5.5.3 Comparação da precisão para dois cenários	116
5.5.4 Desempenho do sistema frente à luminosidade completa e baixa luminosidade ..	117
6 CONCLUSÕES.....	120
7 TRABALHOS FUTUROS	122
REFERÊNCIAS.....	123

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Estrutura do Sistema de Rastreamento Ótico.....	16
Figura 2 Graus de liberdade para objetos em 3D no espaço.	16
Figura 3 Deslocamentos nas imediações da frente de escavação de um túnel.....	18
Figura 4 Ilustração de uma câmera do tipo <i>pinhole</i>	21
Figura 5 Plano da perspectiva da câmera.	23
Figura 6 Distorção radial da lente (E), Imagem sem distorção (D), (GREFF, 2006).....	25
Figura 7 Relação entre o Sistema de coordenadas da Câmera e o Sistema de coordenadas do Espaço, (GREFF, 2006).....	27
Figura 8 Quadro de referência do Espaço do Objeto e o Plano da Imagem usado na DLT	29
Figura 9 Vetores e pontos do quadro de referência no Plano da Imagem no DLT.	30
Figura 10 Modelo da Câmera utilizado pela técnica de calibração Tsai.	35
Figura 11 Configuração do Sistema Estéreo Básico	40
Figura 12 Reconstrução em 3D do ponto P, utilizando configuração de visão Estéreo.....	41
Figura 13 Redução da área de busca na correlação de imagens [http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/48230/Poster_12684.pdf?sequence=2].	42
Figura 14 Representação Básica da Geometria Epipolar.	43
Figura 15 Reconstrução tridimensional do ponto P utilizando Triangulação.	46
Figura 16 Rua colapsada em Munich, ano 1994 [http://munichre.com].	48
Figura 17 Colapso da parede lateral de um túnel na Central Elétrica de Queimado, Brasil, 2002 (SEIDENFUSS, 2006).....	49
Figura 18 Danos no túnel pela ocorrência de <i>rock burst</i> numa mina na África do Sul [http://sciencedirect.com]	50
Figura 19 Ocorrência de <i>squeezing</i> na construção do túnel para a ligação de alta velocidade entre Lyon e Turim (MELÂNEO, 2011).....	51
Figura 20 Queda da frente da entrada do túnel (SEIDENFUSS, 2006).	52
Figura 21 Desabamento da frente de escavação (à esquerda) e do topo do túnel (à direita). (BRADY; BROWN, 2006).....	54
Figura 22 Mecanismos globais e locais.....	55
Figura 23 Mecanismos de colapso no suporte com soleira plana do tipo D2 (GOMES PRATA, 2012).....	56
Figura 24 Mecanismos de colapso no suporte com soleira curva do tipo O1C e O1D (GOMES PRATA, 2012).....	57
Figura 25 Convergências e Extensômetros no interior de um túnel (MELÂNEO, 2011).....	70
Figura 26 Marcas de nivelamento topográfico, Extensômetros e inclinômetros na superfície de um túnel (MELÂNEO, 2011).	71
Figura 27 Seções possíveis de medição de convergências.	72
Figura 28 Instalação do Sistema ao Interior do Túnel.....	73
Figura 29 Artefato composto por marcadores passivos.....	74
Figura 30 Seções para medição ao longo do túnel.	74

Figura 31 Artefatos instalados em três pontos do perfil do túnel.	75
Figura 32 Arquitetura do Sistema de Rastreamento com Visão Estéreo.	78
Figura 33 Marcador passivo com diâmetro de 2 cm.	79
Figura 34 Câmera monocromática iDS [http://en.ids-imaging.com/store/produkte/kameras/usb-2-0-kameras/ueye-se/ui-1220se.html].	80
Figura 35 Conector IDS Sub-D (9 pinos) [http://en.ids-imaging.com/manuals/uEye_SDK/EN/uEye_Manual/index.html].	80
Figura 36 Ângulos de visão das lentes.	81
Figura 37 Placa e carcaça projetada para o módulo flash.	82
Figura 38 Projeto da placa eletrônica.	83
Figura 39 Esquemático das entradas digitais.	84
Figura 40 Configuração mestre-escravo do Sistema por hardware.	85
Figura 41 Diagrama de Módulos da Estrutura Interna.	86
Figura 42 Interface para calibração dos parâmetros intrínsecos de cada câmera.	89
Figura 43 Imagem da interface de calibração interna (8 marcadores padrão).	90
Figura 44 À esquerda imagem com distorção, à direita sem distorção.	90
Figura 45 Padrão de calibração estático.	91
Figura 46 Padrão de calibração espacial.	91
Figura 47 Área de trabalho para o ângulo horizontal das lentes.	92
Figura 48 Peça para variação do ângulo vertical.	93
Figura 49 Peça para variação do ângulo horizontal.	93
Figura 50 Geometria do triângulo escaleno, artefato válido.	94
Figura 51 Geometria não válida para o artefato.	94
Figura 52 Artefato de 4 marcadores cadastrado.	95
Figura 53 À esquerda, o Artefato 1 com 3 marcadores; à direita, o Artefato 2 com 4 marcadores.	96
Figura 54 Plano 2D do artefato de três marcadores utilizado para rastreamento.	96
Figura 55 Detecção de um artefato com três marcadores.	98
Figura 56 Detecção de dois artefatos com três e quatro marcadores respectivamente.	98
Figura 57 Configuração do Sistema de Rastreamento Mestre-Escravo.	103
Figura 58 Sala do cenário 1.	104
Figura 59 Sala do cenário 2.	105
Figura 60 Calibração Parâmetros extrínsecos com 90,55% de sucesso.	108
Figura 61 Calibração Parâmetros extrínsecos com 87,14% de sucesso.	108
Figura 62 Calibração Parâmetros extrínsecos com 78,80% de sucesso.	108
Figura 63 Calibração Parâmetros extrínsecos com 42,35% de sucesso.	109
Figura 64 Repetibilidade nas medições do eixo X, artefato de três marcadores.	111
Figura 65 Repetibilidade nas medições do eixo Y, artefato de três marcadores.	111
Figura 66 Repetibilidade nas medições do eixo Z, artefato de três marcadores.	112
Figura 67 À esquerda a pose 1, à direita a pose 2. Artefato de 4 marcadores.	112
Figura 68 Comportamento do artefato de 4 marcadores na pose 1.	113
Figura 69 Comportamento do artefato de 4 marcadores na pose 2.	113
Figura 70 Partes do paquímetro [http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAIzgAC/paquímetro].	114
Figura 71 Deslocamento forçado do artefato com uso do paquímetro.	114
Figura 72 Deslocamento vertical do Artefato de três marcadores.	116
Figura 73 Deslocamento do artefato de 3 marcadores em presença do artefato de 4 marcadores fixado.	116
Figura 74 Precisão do Sistema frente à baixa luminosidade.	118
Figura 75 Precisão do Sistema frente à luminosidade completa.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Principais colapsos em túneis e obras subterrâneas entre 1994 e 2010 (“THE INTERNATIONAL Association of Engineering Insurers,”)	17
Tabela 2 Trabalhos Relacionados com a Detecção de deslocamento de Maciços Rochosos...	66
Tabela 3 Comparação entre os tipos de sensores para estimação de deslocamentos.	66
Tabela 4 Tecnologias de Rastreamento (GREFF, 2006).....	68
Tabela 5 Especificações das lentes.....	81
Tabela 6 Parâmetros Intrínsecos da Câmera Mestre.	106
Tabela 7 Parâmetros Intrínsecos da Câmera Escravo.....	106
Tabela 8 Percentagem de Sucesso da Calibração Extrínseca das Câmeras.....	107
Tabela 9 Base de dados com a posição do artefato no espaço tridimensional.	110
Tabela 10 Diferenças entre o valor medido e o valor referência.	115
Tabela 11 Comparação entre os cenários de instalação.	117
Tabela 12 Precisão do sistema frente a condições de luminosidade.	119
Tabela 13 Projeto Fatorial Completo-2 Fatores Controláveis.	119

LISTA DE ABREVIATURAS

2D: Duas dimensões x,y

3D: Três dimensões x,y,z

AE: *Acoustic Emission*

EPBM: *Earth Pressure Balanced Machine*

FBG: *Optical Fibre Bragg Grating*

GCAR: Grupo de Controle, Automação e Robótica

IT: *Information Technology*

IDS: *Imaging Development Systems GmbH. – Camera Manufacturer*

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

MDS: Modelos Digitais de Superfície

MFC: *Microsoft Foundation Classes*

NATM: *New Austrian Tunneling Modeling*

OpenCV: *Open Source Computer Vision*

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

RAR: Restrições de Alinhamento Radial

RFPA: *Rock Failure Process Analysis*

SHM: *Structural Health Monitoring*

SMD: *Semi Metallic Disc*

SRO: Sistemas de Rastreamento Ótico

STSM: *Slurry Type Shield Machine*

TBM: *Tunneling Boring Machine*

TDT: *Target Detection Tracking*

TOP: *Terrestrial Optical Photogrammetry*

UDP: *User Datagram Protocol*

USB: *Universal Serial Bus, specification version 2.0*

XML: *eXtensible Markup Language*

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de automação têm ampliado os campos de estudo e aplicação, permitindo que diversas áreas de pesquisa da engenharia aperfeiçoem os seus processos, oferecendo confiabilidade e incremento de segurança no trabalho.

Uma das áreas que tem demandado o apoio de sistemas de automação e medição é a engenharia de túneis, visto que a construção de túneis sob distintas condições geotécnicas gera problemas de estabilidade nos perfis internos do maciço, assim como, nos seus taludes de corte e aterro, e, conseqüentemente, gera restrições geológicas e geotécnicas importantes para este tipo de obra (LOPES, 2007). Com base nesse contexto, torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas de automação e supervisão de movimentação de maciços que possibilitem um pleno entendimento do maciço, identificando características envolvidas em sua dinâmica natural e a adequação de novas soluções para a contenção de massas escorregadias (PAGLIA SESTREM, 2012).

Na Engenharia de Minas há um cuidado especial nos sistemas e dispositivos de monitoramento para a análise geotécnica, pois eles permitem aplicar ações no controle da estabilidade e melhorar a funcionalidade de uma escavação subterrânea, além de segurança e salubridade, como garantia de qualidade da obra, durante e após a construção. Existe uma diversa gama de equipamentos e sistemas de instrumentação com capacidade, manobrabilidade e precisões distintas, para suprir as tarefas de monitoramento do deslocamento de maciços onde a escolha do método a ser utilizado depende das características particulares da obra e do meio envolvente, com o objetivo de adaptar o equipamento mais versátil, que induza os menores distúrbios às atividades construtivas e que possua a precisão necessária.

Continuas investigações como são apresentadas no capítulo 3, vem sendo realizadas para abordar o uso de sistemas de instrumentação no desenvolvimento de construções de túneis.

Um dos avanços nesta linha de investigação de instrumentação são os sistemas de rastreamento ótico (SRO), que apresentam uma estrutura como ilustrado na Figura 1, os quais fazem uso de câmeras para detectar e estimar a posição de objetos dispostos num determinado espaço tridimensional. Estes sistemas são utilizados na análise do deslocamento de objetos associados à movimentação do maciço no interior de túneis, que possam afetar o desenvolvimento normal da sua construção.

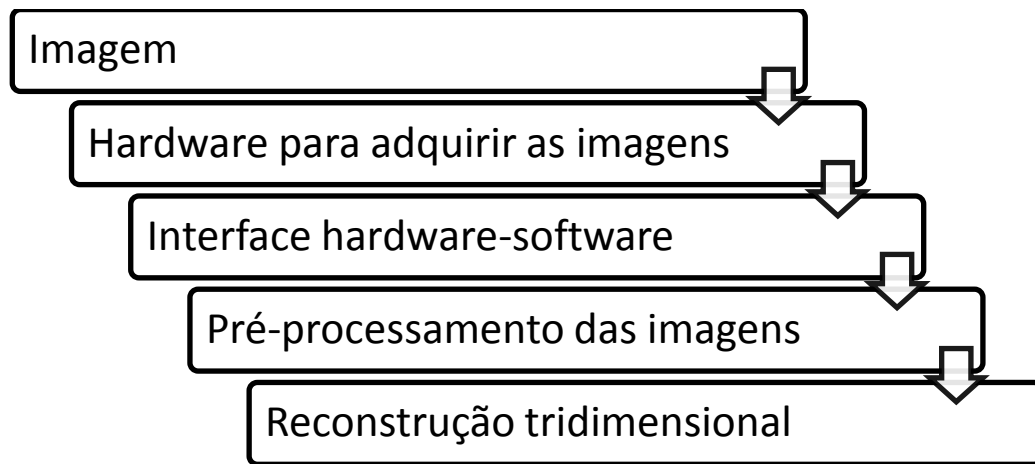


Figura 1 Estrutura do Sistema de Rastreamento Ótico.

Comumente, um SRO estima a posição de um ponto no espaço 3D que é representado nas três coordenadas x , y e z . No entanto, muitas aplicações onde são requeridas as informações da orientação, utilizam objetos em vez de pontos. Refere-se à orientação como a rotação dos eixos, conhecida como *pitch* (também conhecido como atitude ou vertical), *yaw* (também conhecido como eixo transversal), *roll* (também conhecido como eixo longitudinal) (GREFF, 2006). Estas características ilustram-se na Figura 2.

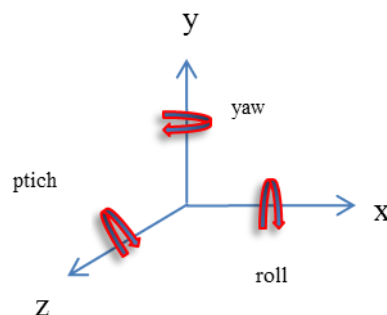


Figura 2 Graus de liberdade para objetos em 3D no espaço.

Para a obtenção destas informações, diferentes tecnologias podem ser utilizadas tais como, eletromagnética, mecânica, inercial, ótica ou rastreamento rádio base, as quais serão abordadas com mais detalhes na seção de análise do estado da arte.

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A construção de túneis e obras subterrâneas está relacionada com diversos fatores não controláveis devido à complexidade e a variabilidade geológica, a qual afeta os custos, o período de construção, a segurança da obra e o impacto no meio envolvente. Uma ação que permite estudar as consequências destes elementos não controláveis tornou-se necessária, dando passo à gestão de riscos tornar-se um processo comum e vital nos projetos de túneis, como ferramenta para prever e controlar todas as atividades, antes, durante e depois da realização de trabalhos subterrâneos (GOMES PRATA, 2012).

Apresenta-se na Tabela 1 os principais colapsos em túneis e obras subterrâneas, durante a sua construção, entre 1994 e 2010, as suas causas gerais e o seu custo aproximado. Outros acidentes ocorreram no mesmo período, mas estes foram os que tiveram mais graves impactos sociais e econômicos nos países em questão.

Tabela 1 Principais colapsos em túneis e obras subterrâneas entre 1994 e 2010 (“THE INTERNATIONAL Association of Engineering Insurers,”)

Ano	Infraestrutura	País	Método	Causa	Custo (€) Milhões
1994	Heathrow Express Link	Reino Unido	NATM	Colapso	150
1995	Metro Los Angeles	EUA	TBM	Colapso	16
1995	Metro Taipei	Taiwan	TBM	Colapso	30
1999	Hull Yorkshire	Reino Unido	TBM	Colapso	64
2000	Taegu Metro	Coreia do Sul	TBM	Colapso	13
2002	Taiwan High Speed Railway	Taiwan	NATM	Colapso	11
2003	Shanghai Metro	China	Freezing	Colapso	69

Ano	Infraestrutura	País	Método	Causa	Custo (€) Milhões
2004	Singapore Metro	Singapura	TBM	Colapso	60
2005	Barcelona Metro	Espanha	NATM	Colapso	15,5
2005	Lausanne Metro	Suíça	NATM	Colapso	10,5
2005	Lane Cove Tunnel	Austrália	NATM	Colapso	16
2006	Metro de São Paulo	Brasil	NATM	Colapso	91,5
2008	Stromovka Tunnel Prague	República Checa	TBM	Colapso	10
2008	Circle Line 4 Singapore	Singapura	TBM	Colapso	Indeterminado
2009	Metro Cologne	Alemanha	TBM	Colapso	365
2010	Cairo Metro	Egipto	TBM	Colapso	20
2010	Lake Mead Tunnel	EUA			30,6

Atualmente, existe grande dificuldade em medir as deformações totais do túnel (contração), uma vez que estas se iniciam no interior do túnel a certa distância da zona escavada como mostrado na Figura 3. Porém, a instrumentação utilizada apresenta dificuldade para sua instalação e a aquisição dos dados.

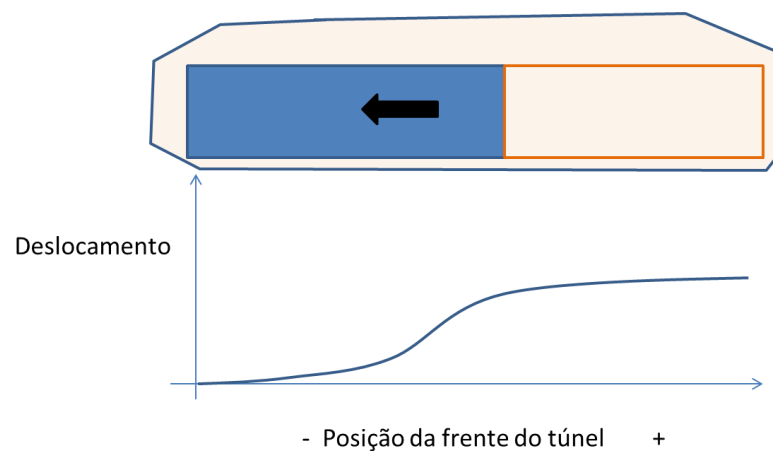


Figura 3 Deslocamentos nas imediações da frente de escavação de um túnel.

Em túneis com pouca profundidade, torna-se relevante manter uma análise de correlação entre os valores e as datas de medição das convergências do túnel com os assentamentos superficiais, principalmente quando os trabalhos decorrem em zonas urbanas ou se encontrem sobre estruturas sensíveis.

O dimensionamento do túnel envolve a determinação de um sistema de suporte que impeça o colapso do terreno envolvente à abertura, assim como, limitar a convergência da mesma a um nível aceitável. A estimação de suporte necessário para estabilizar o túnel escavado é essencialmente um problema de quatro dimensões: a redistribuição tridimensional das forças a envolvente de escavação, assim como os deslocamentos ocorridos ao longo do tempo (ROCHA,1981).

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema para o monitoramento do deslocamento de maciços no interior de túneis usando sistemas de rastreamento ótico.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

Implementar um sistema estéreo de rastreamento ótico baseado em marcadores passivos de material retro reflexivo, assim como os módulos de hardware e software que permitam obter um desempenho significativo na detecção de deslocamentos, em comparação com instrumentos ou sistemas existentes para tal fim.

Estabelecer a precisão do sistema estéreo de rastreamento, com o objetivo de determinar a incerteza no valor do deslocamento de um artefato, a ser detectado no espaço 3D, o qual estará associado à movimentação do perfil do túnel ao longo da sua construção.

Busca-se realizar uma reconstrução tridimensional dos pontos e trajetórias do maciço, durante toda a fase de construção do túnel, para estabelecer curvas do comportamento da estabilidade.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre os sistemas de rastreamento ótico, os métodos utilizados para calibração dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos de uma câmera, bem como, discorre sobre o uso de visão estéreo para a estimação da posição de um ponto no espaço 3D. Adicionalmente, mostram-se alguns conceitos da geologia de túneis, as categorias e tipos de colapsos, os mecanismos e os instrumentos utilizados para detecção de deslocamentos. Com isto, busca-se apresentar a informação necessária para o entendimento da solução a ser implementada.

O capítulo 3 descreve alguns trabalhos encontrados na literatura, os quais tem como objetivo: a análise e o deslocamento, tanto de deslizamentos de maciço externos e internos, e, o tipo de instrumentação utilizada para esse fim. Procura-se estabelecer a precisão na medida do instrumento que foi obtida em cada trabalho. A parte final deste capítulo, apresenta uma comparação entre o uso de distintos sensores e sistemas de monitoramento.

O capítulo 4 apresenta o sistema de monitoramento proposto nesta dissertação, o qual utiliza um sistema ótico com rastreadores para o mapeamento do deslocamento de pontos associados ao perfil do túnel.

O capítulo 5 apresenta a validação experimental do sistema proposto. É descrita a metodologia para validar a detecção de deslocamentos de artefatos, assim como, a metodologia para validar a precisão nas medidas obtidas, a reconstrução simulada em 3D das etapas de deformação do maciço durante a construção de um túnel.

O capítulo 6 apresenta as principais conclusões do trabalho e indica possíveis trabalhos futuros propostos, para dar continuidade a esta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta tópicos fundamentais para o entendimento de sistemas de rastreamento ótico, nos quais utilizam-se câmeras como meio para captura de imagens, das quais se processará a informação, estimando a posição espacial de um ponto ou objeto no espaço 2D ou 3D.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE SISTEMAS DE RASTREAMENTO ÓTICO

2.1.1 Conceitos básicos de Câmeras

Esta subseção apresenta os conceitos referentes às câmeras utilizadas num sistema de rastreamento ótico: modelo da câmera, algoritmos de calibração, sistemas de coordenadas e transformações.

2.1.1.1 Óptica básica

O foco de uma imagem é um dos principais conceitos da óptica básica. Um dispositivo de captura de imagem simples a ser utilizado é uma câmera de *pinhole* como ilustrado na Figura 4. Em outras palavras, uma câmera de abertura reduzida com um ponto só, que resulta em imagens muito nítidas, Contudo, este tipo de câmera não apresenta flexibilidade em relação ao tempo de exposição ou a distância focal ajustada.

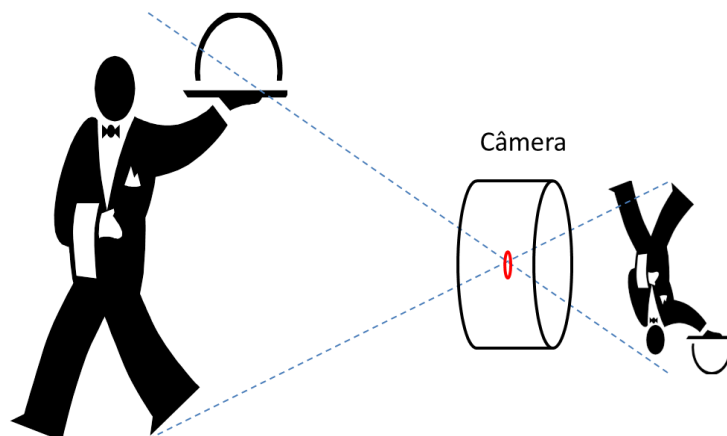


Figura 4 Ilustração de uma câmera do tipo *pinhole*.

Esse modelo de câmera *pinhole* especifica a relação geométrica entre a projeção das coordenadas de um objeto no espaço 3D e a sua projeção no plano da imagem em 2D da câmera. No modelo não se incluem alguns elementos usados nas câmeras atuais, (lentes e suas distorções), e para tanto, utiliza-se uma aproximação para o mapeamento real (IVEKOVIC; FUSIELLO; TRUCCO, 2005) (HARTLEY, R.; ZISSERMAN, 2004).

2.1.1.2 Perspectiva da câmera

Para estabelecer a relação entre os pontos do cenário e os pontos da imagem projetada, a projeção geométrica da câmera deve ser modelada. A geometria mais comum para o modelo de câmera e o modelo de perspectiva (*pinhole*) é apresentada na Figura 5. Neste modelo consta o plano da imagem (π) e o ponto \mathbf{O} , o qual é o centro da projeção. A distância entre π e \mathbf{o} é a distância focal f . A linha entre π e o eixo ótico, é chamado de *ponto principal* ou *centro da imagem*. A projeção \mathbf{p} , sobre o plano da imagem, do ponto \mathbf{P} é obtido pela interseção da linha reta através de \mathbf{P} e \mathbf{O} com o plano da imagem π . O quadro de referência também chamado de quadro da câmera, é aquele no qual o ponto \mathbf{O} é a origem, e π o plano ortogonal ao eixo Z, e representa o sistema de coordenadas da câmera, onde os pontos $\mathbf{p}[x, y, z]$ e $\mathbf{P}[X, Y, Z]$ são localizados.

A relação entre as coordenadas dos pontos \mathbf{p} e \mathbf{P} está representada pelas Equações (1) e (2)

$$x = f \frac{X}{Z} \quad (1)$$

$$y = f \frac{Y}{Z} \quad (2)$$

As quais são equações fundamentais para a projeção. Essas equações são não lineares, por causa do fator $1/Z$, e não preservam nem as distâncias entre os pontos (mesmo tendo fatores de escala comuns) nem os ângulos entre as linhas.

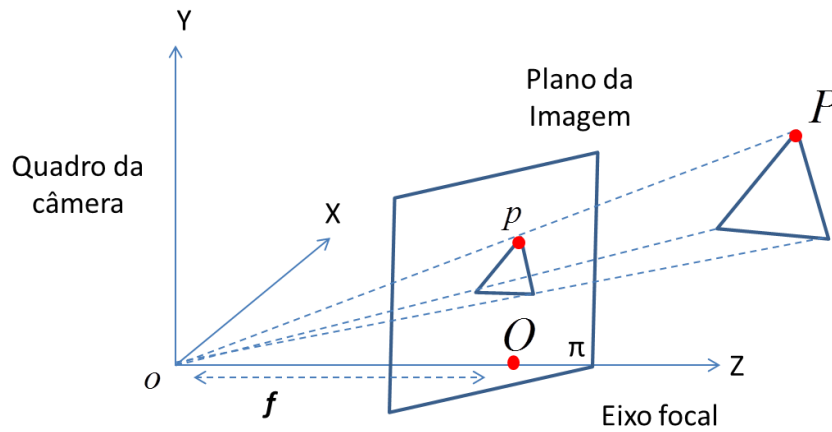


Figura 5 Plano da perspectiva da câmera.

No frame da câmera, qualquer imagem de um ponto tem a terceira componente sempre igual à distância focal, porque a Equação do plano π é $z = f$, o que leva à representação $\mathbf{p}[x, y]$ em vez de $\mathbf{p}[x, y, z]$ (TRUCCO; VERRI, 1998).

2.1.1.3 Parâmetros Intrínsecos da Câmera

Com o objetivo de realizar a reconstrução da posição em 3D de objetos ou pontos no espaço, um sistema de visão computacional realiza transformações, onde se relacionam as coordenadas de pontos de imagem para coordenadas de pixel. Além de relacionar o quadro de referência da câmera para algum outro sistema de coordenadas, denominado como quadro global de referência. Os parâmetros intrínsecos relacionam as coordenadas de pontos da imagem com coordenadas do sistema de referência da câmera (TRUCCO; VERRI, 1998).

Para relacionar os pixels de uma imagem com as coordenadas no quadro de referência da câmera, são necessários os parâmetros intrínsecos da câmera, caracterizando as propriedades óticas e geométricas da câmera. Considerando-se o modelo de câmera pinhole, estes parâmetros são:

- a) a distância focal f , a qual define a perspectiva da projeção;
- b) os parâmetros que definem a transformação do quadro da câmera para pixels;
- c) a distorção geométrica na imagem introduzida pelas lentes.

A distância focal f já está explícita na Equação (1), de modo que um segundo conjunto de parâmetros intrínsecos, deve relacionar a coordenada pixelada (x_{img}, y_{img}) de uma imagem e as coordenadas do sistema de referência da imagem, com as coordenadas (x, y) do mesmo ponto no quadro de referência da câmera. Esta relação, estabelecida pela Equação (3), considera que o conjunto de sensores consiste em elementos fotossensíveis retangulares e ignorar a distorção óptica, onde (o_x, o_y) referem-se às coordenadas do centro da imagem ou também chamado ponto principal, em unidades de pixel, e (S_x, S_y) está relacionada com o tamanho efetivo do pixel, em milímetros, nas direções horizontal e vertical respectivamente. A imagem e os quadros de referência da câmera tem orientação oposta, então a Equação (3) possui sinal negativo.

$$\begin{aligned} x &= -(x_{img} - o_x)S_x \\ y &= -(y_{img} - o_y)S_y \end{aligned} \quad (3)$$

Com a descrição acima, é possível reescrever como multiplicação de matrizes a Equação (3) utilizando coordenadas homogêneas, obtendo-se a Equação (4).

$$\begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde $s \neq 0$ é o fator escala. Usando-se (4) e considerando $f_x = f/S_x$ e $f_y = f/S_y$, obtém-se a expressão (5).

$$\begin{bmatrix} S_{x_{img}} \\ S_{y_{img}} \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x \\ 0 & f_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde o fator escala s tem o valor de Z . De forma mais simplificada pode-se reescrever (5) como

$$\mathbf{u} = \mathbf{M}_{intr}\mathbf{W} \quad (6)$$

Onde \mathbf{u} é o vetor das coordenadas em pixels da imagem e \mathbf{W} é o vetor das coordenadas globais, em notação homogênea \mathbf{M}_{intr} é a matriz de projeção a qual leva em conta os

parâmetros intrínsecos da câmera. Uma câmera pode ser considerada como um sistema que comporta-se como uma transformação de uma projeção linear de um espaço em 3D a uma perspectiva do espaço em 2D.

Tem-se cinco parâmetros intrínsecos para uma câmera, quando não é considerada a distorção provocada pelas lentes: f , o_x , o_y , S_x , S_y . Entretanto, apenas quatro parâmetros podem ser determinados durante o processo de calibração de forma separada, uma vez que existe um fator de escala arbitrária envolvido na f e no tamanho do pixel ao utilizar esta notação de matriz. Assim, o sistema só pode ser solucionado para o f_x e f_y . A distância focal f é geralmente definida com base no tamanho do pixel, que é um parâmetro fornecido através do fabricante do sensor da câmera (TSAI, 1986).

A ótica introduz distorções da imagem, tangencial e radial, as quais chega ser visíveis especialmente nas imagens periféricas. Na Figura 6, é apresentado um exemplo de uma imagem com distorção radial da lente e a sua versão sem distorção e outros estudos tem mostrado que para usos práticos as distorções tangenciais podem ser desprezíveis e as distorções radiais devem-se considerar pelo menos acima do segundo coeficiente.

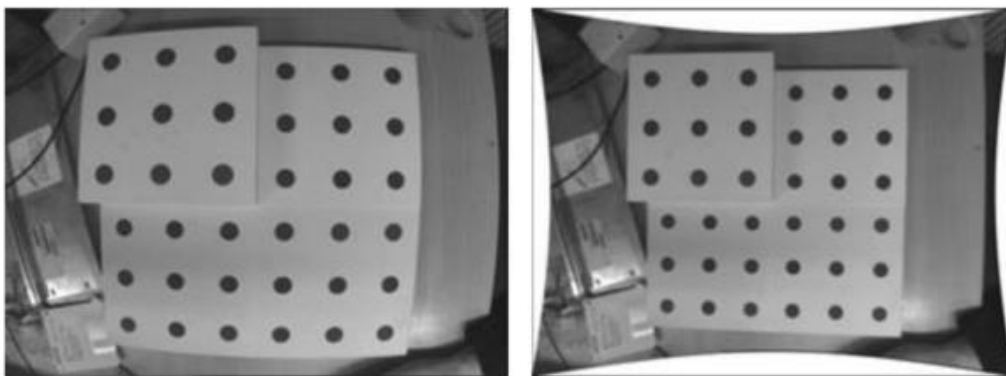


Figura 6 Distorção radial da lente (E), Imagem sem distorção (D), (GREFF, 2006).

As distorções radiais podem ser modeladas segundo

$$\begin{aligned} x &= x_d(1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) \\ y &= y_d(1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) \end{aligned} \tag{7}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{M}_{intr}\mathbf{W} \quad (8)$$

Onde (x_d, y_d) são as coordenadas dos pontos com distorção, $r^2 = x_d^2 + y_d^2$ e k_1, k_2 são os primeiros dois coeficientes para a distorção radial. Esta distorção é um deslocamento dos pontos da imagem, a qual é nula no centro da imagem e cresce com a distância do ponto ao centro da imagem. De outro lado, k_1 e k_2 são os parâmetros intrínsecos da câmera.

2.1.1.4 Parâmetros Extrínsecos da Câmera

O quadro de referência é normalmente, desconhecido. Um problema comum é determinar a localização e orientação desse quadro de referência, utilizando só informações extraídas da imagem. Os parâmetros extrínsecos da câmera são definidos como um conjunto de parâmetros geométricos os quais identificam de forma única a transformação entre o quadro de referência da câmera e o quadro de referência global (GREFF, 2006).

Esta transformação é, na maioria das vezes, definida como uma translação seguida pela rotação. A translação descreve o vetor em 3D de translação \mathbf{T} , que especifica às posições relativas das origens de dois quadros de referência. A rotação descrita por uma matriz ortogonal de dimensão 3x3 contém os eixos relacionados de dois sistemas de coordenadas ortogonais entre si.

A translação e a rotação combinadas geram como resultado uma transformação de 6 graus de liberdade, representado na Figura 7 e mostrados pela Equação (9).

$$\mathbf{P}_{cam} = \mathbf{R} \cdot (\mathbf{P}_{esp} - \mathbf{T}) \quad (9)$$

Sendo \mathbf{P}_{cam} o ponto P no quadro de referência da câmera, \mathbf{P}_{esp} é o mesmo ponto no sistema de coordenadas do espaço. Assim também está definido \mathbf{T} como

$$\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2\mathbf{T}_3]^T \quad (10)$$

e

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

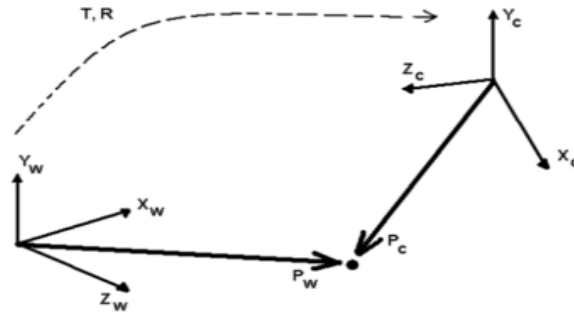


Figura 7 Relação entre o Sistema de coordenadas da Câmera e o Sistema de coordenadas do Espaço, (GREFF, 2006).

Utilizando as coordenadas homogêneas, as Equações (10) e (11) podem ser combinadas numa única matriz com o objetivo de representar a transformação da Equação (12) resultando:

$$\mathbf{P}_{cam} = \mathbf{M}_{extr} \mathbf{P}_W \quad (12)$$

onde,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & -R_1^T \cdot T \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & -R_2^T \cdot T \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & -R_3^T \cdot T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sendo R_i , $i=1, 2, 3$, um vetor em 3D formado pela i -th coluna da matriz \mathbf{R} . \mathbf{M}_{extr} contém uma descrição completa da transformação entre o sistema de coordenadas do espaço e o sistema de coordenadas da câmera.

2.1.1.5 Matriz de Projeção da Câmera

A combinação dos efeitos dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera não é mais que uma primeira transformação do sistema de coordenadas do espaço 3D para o sistema de coordenadas da câmera 3D e depois para às coordenadas em 2D da imagem em pixels. Essa combinação pode ser matematicamente descrita aplicando a matriz de relação dos parâmetros

intrínsecos e extrínsecos ao ponto 3D nas coordenadas do espaço como segue na Equação abaixo

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{intr} \cdot \mathbf{M}_{extr} \cdot \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Onde $x_{img} = x_1/x_3$ e $y_{img} = x_2/x_3$ são as coordenadas dos pixels. Os raios x_1/x_3 e x_2/x_3 são incorporados como parte da matriz de transformação, permitindo escrever a seguinte Equação:

$$\begin{pmatrix} x_{img} \\ y_{img} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \cdot \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Onde \mathbf{P} é a matriz de projeção da câmera, que inclui as transformações devido aos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera.

2.1.2 Calibração das Câmeras

A calibração da câmera é a estimativa dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, incluindo-se a estimativa dos coeficientes de distorção da lente (GREFF, 2006). Normalmente, os parâmetros intrínsecos devem ser calibrados, enquanto os parâmetros extrínsecos estão sujeitos à referência externa, tanto translação como rotação para o sistema de coordenadas.

A solução das equações de projeção que relacionam as coordenadas conhecidas de um conjunto de pontos 3D no espaço e suas projeções em 2D para os parâmetros da câmera descrevem o objetivo principal da calibração. Torna-se importante o conhecimento das coordenadas de alguns pontos 3D, pelo qual, utiliza-se um padrão de calibração, do qual se conhece a sua geometria, e permite, a extração de alguns recursos de imagem para estimar a exatidão das posições 3D. Quando se utiliza marcadores retro-refletores, o mesmo pré-

tratamento utilizado para o rastreamento também pode ser usado para extrair posição 2D de marcadores, e apenas as relações geométricas entre os marcadores de padrão deve ser conhecida .

Também, é possível fazer a calibração sem padrões de calibração, que é chamada de extração de informação 3D diretamente a partir do ambiente. No entanto, a calibração com o uso de padrões de calibração oferece um melhor desempenho com liberdade de robustez considerável, menor poder de processamento, assim como, menor complexidade matemática.

2.1.2.1 Direct Linear Transformation (DLT)

O algoritmo de transformação linear direta foi proposto pelo (ABDEL-AZIZ; KARARA, 1971), o qual busca a descoberta dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera a partir da solução de um sistema de equações lineares.

O método DLT assume dois sistemas de coordenadas como referência: o quadro referência objeto-espaco e o plano da imagem como se apresenta na

Figura 8. A ótica da câmara mapeia as coordenadas (x, y, z) do ponto Q no espaco do objeto, para o ponto I de coordenadas (u, v) no plano da imagem, baseado no ponto M do centro da projeção. Os pontos Q , I e M estão alinhados, definindo-se assim uma condição de linearidade, base do método DLT.

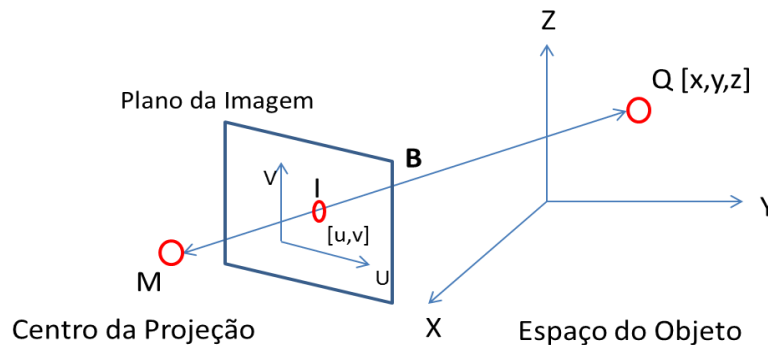


Figura 8 Quadro de referência do Espaço do Objeto e o Plano da Imagem usado na DLT

Estimando-se que o centro da projeção **M** vai se posicionar em (x_0, y_0, z_0) , no quadro de referência do espaço do objeto, o vetor **B** de **M** a **P** pode-se expressar como $(x - x_0, y - y_0, z - z_0)$. Na Figura 9 apresenta-se a adição de um terceiro eixo **W**, ao quadro de referência do plano da imagem, obtendo-se três dimensões e gerando-se uma mudança nas coordenadas do ponto **I** para $(u, v, 0)$. O ponto **P** da Figura 9, possui coordenadas $(u_0, v_0, 0)$. À distância **d**, entres os pontos **P** e **M**, é chamada de distância principal, e é equivalente à dimensão da distância focal da câmera. O ponto **M**, no plano da imagem do quadro de referência tem as coordenadas (u_0, v_0, d) e o vetor **C**, projetado do ponto **M** sobre **I**, chega a ser $(u - u_0, v - v_0, -d)$.

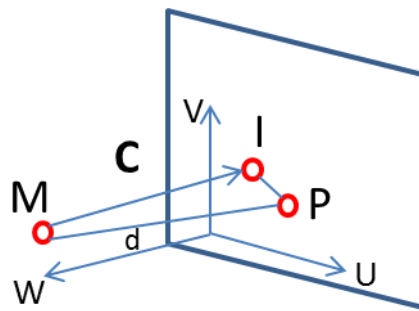


Figura 9 Vetores e pontos do quadro de referência no Plano da Imagem no DLT.

Tendo em conta que os pontos **Q**, **I** e **M** são colineares, os vetores **B** (Figura 8) e **C** (Figura 9) compõem uma linha, e a sua condição pode-se escrever como:

$$\mathbf{C}_{imagem} = s \cdot \mathbf{B}_{objeto} \quad (16)$$

Onde s é o fator escala, \mathbf{C}_{imagem} é o vetor **C** no quadro de referência do plano da imagem e \mathbf{B}_{objeto} é o vetor **B** descrito inicialmente no quadro de referência do espaço do objeto. Ainda assim, torna-se necessária a conversão do vetor **B** ao quadro de referência do plano da imagem com ajuda da matriz de transformação da Equação (17) a qual inclui só as componentes de rotação, isto é, porque as informações da translação são obtidas da posição do ponto **M** (x_0, y_0, z_0) , e aplicando-se ao vetor \mathbf{B}_{objeto} obtém-se a Equação (18)

$$\mathbf{T}_{imagem_objeto} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{B}_{imagem} = \mathbf{T}_{imagem_objeto} \cdot \mathbf{B}_{objeto} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{B}_{objeto} \quad (18)$$

Onde \mathbf{B}_{imagem} é o vetor \mathbf{B} nas coordenadas do plano da imagem. A combinação de (16) e os vetores \mathbf{B} e \mathbf{C}

$$\begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ -d \end{bmatrix} = s \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$= \begin{bmatrix} s \cdot [r_{11} \cdot (x - x_0) + r_{12} \cdot (y - y_0) + r_{13} \cdot (z - z_0)] \\ s \cdot [r_{21} \cdot (x - x_0) + r_{22} \cdot (y - y_0) + r_{23} \cdot (z - z_0)] \\ s \cdot [r_{31} \cdot (x - x_0) + r_{32} \cdot (y - y_0) + r_{33} \cdot (z - z_0)] \end{bmatrix}$$

Da Equação (19), pode-se encontrar uma solução para s

$$s = \frac{-d}{r_{31} \cdot (x - x_0) + r_{32} \cdot (y - y_0) + r_{33} \cdot (z - z_0)} \quad (20)$$

As coordenadas, u , v e v_0 , usam unidades físicas que podem ser mm ou μm . A transformação entre estas unidades discretas dos sistemas de aquisição, como pixels, deve estar sujeita a fatores de conversão de s_u e s_v , os quais geram coordenadas discretas u_{pix} , u_{0_pix} , v_{pix} e v_{0_pix} (unidades em número de pixels) expressadas em (21).

$$\begin{aligned} u - u_0 &= s_u \cdot (u_{pix} - u_{0_pix}) \\ v - v_0 &= s_v \cdot (v_{pix} - v_{0_pix}) \end{aligned} \quad (21)$$

Substituindo (20) e (21) na primeira linha de (19) obtém-se

$$\begin{aligned} u_{pix} - u_{0_pix} &= \frac{-d}{s_u} \cdot \frac{r_{11} \cdot (x - x_0) + r_{12} \cdot (y - y_0) + r_{13} \cdot (z - z_0)}{r_{31} \cdot (x - x_0) + r_{32} \cdot (y - y_0) + r_{33} \cdot (z - z_0)} \\ v_{pix} - v_{0_pix} &= \frac{-d}{s_v} \cdot \frac{r_{21} \cdot (x - x_0) + r_{22} \cdot (y - y_0) + r_{23} \cdot (z - z_0)}{r_{31} \cdot (x - x_0) + r_{32} \cdot (y - y_0) + r_{33} \cdot (z - z_0)} \end{aligned} \quad (22)$$

Realizando-se uma organização na escrita da Equação (22) para ter as variáveis x , y e z , e considerando-se as convenções para os parâmetros intrínsecos ($d=f$, $s_u=s_x$, $s_v=s_y$, $u_{0_{pix}} = o_x$, $v_{0_{pix}} = o_y$, $u_{pix} = x_c$, $v_{pix} = y_c$), obtém a expressão

$$\begin{aligned} x_c - o_x &= \frac{-f}{s_x} \cdot \frac{r_{11} \cdot (x - x_0) + r_{12} \cdot (y - y_0) + r_{13} \cdot (z - z_0)}{r_{31} \cdot (x - x_0) + r_{32} \cdot (y - y_0) + r_{33} \cdot (z - z_0)} \\ y_c - o_y &= \frac{-f}{s_y} \cdot \frac{r_{21} \cdot (x - x_0) + r_{22} \cdot (y - y_0) + r_{23} \cdot (z - z_0)}{r_{31} \cdot (x - x_0) + r_{32} \cdot (y - y_0) + r_{33} \cdot (z - z_0)} \end{aligned} \quad (23)$$

De outra forma, (23) pode ser reorganizada, fazendo foco nas relações entre as coordenadas do quadro de referência do plano da imagem e do espaço do objeto

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{L_1 \cdot x + L_2 \cdot y + L_3 \cdot z + L_4}{L_9 \cdot x + L_{10} \cdot y + L_{11} \cdot z + 1} \\ y_c &= \frac{L_5 \cdot x + L_6 \cdot y + L_7 \cdot z + L_8}{L_9 \cdot x + L_{10} \cdot y + L_{11} \cdot z + 1} \end{aligned} \quad (24)$$

Sendo, os coeficientes L_1 até L_{11} os parâmetros do DLT, e as suas expressões são

$$\begin{aligned}
L_1 &= \frac{o_x \cdot r_{31} - f_x \cdot r_{11}}{D} \\
L_2 &= \frac{o_x \cdot r_{32} - f_x \cdot r_{12}}{D} \\
L_3 &= \frac{o_x \cdot r_{33} - f_x \cdot r_{13}}{D} \\
L_4 &= \frac{(f_x \cdot r_{11} - o_x \cdot r_{31}) \cdot x_0 + (f_x \cdot r_{12} - o_x \cdot r_{32}) \cdot y_0 + (f_x \cdot r_{13} - o_x \cdot r_{33}) \cdot z_0}{D} \\
L_5 &= \frac{o_y \cdot r_{31} - f_y \cdot r_{21}}{D} \\
L_6 &= \frac{o_y \cdot r_{32} - f_y \cdot r_{22}}{D} \\
L_7 &= \frac{o_y \cdot r_{33} - f_y \cdot r_{23}}{D} \\
L_8 &= \frac{(f_y \cdot r_{21} - o_y \cdot r_{31}) \cdot x_0 + (f_y \cdot r_{22} - o_y \cdot r_{32}) \cdot y_0 + (f_y \cdot r_{23} - o_y \cdot r_{33}) \cdot z_0}{D} \\
L_9 &= \frac{r_{31}}{D} \\
L_{10} &= \frac{r_{32}}{D} \\
L_{11} &= \frac{r_{33}}{D}
\end{aligned} \tag{25}$$

Assim,

$$(f_x, f_y) = \left(\frac{f}{s_x}, \frac{f}{s_y} \right) \tag{26}$$

$$D = -(x_0 \cdot r_{31} + y_0 \cdot r_{32} + z_0 \cdot r_{33})$$

2.1.2.2 Método de Tsai

Dentro das técnicas de calibração mais populares em sistemas de visão computacional, encontra-se a técnica de (TSAI, 1986) e (TSAI, 1987), basicamente devido à simplicidade ao realizar a calibração dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos separadamente. Dois estágios são executados na aplicação deste método, que, em um primeiro momento, calcula os

parâmetros extrínsecos (translação e rotação) e depois os parâmetros intrínsecos. O método pode lidar com o controle de pontos coplanares e não coplanares.

Este método é baseado nas restrições de alinhamento radial (RAR), que é apenas uma função da translação e rotação relativa - exceto para o componente z - entre os pontos da câmara e os pontos de calibração ou de controle. Como restrição, quando os pontos de controle de plano simples são utilizados, o plano não deveria ser exatamente paralelo ao plano da imagem.

O modelo da câmara, estabelecido pelo Tsai é apresentado na Figura 10, onde $(x_{esp}, y_{esp}, z_{esp})$ são as coordenadas em 3D do ponto objeto \mathbf{P} no sistema de coordenadas 3D do espaço. Além disso, (x, y, z) são as coordenadas 3D do mesmo ponto objeto \mathbf{P} no sistema de coordenadas 3D da câmara, o qual está centrado no ponto \mathbf{O} , que é o centro ótico e o eixo z é o mesmo que o eixo ótico. O sistema de coordenadas $(\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i)$ está centrado em \mathbf{O}_i e está paralelo ao eixo \mathbf{X} e \mathbf{Y} . A distância focal f , é a distância entre o plano de imagem da frente e o centro ótico. $(\mathbf{X}_u, \mathbf{Y}_u)$ são as coordenadas de imagem (x, y, z) se um modelo de câmara pinhole perfeito fosse usado. $(\mathbf{X}_d, \mathbf{Y}_d)$ são as coordenadas de imagem real que diferem de $(\mathbf{X}_u, \mathbf{Y}_u)$, devido à distorção óptica. $(\mathbf{X}_f, \mathbf{Y}_f)$ são as coordenadas utilizadas no computador, dadas em número de pixels para a imagem discreta no quadro na memória.

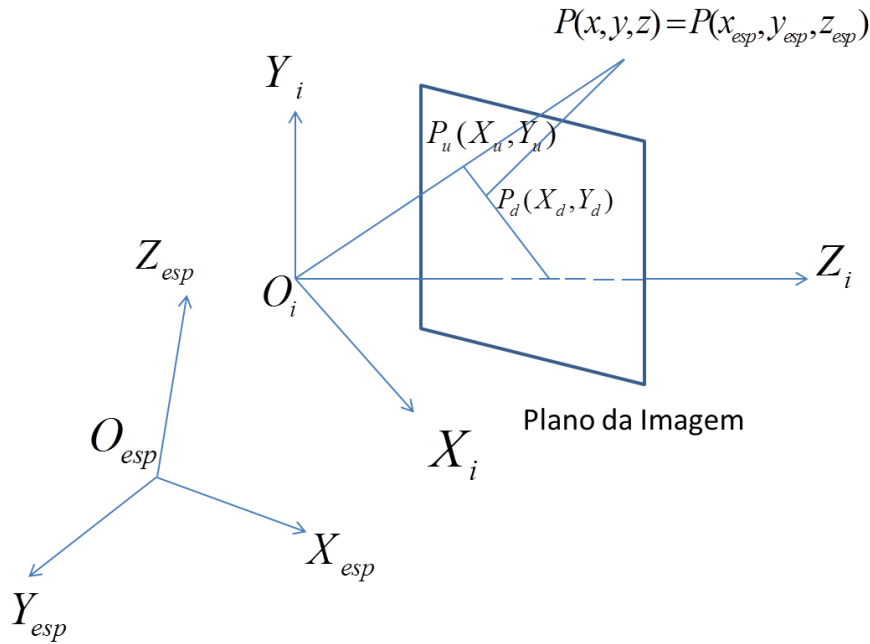


Figura 10 Modelo da Câmera utilizado pela técnica de calibração Tsai.

A técnica de calibração subdivide-se em quatro estágios de transformação das coordenadas 3D do espaço em coordenadas de imagens computadorizadas. Primeiramente, a transformação do corpo rígido desde o sistema de coordenadas do objeto no espaço $(x_{esp}, y_{esp}, z_{esp})$, as coordenadas 3D do sistema (x, y, z) é realizado por meio da rotação seguida da translação, contrário à sequência utilizada no método DLT. Esta mudança da metodologia da técnica Tsai é uma característica fundamental para o desenvolvimento e sucesso da técnica. A transformação é representada pela Equação (27)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (27)$$

Sendo as expressões (28) a matriz de rotação e o vetor de translação, respetivamente.

Define-se \mathbf{R} e \mathbf{T} como os parâmetros extrínsecos que serão calibrados.

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

No segundo estágio, realiza-se uma transformação das coordenadas 3D da câmera (x , y , z), sem distorção, para as coordenadas da imagem (\mathbf{X}_u , \mathbf{Y}_u), usando-se a perspectiva de projeção, considerando-se a geometria de câmera do tipo pinhole e, gerando-se

$$X_u = f \frac{x}{z} \quad (29)$$

$$Y_u = f \frac{y}{z}$$

Onde f que é a distância focal efetiva, é o parâmetro a ser calibrado.

O terceiro passo é inserir a correção da distorção gerada pelas lentes, representada na Equação (30)

$$D_x = X_d \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + \dots)$$

$$D_y = Y_d \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + \dots) \quad (30)$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}$$

onde (\mathbf{X}_d , \mathbf{Y}_d) são as coordenadas sobre o plano da imagem, considerando ou não a distorção. Admitindo que somente a distorção radial é considerada, e que alguns experimentos realizados pelo Tsai, consideram que só o primeiro termo é necessário, assim o coeficiente de distorção \mathbf{k}_1 será o parâmetro a ser calibrado.

Por último, realiza-se a transformação das coordenadas da imagem real (\mathbf{X}_d , \mathbf{Y}_d), às coordenadas da imagem computadorizada (\mathbf{X}_f , \mathbf{Y}_f), representadas pela Equação (31)

$$X_f = s_x \cdot d_x^{-1} \cdot X_d + C_x \quad (31)$$

$$Y_f = d_y^{-1} \cdot Y_d + C_y$$

Deste modo, os parâmetros intrínsecos a ser calibrados são a distância focal efetiva f , o coeficiente de distorção das lentes k_1 , o fator de escala s_x e a origem do sistema de coordenadas computacional (C_x, C_y).

Tsai demonstrou que a incorporação da distorção radial e a etapa de refinamento possibilitaram a geração de resultados com valores de precisão muito superiores àqueles gerados por métodos puramente lineares, como o DLT.

2.1.2.3 Método de Svoboda

O método (SVOBODA; MARTINEC; PAJDLA, 2005) propõe uma calibração totalmente automática, que produz modelos completos de projeção da câmera e requer apenas uma pequena mancha brilhante de fácil detecção. O ponto brilhante pode ser criado a partir de um *laser* usando um pequeno truque. Torna-se necessário mover o ponto ou mancha brilhante em todo o volume de trabalho, ou seja, o espaço tridimensional que é comum à visão de todas as câmeras. As projeções do ponto brilhante são detectadas de forma independente em cada câmera, e desta forma, pode-se chegar a precisão em um nível de sub-pixel, ajustando uma Gaussiana 2D como uma função do ponto propagado. Os pontos são validados através de pares de restrições epipolares. A projeção do movimento e o perfil são computados. As restrições geométricas são aplicadas e as estruturas projetivas são estratificadas para as estruturas Euclidianas. Os parâmetros da distorção não linear são calculados através de refinamento iterativo. O processo de calibração produz menos de 1/5 de erro em pixels reprojados, mesmo para câmeras com distorção radial significativa.

2.1.2.4 Método de Zhang

A técnica proposta pelo Zhang (ZHANG, Z.; WAY, 1999), é um método flexível que requer múltiplas visões de um padrão de calibração planar com diferentes orientações. Entretanto, cada câmera ou o padrão de calibração pode deslocar-se livremente, sem

conhecimento prévio desses movimentos. O método baseia-se em uma solução de forma fechada, seguida por uma otimização não linear com base no critério de máxima verossimilhança. A vantagem desta técnica é a simplicidade, uma vez que um padrão planar ordinário pode ser impresso com alta precisão, e ligado a um corpo rígido, portanto, não exigindo quadros calibração de custo elevado. A técnica de Zhang é implementada nas rotinas de calibração da câmera, incluídos no OpenCV, uma biblioteca de código aberto para os algoritmos de visão computacional, fornecidos pela Intel.

Em comparação com outras técnicas que utilizam padrões de calibração de dois ou três planos ortogonais, a técnica de Zhang deve observar só um padrão de calibração planar, pelo qual, é amplamente utilizada em aplicações desktop de visão computacional.

2.1.2.5 Métodos Híbridos

Muitos dos sistemas de captura de movimento, comercializados atualmente, empregam técnicas de calibração que envolve uma mistura de diversos conceitos e métodos, incluindo aqueles descritos anteriormente. Uma técnica comumente utilizada é aquela envolvendo duas etapas distintas: a etapa da calibração estática e a etapa da calibração dinâmica. A primeira etapa consiste em utilizar um algoritmo não iterativo, como o DLT, para calcular diretamente os parâmetros internos e externos das câmeras utilizando um modelo livre de distorção, como o de pinhole. A segunda etapa consiste de um processo de otimização não linear, que é baseado em um modelo que incorpora distorções e que utiliza os parâmetros obtidos na primeira etapa como valores iniciais para a execução de um refinamento. A segunda etapa geralmente envolve a movimentação de um bastão de calibração, contendo um ou mais marcadores, dentro do volume de reconstrução. Esse processo pode durar de aproximadamente 30 segundos a 5 minutos, dependendo do tamanho do volume e da precisão desejada. Os pontos registrados pelas câmeras, referentes ao(s) marcador(es) do bastão, são

empregados para otimização dos parâmetros visando minimizar o erro de re-projeção dos pontos tridimensionais reconstruídos.

2.1.3 Estimação da Posição em 3D a partir de visão estéreo

Para estimar postura a partir de dois pontos de visão, basicamente, dois problemas devem ser resolvidos. O primeiro, o problema de correspondência, consiste em determinar qual item ou recurso em uma imagem corresponde a qual item ou recurso na outra imagem. O segundo problema, a reconstrução em 3D, que consiste basicamente no cálculo e interpretação da distância projetada - no plano da imagem - entre dois itens correspondentes, chamados de disparidade. Um conjunto de disparidades para a cena - chamado disparidade mapa - pode ser convertido para um mapa 3D da cena, se a geometria do ambiente é conhecida. Problemas de correspondência e de reconstrução 3D são explicados e discutidos nas próximas seções.

2.1.3.1 Conceitos básicos

Nesta seção, os conceitos básicos para a compreensão de questões por trás sistemas de rastreamento com visão estéreo são explicados. Na Figura 11 mostra-se a vista superior de um sistema estéreo composto por duas câmeras do tipo pinhole ou perspectiva. Os planos de imagem da esquerda e da direita são coplanares, representados respectivamente pelos segmentos I_L e I_R . Os pontos O_L e O_R são os centros de projeção, e considera-se que os eixos óticos são paralelos. Por causa disto, o ponto de fixação, definido como o ponto de interseção dos eixos óticos, encontra-se infinitamente distante das câmaras.

O método usado em configurações estéreo para determinar a posição no espaço de P e Q é a triangulação. Por interseção dos raios definidos pelos centros de projeção e as imagens de P e Q , ou seja, os pontos p_L , p_R , q_L , q_R , a posição 3D de P e Q pode ser obtida. O sucesso desta técnica depende da escolha correta dos pontos correspondentes nas duas imagens.

Considerando o problema correspondência como resolvido, a reconstrução 3D do ponto \mathbf{P} é calculada a partir de suas projeções \mathbf{p}_L e \mathbf{p}_R .

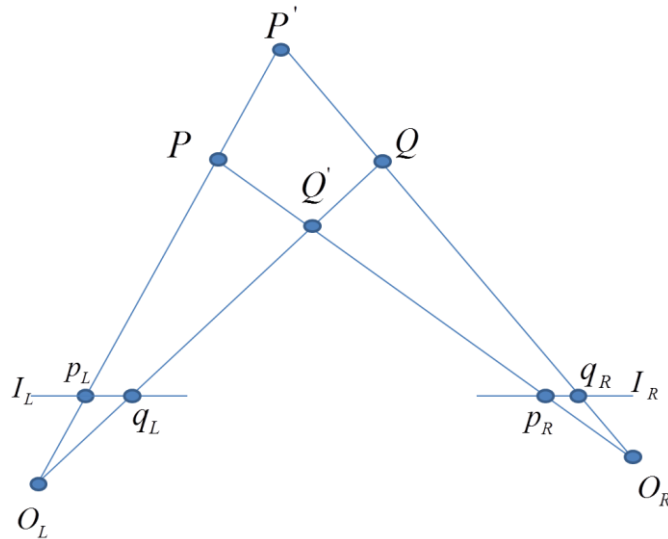


Figura 11 Configuração do Sistema Estéreo Básico

Na Figura 12 é apresentado o problema de reconstrução para o ponto \mathbf{P} . A distância L entre os centros da projeção \mathbf{O}_L e \mathbf{O}_R é chamada de linha base da configuração estéreo. Sendo \mathbf{x}_L e \mathbf{x}_R as coordenadas de \mathbf{p}_L e \mathbf{p}_R em relação aos pontos principais \mathbf{c}_L e \mathbf{c}_R , f a distância focal, e Z a distância entre o ponto \mathbf{P} e a linha base. Assim, a Equação para os triângulos similares $(\mathbf{p}_L, \mathbf{P}, \mathbf{p}_R)$ e $(\mathbf{o}_L, \mathbf{P}, \mathbf{o}_R)$ escreve-se na Equação (32).

$$\frac{L + x_L - x_R}{Z - f} = \frac{L}{Z} \quad (32)$$

onde Z soluciona-se aplicando (32).

$$Z = f \cdot \frac{L}{d} \quad (33)$$

$$d = x_R - x_L$$

Sendo d a disparidade, que é uma medida da diferença em quadros de imagem entre os pontos correspondentes nas duas imagens. A partir da Equação (33) analisa-se que Z é inversamente proporcional à disparidade d .

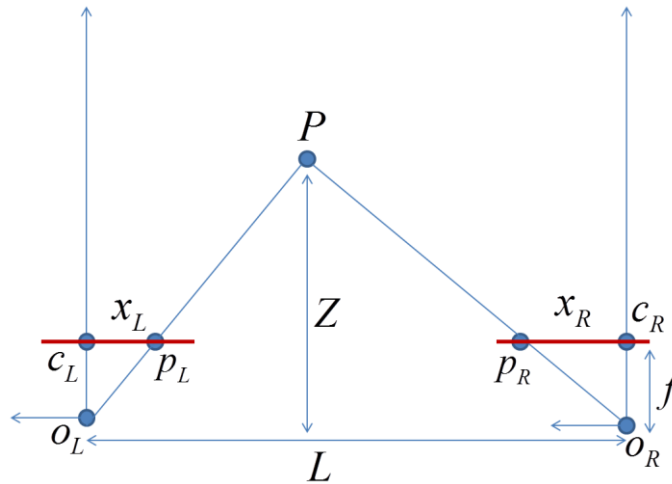


Figura 12 Reconstrução em 3D do ponto P, utilizando configuração de visão Estéreo.

Neste tipo de configuração, os parâmetros intrínsecos são descritos em igual forma que na subseção 2.1.3. Considerando-se uma câmera como o quadro de referência, os parâmetros extrínsecos definem a posição relativa e orientação da outra câmera em relação com a primeira, e as definições da subseção 2.1.4 aplicam-se a estes parâmetros.

2.1.3.2 Módulo de Correspondência

O problema da correspondência pode ser visto como um problema de busca, ou seja, que o elemento em uma imagem corresponde ao elemento de outra imagem, e por essa razão é considerada um estágio fundamental. Deve-se definir o tipo de elemento de imagem será comparada e que medida de similaridade será adotada. Os algoritmos de correspondência podem ser classificados como os baseados em correlação e os baseados em recursos. Enquanto os métodos baseados em correlação são aplicados à totalidade dos pontos da imagem, os métodos baseados em recursos, tentam estabelecer correspondências entre conjuntos menores de características da imagem.

2.1.3.2.1 Correspondência baseada em correlação

Os métodos baseados em correlação utilizam os níveis de cinza de subimagens, sendo uma delas considerada como referência e outra de busca. Neste sentido, a subimagem da imagem de referência, por exemplo, tem um alvo de interesse que se estiver presente na

subimagem capturada pela imagem de busca é possível realizar uma correlação entre a janela que contém o objetivo e todas as subimagens da imagem de busca fazendo uma comparação. Ao final, busca-se a maior similaridade entre as duas imagens. Estes métodos de correlação, são mais fáceis de implementar, fornecendo mapas de disparidade densos, embora exigindo alto performance computacional.

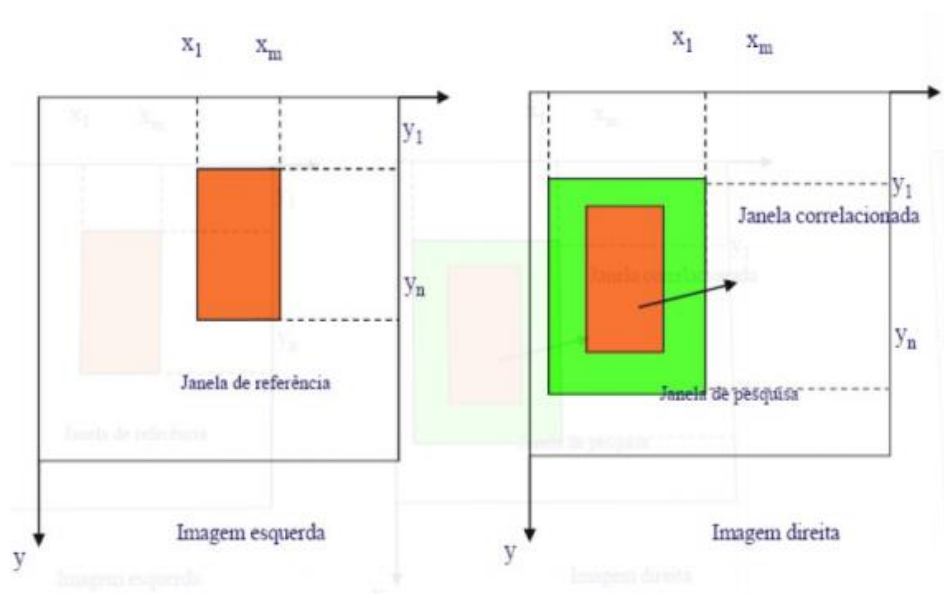


Figura 13 Redução da área de busca na correlação de imagens
[\[http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/48230/Poster_12684.pdf?sequence=2\]](http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/48230/Poster_12684.pdf?sequence=2).

2.1.3.2.2 Correspondência baseada em recursos

Os métodos de correspondência baseado em recursos contém uma ampla pluralidade de soluções. Estas técnicas são adequadas se houver conhecimento prévio da cena, permitindo a escolha do correto detector de recurso. Além disso, eles também apresentam melhor desempenho e menor sensibilidade às mudanças de iluminação, mas geram poucos mapas de disparidade, embora estes pudessem ser informações suficientes para a aplicação. Dando uma visão geral, os algoritmos de correspondência diminuem seu desempenho por pontos em uma imagem que não correspondem a pontos na outra imagem e falsas correspondências. (KATO; BILLINGHURST, 1999).

De acordo com (GALO, 2003), não se deve esperar que os métodos e os algoritmos de correspondência gerem resultados satisfatórios em todas as aplicações. O princípio de

correspondência é único, pelo qual, torna-se necessário considerar fatores adicionais como a diversidade de sensores disponíveis, a geometria do processo na aquisição das imagens, a natureza das mesmas assim como as características dos objetos presentes na cena.

2.1.3.3 Geometria Epipolar

Nesta seção, apresenta-se uma relação geométrica básica para uma configuração de visão estéreo, entre duas visões de uma cena em 3D para câmeras do tipo pinhole ou de perspectiva. Cada visão está relacionada com uma imagem como é mostrado na Figura 14 com os centros de projeção \mathbf{O}_L e \mathbf{O}_R e os planos da imagem π_L e π_R .

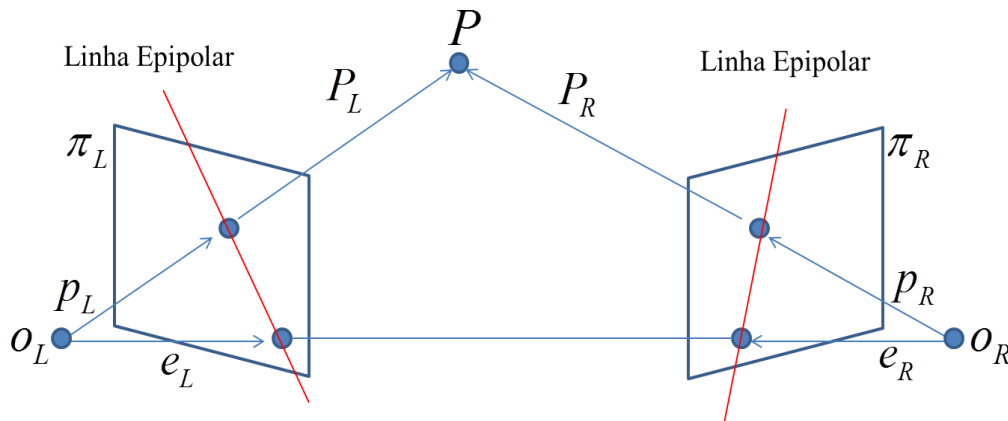


Figura 14 Representação Básica da Geometria Epipolar.

Cada câmera está associada a um sistema de coordenadas 3D, a origem deste coincide com o centro da projeção e o eixo z com o eixo ótico. Os vetores $\mathbf{P}_L = [X_L, Y_L, Z_L]^T$ e $\mathbf{P}_R = [X_R, Y_R, Z_R]^T$ referenciam o ponto \mathbf{P} representado nos quadros de referência para cada câmera. Já, os vetores $\mathbf{p}_L = [x_L, y_L, z_L]^T$ e $\mathbf{p}_R = [x_R, y_R, z_R]^T$ estão relacionados as projeções ortogonais do ponto \mathbf{P} nos planos da imagem de cada câmera. Para todos os pontos da imagem, as expressões $\mathbf{z}_L = \mathbf{f}_L$ e $\mathbf{z}_R = \mathbf{f}_R$ são válidas.

Os parâmetros extrínsecos deste tipo de configuração estéreo relacionam os quadros de referência de cada uma das câmeras, definindo uma transformação 3D do espaço descrita pelo vetor de translação $\mathbf{T} = (\mathbf{O}_R - \mathbf{O}_L)$ e a matriz de rotação \mathbf{R} . Usando-se um ponto aleatório \mathbf{P} no

espaço, a transformação entre \mathbf{P}_R e \mathbf{P}_L é uma translação seguido da rotação representado pela Equação (34).

$$P_R = R \cdot (P_L - T) \quad (34)$$

De outro lado, os pontos em que uma linha através dos centros de projeção cruza os planos de imagem são chamados epipolos, denotado por \mathbf{e}_L e \mathbf{e}_R . O epipolo da esquerda é a imagem do centro de projeção da câmera direita, bem como o epipolo da direita é a imagem do centro de projeção da câmera esquerda. Na Equação (35) relaciona-se os pontos 3D e as suas projeções.

$$\begin{aligned} p_L &= \frac{f_L}{Z_L} \cdot P_L \\ p_R &= \frac{f_R}{Z_R} \cdot P_R \end{aligned} \quad (35)$$

A interseção entre o plano definido pelos pontos \mathbf{P} , \mathbf{O}_L e \mathbf{O}_R , é chamado de plano epipolar, e cada imagem é uma linha, denominada linha epipolar. Considerando que o ponto \mathbf{P} pode-se localizar em qualquer lugar no raio entre \mathbf{O}_L através de \mathbf{p}_L , este deve ter sua correspondência sobre a imagem da direita é a linha epipolar através do ponto \mathbf{p}_R .

Esta condição é conhecida como a restrição epipolar, e estabelece um mapeamento entre pontos da imagem da esquerda e as linhas na imagem da direita, e vice-versa. Isto é usado para restringir a pesquisa para o jogo de \mathbf{p}_L ao longo da linha epipolar correspondente, reduzindo a procura de correspondências para um problema 1D. Alternativamente, o mesmo método pode ser usado para verificar se um ponto candidato reside ou não, na linha epipolar correspondente. Este procedimento é geralmente utilizado para rejeitar falsos pontos correspondentes devido à oclusão (GREFF, 2006).

2.1.3.4 Reconstrução Tridimensional

A reconstrução da geometria tridimensional dos objetos consiste no cálculo das coordenadas espaciais (x, y, z) de um ponto \mathbf{P} a partir de imagens e pode ser feita com o uso

de duas formas principais: utilizando-se as equações e os coeficientes empregados na técnica DLT (ABDEL-AZIZ; KARARA, 1971); ou aproveitando-se as restrições obtidas a partir da geometria epipolar para triangular o ponto espacial por meio do cálculo do traçado inverso dos raios de luz (HARTLEY, R. I.; STURM, 1997).

2.1.3.4.1 Reconstrução com base na técnica DLT

A reconstrução tridimensional com base na técnica DLT utiliza os 11 coeficientes L_1 até L_{11} para construção de um sistema linear que permite o cálculo das coordenadas espaciais de um ponto \mathbf{P} no espaço (ABDEL-AZIZ; KARARA, 1971) *apud* (FURTADO, 2013),(SHAPIRO, 1978). Considerando-se as expressões da seção 2.2.1 onde tem-se um ponto no espaço \mathbf{P} com coordenadas (x, y, z) e o par (u, v) que representa a projeção do ponto \mathbf{P} no plano da imagem, consegue-se reorganizar essas expressões para obter um sistema de equações lineares como se mostra em (36)

$$\begin{bmatrix} (L_1 - uL_9) & (L_2 - uL_{10}) & (L_3 - uL_{11}) \\ (L_5 - vL_9) & (L_6 - vL_{10}) & (L_7 - vL_{11}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - L_4 \\ v - L_8 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Assumindo-se que os onze coeficientes da câmera e a projeção do ponto \mathbf{P} no plano da imagem (u, v) são conhecidos, não seria possível encontrar uma solução para o sistema. Entretanto, se o ponto \mathbf{P} é detectado por mais uma câmera é possível a formulação de mais duas equações como segue em (37).

$$\begin{bmatrix} (L_1^1 - u^1 L_9^1) & (L_2^1 - u^1 L_{10}^1) & (L_3^1 - u^1 L_{11}^1) \\ (L_5^1 - v^1 L_9^1) & (L_6^1 - v^1 L_{10}^1) & (L_7^1 - v^1 L_{11}^1) \\ (L_1^2 - u^2 L_9^2) & (L_2^2 - u^2 L_{10}^2) & (L_3^2 - u^2 L_{11}^2) \\ (L_5^2 - v^2 L_9^2) & (L_6^2 - v^2 L_{10}^2) & (L_7^2 - v^2 L_{11}^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^1 - L_4^1 \\ v^1 - L_8^1 \\ u^2 - L_4^2 \\ v^2 - L_8^2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Lembrando-se que o sistema linear com maior número de equações que incógnitas pode apresentar infinitas soluções, é necessária uma minimização do erro residual utilizando-se a técnica SVD (Singular Value Decomposition).

2.1.3.4.2 Reconstrução em base à geometria epipolar

Após a calibração das câmeras numa configuração de visão estéreo, os parâmetros intrínsecos e extrínsecos são conhecidos e a geometria epipolar também. De esta forma, o problema de reconstrução 3D pode-se resolver por triangulação (HARTLEY, R. I.; STURM, 1997). Pode ser visto na Figura 15 que o ponto P , cujas projeções são os pontos correspondentes p_L e p_R , encontra-se na interseção dos raios de O_L através de p_L e de O_R através de p_R . Se a geometria epipolar é inteiramente conhecida, os raios são conhecidos e a sua interseção pode ser calculada.

Porém, sendo os parâmetros da configuração estéreo aproximadamente conhecidos, os dois raios não vão se intersectar exatamente no espaço e sim estarem próximos um do outro. Assim, a interseção pode ser considerada como o ponto médio de um vetor que conecta ambos os raios na mínima distância entre eles (TRUCCO; VERRI, 1998).

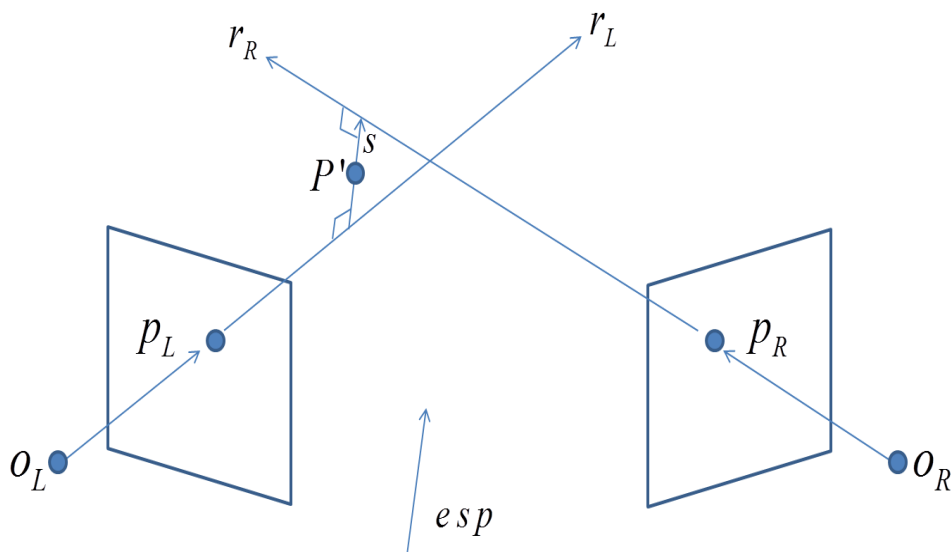


Figura 15 Reconstrução tridimensional do ponto P utilizando Triangulação.

Assume-se o ponto O_L referente à câmera da esquerda como a origem do sistema de coordenadas do espaço, $k_1 \cdot p_L$ o vetor r_L , desde O_L através de p_L , e $T + k_2 \cdot R^T \cdot p_R$ o vetor r_R , desde O_R através de p_R . De outro lado, w é o vetor ortogonal a r_L e r_R , obtido do produto vetorial expressado por $k_3 \cdot (p_L \times R^T \cdot p_R)$. Sendo s o vetor paralelo a w através de r_L ,

representado por $k_1 \cdot p_L + k_3 \cdot (p_L \times R^T \cdot p_R)$, conectando r_L e r_R . O ponto médio P' , que é uma aproximação do ponto P , pode-se calcular obtendo-se primeiro os pontos finais de s e logo sua média. O ponto final onde s une-se com r_R pode ser expresso como $s = r_R$, ou escrito de outra forma como na Equação (38).

$$k_1 \cdot p_L - k_2 \cdot R^T \cdot p_R + k_3 \cdot (p_L \times R^T \cdot p_R) = T \quad (38)$$

Sendo \mathbf{R} , \mathbf{T} , \mathbf{p}_L e \mathbf{p}_R são conhecidos, um sistema linear pode-se construir com três incógnitas e três equações (p_R e p_L estão representados nas coordenadas 3D da câmera), os quais podem-se obter diretamente da solução para k_1 , k_2 e k_3 . Desde que os pontos finais de s e $k_1 \cdot p_L$ e $T + k_2 \cdot R^T \cdot p_R$, o ponto médio P' pode ser calculado.

2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE MACIÇOS

2.2.1 Termos usuais

Um colapso é uma atividade associada ao deslizamento total ou parcial de um maciço causado por uma combinação de fatores, tais como, as condições geológicas, erros no planejamento da construção e falhas na execução (GOMES PRATA, 2012).

O conceito de risco relaciona-se com a possibilidade de perigo, dano ou desvantagem de um objeto ou a ocorrência de uma situação. No que respeita a engenharia de minas, o risco é o valor esperado de um ou mais resultados de um ou mais eventos futuros na construção de obras subterrâneas.

2.2.2 Categorias dos Colapsos

Os colapsos podem ser classificados em função de diversos fatores, tais como, o local onde ocorrem, a extensão, os efeitos, as consequências, as causas, os mecanismos, etc. Assim, apresentam-se seis categorias diferentes de colapsos definidas por (SEIDENFUSS, 2006), as

quais são: colapsos à luz do dia, colapsos subterrâneos, *rock burst*, *squeezing*, inundações e infiltrações de água e colapsos do emboquilhamento.

2.2.2.1 Colapso à luz do dia

Define-se colapso à luz do dia quando o maciço é exposto à superfície, geralmente devido à erosão provocada por águas subterrâneas, podendo o túnel tornar-se visível desde a cratera à superfície ou não. A propagação da falha no maciço até à superfície pode ser extremamente rápida dando origem a situações similares à Figura 16, onde um automóvel ou ônibus em Munique, em 1994, passou por uma área que colapsou nesse momento devido ao túnel do metropolitano, ficando preso numa cratera inundada de água e causando a morte de quatro pessoas (GOMES PRATA, 2012).



Figura 16 Rua colapsada em Munich, ano 1994 [<http://munichre.com>].

2.2.2.2 Colapso Subterrâneo

De outro lado, estão presentes também os colapsos no interior do túnel em construção, afetando pessoas e máquinas, mas não a superfície. Como mostrado na Figura 17, este tipo consiste na queda de material e na formação de uma cavidade durante o desmonte de maciços. Podem ocorrer em qualquer parte da seção do túnel em escavação, principalmente na abóbada (*roof collapse*) ou na parede lateral do túnel (*side-wall caving*), mas também na frente de

escavação quando há utilização de meios mecânicos, pois estes podem afetar o volume de terreno que se encontra alguns metros à frente da frente de ataque do túnel fazendo com que o material colapse a frente das ferramentas de corte (SEIDENFUSS, 2006).

Esta categoria de colapsos apresenta uma percentagem difícil de representar devido ao fato de que nem todos são documentados e registrados no total de acidentes, ao contrário dos colapsos à luz do dia que, devido ao seu impacto no meio, não passam despercebidos.



Figura 17 Colapso da parede lateral de um túnel na Central Elétrica de Queimado, Brasil, 2002 (SEIDENFUSS, 2006).

2.2.2.3 Rock burst

O rock burst é um termo associado a uma ruptura violenta e espontânea de uma rocha que compõe o maciço, que pode ir desde a explosão com o arremessamento de pequenos fragmentos de rocha até o colapso súbito de grandes seções da parede de um túnel ou escavação. Está presente nos maciços de comportamento frágil quando submetido a grandes tensões e é, por isso, comum nas escavações de minas a grandes profundidades. Quando se dá a abertura de uma galeria de uma mina profunda, a rocha envolvente é libertada de enormes pressões o que pode levá-la a literalmente explodir na sua tentativa de restabelecer o equilíbrio.



Figura 18 Danos no túnel pela ocorrência de *rock burst* numa mina na África do Sul
[<http://sciencedirect.com>]

2.2.2.4 Squeezing

Quando o material rochoso tem características de baixa resistência desloca-se para o interior da escavação do túnel sob a ação da gravidade e do elevado campos de tensões existentes no maciço, conhece-se como *Squeezing*. As rochas plásticas e semi-plásticas, que são sensíveis às deformações e falhas mesmo com valores de tensões relativamente baixos, são as que mais provavelmente exibem comportamento de squeezing (GOMES PRATA, 2012).

Segundo (GOMES PRATA, 2012), os efeitos do squeezing tornam-se imediatamente evidentes durante a escavação afetando os hasteais e a frente de escavação, como ilustrado na Figura 19. Entretanto, o volume de rocha sujeita a este efeito no túnel, avança lentamente sem um aumento de volume perceptível. Os efeitos do squeezing na escavação dependem das características do suporte.



Figura 19 Ocorrência de *squeezing* na construção do túnel para a ligação de alta velocidade entre Lyon e Turim (MELÂNEO, 2011).

2.2.2.5 Infiltração e inundação de água

Além dos problemas apresentados anteriormente, podem-se originar alterações no maciço, como a formação de chaminé danos nos trabalhos em curso e colocar em perigo a segurança das pessoas envolvidas, sendo necessárias intervenções adicionais de modo a resolver o problema. O aparecimento de água na construção de túneis pode causar vários tipos de dificuldades de maior ou menor gravidade, dependendo da sua quantidade (apenas uma infiltração ou uma inundação), da prevenção e das características do maciço. Uma inundação de água pode ser particularmente crítica se o túnel estiver que ser escavado em uma direção descendente ou a partir de um poço. A estabilidade das paredes estruturais e a frente de escavação pode ser afetada pela alta capacidade erosiva de fluxos de água a grande pressão ou pela insuficiente resistência ao corte, fazendo com que possam surgir falhas nas paredes do túnel. A presença de uma máquina TBM (*Tunneling Boring Machine*) pode atrasar este tipo de falhas, (SEIDENFUSS, 2006) seja quando é utilizado o método EPBM (*Earth Pressure Balanced Machine*) ou o método STSM (*Slurry Type Shield Machine*).

2.2.2.6 Colapso do emboquilhamento

As áreas de emboquilhamento ou frente do túnel frequentemente apresentam alguns dos pontos mais problemáticos durante a escavação do mesmo. Estes problemas que se concentram no emboquilhamento podem ser originados devido à natureza geológica do terreno, à falta de confinamento na área de recobrimento próxima e descontinuidades do maciço.



Figura 20 Queda da frente da entrada do túnel (SEIDENFUSS, 2006).

Vários fatores influenciam os problemas no emboquilhamento como a direção da escavação, a morfologia do local, as características geomecânicas do terreno, etc. Enquanto, é altamente desejável que na localização escolhida para o emboquilhamento exista terreno de boa qualidade em uma extensão e altura do túnel, as restrições ambientais e outras considerações relevantes irão por sua vez, afetar a escolha do local do emboquilhamento, fazendo com que neste possa ocorrer materiais de fraca qualidade geotécnica. Quando o terreno é exposto, a execução de um pórtico de betão reforçado nesta situação é um grande auxílio para a progressão dos trabalhos (GOMES PRATA, 2012).

2.2.3 Principais Causas de Colapso

A análise da estabilidade do maciço durante a construção de túneis começa com uma comparação entre as várias previsões das fases de projeto e planejamento com as medições que vão se gerando durante sua construção. Contudo, eventualmente devem-se considerar modificações ao projeto e mudanças nos processos construtivos com a meta de se garantir a segurança antes de iniciar uma nova fase da construção. Nas seções que podem apresentar problemas de estabilidade, são escolhidos pontos e instalados os instrumentos de medição de deslocamento antes ou imediatamente depois do processo de escavação. Outras características como a distribuição da estrutura geológica, as propriedades da rocha, falhas e juntas, são registradas enquanto o túnel avança (GOMES PRATA, 2012).

Os dados obtidos durante as fases de medição têm que ser imediatamente estudados. É necessário comparar os resultados obtidos pelos instrumentos de medição nos vários pontos com aqueles obtidos por uma análise por árvore de eventos, por exemplo. Com base nesses resultados, o comportamento da obra é examinado e é confirmado o estado de segurança apresentado em (SEIDENFUSS, 2006), o qual aponta as principais falhas de gestão e controle que podem levar ao colapso em túneis:

- a) Projetistas sem competência ou inexperientes;
- b) Diretores de obra sem competência ou inexperientes;
- c) Empreiteiros sem competência ou inexperientes;
- d) A incapacidade dos profissionais de aprender com experiências anteriores, boas ou más;
- e) Baixa supervisão dos trabalhos de obra;
- f) Permitir a sequência errada de processos construtivos;
- g) Não reação face aos dados de monitoramento.

Destaca-se também a ocorrência repetida de colapsos após a retomada dos trabalhos parados por um período, sejam devido a fins-de-semana, férias ou embargos. Estes colapsos devem-se provavelmente ao resultado da considerável diferença entre a rigidez do betão colocado anteriormente e aquele agora colocado, ainda fresco. Dada à elevada rigidez, na zona do betão anteriormente colocado concentram-se cargas a um nível superior do que era originalmente presumido. Além disto, o reinício de trabalhos causa um distúrbio a uma área que já tinha um estado de tensões consolidado (GOMES PRATA, 2012).

2.2.4 Mecanismos de colapso

O conhecimento dos mecanismos de colapso e dos seus efeitos na escavação de um túnel não devem ser utilizados apenas para evitar os acidentes, mas sim para elaborar e aperfeiçoar os projetos, executar obras mais económicas e realizar intervenções que melhorem o desempenho do túnel. A capacidade de previsão do comportamento dos maciços e no maciço através de modelos matemáticos antes do início das obras é de grande importância para que sejam detectados antecipadamente os pontos ou regiões com solicitações de esforços e deformações máximas. Dessa forma, pode-se monitorar tais regiões com maior pormenorização permitindo a antecipação de possíveis intervenções na obra face ao aparecimento dos primeiros sintomas.



Figura 21 Desabamento da frente de escavação (à esquerda) e do topo do túnel (à direita). (BRADY; BROWN, 2006)

Quando ocorrem acidentes, é bastante comum estes terem sido originados pelas condições do maciço, sendo frequente a ocorrência no interior do maciço de zonas pouco resistentes, de infiltrações abundantes de água, de sobrecargas do suporte pelo maciço, etc. Estas situações podem ocorrer, com maior probabilidade, se for o caso de não ter havido prospecções suficientes, o deficiente controle do nível freático ou as cargas no suporte não terem sido devidamente equilibradas.

Os mecanismos de colapso dos maciços formam-se devido à alteração do seu estado de tensão, geralmente originado pelo processo de escavação ou pelas condições do lençol freático. Tais mecanismos declaram-se, na maioria das vezes, na abóbada da escavação e na frente de avanço do túnel. Uma vez executado o revestimento, os mecanismos no maciço ocorrem somente se a estrutura não oferecer resistência adequada e entrar, ela própria, em colapso.

Nos maciços, os mecanismos de colapso podem ser classificados como locais ou globais dependendo da abrangência dos seus efeitos. Os mecanismos globais verificam-se quando o equilíbrio dos mecanismos, influenciado pelo estado de tensão, afeta volumes do maciço localizados longe da face (frente) da escavação, enquanto os mecanismos locais são aqueles em que a estabilidade depende apenas do comportamento local nas proximidades da abertura (GOMES PRATA, 2012).

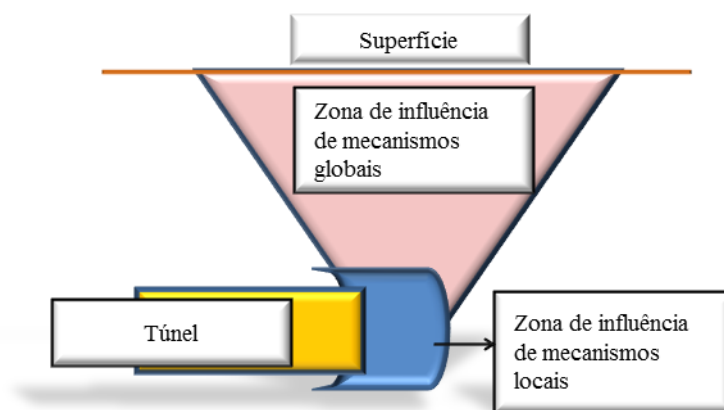


Figura 22 Mecanismos globais e locais

2.2.5 Mecanismos de monitoramento

Quando os túneis são executados em maciços com potencial para a formação de mecanismos globais, deve ser dada especial atenção aos deslocamentos observados durante as obras.

Os mecanismos locais são de difícil detecção, uma vez que, como o seu próprio nome indica, a sua abrangência é local e os seus efeitos, na maioria das vezes, não são detectados pelos instrumentos de observação pelo fato destes se encontrarem instalados em seções equidistantes (GOMES PRATA, 2012).

Embora os mecanismos locais, por vezes, não sejam tão prejudiciais para a obra como os globais, face à sua pequena abrangência, podem causar ferimentos ou até a morte de pessoas que trabalhem no local da queda de blocos. Para que as obras sejam executadas com segurança evitando-se os mecanismos locais, os maciços devem ser devidamente tratados, principalmente na abóbada e frente da escavação, com o uso de ensilagens, injeções, *jet-grouting* e outros tipos de tratamento (GOMES PRATA, 2012).

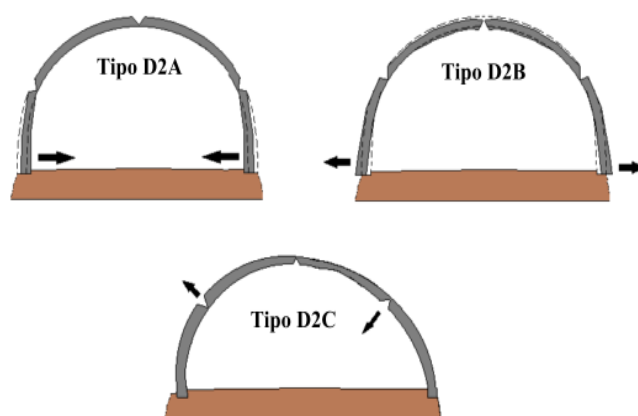


Figura 23 Mecanismos de colapso no suporte com soleira plana do tipo D2 (GOMES PRATA, 2012)

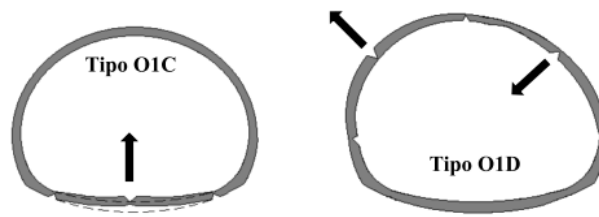


Figura 24 Mecanismos de colapso no suporte com soleira curva do tipo O1C e O1D (GOMES PRATA, 2012)

3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA PARA A ESTIMATIVA E MONITORAMENTO DO DESLOCAMENTO DE MACIÇOS

Este capítulo analisa trabalhos que abordam a problemática para estimar e medir os deslocamentos que se apresentam durante e após a escavação de túneis, assim como as considerações da sua aplicabilidade. Optou-se por realizar uma classificação em pelo menos duas categorias, dentro das quais tem-se trabalhos baseados em simulação e análise numérica, e trabalhos assentados por medições experimentais.

3.1 ESTIMATIVA DO DESLOCAMENTO COM BASE EM SIMULAÇÕES

O trabalho de (PALMSTROM; SING, 2001) apresenta um sistema que integra tecnologia da informação para realizar a caracterização do maciço rochoso e o desenho de túneis visando-se uma construção com segurança, com mais eficiência e gerando uma redução de custos econômicos e procedimentais. O método utiliza os dados em tempo real para realizar retroalimentação aos modelos geológicos e computacionais para escavação e determina o período ótimo da escavação, sua sequência e o suporte estrutural. Não obstante, não se apresenta uma análise da precisão do sistema, nem a robustez do mesmo na identificação de deslocamentos do maciço.

O trabalho de (JIA; TANG, 2008) mostra que durante a escavação subterrânea muitas falhas rochosas circundantes têm estreita relação com as articulações. O estudo de estabilidade em túnel, no maciço rochoso articulado é de importância para a engenharia de rochas, especialmente no desenvolvimento do espaço subterrâneo. Assim, o trabalho propõe um método numérico chamado RFPA (*Rock Failure Process Analysis*), para estudar a influência de diferentes ângulos de inclinação das junções das camadas e o coeficiente de pressão lateral sob a estabilidade do maciço rochoso no túnel. Este código numérico é um método dos elementos finitos de duas dimensões, baseado nos mecanismos de dano e teoria

estatística. As análises numéricas indicaram que tanto o ângulo de inclinação e o coeficiente de pressão lateral têm impactos significativos na estabilidade do túnel. Os processos de falência progressiva de túnel em maciço rochoso articulado foram apresentados e os mecanismos foram discutidos. De outro lado, conclui-se que o aumento do coeficiente de pressão lateral impelirá aos deslocamentos no teto e chão do túnel ter uma diminuição, mas irá fazer com que o deslocamento das duas paredes laterais aumente. Com este estudo, consegue-se obter uma melhor fundamentação e apoio para o desenvolvimento do projeto de túneis.

Segundo (YAZDANI *et al.*, 2012), um método de observação moderna é uma técnica útil para a avaliação de parâmetros de solo e de maciço rochoso e na previsão do seu comportamento mecânico. As maiorias das técnicas de retro análise em problemas de engenharia geotécnica baseiam-se nos métodos que utilizam os dados monitorados de tensões, deformação e deslocamentos. Esta técnica é um dos processos de destaque no desenho e avaliação da estabilidade das cavernas que revela a deficiência dos suportes e de fato tem destaque para a avaliação dos parâmetros de projeto. Neste estudo de análise de deslocamento baseado em retro análise direta usando modelagem numérica contínua e descontínuo, foram aplicando propriedades geotécnicas de rochas, relação de tensões e parâmetros das junções seguido do cálculo de parâmetros, para depois ser comparados com os parâmetros iniciais do projeto. Os resultados da modelagem apresentaram semelhanças com os deslocamentos medidos, não obstante, a diferença quantitativa entre os deslocamentos calculados pelo método e os dados obtidos das medições geradas por grupos de extensômetros, dependem fortemente se a modelagem numérica é contínua ou descontínua.

3.2 ESTIMATIVA E MAPEAMENTO DO DESLOCAMENTO BASEADO EM MEDIÇÕES

As metodologias para estimativa e mapeamento de deslocamento que fazem uso de processos experimentais apresentam resultados que permitem realizar uma comparação com os resultados obtidos dos métodos baseados em simulações. A partir disto, classificam-se os seguintes trabalhos segundo o tipo de sensor utilizado para obter os dados experimentais.

3.2.1 Medições com o uso de extensômetros

Na proposta de (PALMSTROM; SING, 2001) utilizaram-se três métodos de deformação imersivos para analisar e comparar os maciços rochosos. Um deles foi o teste PJT (*Plate Jacking Test*), o qual usa extensômetros para medir as deformações do maciço dentro dos buracos de perfuração. Este tipo de testes escolhe duas áreas diametricamente opostas, nas quais aplicam-se cargas simultaneamente e mede-se a deformação das rochas nos buracos de perfuração. Entretanto, estes métodos são de alto custo e difíceis de realizar, devido à necessidade de dispor de equipamento adicional para gerar cargas ao maciço.

O trabalho de (ZHANG, L. Q. *et al.*, 2006), apresenta uma metodologia para estimar um deslocamento baseado no método de retro análise, para a determinação do módulo do maciço rochoso E e o estresse horizontal *in situ* P que é perpendicular à linha de eixo do túnel de escavação em maciços rochosos duros e intactos. Assume-se que o maciço rochoso vai responder de forma elástica, isotrópica e linear. Essencialmente, o método é uma solução que melhor se ajusta as condições da construção, comparando os deslocamentos medidos perto de uma face do túnel durante a escavação, com os resultados obtidos usando um método tridimensional dos elementos finitos. O método pode ser aplicado de forma eficiente e eficaz por meio de algoritmos iterativos, assim como as técnicas de pesquisa direta e amortecimento com a técnica de dos mínimos quadrados. Escolheram-se 15 perfis de medição, onde os deslocamentos foram medidos por extensômetros de furo e medidores de convergência, sendo

utilizados apenas medidores de convergência para a retro análise de **E** e **P**. A convergência foi medida pelo indicador de convergência tipo SL-2, o qual apresentou uma sensibilidade de 0,01 mm. O medidor de convergência foi calibrado com dispositivos de teste, com uma precisão de $\pm 0,001$ mm.

No entender de (YIN *et al.*, 2011), para o estudo do deslocamento normal de massa rochosa no solo de minas de carvão, um grupo de extensômetros de furo para o monitoramento do deslocamento foram dispostos em poços subterrâneos e observou-se o deslocamento dinâmico do maciço rochoso. Deste modo, os sensores foram dispostos em poços em diferentes profundidades, quando a distância da posição de mineração e perfuração foi de 110 m. Após a conclusão da instalação, os sensores de monitoramento de deslocamento foram adquirindo os dados de forma dinâmica com o instrumento digital de tensão YJZ-16. O princípio básico do monitoramento foi o aumento da frequência de monitoramento com a distância desde as estações de monitoramento, obtendo-se medições de deslocamentos menores a 1 mm.

3.2.2 Medição com acelerômetros

No trabalho de (HIRATA; KAMEOKA; HIRANO, 2007), as medições de tensão inicial na rocha base, análise de tensão secundário em torno de um túnel, e as medições AE (*Acoustic Emission*) são examinados. Com base nos resultados desta análise, mostra-se que a geração de deslocamentos de rocha está relacionada com a presença de descontinuidades geológicas. A medição que sofre o maciço rochoso a partir de estresse das rochas é desejável, no qual neste estudo a deformação delas ao longo do túnel é abordada baseada nas medições iniciais no maciço, no campo explosão. Dessa forma, usa-se monitoramento com emissão acústica para o controle de segurança do túnel. Em particular, o monitoramento foi realizado durante a escavação do túnel principal, sendo executada diariamente, como medida de gestão da

segurança. Quatro acelerômetros com uma ressonância de 15 kHz foram inseridos na rocha, no túnel de evacuação até uma profundidade de 1 m. Assim, as medidas obtidas foram adotadas empiricamente para a seleção e o tipo de suporte a ser usado dentro do túnel obtendo-se efetividade dia a dia durante o processo de construção. Entretanto, a adoção de soluções empíricas pode levar ao comprometimento da segurança ao interior do túnel. De outro lado, não é mostrado o processo para validação dos dados experimentais.

No que diz respeito ao trabalho de (LAN; MARTIN; ANDERSSON, 2012), busca-se compreender e prever o dano *in situ* do maciço rochoso frágil, induzido por um carregamento termomecânico acoplado, no entanto, o conhecimento da força aplicada na massa de rocha, a escala da relação entre a caracterização micro estrutural realizada no laboratório e *in situ* são informações necessárias. Projetou-se um experimento para estimar os deslocamentos associados ao processo de falência do pilar, a ser monitorado em vários estágios da coluna de carga. Instrumentos do tipo LVDT foram escolhidos para medir estes deslocamentos radiais, por causa de serem robustos, fiáveis, apresentar alta resolução e podem ser instalados em túneis com presença de água.

A ampla gama de sensores LVDT utilizados foi da *Geometrik Miniextensometer* (www.geometrik.se). O sensor LVDT utilizado, apresenta uma faixa de medição de 40 mm. O sinal de saída é de 4-20 mA, com uma precisão de $\pm 0,025$ mm. Estes sensores também foram calibrados antes e depois da medição com resultados muito semelhantes. O desvio de temperatura para estes sensores foi entre 0,001 e 0,01 mm por °C (0,01 e 0,1 mm para 10°C).

3.2.3 Medição com tecnologia laser

O trabalho de (SCHULZ; LEMY; YONG, 2005) apresenta um estudo de caso em que foi utilizado o scanner a laser, para gravar a geometria de um túnel durante e após a sua escavação. O principal objetivo do trabalho foi avaliar o potencial da técnica para quantificar

com precisão as características geométricas das estruturas geológicas e na determinação do tempo de lapso de mapas de deslocamento de superfície de afloramentos rochosos com alta resolução espacial. Para comparar os resultados, pontos de objeto foram montados com prismas e apurados após cada etapa de escavação usando uma estação topográfica automatizada. A precisão esperada dos dados de deslocamento para a estação topográfica foi utilizada para fornecer um elevado grau de precisão de ± 1 mm, tanto na diferença entre coordenadas como as diferenças dos pontos 3D, enquanto a precisão esperada do varrimento a laser era de 5 mm para as diferenças de coordenadas e 9 mm para as diferenças de ponto de 3D. Os resultados totais da estação topográfica mostram que os deslocamentos dos pontos são relativamente pequenos, na faixa de ± 3 mm. Observando os resultados, conseguiu-se ver que grandes deslocamentos de ± 7 mm foram identificados com varredura a laser.

Revisando o trabalho de (KUHN; PRÜFER, 2014), um deslizamento de terra ativo, afetando uma seção falésia composto da ilha de Rügen na Alemanha, foi investigado e monitorado usando varredura a laser terrestre. Levantamentos semestrais foram realizados no período compreendido entre 2006 e 2011. Utilizaram-se scanners de alta resolução para delinear extensões de deslizamento de terra, monitorar as mudanças espaciais e temporais, e avaliar os processos de perda de massa ao longo da seção do penhasco. O laser de 1.535 nm pode adquirir acima de 2500 pontos por segundo com uma precisão na posição do ponto de estudo de 8 mm numa distância de até 100 m. A fim de garantir o anterior, diversos fatores geradores de erro, determinam que a qualidade dos dados e a precisão possível do campo de investigações são geralmente menores do que as especificações publicadas pelo fabricante. Duas classes de fatores podem afetar o processo de medição. A primeira delas, afeta os dados não processados e se relaciona ao instrumento (por exemplo, a divergência do feixe do laser), o tipo de terreno e condições ambientais no espaço de trabalho. A segunda classe envolve os

fatores que são introduzidos durante o processamento do conjunto de dados, assim como os erros de registro, edição e interpolação espacial.

3.2.4 Medição com o uso de imagens

Segundo (BHALLA *et al.*, 2005), muitos planejadores urbanos estão considerando seriamente espaço subterrâneo para atender as necessidades comerciais, de transporte, residenciais, industriais e municipais de suas cidades. Devido ao seu design e construção exclusiva, eles precisam de um rigoroso monitoramento da integridade estrutural SHM (*Structural Health Monitoring*), o qual executa-se durante a construção e operação, especialmente quando as estruturas fundamentais estão localizadas nas proximidades da superfície do solo. Seu monitoramento contínuo pode servir para mitigar riscos potenciais, garantir um melhor desempenho e facilitar a compreensão profunda do comportamento estrutural global. Este artigo aborda uma análise das tecnologias de sensores disponíveis e métodos de monitoramento, em particular os sistemas de sensores que usam FBG e MEMS. com ênfase especial em condições encontradas no subsolo. Em conclusão, o sistema pode medir deslocamentos com uma precisão de $\pm 10 \mu\text{m}$.

Conforme (GANCE *et al.*, 2014), *Terrestrial Optical Photogrammetry (TOP)* é uma técnica de monitoramento de baixo custo, que é comumente usada em estudos de detecção de deslocamentos. Para o monitoramento de deslizamento de terra, as técnicas de correlação de imagem utilizando sistemas visão estéreo, são frequentemente usadas para gerar modelos digitais de superfície (MDS), e desta forma medir o deslocamento da superfície. A correlação de imagens permite detectar campos de deslocamento espacialmente contínuos a uma precisão no nível de sub pixel. A técnica, contudo, tem várias limitações para avaliar o deslocamento, porque leva em conta sua sensibilidade a mudanças na textura, forma e radiometria em um grupo de imagens, a necessidade de taxas de amostragem espacialmente

regulares, e a demanda de tempo computacional, o que pode impedir o processamento de grandes conjuntos de dados de imagens.

Para lidar com essas limitações, foi proposto um algoritmo para o cálculo do deslocamento de alvos na imagem durante períodos de tempo. O código do algoritmo TDT (*Target Detection Tracking*), foi desenvolvido em *MATLAB*. A precisão do código TDT é avaliada através de um conjunto de várias imagens adquiridas no deslizamento de terra ao sul dos Alpes franceses, e comparadas com as medições baseadas em estações topográficas. A precisão relativa é calculada entre 10^{-3} e 10^{-4} pixels, em distâncias que variam desde 5 cm a até 115 m das câmeras. Embora a abordagem TDT não forneça informações em tempo contínuo, fornece a quantificação dos deslocamentos de objetos e informações das regiões onde a correlação de imagens falharem por causa grandes deslocamentos de terra. Uma análise de sensibilidade revela que as principais fontes de incerteza são o movimento da câmera e/ou distorção da lente que não está considerada dentro do método.

3.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS TRABALHOS RELACIONADOS

A Tabela 2 lista os métodos analisados e compara-os em função do tipo de sensor utilizado, da precisão obtida na medição e da facilidade de calibração dos sistemas. Analisando-se a Tabela 2 pode-se perceber que o uso dos diferentes tipos de sensores está sujeito à inclusão de novas tecnologias para realizar o sensoriamento e aos sistemas que integram os conjuntos de dados. Atualmente, os sensores mais empregados são os extensômetros e acelerômetros, entretanto, pesquisas a respeito do uso de novas tecnologias como o laser e correlação de imagens permitem que os sistemas de instrumentação sejam aplicados para o monitoramento em construções de obras subterrâneas apresentando vantagens tais como: facilidade de calibração e reaproveitamento para novos casos de estudo.

Tabela 2 Trabalhos Relacionados com a Detecção de deslocamento de Maciços Rochosos

Ano	Tipo do Sensor	Precisão	Referência
2001	Extensômetros	Não definida	(PALMSTROM; SING, 2001)
2005	Laser	5 mm	(SCHULZ; LEMY; YONG, 2005)
2005	LVDT	Sujeito ao tipo de transdutor	(BHALLA <i>et al.</i> , 2005)
2006	Câmeras e Laser	Não definida	(GUTIERREZ <i>et al.</i> , 2006)
2006	Extensômetros e método de convergências	0,001mm	(ZHANG, L. Q. <i>et al.</i> , 2006)
2007	Acelerômetros	Aplica-se às vibrações	(HIRATA; KAMEOKA; HIRANO, 2007)
2008	Análise numérica	< 1 mm	(JIA; TANG, 2008)
2011	Extensômetros	< 1 mm	(YIN <i>et al.</i> , 2011)
2012	Sensores de mola	0,025 mm	(YAZDANI <i>et al.</i> , 2012)
2012	Fibra Ótica e Extensômetros	0,5 mm	(LAN; MARTIN; ANDERSSON, 2012)
2012	Análise numérica	Não aplica	(SANADA; SUGITA; KASHIWAI, 2012)
2014	Câmeras e Laser	< 1 mm	(KUHN; PRÜFER, 2014)
2014	Câmeras	0,1-1 mm	(GANCE <i>et al.</i> , 2014)

A Tabela 3 busca resumir as características e vantagens e desvantagens dos principais sensores utilizados em aplicações de medição e monitoramento de deslocamento de maciços. Finalmente, algumas considerações para a escolha de algum tipo de sensor são mostradas e permite-se uma comparação entre os prós e contras de cada um deles.

Tabela 3 Comparação entre os tipos de sensores para estimação de deslocamentos.

Tipo de Sensor	Propósito	Considerações
Extensômetros 1) Extensômetro de fita 2) Extensômetro de furo	Medições da convergência e divergência Medição do deslocamento relativo entre vários pontos Pode-se fornecer a distribuição do deslocamento em grandes volumes de rochas	Podem ser gerados afrouxamentos leves dos pinos de convergência poderia afetar gravemente a precisão da medição.

Tipo de Sensor	Propósito	Considerações
Transdutores de Pressão 1) Tipo Diafragma 2) Baseado em Quartzo	Medição de Pressão Faixa de medições entre 200 e 700 MPa, frequências acima de 10kHz Faixa de medição até 700 MPa, frequências acima de 200kHz	Quando usado em concreto, o encolhimento do betão frequentemente causa problemas.
Acelerômetros	Medição da resposta dinâmica, assim como os harmônicos (vibrações) ou transitórios (terremoto)	Deve-se estabelecer a largura de banda de acordo ao tipo de aplicação, suscetibilidade ao ruído elétrico.
Sensores de Temperatura 1) Tipo Expansão 2) Detectores de temperatura com base em resistência (RTD) 3) Termistor	Medição de Temperatura	Volumoso. A medição de temperatura pode ser automatizada; mas tendem a serem não estáveis próximo ao limite superior. Demanda manter a temperatura constante em um terminal.
Tecnologia Laser	Deslocamento de pontos associados a objetos localizados no perfil de medição.	Custo elevado
Processamento de imagens	Deslocamento tridimensional de pontos ou objetos localizados no perfil do maciço.	Sensibilidade ao ruído ótico. Custo computacional elevado.

4 PROPOSTA PARA O MAPEAMENTO DO DESLOCAMENTO DE MACIÇO EM TÚNEIS

Conforme mencionado no capítulo inicial, este trabalho propõe o uso de um sistema de rastreamento ótico usando marcadores passivos para o monitoramento do deslocamento de maciços em construções subterrâneas. Dentre as características destes sistemas que os qualificam para o uso nas aplicações desejadas destacam-se:

- a) possibilidade de trabalhar em ambientes com pouca luminosidade e poluição, visto que os artefatos são identificados através do uso de câmeras que operam na frequência do infravermelho;
- b) precisão no deslocamento translacional menor a 1 mm a uma distância de 4m;
- c) fácil instalação dos marcadores passivos;
- d) flexibilidade da calibração para espaços de trabalho semelhantes;
- e) análise do deslocamento baseado no método de convergências.

Na Tabela 4, é feita uma análise comparativa das diferentes tecnologias de rastreamento avaliando as diferentes características, tais como, a precisão, a latência, a taxa de amostragem, liberdade de movimento, robustez frente a interfaces e problemas extras que se podem apresentar ao uso de sistemas de rastreamento.

Tabela 4 Tecnologias de Rastreamento (GREFF, 2006).

Tecnologia	Precisão	Latência	Taxa de atualização	Liberdade de movimento	Robustez frente a interfaces	Problemas Extras
	Valor desejado					
	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Nenhum
Eletro magnético	Alta (mm)	Muito baixa (5ms)	Alta (100Hz)	Alta	Baixa (Sensível a metais e fontes de campos eletromagnético)	Volume pequeno de trabalho, não expansível.
Mecânico	Alta (mm)	Baixa (<10ms)	Alta (>100Hz)	Muito baixa	Alta	Volume pequeno de trabalho

Tecnologia	Precisão	Latência	Taxa de atualização	Liberdade de movimento	Robustez frente a interfaces	Problemas Extras
	Valor desejado					
	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Nenhum
Inercial	Média (Erro alto ao crescimento da taxa)	Baixa (<10ms)	Muito Alta	Muito alta	Alta	Erro de posição acumulável a causa da integração e diferença das medidas
Ótico	Média (cm)	Baixa Média (10 a 40 ms)	Média - Alta (50 a 200 Hz)	Média - Alta	Média - Alta	Sensibilidade à luz infravermelha e ruído ótico, vibrações e impactos.
Radio	Média (cm)	Alta (>50ms)	Baixa (A causa da alta latência)	Alta	Média - Alta	---

A partir da análise anterior para cada tipo de tecnologia, pode-se estabelecer que um sistema de rastreamento que utilize sensores óticos não apresenta valores críticos nos fatores avaliados. Para enfrentar o problema do ruído ótico, adotou-se o uso de luz infravermelha para iluminar os objetos a ser reconhecidos pelo sistema.

As modernas tecnologias permitem ainda, além da avaliação dos deslocamentos relativos, a medição dos deslocamentos absolutos, através de métodos topográficos, fundamentalmente eletromagnéticos.

4.1 TÉCNICAS USUAIS PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS

Os principais instrumentos utilizados para medir estados de deformação e deslocamentos que podem levar a colapsos nas obras subterrâneas são:

- a) as convergências no interior do túnel estimadas pela variação da medida de cordas estabelecidas em pontos fixos na parede do túnel (representados na Figura 25 por

C12, C13, C23, C14, C15 e C45). Esta técnica é especialmente apropriada para a detecção dos movimentos de soleira e de assentamento global do túnel, aplicando-se preferencialmente nas zonas de emboquilhamento ou em túneis pouco profundos em meios urbanos.

- b) extensômetros colocados no interior do túnel por diferença de níveis em marcas de referência ou da variação do comprimento de uma grandeza geométrica estabelecida no contorno interior do túnel (representados na Figura 25 por EM1, EM2, EM3, EM4 e EM5).

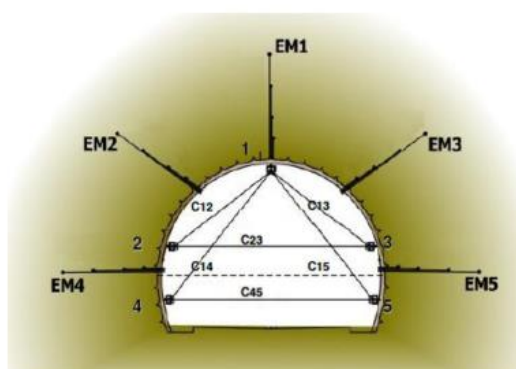


Figura 25 Convergências e Extensômetros no interior de um túnel (MELÂNEO, 2011).

- c) marcas de nivelamento topográfico instaladas na superfície com o objetivo de estimar os assentamentos (representados na Figura 26 por M1, M2, M3, M4 e M5);
- d) extensômetros colocados à superfície em furos de sondagens, medindo-se a diferença de níveis em marcas de referência seladas no interior do terreno (representados na Figura 26 por E1 e E2);
- e) inclinômetros instalados sob o solo, no interior de furos de sondagens (representados na Figura 26 por I1).

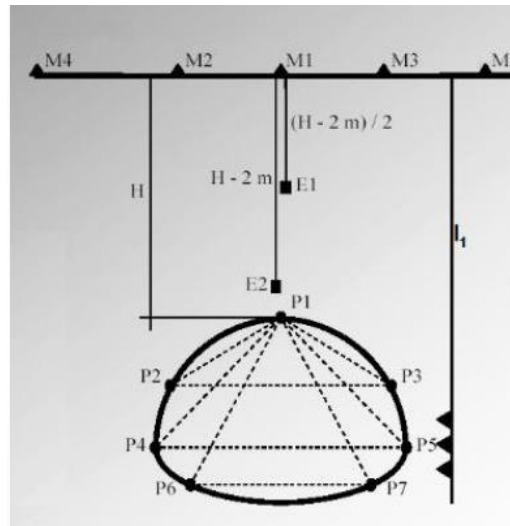


Figura 26 Marcas de nivelamento topográfico, Extensômetros e inclinômetros na superfície de um túnel (MELÂNEO, 2011).

4.2 ABORDAGENS PARA A DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

A grande maioria dos problemas de engenharia geotécnica possui duas abordagens possíveis. A mais utilizada, consiste em definir as características mecânicas do material *in situ* (solo ou rocha) para um determinado espaço (temporário), estabelecida em um período prévio à obra, considerando que não existirão alterações significativas dos parâmetros do maciço definidos inicialmente. Assumindo que o material geotécnico em estudo corresponde a um maciço rochoso, a caracterização das propriedades mecânicas pode ser uma tarefa de elevada dificuldade devido à natureza heterogênea, característica deste tipo de materiais. Neste sentido, a realização de ensaios no laboratório tem limitações, pois seria necessária colher e ensaiar amostras de grandes dimensões para serem representações do maciço em estudo. Além disso, para ter uma amostragem representativa à escala das obras, seria necessário realizar um significativo número de ensaios *in situ* (DA MATA, 2013).

No contexto da mecânica das rochas é fundamental perceber como se processam as variações de tensões nos maciços em estudo. O estado de tensão instalado inicialmente num maciço rochoso pode mudar drasticamente devido a alterações provocadas por intervenções externas, como por exemplo, uma escavação. No caso do dimensionamento de estruturas

subterrâneas, as solicitações a que estão sujeitas dependem de fatores intrínsecos à natureza do meio em que são construídas, contrariamente à generalidade das estruturas, em que as solicitações dependem maioritariamente da sua própria geometria. Por exemplo, a abertura de um túnel num maciço rochoso provoca uma redistribuição de tensões na zona de abertura, que, no caso da análise de tensões iniciais serem mal avaliada, pode conduzir à rotura. (HUDSON; HARRISON; POPESCU, 2002).

4.3 ESCOLHA DA TÉCNICA DE MEDIÇÃO E ESTIMAÇÃO DO DESLOCAMENTO DE MACIÇO

Dentro das técnicas utilizadas para estimar o deslocamento do maciço em túneis, a técnica de medição de convergências com o uso de instrumentação tem aplicação, permitindo um processo simples, econômico e rápido. Este método permite a obtenção de informação dos deslocamentos relativos de contração ou expansão do perímetro do túnel, como mostrado na Figura 27, o que ajuda a ter informações sobre o comportamento dos sistemas de suporte (NASCIMENTO BASTOS, 1998).

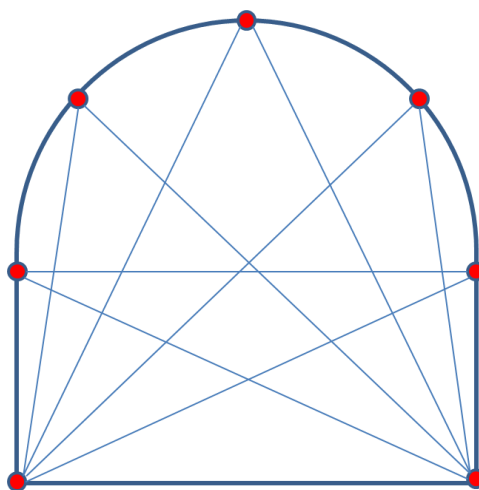


Figura 27 Seções possíveis de medição de convergências.

Implementa-se um equipamento de monitoramento, baseado num sistema de visão estéreo, para o rastreamento de artefatos que estão instalados em pontos estratégicos no perfil do túnel, como é ilustrado na Figura 28. O sistema é composto por duas câmeras com flash

infravermelho, que permitem detectar artefatos, os quais estão formados por um conjunto de marcadores passivos com material refletivo como mostrado na Figura 29. Os artefatos serão reconhecidos e identificados, permitindo-se a extração de informação da posição de sua distribuição no espaço tridimensional, e assim, realizar a análise do deslocamento desses pontos pelo método de convergências. Desta forma, busca-se oferecer um sistema de monitoramento que utiliza informação a partir de imagens monocromáticas em 2D podendo-se obter a posição em 3D dos pontos para estabelecer informações da estabilidade do túnel durante e após sua construção.

Não obstante, o sistema poderá rastrear artefatos numa distância de até 4m, pelo qual torna-se necessário, o traslado físico deste sistema ao longo do túnel, para posteriormente, com os dados coletados, realizar um perfil tridimensional que permita estabelecer a deformação do perfil ideal do túnel.



Figura 28 Instalação do Sistema ao Interior do Túnel.

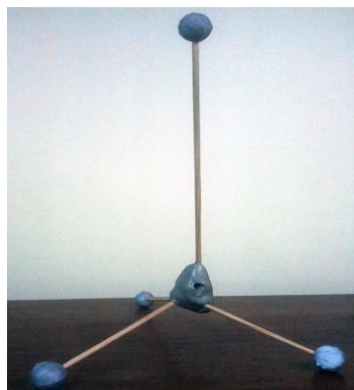


Figura 29 Artefato composto por marcadores passivos.

Como foi definido durante a motivação e o objetivo deste trabalho, busca-se estabelecer a condição de estabilidade do túnel durante e após a construção. Entretanto, o sistema de rastreamento está limitado ao volume de trabalho (espaço tridimensional onde são rastreados os artefatos), para tanto, o protótipo do sistema deverá ser transladado ao longo do túnel em seções de 4 m cada, da forma como se mostra na Figura 30. Assim, no final, poderá se reconstruir o perfil do túnel a partir do conjunto de dados armazenados durante o monitoramento.

O sistema de rastreamento ótico deve identificar seis graus de liberdade da posição do centro do artefato, e desta forma obter as informações das convergências entre os pontos do perfil.

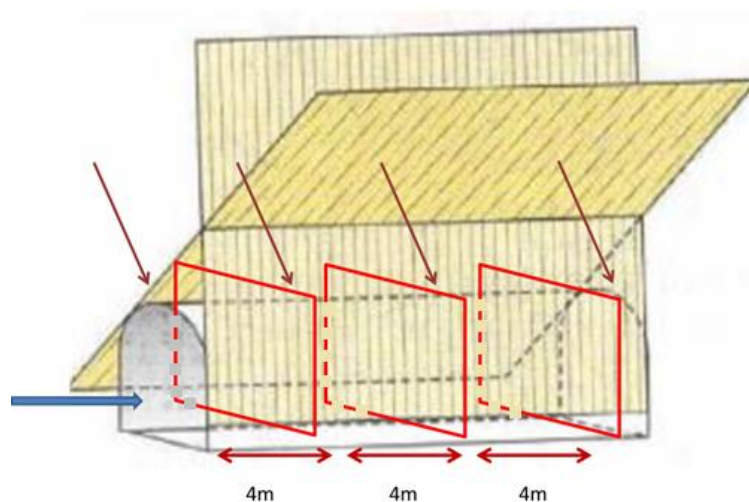


Figura 30 Seções para medição ao longo do túnel.

Deve-se destacar que os artefatos instalados devem apresentar diferentes geometrias entre eles, a fim de garantir o reconhecimento do objeto associado a um ponto específico do perfil do túnel. Na Figura 31, exibe-se uma das configurações possíveis de instalação de artefatos (compostos por marcadores passivos), da qual, pode-se obter as coordenadas 3D do centro do objeto, e a posteriori, estabelecer as diferenças de deslocamento entre estes pontos. O procedimento para capturar o deslocamento dos artefatos por meio de um sistema estéreo de visão estéreo será abordado nas seções seguintes.

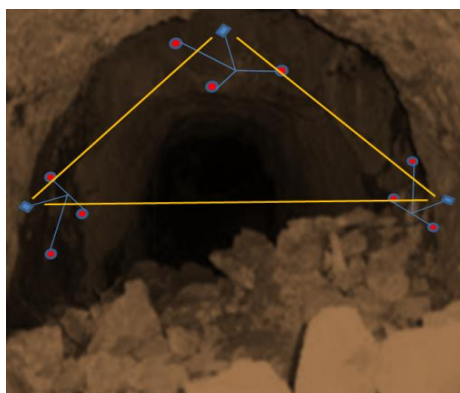


Figura 31 Artefatos instalados em três pontos do perfil do túnel.

4.4 CARACTERÍSTICAS E LIMITAÇÕES DO SISTEMA

A seleção desta proposta está ligada às características referentes à construção, à metodologia para estabelecer deslocamentos descrita na seção anterior, e ao meio no qual pretende-se realizar o monitoramento, permitindo ao sistema adaptabilidade aos diversos perfis de obras subterrâneas. Em túneis pouco profundos, torna-se importante uma análise da correlação entre os valores, as datas e o tempo da medição das convergências, essencialmente quando as obras estão localizadas em zonas urbanas, sobre estruturas sensíveis ou baixas condições desfavoráveis do maciço. Tendo em conta isto, o SRO deve ter algumas propriedades técnicas específicas para a sua implementação, tais como:

- a) espaço de operação: espaço tridimensional no qual pode-se reconhecer um artefato e detectar os movimentos de translação, assim como a rotação de cada um dos seus eixos sobre se mesmos. Define-se um espaço de trabalho de 48 m³;
- b) robustez frente a interferências: razões de confiabilidade das medidas frente a condições ambientais e da construção, durante e após o projeto de túneis;
- c) diferença da medição: Segundo o VIM 2012, calculada como a diferença entre as medições (distância ou ângulo do objeto rastreado) obtidas pelo sistema e os valores determinados por um sistema de referência expressado por:

$$Diferença = \frac{1}{N} \sum_N |valor_{medido} - valor_{real}| \quad (39)$$

Onde N é o número total de medições e valor é o valor da orientação ou posição medido.

Teoricamente o sistema de rastreamento tem três valores de precisão para posição (x, y, z) e três orientações (*pitch*, *yaw*, *roll*);

- d) precisão: Segundo o VIM 2012, definida como o grau de concordância entre os valores medidos, obtidos por medições repetidas do mesmo objeto e sob condições especificadas. Esta é expressa como o desvio padrão das medições de posição ou o de orientação, esperando-se uma precisão menor a 1 mm;

$$Precisão = \sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_N (valor_{medido} - \mu_{erro})^2} \quad (40)$$

- e) resolução: é a menor variação na posição ou orientação de um objeto que pode ser detectada pelo sistema, esperada em 1 mm para o deslocamento de cada eixo;
- f) taxa de amostragem: quantas vezes por unidade de tempo o sistema prove novas informações de posição ou orientação;
- g) latência: duração de tempo do sistema contado desde a mudança da posição ou orientação atual do rastreador de objetos até a última mudança reportada pela saída

do sistema, ou seja, o tempo que o sistema de medição leva para calcular um novo dado de posição ou orientação.

Por outro lado, as características físicas das lentes utilizadas para capturar as imagens a ser analisadas, determinam uma relevante limitação referente ao espaço de trabalho, o qual estabelece o volume para localização dos artefatos, a distância entre as câmeras e também o tamanho dos marcadores a ser utilizados. As câmeras deverão ser localizadas sobre uma superfície estável, para evitar erros nas medições por causa de vibrações e deslocamentos dentro do túnel, que possam afetar a origem do sistema de coordenadas 3D do espaço. Outro aspecto a ser considerado diz respeito à calibração das câmeras, que abrange os parâmetros intrínsecos e extrínsecos delas. Estes parâmetros tem uma importância relevante na detecção e cadastramento de objetos, assim como, a precisão com a qual é estimado o deslocamento deles.

4.5 ESTRUTURA DO SISTEMA DE VISÃO ESTÉREO

O sistema proposto divide-se em dois grandes blocos, necessários para a aquisição de imagens e para o processamento das mesmas, como se observa na Figura 32, destacando-se uma divisão entre hardware e software. Neste sentido, obtém-se a informação da posição em 3D dos artefatos rastreados. Os algoritmos e as equações não lineares utilizadas para o processamento da imagem tornam a implementação do software bastante complexa.

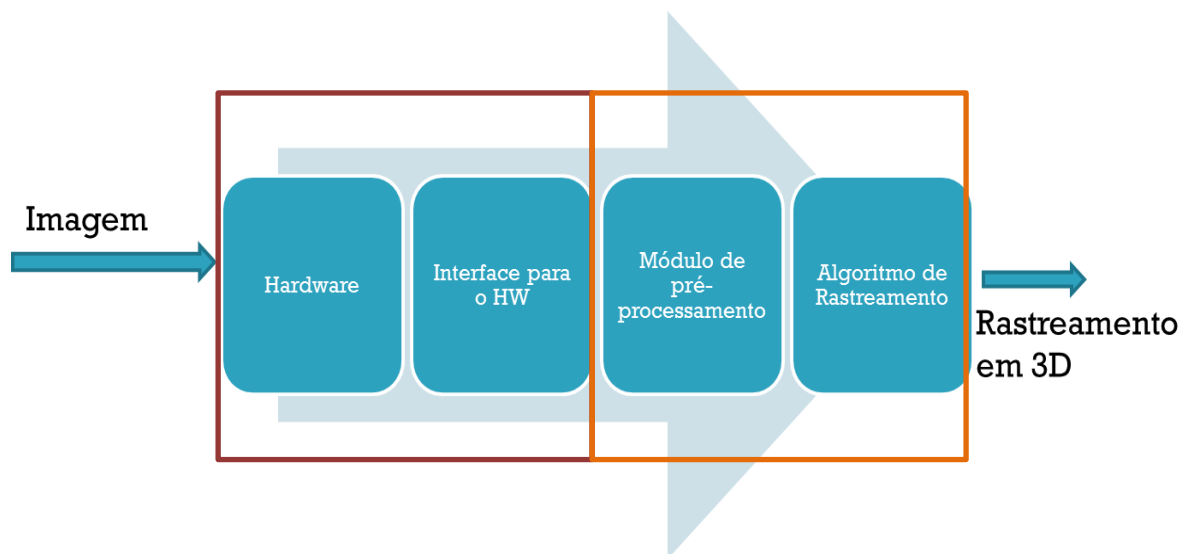


Figura 32 Arquitetura do Sistema de Rastreamento com Visão Estéreo.

4.5.1 Módulos de Hardware

O hardware do sistema está composto por duas câmeras monocromáticas apresentadas na seção 4.5.1.2, duas placas com conjuntos de LEDs infravermelhos (realizando a função do flash), o módulo da conexão do sinal de disparo para sincronismo de aquisição e computador para processamento de dados.

4.5.1.1 Marcadores Passivos

O sistema de rastreamento ótico faz uso de marcadores passivos com materiais retro reflexivos, que são fixados no corpo do artefato. As câmeras desenvolvidas para esses sistemas são equipadas com LEDs (diodos emissores de luz – *light emitting diodes*) que emitem luz infravermelha. Parte dessa luz é refletida pelos marcadores e absorvida de volta pela câmera. A iluminação infravermelha em conjunto com o material altamente reflexivo dos marcadores e os filtros de luz integrados às câmeras (que deixam passar apenas o infravermelho) possibilita que os marcadores apareçam em alto contraste nas imagens capturadas. Isto torna possível a detecção dos marcadores nas imagens com menor custo computacional e com maior precisão, o que aumenta a qualidade dos dados tridimensionais reconstruídos a partir dessas imagens (GUTEMBERG, 2005).

O tamanho e o formato dos marcadores dependem principalmente do tamanho do volume de captura, da resolução das câmeras e do tipo de movimento a ser capturado. Marcadores esféricos com 1,6 cm ou mais de diâmetro são comumente empregados na captura de movimentos onde tem se espaços de trabalho acima de 1 m^3 , enquanto marcadores esféricos com aproximadamente 3 ou 4 mm de diâmetro, são utilizados na captura de movimentos em espaços menores a 1 m^3 (GUTEMBERG, 2005). Desta forma, para esta proposta, confeccionaram-se marcadores de 2 cm de diâmetro, envolvidos com matéria refletivo de acordo com a Figura 33.



Figura 33 Marcador passivo com diâmetro de 2 cm.

4.5.1.2 Câmeras monocromáticas

O sistema tem duas câmeras de vídeo digitais monocromáticas como apresentado na Figura 34. Cada câmera tem 752×480 pixels de resolução e tem uma faixa de captura de até 86 quadros por segundo. Uma das características importantes que apresenta este tipo de câmeras é o disparo global (*Global Shutter*), o qual permite capturar movimentações rápidas de objetos. Em adição, estas câmeras possuem um sistema embarcado, que facilita o sincronismo na aquisição de imagens, isto, por causa de processar e gerar um sinal de disparo. O modelo escolhido UI-1220SE-M-DL USB2.0, é uma família de câmeras de baixo custo, extremamente compactas para uso profissional em automação, controle de qualidade e tecnologia de segurança. Através da conexão USB 2.0, as câmaras podem ser interligadas com uma variedade de sistemas, sob sistemas operacionais como Windows e Linux.



Figura 34 Câmera monocromática IDS [<http://en.ids-imaging.com/store/produkte/kameras/usb-2-0-kameras/ueye-se/ui-1220se.html>].

Nas câmeras uEye da IDS é usado um conector de cabo USB do tipo Sub-D como apresentado na Figura 35. Os quatro pinos marcados pelos números 1, 5, 6 e 9 correspondem à porta USB universal, sendo os pinos adicionais utilizados para os sinais da entrada e saídas digital da câmera.

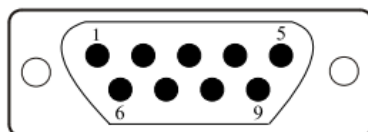


Figura 35 Conector IDS Sub-D (9 pinos) [http://en.ids-imaging.com/manuals/uEye_SDK/EN/uEye_Manual/index.html].

Não obstante, a largura de banda definida para este tipo de conector garante uma comunicação livre de erro entre as câmeras e o computador, sendo limitada a 416MBit/s. Em teoria, a porta USB2.0 pode transmitir acima da taxa de 50 MB/s. Na prática, um desktop-PC de alto desempenho pode transmitir cerca de 40MB/s, contrário à maioria dos notebooks ou sistemas embarcados, que transmitem a uma taxa menor que 40MB/s.

4.5.1.3 Lentes

Adquiriu-se duas lentes FUJINON TV DF6HA-1B, cujas especificações apresentam-se na Tabela 5, nas quais, deve-se destacar os ângulos de visão que definem o volume de

trabalho para cada câmera, de acordo com a Figura 36. Já no sistema de visão estéreo, o volume de trabalho será a interseção entre os volumes de cada câmera.

Tabela 5 Especificações das lentes.

Comprimento focal	6 mm
Diâmetro da íris	F/4
Foco	Manual
Ângulo de visão horizontal	56° 09'
Ângulo de visão vertical	43° 36'

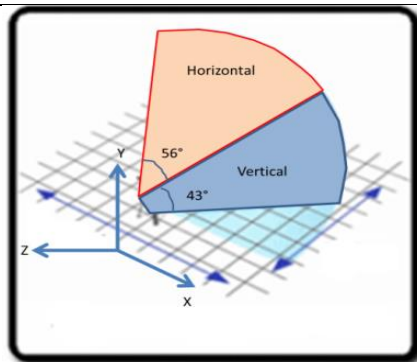


Figura 36 Ângulos de visão das lentes.

4.5.1.4 Módulo de LEDs

Para a construção do módulo flash, utilizou-se como base o sistema BraTrack (PINTO; BUAES; FRANCO, 2008), utilizando componentes SMD, atingindo exigências atuais para o desenvolvimento de protótipos eletrônicos. Busca-se ter a maior quantidade de LEDs e sob distintas intensidades, para analisar o efeito da luminosidade na detecção de marcadores que pertencem ou não a cada um dos artefatos. A Figura 37 apresenta uma foto do sistema desenvolvido, onde pode-se identificar o grande número de LEDs (total de 250) ao redor da lente, visando a emissão de um flash uniforme para todo o ângulo de captura da câmera.



Figura 37 Placa e carcaça projetada para o módulo flash.

Procura-se cobrir a maior área possível entre o campo comum de visão das duas câmeras, sem perder a precisão na detecção da posição de artefatos, e também, enfrentar problemas de luminosidade, poeira, ruído ótico que podem-se encontrar ao interior de construções subterrâneas, pelo qual adopta-se o uso de LEDs infravermelhos com largura de onda de 850nm, e sua ativação será realizada pela saída digital de disparo em cada câmera.

Projetou-se o circuito esquemático da cadeia dos LEDs, o qual está organizado em quatro grupos, tendo-se um total de 250 LEDs infravermelhos para cada câmera. Cada sequência contém 15 LEDs infravermelhos em série e tem uma queda de tensão total em torno de 22.5V. Na Figura 38, é mostrada a plataforma do Altium Designer Summer 9, software no qual foi projetada a placa eletrônica.

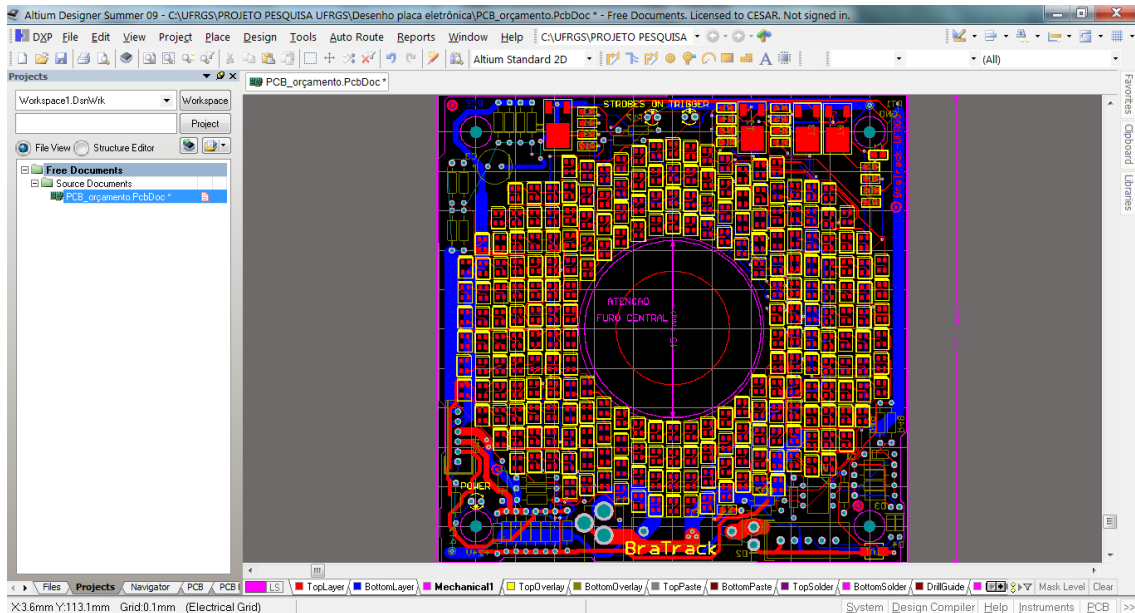


Figura 38 Projeto da placa eletrônica.

As dimensões da placa foram fixadas em 120 mm x 120 mm, para poder distribuir de forma uniforme os LEDs no contorno da lente da câmera. Para futuras melhoras e diminuição do espaço ocupado pela placa dos protótipos, desenvolveu-se os pads para cada equipamento: LEDs infravermelhos, optoacoplador, resistores, capacitores, etc.

Para regulação da intensidade do brilho do LED infravermelho é usada uma chave rotativa, com cinco posições. Diferentes divisores de tensão foram configurados em cada posição da chave rotativa, variando os valores de corrente nos LEDs.

4.5.1.5 Sinal de disparo para o sincronismo entre as câmeras

Para gerar o sinal de disparo da captura da imagem, ou melhor, o sinal que permite sincronizar a aquisição das imagens, configuram-se duas entradas digitais que são isoladas no circuito por um acoplador óptico. Utilizou-se um diodo zener, para grampear e garantir a tensão máxima projetada no pino ânodo do optoacoplador. Na Figura 39, apresenta-se o esquema de entradas digitais.

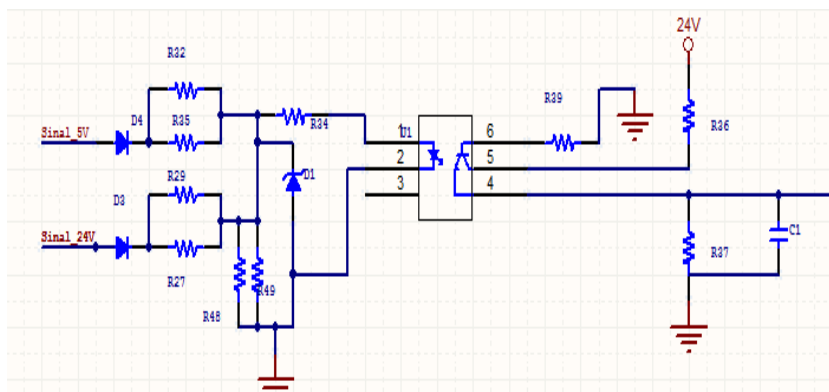


Figura 39 Esquemático das entradas digitais.

A fim de atingir uma melhor calibração do sistema baseada na melhora do sincronismo de aquisição de imagens, uma configuração mestre-escravo pode ser configurada com a conexão física dos sinais de entrada e saída entre as câmeras. Com este sinal pretende-se estabelecer o estado de espera e exposição de uma imagem. Pode-se configurar através de um sinal na entrada digital da câmera ou via software através da interface USB. O quadro de amostragem depende do tempo de exposição da imagem. Dois modos do sinal de disparo são possíveis: o primeiro baseia-se num disparo simples, sendo que após a ocorrência deste sinal uma imagem é capturada e posteriormente transmitida, o segundo é associado a um disparo contínuo onde as imagens tem que ser requeridas e sincronizadas individualmente.

Esta conexão é realizada por um cabo do tipo par trançado, que liga o sinal de disparo da saída de uma câmara com a entrada de sinal de disparo da outra como é mostrado na Figura 40. Assim, as câmeras se configuram no modo mestre-escravo. Adicionalmente, o sistema pode operar em outras duas configurações, uma delas onde as câmeras são escravos e são sincronizadas por meio de um sinal externo, e a segunda, onde nenhum sinal é utilizado para a sincronização, o qual geralmente compromete a precisão e confiabilidade do sistema. A ativação dos módulos de LEDs depende da ligação de saída adequada de terminais internos de cada câmara.

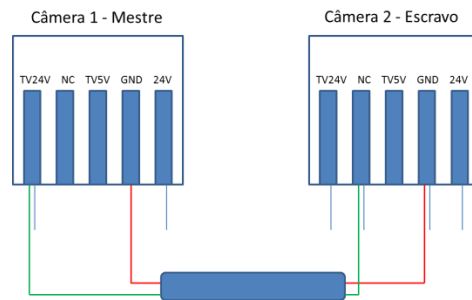


Figura 40 Configuração mestre-escravo do Sistema por hardware.

4.5.2 Módulos de Software

O software de rastreamento deverá reconhecer artefatos e as suas respectivas poses (posição e orientação), definidos como um conjunto de marcadores esféricos refletivos à região infravermelha. Dispõe-se então, de uma biblioteca chamada *BraTrackLib.lib* obtida do trabalho (PINTO; BUAES; FRANCIOSI, 2008), desenvolvida em C++ com uso da ferramenta Visual Studio 2005. O software baseia-se em módulos com orientação a objetos como ilustrado na Figura 41, e desenvolvido sobre a plataforma Windows. Entretanto, o software permite o sincronismo da aquisição de imagens de duas câmeras, o processamento da imagem para identificação dos marcadores, a correspondência da posição 3D dos marcadores, a reconstrução tridimensional da posição de cada um dos marcadores do artefato, a detecção da pose do artefato, o gerenciamento da inclusão e validação de artefatos.

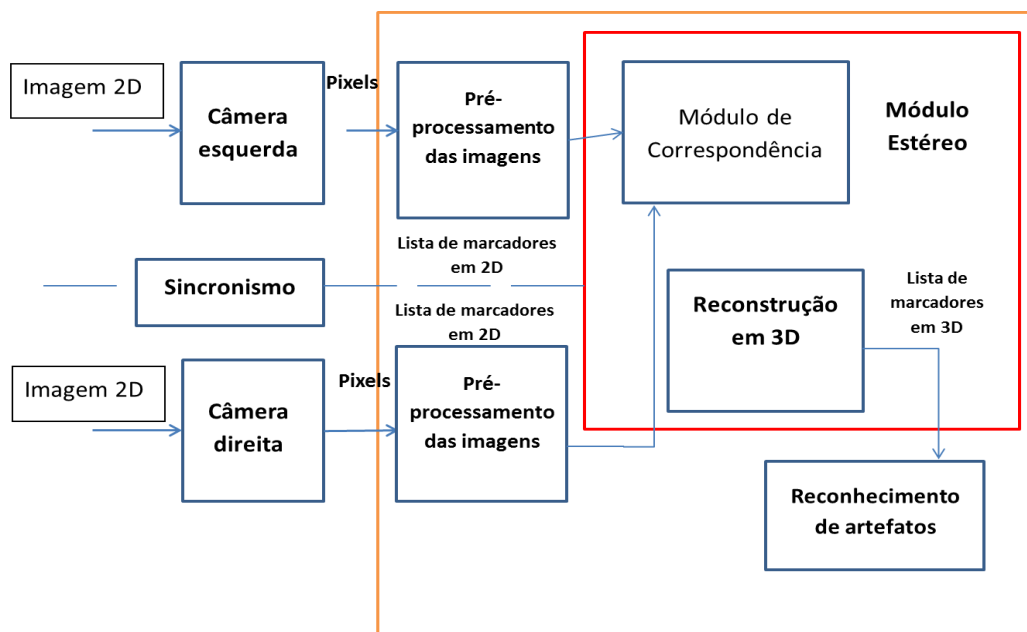


Figura 41 Diagrama de Módulos da Estrutura Interna.

4.5.2.1 Módulo da Câmera

Neste módulo, os parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos durante a calibração das câmeras, são usados na identificação das coordenadas em 2D dos marcadores reconhecidos que por sua vez, são projetadas nas coordenadas do plano da imagem para posteriormente serem transmitidas ao módulo de correspondência de 3D. O número de instâncias deste módulo está sujeito ao número de câmeras utilizado, que no caso de visão estérea, são necessários dois módulos. A comunicação entre os módulos baseia-se no protocolo UDP (*User Datagram Protocol*), transmitindo-se pequenos pacotes com a lista das posições dos marcadores. Segundo a seção 2.1.1.2, para estabelecer as relações entre os pontos projetados da imagem, foi modelada a geometria de uma câmera de perspectiva ou do tipo pinhole.

4.5.2.2 Módulo Estéreo

O módulo de correspondência utiliza geometria epipolar segundo a seção 2.1.3 para estabelecer a correspondência entre as projeções dos marcadores das imagens capturadas pelas câmeras. Esse módulo lê os dados dos módulos de câmera, pela memória compartilhada e é responsável pela identificação de quais das projeções do marcador em cada uma das

câmeras, correspondem ao mesmo marcador. Este módulo gera uma lista de pares das projeções dos marcadores correlacionados e também uma lista de marcadores projeções cuja correlação não pôde ser estabelecida. O módulo de correspondência comunica-se com o módulo de reconstrução 3D por meio de memória compartilhada.

As equações de projeção dos pontos em cada um dos planos da imagem para cada câmera, implementam-se da forma como foi apresentado na seção 2.1.3.4.2. Este tipo de reconstrução foi utilizada por estabelecer um mapeamento entre os pontos detectados pela imagem de cada câmera, e assim, restringir o reconhecimento de falsas correspondências entre pontos, que possam reduzir a precisão do sistema.

4.5.2.3 Módulo de Reconhecimento de Artefatos

Com este módulo estabelece-se a correspondência entre os conjuntos de marcadores identificados no espaço 3D e os dados já conhecidos das poses dos artefatos que se encontram na base de dados “ArtifactDataBase.xml”. A biblioteca utilizada faz o uso de algoritmos de minimização de erro para obter um melhor encaixe entre o conjunto de marcadores em 3D e os artefatos presentes, ajudando também na rapidez para identificá-los.

4.5.2.4 Módulo de Sincronismo

Ao conectar as câmeras no hardware pela configuração mestre-escravo, a finalidade do módulo software de sincronismo, foca-se no controle interno da aquisição de imagem de cada câmera. Não obstante, é importante destacar que na configuração mestre-escravo, pode-se apresentar uma diminuição na taxa de aquisição, no tempo de exposição da imagem e a latência do sistema.

4.5.2.5 Gerenciamento de Artefatos

Neste módulo compilam-se todos os módulos descritos anteriormente para salvar a distribuição espacial de artefatos, criando uma base de dados com a respectiva identificação,

esta base utiliza fontes XML para realizar esta tarefa. Desta forma, é possível analisar trajetórias e deslocamentos dos objetos identificados.

4.6 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Pretende-se obter uma configuração dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras que permitam cadastrar e reconhecer artefatos, para tanto, métodos de calibração foram adotados e estudados. Definiram-se dois estágios para realizar a calibração do sistema, o primeiro para obter os parâmetros intrínsecos de cada câmera utilizada, e o segundo, para definir os parâmetros extrínsecos e de relação geométrica entre as câmeras. Nesta segunda etapa, se faz uma calibração estática e dinâmica, para definir a origem do sistema de coordenadas no espaço do sistema. Segue embaixo uma descrição mais detalhada dos estágios comentados.

4.6.1.1 Módulo de Calibração

Neste módulo soluciona-se um sistema de equações para calcular os parâmetros das câmeras, para tanto, utiliza-se um software livre chamado OpenCV, o qual tem algoritmos de calibração. O resultado deste módulo é apresentado em um arquivo XML com as informações dos parâmetros intrínsecos das câmeras, os coeficientes de distorção da imagem, os parâmetros extrínsecos e a relação da geometria espacial entre as câmeras. A calibração é realizada uma por cada câmera no caso dos parâmetros intrínsecos, usando o mesmo padrão de calibração, e de forma paralela para os parâmetros extrínsecos.

4.6.1.2 Calibração Intrínseca das câmeras

Para realizar a calibração dos parâmetros intrínsecos de cada câmera, implementa-se uma interface ilustrada na Figura 42, implementada com o uso de Visual Studio 2005, na plataforma de Windows 7 Professional Service Pack 1.

A técnica proposta por (ZHANG, Z.; WAY, 1999; ZHANG, Z., 2000) requer apenas que a câmara observe um padrão de calibração plano, com diferentes orientações. O movimento não precisa ser conhecido, somente a localização dos marcadores deste padrão. A abordagem proposta encontra-se entre o tipo de calibração fotogramétrica e de auto calibração, em função de utilizar métricas em 2D, em vez de 3D. Em comparação com as técnicas clássicas, a técnica implementada é consideravelmente mais flexível. Em comparação com a auto calibração, ganha considerável grau de robustez.

Utilizou-se as fontes do OpenCV como utilizado em (ZHANG, Z.; WAY, 1999) e (ZHANG, Z., 2000), o qual refere-se às posições em 2D de cada um dos marcadores detectados os quais são comparados com os marcadores contidos num arquivo XML referente ao padrão de calibração. Utilizou-se um padrão de calibração de 8 marcadores reflexivos com diferentes coordenadas x, y e z, ilustrado na Figura 43. Assim, deve-se realizar movimentos de translação e rotação do padrão de calibração dentro da área de trabalho das câmeras.

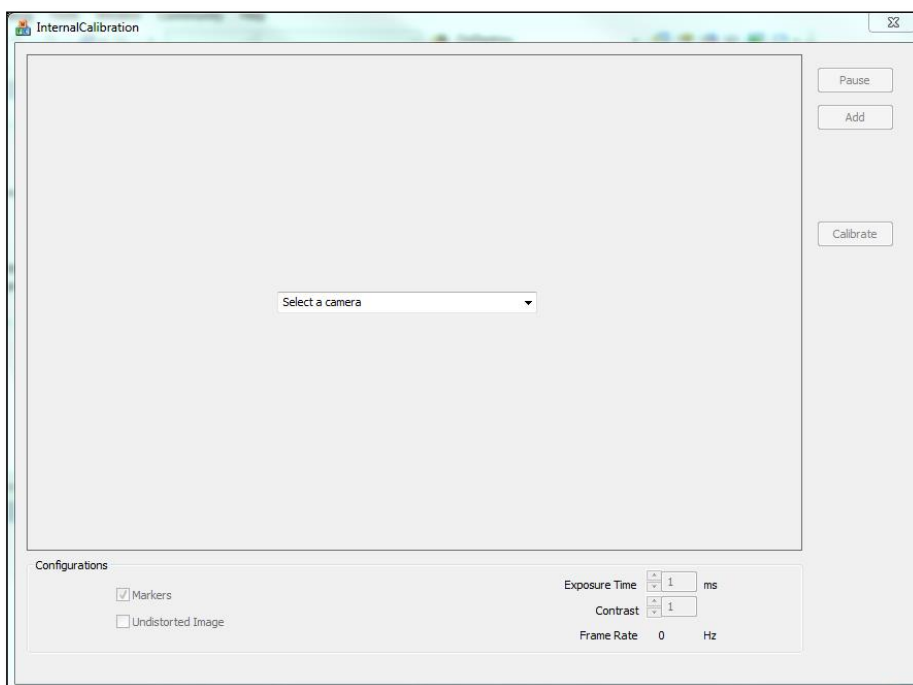


Figura 42 Interface para calibração dos parâmetros intrínsecos de cada câmara.

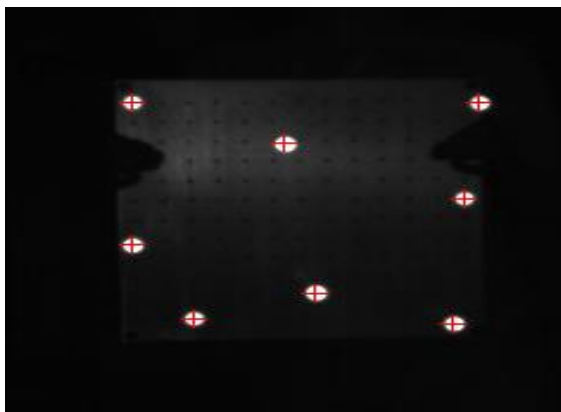


Figura 43 Imagem da interface de calibração interna (8 marcadores padrão).

É possível visualizar na Figura 44 a importância de considerar a distorção radial da imagem, no reconhecimento de marcadores, uma vez que no instante de calibração os centros (na cor vermelho) são traçados a partir da informação do padrão de calibração. Segundo o ângulo de inclinação do padrão de calibração visualizado pelas câmeras, aumenta ou diminui a distorção, entretanto, só a distorção radial foi considerada para este estudo de caso.

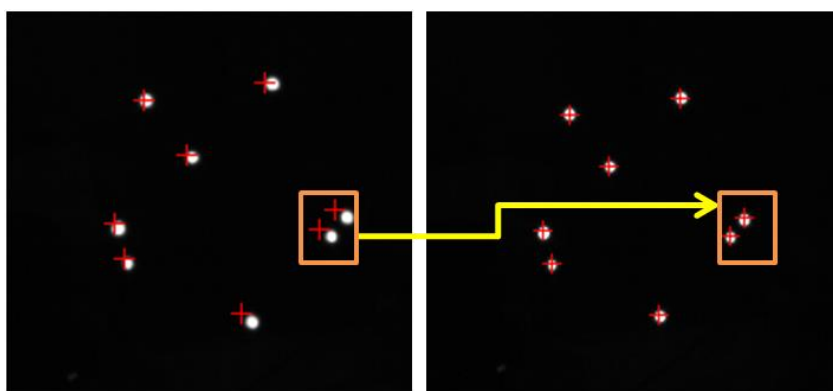


Figura 44 À esquerda imagem com distorção, à direita sem distorção.

4.6.1.3 Calibração Extrínseca

A calibração dos parâmetros extrínsecos deve ser realizada no espaço onde as duas câmeras tenham visão, verificando-se com a janela da interface a qual demonstra o número de marcadores vistos por cada câmera, sendo que este número deve ser igual nas duas câmeras. No primeiro passo, faz-se uso de um padrão de calibração conforme a Figura 45, para definir a origem do sistema de referência definindo-se a orientação para os eixos x, y e z de todo o espaço tridimensional.

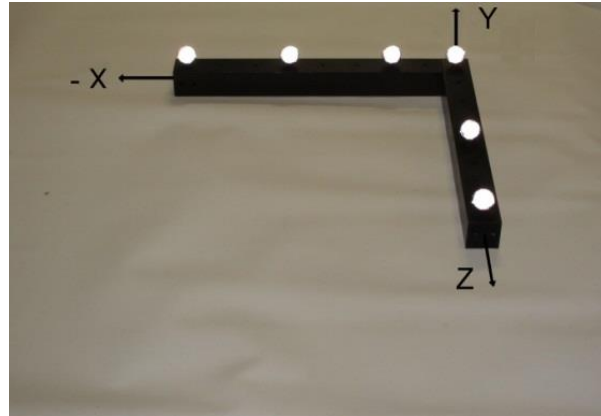


Figura 45 Padrão de calibração estático.

No segundo passo, outro padrão de calibração como ilustrado na Figura 46 é usado, para determinar a relação geométrica entre as câmeras. Caso não haja erro, o quadro de referência é calibrado e os parâmetros de transformações geométricas são estimados.



Figura 46 Padrão de calibração espacial.

4.7 ESPAÇO DE TRABALHO

Denomina-se espaço de trabalho o volume onde pode-se movimentar e detectar artefatos. Neste espaço, as duas câmeras podem capturar o mesmo número de artefatos e desta forma, a correspondência de informações entre as duas câmeras terá um melhor resultado.

Uma simulação foi realizada para estimar as áreas associadas à variação do ângulo horizontal das lentes em relação à linha de visão da câmera, assumindo-se que o artefato a ser rastreado encontra-se na linha central do local. Três orientações do ângulo horizontal de cada

câmera foram configuradas, com variação de 20° da linha central de visão de cada câmera. Na Figura 47, observa-se o incremento da área de trabalho, conforme é variado o ângulo horizontal, ou seja, quanto mais adjacente seja a posição da câmera ao artefato, maior será a liberdade que ele possa ter dentro do local.

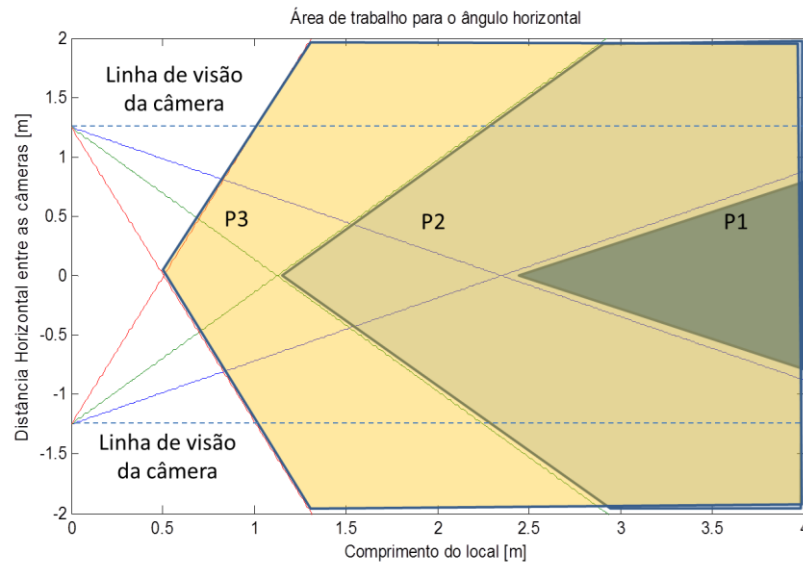


Figura 47 Área de trabalho para o ângulo horizontal das lentes.

Essas variações de orientação das câmeras relacionam-se com a mudança da orientação da carcaça do protótipo de cada câmera. Para isto, se projetou um suporte com o objetivo de ter um manejo controlado dos ângulos de captura das câmeras. Este protótipo foi desenvolvido no software *SolidWorks 2010*. Na Figura 48 e Figura 49, são mostradas as peças que permitem realizar variações nas angulações vertical e horizontal, em uma faixa de 0° a 180° , respectivamente.

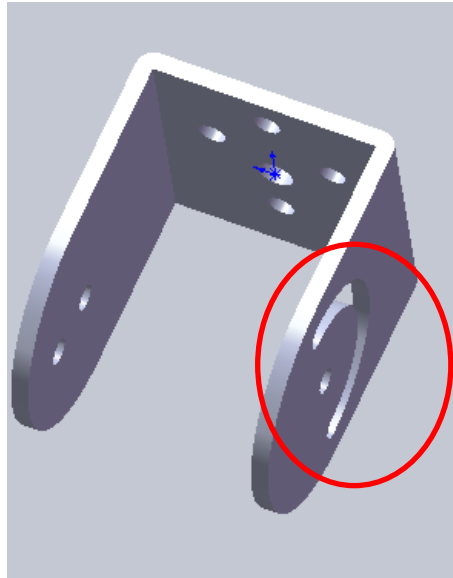


Figura 48 Peça para variação do ângulo vertical.

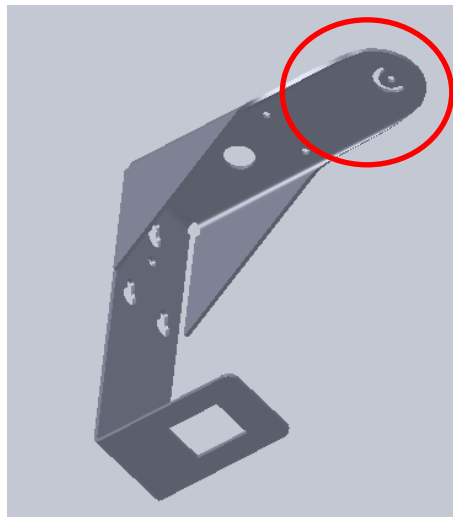


Figura 49 Peça para variação do ângulo horizontal.

4.8 CADASTRAMENTO E RECONHECIMENTO DE ARTEFATOS

Torna-se necessário definir algumas características geométricas para os artefatos, que garantam sua detecção. Estes necessitam ser construídos de forma que os marcadores não gerem ambiguidades nas distribuições espaciais. O sistema implementado não permite o uso de artefatos que são muito semelhantes a outros artefatos ou têm geometria ambígua. Uma vez que um artefato pode ser reconhecido por um subconjunto de pelo menos três dos seus

marcadores, cada subconjunto de três marcadores de um artefato deve ser suficientemente diferente de todos os subconjuntos de três marcadores de outros artefatos.

A geometria válida é aquela que não contém nenhum ponto ambíguo na distribuição geométrica, tal como um triângulo escaleno como ilustrado na Figura 50, o que é uma geometria válida. Todos os lados do triângulo têm comprimentos diferentes. O sistema pode facilmente distinguir entre AB, AC ou BC.

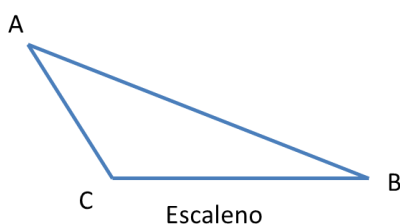


Figura 50 Geometria do triângulo escaleno, artefato válido.

Uma geometria inválida é apresentada na Figura 51, esta geometria, é aquela que contém pontos ambíguos na sua distribuição, tal como um triângulo equilátero ou de um triângulo isóscele. Em um triângulo equilátero, o sistema não pode distinguir entre AB, AC ou BC. Em triângulo isóscele, o sistema não pode distinguir entre AB e AC.

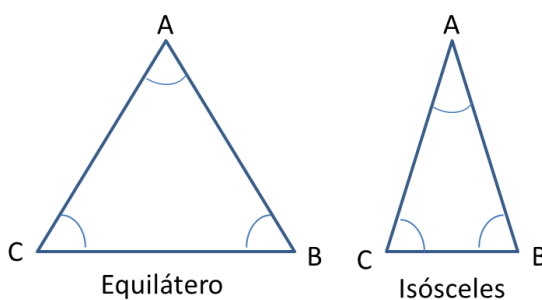


Figura 51 Geometria não válida para o artefato.

O processo de cadastramento do artefato tem como objetivo analisar a distribuição geométrica dos marcadores que compõem o artefato. O tempo destinado para esta tarefa foi estabelecido em 15 s, no qual, o artefato deve ser submetido a movimentos rotacionais e de translação, onde são capturadas diversas imagens do artefato, a fim de gerar uma variedade de posturas para calcular a distância entre cada um dos marcadores que o compõem. Na Figura

52 é mostrada a janela ao final do processo de cadastramento, onde visualiza-se o número total de posturas capturadas, e o número de posturas válidas (geometria não ambígua). Quanto maior seja o número de posturas validas, mais fácil será o reconhecimento durante o rastreamento. Neste sentido, a orientação do artefato que pode ser reconhecida está ligada ao número de posturas validas cadastradas.

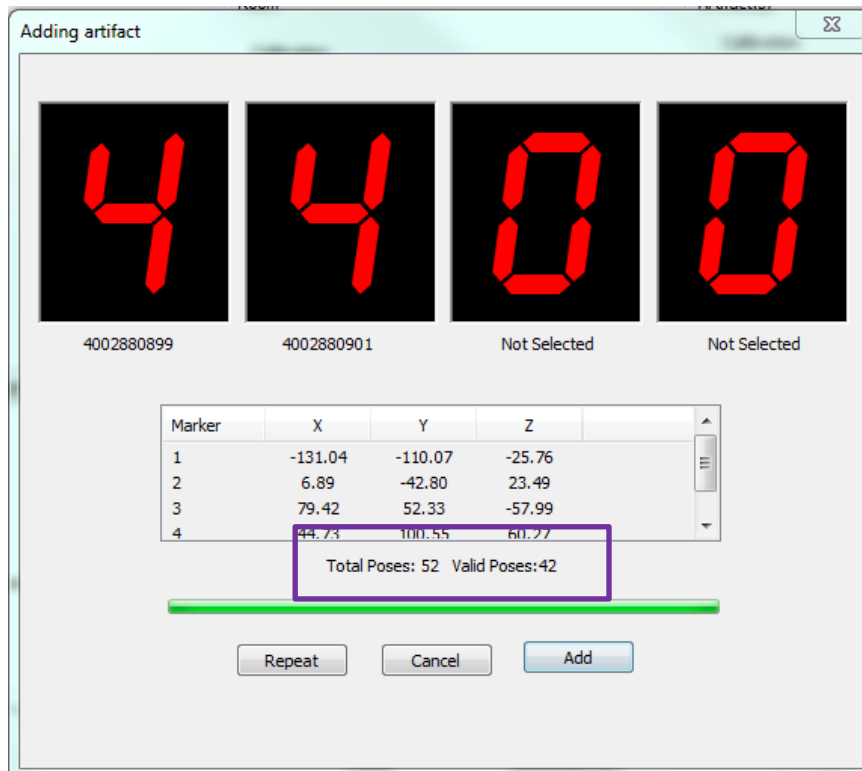


Figura 52 Artefato de 4 marcadores cadastrado.

4.9 REGISTRO E RASTREAMENTO DE ARTEFATOS

Primeiramente, os artefatos utilizados para a detecção do deslocamento devem ser cadastrados, armazenando as distintas poses que este possa ter no espaço tridimensional. Com isto, garante-se que pontos ambíguos não sejam apresentados na movimentação em distintas posições. O processo de cadastramento do artefato é realizado com uma taxa de aquisição de 30 quadros por segundo.

4.9.1 Geometria dos Artefatos utilizados

O número mínimo de marcadores que pode apresentar um artefato é três. Para as análises do deslocamento, foram construídos dois artefatos mostrados na Figura 53, de três e quatro marcadores respectivamente, assim, cada um deles será associado a um ponto no perfil do túnel. Em adição, o processo de cadastramento de cada artefato permite salvar as coordenadas da melhor pose identificada num arquivo XML (*ArtifactDataBase.xml*). Com isto, pode-se utilizar o software *MATLAB* para graficar esses pontos e verificar a geometria cadastrada no sistema. Na Figura 54, visualiza-se uma pose do artefato de três marcadores, na qual, a união dos pontos tem a geometria de um triângulo escaleno, para avaliar o processo de cadastramento do artefato.



Figura 53 À esquerda, o Artefato 1 com 3 marcadores; à direita, o Artefato 2 com 4 marcadores.

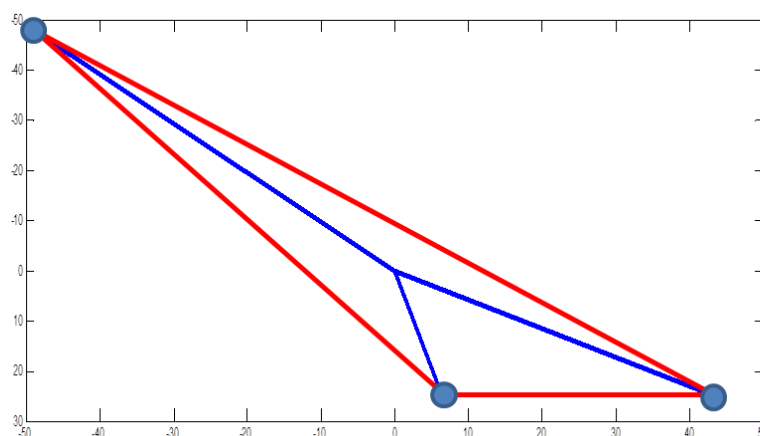


Figura 54 Plano 2D do artefato de três marcadores utilizado para rastreamento.

4.9.2 Janela para Visualizar o Rastreamento

Durante a construção de túneis, variações do ar presente ao longo do mesmo, umidade, gotas de água que deteriorem o material refletivo dos marcadores, poeira gerada pela explosão de rochas e outros fatores do ambiente, podem afetar de maneira considerável, a detecção dos marcadores e dos artefatos. Por tanto, utilizou-se uma janela para visualizar o número de artefatos reconhecidos, o número de marcadores presentes e a posição atual deles, sendo possível verificar antes de iniciar o processo de rastreamento, se os artefatos são reconhecidos e se os seus marcadores estão em condições normais. Além disso, criou-se um *timestamp* associado à posição e identidade de cada artefato, para verificar pontos de deslocamento críticos, isto é, durante suspensão de trabalhos, movimentos de terra como terremotos, e/ou, fenômenos geológicos que possam se apresentar durante as fases de construção de túneis.

Na Figura 55, é ilustrada a detecção de um artefato reconhecido, e também se as duas câmeras conseguem visualizar três marcadores associados a dito artefato. Efetuou-se também, o reconhecimento de dois artefatos, com três e quatro marcadores mostrado na Figura 56, na qual evidencia-se que, cada câmera consegue detectar 7 marcadores, os quais formam parte do artefato com três e quatro marcadores.

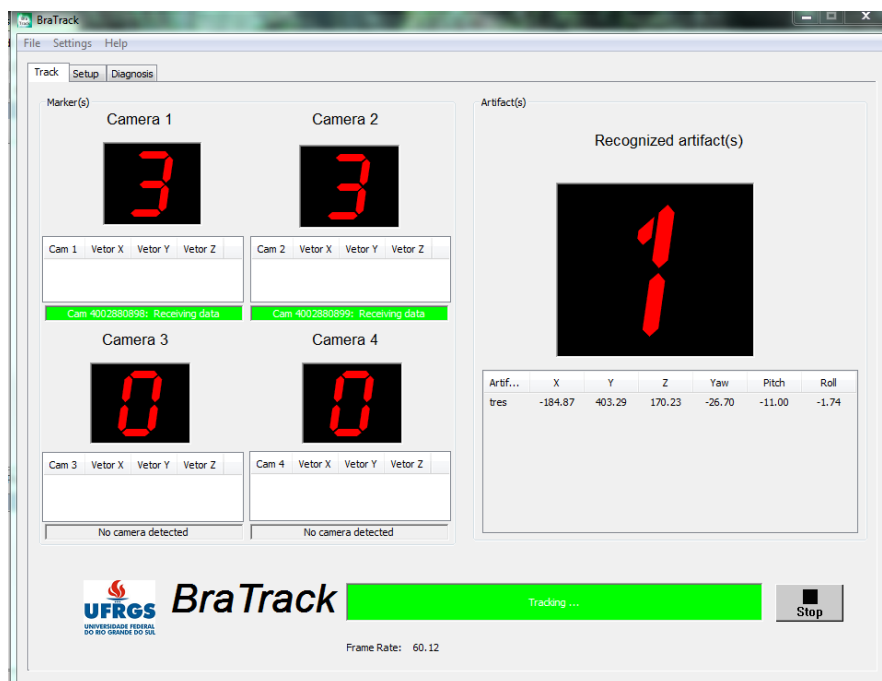


Figura 55 Detecção de um artefato com três marcadores.

Embora as câmeras detectem marcadores que não pertençam aos artefatos cadastrados, isso não dificultará a função de detecção, porque sempre é analisada a distância entre os marcadores que compõem o artefato, deste modo, se aparecer outro marcador, não será possível associa-lo ao grupo de marcadores do artefato.

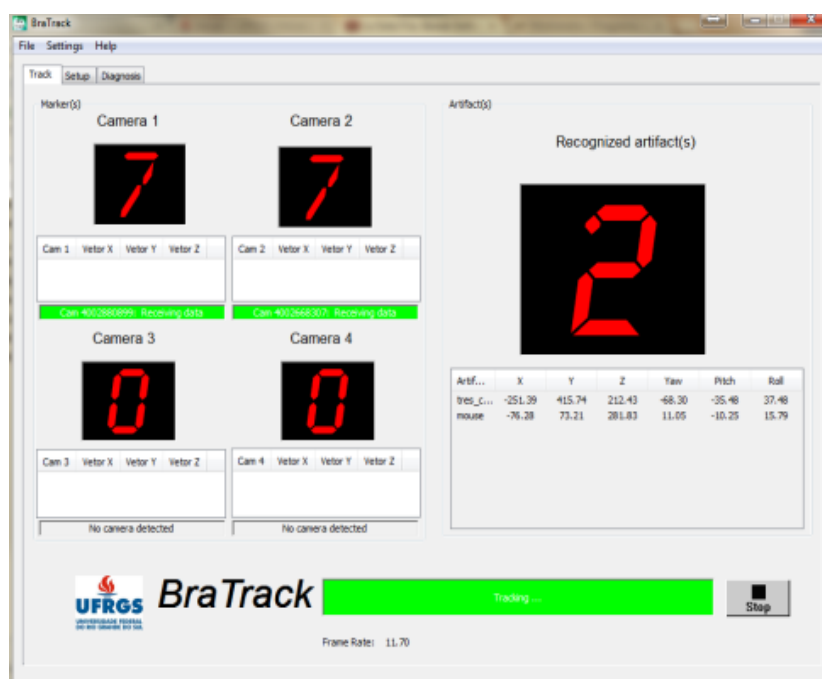


Figura 56 Detecção de dois artefatos com três e quatro marcadores respectivamente.

4.10 INCREMENTO DA ÁREA DE RASTREAMENTO COM MÚLTIPLAS CÂMERAS

O volume de rastreamento pode ser incrementado com o incremento de mais um sistema de visão estéreo. Ao usar varias câmeras para o rastreamento, maior robustez contra problemas de oclusão e maior precisão podem ser obtidos, bem como a possibilidade de rastreamento de áreas maiores.

4.11 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

No que se refere ao hardware, atividades que estiveram relacionadas com a pesquisa de mercado para seguimento de tendências de produtos similares em relação a sistemas de rastreamento ótico. Desta forma, projetou-se uma placa que envolve em sua maioria componentes SMD atendendo a requisitos atuais para o desenvolvimento de protótipos eletrônicos. Modelou-se a mecânica da carcaça dos módulos de hardware para gerar um protótipo, e teve-se como ênfase a praticidade, robustez e design, para instalação em ambientes diversos.

Os módulos de software apresentados, foram implementados em equipe durante o desenvolvimento do projeto de pesquisa BraTrack, mudando-se da plataforma do Windows XP para Windows 7 Professional, e utilizando a plataforma do Visual Studio 2005. De outro lado, a interface gráfica do sistema de rastreamento, foi desenvolvida utilizando a biblioteca MFC. O sistema permite analisar o deslocamento de artefatos em tempo contínuo. Implementações para o interfaceamento de dois sistemas de visão estéreo foram realizadas, porém não se conseguiu testar as características e propriedades de desempenho.

Em resumo, as principais vantagens dos sistemas óticos baseados no uso de marcadores passivos são:

- a) Possibilita a captura e com níveis de precisão na ordem de outros sistemas de instrumentação;

- b) Os movimentos de múltiplos artefatos podem ser capturados simultaneamente;
- c) O objeto pode-se movimentar livremente dentro do volume de trabalho, não sofrendo obstrução por fios ou equipamentos que limitam os movimentos;
- d) O espaço de trabalho pode ser grande o suficiente para vários tipos de obras subterrâneas.

5 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo descreve-se a metodologia adotada para estabelecer a precisão e exatidão do sistema implementado, avaliar os distintos cenários de utilidade e finalmente a viabilidade do uso para monitoramento do deslocamento de maciço.

5.1 REQUISITOS

Foram desenvolvidos testes de avaliação a fim de estabelecer o comportamento do sistema de rastreamento implementado, para a detecção de deslocamentos de artefatos, os quais permitem estabelecer condições de estabilidade durante e após a construção de túneis. Para tal fim, precisa-se avaliar a precisão das medições do deslocamento obtidas pelo sistema, para considera-lo como sistema de monitoramento em obras subterrâneas.

A plataforma para realização dos testes precisa fornecer um meio para comparar os dados obtidos pelo sistema de rastreamento e os deslocamentos definidos por equipamentos de precisão. Presume-se a mudança contínua da posição nos três eixos do sistema de coordenadas tridimensional, no entanto, o experimento modificará um eixo de cada vez. O sistema de rastreamento deve proporcionar a capacidade para analisar a posição e orientação do artefato rastreado, em qualquer instante de tempo. Para realizar experimentos de translação de maior confiabilidade, a fixação da pose do artefato deverá ser garantida, a fim de ter um deslocamento em apenas um dos eixos, isto é, deixar um grau de liberdade do artefato para cada experimento.

Não obstante, o espaço tridimensional de trabalho deve apresentar a maior semelhança possível com um espaço do interior de um túnel, como definido na seção 4.7. Desta forma, os deslocamentos translacionais dos artefatos devem-se realizar dentro deste espaço.

5.2 EXPERIMENTOS

Espera-se que os experimentos para estimar o deslocamento do artefato sejam os mais semelhantes possíveis aos deslocamentos que podem ocorrer na construção de túneis, e por isso, o deslocamento em cada um dos eixos deve ser controlado com a maior precisão possível dentro da faixa milimétrica. Neste sentido, três experimentos foram realizados para atingir a validação.

5.2.1 Deslocamento no eixo “Y” de artefato com três marcadores

Dispõe-se um artefato de três marcadores, fixado à banda deslizante de um paquímetro. Com os eixos “X” e “Z” fixos, desloca-se a cada 1 mm o paquímetro sobre o eixo “Y”. Desta forma, os dados obtidos pelo sistema são comparados com as medições mostradas pelo instrumento. Logo, pretende-se avaliar as características para um sistema de rastreamento.

5.2.2 Deslocamento no eixo “X” e “Y” de dois artefatos respectivamente

Na presença de dois artefatos, respectivamente com três e quatro marcadores, pretende-se avaliar a detecção e o erro na identificação dos artefatos. Os artefatos foram instalados a uma distância de 20 cm entre si. Nesta distância, podem ser gerados falsos objetos e pontos ambíguos (pontos que formam triângulos de lados iguais). No entanto, busca-se verificar se a qualidade das medidas é afetada, em outras palavras, se há diminuição da precisão da medição nos eixos que se deslocam. O eixo **Z**, que se associa a distância do objeto ao ponto médio da linha horizontal entre as câmeras, permanece fixo.

5.2.3 Comportamento do sistema frente à luminosidade completa e baixa luminosidade

Neste experimento, pretende-se avaliar a detecção de artefatos frente a condições de completa e baixa luminosidade, geralmente apresentadas em túneis. Estas condições podem

ser ocasionadas devido a rochas com presença de água, materiais metálicos, entre outros. Sob estas condições, uma luz infravermelha pode ser refletida nas câmeras, gerando possíveis (falsos) marcadores que possam dificultar as medições. Desta forma, gera-se baixa luminosidade quando é configurada a mínima potência da cadeia dos LEDs, e alta luminosidade quando se alcança a maior potência deles. Os módulos de hardware permitem ajustar estes parâmetros.

5.3 CENÁRIOS DE INSTALAÇÃO DAS CÂMERAS

Pretende-se configurar os ângulos de incidência das câmeras, com o objetivo de abranger o maior volume de trabalho possível. Busca-se capturar e reconhecer pelo menos três artefatos, associados a três pontos do perfil do túnel. Na Figura 57, ilustra-se a ideia da interseção das visões das câmeras, quanto maior for a distância horizontal entre elas e a altura na qual cada uma delas é instalada, maior será o espaço tridimensional no qual pode-se reconhecer artefatos. Nas seguintes subseções serão descritas as configurações dos cenários utilizados para realizar a coleta dos dados.

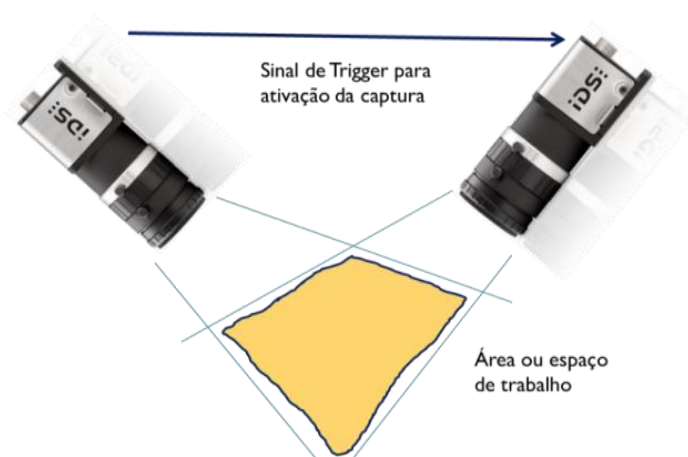


Figura 57 Configuração do Sistema de Rastreamento Mestre-Escravo.

Definiu-se dois cenários (simulando dimensões de túneis reais) para a avaliação do sistema. Objetiva-se simular as condições físicas de deslocamento que possa sofrer o maciço, e assim, avaliar através do método de convergências a curva de estabilidade do túnel.

5.3.1 Cenário 1

Neste primeiro cenário, os testes foram realizados em uma sala exibida na Figura 58, com dimensões de 7 m de largura, 9 m de comprimento e 2,4 m de altura. A sala conta com quatro fileiras de duas lâmpadas fluorescentes cada, tendo 38 W de potência cada lâmpada. Definiram-se duas condições de iluminação: iluminação completa (quando todas as lâmpadas estão ligadas) e baixa iluminação (quando todas as luzes estão desligadas). As câmeras são instaladas sobre tripés, com altura de 2,20 m cada, com uma distância entre si de 4 m. O artefato é situado na linha do centro a uma distância da linha horizontal de 4 m e alturas de 1,40 m e 1,60 m. O experimento foi realizado 10 vezes, movimentando o artefato em três posições de 1 mm, 3 mm e 5 mm cada.

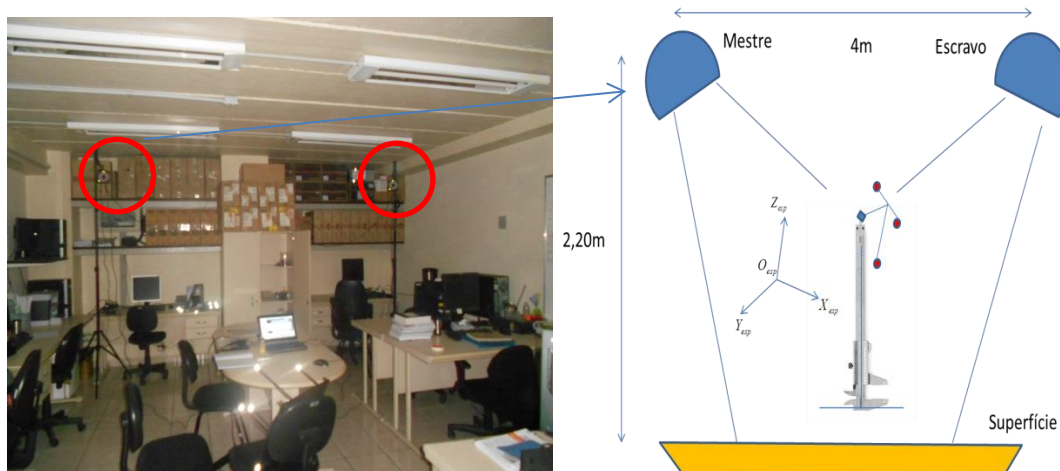


Figura 58 Sala do cenário 1.

5.3.2 Cenário 2

O segundo cenário difere-se do primeiro cenário pelas suas dimensões (4 m de largura, 6 m de comprimento e 2,4 m de altura), e o posicionamento das câmeras como se observa na Figura 59. Aplicou-se as mesmas condições de iluminação que foram utilizadas no primeiro cenário. As câmeras são instaladas em suportes fixados no teto da sala, estando a uma altura de 2,30 m cada uma delas. A distância entre as câmeras é de 3 m entre si. O artefato é situado a uma distância de 3 m em relação à linha horizontal das câmeras, e em alturas de 1,50 m e

1,70 m. O experimento foi realizado 10 vezes, movimentando o artefato em três posições de 1 mm, 3 mm e 5 mm cada.

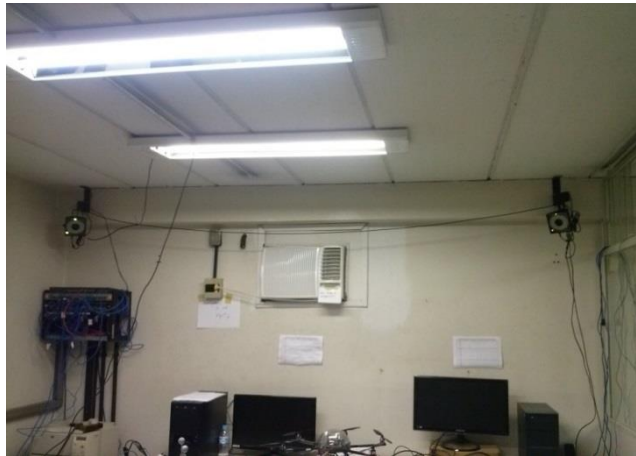


Figura 59 Sala do cenário 2.

5.4 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

O processo de calibração para a obtenção dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos está restrito às condições de luminosidade do local onde é realizado o processo, à configuração dos ângulos de inclinação das câmeras, à precisão na construção do padrão de calibração, a qualidade do material refletivo utilizado para a confecção dos marcadores e ao número de fotos capturadas durante este processo. Foram realizadas inúmeras tentativas de calibração do sistema até conseguir o cadastramento e detecção de artefatos movimentando-se o mesmo no espaço tridimensional.

5.4.1 Calibração Intrínseca das câmeras

Para obter os parâmetros intrínsecos, realizaram-se quatro experimentos para cada câmera, sendo dois com a captura de 30 fotos e outros dois de 50 fotos. Na Tabela 6 e na Tabela 7, apresentam-se os dados dos parâmetros intrínsecos f_x , f_y , c_x , c_y , para cada câmera, e também os coeficientes de distorção da imagem k_1 , k_2 , p_1 e p_2 . A partir dos experimentos realizados, calculou-se a média para cada parâmetro, e estes dados foram estipulados como os parâmetros finais da calibração intrínseca. Adotou-se os dados médios, devido à variação que

pode existir entre as diferentes poses do padrão de calibração no espaço de trabalho durante o processo de calibração. Estes parâmetros são de suma importância para permitir uma calibração extrínseca aceitável e poder capturar o maior número de poses de um artefato.

Tabela 6 Parâmetros Intrínsecos da Câmera Mestre.

	<i>30 fotos</i>	<i>30 fotos</i>	<i>50 fotos</i>	<i>50 fotos</i>	<i>Média</i>
fx	763,762	758,547	777,507	729,782	757,3995
fy	766,529	770,548	774,297	757,333	767,1768
cx	364,961	38,1357	395,133	412,466	302,6739
cy	447,319	362,148	316,692	460,146	396,5763
k1	-0,17358	-0,32425	-0,60931	-0,0257	-0,28321
k2	-0,25387	0,091129	1,78041	-0,19351	0,35604
p1	-0,00359	-0,01253	-0,01129	0,033126	0,001429
p2	0,000975	0,030233	-0,00464	-0,00574	0,005207

Tabela 7 Parâmetros Intrínsecos da Câmera Escravo.

	<i>30 fotos</i>	<i>30 fotos</i>	<i>50 fotos</i>	<i>50 fotos</i>	<i>Média</i>
fx	796,887	715,681	813,752	671,222	749,3855
fy	791,186	701,59	800,298	667,24	740,0785
cx	409,781	167,948	290,434	614,816	370,7448
cy	161,047	438,723	127,173	186,213	228,289
k1	-0,33536	-0,07464	-0,29074	-0,17868	-0,21985
k2	1,19241	0,021866	0,486282	0,040082	0,43516
p1	0,001933	0,005061	-0,00572	-0,00076	0,000129
p2	-0,01322	-0,05038	-0,0127	0,006404	-0,01748

5.4.2 Calibração dos parâmetros extrínsecos das câmeras

Para realizar este processo de calibração, estabeleceu-se o ponto central do espaço tridimensional de trabalho, a fim de ser este a origem do sistema de coordenadas espaciais para os artefatos. Neste ponto, foi fixado o padrão de calibração da Figura 45 e movimentado a padrão ilustrado na Figura 46, obtendo-se a matriz de rotação e a escala de reconstrução da câmera mestre à câmera escravo.

Neste processo, varia-se o tempo para capturar imagens, em 10 s, 15 s e 25 s, com o objetivo de ter-se um maior número de quadros de imagem para analisar em cada teste, e verificar a melhora na percentagem de sucesso na estimativa nos parâmetros de calibração.

Deste modo, da mesma maneira que na calibração intrínseca, o número de imagens capturadas e processadas aumenta a percentagem de sucesso deste processo, sendo importante, que o padrão de calibração espacial seja movimentado em todo o espaço de trabalho. Na Tabela 8, verifica-se que quanto maior o número de imagens válidas do padrão espacial capturado pelas duas câmeras em sincronismo (mestre-escravo) se atingirá um percentual de até 90,55%, permitindo assim, a facilidade para o cadastramento, gerenciamento e reconhecimento de artefatos, expostos à visão estéreo do sistema de rastreamento. Esta percentagem foi calculada pela relação entre o número de imagens válidas e o número de imagens capturadas durante o processo.

Tabela 8 Percentagem de Sucesso da Calibração Extrínseca das Câmeras.

Tempo [s]	N. de imagens	Imagens Válidas	% Sucesso
5	281	119	42,35
10	382	301	78,8
15	490	427	87,14
25	656	594	90,55

Para justificar os dados apresentados na Tabela 8, utilizam-se as Figura 60, Figura 61, Figura 62 e a Figura 63. Cada uma delas mostra que as duas câmeras estão visualizando oito marcadores, correspondentes a seis marcadores do padrão de calibração L e dois marcadores, referentes ao padrão de calibração espacial.

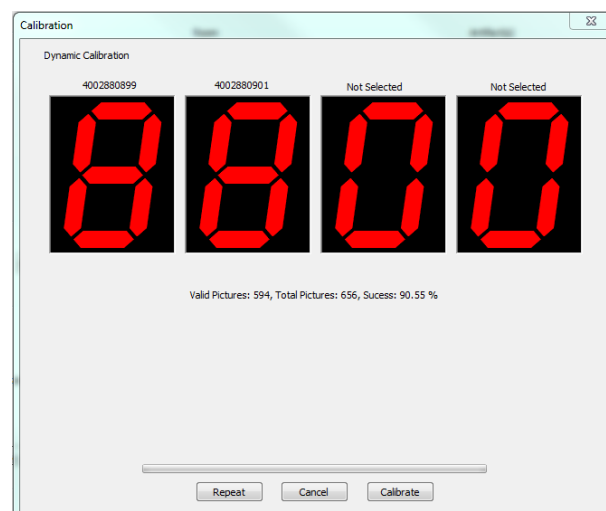


Figura 60 Calibração Parâmetros extrínsecos com 90,55% de sucesso.

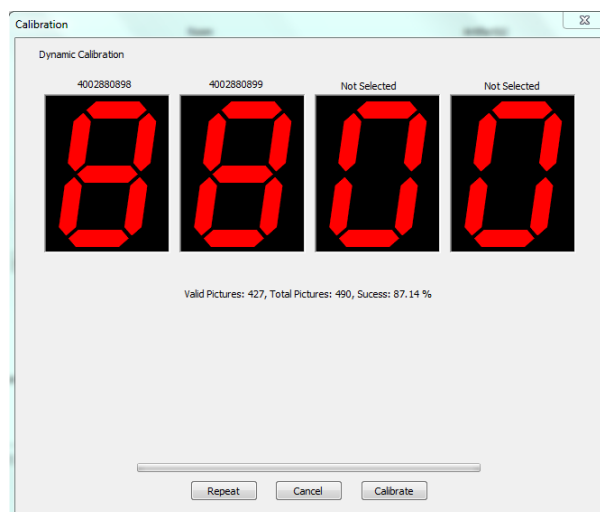


Figura 61 Calibração Parâmetros extrínsecos com 87,14% de sucesso

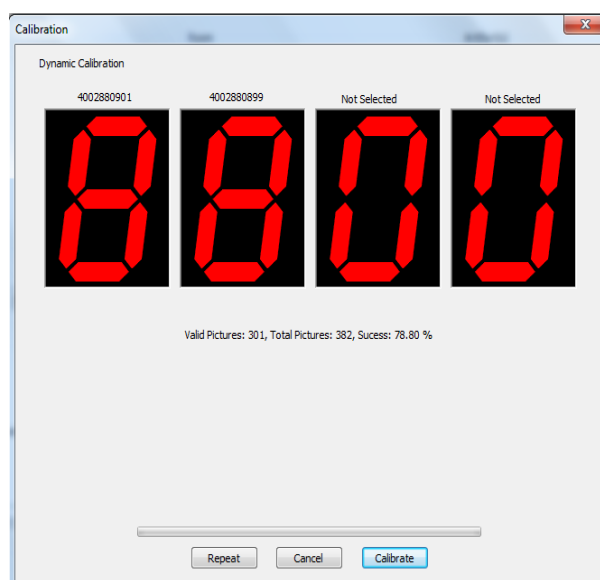


Figura 62 Calibração Parâmetros extrínsecos com 78,80% de sucesso

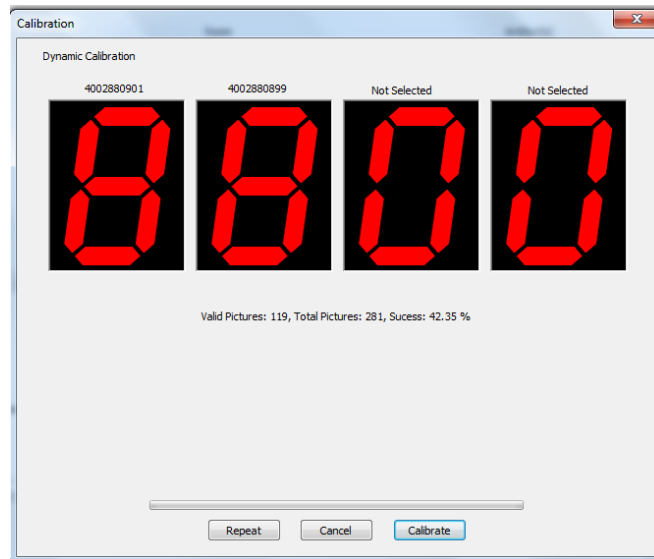


Figura 63 Calibração Parâmetros extrínsecos com 42,35% de sucesso

5.5 ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DOS ARTEFATOS

5.5.1 Análise da precisão no deslocamento

Segundo o VIM 2012, a precisão de medição ou fidelidade, define-se como o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas. Entretanto, a precisão numa medição é uma característica quantitativa, expressa como o desvio padrão, a variação ou o coeficiente de variação. Em consequência, nos dados obtidos da posição da distribuição espacial de cada artefato, calcula-se o desvio padrão das medições, a fim de, analisar a repetitividade das medições para cada eixo. Neste sentido, a precisão do sistema, foi considerada como a somatória dos desvios padrões para cada eixo, levando-se os três graus de liberdade associados à rotação dos eixos sobre si mesmos.

Por outro lado, o número de quadros por segundo foi definido em 60 e o tempo de exposição do flash foi fixado em 1 ms. Este relaciona o tempo no qual o sensor das câmeras mantém-se sensível ao passo de luz.

Na Tabela 9, apresenta-se um exemplo do arquivo gerado em cada processo de monitoramento, no qual, os dados de tempo, nome do artefato, coordenadas x, y e z, e os

vetores de rotação sobre cada eixo R1, R2 e R3, podem ser visualizados para identificar pontos críticos. Os dados estão em milímetros. Para obter a informação desta Tabela, fixou-se o artefato de três marcadores a uma estrutura vertical sobre uma mesa, sendo esta, submetida a vibrações geradas manualmente, as quais simulam explosões que podem-se apresentar em outras seções da construção subterrânea, mas sem possibilidades de estimar a magnitude delas. Os dois quadros vermelhos sinalam o momento do início e fim das vibrações.

Tabela 9 Base de dados com a posição do artefato no espaço tridimensional.

Data	Hora	Nome	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	R1 [°]	R2 [°]	R3 [°]
22/06/2014	18:58:24	t	-179,2766	422,3611	170,7886	-26,6569	-11,9365	-1,7907
22/06/2014	18:58:25	t	-179,5588	422,4018	171,2722	-26,8808	-11,9670	-1,7917
22/06/2014	18:58:26	t	-180,0018	422,5307	171,8781	-26,7117	-11,9426	-1,7980
22/06/2014	18:58:27	t	-179,8266	422,4799	171,5392	-26,8543	-11,9401	-1,7960
22/06/2014	18:58:28	t	-178,4660	422,6010	171,2916	-26,6520	-11,9922	-1,8812
22/06/2014	18:58:29	t	-179,1779	422,3179	171,0862	-26,7030	-11,9464	-1,8113
22/06/2014	18:58:30	t	-178,6849	422,4541	170,8415	-26,6478	-11,9880	-1,8706
22/06/2014	18:58:31	t	-181,6280	422,4575	172,0380	-26,6526	-11,8367	-1,7345
22/06/2014	18:58:32	t	-181,5465	422,4786	172,0107	-26,5943	-11,8402	-1,7363
22/06/2014	18:58:33	t	-183,2723	422,1340	173,1806	-26,5986	-11,5432	-1,3117
22/06/2014	18:58:34	t	-181,0615	421,6377	173,8900	-26,6805	-12,2124	-1,5941
22/06/2014	18:58:35	t	-182,7279	414,3404	175,1055	-26,5816	-11,7758	-1,2321
22/06/2014	18:58:36	t	-183,7842	406,6552	174,7589	-26,6365	-11,2375	-1,2265
22/06/2014	18:58:37	t	-184,7188	403,1158	174,8855	-26,4656	-10,9285	-1,0742
22/06/2014	18:58:38	t	-182,6620	403,7763	173,2971	-26,5308	-11,2912	-1,4996
22/06/2014	18:58:39	t	-182,8859	403,9613	173,6590	-26,6544	-11,2545	-1,5006
22/06/2014	18:58:40	t	-182,8380	403,9864	173,6053	-26,6072	-11,2597	-1,5078
22/06/2014	18:58:41	t	-182,8540	403,9960	173,6357	-26,6611	-11,2503	-1,5075
22/06/2014	18:58:42	t	-182,8063	403,9770	173,5677	-26,5645	-11,2763	-1,5136
22/06/2014	18:58:43	t	-180,5348	404,0246	173,2917	-26,6960	-11,3141	-1,5580
22/06/2014	18:58:44	t	-180,2436	403,9160	172,5531	-26,6078	-11,3493	-1,6999
22/06/2014	18:58:45	t	-180,1019	403,8559	172,7253	-26,5585	-11,3911	-1,6633
22/06/2014	18:58:46	t	-179,9767	403,8923	172,5901	-26,6461	-11,3516	-1,6856

De outro lado, um experimento foi realizado com o objetivo de avaliar a detecção de deslocamentos milimétricos de um artefato. Primeiramente, o artefato de três marcadores foi fixado numa posição aleatória. Com este ensaio, buscou-se investigar a variação nas medidas oferecidas pelo sistema, sem deslocamento do artefato.

Observaram-se 500 dados, coletados em 10 experimentos, ou seja, 50 dados em cada, da estimativa da posição do eixo X do centro de massa do artefato. Obteve-se uma precisão de 0,1881 mm, a qual foi calculada como o desvio padrão do conjunto de medições sob as mesmas condições. Na Figura 64, mostra-se a distribuição das medições, onde a maioria das medidas encontram-se nas proximidades da tendência.

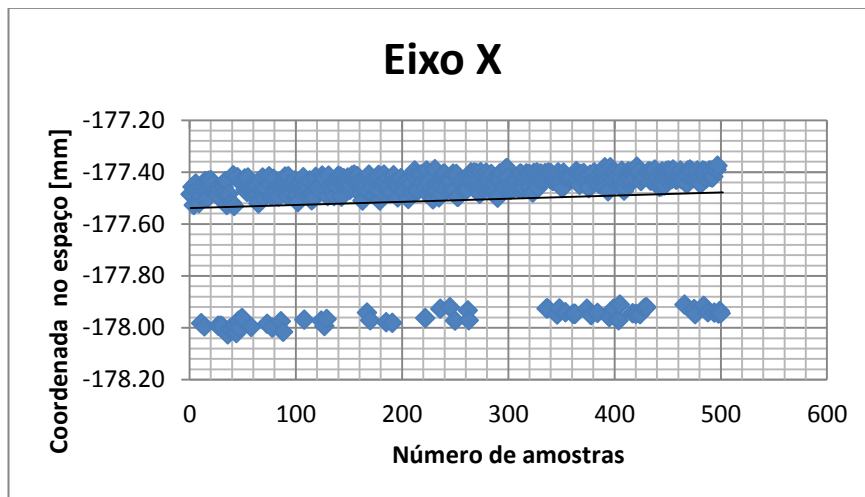


Figura 64 Repetibilidade nas medições do eixo X, artefato de três marcadores.

Efetuuou-se um procedimento similar para a coordenada Y, e, a partir de 500 dados analisados, obteve-se uma precisão de 0,0636 mm. Neste sentido, a Figura 65, permite visualizar o aumento na precisão para o eixo Y em relação com o eixo X.

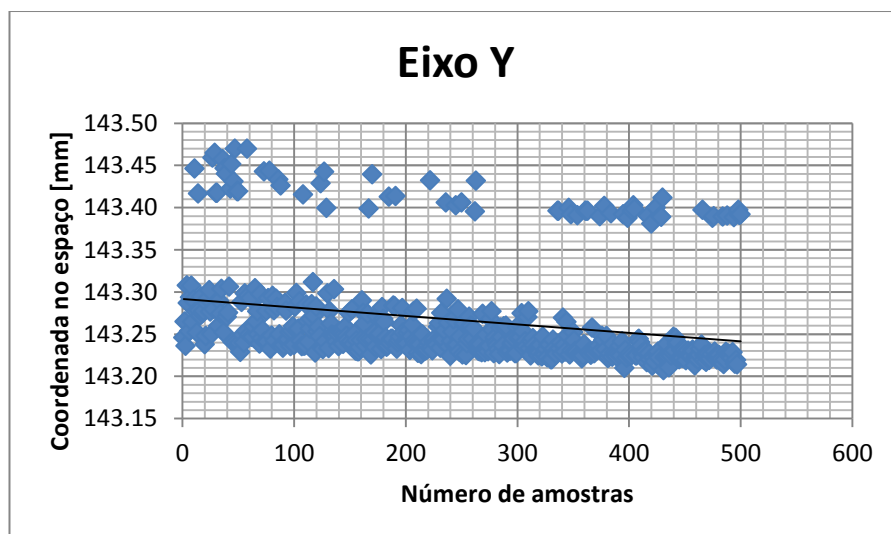


Figura 65 Repetibilidade nas medições do eixo Y, artefato de três marcadores.

Particularmente, o eixo Z, tem uma distribuição nas medidas com uma precisão de 0,06391 mm, em outras palavras, é a coordenada com melhor precisão, por causa de ter uma relação direta com a distância focal das câmeras. O eixo X e Y, embora sendo considerados os parâmetros de distorção radial, sofrem o fenômeno de distorção tangencial da imagem.

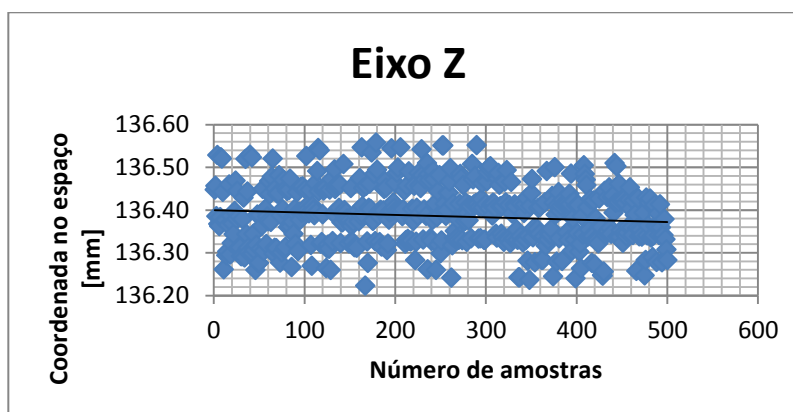


Figura 66 Repetibilidade nas medições do eixo Z, artefato de três marcadores.

Já na análise de precisão da medida da coordenada do artefato de quatro marcadores, utilizaram-se duas poses do artefato neste experimento. O primeiro com o propósito de verificar a mudança na precisão, a causa da orientação do artefato no espaço, sabendo-se que em algumas poses poderá ser observado marcadores perto um dos outros, comprometendo-se a precisão. Este artefato de quatro marcadores é fixado num lugar do espaço, numa pose chamada 1, onde um dos marcadores encontra-se sobreposto numa imagem do objeto 2D e numa pose 2 como é ilustrado na Figura 67.

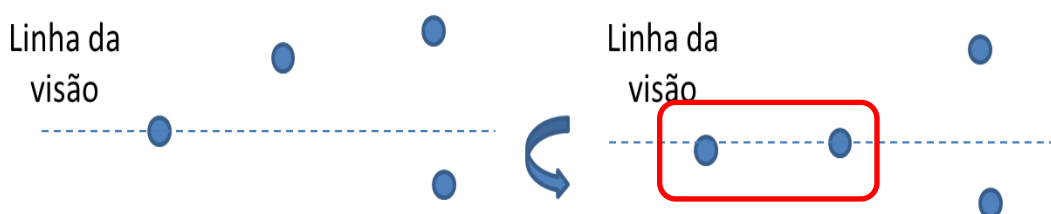


Figura 67 À esquerda a pose 1, à direita a pose 2. Artefato de 4 marcadores.

Na Figura 68, observa-se a precisão para cada um dos eixos, tendo-se uma média de $\pm 0,2708$ mm da medição. O pior caso apresenta-se para o grau de liberdade rotacional

associado ao eixo Z, onde o desvio padrão acumulado para os seis graus de liberdade foi de $\pm 1,6250$ mm.

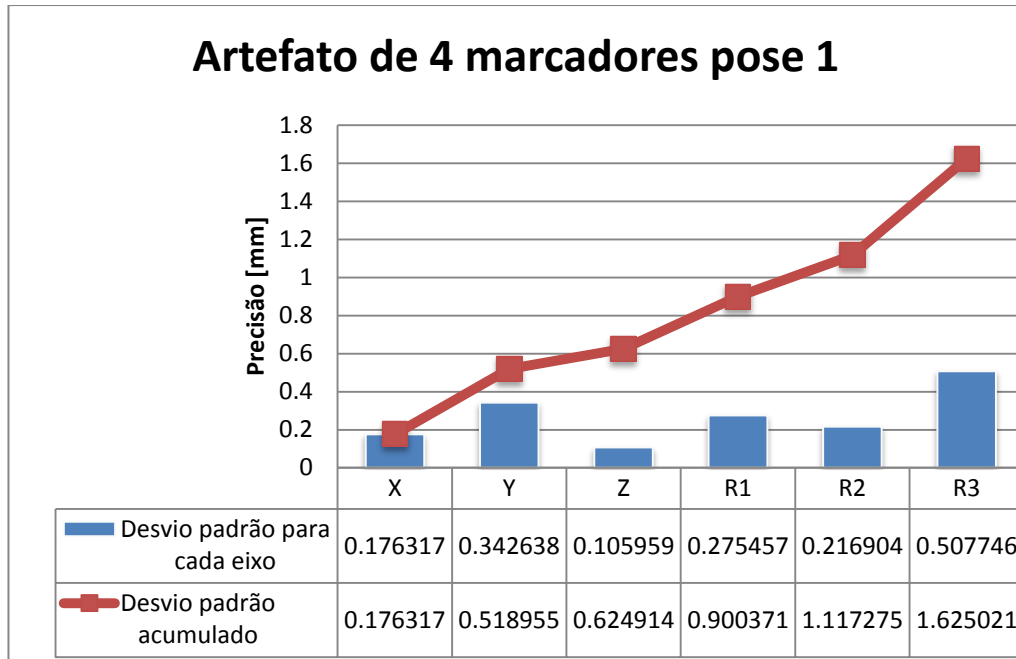


Figura 68 Comportamento do artefato de 4 marcadores na pose 1.

Na Figura 69, repete-se o mesmo experimento descrito anteriormente, mas para a pose 2 do artefato. Nesta pose, os marcadores que compõem o artefato estão mais separados uns dos outros, diminuindo-se o erro na distribuição espacial do centro de massa do artefato. Para este caso, obteve-se o pior caso no eixo Z, com uma precisão de $\pm 0,4952$ mm, e um desvio padrão acumulado de $\pm 1,0112$ mm.

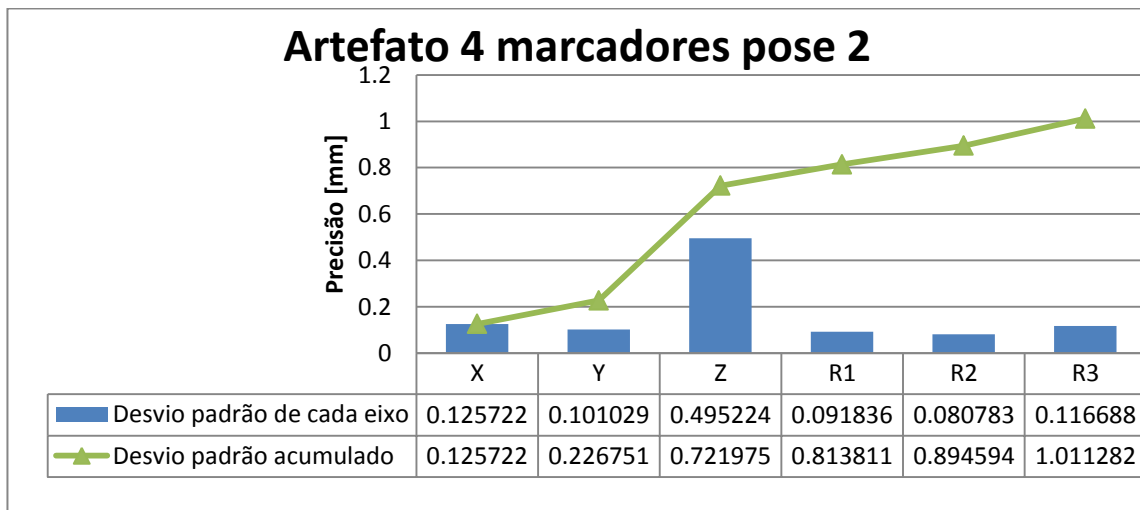


Figura 69 Comportamento do artefato de 4 marcadores na pose 2.

Nota-se então, que a orientação ou pose do artefato na qual se deseja estimar sua posição, deve estar com os seus marcadores totalmente visualizados por cada uma das câmeras.

5.5.1 Deslocamento no eixo “Y” de artefato com três marcadores

Depois de ter sido investigada a precisão do sistema, para cada uma das coordenadas do artefato, efetuou-se o procedimento de deslocar o artefato no eixo Y. Este deslocamento está associado ao movimento da haste de profundidade (Figura 70). Inspeccionando-se o cursor do paquímetro, com variações de 1 mm, 10 mm e 15 mm, apresentado na Tabela 10, as diferenças entre o valor medido (do sistema) e o valor real (do paquímetro), a média das diferenças foi 0,0691 mm

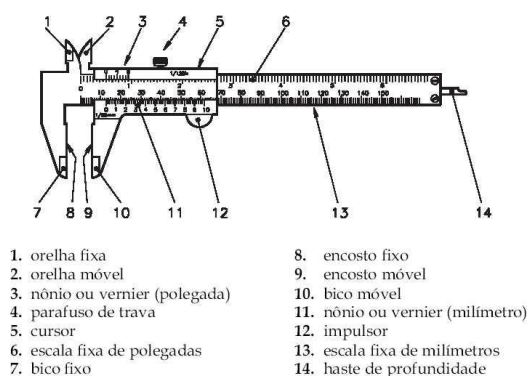


Figura 70 Partes do paquímetro

[<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAlzgAC/paquímetro>].

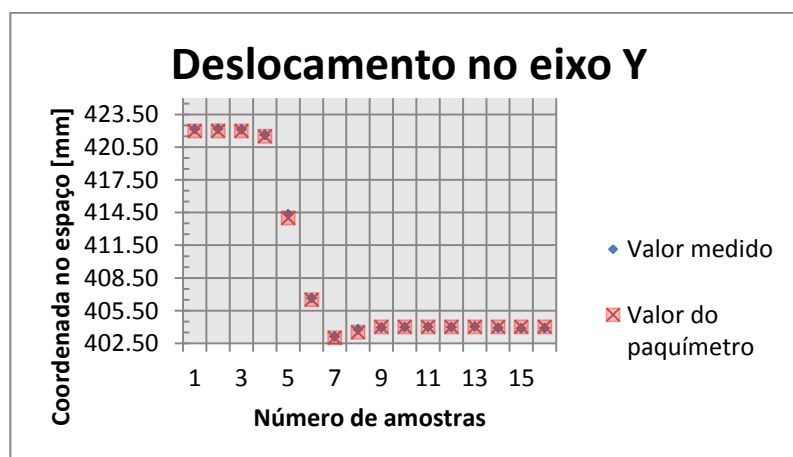


Figura 71 Deslocamento forçado do artefato com uso do paquímetro.

Tabela 10 Diferenças entre o valor medido e o valor referência.

Amostra	Valor medido [mm]	Valor real [mm]	Diferença [mm]
1	422,1575	422	0,1575
2	422,1786	422	0,1786
3	422,1340	422	0,1340
4	421,6377	421,5	0,1377
5	414,3404	414,	0,3404
6	406,6552	406,5	0,1552
7	403,1158	403	0,1158
8	403,7763	403,5	0,2763
9	403,9613	404	-0,0387
10	403,9864	404	-0,0136
11	403,9960	404	-0,0040
12	403,9770	404	-0,0230
13	404,0246	404	0,0246
14	403,9160	404	-0,0840
15	403,8559	404	-0,1441
16	403,8923	404	-0,1077
		TOTAL	0,0691

5.5.2 Deslocamento no eixo “X” e “Y” para cada um dos artefatos

Atendendo ao experimento que desloca o eixo **X** e **Y**, do artefato de três marcadores, na Figura 72, ilustram-se os resultados da posição detectada pelo sistema com variações entre 0 e 1 mm. Foi deslocado um eixo de cada vez, por se ter somente um paquímetro. Neste sentido, calculou-se o desvio padrão médio, que é razão entre a média dos desvios absolutos pelo desvio de todos os dados, obtendo-se uma precisão de $\pm 0,2689$ mm, $\pm 0,2141$ mm para os eixos **X** e **Y** respetivamente. Esperava-se uma semelhança entre estes dois valores, mas devido à movimentação ser realizada manualmente, obteve-se essa diferença nas precisões.

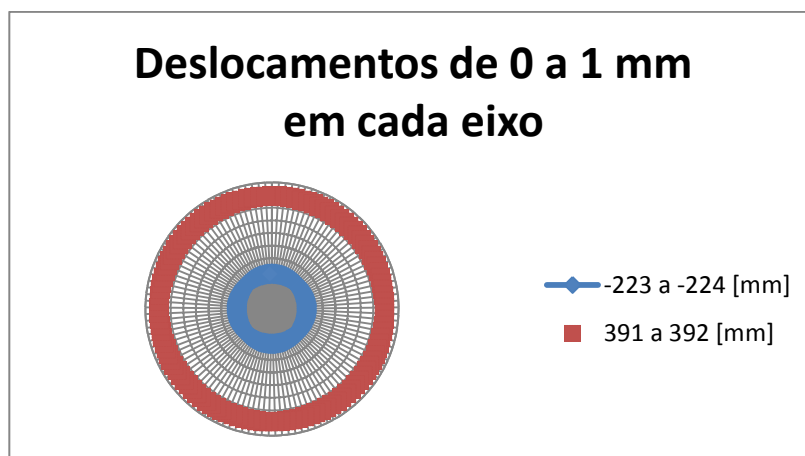


Figura 72 Deslocamento vertical do Artefato de três marcadores.

Ao utilizar o paquímetro analógico pode-se ter incerteza na medição a causa do erro de paralaxe, na hora de identificar o número e as cifras decimais e o ponto exato para medir o deslocamento do artefato.

A Figura 73 apresenta a trajetória que teve cada marcador, em cada eixo, em 15 instantes de tempo aleatórios durante 1 minuto. Com isto, apresenta-se a ideia do monitoramento ao longo do tempo, em períodos contínuos de até 24 h.

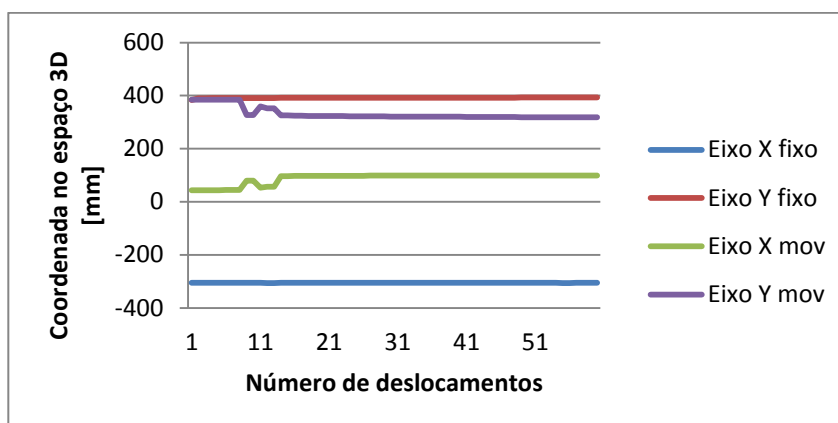


Figura 73 Deslocamento do artefato de 3 marcadores em presença do artefato de 4 marcadores fixado.

5.5.3 Comparação da precisão para dois cenários

Como foi descrito na seção 5.3, configurou-se o sistema para dois cenários. No cenário um, apresentou-se um melhor comportamento no mapeamento de artefatos, pode ter-se um maior espaço de trabalho, permitindo que, durante a calibração dos parâmetros das câmeras,

consiga-se realizar a movimentação dos padrões de calibração com maior liberdade no espaço. Já no segundo cenário, reduziu-se a distância horizontal entre as câmeras, e assim, o espaço de visão comum se reduz, restringindo a qualidade da calibração do sistema.

Na Tabela 11, mostra-se o desvio padrão para cada grau de liberdade, organizados em quatro testes. O teste 1 e o teste 2, correspondem ao cenário um, e o teste 3 e 4 ao cenário dois. Como era esperada, a calibração do sistema para o primer cenário tem uma qualidade melhor que o segundo, tendo uma melhor precisão quando o espaço de trabalho é maior.

Tabela 11 Comparação entre os cenários de instalação.

Cenário	Desvio Padrão	Eixo X [mm]	Eixo Y [mm]	Eixo Z [mm]	R1 [°]	R2 [°]	R3 [°]	Total [mm]
1	Teste 1	0,01829	0,022804	0,030829	0,010339	0,024359	0,012314	0,118934
	Teste 2	0,01944	0,029102	0,047533	0,007791	0,015566	0,011138	0,130571
2	Teste 3	0,039236	0,030329	0,048423	0,015854	0,023318	0,022112	0,179273
	Teste 4	0,111227	0,059997	0,170979	0,012104	0,02217	0,024464	0,400941

5.5.4 Desempenho do sistema frente à luminosidade completa e baixa luminosidade

Conforme foi descrito na seção 5.1, executaram-se uma série de experimentos, com o objetivo de analisar o desempenho do sistema de rastreamento sob condições de luminosidade do ambiente. A intensidade luminosa afeta a reflexão da onda infravermelha dos marcadores à câmera. Na Figura 74, os resultados para a precisão de cada eixo, obtidos em três experimentos, com 500 medidas cada. Com isto, o eixo **X** apresenta a menor precisão do sistema, em relação às outras coordenadas, e às três rotações dos eixos.

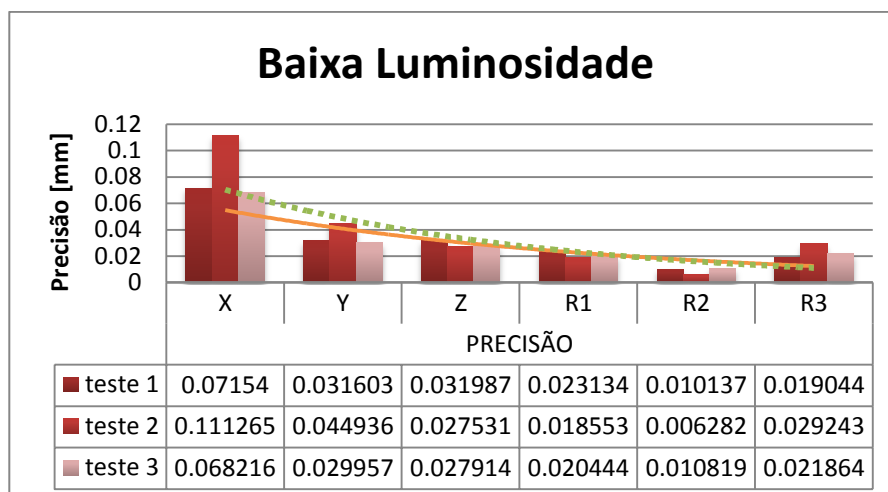


Figura 74 Precisão do Sistema frente à baixa luminosidade.

Na Figura 75, é mostrado o comportamento do sistema frente à condição de luminosidade completa, onde é apreciável que a precisão diminua em relação à luminosidade baixa, pois a luz das lâmpadas é absorvida pelo material refletivo dos marcadores, ocasionando que a câmera o visualize com maior intensidade e maior área, diminuindo desta forma a estimação do centro do marcador, uma vez que quanto maior for a área do marcador na imagem, menor será a sua precisão.

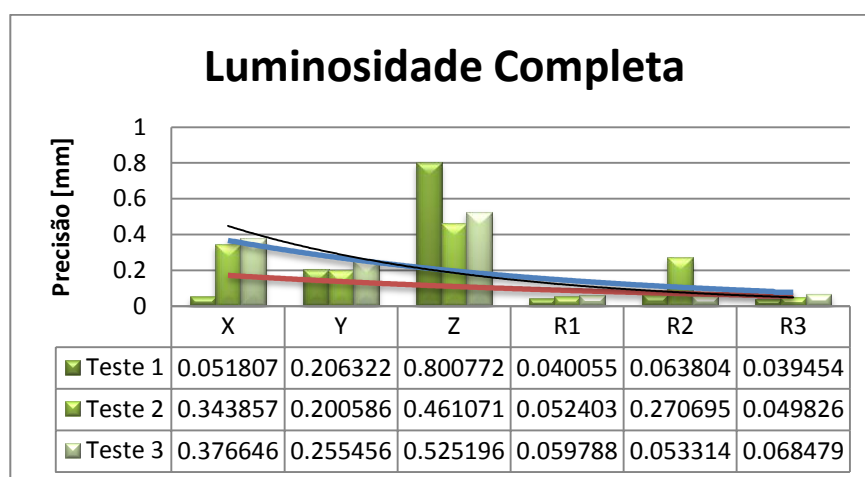


Figura 75 Precisão do Sistema frente à luminosidade completa.

As Tabela 12 e 13, possuem os dados que permitem estabelecer se as medidas foram significativas ou não, isto é, se as condições de luminosidade conseguem afetar o comportamento do sistema. Depois de realizada a análise, conclui-se que, o fator de baixa

luminosidade, o fator de luminosidade completa, e a interação entre esses dois, foram significativos. Definiu-se como fatores controláveis (FC): o fator controlável A associado à condição de baixa luminosidade, o fator controlável B à condição de luminosidade completa, lembrando que esta condição está relacionada com a ligação ou não, das lâmpadas fluorescentes presentes nas salas dos experimentos. A variável de resposta (VR) será a precisão do sistema de rastreamento ótico. Busca-se com esta análise determinar se existe uma diferença significativa entre os ambientes de luminosidade baixa e completa, nos quais opera o sistema de rastreamento ótico, influenciando a precisão do sistema. Além disso, tem-se 6 níveis aleatórios para cada fator controlável, os quais estão relacionados com o deslocamento de cada um dos seis graus de liberdade.

Por outro lado, SQ: Somas dos quadrados; GDL: São os graus de liberdade; MQ: são as médias quadradas; F_c : é o fator F calculado; F_t : é o fator F tabelado; desta forma, o efeito pode ser significativo se $F_c > F_t$, e caso contrário, o efeito será não significativo.

Tabela 12 Precisão do sistema frente a condições de luminosidade.

		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	R1 [°]	R2 [°]	R3 [°]
Baixa Luminosidade	Teste 1	0,07154	0,031603	0,031987	0,023134	0,010137	0,019044
	Teste 2	0,111265	0,044936	0,027531	0,018553	0,006282	0,029243
	Teste 3	0,068216	0,029957	0,027914	0,020444	0,010819	0,021864
Luminosidade Completa	Teste 1	0,051807	0,206322	0,800772	0,040055	0,063804	0,039454
	Teste 2	0,343857	0,200586	0,461071	0,052403	0,270695	0,049826
	Teste 3	0,376646	0,255456	0,525196	0,059788	0,053314	0,068479

Tabela 13 Projeto Fatorial Completo-2 Fatores Controláveis.

FV	SQ	GDL	MQ	F_c	F_t	Conclusões
A	0,30527	1	0,30527	46,10083	4,75	Significativo
B	0,33518	5	0,06704	10,12355	3,11	Significativo
AB	0,29727	5	0,05945	8,97851	3,11	Significativo
Erro	0,15892	24	0,00662			
TOTAL	1,09663	35				

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi implementado um sistema de rastreamento baseado em visão estéreo, para o reconhecimento e o mapeamento do deslocamento de artefatos dispostos no espaço tridimensional. Desta forma, esses artefatos, podem-se associar a pontos sobre o perfil do túnel, obtendo-se, dados que possibilitam a aplicação do método de convergências, o qual permite estabelecer as condições de estabilidade do túnel. Estudou-se o desempenho do sistema frente a condições do ambiente que surgem ao longo da construção de túneis, tais como, condições de luminosidade, presença de metais, vazamentos de água, e outros fatores que possam afetar as medidas e causem erros na estimativa da estabilidade do maciço.

Alguns ensaios foram realizados para analisar a precisão na posição estimada para cada eixo, no artefato de três marcadores, obtendo-se uma precisão de $\pm 0,1881$ mm, que foi apresentada no eixo **X**, sendo o pior caso em comparação com os eixos **Y** e **Z**. Em adição, os experimentos realizados para comparar o deslocamento medido pelo sistema e a variação feita pelo paquímetro, permitiu estabelecer uma sensibilidade do sistema de 0,99 mm, a qual foi calculada como o quociente entre a variação de uma medida do sistema com a variação do valor da grandeza medida.

Por outro lado, analisou-se também o desempenho do sistema, quando o número de marcadores que compõem um artefato é incrementado. Com isto, para um artefato de quatro marcadores, obteve-se uma precisão de $\pm 0,4952$ mm, com o qual, conclui-se que, um artefato com mais de três marcadores reduz os pontos ambíguos que possam se apresentar na postura do artefato, porém, compromete-se desta forma a precisão do sistema para estimar a posição do centro de massa do artefato.

O sistema implementado permite também a análise de outros três graus de liberdade do artefato, associados à rotação de cada um dos eixos **X**, **Y** e **Z**. Estas informações de rotação,

oferecem uma alternativa que não é possível obter com a instrumentação atual, já que, esses atuam somente em movimentos translacionais.

Embora tenham se obtido resultados importantes e dentro dos valores obtidos por outros sistemas de monitoramento, como foi apresentado no capítulo 3, ainda existem lacunas para estabelecer uma relação entre os parâmetros de configuração do sistema, tais como taxa de aquisição, tempo de exposição da imagem, latência, que permitam melhorar o desempenho do sistema. Em adição, o processo de calibração das câmeras, onde são obtidos os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, pode-se considerar como base principal para um desempenho qualitativamente exato e quantitativamente preciso do sistema de rastreamento. Cada teste realizado para calibração gerou um grupo de parâmetros, os quais foram utilizados um por um para analisar a correta detecção ou não dos artefatos, concluindo que deve-se utilizar a média para cada um dos parâmetros dentro de todo o grupo de experimentos realizados para o cálculo desses parâmetros. Os padrões de calibração foram construídos com a maior qualidade possível, com o objetivo de garantir diminuição do erro na calibração da origem do sistema de coordenadas espacial.

Os cenários dos testes mostraram uma mudança do desempenho do sistema. A configuração espacial das câmeras apresenta melhores resultados quando o espaço de trabalho tem um volume maior, permitindo-se uma distância horizontal maior entre elas, uma altura maior, tendo restrições dos ângulos de captura das lentes. Neste sentido, consegue-se uma calibração de melhor eficiência, permitindo melhor identificação de marcadores, e de artefatos.

7 TRABALHOS FUTUROS

Devido ao espaço de trabalho utilizado para alocação dos artefatos a serem detectados depender fortemente dos ângulos de captura das duas câmeras, realizou-se a integração de mais duas câmeras nos módulos de correspondência, sincronismo e calibração, porém não foram realizados testes para verificar o novo desempenho.

A configuração dos ângulos de inclinação dos protótipos que contêm as câmeras, é realizada empiricamente, por isso propõe-se modelar e utilizar um método de otimização matemática para estabelecer os ângulos e distâncias que gerem o maior espaço possível.

A conexão dos módulos de hardware é feita com cabo do tipo par trançado (para a conexão mestre-escravo), e cabo USB, para a transmissão da informação das câmeras até o computador onde serão processadas, limitando as distâncias em 5 m ou fazendo-se necessário o uso de repetidores, elevando assim o custo de instalação. Logo, pode-se estudar a utilização de outro tipo de barramento para realizar esta comunicação, que seja mais flexível e permita um maior número de interconexões de câmeras.

Analisar a perda de pacotes durante a transmissão no protocolo UDP para verificar o processamento das informações de imagem.

Pensando na inovação da gestão de construção de túneis, utilizar a tecnologia de rastreamento ótico para construir uma mina virtual, oferecendo um apoio no planejamento de obras de mineração. Finalmente, poderiam ser modelados os perfis do túnel gerando ambientes virtuais, os quais vinculam parâmetros reais obtidos do sistema de rastreamento ótico, e através disso, analisar a segurança e o comportamento que teria a construção frente às condições ambientais e de deslocamento do perfil do túnel.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. In: SYMPOSIUM CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY, 1971, Falls Church, USA. **Proceedings...** Falls Church, USA: ASP/UI, 1971. p. 1–18.
- BHALLA, S. *et al.* Structural health monitoring of underground facilities – Technological issues and challenges. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [S. l.], v. 20, n. 5, p. 487–500, September 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0886779805000234>>. Acesso em: 1 set. 2014.
- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock Mechanics for underground mining**. 3rd. ed. [S.l.]: Springer, 2006.
- DA MATA, C. M. D. **Aplicação de retroanálise em obras subterrâneas**. 2013. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- FURTADO, D. A. **Um Método Computacional Livre de Modelo Esquelético para Rastreamento e Reconstrução em Tempo Real de Múltiplos Marcadores em Sistemas de Captura de Movimento Ópticos**. 2013. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- GALO, M. **Automação dos Processos de Correspondência e Orientação Relativa em Visão Estéreo**. 2003. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- GANCE, J. *et al.* Target Detection and Tracking of moving objects for characterizing landslide displacements from time-lapse terrestrial optical images. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 172, p. 26–40, April 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001379521400009X>>. Acesso em: 27 jul. 2014.
- GOMES PRATA, D. A. **Gestão de riscos na construção de túneis e obras subterrâneas**. 2012. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012.
- GREFF, A. **A Low Cost One-camera Optical Tracking System for Indoor Wide-area Augmented and Virtual Reality Environments**. 2006. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GUTEMBERG, B. G. F. Optical motion capture: Theory and implementation. **Journal of Theoretical and Applied Informatics**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 61–90, 2005. Disponível em: <<http://dblp.uni-trier.de/db/journals/rita/rita12.html#Guerra-Filho05>>. Acesso em: 3 set. 2014.

GUTIERREZ, M. *et al.* An IT-based system for planning, designing and constructing tunnels in rocks. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [S. l.], v. 21, n. 3-4, p. 221-227, May 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0886779805001318>>. Acesso em: 1 set. 2014.

HARTLEY, R. I.; STURM, P. Triangulation. **Computer Vision and Image Understanding**, [S. l.], v. 68, n. 2, p. 146–157, November 1997. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1077314297905476>>. Acesso em: 1 set. 2014.

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision**. 2nd. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>>. Acesso em: 23 jul. 2014.

HIRATA, A.; KAMEOKA, Y.; HIRANO, T. Safety Management Based on Detection of Possible Rock Bursts by AE Monitoring during Tunnel Excavation. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, [S. l.], v. 40, n. 6, p. 563–576, January 2007. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00603-006-0122-7>>. Acesso em: 13 jan. 2014.

HUDSON, J.; HARRISON, J.; POPESCU, M. Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. **Applied Mechanics Reviews**, [S. l.], v. 55, n. 2, p. B30, April 2002. Disponível em: <<http://appliedmechanicsreviews.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1397000>>. Acesso em: 31 ago. 2014.

IVEKOVIC, S.; FUSIELLO, A.; TRUCCO, E. Fundamentals of multiple view geometry. In: SCHREER, O.; KAUFF, P.; SIKORA, T. (Ed.) **3D videocommunication: algorithms, concepts, and real-time systems in human centred communication**. Chichester, Hoboken, NJ: Wiley, 2005. p. 91–113.

JIA, P.; TANG, C. A. Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [S. l.], v. 23, n. 5, p. 500–507, November 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0886779807000971>>. Acesso em: 12 ago. 2014.

KATO, H.; BILLINGHURST, M. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON AUGMENTED REALITY, 1999, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: IEEE Comput. Soc, 1999. p. 85–94. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=803809>>. Acesso em: 31 ago. 2014.

KUHN, D.; PRÜFER, S. Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany.

Geomorphology, [S. l.], v. 213, p. 153–165, January 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X14000233>>. Acesso em: 3 jun. 2014.

LAN, H.; MARTIN, C. D.; ANDERSSON, J. C. Evolution of In Situ Rock Mass Damage Induced by Mechanical–Thermal Loading. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, [S. l.], v. 46, n. 1, p. 153–168, April 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00603-012-0248-8>>. Acesso em: 31 ago. 2014.

LOPES, A. P. R. **Mapeamento do potencial de instabilização de taludes rodoviários usando SIG e seções geológico-geotécnicas de campo com aplicação na rodovia SP-310**. 2007. 146 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Paulo, 2007.

MELÂNEO, F. **Obras Subterrâneas**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.

NASCIMENTO BASTOS, M. J. **A Geotecnia na Concepção, Projeto e Execução de Túneis em Maciços Rochosos**. 1998. 166 p. Dissertação (Mestrado em Georrecursos–Área de Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1998.

PAGLIA SESTREM, L. **Concepção e Implantação de um Plano de Instrumentação para Avaliação das Condicionantes Geotécnicas de uma Encosta Litorânea**. 2012. 195 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PALMSTROM, A.; SING, R. The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [S. l.], v. 16, p. 115–131, 2001.

PINTO, F.; BUAES, A.; FRANCIO, D. BraTrack: a low-cost marker-based optical stereo tracking system. In: SIGGRAPH, 2008, New York, NY, USA. **Proceedings...** New York, NY, USA: ACM, 2008. p. 131.

SANADA, H.; SUGITA, Y.; KASHIWAI, Y. Development of a multi-interval displacement sensor using Fiber Bragg Grating technology. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, [S. l.], v. 54, p. 27–36, September 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1365160912001001>>. Acesso em: 1 set. 2014.

SCHULZ, T.; LEMY, F.; YONG, S. Laser scanning technology for rock engineering applications. In: OPTICAL 3-D MEASUREMENT, 2005, **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005. Disponível em: <http://www.geometh-data.ethz.ch/downloads/schulz_tunnel_o3d_vienna.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2014.

SEIDENFUSS, T. **Collapses in Tunnelling Lausanne**. [S.l.: s.n.], 2006.

SHAPIRO, R. Direct Linear Transformation Method for Three-Dimensional Cinematography. **Research Quarterly**, [S. l.], v. 49, n. 2, p. 197–205, 1978.

SVOBODA, T.; MARTINEC, D.; PAJDLA, T. A Convenient Multicamera Self-Calibration for Virtual Environments. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 407–422, August 2005. Disponível em: <<http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/105474605774785325>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

THE INTERNATIONAL Association of Engineering Insurers. Disponível em: <<http://www.imia.com/>>. Acesso em: 3 set. 2014.

TRUCCO, E.; VERRI, A. **Motion**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998.

TSAI, R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. **Journal on Robotics and Automation**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 323–344, August 1987.

TSAI, R. Y. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, June 1986, Miami Beach, USA. **Proceedings...** Miami Beach, USA: IEEE, jun. 1986. p. 364–374.

YAZDANI, M. *et al.* Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [S. l.], v. 28, p. 41–48, March 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0886779811001179>>. Acesso em: 3 jun. 2014.

YIN, H. Y. *et al.* Dynamic monitoring research on displacement of rock mass in coal seam floor on the 1604 workface in NanTun coalmine, Shandong Province, China. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 26, p. 876–882, January 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705811050934>>. Acesso em: 3 jun. 2014.

ZHANG, L. Q. *et al.* A displacement-based back-analysis method for rock mass modulus and horizontal in situ stress in tunneling – Illustrated with a case study. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [S. l.], v. 21, n. 6, p. 636–649, November 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S088677980500129X>>. Acesso em: 3 jun. 2014.

ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. **Pattern Analysis and Machine Intelligence**, [S. l.], v. 22, n. 11, p. 1330–1334, 2000. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=888718>. Acesso em: 17 jun. 2014.

ZHANG, Z.; WAY, O. M. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 7, 1999, Kerkyra. **Proceedings...** Kerkyra: IEEE, 1999. p. 666–673. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=791289>>. Acesso em: 31 ago. 2014.