



**Diogo Marques
Batalha**

**Sistema de visão para avaliação de deformação
em superfícies complexas**



**Diogo Marques
Batalha**

**Sistema de visão para avaliação de deformação
em superfícies complexas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Abílio Manuel Borges, Assistente Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de António Manuel Godinho Completo, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Doutor Miguel Armando Riem de Oliveira
Bolseiro Pós-Doutoramento do Inesc-Porto

Prof. Abílio Manuel Borges
Assistente Convidado da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Agradeço ao professor Abílio Borges por toda orientação dada no desenvolvimento da minha dissertação de mestrado. Ao seu empenho e disponibilidade imediata sem os quais teria sido impossível concluir esta etapa. Agradeço também ao professor António Completo pela prontidão e ajuda sempre que foi necessário. Um agradecimento em especial aos meus pais e irmão que tornaram possível todo o meu projeto acadêmico. Agradeço à minha companheira Dominique Girão por todo o apoio e compreensão durante esta etapa da minha vida. Um agradecimento muito especial a todos os verdadeiros amigos que sempre prontos a ajudar tornaram também possível concluir esta etapa da vida. Ao Jorge Almeida, que com toda a disponibilidade me ajudou no desenvolvimento da minha dissertação de mestrado. Agradeço à empresa INFAIMON que gentilmente emprestou duas câmaras, para aquisição de imagens.

Palavras-chave

3D DIC; Visão Stereo; Optical Flow; Padrão de Speckle; Deslocamentos 3D; Deformação 3D

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema 3D DIC (*Digital Image Correlation*) para análise de deformação em superfícies complexas, utilizando técnicas de visão artificial, nomeadamente: visão *stereo* e 2D DIC. O sistema desenvolvido combina duas etapas: correspondência *stereo* e temporal. Esta técnica requer a aquisição do conjunto de imagens inicial, correspondente ao estado inicial do objeto, e a aquisição do conjunto de imagens final, após processo de deformação. O processo de calibração, utilizando um padrão xadrez, permite determinar a relação entre os referenciais das câmaras. A aplicação de um padrão de *speckles*, padrão aleatório e texturado, é determinante na correlação dos pixels entre as imagens e identificação dos pixels correspondentes. Para cálculo do mapa disparidade foi utilizado o algoritmo SGBM (*Semi Global Block Matching*). O mapa disparidade e os parâmetros de calibração permitem obter uma representação gráfica da nuvem de pontos tridimensional do cenário em análise, utilizando a biblioteca PCL (*Point Cloud Library*). A análise das imagens no espaço temporal permite determinar o deslocamento sofrido pelo objeto após processo de deformação. O campo de deslocamentos, aplicado à representação tridimensional da peça deformada, permite uma análise intuitiva do processo de deformação. Para validação do sistema desenvolvido, foi efetuada a análise de um processo de deformação juntamente com o sistema ARAMIS, sendo os resultados obtidos pelo sistema ARAMIS os de referência, permitindo determinar a fiabilidade do sistema de visão desenvolvido nesta dissertação.

Keywords

3D DIC; Stereo Vision; Optical Flow; Speckle Pattern; 3D Displacement; 3D Deformation;

Abstract

This thesis aims the development of a 3D DIC system (Digital Image Correlation) to analysis deformation on complex surfaces using techniques of artificial vision, namely: stereo vision and 2D DIC. The developed system combines two steps: stereo and temporal matching. This technique requires the acquisition of the initial image set, corresponding to the initial state of the object, and the acquisition of the final images, after deformation process. The calibration process, using a chessboard pattern, determines the relationship between cameras referential. Applying the random and textured pattern speckles, is crucial for the correlation of pixels between images and identifying the correspondent pixel. To calculate the disparity map was used SGBM algorithm (Semi Global Block Matching). The disparity map and the calibration parameters allow us to obtain a graphical representation of three-dimensional cloud points of the analysis scenario using the PCL library (Point Cloud Library). The temporal analysis of the images allows to determine the displacement of the object after deformation process. The displacement field applied to the three-dimensional representation of the deformed part, allows an intuitive analysis of the deformation process. For validation of the developed system, it was made the analysis of a deformation process with the developed system and ARAMIS system. The results obtained with ARAMIS considered as reference, allows to determine the liability of the vision system developed in this thesis.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Tabelas	iii
Lista de Figuras	v
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e Objetivos	1
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 Estado da Arte	3
2.1 Medição de Deformações	3
2.1.1 Métodos Mecânicos	3
2.1.2 Métodos Elétricos	4
2.1.3 Métodos Óticos	5
2.1.4 Sistemas Disponíveis para Medição de Tensões e Deformações	12
2.2 Técnicas de Imagem 3D	15
2.2.1 Tempo de voo	16
2.2.2 Visão Stereo	16
2.2.3 Photometric Stereo	18
2.2.4 Shape-from-Texture	19
2.2.5 Triangulação Laser	19
2.2.6 Luz Estruturada	21
3 Implementação	23
3.1 Calibração	23
3.1.1 Modelo de Câmara Pinhole	23
3.1.2 Distorção da lente	27
3.1.3 Geometria epipolar	28
3.1.4 Calibração Stereo	29
3.1.5 Procedimento de calibração	30
3.2 Stereo	31
3.2.1 Correspondência Stereo	31
3.2.2 Retificação e distorção do par de imagens stereo	32
3.2.3 Mapa Disparidade	32
3.2.4 Reconstrução 3D	34

3.3	Correspondência temporal	36
3.3.1	Análise de deslocamentos	36
3.3.2	Algoritmo optical flow	36
3.3.3	Deslocamentos 2D	37
3.4	Região de interesse	38
3.5	Processamento Nuvem de Pontos	39
3.5.1	Filtros aplicados	39
3.5.2	Processamento de Nuvem de Pontos	40
3.5.3	Tracking 3D	41
3.5.4	Malha de triângulos	41
3.5.5	Deslocamentos 3D	42
3.5.6	Interpolação dos Pontos 3D	43
3.5.7	Secções vertical e horizontal	43
4	Experiências e Resultados	45
4.1	Sistema Stereo	45
4.2	Aquisição de Imagens	47
4.3	Sistema Experimental	47
4.4	Preparação do Provete	49
4.5	Validação Calibração	49
4.6	Parâmetros da função SGBM	51
4.7	Parâmetros da função Gunnar Farneback	55
4.8	Validação Reconstrução tridimensional	56
4.9	Exemplos de Reconstrução Tridimensional	59
4.10	Análise de Deslocamentos	59
4.10.1	Secções do Provete	59
4.10.2	Reconstrução Tridimensional Provete	59
4.10.3	Tracking 3D	61
4.10.4	Análise de deslocamentos	61
4.11	Discussão de Resultados	63
5	Conclusões e Trabalho Futuro	71
5.1	Conclusões	71
5.2	Trabalho Futuro	72
	Referências	75

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros de utilização de algoritmo para construção de malha de triângulos	42
4.1	Propriedades das configurações selecionadas para o sistema <i>stereo</i>	45
4.2	Cálculo de profundidade	51
4.3	Validação calibração - cálculo de altura (altura real \mapsto 57.5 mm).	52
4.4	Parâmetros algoritmo SGBM.	54
4.5	Parâmetros função <i>farneback</i>	56
4.6	Erro médio entre a nuvem de pontos e o plano teórico.	58
4.7	Erro no cálculo dos deslocamentos na secção horizontal	63
4.8	Erro no cálculo dos deslocamentos na secção vertical	63

Lista de Figuras

2.1	Extensômetro mecânico	3
2.2	Representação esquemática de extensômetro elétrico.	4
2.3	Técnica FBG [1].	5
2.4	Padrões de moiré	6
2.5	Padrão de <i>moiré</i> . a) Corpo não deformado b) Corpo deformado	7
2.6	Padrão de <i>moiré</i> interferométrico.	8
2.7	Princípio de funcionamento da técnica <i>moiré</i> interferométrico.	8
2.8	Padrão fotoelástico	9
2.9	Princípio de funcionamento holografia digital	10
2.10	Padrão de Interferência	10
2.11	Princípio de funcionamento da técnica 3D-DIC.	11
2.12	Sistema Aramis	12
2.13	Sistema Argus	14
2.14	Shimadzu	15
2.15	Princípio de funcionamento da técnica <i>tempo de voo</i>	16
2.16	Correspondência <i>stereo</i>	18
2.17	<i>Photometric stereo</i>	19
2.18	Resultado de aplicação de algoritmo <i>shape-from-texture</i>	20
2.19	Princípio de funcionamento da técnica triangulação laser	20
2.20	Técnica triangulação laser representada em 2D	21
2.21	Técnica luz estruturada	22
3.1	Técnica 3D DIC, correspondência <i>stereo</i> e temporal.	24
3.2	Modelo de câmara <i>pinhole</i>	25
3.3	Sistema de coordenadas da câmara e do plano de imagem.	26
3.4	Transformação entre o referencial mundo e o referencial da câmara.	27
3.5	Distorção radial	28
3.6	Distorção tangencial	28
3.7	Geometria epipolar.	29
3.8	Calibração <i>stereo</i> : representação do referencial mundo e referencial das câmaras	30
3.9	Colocação do tabuleiro xadrez em diferentes posições no espaço tridimensional.	30
3.10	Deteção de interseções do tabuleiro xadrez.	31
3.11	Correspondência <i>stereo</i> : identificação de pixel (bloco) correspondente na imagem esquerda e direita	32

3.12	Retificação e distorção de conjunto de imagens <i>stereo</i>	33
3.13	Retificação par de imagens <i>stereo</i>	33
3.14	Agregação de custos no espaço disparidade	34
3.15	Sistema de visão <i>stereo</i> retificado	34
3.16	Profundidade varia inversamente com a disparidade	35
3.17	Correspondência temporal, identificação de pixel correspondente na imagem de referência e imagem após deformação	37
3.18	Deslocamentos 2D: representação de pontos da peça de referência a vermelho e após deformação a verde.	38
3.19	Região de interesse selecionada na imagem retificada esquerda	39
3.20	Resultado de aplicação de máscara ao mapa tridimensional	39
3.21	Volume de trabalho	40
3.22	Nuvem de pontos tridimensional.	40
3.23	Tracking 3D: nuvem de pontos da peça no estado inicial e após deformação, representadas a verde e a vermelho respetivamente.	41
3.24	Malha de triângulos.	42
3.25	Campo de deslocamentos	43
3.26	Interpolação de valor de deslocamentos	44
3.27	Vista das secções	44
4.1	Sistema <i>stereo: Raspberry Pi</i>	46
4.2	Especificações técnicas Genie 1280.	46
4.3	Configurações adotadas para aquisição de imagens	46
4.4	Estúdio de Trabalho	47
4.5	Sistema experimental para aplicar o processo de deformação.	48
4.6	<i>ARAMIS</i> vs Sistema implementado	48
4.7	Padrão de <i>Speckles</i>	49
4.8	Cilindro de calibração	50
4.9	Validação da calibração	50
4.10	Cálculo de profundidade.	51
4.11	Cálculo de altura.	52
4.12	Mapa disparidade obtido a partir de par de imagens <i>stereo</i> retificadas	55
4.13	Validação tridimensional	57
4.14	Distância do ponto ao plano	58
4.15	<i>Baseline narrow</i>	60
4.16	<i>Baseline medium</i>	60
4.17	<i>Baseline wide</i>	60
4.18	Reconstrução tridimensional e secções aplicadas ao provete	61
4.19	<i>Tracking</i>	62
4.20	Deslocamentos na direção X	67
4.21	Deslocamentos na direção Y	68
4.22	Deslocamentos na direção Z	69
4.23	Norma dos deslocamentos	70

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Desde as primeiras civilizações, a medição é de extrema importância, uma vez que permite determinar quantitativamente e qualitativamente dimensões, por comparação, com um padrão conhecido.

Atualmente existe um vasto leque de técnicas e algoritmos capazes de quantificar medições. Tal evolução deve-se ao desenvolvimento tecnológico, em resposta à necessidade de desenvolver sistemas capazes de avaliar medições com maior grau de exatidão.

O desenvolvimento dos sistemas de medição permitem analisar o processo de deformação aplicado ao objeto em estudo, capaz de estabelecer correspondência temporal, do estado do objeto numa fase de referência e na fase após deformação. Tornando possível a quantificação do processo de deformação, correspondente à variação temporal da geometria do objeto em estudo.

O processo de deformação aplicado ao objeto em estudo, originado normalmente por uma carga ou mudança de temperatura do corpo, conduz ao movimento de pontos individuais do componente que acompanham a carga aplicada ao objeto, sendo esse movimento designado como deslocamento. Denomina-se deslocamento de corpo rígido, quando não ocorre deformação, ou seja, quando ocorrem rotações e/ou translações de todos os pontos do corpo em simultâneo. Denomina-se deformação, quando um conjunto de pontos do corpo se movimentam, relativamente a outros, de tal forma que ocorra alteração da forma e/ou tamanho do corpo associado a uma carga aplicada.

Os primeiros métodos de análise de processos de deformação, apenas permitiam quantificar ordens de grandeza elevadas, em que eram utilizados métodos de sistema com contacto. Com o desenvolvimento tecnológico novos sistemas foram desenvolvidos surgindo a medição sem contacto. Existe uma grande variedade de ferramentas e métodos no mercado, nomeadamente métodos mecânicos, elétricos e óticos.

1.2 Motivação e Objetivos

Com o desenvolvimento tecnológico, tem crescido nas áreas da engenharia, a necessidade de analisar processos de deformação com elevado grau de resolução e precisão. Os sensores presentes no mercado permitem a aquisição de dados com elevada precisão. A possibilidade de aquisição de dados, de áreas mais abrangentes, revela-se uma grande

vantagem, visto que permite ao utilizador selecionar uma região de interesse. Nesta dissertação de mestrado propõe-se o desenvolvimento de um sistema de visão, capaz de avaliar e analisar processos de deformação, aplicados a objetos com superfícies complexas, independentemente do tipo de material. Das várias técnicas existentes, a técnica adotada, deve consistir em 3D DIC (*Digital Image Correlation*), que combina a técnica de visão *stereo* com a técnica 2D DIC. Este sistema deve ser capaz de quantificar deslocamentos e deformações. Deverá ser efetuado uma reconstrução tridimensional do objeto a analisar, numa fase inicial e numa fase final, em que o objeto já se encontra deformado. A correspondência temporal dos pontos na transição de uma fase inicial e final deverá permitir quantificar deslocamentos. Deverá, ainda, ser efetuada uma representação gráfica que permita analisar as diferentes zonas, com correspondente deslocamento e deformação.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento apresenta-se dividido em 5 capítulos.

No capítulo 1 é realizada uma apresentação do enquadramento do trabalho a desenvolver. É apresentada a motivação e objetivos para desenvolvimento da dissertação de mestrado.

O capítulo 2 consiste no estado da arte, no qual se encontram mencionadas várias técnicas de medição de deslocamentos e deformações, bem como técnicas de reconstrução tridimensional.

No capítulo 3 é descrito todo o processo implementado para análise de deslocamentos e deformações tridimensionais. Descreve-se todo o processo de calibração do sistema *stereo* e o processo de reconstrução tridimensional. É abordada a correspondência *stereo* e temporal. Refere-se o funcionamento dos algoritmos utilizados e os valores dos parâmetros adotados.

No capítulo 4 são descritas as experiências realizadas e os resultados obtidos.

No capítulo 5 encontram-se as conclusões do presente trabalho e objetivos alcançados, assim como opções de continuidade de trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Medição de Deformações

Existem vários métodos experimentais para análise de deformações e tensões. Estes podem ser divididos em mecânicos, elétricos e óticos. Os métodos óticos apresentam várias vantagens, nomeadamente o facto de se tratar de um método de medição sem contato permite maiores velocidades de aquisição e a possibilidade de analisar superfícies quentes e complexas.

2.1.1 Métodos Mecânicos

Extensómetro Mecânico

O extensómetro mecânico (*clip gage*) é um dispositivo utilizado normalmente em ensaios de tração. A extensão e compressão do objeto origina movimentos nos braços do dispositivo. O movimento é quantificado através de extensómetros de resistência elétrica. É enviado um sinal elétrico proporcional ao movimento do braço do dispositivo [2]. Na figura 2.1, observa-se um extensómetro mecânico aplicado num ensaio de tração.

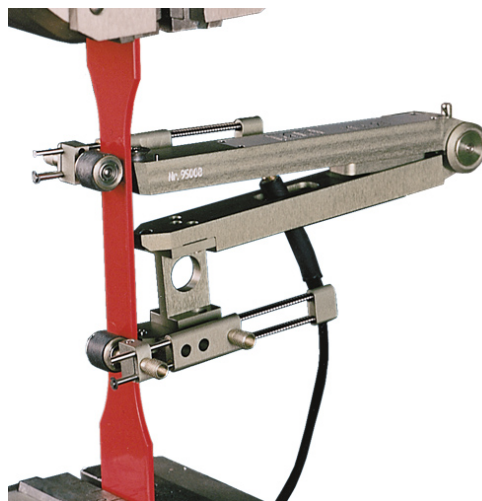


Figura 2.1: Extensómetro mecânico.

2.1.2 Métodos Elétricos

Extensômetro Elétrico

Na análise de tensões por extensometria, o sistema de medição é formado por um extensômetro que permite quantificar e analisar deformações. O princípio de funcionamento baseia-se numa das características dos condutores elétricos [Lord Kelvin, 1856], segundo a qual a resistência elétrica varia em função da deformação a que o extensômetro está exposto [3].

O extensômetro elétrico (*strain gage*) consiste num dispositivo formado por um condutor elétrico em forma de grelha, como está ilustrado na figura 2.2. Os extensômetros devem ser colados ao objeto que se pretende analisar. A direção do eixo extensométrico deve ser a mesma direção que se pretende analisar a deformação. A leitura das variações de resistência devido ao processo de deformação é efetuada através de uma ponte de *Wheatstone*, obtendo uma diferença de potencial de baixa amplitude, que deve ser acondicionado e amplificado, equivalente à grandeza a medir.

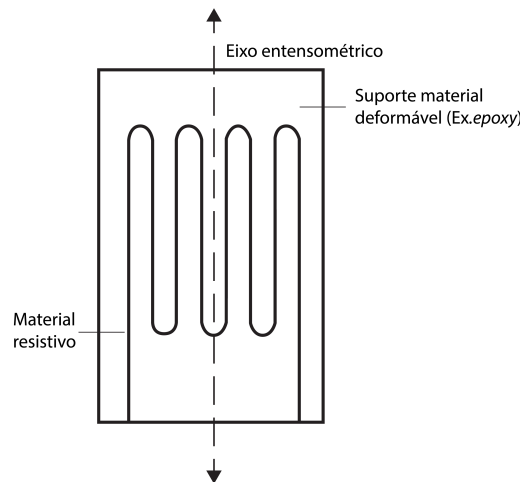


Figura 2.2: Representação esquemática de extensômetro elétrico.

Fibras de Bragg Grating

As fibras de *Bragg Grating* (FBG) são um dispositivo normalmente utilizado nas telecomunicações e em sensores de fibra ótica para medição de tensão, temperatura e pressão.

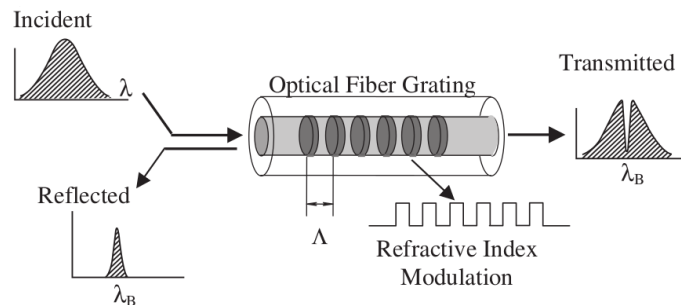
As FBG são formadas por uma alteração periódica no índice refrativo da fibra tubular, na direção de propagação da radiação ótica que atuam como um filtro de espectros que reflete certos comprimentos de onda de luz perto do comprimento de onda da ressonância de *Bragg*. Os restantes sinais óticos de espectro não são retidos pelo filtro. O comprimento de onda de ressonância de *Bragg* é dado pela equação 2.1 [1].

$$\lambda_{Bragg} = 2 \times neff \times \Delta \quad (2.1)$$

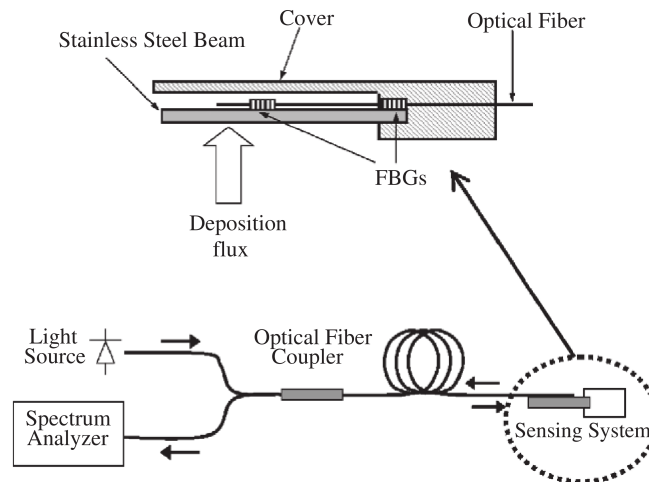
O comprimento de onda de ressonância é dado por λ_{Bragg} , $neff$ corresponde ao índice de refração efetivo e Δ à variação periódica da FBG.

O comprimento de onda de ressonância de *Bragg* é condicionado por vários fatores, que afetam o índice de refração tais como a temperatura e a deformação mecânica. Nas aplicações reais torna-se difícil separar cada um destes fatores o que obriga à sua quantificação.

Têm sido desenvolvidos vários tipos de sensores com FBG, no entanto, a maioria utiliza o processo longitudinal para medição da deformação principal que resulta em deslocamentos maiores de sinais óticos do comprimento de onda, quando comparados com o processo lateral que corresponde a deslocamentos menores. Na figura 2.3 pode-se observar o princípio de funcionamento das FBG.



(a) Princípio de funcionamento da técnica FBG [1].



(b) Aplicação da técnica FBG [1].

Figura 2.3: Técnica FBG [1].

2.1.3 Métodos Óticos

Moiré

O efeito *moiré* consiste na sobreposição de dois padrões uniformes de linhas ou pontos com o mesmo espaçamento, originando os padrões de *moiré*. Na figura 2.4 observa-se o efeito dos padrões de *moiré*, uma grelha de linhas rodada sobre um ângulo α em relação à grelha de referência, produz zonas de sombra quando as linhas estão em

diferença de fase. Quando o ângulo entre as grelhas é aumentado, a separação entre zonas claras e escuras aumenta.

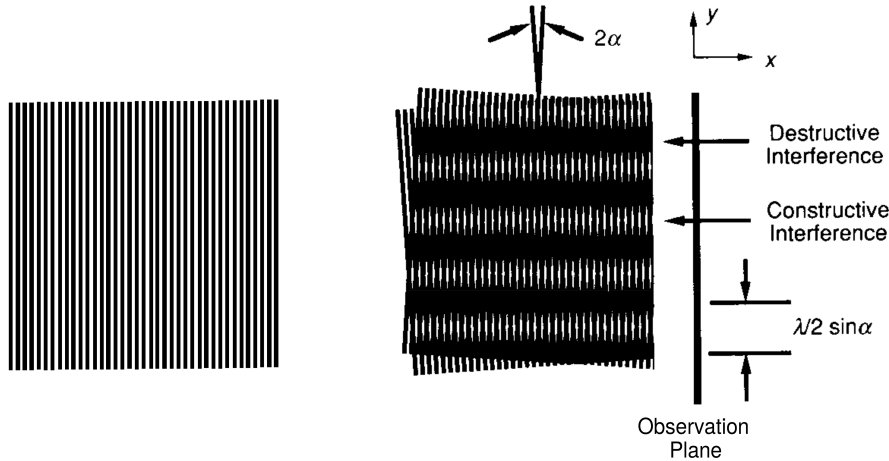


Figura 2.4: Padrões de *moiré* [4].

Os padrões de *moiré* amplificam o movimento e permitem elevada sensibilidade a medições de movimentos relativos, [Cloud, 1998], o que confere a esta técnica alta aplicabilidade na análise de deformação no plano para determinar os campos do deslocamento (u, v) ou de deformações (Ex, Ey) na superfície plana de corpos sujeitos a deformação [5].

Esta técnica pode ser utilizada para medição de deslocamentos e análise de tensões bem como para leitura do contorno dos objetos. A medição de deslocamentos é efetuada por comparação dos padrões de *moiré* obtidos antes e depois do processo de deformação aplicado ao objeto.

Utilizando técnicas de medição de fase, a relação entre os padrões de *moiré* podem ser obtidos quantitativamente. Quando as linhas de contorno são diretas e igualmente espaçadas na superfície do objeto, então a superfície de referência é um plano. Se as linhas do padrão de *moiré* não forem diretas e tiverem diferentes espaçamentos, a superfície de referência não é um plano.

Moiré Geométrico

A técnica de *moiré* geométrico consiste na medição de deslocamentos no plano. Esta técnica requer a utilização de duas grelhas periódicas com a particularidade de necessitar de uma grelha fixa ao corpo em estudo. A análise do padrão de *moiré* permite quantificar as diferenças de passo e orientação entre as estruturas sobrepostas.

A grelha aplicada ao objeto antes do processo de deformação é igual à grelha de referência. Enquanto garantida a igualdade das grelhas a intensidade de luz que atravessa as grelhas sobrepostas é máxima; pelo contrário, quando as grelhas deixarem de coincidir a intensidade de luz atinge valores mínimos.

As posições relativas entre as duas grelhas permitem analisar e quantificar a deformação. Quando sujeito a processos de deformação, a densidade das linhas da grelha fixa ao corpo aumenta em casos de compressão e diminui em casos de tração, originando variações nas intensidades luminosas [5].

Na figura 2.5 está esquematizada a técnica de *moiré* geométrico e a formação de padrões.

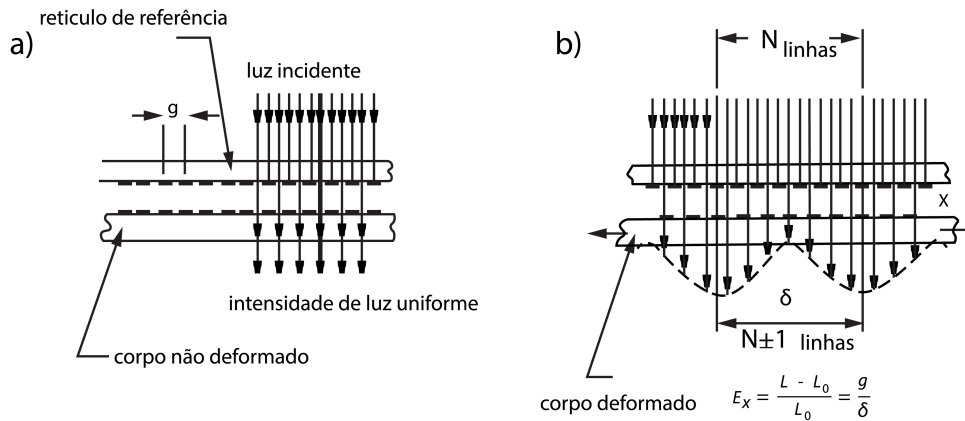


Figura 2.5: Padrão de *moiré*. a) Corpo não deformado b) Corpo deformado [6].

Moiré Interferométrico

Moiré interferométrico (MI) tornou-se uma técnica bastante importante a nível industrial, de investigação e desenvolvimento académico. Esta técnica permite a medição de deformações no plano de objetos sólidos, quando sujeitos a forças de compressão e tração e mudanças de temperatura.

A técnica de *moiré* interferométrico tem sido aplicada na investigação de materiais compósitos, policristalinos, piezoelétricos, materiais em camadas, elementos e juntas estruturais.

Para medições no plano, a técnica tem evoluído significativamente desde o *moiré* geométrico, permitindo analisar e medir a geometria do objeto em estudo e alteração de forma da superfície. Esta técnica pode ser utilizada para deformações elásticas e plásticas, em materiais isotrópicos e anisotrópicos como para compressões mecânicas, térmicas e dinâmicas [7].

[Weissman, 1981] desenvolveu o padrão de *moiré*. Na figura 2.6 observa-se o campo de deslocamentos vertical em torno de um furo numa placa em compressão.

O sistema utilizado está representado na figura 2.7. É aplicada uma grelha de linhas laser no provete, que acompanham o movimento do objeto, quantificando a deformação aplicada. Um sistema de espelho de *Lloyd's* origina um padrão de interferência no mesmo local, que consiste no padrão de referência.

Uma das vantagens da técnica de (MI) relativamente ao *moiré* geométrico é a possibilidade de aplicar ao provete grelhas de referência de alta sensibilidade.

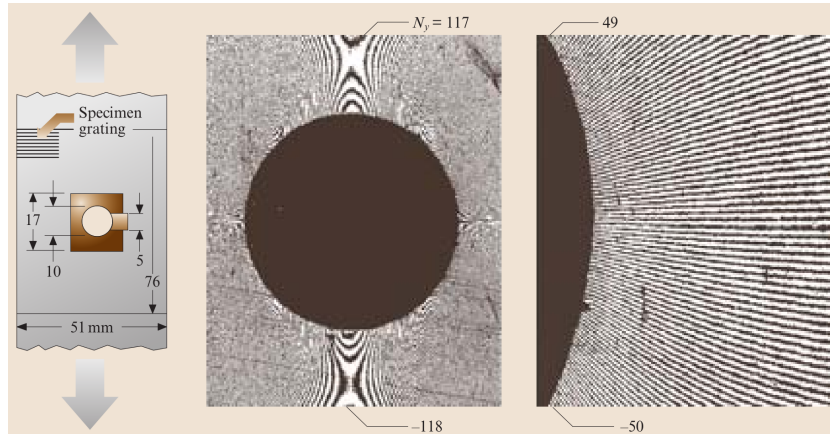


Figura 2.6: Padrão de *moiré* interferométrico [7].

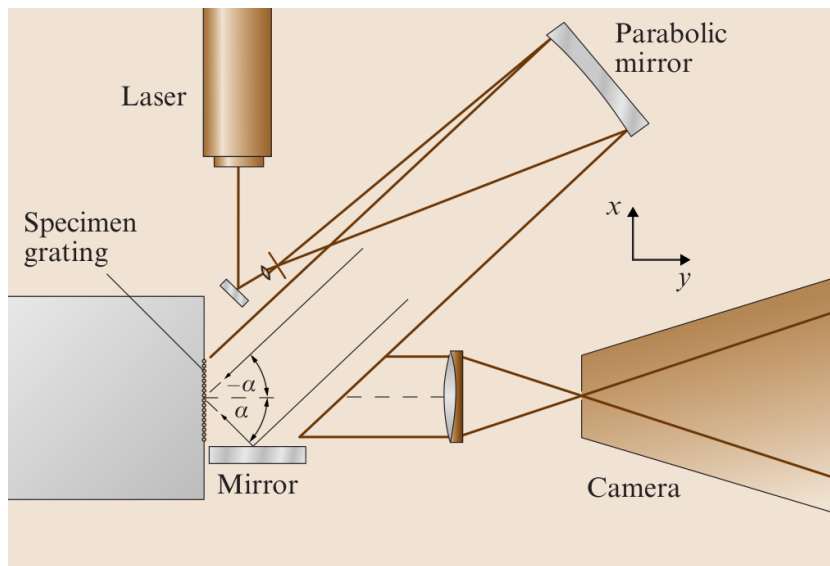


Figura 2.7: Princípio de funcionamento da técnica *moiré* interferométrico [7].

Fotoelasticidade

Fotoelasticidade é uma técnica direcionada para análise de tensões e deformações em objetos com geometrias complexas e tensões aplicadas bastante condicionadas.

A análise fotoelástica é bastante utilizada para estudo de tensões e deformações em que a estrutura a analisar tem grande área, o que proporciona uma escolha detalhada das regiões de interesse, nas áreas que apresentam valores de tensão elevados na superfície e nos pontos interiores da estrutura, possibilitando também desprezar áreas sem interesse de estudo.

Este método tem a particularidade de utilizar alguns materiais plásticos transparentes. Podem ser realizados modelos do objeto a analisar em material fotoelástico. Quando não é desenvolvido um modelo, pode-se colocar uma camada fina de material fotoelástico a envolver o corpo em estudo.

Quando o modelo se encontra pressionado e um feixe de luz polarizada incide no

modelo ao longo da direção de tensão principal, este feixe de luz é dividido em duas componentes de onda, cada uma com o seu plano de vibração (plano de polarização) paralelo com uma das duas direções principais restantes (plano onde a tensão é zero). Adicionalmente, a luz atravessa estes dois trajetos com velocidades diferentes dependendo da tensão aplicada ao material. Na figura 2.8 está representado um padrão foto-elástico.

Esta técnica possui a vantagem de ter aplicação em análise em duas e em três direções. Oferecendo também uma oportunidade única para a análise das tensões no interior do corpo em estudo [8].

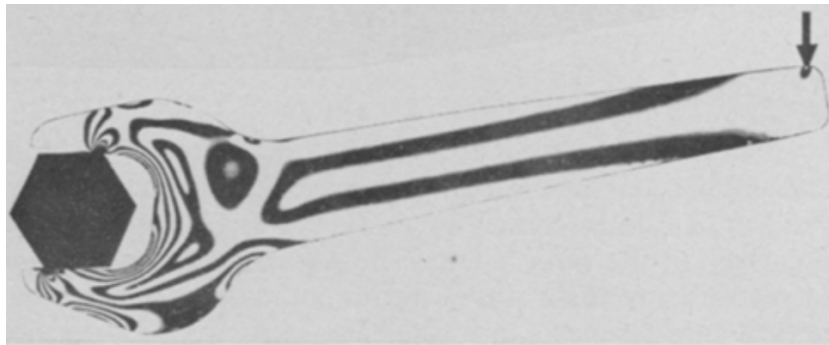


Figura 2.8: Padrão fotoelástico [8].

Holografia Interferométrica

A maioria da informação que recebemos do mundo vem sobre a forma de ondas sonoras e luminosas. Holografia digital é a técnica que permite a emissão, captura, reconstrução e análise de ondas.

O conceito de holografia digital pode ser visualizado na figura 2.9. Podem ser utilizadas várias configurações para esta técnica, no entanto um sistema típico é constituído por um laser, espelhos, lentes e uma câmara CCD (*Charge Couple Device*). A luz laser após incidir numa lente é dividida em duas ondas parciais. A primeira onda incide na superfície do objeto, sendo refletida para a câmara. A segunda onda, de referência, incide na câmara diretamente. Deste modo ambas as ondas interferem originando um padrão de interferência, que se denomina holograma [9].

A holografia interferométrica é uma técnica sem contato, com elevada resolução, que permite uma análise estática e dinâmica dos deslocamentos, nas três direções, aplicados à superfície do objeto, causados por processos de deformação, em objetos constituídos por materiais opacos ou transparentes.

Deste modo, devem ser adquiridos dois hologramas em tempos diferentes. A primeira aquisição deve ser efetuada no estado de referência, na qual o objeto ainda não foi sujeito ao processo de deformação. A segunda aquisição, deverá ser efetuada com a peça deformada. A sobreposição dos dois hologramas, resulta num padrão de interferência causado pela diferença de fase entre o holograma de referência e o holograma da peça deformada. Encontra-se representado na figura 2.10 um padrão de interferência [10].

Digital Image Correlation

Digital Image Correlation (DIC) é uma técnica sem contacto utilizada para análise de

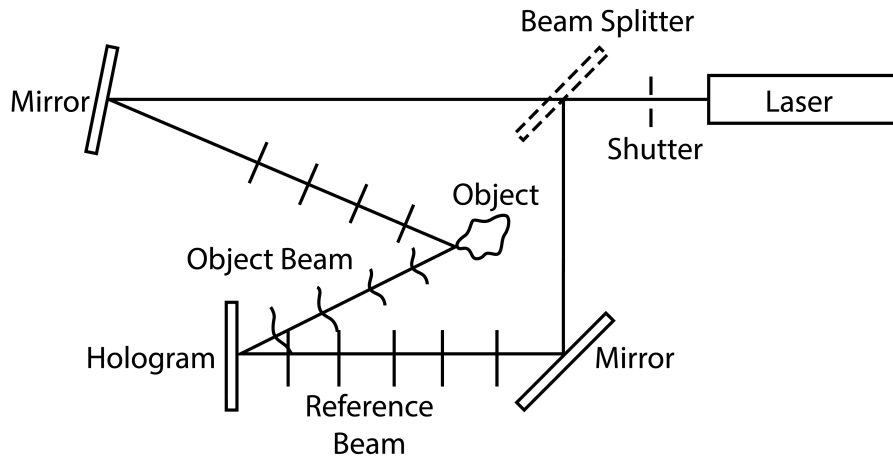


Figura 2.9: Princípio de funcionamento holografia digital [9].



Figura 2.10: Padrão de Interferência [10].

deslocamentos no plano, a partir de duas imagens digitais, imagem de referência, antes de ser aplicado processo de deformação ao objeto em estudo e imagem deformada, após aplicação do processo de deformação. O sistema ótico, constituído por uma só câmara, define a resolução da medição de deslocamentos, uma vez que a análise é efetuada nas imagens adquiridas pela câmara.

Esta técnica permite a análise de vários tipos de materiais, tais como, plásticos, madeira, cerâmicos, têxteis, compósitos quer com geometrias simples quer complexas.

A aplicação de um padrão de *speckles*, padrão texturizado e aleatório, permite definir a similaridade entre as imagens e identificar possíveis correspondências. O padrão aplicado

ao objeto adere à sua superfície e acompanha o processo de deformação. A preparação da superfície do objeto em estudo tende a ser rápida e fácil.

Devem ser utilizadas fontes de iluminação, de cor branca, estáveis e controláveis, direcionadas para o objeto em estudo, de modo a garantir um bom contraste nas imagens e precisão na correspondência do padrão. O que leva a que a maioria das aquisições com esta técnica sejam efetuadas em laboratório, permitindo controlar mais facilmente o ambiente. Nas aquisições em meio exterior, em que ocorrem variações nas fontes de iluminação a similaridade entre imagens tende a diminuir.

Os métodos que utilizem o cálculo do gradiente, que contabilizem os níveis de cinzento da imagem, permitem uma resolução de aquisição ao sub-pixel. Para tal, funções de interpolação que contabilizem uma vizinhança de pixels garantem corretas correspondências entre as imagens [11].

Para análise de deformações 3D, fora do plano, a técnica 2D-DIC combinada com a técnica visão *stereo* permite a análise de deformações nas três direções. Observa-se na figura 2.11 o princípio de funcionamento da técnica 3D-DIC [12].

A aquisição de um conjunto de imagens num estado inicial, e de um conjunto de imagens após aplicado o processo de deformação, permitem quantificar a deformação aplicada ao objeto em estudo. A partir da técnica visão *stereo* é possível obter, do conjunto de imagens, a reconstrução tridimensional. A análise das imagens obtidas no espaço temporal, permitem identificar a correlação dos pixels correspondentes nas imagens sequenciais. A partir do processo de calibração é possível obter os deslocamentos e deformações nas três direções $[X, Y, Z]'$.

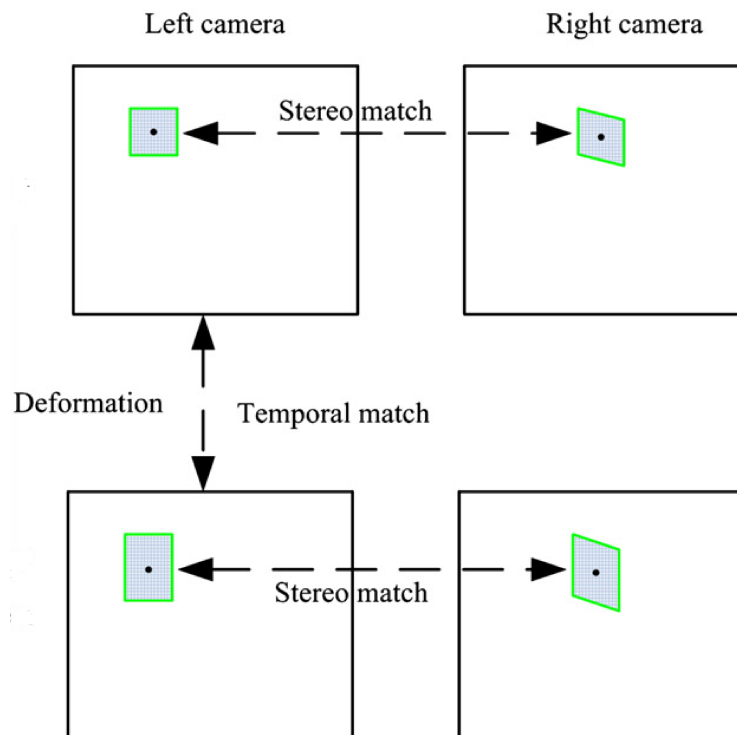


Figura 2.11: Princípio de funcionamento da técnica 3D-DIC [12].

2.1.4 Sistemas Disponíveis para Medição de Tensões e Deformações

ARAMIS

ARAMIS é um sistema ótico de medição sem contato para análise de deformação tridimensional.

A representação gráfica dos resultados de medição obtidos por este método, proporciona uma boa análise do comportamento do objeto. A aquisição de um par de imagens permite a reconstrução tridimensional e cálculo de coordenadas tridimensionais para cada ponto na imagem. A primeira aquisição durante o processo de deformação corresponde ao estado inicial, sem deformação.

Durante o processo de deformação é adquirido um conjunto de imagens para cada estágio que após processadas, é calculado o deslocamento e deformação das características do objeto, através do sistema ARAMIS. As superfícies homogêneas devem ser preparadas aplicando por exemplo um padrão de *speckles*.

O sistema *ARAMIS* é adequado para análise de deformação tridimensional, quer em regime estacionário quer dinâmico. A maioria das funções do sistema são controladas pelo software, e dispõe de vários campos de utilização [13]:

- Teste de materiais;
- Dimensionamento de componentes;
- Análise de força;
- Análise de comportamento não linear;
- Análise do comportamento de materiais durante o processo de deformação;
- Processamento de tensões;
- Determinação de curvas de conformação limite;
- Determinação das características dos materiais.

Na figura 2.12 é possível visualizar o hardware utilizado pelo sistema.



Figura 2.12: Sistema Aramis [13].

ARGUS

ARGUS é um sistema ótico sem contato para análise de deformação tridimensional normalmente em peças metálicas.

Este sistema proporciona o cálculo tridimensional da superfície do objeto, bem como a distribuição de deformação na superfície e redução de espessura. Nos diagramas de curvas de conformação limite, a leitura de deformação é comparada com as características do material.

Este sistema, suporta a otimização de processos de conformação de chapas metálicas a partir de:

- Detecção de áreas com deformação crítica;
- Verificação de simulações numéricas;
- Determinação de curvas Conformação Limite.

O sistema permite comparar as posições tridimensionais de um padrão de pontos num estado de referência, antes de ser aplicado o processo de deformação, com os pontos após processo de deformação. Deste modo, deve ser aplicado um padrão regular de pontos à superfície do objeto em estudo.

O padrão regular de pontos pode ser aplicado a partir de processos eletrolíticos, para análise de processos de deformação com grandes fricções, garantindo a visibilidade dos pontos na superfície do objeto.

Após o processo de deformação, devem ser adquiridas várias imagens de posições distintas do objeto em análise. A colocação de objetos de calibração perto do objeto em análise permite a orientação espacial automática, permitindo a relação do padrão de pontos nas sucessivas imagens como é possível visualizar na figura 2.13. Relacionando as várias imagens obtidas de diferentes pontos de vista é possível calcular a posição tridimensional dos vários pontos e localização das sucessivas posições da câmara para aquisição de imagem.

O processamento da deformação existente é efetuado comparando o padrão regular de pontos antes do processo de deformação, com os pontos existente na peça após processo de deformação.

O padrão regular de pontos para cálculo do processo de deformação não é adquirido óticamente, mas resulta sim do espaçamento teórico entre os pontos definido nos parâmetros do projeto. Deste modo, o sistema ARGUS é capaz de definir a grandeza de erro no processo de marcação do padrão de pontos [14].

A aquisição de um conjunto de imagens do objeto no estado de referência, a partir da técnica visão *stereo*, permite efetuar a reconstrução tridimensional referente ao estágio inicial. A aquisição de um conjunto de imagens nos diferentes estágios do processo de deformação aplicado ao objeto em análise, permite quantificar intuitivamente a deformação sofrida pelo objeto. A análise temporal dos sucessivos conjuntos de imagens permite identificar os pontos correspondentes e estabelecer uma correspondência temporal nos diferentes estágios do processo de deformação. A análise sequencial dos diferentes estágios confere a este sistema ótico a capacidade de analisar deformações elevadas, uma vez que a similaridade entre as sucessivas imagens é garantida.

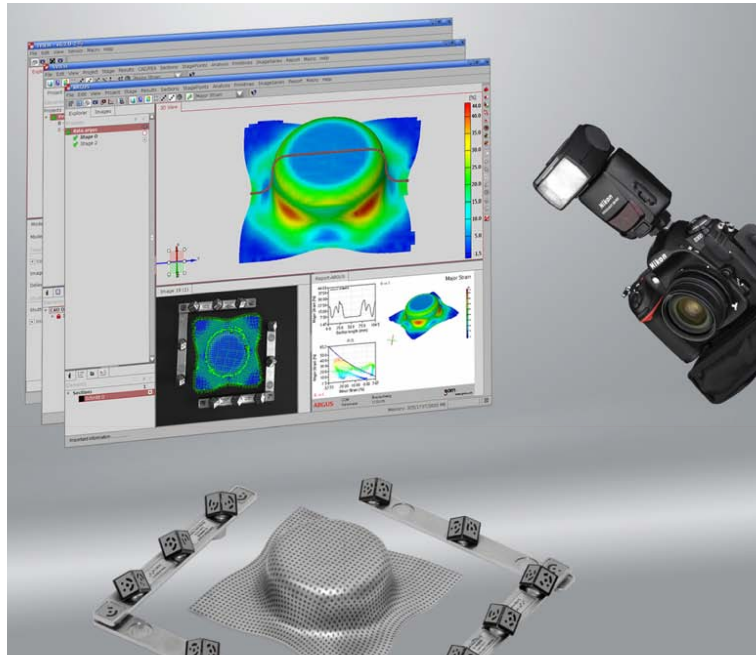


Figura 2.13: Sistema Argus [14].

SHIMADZU

A *Shimadzu AG-X* é uma máquina de ensaios tração-compressão que garante um elevado nível de controlo e performance no processo de medição, utilizando tecnologias desenvolvidas a partir de modelos convencionais, (figura 2.14). Adicionalmente, o foco do desenvolvimento direciona-se para operações intuitivas e suporte de funções práticas [15].

Possui ainda um ecrã *lcd touch* para operações sem comando. O software utilizado é o *TRAPEZIUM X* que permite o controlo de várias funções:

- Funções de poupança de energia durante o período de inatividade;
- Garra pneumática com operação de engrenagem;
- Calibração automática;
- Velocidade do ensaio controlável;
- Leitura automática das propriedades das células de carga;
- Amostragem do valor de tensão aplicado;
- Detecção de rutura;
- Teste de força e indicação de curso;
- Teste de força e controlo de tensão.



Figura 2.14: Shimadzu [15].

2.2 Técnicas de Imagem 3D

As técnicas de imagem 3D permitem identificar a forma e geometria dos objetos para aplicações como, navegação robótica, sistemas de visão, e prototipagem rápida [16].

Estas técnicas requerem a aplicação de sensores com capacidade de aquisição, processamento e armazenamento de dados tridimensionais, bem como o recurso a softwares existentes no mercado e desenvolvimento de novos programas.

A reconstrução 3D pode ser obtida utilizando diferentes métodos:

- *Stereo Vision* (Visão *Stereo*);
- *Laser Triangulation* (Triangulação Laser);
- *Structured Light* (Triangulação com Luz Estruturada);
- *Time of Flight* (Tempo de Voo);
- *Interferometry* (Interferometria);
- *Holography* (Holografia);
- *Moiré* (Moiré);
- *Shape from Texture* (Forma deduzida da Textura);
- *Shape from Shadow* (Forma deduzida da Sombra);
- *Shape from Focusing* (Forma deduzida da Focagem).

A escolha do método a ser utilizado depende das características, precisão a obter e foco do trabalho a desenvolver, uma vez que qualquer uma das abordagens apresenta vantagens e desvantagens. Limitações ambientais em que os objetos estão inseridos, questões de iluminação, deformação e forma dos objetos são fatores importantes na escolha do método.

2.2.1 Tempo de voo

Tempo de voo é uma técnica de aquisição 3D que permite a captura de uma nuvem de pontos 3D, com velocidade de aquisição de 30 a 50 *fps* (*frames per second*), sendo esta a principal vantagem relativamente a outros sistemas de visão. A aquisição pode ser efetuada apenas de um ponto de vista, não necessitando de varrimento 3D.

Esta técnica utiliza dois princípios de funcionamento. O primeiro princípio determina a distância a partir da medição direta do tempo de voo da luz emitida, utilizando para o efeito SPADs (*Single-Photon Avalanche Diodes*). A superfície do objeto é iluminada por um feixe de luz laser, enquanto que um sensor recebe a luz refletida. O segundo princípio consiste na medição da diferença de fase entre o sinal enviado e o sinal recebido e é utilizado normalmente para distâncias mais pequenas.

Este princípio evidencia a ocorrência de ruído devido à intensidade do sinal ser baixo. Assim sendo, deve ser utilizado um processo de calibração de modo a minimizar os erros residuais existentes. Na figura 2.15 está representado este princípio de funcionamento da técnica tempo de voo.

O primeiro princípio é utilizado para sistemas complexos e com baixa frequência de aquisição, o segundo princípio tende a ser utilizado em sistemas comerciais, com maior velocidade de aquisição.

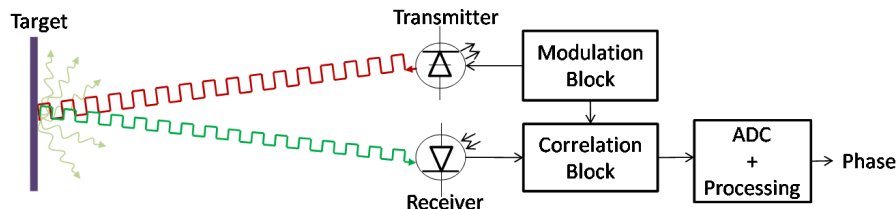


Figura 2.15: Princípio de funcionamento da técnica *tempo de voo* [17].

2.2.2 Visão Stereo

Visão *stereo* consiste numa técnica de reconstrução 3D baseada no sistema de visão humana, o qual é capaz de perceber a profundidade de um cenário a partir das diferenças entre as imagens captadas pelo olho esquerdo e direito. Um objeto no espaço é captado pelos olhos humanos com diferentes pontos de vista. Uma experiência simples passa por colocar um dedo verticalmente em frente aos nossos olhos fechando cada olho alternadamente. É notável que o dedo se desloca para a esquerda e para a direita relativamente ao cenário de fundo. Tal como o sistema humano, normalmente esta técnica requer duas câmaras idênticas a fim de captar duas imagens simultâneas do mesmo objeto com diferentes pontos de vista situado no espaço tridimensional.

A técnica de visão *stereo* possui várias áreas de aplicação como visão computacional, navegação robótica, entretenimento, identificação de objetos, etc.

Afim de obter a profundidade do cenário recorrendo a um par de imagens obtidas simultaneamente, é necessário identificar a correspondência de pontos em ambas as imagens. Uma vez que são definidos dois planos de imagem na técnica visão *stereo*, as projeções de um objeto no espaço tridimensional são representados com diferentes coordenadas nos dois planos de imagem. Deste modo o problema da correspondência consiste em identificar os pontos correspondentes entre as imagens. O cálculo da diferença de coordenadas do ponto correspondente entre as imagens é denominada disparidade. O cálculo de disparidade para um conjunto de pontos presentes nas imagens é denominado mapa disparidade.

É possível visualizar uma configuração típica de um sistema de visão *stereo* na figura 2.16. Um ponto tridimensional W situado na superfície de um objeto é projetado nos planos de imagem das câmaras. Como foi mencionado, o problema da correspondência consiste em encontrar o ponto $p1$ e $p2$. No entanto, para encontrar as correspondências *stereo* é necessário elevado tempo de processamento uma vez que para determinar um mapa disparidade é necessário determinar a disparidade para cada ponto da imagem.

De modo a reduzir o custo de processamento necessário para resolver o problema da correspondência *stereo*, deve ser considerada uma configuração do sistema *stereo* que delimite a área de pesquisa de uma imagem. Para determinar a configuração de um sistema *stereo* é necessário aplicar um processo de calibração para determinar a relação entre os sistemas de coordenadas de cada câmara. A partir do processo de calibração *stereo*, as correspondências *stereo* podem ser relacionadas pela geometria epipolar.

A geometria epipolar entre duas imagens *stereo* delimita a zona de pesquisa para determinar as correspondências *stereo*. A restrição epipolar é essencial no processo da correspondência *stereo* uma vez que um ponto numa imagem contém o seu ponto correspondente na linha epipolar na outra imagem, enquanto que a linha epipolar é deduzida a partir do ponto original. Deste modo, o custo de processamento é bastante reduzido e a possibilidade de falsas correspondências é minimizada, uma vez que a zona de pesquisa é limitada. Caso as linhas epipolares sejam paralelas com o eixo da imagem horizontal, a correspondência *stereo* pode ser efetuada de um modo muito mais eficiente e rápido uma vez que os pontos correspondentes se situam no mesmo eixo horizontal. Deste modo, torna-se muito mais vantajoso alinhar paralelamente as linhas epipolares, sendo esta configuração de um sistema *stereo* denominada como retificação *stereo*.

A maioria das técnicas de correspondência *stereo*, em termos de custo de correspondência e agregação de energia, são agrupadas em dois tipos sendo técnicas de correspondência *stereo* globais e locais. As técnicas de correspondência locais utilizam padrões definidos em ambas as imagens *stereo* para determinar a sua correlação. As técnicas mais utilizadas são a técnica (SAD) *Sum of Absolute Difference*, (SSD) *Sum of Square Difference* e (NCC) *Normalized Cross Correlation*.

Nos métodos de modelos padrão, uma função de custo é definida tendo como base a similaridade entre dois modelos padrão entre as imagens. No caso de um modelo padrão ser definido na imagem da esquerda, a comparação será efetuada ao longo da linha epipolar da imagem da direita. Deste modo, um modelo padrão correspondente é selecionado da imagem da direita de modo a minimizar o custo de correspondência.

Nas técnicas de correspondência global a similaridade entre as imagens é determinada a partir de modelos padrão e adicionalmente o cálculo de custos de correspondência global

na disparidade de pixels adjacentes na imagem. Ou seja, a disparidade de um ponto na imagem é determinado não só pelas propriedades da imagem bem como pela análise contínua de disparidade nos pontos adjacentes. Os métodos globais apresentam melhores resultados que os métodos locais, no entanto é necessário um tempo de processamento mais elevado. Exemplos de técnicas de correspondência global são (SGBM) *Semi-Global Matching*, (GC) *Graph Cut* e (CR) *Cooperative Region*, etc.

Relativamente à densidade de um mapa disparidade, as técnicas de correspondência *stereo* encontram-se divididas em duas categorias. Os métodos de correspondência densos determinam a disparidade para cada pixel da imagem. Deste modo o mapa disparidade tem a mesma resolução que as imagens *stereo*. Por outro lado, os métodos de correspondência dispersos determinam os valores de disparidade para apenas alguns pontos da imagem. Neste método, as características presentes numa imagem representam especial importância, tais como cantos ou pilares [18].

A oclusão parcial ou total de objetos e variações de iluminação ambientais dificultam a correspondência e a reconstrução 3D nas técnicas de imagem da visão *stereo*.

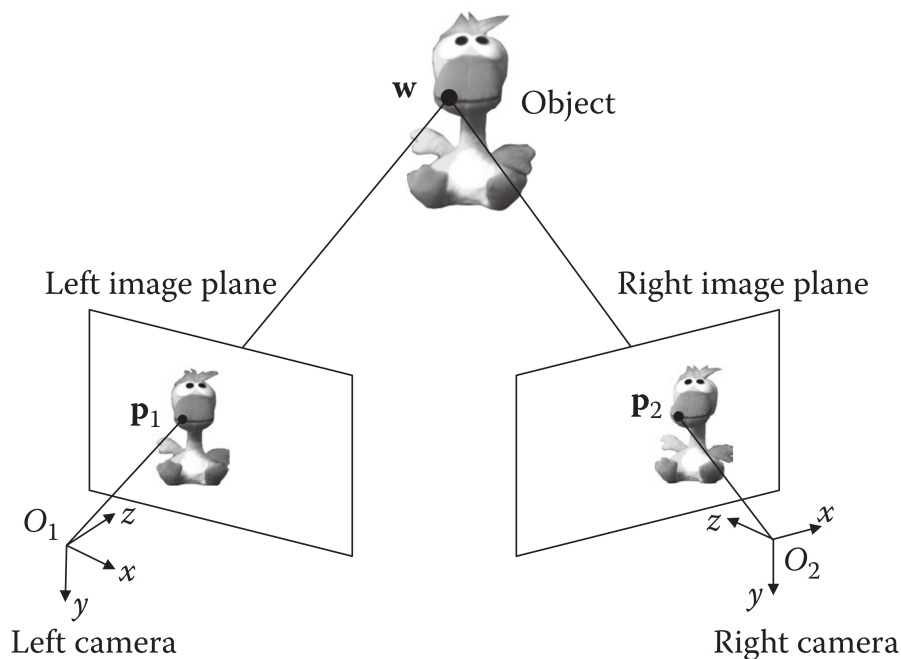


Figura 2.16: Correspondência *stereo* [18].

2.2.3 Photometric Stereo

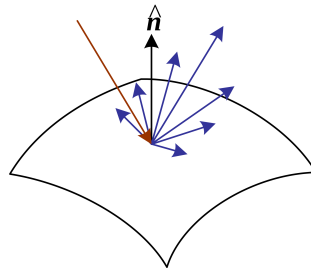
Photometric Stereo é uma técnica de imagem 3D capaz de reconstruir a geometria de um objeto a partir de uma sequência mínima de três imagens adquiridas do mesmo ponto de vista, em objetos com ou sem textura.

Na figura 2.17a, visualiza-se um objeto sem textura, no entanto, a superfície do objeto continua a ser perceptível. Tal facto deve-se a que à medida que as normais da superfície se alteram ao longo da superfície, a intensidade de cada pixel altera-se em função do

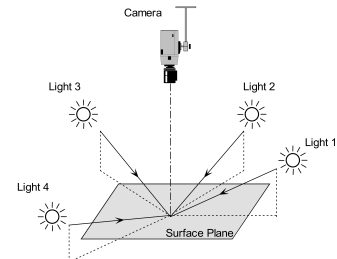
ângulo entre a orientação da normal da superfície e a luz incidente, como representado na figura 2.17b.



(a) Objeto sem textura [19].



(b) Dispersão da luz quando atinge a superfície [19].



(c) Princípio de funcionamento da técnica *photometric stereo* [20].

Figura 2.17: *Photometric stereo*

O princípio de funcionamento da técnica *Photometric Stereo* está representado na figura 2.17c. Esta técnica utiliza uma câmara e várias fontes de iluminação que seletivamente são ligadas e desligadas sequencialmente.

Deste modo a partir da variação de intensidade de cada pixel é possível determinar a orientação das normais da superfície em cada pixel. Integrando todas as orientações das normais da superfície é possível obter em detalhe a geometria do objeto. Para tal, devem ser evitadas zonas da imagem nas quais a intensidade luminosa não revele informação suficiente, como é o caso de zonas escuras. A solução passa por uma configuração cuidada do sistema, na qual as fontes luminosas estejam dispostas de modo a adquirir a melhor informação em cada imagem captada do objeto [19].

2.2.4 Shape-from-Texture

A técnica *Shape from Texture* é uma técnica de imagem 3D para reconstrução da geometria de uma superfície em estudo, a partir da orientação das normais da superfície. Esta técnica requer a aplicação de um padrão regular para análise do processo de deformação aplicado à superfície do objeto em estudo. As formas originais do padrão alteram-se em função da deformação aplicada.

A regularidade do padrão é utilizada para determinar a orientação local da superfície em estudo. Na figura 2.18 é possível visualizar um padrão regular aplicado à superfície em estudo. Na verdade as elipses correspondem a círculos, e a seta presente no centróide de cada círculo corresponde à normal da superfície [21].

2.2.5 Triangulação Laser

A técnica de triangulação laser é uma técnica de varrimento 3D muito utilizada em diversas áreas para a realização de medições dimensionais e reconstrução de modelos.

Na figura 2.19 está representado o princípio de funcionamento da técnica triangulação laser. Um laser projeta um feixe ou um padrão de luz na superfície do objeto a analisar.

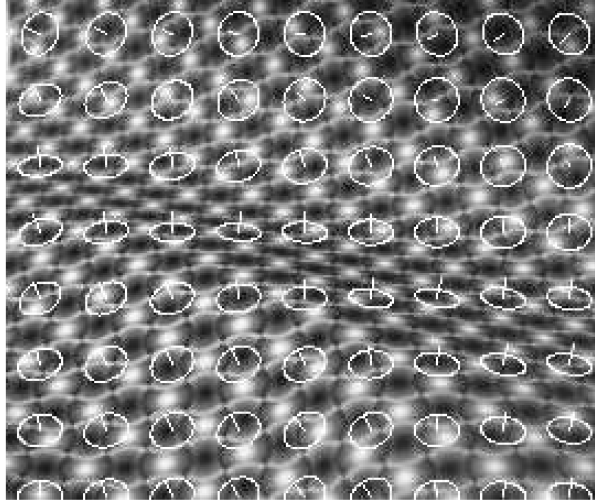


Figura 2.18: Resultado de aplicação de algoritmo *shape-from-texture* [21].

A zona iluminada pelo laser corresponde à zona de luz S . Os feixes de luz provenientes do laser são capturados por uma câmara CCD (*Charge Couple Device*).

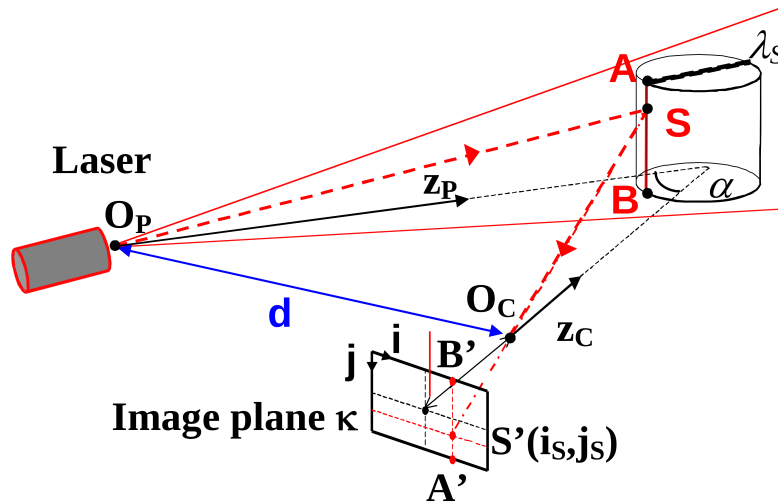


Figura 2.19: Princípio de funcionamento da técnica triangulação laser [22].

É possível determinar a posição espacial do ponto S através da projeção de um ponto laser no objeto. A variação de posição do ponto é identificada pela variação de posição no sensor da imagem. A variação da coordenada Z , é representada pela equação 2.2, segundo [22]:

$$\Delta Z = \frac{\Delta X}{\sin \alpha} \quad (2.2)$$

O valor de α é determinado durante o processo de calibração. Na figura 2.20 encontra-se a representação do sistema em duas dimensões para maior simplicidade de representação.

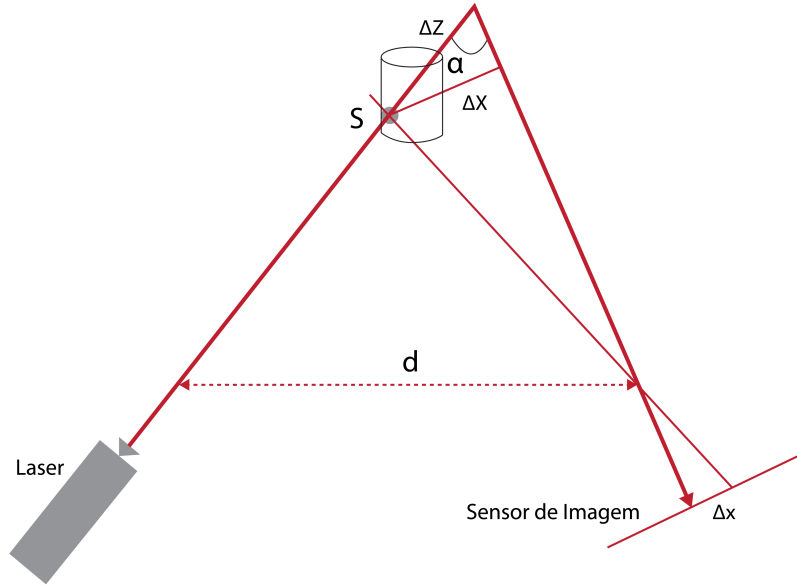


Figura 2.20: Técnica triangulação laser representada em 2D.

A relação de amplificação do sistema de visão β é dado pela relação ΔX e Δx , equação 2.3.

$$\beta = \frac{\Delta x}{\Delta X} \quad (2.3)$$

Substituindo na equação 2.4 :

$$\Delta Z = \frac{\Delta x}{\sin \alpha} \frac{1}{\beta} \quad (2.4)$$

Para estabelecer uma relação entre as coordenadas do sensor de imagem e as coordenadas do sistema real, é necessário realizar o processo de calibração com um objeto de referência, com dimensões e posições conhecidas, permitindo calcular os parâmetros do sistema de visão.

Para aquisição da informação tridimensional de um objeto, utilizando a técnica triangulação laser através da projeção de um ponto sobre o objeto, é necessário realizar um varrimento geral do ponto em duas direções e consequente processamento da imagem.

Uma das grandes vantagens desta técnica é a sua capacidade de resolução independente das condições de iluminação e da textura das superfícies. Esta técnica é bastante utilizada comercialmente, para medição de distâncias, diâmetros, espessura e controle de superfície [22].

2.2.6 Luz Estruturada

A técnica Luz Estruturada é uma técnica de imagem 3D que utiliza o princípio de triangulação, tal como a técnica de triangulação laser. No entanto, em vez de ser efetuado um varrimento 3D, são projetados padrões bidimensionais na superfície a analisar, como representado na figura 2.21. Múltiplos padrões ou um padrão único pode ser projetado. Os planos são indexados ao longo das coordenadas LP do plano do projetor. A informação

da profundidade de um ponto S do objeto é obtida através da interseção entre a linha SS' e o plano indexado LP . Deve ser garantido que para objetos diferentes são atribuídos índices diferentes ao longo das coordenadas LP. Para o efeito foram desenvolvidos várias estratégias de projeção de padrões, tais como, padrão em grelha, padrão de pontos, padrão de linhas verticais e padrões constituídos por várias cores.

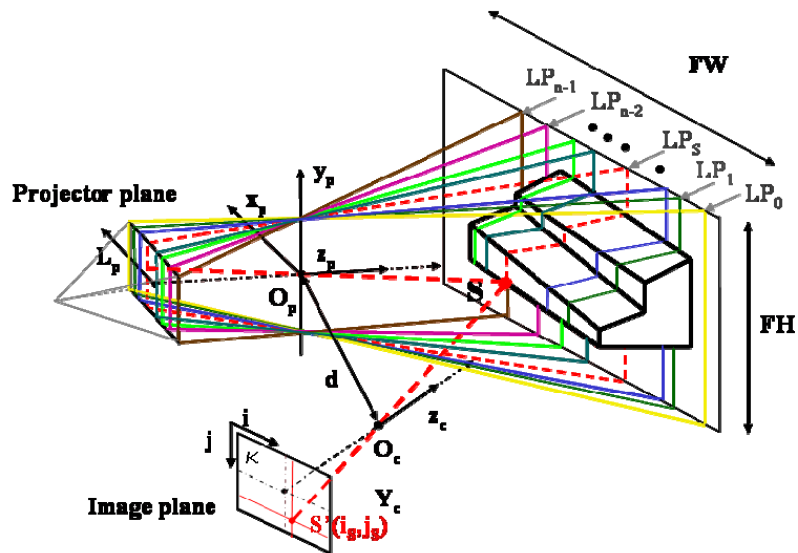


Figura 2.21: Técnica luz estruturada [22].

Capítulo 3

Implementação

Este capítulo inclui todo o procedimento utilizado para análise de processos de deformação aplicados a objetos com diferentes tipos de geometria.

A análise do objeto tridimensional numa fase de referência, antes do processo de deformação, e numa fase final, após processo de deformação, permite determinar os deslocamentos 3D dos pontos tridimensionais correspondentes.

A partir da aquisição de um conjunto de imagens da peça de referência antes de ser deformada, é possível proceder à reconstrução tridimensional do objeto no estado inicial. Do par de imagens *stereo* do objeto após deformação resulta a reconstrução 3D do objeto deformado. Adicionalmente, ao fazer a correspondência temporal entre a primeira e a segunda imagem da câmara esquerda é possível obter os deslocamentos 3D dos pontos correspondentes. Nesta dissertação o sistema de coordenadas da câmara esquerda representa o sistema de coordenadas global, deste modo os dados adquiridos pela câmara esquerda não necessitam da aplicação de uma transformação (rotação e translação).

Esta técnica, 3D DIC, contempla duas etapas (figura 3.1):

- Correspondência *stereo*;
- Correspondência temporal.

3.1 Calibração

Uma fase importante e indispensável nas técnicas de visão 3D é a calibração da câmara que consiste na determinação dos parâmetros que relacionam as coordenadas do sensor de imagem e as coordenadas mundo. Por norma é utilizado um objeto de calibração em que as dimensões e posição espacial são conhecidas [23].

3.1.1 Modelo de Câmara Pinhole

O termo *pinhole* que significa "furo de alfinete" consiste numa parede imaginária com um pequeno orifício no centro que filtra todos os raios de luz exceto os que atravessam o furo do centro. Os sistemas de aquisição de imagem que utilizam o sistema *pinhole* devem possuir na sua constituição uma lente de modo a obter uma intensidade de luz mais elevada para cada ponto durante a aquisição, uma vez que na ausência de lente

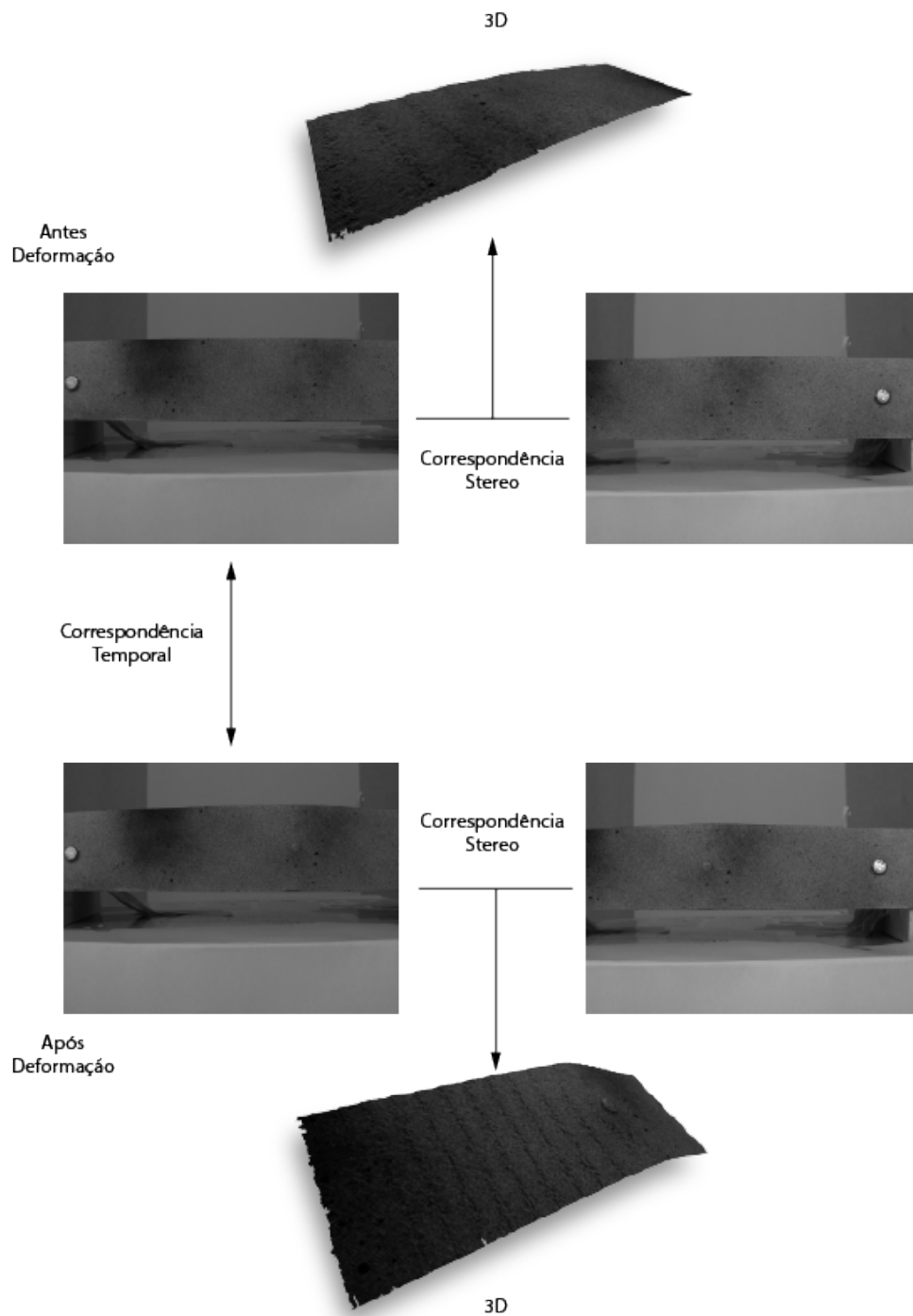


Figura 3.1: Técnica 3D DIC, correspondência *stereo* e temporal.

a intensidade de luz disponível seria menor, o que levaria a um aumento do tempo de exposição para obter a intensidade de luz desejada para cada ponto na aquisição [24].

Na figura 3.2 está representada a geometria do modelo *pinhole* na qual a lente da câmara está representada pelo seu centro ótico no sistema de coordenadas da câmara, que se situa entre o espaço tridimensional e o plano da imagem. O plano da imagem é perpendicular ao eixo ótico e intersecta-se com este num ponto, que se denomina ponto principal. A distância entre o centro ótico e o ponto principal denomina-se por distância principal [25].

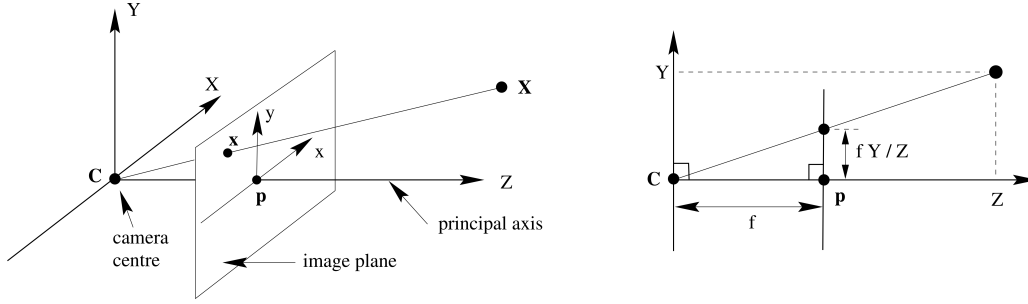


Figura 3.2: Modelo de câmara *pinhole* [26].

Utilizando a semelhança de triângulos, um ponto no espaço $[X, Y, Z]'$ é projetado no plano de imagem com as coordenadas $[fX/Z, fY/Z]'$, como representado na equação 3.1 [26].

$$[X, Y, Z]' \mapsto [fX/Z, fY/Z]' \quad (3.1)$$

Na equação 3.2 [26] encontra-se representada a transformação Euclidiana que relaciona o espaço $2D$ com o espaço $3D$, na forma matricial e em coordenadas homogêneas.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Na expressão 3.1 assume-se que a origem do sistema de coordenadas do plano de imagem coincide com o ponto principal. No entanto, na prática, o ponto principal pode não corresponder ao centro da imagem. Deste modo, a equação 3.3 representa a transformação Euclidiana entre o espaço $2D$ e $3D$. Os parâmetros $(p_x, p_y)'$ são as coordenadas do ponto principal, figura 3.3. Esta equação pode ser representada na forma matricial, em coordenadas homogêneas, equação 3.4.

$$[X, Y, Z]' \mapsto [fX/Z + p_x, fY/Z + p_y]' \quad (3.3)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX + Zp_x \\ fY + Zp_y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

A matriz K , expressão 3.5 [26], corresponde aos parâmetros intrínsecos da câmara. Representa a transformação entre a lente da câmara e o plano da imagem. Esta matriz

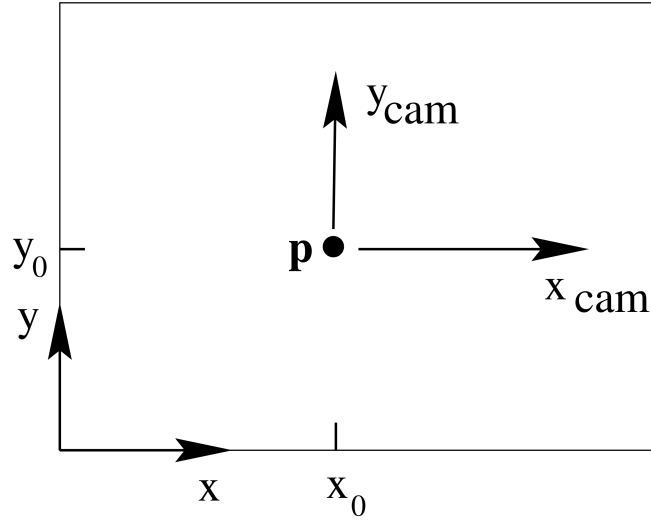


Figura 3.3: Sistema de coordenadas da câmera e do plano de imagem [26].

uma vez calculada pode ser reutilizada uma vez que não depende do espaço tridimensional, desde que o sistema de montagem da câmera não seja alterado, não exista folgas no posicionamento da lente, e desde que a distância focal não seja alterada (no caso de câmaras com *zoom*) [24].

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

O modelo de câmera *pinhole* assume que as coordenadas do plano de imagem são coordenadas Euclidianas, tendo escalas iguais em ambas as direções. No caso de câmaras CCD, existe a possibilidade de haver pixels que não representam quadrados, resultante da distorção contida na imagem. Deste modo, a matriz dos parâmetros intrínsecos, equação 3.6, contempla os seguintes parâmetros:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & p_x \\ 0 & \alpha_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

- $(\alpha_x, \alpha_y) \mapsto$ Distância focal nas duas direções;
- $s \mapsto$ Distorção;
- $(x_0, y_0) \mapsto$ Coordenadas do ponto principal.

O sistema de coordenadas da câmera e o referencial mundo relacionam-se através de uma rotação e de uma translação, figura 3.4.

A equação 3.7 [26], na forma matricial e em coordenadas homogêneas, representa a

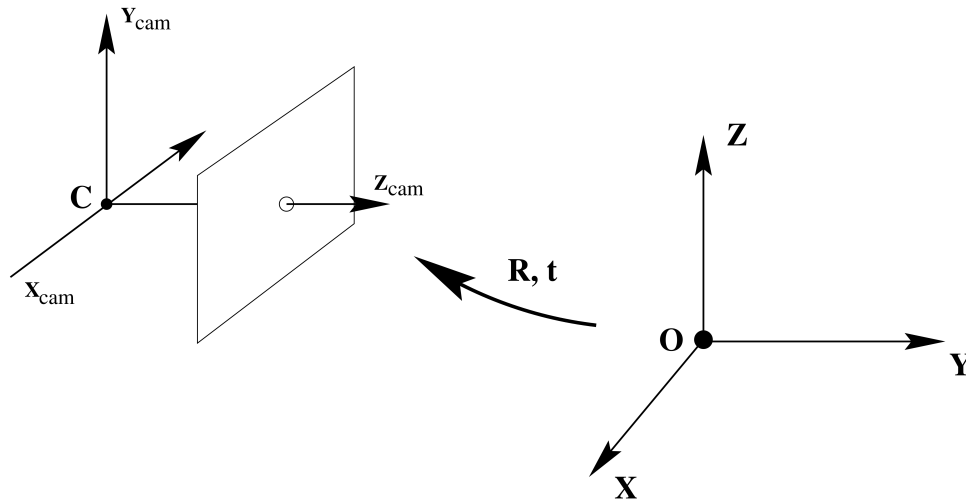


Figura 3.4: Transformação entre o referencial mundo e o referencial da câmera [26].

relação entre os dois sistemas de coordenadas.

$$X_{cam} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} \quad (3.7)$$

A matriz rotação, R [3×3], representa a orientação do sistema de coordenadas da câmera. O vetor T representa a translação entre os dois referenciais. A matriz $[R|T]$ representa a matriz dos parâmetros extrínsecos.

3.1.2 Distorção da lente

A utilização de uma lente numa câmera CCD ou CMOS *Complementary Metal-Oxide Semiconductor* apresenta vantagens, uma vez que uma lente consegue focar maior quantidade de luz num ponto, permitindo uma aquisição mais rápida e precisa. No entanto, a utilização de uma lente leva principalmente a dois tipos de distorção na imagem, a distorção radial e tangencial. Também ocorrem outros tipos de distorções em sistemas de aquisição de imagens, no entanto são excluídos uma vez que têm um efeito muito menos significativo.

A distorção radial resulta da forma da lente e a distorção tangencial resulta do processo de montagem da câmera como um todo.

A distorção radial ocorre quando há distorção dos pixels perto dos limites da imagem, efeito barril que pode ser visualizado na figura 3.5. No centro ótico da imagem a distorção radial é zero e tende a aumentar com a distância ao centro ótico [24].

A distorção tangencial deve-se aos defeitos de produção e montagem uma vez que não é garantido o paralelismo da lente com o plano da imagem, como se verifica na figura 3.6.

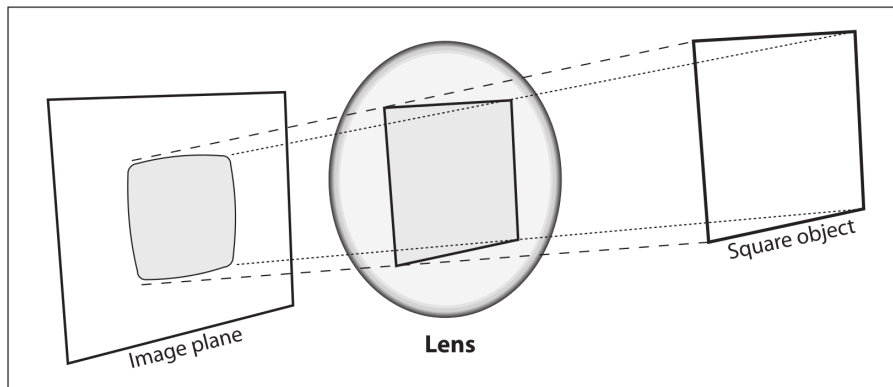


Figura 3.5: Distorção radial [24].

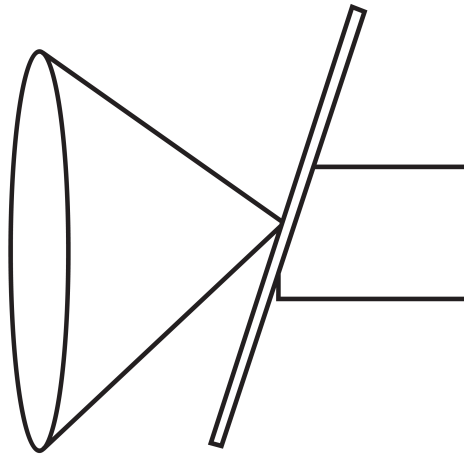


Figura 3.6: Distorção tangencial.

3.1.3 Geometria epipolar

Admitindo que um sistema *stereo* é constituído por duas câmaras de modelo *pinhole*, como está representado na figura 3.7. Cada câmara tem um centro de projeção, O_l e O_r , e um plano de projeção, l e r .

Um ponto P no mundo real tem uma projeção em cada um destes planos nos pontos, pl e pr respetivamente. Os pontos epipolares el , er são obtidos pela interseção da linha que une os centros de projeção O_l e O_r com os planos da imagem. As linhas epipolares correspondem à interseção dos pontos de projeção com os pontos epipolares.

Uma das etapas da visão *stereo* é a correspondência, identificar o ponto P do referencial mundo, na imagem da esquerda e da direita. No entanto, o ponto projetado na imagem da direita pode estar localizado em centenas de pixels. Deste modo torna-se indispensável limitar a área de pesquisa de modo a evitar falsas correspondências e diminuir o tempo de processamento.

O grande interesse das linhas epipolares é determinar a zona de pesquisa do ponto correspondente na imagem da direita, uma vez que o ponto P projetado na imagem da esquerda tem o seu ponto correspondente na imagem da direita ao longo da linha epipolar [24]. Apesar de existirem inúmeras possibilidades para encontrar o ponto correspondente

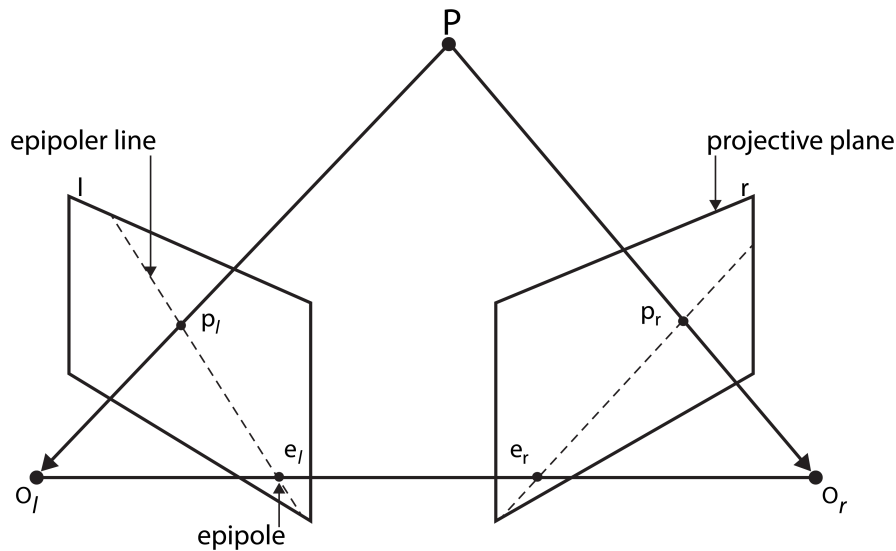


Figura 3.7: Geometria epipolar [24].

a pesquisa fica limitada a apenas uma linha da imagem, ou seja, o ponto correspondente situa-se na mesma abcissa, ficando a pesquisa limitada apenas em uma direção.

3.1.4 Calibração Stereo

A calibração de um sistema *stereo* determina a transformação euclidiana entre o sistema de coordenadas entre a câmara esquerda e direita. O conhecimento da posição geométrica dos dois referenciais permite realizar a retificação *stereo* e a reconstrução tridimensional de dois pontos correspondentes em ambas as imagens. Para proceder à calibração é necessário definir um referencial global, referencial mundo, para que as coordenadas das câmaras possam ser determinadas em relação ao referencial mundo [18], como está representado na figura 3.8.

Calibração de um sistema *stereo*:

- Uma das câmaras deve ser selecionada como "principal" (nesta dissertação a câmara esquerda);
- A orientação e posição de um sistema de coordenadas global é determinado relativamente ao sistema de coordenadas da câmara principal;
- A orientação e posição das restantes câmaras constituintes do sistema *stereo* são determinadas relativamente ao referencial da câmara principal. Os parâmetros individuais de cada câmara, parâmetros intrínsecos, não se alteram durante o processo de calibração.

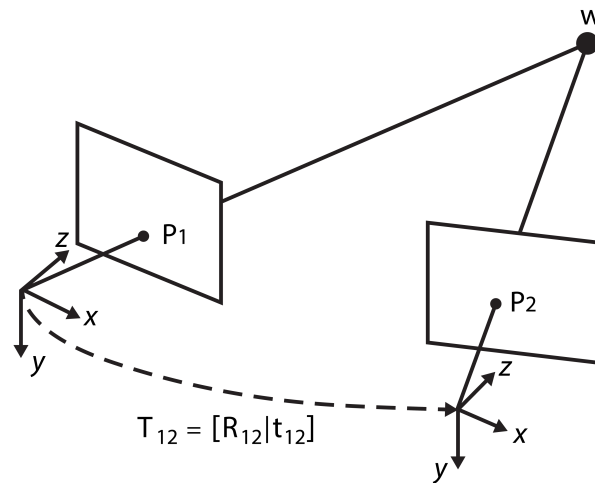


Figura 3.8: Calibração *stereo*: representação do referencial mundo e referencial das câmaras.

3.1.5 Procedimento de calibração

Para proceder à calibração foi utilizada a biblioteca *open source OPENCV (OPEN source Computer Vision)*. Existem muitos métodos de calibração que utilizam objetos de calibração tridimensional, no entanto um padrão em duas dimensões é mais fácil de adquirir. A biblioteca *OPENCV* utiliza um padrão xadrez bidimensional, com quadrados brancos e pretos com as mesmas dimensões, possibilitando a detecção das interseções, e identificação desses pixels na imagem.

As funções de calibração, disponíveis na biblioteca, permitem determinar a dimensão e o número de quadrados que constituem o padrão xadrez [24].

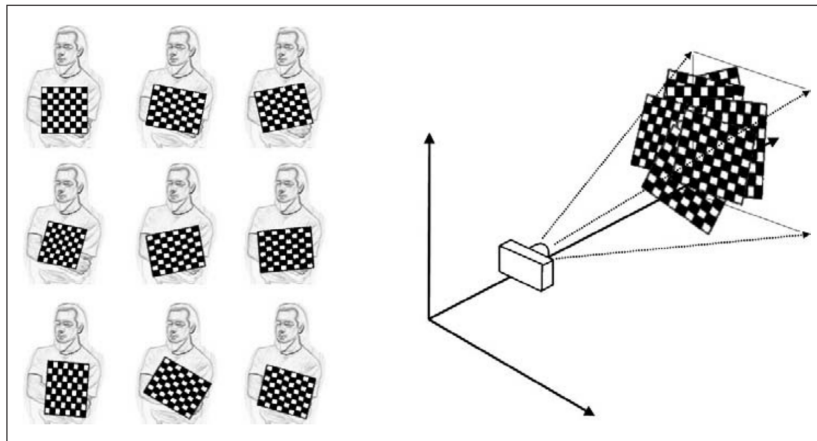


Figura 3.9: Colocação do tabuleiro xadrez em diferentes posições no espaço tridimensional [24].

Devem ser então adquiridos vários pares de fotos, a aquisição da imagem esquerda e direita deve ser efetuada simultaneamente, garantindo a similaridade entre as imagens, evitando variações de iluminação e colocação dos objetos no espaço tridimensional. O

tabuleiro de xadrez deve ser colocado no espaço 3D a diferentes profundidades com várias direções, fornecendo vários pares de fotos com diferentes pontos de vista do tabuleiro, como está representado na figura 3.9.

Após a detecção das interseções na imagem é necessário verificar que todas as interseções foram detetadas, como se verifica na figura 3.10.

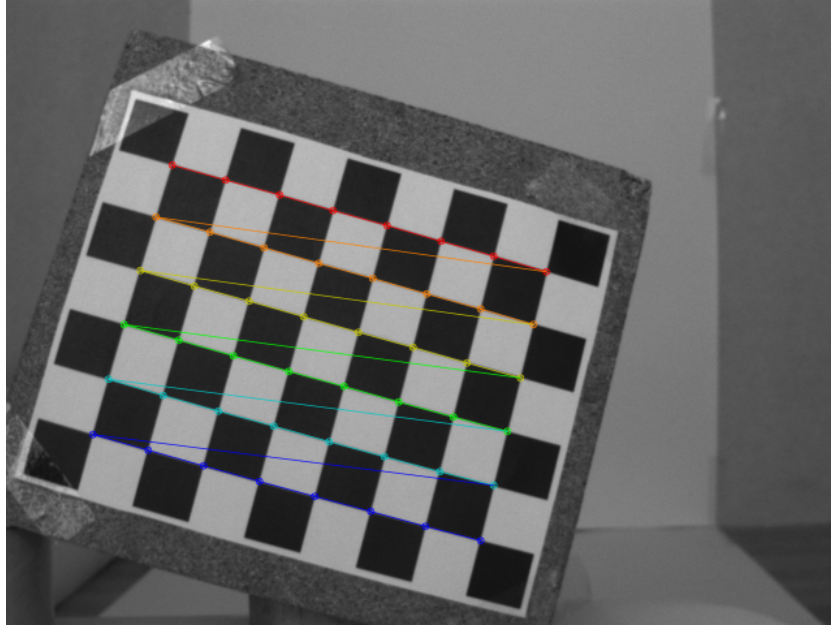


Figura 3.10: Detecção de interseções do tabuleiro xadrez.

3.2 Stereo

3.2.1 Correspondência Stereo

A correspondência *stereo* consiste em encontrar os pontos correspondentes na imagem esquerda e direita, como representado na figura 3.11. A partir das correspondências, e de um baseline conhecido é possível determinar a localização tridimensional dos pontos. No entanto, um pixel na imagem esquerda pode corresponder a vários pixels na imagem direita, como tal esta procura deve ser limitada.

A correspondência *stereo* envolve uma série de etapas de modo a diminuir o custo de processamento envolvido no processo e desprezar falsas correspondências. Na verdade, a correspondência *stereo* envolve quatro passos:

- Retificação de imagens;
- Identificação do pixel correspondente na imagem da esquerda e da direita. Cálculo do mapa disparidade, no qual a disparidade consiste na diferença de coordenadas no eixo x entre a imagem esquerda e direita $[x_l - x_r]$;
- Conversão do mapa disparidade para distâncias tridimensionais a partir do conhecimento da posição das câmaras.

Para o cálculo do mapa disparidade, foi utilizado o algoritmo SGBM (*Semi Global Block Matching*) [27], disponibilizado pela biblioteca *OPENCV*.

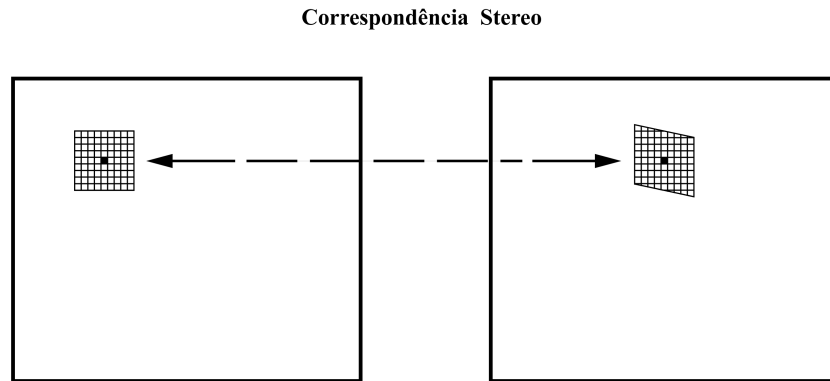


Figura 3.11: Correspondência *stereo*: identificação de pixel (bloco) correspondente na imagem esquerda e direita.

3.2.2 Retificação e distorção do par de imagens stereo

Na figura 3.12 está esquematizado o processo de remoção da distorção e retificação aplicado a um par de imagens *stereo*, que envolve várias etapas:

- a) Projeção de um objeto no espaço tridimensional na imagem esquerda e direita.
- b) Remoção de distorção das imagens.
- c) Alinhamento das linhas epipolares em ambas as imagens.

É possível visualizar o resultado final do processo de distorção e retificação aplicado a um par de imagens na figura 3.13, utilizando os parâmetros intrínsecos e extrínsecos obtidos através do processo de calibração.

3.2.3 Mapa Disparidade

Para um ponto no espaço, capturado por um par de câmaras, o valor da intensidade dos pixels correspondentes normalmente difere. O facto da luz refletida pelo ponto não ser a mesma nas duas direções e, as câmaras poderem apresentar pequenas diferenças como ganhos e ruído são fatores que contribuem para esse efeito.

Num sistema de câmaras *stereo* retificado, as linhas epipolares devem estar alinhadas e devem coincidir. Ao longo da linha epipolar para um pixel na posição x_l é calculada a diferença do valor de intensidade com os pixels nas sucessivas posições x_r . A intensidade dos pixels que constituem a vizinhança do pixel em análise também são considerados. Os menores valores das diferenças são possíveis correspondências [28]. Estas diferenças correspondem a custos de correspondência.

Por vezes, o custo de correspondência é ambíguo uma vez que as correspondências podem não ser as corretas. O algoritmo SGBM dispõe de duas restrições $P1$ e $P2$, que afetam todos os pixels q na vizinhança de Np . A constante $P1$ afeta os pixels para os quais a disparidade difere um pixel, permitindo uma adaptação para superfícies curvas

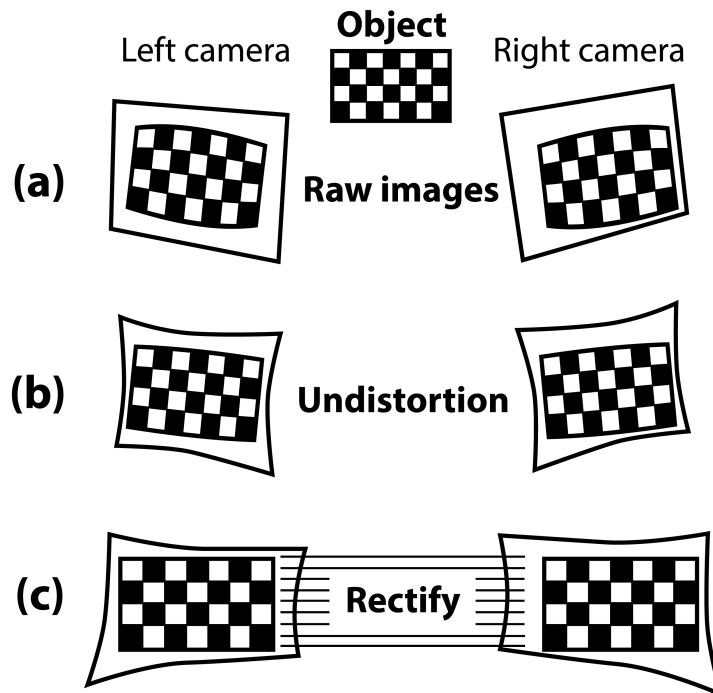
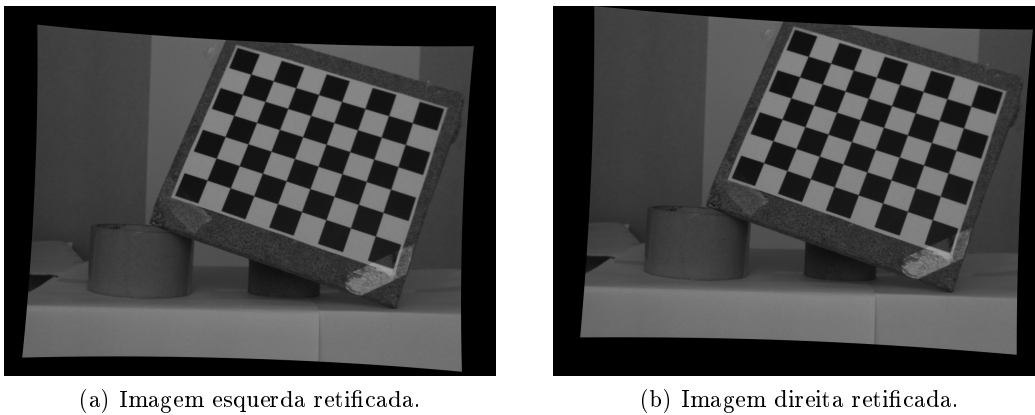


Figura 3.12: Retificação e distorção de conjunto de imagens *stereo*.



(a) Imagem esquerda retificada.

(b) Imagem direita retificada.

Figura 3.13: Retificação par de imagens *stereo*.

e inclinadas. A constante $P2$ afeta os pixels em que a disparidade é maior prevenindo discontinuidades. Deve ser garantido que $P2$ é maior que $P1$.

Para cada pixel é adicionado o custo de correspondência em todas as direções 1D. O custo agregado é calculado somando o custo de todos os trajetos 1D que terminam no pixel p e disparidade d , figura 3.14. Estes trajetos são projetados como linhas direitas na imagem esquerda, no entanto não são linhas direitas na imagem correspondente.

O mapa disparidade Dm corresponde à imagem Im , imagem base, determinada pela soma dos custos de agregação ao longo da linha epipolar do pixel q na imagem correspondente Ib . Adicionalmente, o mapa disparidade Db calculado da imagem Ib , permite determinar oclusões e falsas correspondências quando comparado com Dm , realizando

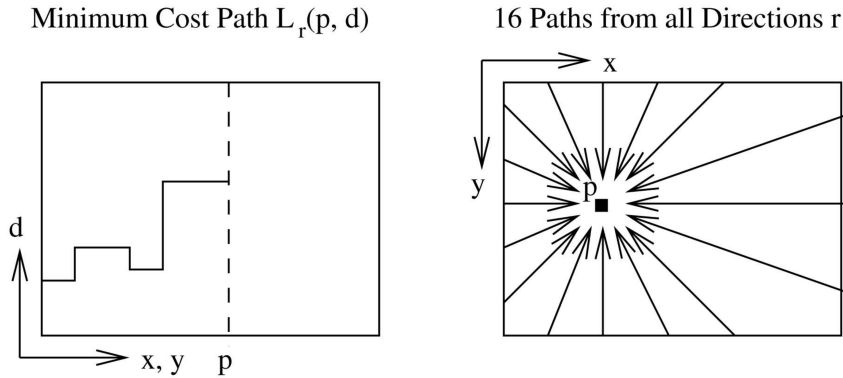


Figura 3.14: Agregação de custos no espaço disparidade [27].

um teste de consistência *uniqueness constraint*. No processamento do mapa disparidade e teste de consistência, cada pixel é considerado um certo número de vezes para a mesma disparidade.

3.2.4 Reconstrução 3D

O princípio de triangulação procura a posição de um ponto situado no espaço tridimensional, através da projeção desse ponto nas duas imagens adquiridas pelo sistema *stereo* [24].

O conhecimento das propriedades óticas das câmaras permite a calibração e retificação de imagens. A retificação corresponde à remoção de distorção da imagem e alinhamento das linhas epipolares. Assim, o mapa disparidade permite calcular a posição do ponto P no mundo real $[X, Y, Z]'$.

Na figura 3.15 está representado um sistema de visão *stereo* alinhado e retificado.

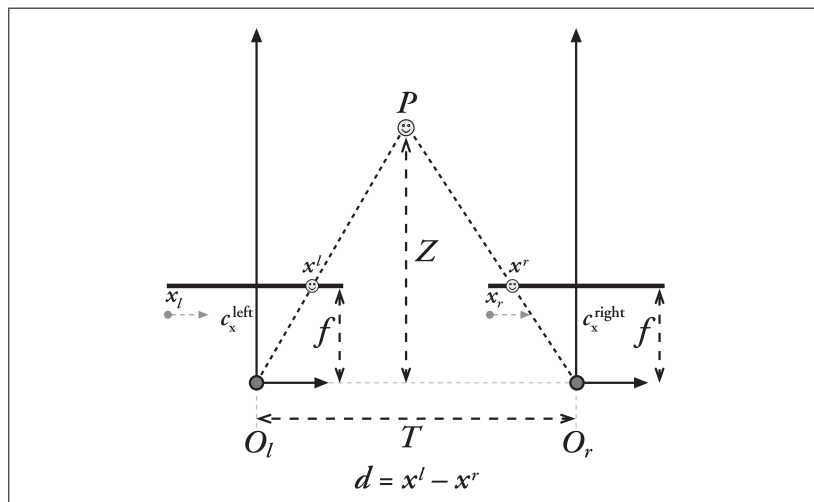


Figura 3.15: Sistema de visão *stereo* retificado [24].

Assumindo que um ponto P no mundo real está representado na imagem esquerda e direita como pl e pr , possui as coordenadas horizontais x_l e x_r respetivamente.

A disparidade é então definida como $d = x_l - x_r$. A triangulação do ponto P nas duas imagens permite obter a profundidade Z , equação 3.8:

$$Z = \frac{f \times T}{x_l - x_r} \quad (3.8)$$

A distância focal é representada por f e o *baseline* (distância entre câmaras) por T . Como a profundidade é inversamente proporcional à disparidade, para pequenas distâncias de *baseline*, pequenas diferenças de disparidade correspondem a grandes diferenças de profundidade. Para valores maiores de disparidade, pequenas diferenças pouco alteram a profundidade.

Consequentemente, os sistemas de visão *stereo* apenas apresentam bons resultados de profundidade para objetos que se apresentem relativamente perto da câmara, como se pode ver na figura 3.16.

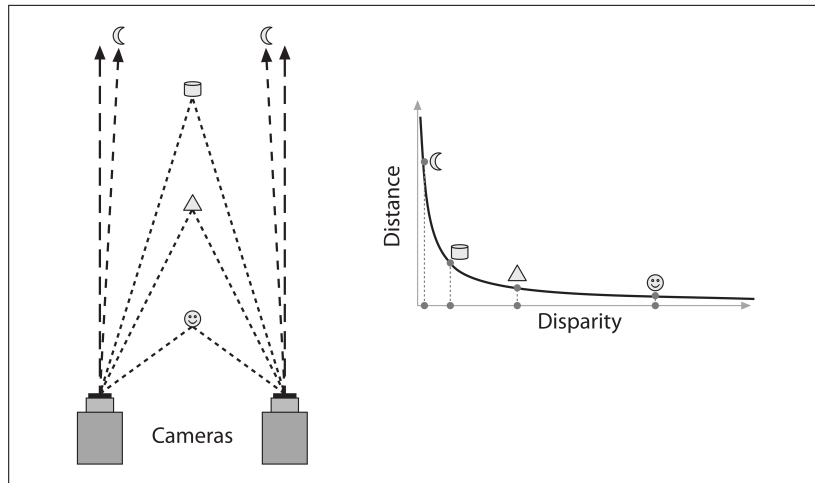


Figura 3.16: Profundidade varia inversamente com a disparidade [24].

O erro de profundidade do cálculo *stereo* é dado pela equação 3.9, [29] :

$$\varepsilon_z = \frac{z^2}{b \times f} \varepsilon_d \quad (3.9)$$

O erro de profundidade é dado pela variável ε_z , z a profundidade, b o *baseline* e ε_d erro de correspondência em pixels (valores de disparidade).

A posição no espaço do ponto P é obtida pela equação 3.10. A projeção de um ponto 2D no espaço 3D resulta nas coordenadas tridimensionais $[X, Y, Z]'$, onde o parâmetro d corresponde à disparidade.

$$Q \begin{bmatrix} X_{cam} \\ Y_{cam} \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

A matriz Q é dada pela equação 3.11:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T_x & (c_x - c'_x)/T_x \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Os parâmetros da matriz Q são referentes à imagem da esquerda, exceto c'_x que corresponde à coordenada x na imagem da direita. O parâmetro T_x corresponde à translação entre as duas câmaras e f à distância focal.

3.3 Correspondência temporal

3.3.1 Análise de deslocamentos

A análise de deslocamentos é alvo de estudo em várias experiências científicas, aplicações de engenharia e testes estruturais de materiais. A precisão pretendida é cada vez mais elevada, sendo necessário o cálculo do campo de deslocamentos para avaliar as deformações. Recentemente, a análise de deformação sem contacto baseado na correspondência de imagens digitais (DIC), tem sido a técnica de eleição para experiências na área da engenharia mecânica [11].

Este desenvolvimento deve-se à existência de câmaras digitais de elevada qualidade, computadores com elevada capacidade de processamento e desenvolvimento e aplicação de algoritmos (DIC). Atualmente, é possível medir deslocamentos 2D em duas imagens consecutivas com um erro de 0.01 pixel ou menos dependendo de todo o processo aplicado [30].

Tracking

O *tracking* de objetos em imagens sequenciais é uma das técnicas mais utilizadas em visão artificial e processamento de imagem. De entre os algoritmos de *tracking* 2D que utilizam imagens com textura (com padrões aleatórios), os algoritmos baseados no método de gradiente apresentam melhor precisão. Para um objeto 3D, a relação entre as imagens projetadas 2D do objeto é definido como homografia [31].

Optical flow é uma aproximação do movimento de uma região da imagem baseado nas derivadas locais e numa sequência de imagens. Ou seja, em 2D determina o que cada pixel se movimentou em duas imagens consecutivas, em 3D determina o que cada volume se moveu em dois instantes consecutivos [32], como está representado na figura 3.17.

3.3.2 Algoritmo optical flow

O algoritmo optical flow determina o campo de deslocamentos a partir de duas imagens sequenciais, tendo em conta o movimento do *background*. A vizinhança, de cada pixel, nas duas imagens são aproximadas através de um polinómio de expansão quadrática [33].

Sejam I e J duas imagens em níveis de cinzento, o valor do nível de cinzento na posição $a = [x, y]'$, sendo x e y as coordenadas dos pixels de um ponto a na imagem, é dado por $I(a) = I(x, y)$ e $J(a) = J(x, y)$. Considerando um ponto $u = [u_x, u_y]'$

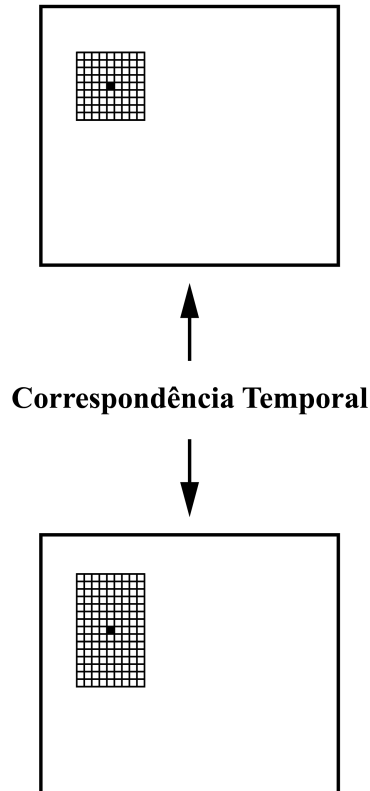


Figura 3.17: Correspondência temporal, identificação de pixel correspondente na imagem de referência e imagem após deformação.

na imagem I , a posição do pixel correspondente na imagem J é dada pela equação $v = u + d = [u_x + d_x, u_y + d_y]$. O vetor $d = [d_x, d_y]'$ corresponde ao deslocamento da imagem no ponto a . É necessário definir uma vizinhança para garantir a correspondência correta dos pixels [34].

3.3.3 Deslocamentos 2D

A correspondência 2D de um pixel em duas imagens sequenciais, permite determinar as coordenadas em pixels do deslocamento ocorrido. Para determinar esta correspondência foi utilizado um algoritmo *optical flow* de *Gunnar Farnebäck*, disponibilizado pela biblioteca *OPENCV*. Trata-se de um algoritmo que devolve um mapa denso de deslocamentos, ou seja, determina o deslocamento de todos os pixels da imagem inicial para a segunda imagem.

Na figura 3.18 está representado o resultado da função, os deslocamentos encontram-se representados na imagem de referência. Os pixels da imagem de referência estão representados por um círculo a vermelho. Os respetivos deslocamentos de cada pixel estão representados por uma linha verde. Esta linha verde não representa o trajeto de cada ponto, mas sim a magnitude e direção de cada deslocamento 2D.

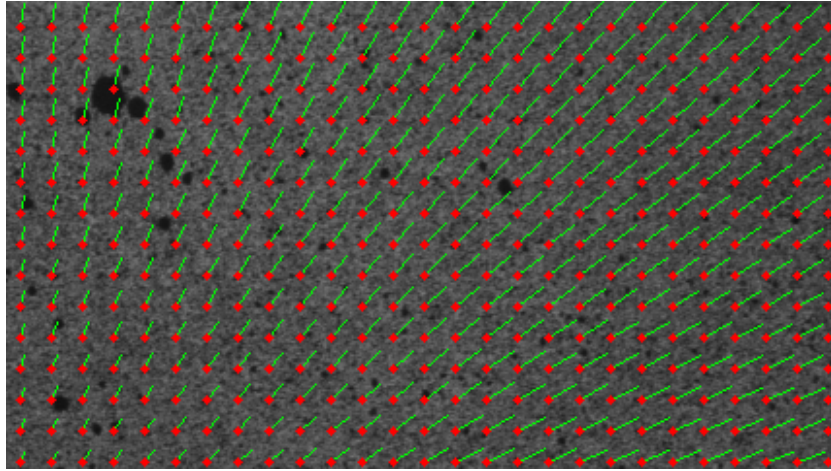


Figura 3.18: Deslocamentos 2D: representação de pontos da peça de referência a vermelho e após deformação a verde.

3.4 Região de interesse

A seleção de uma região de interesse (ROI), no tratamento de imagens e processos por visão artificial, permite selecionar a informação que se pretende analisar, a partir da seleção dos limites na imagem.

O cálculo do mapa disparidade é efetuado relativamente à imagem de referência, imagem esquerda retificada, ou seja, para cada pixel da imagem é efetuado o cálculo da disparidade. O valor de disparidade é armazenado no mesmo índice da imagem do pixel correspondente. O mesmo acontece no armazenamento da informação tridimensional, cada valor disparidade contém a informação tridimensional correspondente no mesmo índice da matriz.

A imagem de referência confere uma percepção visual do objeto em estudo, permitindo a seleção da região de interesse, que aplicada ao mapa que contém a informação tridimensional resulta numa seleção intuitiva da informação que se pretende analisar. Na figura 3.19, está representada a imagem retificada obtida pela câmara esquerda, na qual é possível visualizar uma ROI delimitada por um retângulo a vermelho.

Após seleção da ROI, a aplicação de uma máscara, com as dimensões definidas na ROI, no mapa da informação tridimensional permite obter a informação de interesse desprezando a restante. Este processo pode ser visualizado na figura 3.20.

A aplicação da ROI no mapa que contém a informação tridimensional, permite uma análise intuitiva e dinâmica, uma vez que permite redefinir novas ROI desprezando o tempo de processamento necessário para cálculo da matriz disparidade e informação tridimensional. Por outro lado, a aplicação da ROI numa fase inicial, ou seja, na imagem de referência implicaria a seleção de uma segunda ROI na imagem direita, uma vez que a informação presente na imagem esquerda encontra-se deslocada na imagem da direita. Adicionalmente, a restrição da informação disponível na imagem levaria a uma diminuição de resolução no cálculo da disparidade, uma vez que o algoritmo SGBM, utilizado para cálculo do mapa disparidade, contabiliza os trajetos 1D em direção ao pixel em análise.

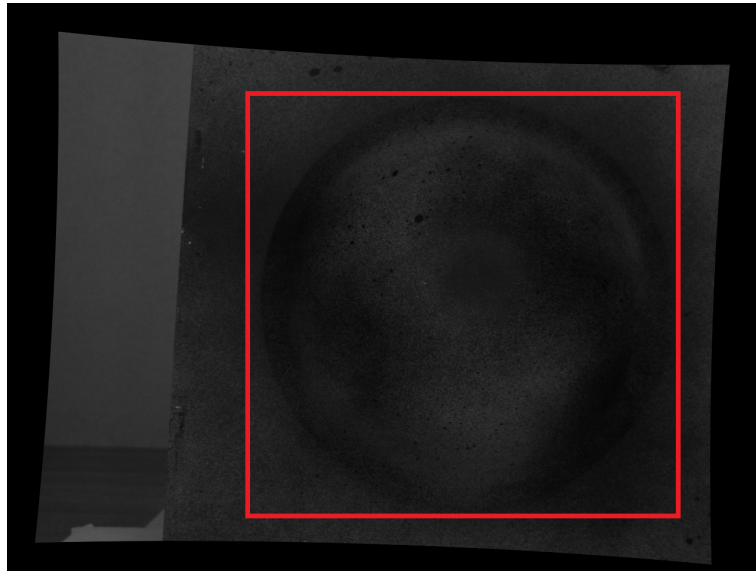


Figura 3.19: Região de interesse selecionada na imagem retificada esquerda.

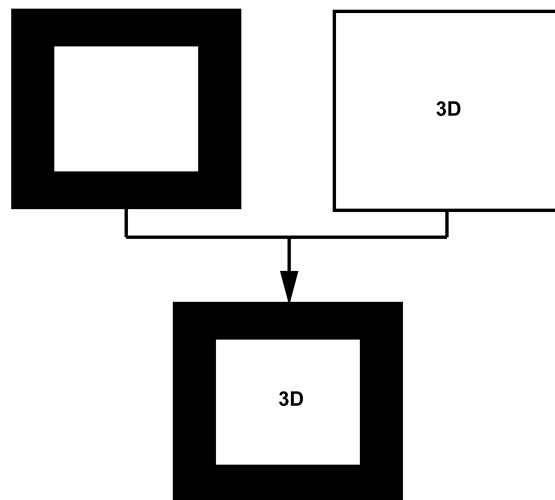


Figura 3.20: Resultado de aplicação de máscara ao mapa tridimensional.

3.5 Processamento Nuvem de Pontos

3.5.1 Filtros aplicados

O resultado do cálculo *stereo* por vezes contém informação errada proveniente de falsas correspondências. Por isso, as respetivas nuvens de pontos apresentam por vezes ruído.

A aplicação de filtros, à informação tridimensional permite um processamento mais eficiente e proporciona uma análise detalhada dos resultados obtidos.

Filtro de distâncias

A informação tridimensional obtida do processamento dos dados adquiridos da visão stereo deve ser filtrada para eliminar o ruído existente, otimizando os resultados obtidos. A informação tridimensional deve estar localizada numa zona (volume) suposta em função da forma, localização do objecto e de um intervalo de tolerância de profundidade definido, figura 3.21. Os pontos que se situem fora deste volume previsto, não devem ser considerados.

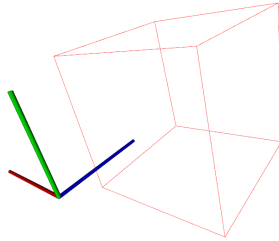


Figura 3.21: Volume de trabalho.

3.5.2 Processamento de Nuvem de Pontos

Para visualizar a informação tridimensional foi utilizada a biblioteca *open source* PCL (*Point Cloud Library*), implementada em C++. Esta biblioteca, possui uma vasta gama de ferramentas para representação e tratamento de dados tridimensionais.

Para representar o objeto no espaço é necessário conhecer as coordenadas 3D [X; Y; Z] de todos os pontos e a cor correspondente de cada ponto. A informação da cor pode ser obtida da imagem retificada da câmara esquerda. Na figura 3.22, pode-se observar uma nuvem de pontos de um objeto no espaço tridimensional.

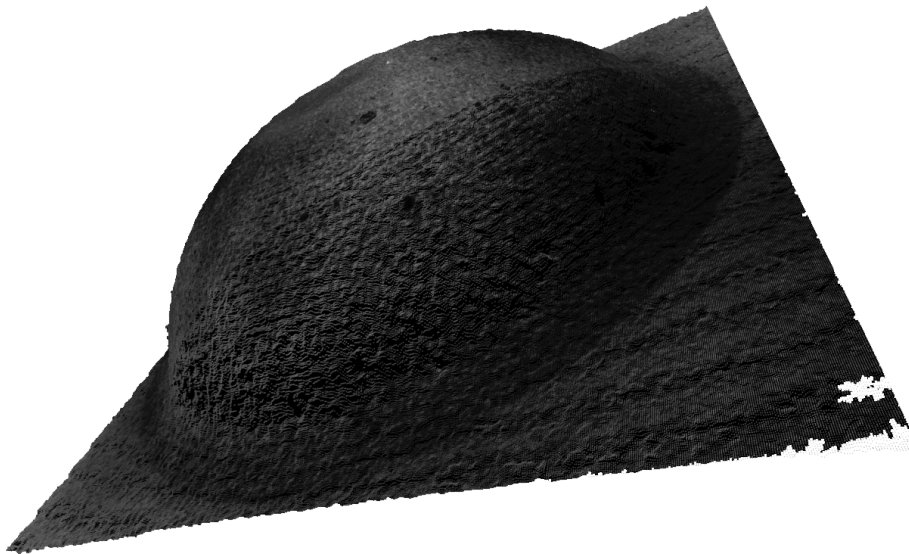


Figura 3.22: Nuvem de pontos tridimensional.

3.5.3 Tracking 3D

A técnica 3D DIC contempla duas etapas, correspondência *stereo* e correspondência temporal. Deve-se garantir a correta correspondência dos pontos tridimensionais no espaço temporal. A informação dos deslocamentos 2D das imagens inicial e final da câmara esquerda permite identificar os pontos tridimensionais correspondentes.

Os filtros aplicados à nuvem de pontos tridimensional eliminam um conjunto de pontos. Para se proceder à correcta reconstrução 3D, o número de pontos nas nuvens de pontos da imagem inicial e final devem ser iguais. Assim deve-se garantir que quando se elimina um ponto na imagem inicial de referência, deve eliminar-se o ponto correspondente na imagem final.

De modo a permitir uma análise gráfica dos pontos correspondentes foram projetadas as duas nuvens, figura 3.23. A verde está representada a nuvem de pontos da peça no estado inicial e a vermelho a nuvem de pontos da peça após deformação. As linhas unem os pontos correspondentes da peça de referência e após deformação.

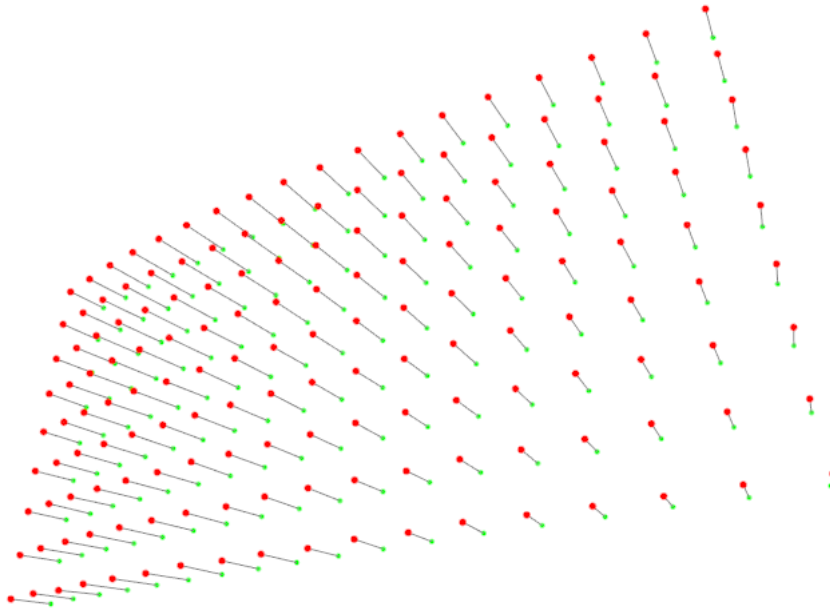


Figura 3.23: Tracking 3D: nuvem de pontos da peça no estado inicial e após deformação, representadas a verde e a vermelho respetivamente.

3.5.4 Malha de triângulos

Para representar as nuvens de pontos em superfícies foi aplicada uma malha de triângulos aos pontos tridimensionais, de modo a unir todos os pontos. A biblioteca PCL dispõe de um algoritmo para obter uma malha de triângulos baseado nos pontos locais vizinhos. A triangulação é definida localmente, projetando os pontos vizinhos ao longo da normal conectando todos os pontos.

O algoritmo tem parâmetros de utilização padrão, no entanto, estes devem ser definidos para cada caso, de acordo com o tipo de malha de triângulos e dimensões pretendidas.

A tabela 3.1 contém os valores padrão e descrição dos parâmetros do algoritmo.

Tabela 3.1: Parâmetros de utilização de algoritmo para construção de malha de triângulos.

Parâmetro	Descrição	Valores Padrão
setSearchRadius	Distância máxima para cada lado do triângulo	0.025
setMu	Distância máxima aceitável para o ponto ser considerado	2.5
setMaximumNearestNeighbors	Define a pesquisa do número máximo de pontos vizinhos	100
setMaximumSurfaceAngle	Ângulo máximo das normais para conexão dos pontos	$M_PI/4$
setMinimumAngle	Ângulo mínimo em cada triângulo	$M_PI/18$
setMaximumAngle	Ângulo máximo em cada triângulo	$2*M_PI/3$

Na figura 3.24 está representada uma nuvem de pontos conectados por uma malha de triângulos. A cor de cada triângulo é definida em função dos três vértices constituintes do triângulo.

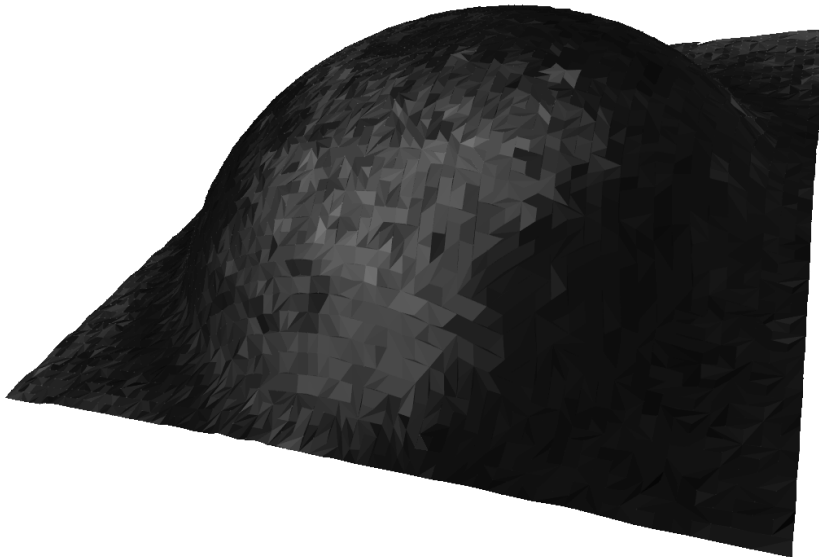


Figura 3.24: Malha de triângulos.

3.5.5 Deslocamentos 3D

A análise de deslocamentos 3D é efetuada a partir da análise da nuvem de pontos inicial (peça de referência) e final (peça após deformação). A diferença da posição final

$[X', Y', Z']$ com a posição inicial $[X, Y, Z]$ permite determinar o deslocamento ocorrido para cada ponto, equação 3.12. Os deslocamentos, máximo e mínimo, definem o intervalo dos valores de deslocamento obtidos. A cor de cada ponto representa a grandeza do deslocamento.

$$\begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

A determinação do deslocamento de cada ponto permite determinar o campo de deslocamentos. O campo de deslocamentos, aplicado à nuvem de pontos final (peça após deformação), proporciona uma análise intuitiva do processo de deformação aplicado, uma vez que permite uma análise gráfica dos resultados obtidos na ROI definida. Na figura 3.25, está representado o campo de deslocamentos de uma peça após sofrer deformação. A vermelho a zona de maior deformação e a azul a zona de menor deformação.

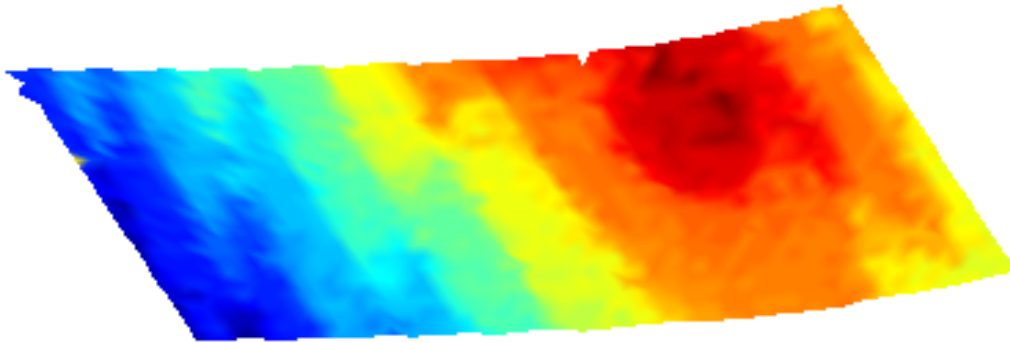


Figura 3.25: Campo de deslocamentos.

3.5.6 Interpolação dos Pontos 3D

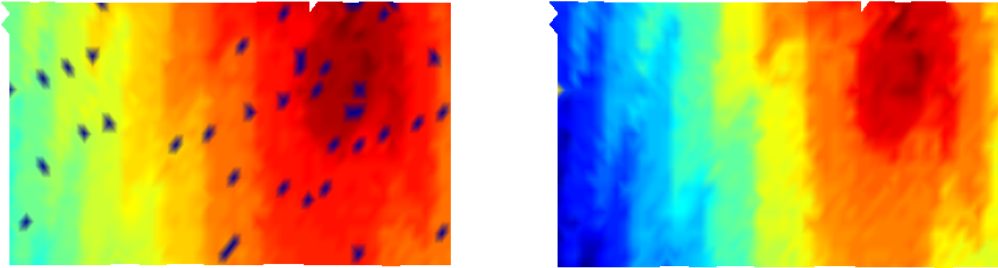
Caso o padrão de *speckles* aplicado ao provete falhe em algum ponto, a malha de triângulo representativa dos deslocamentos aplicada à peça deformada apresentaria falhas, como está representado na figura 3.26.

Para eliminar estas falhas o deslocamento relativo ao ponto em falha é obtido através da interpolação com o valor de deslocamento dos pontos na vizinhança.

3.5.7 Secções vertical e horizontal

Para análise quantitativa do campo de deslocamentos é possível definir secções de acordo com os planos $[X, Y, Z]'$ do provete relativamente ao sistema de coordenadas global.

Na figura 3.27 estão representadas duas secções, a secção vertical ao longo da direcção Y e a secção horizontal ao longo da direcção X .



(a) Campo de deslocamentos com zonas de falha.

(b) Campo de deslocamentos com interpolação de deslocamentos em falta.

Figura 3.26: Interpolação de valor de deslocamentos.

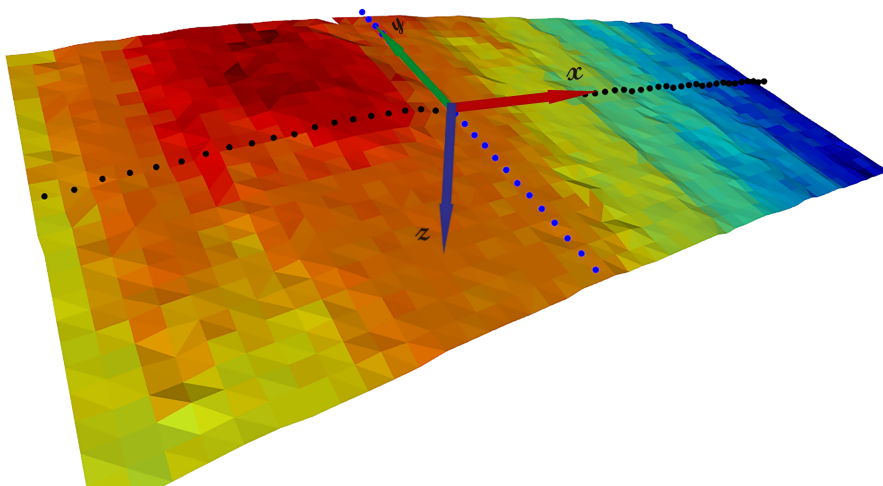


Figura 3.27: Vista das secções.

Capítulo 4

Experiências e Resultados

4.1 Sistema Stereo

O sistema *stereo* desenvolvido inicialmente era constituído por dois *Raspberry Pi* e duas câmaras com resolução $(2592 * 1944)[\text{pixels}]$, para aquisição de um conjunto de imagens *stereo*, figura 4.1. Um suporte em material polietileno maquinado num CNC (Comando Numérico Computorizado) garante a fixação das câmaras ao suporte, permitindo ajustar o *baseline* e orientação das câmaras para cada análise. Foi desenvolvido um programa em linguagem *C*, com interface gráfica, que permite ao utilizador intuitivamente, efetuar a aquisição de imagens *stereo*, sendo realizada a aquisição de duas imagens simultaneamente. Este programa estabelece a comunicação com dois *Raspberry Pi* para aquisição de imagens. No entanto, devido à falta de qualidade das câmaras e impossibilidade de controle da distância focal foi necessário utilizar um sistema *stereo* com mais qualidade, sensores e lentes de alta definição.

Um *raspberrypi* é um computador de baixo custo, desenvolvido pela *The Raspberry Foundation* com a finalidade de fornecer computadores de baixo custo para os estudantes e programas gratuitos. Este pode ser conectado a um ecrã com ligação HDMI, teclado e rato e funcionar como um computador fixo. Estão disponíveis vários módulos, entre os quais, câmaras e adaptadores wireless, etc.

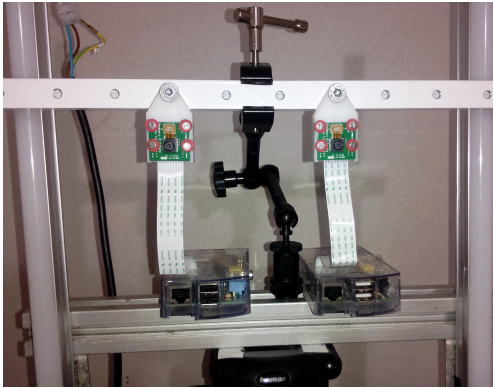
Deste modo foi adotado um sistema de visão *stereo* constituído por duas câmaras monocromáticas Genie M1280. Na figura 4.2, encontram-se as especificações técnicas das câmaras utilizadas.

O suporte das câmaras permite controlar a distância entre elas, ou seja o *baseline* e a direção dos eixos óticos.

Foram selecionadas três configurações do sistema *stereo*, que se encontram descritas com respetivas propriedades na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Propriedades das configurações selecionadas para o sistema *stereo*

<i>Baseline</i>	Distância entre eixos óticos [mm]	Orientação dos eixos óticos
<i>Narrow</i>	45,8	Paralelos.
<i>Medium</i>	71,9	Paralelos.
<i>Wide</i>	136,8	Convergem para o mesmo ponto no espaço.



(a) Sistema *stereo*: constituído por dois *Raspberry Pi*.



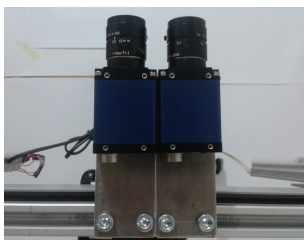
(b) *Raspberry Pi*.

Figura 4.1: Sistema *stereo*: *Raspberry Pi*.

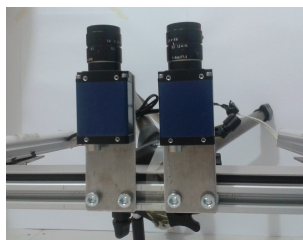
Manufacturer:	Dalsa	Model:	Genie 1280	Total Pixels:	1,228,800
Resolution:	1280(h) 960(v)	Sensor Size (inch):	1/3	Color/B & W:	Color / B&W
Frame Rate (fps):	24	Sensor Type:	CCD	Sensor Device:	Sony ICX445
Pixel Size (µm):	3.75(h) 3.75(v)	A/D Bits:	10	Shutter Speed (µs):	100(min)/4000(max)
Interface:	GigE	Voltage (VDC):	12V - 24V	Power (watts):	4
Lens Mount:	C	Shutter Type:	Global	Weight (grams):	120
S/N Ratio (dB):	call	External Trigger:	Yes	Dimensions (mm):	67Lx44Wx29H

Figura 4.2: Especificações técnicas Genie 1280.

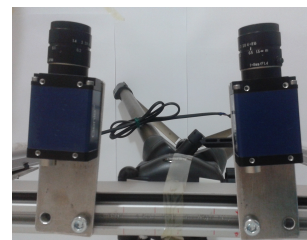
Os resultados correspondentes de cada configuração serão comparados. Para um *baseline* fixo, o erro de profundidade aumenta quadraticamente com a profundidade [29].



(a) *Narrow*.



(b) *Medium*.



(c) *Wide*.

Figura 4.3: Configurações adotadas para aquisição de imagens.

4.2 Aquisição de Imagens

De modo a proporcionar uma boa aquisição de imagens foi construído um estúdio, figura 4.4, com o objetivo de garantir uma menor variação de iluminação no decorrer do processo de deformação aplicado ao objeto, uma vez que variações na iluminação dificultam significativamente a correspondência *stereo* e temporal.

Para garantir uma correta iluminação foram utilizados dois sistemas de iluminação *led*, posicionados em cada extremidade do suporte das câmaras e direcionados para o objeto em análise. A aquisição do conjunto de imagens *stereo* deve ser efetuada em simultâneo, para garantir que não ocorrem variações nos níveis de iluminação e posicionamento da peça no espaço tridimensional.

O software utilizado para aquisição de imagens foi o *CamExpert* disponibilizado pela *Teledyne Dalsa Sopera LT*.



Figura 4.4: Estúdio de Trabalho.

4.3 Sistema Experimental

Foram desenvolvidos dois sistemas experimentais para implementação do sistema 3D DIC. O primeiro sistema experimental é constituído por uma chapa metálica, com dimensões $(50 * 500)[mm]$ fixa num suporte, e um parafuso para originar o processo de deformação, como se pode observar na figura 4.5. O propósito deste sistema foi implementar o sistema 3D DIC. Muito prático e de fácil utilização tem a vantagem de permitir análise do processo de deformação fora do plano.

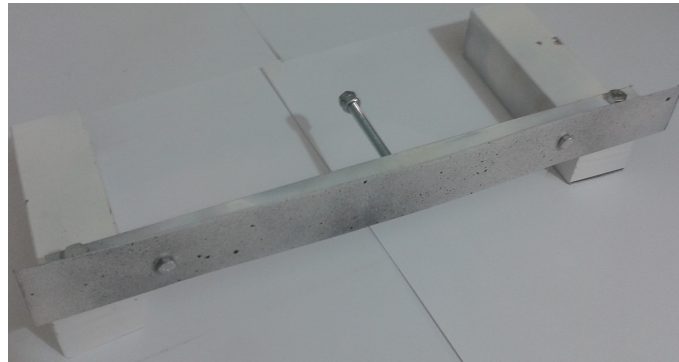


Figura 4.5: Sistema experimental para aplicar o processo de deformação.

O segundo sistema experimental constituído pela máquina de tração *Shimadzu* e um provete permitiu a análise e validação de resultados do processo de deformação. Antes da experiência, foi aplicado à superfície do provete um padrão de *speckles*. A máquina de tração *Shimadzu* permitiu aplicar deformação incrementalmente ao provete. Para cada estágio foi registado um conjunto de imagens *stereo*. Para analisar os resultados finais obtidos foram colocados os sistemas: *stereo ARAMIS* juntamente com o sistema *stereo* constituído pelas câmaras *Genie M1280*, para aquisição de conjuntos de imagens do provete no decorrer do processo de deformação, evitando diferenças de brilho entre as câmaras esquerda e direita. Para cada estágio, no processo de deformação, foi adquirido um conjunto de imagens por cada um dos sistemas *stereo*. É possível verificar os dois sistemas de aquisição de imagens bem como a máquina de tração *Shimadzu* na figura 4.6.



Figura 4.6: *ARAMIS* vs Sistema implementado.

4.4 Preparação do Provete

Avaliar deformações tridimensionais utilizando a técnica 3D DIC contempla essencialmente duas etapas: correspondência *stereo* e temporal. Para identificar os pontos correspondentes na reconstrução tridimensional inicial e final, deve ser aplicado um padrão na peça em estudo, criando uma superfície texturada. Os algoritmos de correspondência *stereo* e temporal requerem uma superfície texturada, de modo a garantir exatidão na pesquisa do pixel correspondente, uma vez que, para este cálculo o valor do pixel e respetiva vizinhança são contabilizados.

Deste modo deve ser aplicado à superfície do objeto em estudo um padrão de *speckles*. Para tal, deve ser aplicado à peça uma cobertura de tinta branca. Posteriormente, deve ser aplicado um padrão aleatório de pequenos pontos de cor preta utilizando um *spray*. Com este método, é bastante rápido e fácil aplicar um padrão texturizado, de pontos aleatórios. Na figura 4.7 encontra-se um exemplo do padrão a aplicar para utilizar esta técnica. A dimensão dos pontos pretos deve ser mínima de modo a reduzir redundâncias e melhorar a avaliação de deformação, uma vez que quando aplicado pontos de dimensões maiores o método torna-se menos exato, a superfície deixa de ser texturada e deixa de existir informação suficiente na janela de pesquisa para determinar os pixels correspondentes.

A textura da superfície ideal deve ser isotrópica, ou seja, não deve possuir orientação, porque as texturas repetitivas tendem a resultar em falsas correspondências. O padrão a aplicar deve ser um padrão texturado não periódico. Devem ser evitadas superfícies refletoras visto que originam mau contraste, bem como diferenças de brilho da câmara esquerda para a câmara direita.

Os padrões tipicamente utilizados lembram o padrão de *speckles* utilizado em técnicas laser, no entanto os padrões de *speckles* utilizados em DIC aderem à superfície e acompanham a sua deformação, proporcionando uma boa correlação de imagens mesmo para grandes valores de deformação e translação [11].

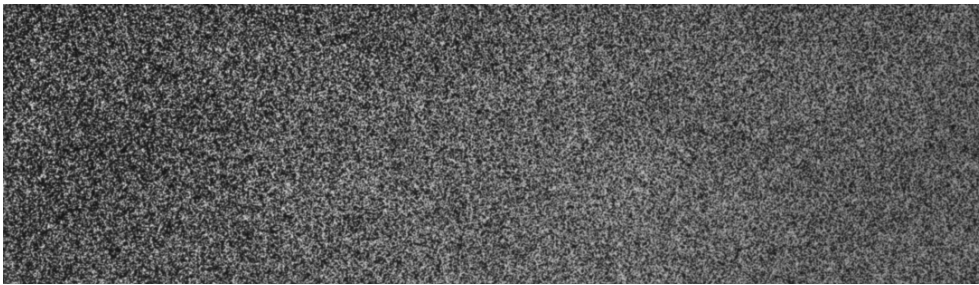


Figura 4.7: Padrão de *Speckles*.

4.5 Validação Calibração

Depois de efetuada a calibração é necessário proceder à validação dos resultados e determinar o erro existente. Foram testadas as três configurações adotadas do sistema *stereo* (figura 4.3) para determinar qual o limite de profundidade aceitável para cada *baseline* e aferir a precisão. Para proceder a esta validação recorreu-se a validação direta, por *groundtruth*.

Foram realizadas duas experiências para validar a calibração. Um objeto cilíndrico com dimensões conhecidas, com um padrão aleatório de *speckles*, colocado a diferentes profundidades das câmaras, figura 4.8. Para cada posição do objeto foi calculada a distância d , a profundidade a que se encontra o objeto, figura 4.9.

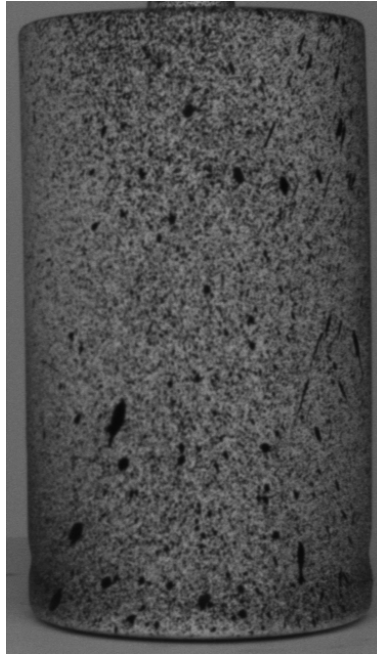


Figura 4.8: Cilindro de calibração.

Desta primeira experiência foi possível determinar o limite de profundidade de modo a obter resultados aceitáveis. O intervalo de profundidade de 200 a 700 *mm* proporciona resultados válidos de profundidade, os resultados estão representados na tabela 4.2 e figura 4.10.

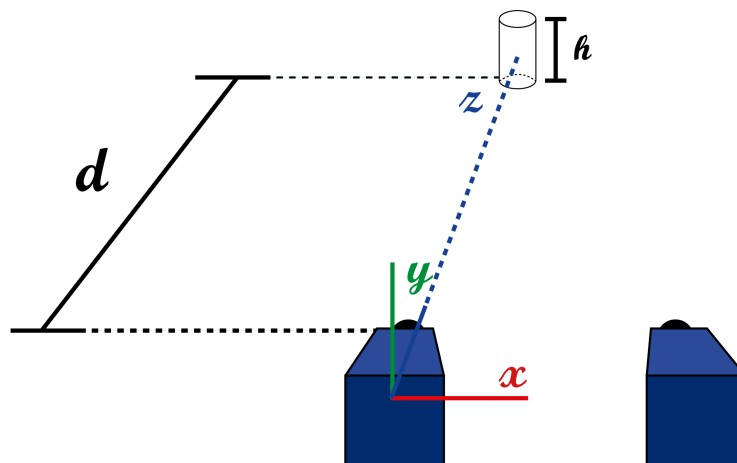


Figura 4.9: Validação da calibração.

Tabela 4.2: Cálculo de profundidade.

Distância [mm]	<i>Baseline</i>		
	<i>Narrow</i> [mm]	<i>Medium</i> [mm]	<i>Wide</i> [mm]
200	200.5	198.7	197.9
300	311.6	304.2	297.2
400	428.6	400.1	409.9
500	518.8	499.3	501.6
600	622.3	606.2	608.6
700	735.4	708.6	716.0
Erro médio	19.5	3.5	6.9

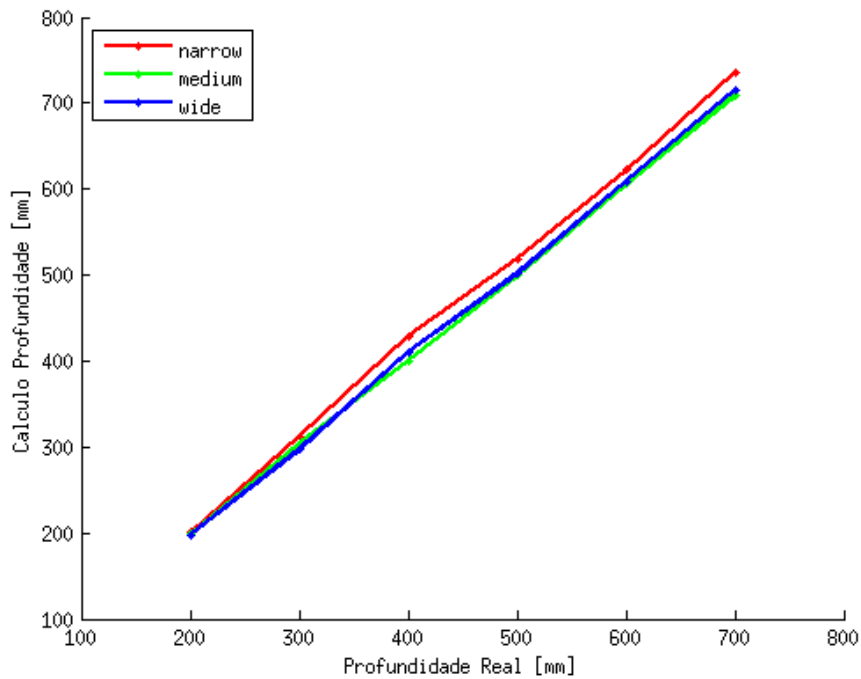


Figura 4.10: Cálculo de profundidade.

Após validar a profundidade que o objeto se encontra no espaço tridimensional, foi efetuada a segunda experiência para validar a altura h do objeto em estudo, como está representado na figura 4.9. De igual modo, o objeto foi colocado em intervalos de profundidade de 100 mm . A tabela 4.3 e a figura 4.11 apresentam os resultados comparativos da altura obtida a partir da reconstrução tridimensional relativamente à altura real do objeto 57.5 mm .

4.6 Parâmetros da função SGBM

Foi selecionado o algoritmo SGBM (*Semi-Global Block-Matching*) para cálculo do mapa disparidade.

Tabela 4.3: Validação calibração - cálculo de altura (altura real \mapsto 57.5 mm).

Distância [mm]	<i>Baseline</i>		
	<i>Narrow</i> [mm]	<i>Medium</i> [mm]	<i>Wide</i> [mm]
200	57.6	57.5	59.0
300	57.5	57.4	58.7
400	57.8	57.4	56.9
500	57.2	57.8	56.8
600	55.7	58.6	55.3
700	55.9	57.8	55.5
Erro médio [mm]	0.22	0.32	1.37

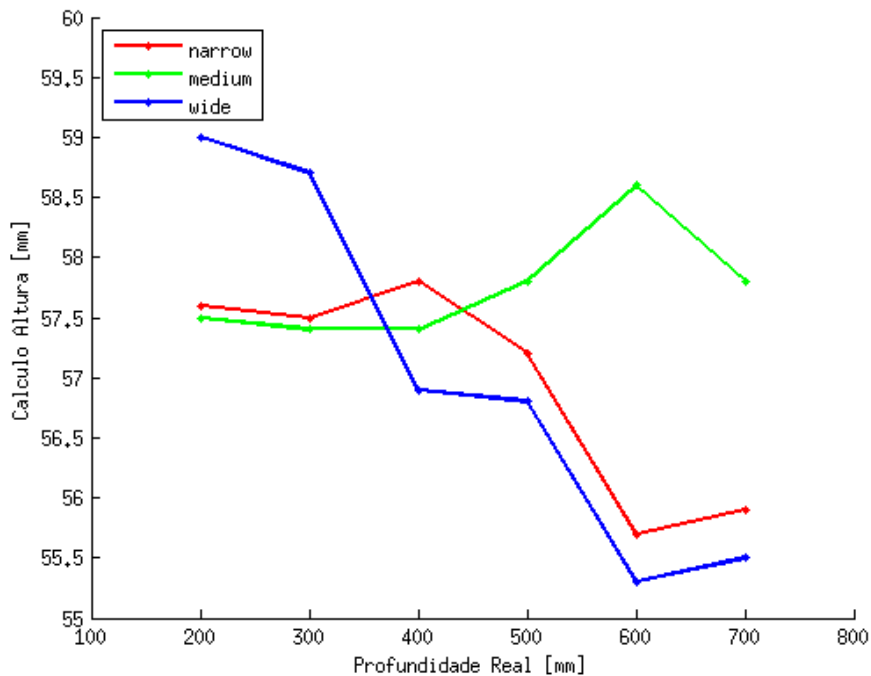


Figura 4.11: Cálculo de altura.

O algoritmo SGBM disponível na biblioteca *OPENCV* permite determinar um conjunto de parâmetros para o cálculo *stereo*. Os parâmetros disponíveis estão enumerados na tabela 4.4. O ajuste destes parâmetros define a qualidade do *stereo*.

Encontram-se disponíveis vários exemplos com valores indicativos, no entanto não existe um conjunto de valores perfeitos, sendo necessário ajustar os parâmetros para cada situação. Fatores como o *baseline*, orientação, posicionamento das câmaras e iluminação condicionam e influenciam os parâmetros a utilizar. Para determinar os valores adequados é possível analisar o resultado do cálculo *stereo* a partir da imagem disparidade e da correspondente nuvem de pontos tridimensional.

O parâmetro *MinDisparity* define onde é iniciada a pesquisa da correspondência, normalmente 0, no entanto alguns algoritmos de retificação podem deslocar as imagens.

Definir o início de pesquisa facilita a correspondência para casos em que a disparidade é elevada e reduz o tempo de processamento. A pesquisa da disparidade é limitada por *numDisparities* que corresponde ao valor máximo, em pixels, para pesquisa da disparidade. Reduzindo este campo, o tempo de processamento é menor. O parâmetro *SADWindowSize* corresponde à janela de correlação e a sua dimensão, definida pelo utilizador, determina o número de pixels vizinhos que entram no cálculo da função de custo de [Birchfield Tomasi, 98]. O parâmetro *disp12MaxDiff* delimita a diferença máxima admitida (em pixels) no teste de consistência na imagem disparidade esquerda/direita. O parâmetro *P1* afeta todos os pixels com disparidade pequena, enquanto que *P2* afeta os pixels restantes (ver página 32).

Após calculada a função de custo [BT] e sucessiva agregação de custos [SGBM] é aplicado um filtro para remover falsas correspondências.

Os parâmetros *speckleWindowSize* e *speckleRange* diminuem o efeito *speckling* que se forma em descontinuidades.

Na figura 4.12 está representado um exemplo de uma imagem disparidade, obtida a partir de um conjunto de imagens *stereo* retificadas.

Tabela 4.4: Parâmetros algoritmo SGBM.

Parâmetro	Descrição	200 [mm]	300 [mm]	400 [mm]	500 [mm]	600 [mm]	700 [mm]
minDisparity	Disparidade mínima	300	150	150	150	100	50
numberOfDisparities	Disparidade máxima	25*16	25*16	20*16	20*16	15*16	15*16
preFilterCap	Constante de normalização de imagem	63	63	63	63	63	63
SADWindowSize	Tamanho da janela de correlação	3	3	3	3	3	3
P2	Controla os valores de disparidade maiores que 1 pixel	1500	1500	1500	1500	1500	1500
P1	Controla os valores de disparidade pequenos	500	500	500	500	500	500
uniquenessRatio	Limite mínimo em percentagem correspondente ao teste de consistência do mapa de disparidade.	50	50	50	50	50	50
speckleWindowSize	Dimensão da janela para filtrar <i>speckles</i> .	100	100	100	100	100	100
speckleRange	Disparidade máxima aceite. Este valor é multiplicado por 16.	32	32	32	32	32	32
disp12MaxDiff	Diferença mínima para disparidade.	1	1	1	1	1	1
fullDP	full scale algorithm	true	true	true	true	true	true

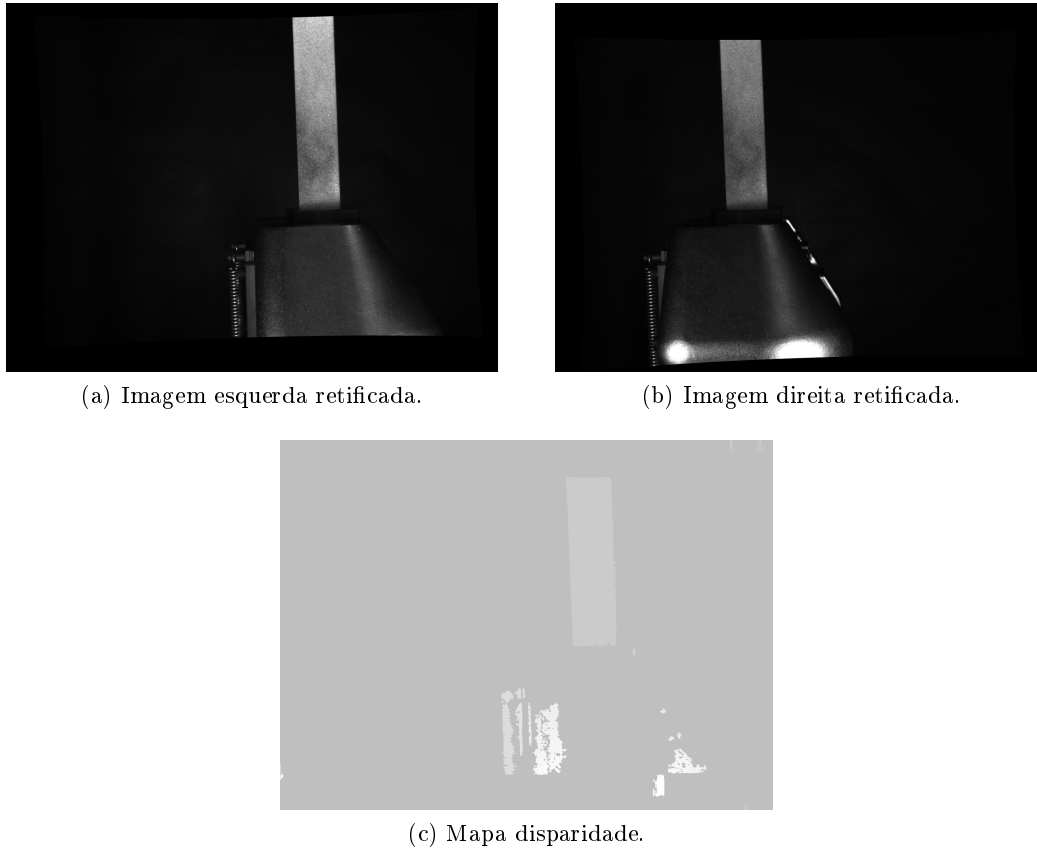


Figura 4.12: Mapa disparidade obtido a partir de par de imagens *stereo* retificadas.

4.7 Parâmetros da função Gunnar Farnebäck

O algoritmo de *Gunnar Farnebäck (optical flow)* disponível na biblioteca OPENCV, para cálculo do mapa de deslocamentos, permite o ajuste de parâmetros. Estes parâmetros devem ser definidos para cada situação na medida de obter melhores resultados ou capacidade de aquisição mais elevada.

Na tabela 4.5, encontram-se os parâmetros da função, respetiva descrição e valor utilizado. Os primeiros parâmetros, *prev* e *next*, correspondem à primeira imagem (imagem inicial) e segunda imagem (imagem após deformação), para análise dos deslocamentos.

O parâmetro *flow* corresponde ao mapa denso de deslocamentos 2D devolvido pela função.

O parâmetro *pyr_scale* especifica a escala da imagem para representar cada imagem em pirâmide, um valor de 0.5 significa uma pirâmide clássica, na qual a próxima camada é metade da anterior. A representação da imagem em pirâmide tem início no nível 0, nível da imagem. Admitindo uma imagem I com dimensão $[nx * ny]$ o comprimento e largura é definido como $nx_0 = nx$ e $ny_0 = ny$. A representação em pirâmide é então construída de um modo recursivo, obtendo $I1$ de $I0$, de seguida $I2$ de $I1$ e assim sucessivamente. Por exemplo para uma imagem com resolução $[1280 * 1024]$ as imagens $I1$, $I2$, $I3$ e $I4$ têm as dimensões $[640 * 612]$, $[320 * 156]$, $[160 * 78]$, $[80 * 39]$, respetivamente.

O número de camadas por pirâmide incluindo a imagem inicial é determinado pelo campo *levels*, no qual *levels* = 1 só é considerada a imagem original.

O parâmetro *winsize* controla a dimensão da janela de pesquisa, para valores mais elevados, a probabilidade de obter ruído na imagem aumenta, no entanto proporciona uma melhor detecção para movimentos rápidos.

O número de iterações para cada nível da pirâmide pode ser controlado em *iterations*.

A função permite determinar a vizinhança de pixels para encontrar a expansão polinomial para cada pixel em *poly_n*, valores mais elevados significam que a imagem irá ser aproximada por superfícies suaves.

O parâmetro *poly_sigma* controla o desvio padrão da curva Gaussiana que é utilizada como ponto de partida para a expansão polinomial, para um valor de *poly_n* = 5 *poly_sigma* deve ser 1.1 e para um valor de *poly_n* = 7, *poly_sigma* deve ser 1.5.

Tabela 4.5: Parâmetros função *farneback*.

Parâmetro	Descrição	Valores
prev	Primeira Imagem	"Antes Deformação"
next	Segunda Imagem	"Após Deformação"
flow	Mapa Denso de Deslocamentos	"Flow"
pyr_scale	Escala da imagem para representação em pirâmide	0.5
levels	Número de camadas por imagem	3
winsize	Dimensão da janela de pesquisa	11
iterations	Número de iterações por cada camada de pirâmide	5
poly_n	Vizinhança de pixels a considerar para expansão polinomial	5
poly_sigma	Desvio Padrão da Curva Gaussiana	1.1

4.8 Validação Reconstrução tridimensional

Após efetuada a reconstrução tridimensional é necessário calcular o erro associado. O método utilizado neste trabalho avalia a distância média da nuvem de pontos a um plano teórico.

Foi colocada uma chapa plana metálica no espaço tridimensional, com um ângulo aproximado de trinta graus com a horizontal, para possibilitar a avaliação da reconstrução tridimensional para diferentes intervalos de profundidade, como está representado na figura 4.13.

Para avaliar o erro da reconstrução para várias profundidades é necessário segmentar a nuvem de pontos com um filtro de distâncias, no qual a profundidade varia em intervalos de 100 *mm*.

Assim, torna-se possível determinar a distância da nuvem de pontos tridimensional ao plano estimado para o intervalo de profundidade em análise.

O modelo RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*) permite determinar os coeficientes de alguns modelos teóricos, neste caso o plano. A validação da reconstrução tridimensional consiste na comparação do modelo teórico com a nuvem de pontos aproximada ao

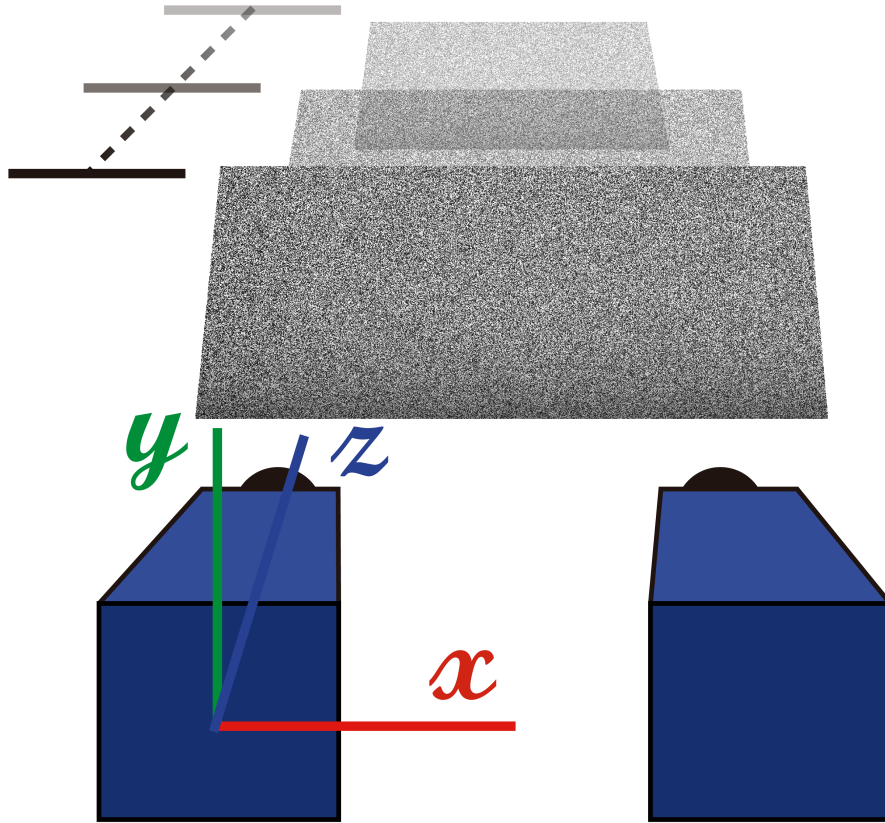


Figura 4.13: Validação tridimensional.

modelo estimado. Este é um método iterativo em que os coeficientes devolvidos para o plano são directamente afetados pelo número de iterações realizadas [35].

A biblioteca *PCL* possui uma classe para determinar alguns modelos matemáticos. O algoritmo devolve os coeficientes $[a, b, c, d]$ da equação do plano obtido da nuvem de pontos, equação 4.1.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4.1)$$

A partir dos coeficientes do plano, e conhecendo as coordenadas $[x_0, y_0, z_0]'$ do ponto é possível determinar a distância de cada ponto ao plano, equação 4.2, como está representado na figura 4.14.

$$D = \frac{ax_0 + by_0 + cz_0 + d}{\text{sqrt}(a^2 + b^2 + c^2)} \quad (4.2)$$

A análise da reconstrução tridimensional consistiu na análise da distância média da

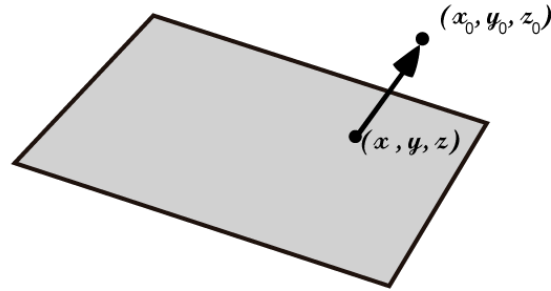


Figura 4.14: Distância do ponto ao plano.

nuvem de pontos ao plano D_{med} , para diferentes intervalos de profundidade. Deste modo, o resultado consiste no somatório das distâncias, D , em relação ao número total de pontos N , como está representado na equação 4.3.

$$D_{med} = \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{N} \quad (4.3)$$

Tabela 4.6: Erro médio entre a nuvem de pontos e o plano teórico.

Intervalo Profundidade mm	<i>Baseline</i>		
	<i>Narrow</i> mm	<i>Medium</i> mm	<i>Wide</i> mm
200/300	0.21	0.11	0.10
300/400	0.16	0.10	0.12
400/500	0.23	0.18	0.11
500/600	0.53	0.31	0.20
600/700	0.70	0.46	0.20
700/800	0.94	0.60	0.32
Erro médio	0.47	0.29	0.17

A tabela 4.6, apresenta o erro médio entre a nuvem de pontos e o plano teórico para os diferentes intervalos de profundidade, e comprova que o erro da reconstrução tridimensional aumenta proporcionalmente com a profundidade e com o *baseline*. O erro associado à reconstrução tridimensional é mínimo para os primeiros dois intervalos de profundidade 200/300 mm e 300/400 mm, na ordem dos 0,1 mm. Como tal o intervalo de profundidade selecionado para implementação de todo o processo corresponde a 300/400 mm, tendo em vista a obtenção de uma nuvem de pontos de um objeto no espaço tridimensional com o menor erro associado.

A precisão da reconstrução 3D depende de vários fatores [36]:

- Qualidade das câmaras e resolução;
- Sensibilidade conversor Analógico/ Digital;
- A configuração das duas câmaras (*baseline* e ângulo entre os eixos óticos), figura 3.15;

- Profundidade do objeto em análise;
- A precisão da calibração do sistema stereo;
- A precisão das correspondências na imagem esquerda e direita.

4.9 Exemplos de Reconstrução Tridimensional

O intervalo de profundidade para análise do objeto no espaço tridimensional definido pela validação da reconstrução, permite definir o intervalo de profundidade a colocar o objeto para obter melhores resultados.

Para validar qualitativamente a reconstrução tridimensional várias superfícies, com diferentes geometrias, foram alvo de estudo. Nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17 é possível visualizar as várias superfícies com as diferentes geometrias para o *baseline Narrow, Medium* e *Wide*, respetivamente.

4.10 Análise de Deslocamentos

A análise de um provete antes de sofrer deformação, estado de referência, e depois de deformado, estado deformado, permite obter o campo de deslocamentos relativos ao processo de deformação. Processando o deslocamento máximo e mínimo é possível definir um valor no intervalo de cores para cada deslocamento de acordo com o seu valor de deslocamento.

Uma malha de triângulos aplicada à nuvem tridimensional do estado deformado, permite compreender intuitivamente o campo dos deslocamentos ocorrido durante o processo de deformação. A cor de cada triângulo é obtida através da interpolação da cor dos três vértices de cada triângulo.

4.10.1 Secções do Provete

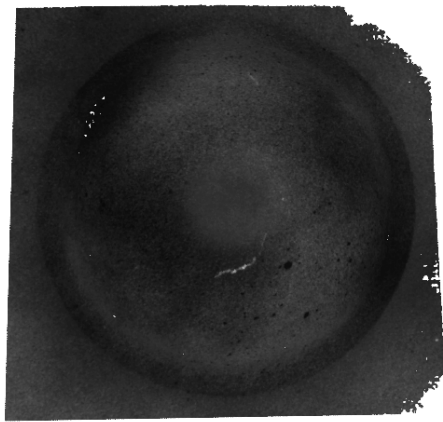
Para análise dos deslocamentos ocorridos no provete submetido a um ensaio de tração foram definidas duas secções no provete. Uma secção vertical e uma horizontal como se verifica na figura 4.18a. A secção vertical permite a análise dos deslocamentos na direção *Y*, enquanto que a secção horizontal permite a análise dos deslocamentos ao longo da direção *X*.

Foram definidas as mesmas secções, no mesmo local do provete nos dois sistemas possibilitando a comparação e análise de erro do sistema *stereo* constituído pelas câmaras *Genie* relativamente ao sistema ARAMIS.

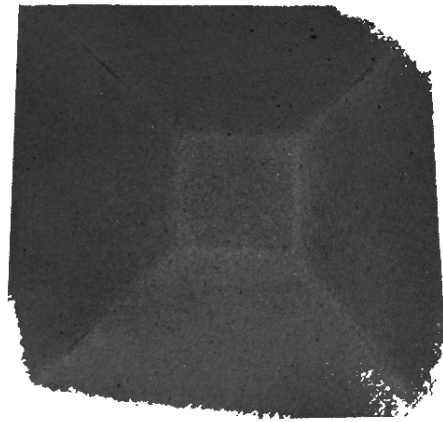
Os deslocamento máximo e mínimo definem o intervalo dos resultados dos deslocamentos, a cor de cada ponto define a grandeza do valor de deslocamento obtido.

4.10.2 Reconstrução Tridimensional Provete

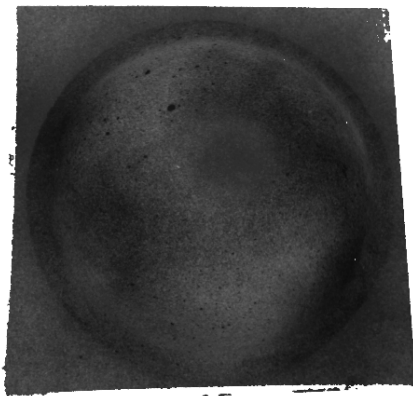
A partir do conjunto de imagens *stereo* é possível fazer a reconstrução tridimensional do objeto em análise. Na figura 4.18b é possível visualizar a reconstrução tridimensional do provete através da nuvem de pontos, a cor de cada ponto da nuvem de pontos é obtida através da imagem retificada esquerda.



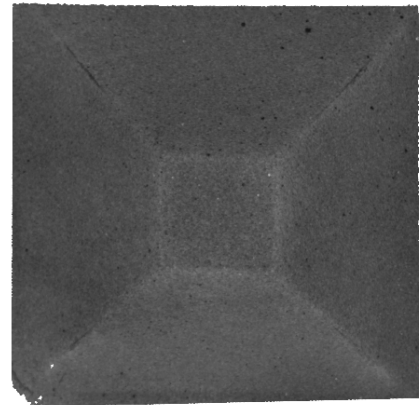
(a) Cupula.



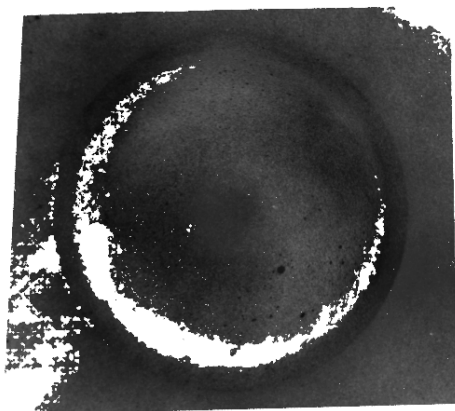
(b) Pirâmide.

Figura 4.15: *Baseline narrow.*

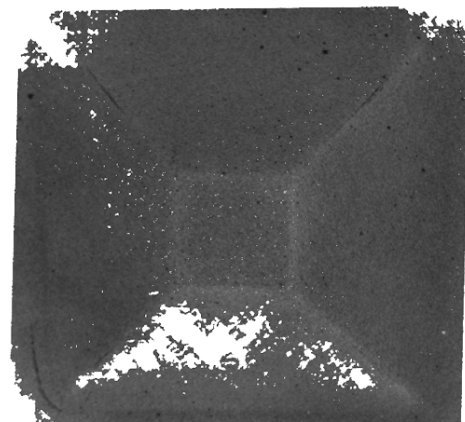
(a) Cupula.



(b) Pirâmide.

Figura 4.16: *Baseline medium.*

(a) Cupula.



(b) Pirâmide.

Figura 4.17: *Baseline wide.*

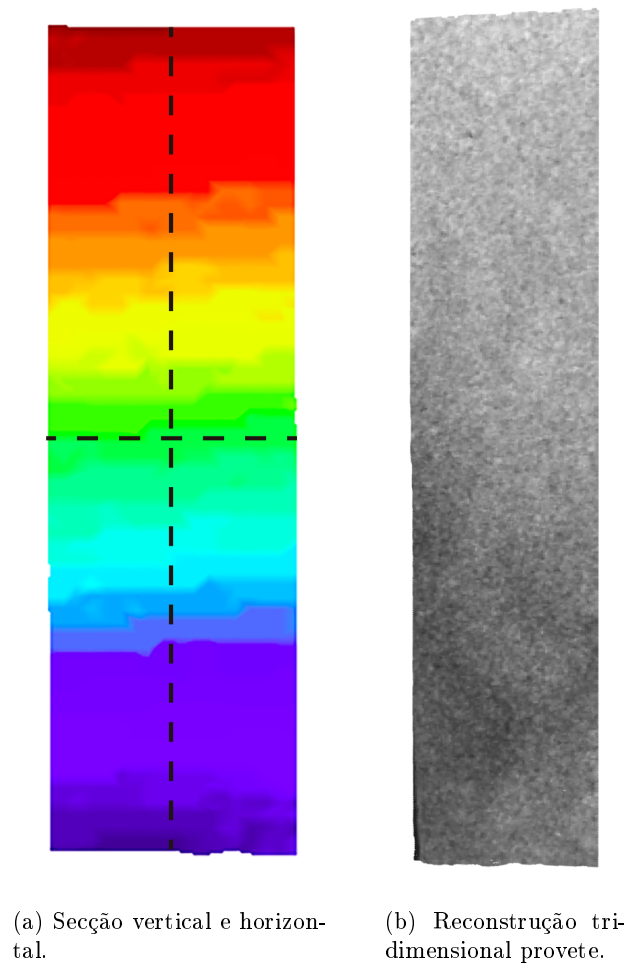


Figura 4.18: Reconstrução tridimensional e secções aplicadas ao provete.

4.10.3 Tracking 3D

A técnica 3D DIC (*Digital Image Correlation*) implementada nesta dissertação de mestrado contempla duas etapas: correspondência *stereo* e temporal. A correspondência temporal, permite a correlação da peça de referência e da peça após deformação. A imagem obtida pela câmara esquerda permite determinar os deslocamentos 2D (figura 4.19a), passo fundamental para determinar os deslocamentos 3D. A partir dos deslocamentos 2D é possível corresponder os pontos da nuvem de pontos inicial e final. Na figura 4.19b, é possível visualizar a correspondência dos pontos tridimensionais, a verde está representada a nuvem da peça de referência e a vermelho a nuvem referente à peça após processo de deformação, as linhas a cinzento conectam os pontos correspondentes.

4.10.4 Análise de deslocamentos

O cálculo do campo de deslocamentos permite analisar a deformação aplicada ao provete. Para cada ponto da nuvem de pontos, delimitada pela região de interesse, *ROI*, definida no provete, foram calculados os deslocamentos $[dX, dY, dZ, dNorma]'$ nas direções

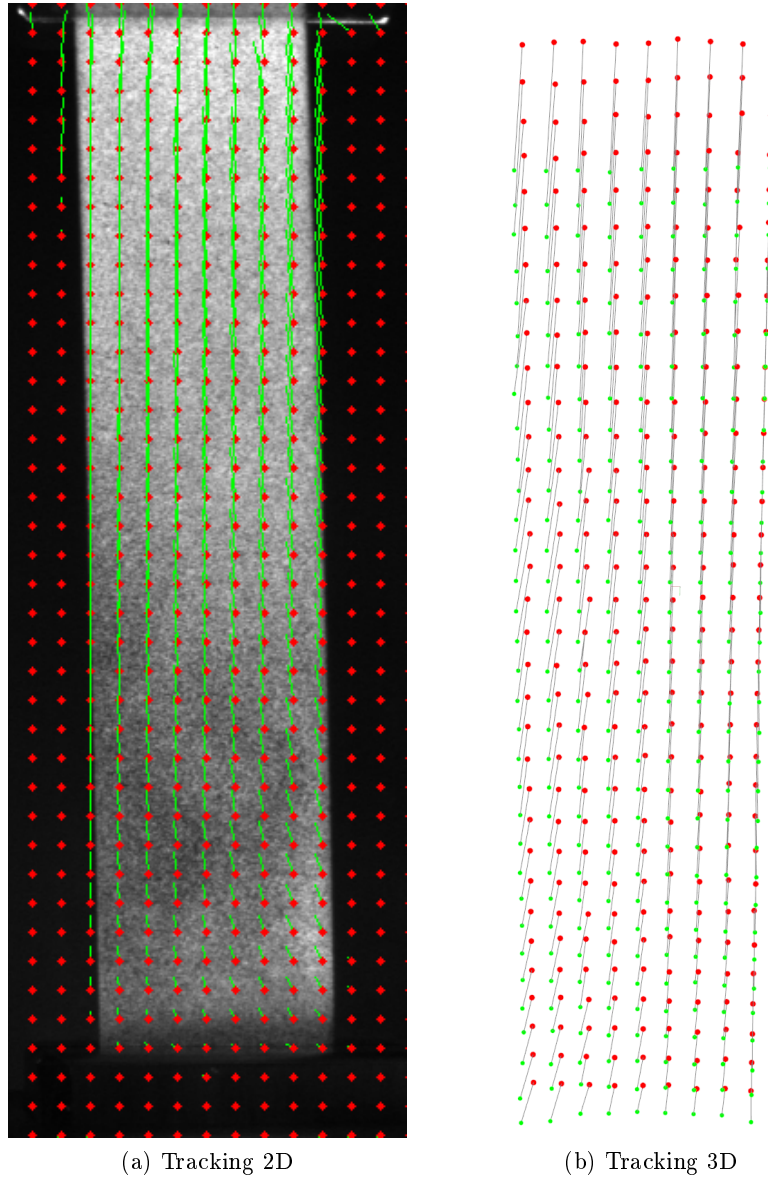


Figura 4.19: *Tracking*.

$[X, Y, Z, Norma]'$. A *Norma* quantifica a magnitude dos deslocamentos $[dX, dY, dZ]'$ para cada ponto. As figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 apresentam os resultados de deslocamentos obtidos para a direção $[X, Y, Z, Norma]'$, respectivamente.

Os deslocamentos, aplicado à reconstrução tridimensional da peça deformada, permite uma análise intuitiva do processo de deformação aplicado ao provete. Nas figuras 4.20a, 4.20b, 4.21a, 4.21b, 4.22a, 4.22b encontram-se representadas as nuvens de pontos com o campo de deslocamentos, obtidas pelo sistema 3D DIC implementado nesta dissertação de mestrado e pelo sistema ARAMIS. Deste modo, é possível comparar os campos de deslocamentos obtidos pelos dois sistemas.

As duas secções: horizontal e vertical, definidas no provete permitem analisar quanti-

tativamente os deslocamentos obtidos pelos dois sistemas. Os gráficos representados nas figuras 4.20c, 4.21c, 4.22c, 4.23c, representam os deslocamentos obtidos ao longo da secção vertical, enquanto que os gráficos das figuras 4.20d, 4.21d, 4.22d, 4.23d representam os resultados obtidos ao longo da secção horizontal. A azul estão representados os resultados obtidos pelo sistema implementado nesta dissertação e a vermelho os resultados obtidos pelo sistema ARAMIS.

Para quantificar o erro obtido pelo sistema implementado nesta dissertação os resultados obtidos ao longo de cada secção pelo sistema ARAMIS foram considerados os resultados de referência. Deste modo, para cada coordenada ao longo da secção vertical e horizontal foi quantificado a diferença entre o valor de deslocamento obtido pelo sistema ARAMIS (D_{ARAMIS}) e pelo sistema implementado ($D_{SistemaImplementado}$), equação 4.4.

$$Erro = D_{ARAMIS} - D_{SistemaImplementado} \quad (4.4)$$

Os valores de erro calculados foram representados graficamente através de histogramas, permitindo a análise da distribuição do erro.

Nas tabelas 4.7 e 4.8, apresentam-se os resultados do erro para a secção horizontal e vertical, respetivamente. Foi determinado o erro médio, desvio padrão e RMS para as direções $[X, Y, Z, Norma]'$. Os resultados serão discutidos no sub-tópico 4.11.

Tabela 4.7: Erro no cálculo dos deslocamentos na secção horizontal.

Direção	RMS [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
dX	0.10	0.07	0.07
dY	0.05	0.02	0.04
dZ	0.82	0.77	0.29
$dNorma$	0.01	0.01	0.02

Tabela 4.8: Erro no cálculo dos deslocamentos na secção vertical.

Direção	RMS [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
dX	0.12	0.08	0.08
dY	0.25	0.09	0.23
dZ	0.83	0.77	0.30
$dNorma$	0.82	0.77	0.30

4.11 Discussão de Resultados

Os resultados obtidos a partir do processo de calibração permitiram definir um intervalo de profundidade, para o qual as dimensões dos objetos obtidos por reconstrução tridimensional, correspondem a resultados válidos. O objeto de calibração consistiu num cilindro, ao qual foi aplicado um padrão de *speckles*. Da primeira experiência, que consistiu no cálculo de profundidade a que encontrava o objeto em análise, verificou-se que os resultados experimentais obtidos são válidos. O erro presente no cálculo de profundidade advém do posicionamento do objeto de calibração no espaço tridimensional e ao erro associado ao cálculo da profundidade na técnica visão *stereo*.

Da segunda experiência, que consistiu no cálculo da altura do cilindro, os resultados mostraram-se bastante satisfatórios uma vez que os erros obtidos foram na ordem do décimo de milímetro. Com o aumento da profundidade o erro relativo ao cálculo da altura tende a aumentar, mais notório no *baseline Narrow*, a altura do objeto obtida tende a diminuir com o aumento da profundidade. Desta experiência, salientam-se os *baselines Narrow* e *Medium* visto que os resultados foram mais precisos, apresentando um erro médio para cálculo da altura do cilindro de 0.22 mm e 0.32 mm , respetivamente, para os seis intervalos de profundidade.

Do processo de calibração resulta o conhecimento do intervalo de profundidade para os quais os diferentes *baselines* apresentam resultados aceitáveis. No entanto, apenas pela análise destas duas experiências não é possível determinar qual o *baseline* que proporciona resultados mais exatos.

Os resultados obtidos da reconstrução tridimensional podem ser analisados qualitativamente e quantitativamente. Qualitativamente, através da análise visual das nuvens de pontos tridimensionais. Os *baselines Narrow* e *Medium* apresentam bons resultados a nível da reconstrução tridimensional. As nuvens apresentam uma boa densidade de pontos, com poucas falhas e pouco ruído. Por outro lado, o *baseline Wide* apresenta menor densidade de pontos, e largas zonas de falhas nas quais o algoritmo para cálculo do mapa disparidade falhou, apresentando também algumas zonas de ruído. Quando as câmaras se encontram perfeitamente alinhadas, com as linhas epipolares alinhadas e eixos óticos paralelos a pesquisa da correspondência torna-se mais eficaz uma vez que é mantida a similaridade entre as imagens. A diferença nos resultados resulta da configuração do sistema *stereo*, uma vez que para os *baselines Narrow* e *Medium* foi garantido o paralelismo entre os eixos óticos. Por outro lado para o *baseline Wide* o paralelismo entre os eixos óticos deixou de ser garantido, as câmaras foram posicionadas no espaço de modo a convergirem para o mesmo ponto no objeto em estudo no espaço real. A orientação e posição dos eixos óticos no cálculo *stereo* representam um fator determinante na qualidade e precisão a obter. O ângulo entre as câmaras dificulta a correlação dos pixels na imagem esquerda e direita, com o aumento do ângulo aumenta a dificuldade na correlação. A similaridade entre as imagens deixa de ser garantida com o aumento do ângulo entre os eixos óticos, os pixels contidos na janela de pesquisa começam a apresentar informação diferente. O efeito perspectiva é um exemplo de um dos fatores que condicionam a similaridade entre as imagens.

Para complementar a análise anterior foi determinado o erro proveniente da reconstrução tridimensional, para diferentes intervalos de profundidade. O cálculo da distância média da nuvem de pontos tridimensional, ao plano teórico, permitiu determinar qual o *baseline* que proporciona a reconstrução tridimensional mais exata. Desta experiência foi também possível determinar qual o intervalo de profundidade para o qual o sistema *stereo* apresenta menor erro. Os *baselines: Narrow, Medium* e *Wide* apresentam um erro médio de 0.47 mm , 0.29 mm e 0.17 mm , respetivamente. Os resultados que apresentaram menor erro foram os *baselines Medium* e *Wide*, para os intervalos de profundidade: $200/300\text{ mm}$ e $300/400\text{ mm}$. O *baseline* tem especial importância no cálculo do erro de profundidade associado ao *stereo*, erro que aumenta quadraticamente com a profundidade, figura 3.16.

A partir da análise qualitativa e quantitativa das reconstruções tridimensionais, foi possível determinar qual o *baseline* a utilizar nesta dissertação. O *baseline Medium* foi o *baseline* adotado neste trabalho, uma vez que apresenta melhor densidade de pontos na

reconstrução tridimensional e menor erro que o *baseline Narrow*.

Os resultados da medição do campo de deslocamentos nas direções $[X, Y, Z, Norma]'$ encontram-se representados nas figuras 4.20a, 4.20b, 4.21a, 4.21b, 4.22a, 4.22b, 4.23a, 4.23b. O campo de deslocamentos proporciona uma análise rápida e intuitiva do estado de deformação da peça. Para cada direção e norma é possível comparar o campo de deslocamentos obtidos pelo sistema implementado nesta dissertação relativamente ao sistema *ARAMIS*.

As secções vertical e horizontal definidas ao longo do provete, permitem obter os valores de deslocamentos ao longo da secção, permitindo uma análise quantitativa dos resultados.

As secções foram definidas de igual modo no sistema implementado nesta dissertação de mestrado e no sistema *ARAMIS*. Para cada ponto ao longo da secção definida, foi quantificado o deslocamento $[dX, dY, dZ]'$. Os resultados obtidos pelo sistema *ARAMIS* são considerados os resultados de referência, que servem como termo de comparação. Para cada coordenada ao longo da secção foi registado o valor obtido por ambos os sistemas, como se pode visualizar nos gráficos das figuras: 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23. Deste modo, foi possível calcular a diferença dos resultados obtidos pelos dois sistemas, como se observa nos histogramas representativos do erro.

Os resultados dos deslocamentos na direção X , obtidos ao longo da secção vertical, apresentam um erro médio de 0.08 mm e um desvio padrão de 0.08 mm apresentando uma densidade maior de erro para 0.30 mm pela análise do respetivo histograma, figura 4.20e. Pela análise do gráfico, figura 4.20c, verifica-se que os valores de deslocamentos obtidos tendem a manterem-se constantes, atingindo um valor máximo absoluto de 0.69 mm . O deslocamento na direção X apresenta valores de deslocamento no décimo de milímetro, uma vez que esta direção não é a direção de tração do provete.

No caso da secção horizontal os valores de deslocamento acompanham os resultados obtidos pelo sistema *ARAMIS* embora com alguma discrepância, figura 4.20d. Estas pequenas diferenças são originadas pela limitação na aquisição do número de cinzentos da câmara (resolução em profundidade). Os resultados obtidos apresentam um erro médio de 0.07 mm , e desvio padrão 0.07 mm apresentando deste modo uma distribuição normal, como se verifica pela análise do histograma, figura 4.20f.

É possível verificar o valor de deslocamentos obtidos na direção Y , ao longo da secção vertical na figura 4.21c, estes apresentam-se sob a forma aproximada de uma reta com declive negativo. Os degraus obtidos pelo sistema implementado resultam da limitação de aquisição da câmara. Esta secção apresenta um valor máximo e mínimo de deslocamento de 7.18 mm e de 1.36 mm , respetivamente. A direção Y é a direção de tração do provete, resultando em valores de deslocamento mais elevados. O histograma referente à distribuição do erro para a direção Y , figura 4.21e, demonstra uma distribuição normal com um erro médio de 0.09 mm e um desvio padrão 0.23 mm .

Ao longo da secção horizontal os valores de deslocamento na direção Y apresentam um deslocamento máximo e mínimo de 4.28 mm e 4.21 mm respetivamente. O valor de deslocamento dY tende a manter-se constante ao longo da secção horizontal, uma vez que a deformação na direção Y ao longo da secção horizontal tende a ser uniforme. O cálculo do erro apresenta um erro médio de 0.02 mm e um desvio padrão 0.04 mm .

Os deslocamentos na direção Z representam os deslocamentos em profundidade. Pela análise dos gráficos das secções vertical e horizontal, figura 4.22c e 4.22d verifica-se alguma discrepância nos resultados obtidos que resulta do erro associado ao cálculo de

profundidade utilizando a técnica visão *stereo*.

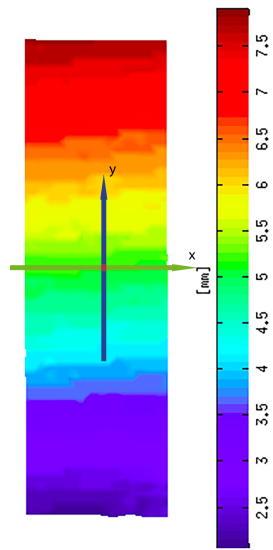
Pela análise dos referentes histogramas, figura 4.22e e 4.22f, verifica-se um erro médio de 0.77 mm para a secção vertical e horizontal.

Para diminuir o erro obtido no cálculo do campo de deslocamentos na direção Z , várias medidas poderiam ser adotadas:

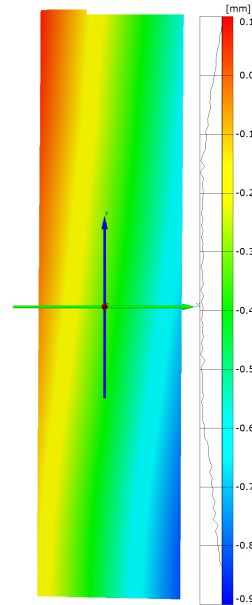
- melhorar a precisão da calibração do sistema *stereo*;
- adotar umas câmaras e lentes com mais qualidade;
- diminuir a profundidade a que se encontra o objeto em estudo;
- aumentar o *baseline* entre as câmaras;
- utilização de algoritmos de correspondência *stereo* com maior ordem de precisão;
- desenvolvimento de um sistema *stereo* capaz de controlar com precisão a configuração das câmaras.

A norma dos deslocamentos, representa o valor da magnitude do vetor deslocamento para cada ponto. Pela análise do gráfico da secção vertical (figura 4.23c) verifica-se que apresenta um resultado semelhante aos deslocamentos na direção Y , uma vez que a direção Y consiste na direção de tração do provete e tem especial importância no cálculo da norma. Os resultados obtidos apresentam-se sobre uma reta com declive negativo. A reta obtida pelo sistema implementado intersecta a reta obtida pelo ARAMIS e como tal pela análise do referente histograma verifica-se dois picos.

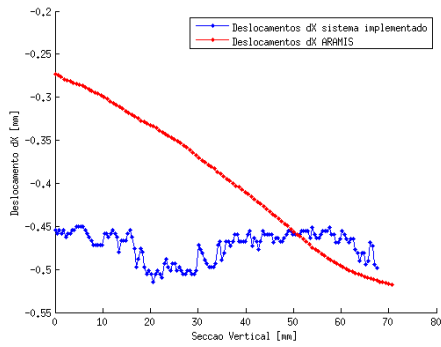
A figura 4.23d, permite a análise da norma dos deslocamentos ao longo da secção horizontal, os resultados obtidos revelam uma discrepância na ordem dos 0.1 mm , no entanto tendem a manter um valor constante quando analisados na ordem do décimo de milímetro. A partir da análise deste gráfico é possível verificar o erro associado ao processo *stereo*, uma vez que os pontos *outliers* têm principal origem no cálculo da profundidade. O erro médio associado tende para 0.01 mm com um desvio padrão de 0.02 mm , o intervalo de erro dos deslocamentos com maior densidade de pontos situa-se entre -0.01 mm e 0.03 mm .



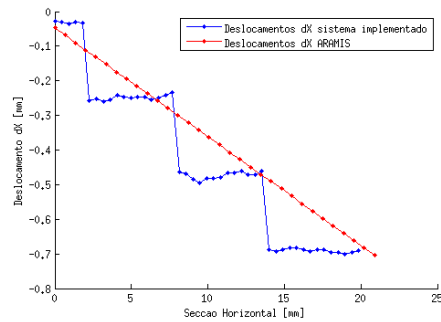
(a) Campo de deslocamentos dX , sistema implementado.



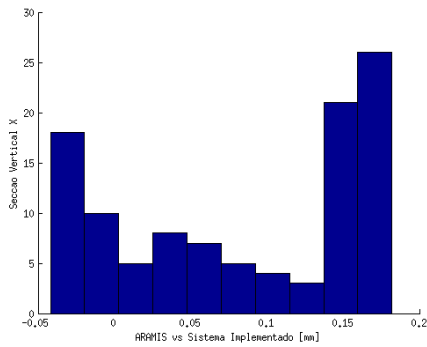
(b) Campo de deslocamentos dX , ARAMIS.



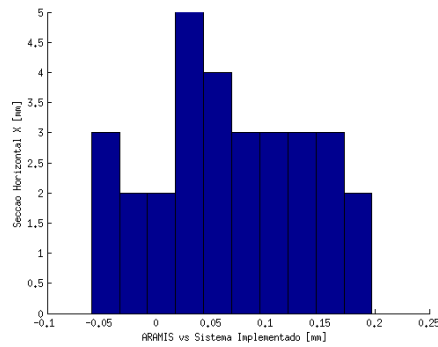
(c) Deslocamentos dX ao longo da seção vertical.



(d) Deslocamentos dX ao longo da seção horizontal.

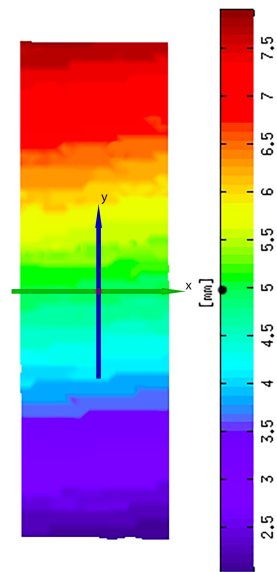


(e) ARAMIS vs Sistema implementado - Seção vertical, direção X .

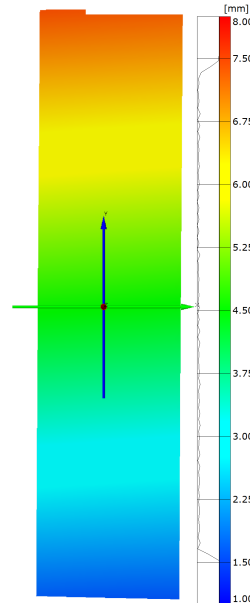


(f) ARAMIS vs Sistema implementado - Seção horizontal, direção X .

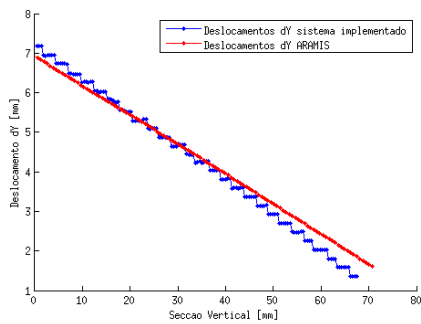
Figura 4.20: Deslocamentos na direção X .



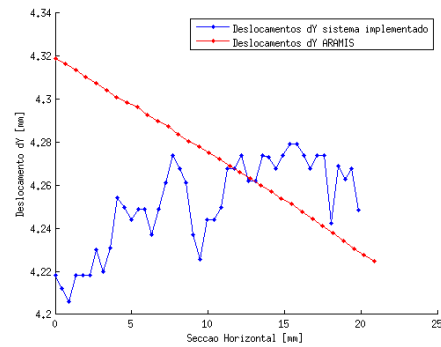
(a) Campo de deslocamentos dY , sistema implementado.



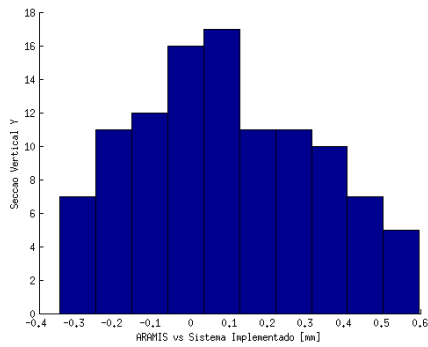
(b) Campo de deslocamentos dY , *ARAMIS*.



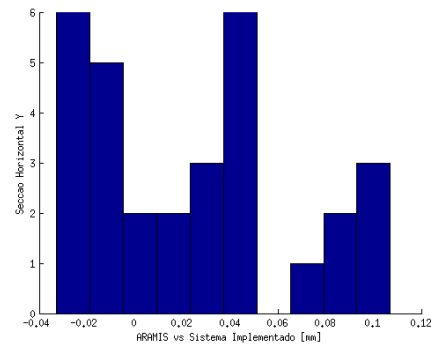
(c) Deslocamentos dY ao longo da seção vertical.



(d) Deslocamentos dY ao longo da seção horizontal.

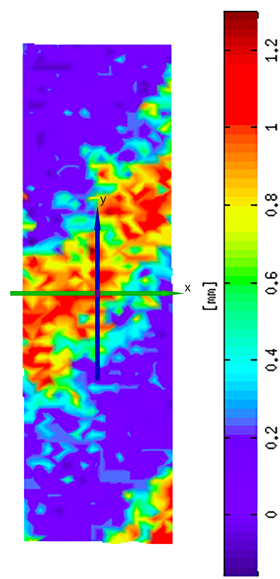


(e) *ARAMIS* vs Sistema implementado - Seção vertical, direção Y .

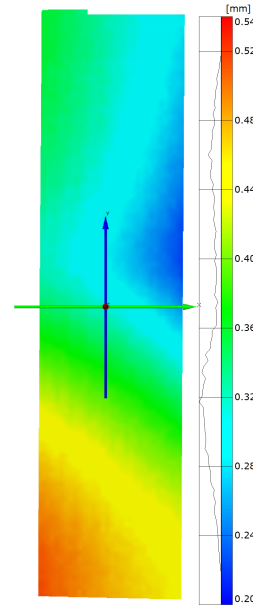


(f) *ARAMIS* vs Sistema implementado - Seção horizontal, direção Y .

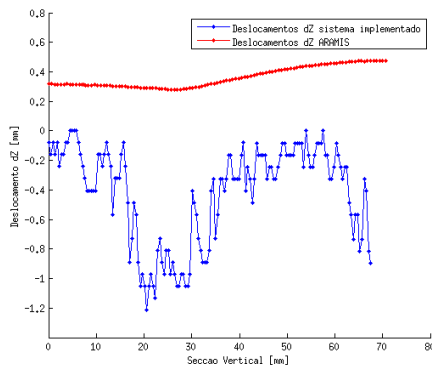
Figura 4.21: Deslocamentos na direção Y .



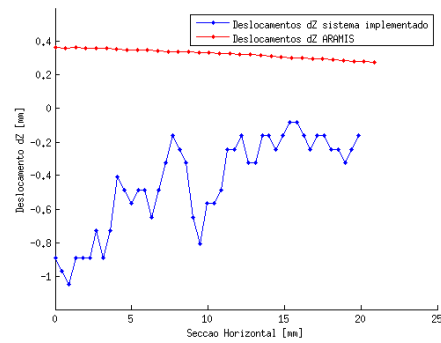
(a) Campo de deslocamentos dZ , sistema implementado.



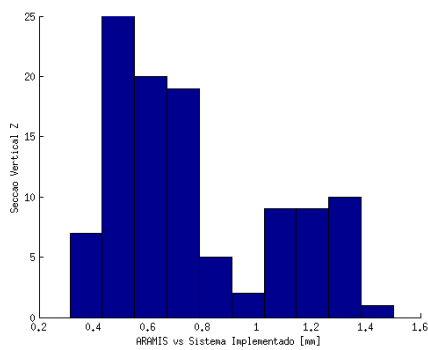
(b) Campo de deslocamentos dZ , *ARAMIS*.



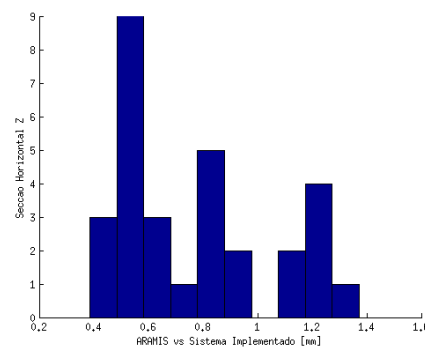
(c) Deslocamentos dZ ao longo da secção vertical.



(d) Deslocamentos dZ ao longo da secção horizontal.

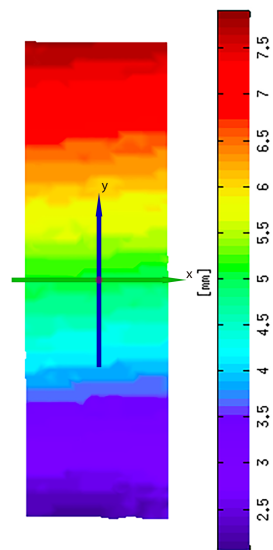


(e) *ARAMIS* vs Sistema implementado - Secção vertical, direção Z .

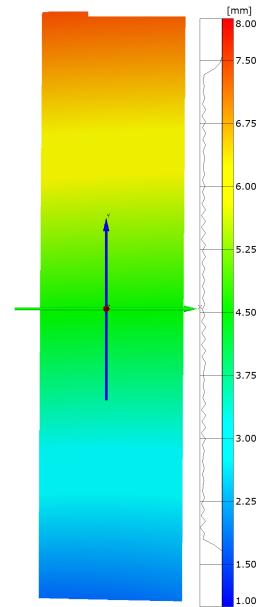


(f) *ARAMIS* vs Sistema implementado - Secção horizontal, direção Z .

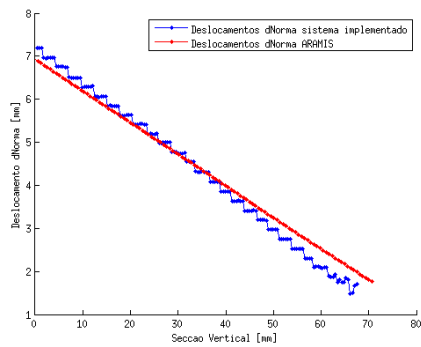
Figura 4.22: Deslocamentos na direção Z .



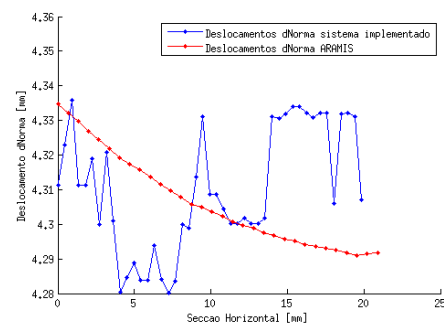
(a) Campo de deslocamentos $dNorma$, sistema implementado.



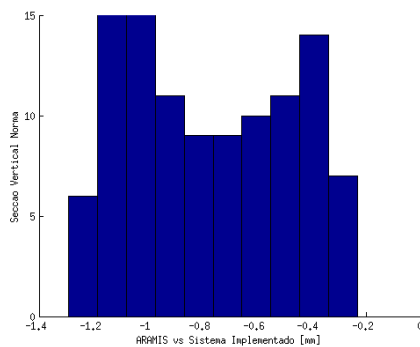
(b) Campo de deslocamentos $dNorma$, ARAMIS.



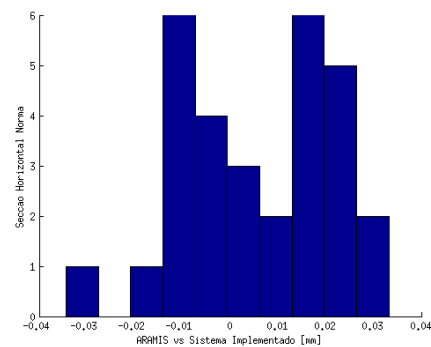
(c) Deslocamentos $dNorma$ ao longo da seção vertical.



(d) Deslocamentos $dNorma$ ao longo da seção horizontal.



(e) ARAMIS vs Sistema implementado - Seção vertical, direção $Norma$.



(f) ARAMIS vs Sistema implementado - Seção horizontal, direção $Norma$.

Figura 4.23: Norma dos deslocamentos.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

Foi proposto nesta dissertação de mestrado um sistema capaz de avaliar deformação, quer em superfícies simples, quer complexas. Este sistema contempla duas técnicas: visão *stereo* e 2D DIC.

A partir de um conjunto de imagens da peça de referência e um conjunto de imagens da peça deformada é possível determinar a correspondência temporal de um conjunto de pontos.

O processo de validação de calibração e reconstrução tridimensional permitiram definir o baseline com melhor precisão, e o intervalo de profundidade a posicionar o objeto em estudo, com a finalidade de obter resultados mais precisos. Foram utilizados dois objetos de calibração. Um padrão xadrez 2D permitiu realizar o processo de calibração e obter os parâmetros de calibração do sistema *stereo*. Adicionalmente um objeto cilíndrico 3D, ao qual foi aplicado um padrão de *speckles*, permitiu confirmar o processo de calibração e selecionar o intervalo de profundidade, com a finalidade de obter melhores resultados.

A correspondência *stereo* foi a etapa mais difícil nesta dissertação que envolveu um vasto estudo sobre algoritmos existentes e um estudo intensivo da funcionalidade dos parâmetros *stereo*. O algoritmo SGBM, para cálculo do mapa disparidade, foi o mais preciso, apresentando melhores resultados, com uma boa densidade da nuvem de pontos, tendo sido portanto o algoritmo adotado. A seleção dos parâmetros *stereo* condiciona significativamente na qualidade da reconstrução tridimensional.

A correspondência temporal permite fazer a correspondência dos pontos da reconstrução tridimensional, da peça de referência com a peça deformada. A janela de pesquisa permite fazer a correlação dos pixels correspondentes na imagem de referência, com a imagem após deformação. A correta determinação dos parâmetros permite obter resultados mais precisos. Ao aumentar a dimensão da janela de pesquisa são atingidas velocidades de aquisição mais elevadas, apresentando contudo, um erro mais elevado e algum ruído.

Foram utilizados dois sistemas *stereo* para aquisição de imagens: o sistema *stereo* constituído pelos *raspberry pi* e o sistema *stereo* constituído pelas câmaras *Genie 1280*. O primeiro sistema foi abandonado pela falta de qualidade dos sensores e impossibilidade de controlo da distância focal. O segundo sistema apresentou resultados mais precisos. A resolução em níveis de cinzento destes sensores é mais elevada, no entanto, a limitação de resolução espacial (número de pixels horizontais e verticais), refletiu-se na qualidade dos

resultados. A possibilidade de controlo da distância focal permitiu um grande desenvolvimento no sistema implementado uma vez que o ajuste da distância focal, proporciona melhores resultados para a profundidade a que se encontra o objeto. A distância entre as câmaras, bem como o ângulo entre estas, são fatores importantes e decisivos na qualidade da reconstrução tridimensional. O erro associado ao cálculo *stereo* tende a aumentar quadraticamente com a profundidade, figura 3.15. O ângulo, entre os eixos óticos das câmaras, prejudica a similaridade entre as imagens, dificultando a pesquisa do pixel correspondente na imagem seguinte. Por isso, foi garantido o paralelismo entre os eixos óticos das câmaras.

Variações de iluminação e posicionamento do objeto no espaço tridimensional, ao longo do processo de deformação, devem ser evitadas, uma vez que diferenças nos níveis de cinzento entre as imagens, prejudicam a pesquisa do pixel (bloco) correspondente. De modo a garantir consistência ao longo do processo de deformação foi construído um estúdio de trabalho para controlo das condições ambientais, garantindo que não ocorrem variações na iluminação, no decorrer do processo de deformação.

Foram desenvolvidos dois sistemas experimentais para análise de deformações. Um dos sistemas, constituído por uma chapa com um parafuso, tem como objetivo a aplicação do processo de deformação, tendo permitido desenvolver e conceber o sistema implementado nesta dissertação. A sua fácil utilização permitiu ainda, uma vasta aquisição e tratamento de resultados. O segundo sistema experimental, constituído pela máquina *Shimadzu*, para análise de deformação, permitiu validar os resultados obtidos pelo sistema 3D DIC implementado nesta dissertação comparando-os relativamente aos resultados obtidos pelo sistema *ARAMIS*.

A correspondência temporal dos pontos tridimensionais permite determinar o campo de deslocamentos, que, aplicado à peça deformada, permite uma análise intuitiva do processo de deformação aplicado ao provete.

A realização da experiência de validação de resultados, com os dois sistemas *stereo*, permitiu validar e comparar os resultados dos deslocamentos obtidos pelo sistema implementado nesta dissertação de mestrado.

O sistema 3D DIC desenvolvido nesta dissertação, tem a vantagem de não necessitar de marcação de um padrão regular na superfície em estudo, pelo contrário, a aplicação de uma nuvem de pontos aleatórios à superfície em estudo, confere uma superfície texturada ao objeto em análise.

5.2 Trabalho Futuro

Propõe-se o desenvolvimento de uma interface gráfica, permitindo a seleção de região de interesse de forma intuitiva e dinâmica e desenvolvimento do sistema implementado para análise de deformações e tensões, bem como o desenvolvimento de um sistema, capaz de analisar deformação em vários estágios ao longo do processo incremental de deformação.

A escolha de umas câmaras com maior resolução e exatidão, o desenvolvimento de um novo sistema de iluminação, capaz de aferir a aquisição de imagens com maior qualidade, possibilitariam a obtenção de resultados mais precisos, uma vez que, para maiores valores de disparidade e um *baseline* fixo o erro tende a ser menor

Desenvolvimento futuro de um sistema capaz de adquirir dinamicamente, com reso-

luções mais baixas de aquisição, de modo a diminuir o custo de processamento envolvido no processo.

Desenvolvimento de uma estrutura de suporte para sistemas de iluminação, sensores e objetos que permita o ajuste do baseline e orientação das câmaras de modo intuitivo.

Implementação de algoritmos capazes de melhorar a qualidade da imagem e diminuição da diferença de níveis de cinzento entre a imagem esquerda e direita.

Referências

- [1] F. Urban, J. Kadlec, R. Vlach, and R. Kuchta, “Design of a pressure sensor based on optical fiber Bragg grating lateral deformation,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 10, pp. 12–25, Jan. 2010.
- [2] D. P. Willemann, *Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para Medição de Tensões e Deformações utilizando Holografia Eletrônica*. PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- [3] A. V. Silva and J. Duarte, “Introdução à extensometria eléctrica de resistência,” *Escola Superior Tecnologia Setúbal*, 1997.
- [4] K. Creath and J. C. Wyant, “Moiré and Fringe Projection Techniques,” in *Optical Shop Testing* (D. Malacara, ed.), pp. 653–685, second ed., 1992.
- [5] E. A. Afonso, *Extensometria Óptica Por Moiré Geométrico Digital para Análise de Tensões no Plano*. PhD thesis, Universidade Estadual De Campinas, 2011.
- [6] Standardization Project for Optical Techniques of Strain Measurement, “Good Practice Guide to Geometric Moiré for In-plane Displacement/Strain Analysis,” 2005.
- [7] D. Post and B. Han, “Moiré Interferometry,” in *Handbook of Experimental Solid Mechanics*, ch. C, pp. 1–27, 2008.
- [8] D. Post, “Photoelasticity,” in *Manual on Experimental Stress Analysis*, ch. IV, pp. 176–192, 1979.
- [9] C. E. Taylor, “Holography,” in *Manual on Experimental Stress Analysis*, pp. 339–348, 1979.
- [10] U. Schnars; W. Jueptner, *Digital Holography, Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*. 2005.
- [11] Michael A. Sutton, J. J. Orteu, and H. W. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. 2009.
- [12] Z. Tang, J. Liang, Z. Xiao, and C. Guo, “Large deformation measurement scheme for 3D digital image correlation method,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, no. 2, pp. 122–130, 2012.
- [13] G. T. Optical Measuring, *Aramis v6.3 and higher - User Manual*, vol. 49. 2011.
- [14] G. T. Optical Measuring, *Argus v6.2 - User Manual*, vol. 49. 2009.

- [15] Shimadzu, *Autograph AG-X plus*. 2009.
- [16] T. Moons, L. V. Gool, and J.-J. Orteu, “Moiré Interferometry,” in *Manual on Experimental Stress Analysis*, vol. 50, ch. IV, pp. 1–27, IEEE Comput. Soc, 2008.
- [17] T. Instruments, *Introduction to the Time-of-Flight (ToF) System Design*. 2014.
- [18] S. Zhang, *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging*. 2013.
- [19] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*. 2010.
- [20] M. Smith, “The analysis of surface texture using photometric stereo acquisition and gradient space domain mapping,” *Image and Vision Computing*, vol. 17, no. 14, pp. 1009–1019, 1999.
- [21] T. Moons, M. Vergauwen, and L. V. Gool, “3D reconstruction from multiple images.” 2008.
- [22] G. Sansoni, M. Trebeschi, and F. Docchio, “State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 9, no. 1, pp. 568–601, 2009.
- [23] J. J. Orteu, V. Garric, and M. Devy, “Camera calibration for 3D reconstruction : application to the measure of 3D deformations on sheet metal parts,” 1997.
- [24] G. Bradski and A. Kaehler, *Computer Vision with the OpenCV Library*. 2008.
- [25] C. Wöhler, *3D Computer Vision Efficient Methods and Applications*. 2013.
- [26] H. Opower, *Multiple view geometry in computer vision*, vol. 37. 2002.
- [27] H. Hirschmu, “Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information \hat{A} ,” vol. 30, no. 2, pp. 328–341, 2008.
- [28] S. Birchfield and C. Tomasi, “A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, pp. 401–406, Apr. 1998.
- [29] D. Gallup, J.-m. Frahm, P. Mordohai, M. Pollefeys, and C. Hill, “Variable Baseline/Resolution Stereo.” 2008.
- [30] W. Tong, “Formulation of Lucas-Kanade Digital Image Correlation Algorithms for Non-contact Deformation Measurements: A Review,” *Strain*, vol. 49, pp. 313–334, Aug. 2013.
- [31] H. S. Hong and M. J. Chung, “3D pose and camera parameter tracking algorithm based on Lucas-Kanade image alignment algorithm,” *2007 International Conference on Control, Automation and Systems*, vol. 1, pp. 548–551, 2007.
- [32] J. L. Barron and N. a. Thacker, “Tutorial: Computing 2D and 3D optical flow,” *Imaging Science and Biomedical Engineering Division, Medical School, University of Manchester*, no. 2004, pp. 1–12, 2005.

-
- [33] G. Farneback, “Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion,” no. 1, 2000.
- [34] J.-y. Bouguet, “Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the algorithm,” vol. 1, no. 2, pp. 1–9, 1999.
- [35] R. B. Rusu, S. Cousins, W. Garage, and M. Park, “3D is here: Point Cloud Library (PCL),” 2011.
- [36] D. Garcia, J. Orteu, and L. Penazzi, “A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 125-126, pp. 736–742, Sept. 2002.