



Daniel Jorge Silva
Rodrigues Quartau

Desafios Operacionais e Metrológicos da
Medição 3D



**Daniel Jorge Silva
Rodrigues Quartau**

Desafios Operacionais e Metrológicos da Medição 3D

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 Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor Mário Augusto Pires Vaz

Professor Associado com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Arguente)

Agradecimentos / Acknowledgements

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais por me terem apoiado sempre no decorrer do curso e em toda a minha vida.

De seguida agradeço à Universidade de Aveiro por todas as condições de estudo que me permitiram obter os conhecimentos que hoje posso afirmar que tenho.

Também agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas e ao meu co-orientador, Professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos por todo o acompanhamento e aconselhamento que me deram no decorrer desta dissertação.

Agradeço à firma Micronsense, por ter disponibilizado os instrumentos necessários à conclusão desta dissertação, em especial ao Nuno Petronilho pelos ensinamentos e ajuda que me deu e pelo tempo que me aturou.

Quero agradecer a todos os meus amigos e colegas, que desde o primeiro dia em Aveiro me acompanharam e ajudaram a completar esta jornada, que parecia não ter fim ao início e agora me deixa a impressão de que foi curta.

Quero também agradecer a toda a minha família por me ajudarem a ultrapassar todas as barreiras que me foram impostas, em especial ao Ivo Rosa e à Alexandra Rosa, por toda a ajuda na escrita da dissertação.

Por último quero agradecer à Salomé Fernandes por estar sempre ao meu lado nos bons e maus momentos.

Palavras-chave

Metrologia 3D; CMM; Técnicas Operacionais

Resumo

A Metrologia está cada vez mais inserida no meio industrial, no entanto a sua implementação e conhecimento ainda é recente. Mesmo assim esta tem um papel estratégico no apoio à competitividade do setor produtivo.

A Metrologia é definida como a ciência da medição e tem como foco principal prover confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medidas. Como as medições estão presentes, direta ou indiretamente, em praticamente todos os processos de produção industrial de tomada de decisão, a abrangência da metrologia é imensa. As ferramentas metrológicas são responsáveis por prover medições corretas nos produtos fabricados, controlando e monitorando o processo produtivo em todas as suas fases de produção. A Qualidade não pode ser dissociada da Metrologia, pois as especificações dos projetos, dadas por normas, são controladas por instrumentos e sistemas de medições que tenham sua capacidade de medição atestada.

Durante a fase de desenvolvimento e ao longo do ciclo de vida do produto a informação do material da peça e da geometria do produto é normalmente suficiente, mas a informação das especificações do GD&T é absolutamente necessária para o fabrico e o controle geométrico do produto. As referências (*datums*), os quadros de controlo com a especificação das tolerâncias e toda a simbologia normalizada do GD&T, tradicionalmente formalizada nos desenhos de engenharia ou diretamente no modelo 3D são condições imprescindíveis para garantir a qualidade do produto.

Embora não seja novidade, é complexo o sistema de causas do erro em medições por coordenadas e poucos são os trabalhos que exibem de forma qualitativa a questão. São vários os aspetos que precisam de ser considerados na realização de medições por coordenadas, de modo a garantir que as especificações das características dos produtos estarão sendo medidas corretamente.

Keywords

3D Metrology; CMM; Operational Techniques

Abstract

Metrology is increasingly inserted in the industrial environment, however its implementation and knowledge is still fresh. Nevertheless it has a strategic role in supporting the competitiveness inside the productive sector.

Metrology is defined as the science of measurement and its main focus is to provide reliability, credibility, universality and quality measures. As the measurements are present, directly or indirectly, in almost all industrial production processes of decision-making, the range of metrology is immense. The measuring tools are responsible for providing accurate measurements in manufactured products, controlling and monitoring the production process in all its production phases. The quality cannot be dissociated from metrology, as the specifications of the projects, given by regulation, are controlled by instruments and measurement systems that have their attested measurement capability.

During the development phase and throughout the product life cycle, the information of the material and the geometry of the product is usually sufficient, but the information on the specifications of GD&T is absolutely necessary for the manufacturing and geometric control of the product. References (*datums*), the control tables with the specification of tolerances and all the standard symbology of GD&T traditionally formalized in technical drawings or directly in the 3D model are essential conditions to ensure product quality.

Even though this area is not new, the system that detects the cause of error in the measurements acquired by CMM is complex and there are few studies that can show quantitatively the issue. There are several aspects that need to be considered when making measurements by CMM in order to ensure that the specifications of the product characteristics are being correctly measured.

Conteúdo

I	Enquadramento	1
1	Introdução	3
1.1	Contexto	3
1.2	Objectivos do Trabalho	3
1.3	Organização do Documento	5
2	Revisão Bibliográfica/Estado de Arte	7
2.1	Metrologia	7
2.2	Metrologia 3D	8
2.3	Enquadramento Histórico	9
2.4	Dimensionamento Geométrico e Toleranciamento	10
3	A Máquina de Medição por Coordenadas	13
3.1	Componentes Principais	13
3.1.1	Estrutura	13
3.1.2	Sistema de Prova	15
3.1.3	Sistema de Controlo da Máquina	19
3.2	Calibração	20
3.3	Tecnologias de CMM	24
3.4	Métodos de Alinhamento	25
3.4.1	Alinhamento Plano-Linha-Ponto	25
3.4.2	Reference Point System	26
3.4.3	Best Fit	26
3.5	Fatores Relevantes na Medição	26
3.5.1	<i>Probe Lobing</i>	26
3.5.2	Velocidade de Contato	27
3.5.3	<i>Pre-Travel</i>	28
3.5.4	Temperatura	28
II	Trabalho Realizado	29
4	Metodologia	31
4.1	Equipamento Utilizado	31
4.2	Comparação entre o <i>Software Aberlink 3D</i> e <i>PowerInspect</i>	33
4.2.1	Interface do Utilizador	33
4.2.2	Operação e Programação	34

5	Trabalho Experimental	37
5.1	Modelo de Estudo	37
5.2	Formato dos Resultados Obtidos	37
5.3	Verificação da Influência da Velocidade de Toque na Medição	38
5.3.1	Metodologia	38
5.3.2	Resultados Obtidos	39
5.4	Determinação do Comprimento de <i>Pre-travel</i> mais adequado na Medição	40
5.4.1	Metodologia	40
5.4.2	Resultados Obtidos	41
5.5	Verificação da Influência do Ângulo de Ataque na Medição	46
5.5.1	Metodologia	46
5.5.2	Resultados Obtidos	47
5.6	Verificação da Influência do Ângulo da Cabeça Motorizada na Medição	48
5.6.1	Metodologia	48
5.6.2	Resultados Obtidos	49
5.7	Verificação do Número Mínimo de Pontos Necessários Para Definir uma Entidade Corretamente	50
5.7.1	Metodologia	50
5.7.2	Resultados Obtidos	50
5.8	Verificação da Influência do Comprimento da Ponteira na Medição	54
5.8.1	Metodologia	54
5.8.2	Resultados Obtidos	54
5.9	Ensaio para a verificação da influência do diâmetro da ponteira na medição	55
5.9.1	Metodologia	55
5.9.2	Resultados Obtidos	55
III	Conclusões	57
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	59
6.1	Conclusões	59
6.2	Trabalhos Futuros	60
	Anexos	63
A	Guia de Utilização da Máquina de Medição por Coordenadas	65
B	Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência da Velocidade de Toque na Medição	89
C	Resultados Numéricos do Ensaio para a Identificação o <i>Pre-travel</i> Mínimo	93
D	Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Ângulo de Ataque	97
E	Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Ângulo da Cabeça Motorizada	105

F	Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar o Número Mínimo de Pontos Para Definir uma Entidade Corretamente	109
G	Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Comprimento da Ponteira	121
H	Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Diâmetro da Ponteira	125

Lista de Tabelas

4.1	Ponteiras e extensões utilizadas nos ensaios.	32
4.2	Comparação entre <i>Softwares</i>	35
5.1	Valores mínimos obtidos na avaliação dos resultados dos ensaios da verificação da influência do <i>pre-travel</i>	46
5.2	Desvio entre o valor medido e a cota nominal.	47
B.1	Resultados numéricos do ensaio com o objetivo de verificar a influência da velocidade na medição	90
B.2	Continuação da Tabela B.1.	91
C.1	Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o <i>pre-travel</i> ideal para o movimento em X-.	94
C.2	Continuação da Tabela C.1.	94
C.3	Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o <i>pre-travel</i> ideal para o movimento em X+.	94
C.4	Continuação da Tabela C.3.	94
C.5	Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o <i>pre-travel</i> ideal para o movimento em Y-.	94
C.6	Continuação da Tabela C.5.	94
C.7	Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o <i>pre-travel</i> ideal para o movimento em Y+.	95
C.8	Continuação da Tabela C.7.	95
C.9	Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o <i>pre-travel</i> ideal para o movimento em Z-.	95
C.10	Continuação da Tabela C.9.	95
C.11	Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o <i>pre-travel</i> ideal para o movimento em Z+.	95
C.12	Continuação da Tabela C.11.	95
D.1	Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar a influência do ângulo de ataque no plano OXY.	98
D.2	Continuação da tabela D.1.	99
D.3	Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar a influência do ângulo de ataque no plano OYZ.	100
D.4	Continuação da tabela D.3.	101
D.5	Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar a influência do ângulo de ataque no plano OXZ.	102

D.6	Continuação da tabela D.5.	103
E.1	Resultados Numéricos para o Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Ângulo da Cabeça Motorizada(Paralelismo).	106
E.2	Resultados Numéricos para o Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Ângulo da Cabeça Motorizada(Perpendicularidade).	107
F.1	Resultados numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro do círculo. .	110
F.2	Continuação da tabela F.1.	111
F.3	Resultados numéricos para o ensaio onde se mede a tolerância do círculo. .	112
F.4	Continuação da tabela F.3.	113
F.5	Resultados numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro da esfera. . .	114
F.6	Resultados numéricos para o ensaio onde se mede a tolerância da esfera. .	115
F.7	Resultados numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro do cilindro. .	116
F.8	Continuação da tabela F.7.	117
F.9	Resultados numéricos para o ensaio onde se mede a tolerância do cilindro.	118
F.10	Continuação da tabela F.9.	119
G.1	Resultados Numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro da esfera. .	122
G.2	Continuação da tabela G.1.	123
H.1	Resultados numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro da esfera. . .	126

Lista de Figuras

1.1	Erros de medição associados à CMM[1].	4
2.1	Cúbito Real [7].	9
2.2	Representação da correta identificação da tolerância[10].	11
3.1	Estrutura com apoio único[11].	14
3.2	Estrutura em ponte[11].	14
3.3	Estrutura em coluna[11].	15
3.4	Estrutura em Cavalete para Grua Móvel[11].	15
3.5	Cabeça motorizada da CMM[12].	16
3.6	Exemplo de uma sonda complexa[15].	16
3.7	Sonda da CMM[13].	17
3.8	Propriedades dos Materiais utilizados na sonda[15].	17
3.9	Diagrama Esquemático de uma "Trigger Probe" [18].	18
3.10	Sonda Laser[20].	18
3.11	Possíveis erros na calibração do eixos da máquina[25].	20
3.12	Esquema de um laser interferómetro com montagem linear[25].	21
3.13	Montagem de um laser interferómetro com montagem linear[25].	21
3.14	Montagem utilizada na verificação da rotação em torno do eixo Y[25].	22
3.15	Montagem utilizada na verificação da rotação em torno do eixo Z[25].	22
3.16	Montagem de um nível eletrónico para verificação de rotação com eixo em X[25].	22
3.17	Montagem para a verificação da translação horizontal[25].	23
3.18	Montagem para a verificação da translação vertical[25].	23
3.19	Montagem MCG[27].	23
3.20	Alinhamento por Plano-Linha-Ponto[1].	25
3.21	Comparação de diferentes orientações de disparo.	27
3.22	<i>Probe Lobing</i> [18].	27
3.23	Variação do ângulo[17].	27
3.24	Esquema de forças existente no toque[33].	28
4.1	Máquina existente no Departamento de Engenharia Mecânica da U. de Aveiro[37].	31
4.2	Máquina onde se realizaram os ensaios [37].	31
4.3	Exemplo da configuração com os componentes utilizados nos ensaios[38].	32
4.4	Peça tutorial da ©Aberlink [39].	33
5.1	Exemplo do <i>output</i> do ensaio do <i>pre-travel</i>	38

5.2	Exemplo do <i>output</i> do ensaio de medição.	38
5.3	Representação gráfica da variação do diâmetro medido com o aumento da velocidade de toque.	39
5.4	Representação gráfica da variação do desvio padrão com o aumento da velocidade de toque.	39
5.5	Imagem de um ensaio registrado a 10mm/s.	40
5.6	Representação gráfica da variação do <i>Overshoot</i> no eixo X com o aumento da velocidade do movimento.	41
5.7	Representação gráfica da variação da distância de estabilização no eixo X com o aumento da velocidade do movimento.	42
5.8	Representação gráfica da variação do tempo de estabilização no eixo X com o aumento da velocidade do movimento.	42
5.9	Representação gráfica da variação do <i>Overshoot</i> no eixo Y com o aumento da velocidade do movimento.	43
5.10	Representação gráfica da variação da distância de estabilização no eixo Y com o aumento da velocidade do movimento.	43
5.11	Representação gráfica da variação do tempo de estabilização no eixo Y com o aumento da velocidade do movimento.	44
5.12	Representação gráfica da variação <i>overshoot</i> no eixo Z com o aumento da velocidade do movimento.	44
5.13	Representação gráfica da variação da distância de estabilização no eixo Z com o aumento da velocidade do movimento.	45
5.14	Representação gráfica da variação do tempo de estabilização no eixo Z com o aumento da velocidade do movimento.	45
5.15	Exemplo do variação do ângulo do aproximação no plano OXZ.	47
5.16	Vista de topo e vista lateral direita da peça.	48
5.17	Representação gráfica da variação do valor medido do paralelismo com a variação do ângulo (A) do cabeçote.	49
5.18	Representação gráfica da variação do valor medido da perpendicularidade com a variação do ângulo (A) do cabeçote.	49
5.19	Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido do círculo com a variação do número de pontos obtidos.	51
5.20	Representação gráfica da variação do valor da tolerância medida do círculo com a variação do número de pontos obtidos.	51
5.21	Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido da esfera com a variação do número de pontos obtidos.	52
5.22	Representação gráfica da variação do valor da tolerância medida da esfera com a variação do número de pontos obtidos.	52
5.23	Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido do cilindro com a variação do número de pontos obtidos.	53
5.24	Representação gráfica da variação do valor da tolerância medida do cilindro com a variação do número de pontos obtidos.	53
5.25	Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido com o aumento do comprimento da ponteira.	54
5.26	Representação gráfica do desvio padrão da amostra utilizada na Figura 5.25.	55
5.27	Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido com o aumento do diâmetro da ponteira.	56

5.28 Representação gráfica do desvio padrão da amostra utilizada na Figura 5.27. 56

Nomenclatura Utilizada

CMM - Máquinas de Medição por Coordenadas (Coordinate Measuring Machine)

GD&T - Controlo Geométrico e Dimensional (Geometric Dimensioning and Tolerancing)

CNC - Comando Numérico Computorizado

CAD - Design Assistido por Computador (Computer Aided Design)

CAM - Fabrico Assistido por Computador (Computer Aided Manufacturing)

FDM - Fabrico por Depósito de Material Fundido (Fused Deposition Modeling)

MCG - Calibre de Verificação das Esquadrias da Máquina (Machine Checking Gauge)

PLP - Alinhamento Plano-Linha-Ponto

RPS - Alinhamento com Pontos de Referência (Reference Point System)

PID - Controlador Proporcional Integrador Derivativo

Parte I

Enquadramento

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

O desenvolvimento desta dissertação provém da necessidade de evolução na área da medição 3D para uma obtenção de resultados mais fiáveis, sendo assim possível a criação de um produto mais competitivo no mercado. O foco da dissertação foi o ponto de vista do utilizador e as suas competências, que é de longe o fator predominante no sucesso ou insucesso do controlo de qualidade do produto.

Embora a tecnologia utilizada nas máquinas de medição por coordenadas (CMM), não seja a mais recente e tenha sido exaustivamente desenvolvida e melhorada em aspetos como a construção da estrutura da máquina, o software de medição e de processamento e mesmo no sistema de palpação, persistem ainda erros associados às medições adquiridas, provenientes de inúmeros fatores, como se pode observar na Figura 1.1. Porém, qualquer desenvolvimento tecnológico na área exige custos elevados quando comparado com a criação de boas técnicas a praticar pelo utilizador, área esta onde ainda existe margem de progressão para um enorme progresso tecnológico.

Assim o foco desta tese consistiu na avaliação de técnicas a utilizar por parte do técnico responsável por efetuar a medição e na escolha das mais adequadas do ponto de vista da precisão dos resultados da medição.

O trabalho apoiou-se na teoria da repetibilidade, também conhecida por teoria dos erros, em que o resultado obtido na maioria das vezes é considerado o mais aproximado do real e os resultados que se desviarem são considerados errados. O trabalho experimental consistiu na realização de vários ensaios em que se assumiu que todos os parâmetros são mantidos constantes, com exceção do fator que se quer verificar.

1.2 Objectivos do Trabalho

O objetivo principal desta dissertação foi a verificação da influência de diversos fatores na medição e a identificação dos parâmetros ideais de modo a reduzir a flutuabilidade de todo o processo metrológico.

A medição através da obtenção de coordenadas consiste na medição de vários pontos existentes na superfície de uma peça e a respetiva construção da geometria real por análise e comparação com a geometria teórica.

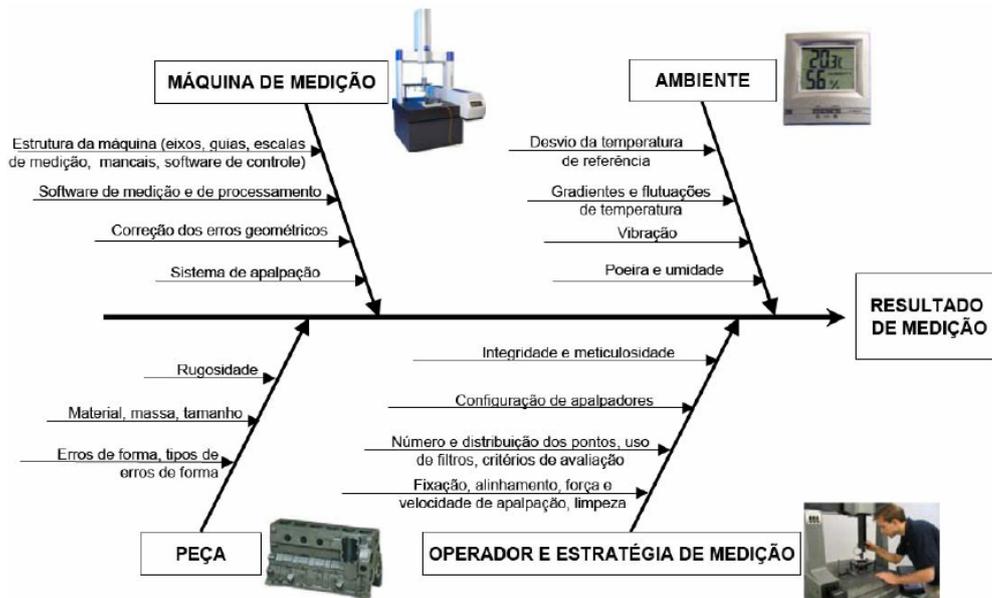


Figura 1.1: Erros de medição associados à CMM[1].

Existem vários fatores que podem ser cruciais para uma correta medição por coordenadas, como por exemplo a velocidade do toque, o comprimento e diâmetro da ponteira, o ângulo de ataque, entre outros. Uma disparidade entre os valores medidos e o valor real pode resultar na incorreta avaliação acerca da qualidade do produto final.

Para além da componente teórica, a dissertação contempla também uma componente prática desenvolvida no laboratório de prototipagem e desenvolvimento do produto, existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, com a utilização de equipamentos de medição e de *software* associado.

Foi desenvolvido um manual de utilização do equipamento de medição, incluindo os procedimentos de trabalho, o tipo de abordagem mais adequado para cada caso de estudo e os cuidados a ter com o equipamento.

Foram estudados e avaliados os dois programas informáticos existentes no equipamento de medição, o *Aberlink 3D* (Aberlink©) e o *PowerInspect* (Delcam©), e feita uma análise comparativa entre estes dois programas.

Para que seja possível uma proficiência nos ensaios a realizar, foi necessária uma fase de aprendizagem com ambientação aos controlos da máquina e do *software*, seguida da consolidação dos conhecimentos adquiridos.

Por ultimo, desenvolveram-se rotinas específicas a partir do próprio *software* do equipamento, de modo a permitir a repetibilidade de todo o processo metrológico.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais foram organizados e analisados, e serviram de base para o desenvolvimento de boas práticas de medição, objeto desta dissertação.

1.3 Organização do Documento

O documento encontra-se dividido em três partes. A primeira, designada por "Enquadramento", encontra-se dividida em três capítulos.

No primeiro capítulo encontra-se uma pequena introdução ao tema, na qual se pode encontrar uma contextualização do problema na atualidade os objetivos da dissertação.

No segundo capítulo faz-se uma pequena introdução a o que é a metrologia, mais propriamente a metrologia 3D. Posteriormente fala-se de controlo geométrico e dimensional(GD&T) e da sua utilidade na industria atual.

No terceiro capítulo pode-se encontrar uma descrição dos componentes que fazem parte da tecnologia de medição por coordenadas, métodos de calibração dos instrumentos, as diferenças entre as várias tecnologias de medição por coordenadas, métodos de alinhamento da CMM e, por último, os fatores relevantes na medição.

A segunda parte, com o nome de "Trabalho Realizado", encontra-se dividida em dois capítulos, o quarto e o quinto.

No quarto capítulo encontra-se uma introdução ao equipamento utilizado para a realização dos ensaios experimentais, uma comparação entre dois *softwares* e o guia de utilização do equipamento existente na Universidade de Aveiro.

No quinto capítulo encontram-se as metodologias e os resultados obtidos para todos os ensaios experimentais realizados no âmbito desta dissertação.

A terceira parte, com o nome de "Conclusões", encontra-se no capítulo seis.

Neste mesmo capítulo encontram-se as conclusões obtidas a partir dos resultados dos ensaios experimentais e as propostas de trabalho futuro, tendo em conta o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica/Estado de Arte

O interesse no desenvolvimento deste tema na área da metrologia 3D provém do facto de que, sendo a metrologia uma ferramenta vital no controlo de qualidade de um produto obtido através de qualquer tipo de processo, o avanço tecnológico na área da metrologia resulta num avanço na área da produção. Com a redução ou mesmo eliminação de erros associados à medição é possível afirmar, com uma maior certeza, o que cada tipo de processo é capaz de oferecer à peça.

Embora esta área se encontre num estado muito avançado, os estudos realizados do ponto de vista do utilizador ainda são muito reduzidos.

2.1 Metrologia

A metrologia é, por definição, a ciência da medição e todas as suas aplicações teóricas e práticas, não interessando a incerteza da medição e o campo de aplicação. Também se considera a medição todo o processo experimental de obtenção de um ou mais valores de quantidade [2]. As maiores preocupações no desenvolvimento da área da metrologia são a designação das unidades de medida, desenvolvimento e análise de novos métodos de aquisição de dados, a certeza na uniformidade das medições e a diminuição do erro associado à medição[3].

Existem três categorias dentro da metrologia. A metrologia científica é responsável pela organização e desenvolvimento da norma de medição, enquanto a metrologia industrial é responsável por garantir o funcionamento correto dos instrumentos de medição tanto na produção como na prototipagem. Por último existe a metrologia legal que verifica todo o tipo de medição que diga respeito à economia, saúde e segurança. Esta destina-se a proteger o público de imprecisões no momento da aquisição do produto.

Visto que a medição tem como objetivo determinar o valor de quantidade mais próximo do valor real, quando se desenvolve um equipamento para realizar medições, é necessário ter em conta parâmetros principais. São estes a exatidão, a precisão, a tendência, a linearidade, a estabilidade e a reprodutibilidade[3].

A exatidão é o grau com que o valor medido se aproxima do valor real. Como é muito difícil obter o valor real, devido a desvios que resultam de gradientes de temperatura, características intrínsecas do material, geometrias exóticas existentes na peça ou

mesmo erros de medição por parte do operador, é necessária a criação de um método que quantifique o desvio entre o valor medido e o valor real[4].

A precisão, também conhecida por repetibilidade, consiste na flutuação do resultado da medição quando são realizados vários ensaios, mantendo constantes todos os parâmetros do ensaio[4].

A tendência consiste numa estimativa do erro sistemático existente no processo de medição. Para se determinar a existência de algum tipo de tendência no processo metrológico, utiliza-se um bloco padrão, cujas dimensões são conhecidas, para que exista a possibilidade de verificar a existência de algum desvio constante entre o valor real e o valor medido através do processo metrológico[4].

A linearidade consiste numa verificação da tendência para várias peças diferentes, com características conhecidas. O teste tem como objetivo verificar se a tendência é sempre a mesma para várias medições[4].

A estabilidade consiste na realização de vários testes que verifiquem a tendência com um intervalo de tempo entre eles e tem como objetivo verificar se existem flutuações no resultado obtido com o avanço do tempo[4].

A reprodutibilidade é a característica que indica o quanto a medição varia quando efetuada por operadores diferentes, utilizando o mesmo sistema de medição e peça. No caso especial das máquinas de medição por coordenadas, o teste pode ser realizado pelo mesmo operador, variando a posição da peça na mesa de trabalho[4].

Mesmo que todos estes parâmetros se verifiquem, o resultado da medição não é um valor só, mas sim um intervalo de valores. O resultado que se tenta obter tem o nome de "*true quantity value*" e, na prática, é impossível de obter[2]. Embora este valor não tenha valor prático, por ser inatingível, é muito útil para indicar o que se pretende na teoria, ou seja, a cota nominal da entidade a medir na peça.

2.2 Metrologia 3D

A metrologia 3D tem como base de medição um sistema cartesiano, utilizando a representação de cada ponto num sistema ortogonal de coordenadas. Com a informação obtida é possível avaliar as diferentes características dimensionais do produto[4].

A tecnologia CMM começou a ser desenvolvida nas décadas de 50 e 60 pelas empresas com o nome de *Ferranti* (atualmente com o nome de *International Metrology Systems*), com sede na Escócia, e *Digital Electronic Automation Spa*, sediada na Itália[5]. O desenvolvimento da área da metrologia deve-se à evolução do mundo industrial e à competitividade do mesmo. As empresas não se podiam dar ao luxo de confiar apenas nos processos de produção, tinham que ter a certeza que o produto obtido correspondia ao pretendido pelo cliente. Esta recente "exigência" por parte da indústria levou também ao crescimento global da área da metrologia. Os pioneiros foram a Escócia e a Itália, mas logo apareceram as marcas francesas com o a *Renault CMM* e as marcas alemãs como a *Zeiss CMM*, entre outras[5].

Atualmente a metrologia é essencial ao avanço tecnológico, principalmente na avaliação de novos processos de produção. Também é bastante útil na indústria dos moldes, quando o fabrico de um novo molde, pois a forma do molde não é necessariamente a forma da peça obtida por injeção, por exemplo tornando assim a verificação da forma da peça essencial para concluir se o molde é capaz de fabricar a peça conforme o projeto e os requisitos funcionais definidos.

2.3 Enquadramento Histórico

Embora a metrologia seja um tema aparentemente recente, o início deste retrocede aos tempos de quando os primeiros primatas pisavam a terra quando estes mediam de alto a baixo o seu rival de batalha. Daí todos os animais, em situações de conflito, tentarem mostrarem-se maiores do que na realidade o são, tentando induzir o seu opositor em erro[6].

Mesmo de uma forma muito limitada e rudimentar foi por esta altura que se começou a sentir a necessidade de fazer medições, mesmo sendo estas feitas inconscientemente. Desde então que a metrologia tem evoluído até se tornar o que é hoje em dia. Esta evolução deve-se à necessidade de comunicação de ideias e conceitos, tornando assim possível a realização de uma medição cada vez mais próxima do real.

Embora a metrologia seja um tema pré-histórico, acredita-se que foram os Egípcios os primeiros a criar uma unidade de medida chamada cúbito, que se encontra representada na Figura 2.1.



Figura 2.1: Cúbito Real [7].

Esta baseava-se no comprimento do antebraço do Faraó que media, aproximadamente, 524mm [7]. Esta unidade de medida foi mais tarde adotada por outros povos, os Gregos e os Romanos.

Na época medieval, foram criados marcos que eram colocados em pontos do país de modo a serem utilizados como medida para que, como afirmou D. Sebastião, em 1575:

"... em uns lugares as medidas são grandes e logo em outros, junto deles, são pequenas e em outros mais pequenas ou maiores..."

Assim se criou a Lei de Almeirim que definiu conceitos de rastreabilidade, comparação e calibração[6]. Embora tenha sido um avanço impressionante na metrologia, o marco da evolução foi a criação do sistema métrico na revolução industrial francesa e o conseqüente

nascimento da unidade de medida "metro". Esta foi baseada numa grandeza geográfica, visto que a primeira definição de metro seria:

"A décima milionésima parte do quarto do meridiano terrestre que passa por Paris[6]"

Atualmente o conceito de metro é definido por:

"O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $\frac{1}{299792458}$ do segundo[6]. "

Esta definição pode-se considerar perfeita, no sentido em que o conceito dita o que se passa na teoria, mas a medição desse tempo pode sofrer alterações visto que, com avanços tecnológicos, podem-se alcançar valores mais próximos do valor desejado. [6]

Hoje em dia a metrologia tem um impacto tão grande na indústria que se criou uma entidade com o objetivo de assegurar o rigor e a rastreabilidade das medições feitas em território nacional, sendo esta o Laboratório Nacional de Metrologia que pertence ao Instituto Português da Qualidade[8].

2.4 Dimensionamento Geométrico e Toleranciamento

O dimensionamento geométrico e o respetivo toleranciamento (GD&T) é uma disciplina que tem vindo a ser utilizada desde 1940. A criação da mesma surge da incapacidade das empresas descreverem o tipo e geometria das peças que queriam que fossem fabricadas, visto que se geravam muitas ambiguidades na passagem de uma peça(3D) para um desenho(2D). Para além da passagem de 3D para 2D também existia a necessidade de saber que toleranciamentos eram aceitáveis para cada caso, visto que o desenho apenas definia a forma da peça e não o toleranciamento necessário para o seu correto funcionamento. No sentido de evitar confusões e ambiguidades, sentiu-se necessidade de criar uma convenção, ou seja, uma linguagem na qual seria possível comunicar globalmente[9].

"A peça real só pode ser fabricada com faces mais ou menos planas, ou mais ou menos cilíndricas, etc., e com tamanho mais ou menos exato. O exato é inatingível."[10]

A partir da frase que se encontra acima pode-se concluir que as cotas nominais (ideais) são tão essenciais como a tolerância, no sentido do bom funcionamento do produto.

O toleranciamento geométrico dita que a peça a desenhar tem que se encontrar dentro de uma zona de tolerância, ou seja, um espaço geométrico com as dimensões máximas/mínimas permitidas. Este é desenhado por linhas ou superfícies com formas geométricas ideais máximas e mínimas permitidas pelo projeto[10].

Todo o toleranciamento feito respeita um conjunto de regras, tal como o facto da sua representação se encontrar sempre dentro de quadros retangulares, divididos em duas ou mais casas. Na primeira divisão (a partir da esquerda) encontra-se sempre a característica a toleranciar, de seguida encontra-se o valor da tolerância e por fim letras que indicam uma ou mais referências necessárias para um correto toleranciamento. Este quadro encontra-se ligado à peça por uma linha com uma seta que aponta para o elemento toleranciado, como se pode observar na Figura 2.2[10].

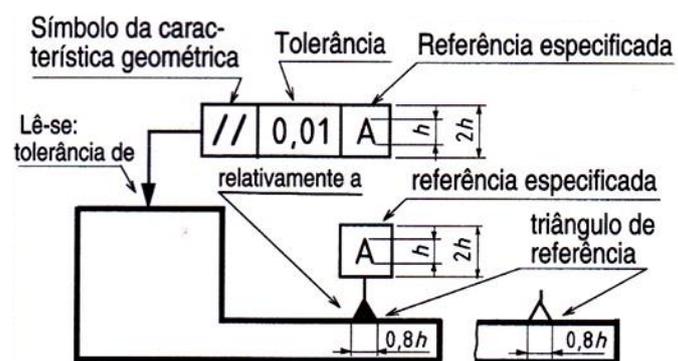


Figura 2.2: Representação da correta identificação da tolerância[10].

Capítulo 3

A Máquina de Medição por Coordenadas

3.1 Componentes Principais

Com o desenvolvimento exponencial de máquinas de controlo numérico (CNC) veio a necessidade do desenvolvimento de tecnologia para o seu apoio e suporte. As máquinas de medição por coordenadas vêm complementar as máquinas CNC, que até ao momento não tinham uma maneira viável de verificar se a peça correspondia ao requerido pelo projeto, pois a verificação manual é muito lenta e propensa a erros de medição enormes.

No sentido generalizado a tecnologia CMM divide-se em três categorias. As CMM que utilizam o contato para efetuar a medição, as que utilizam laser e as que utilizam sistemas de visão.

As CMM são máquinas com características muito específicas como a rigidez mecânica, a capacidade de resistir a gradientes de temperatura e vibrações, entre outras. Estas são compostas por três elementos fundamentais, sendo estes a estrutura, o sistema de prova e o sistema de controlo da máquina.

3.1.1 Estrutura

Como já referido anteriormente, é necessária uma estrutura bastante rígida/robusta para que não existam desvios entre medições visto tratar-se de um equipamento de precisão que é implantado no meio fabril, onde está sujeito a interferências exteriores. Existem vários tipos de estrutura, tais como as de apoio único, as de ponte, as de coluna e por fim as de grua móvel.

As CMM com uma estrutura de apoio único (Figura 3.1) têm dimensões pequenas e um acesso muito fácil porque a sonda é apenas suportada por um apoio que se encontra na traseira da máquina. Também permitem que as peças a avaliar tenham dimensões maiores às da máquina. Por outro lado, o maior problema associado a esta tecnologia é o facto da sonda só estar apoiada de um lado o que leva à deflexão da mesma, provocando erros na realização da medida[3] [11].

A estrutura em forma de ponte (Figura 3.2) é a mais utilizada no meio industrial por oferecer uma melhor exatidão, embora o alinhamento dos carris, onde é apoiada a ponte, seja muito difícil de obter[3] [11]. A CMM utilizada para realizar os ensaios no decorrer da dissertação tem uma estrutura como a representada na Figura 3.2. Para que

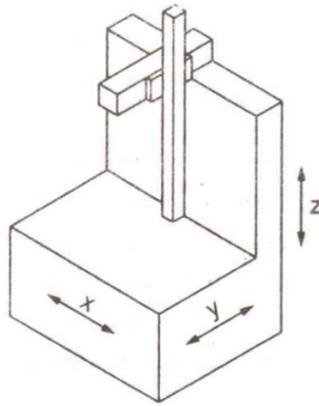


Figura 3.1: Estrutura com apoio único[11].

a máquina não tenha demasiado peso todas as partes denominadas estruturais são ocas, mantendo assim as características mecânicas e poupando no peso.

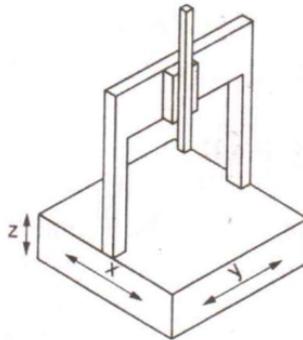


Figura 3.2: Estrutura em ponte[11].

As CMM com uma estrutura em forma de coluna (Figura 3.3) não são tão utilizadas no ambiente fabril devido à sua estrutura ser mais suscetível a desvios por pancadas. Estas costumam encontrar-se nos laboratórios de medição. Ao contrário das referidas anteriormente, a coluna apenas se movimentam no eixo Z. O movimento nos eixos X e Y são feitos pela mesa da máquina.[3] [11]

Por fim existem as CMM com a estrutura de grua móvel (Figura 3.4). Estas possuem dois apoios em forma de C que estão fixos à estrutura inferior. Acoplados a estes está uma ponte móvel que se desloca no eixo X. Por fim, tem uma coluna que está apoiada na ponte e tem a capacidade de se deslocar nos eixos Y e Z[3] [11].

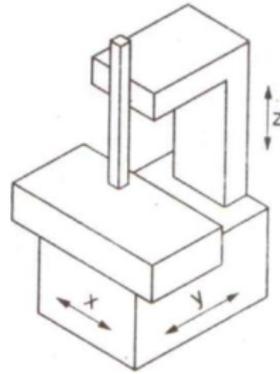


Figura 3.3: Estrutura em coluna[11].

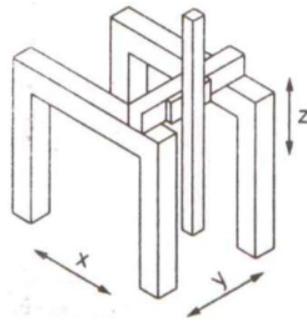


Figura 3.4: Estrutura em Cavalete para Grua Móvel[11].

3.1.2 Sistema de Prova

Considere-se previamente a distinção entre CMM por contato e CMM por laser.

Em ambas as tecnologias o sistema de prova é composto por uma cabeça onde se irá enroscar a sonda e de seguida a ponteira. Na Figura 3.5 encontra-se representada uma cabeça motorizada que permite a rotação da ponteira em dois eixos, tornando uma máquina de 3 eixos numa máquina de 5 eixos.

A cabeça motorizada(Figura 3.5) tem a vantagem de reduzir os erros de inércia devido ao facto de nem todo o movimento ser realizado pela estrutura do equipamento. Este tipo de cabeça permite uma maior amplitude de medições e um movimento em velocidade constante num vetor linear, o que seria completamente impossível com o uso da cabeça fixa[14].

Embora existam vários tipos de sondas, a existência da cabeça motorizada vem permitir uma escolha de ponteira mais simples visto que o operador apenas tem que ter em conta o comprimento, o diâmetro e o material da ponteira. Na presença de uma cabeça fixa é necessária a adição de uma sonda muito mais complexa para que se possa realizar medições em zonas de difícil acesso da peça, como se pode observar na Figura 3.6.

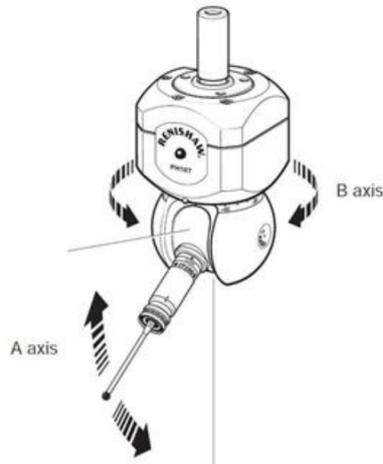


Figura 3.5: Cabeça motorizada da CMM[12].



Figura 3.6: Exemplo de uma sonda complexa[15].

Sondas de contato

As sondas de contato são compostas pelo corpo da sonda e pela ponteira que faz o contato com a peça. Por vezes podem-se utilizar configurações que tenham extensões ou mesmo adaptadores. Pode-se encontrar uma configuração simples na Figura 3.7.

As sondas de contato apresentam características mecânicas semelhantes às da estrutura, mas numa escala muito menor. Como a zona que toca na peça está ligada por uma haste com um diâmetro muito reduzido, verifica-se deflexão ao mínimo toque. Para combater estes erros desenvolveram-se softwares que corrigem esse erro e gatilhos que são acionados com uma força inferior. Sempre que possível utiliza-se uma sonda com um comprimento pequeno para minimizar este erro[16]. De momento utilizam-se materiais com uma enorme resistência aos gradientes térmicos e com uma densidade relativamente baixa, como se pode observar na Figura 3.8.

A partir desta Figura (Figura 3.8) pode-se concluir que o material mais indicado para o fabrico da haste da ponteira é a fibra de carbono por ter as propriedades mecânicas mais adequadas ao processo de medição, mas na realidade o material de eleição para o fabrico da haste da ponteira ainda é o titânio e o alumínio, por ser mais viável economicamente.

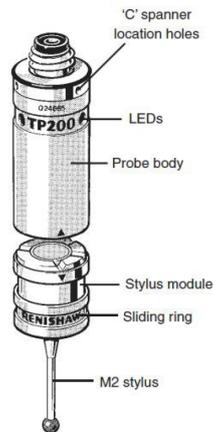


Figura 3.7: Sonda da CMM[13].

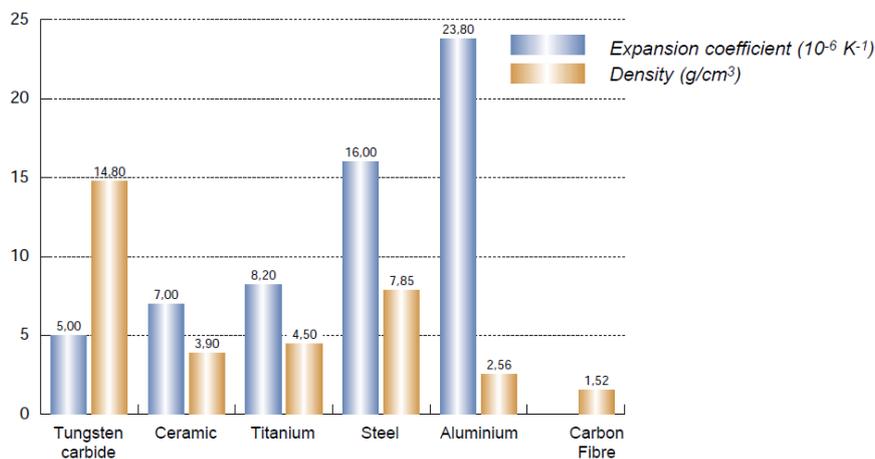


Figura 3.8: Propriedades dos Materiais utilizados na sonda[15].

Apenas se utiliza a fibra de carbono para a construção de extensões com dimensões mais elevadas(50mm).

A esfera que compõe a ponta da sonda é composta por materiais com uma enorme resistência ao desgaste superficial como o rubi ou o zircónio. Estes são materiais que se encontram no topo da escala de "*Mohs*" por isso vão sofrer um desgaste pequeno, para que possam realizar muitas medições sem pôr em causa a repetibilidade do processo.

Para completar o sistema de prova, tem-se a sonda que faz a conexão entre a ponteira e a cabeça. Na categoria de sondas de contato pode ser feita uma divisão entre as "*hard probes*" e as "*trigger probes*".

As "*hard probes*" são ligeiramente mais desatualizadas, mas mesmo assim têm a sua utilização na metrologia dos dias de hoje. O problema das sondas rígidas é o fator humano, visto que estas não detetam o contato entre a máquina e a peça, sendo assim o trabalho do operador garantir que o contato é o mais adequado para uma medição exata e precisa. Por exemplo, se o operador posicionar de forma incorrecta a ponteira, sobre esta será exercida uma força desnecessária, resultando na flexão da mesma e dando origem a uma medição errada[17]. Mesmo assim as "*hard probes*", com a ajuda de um

interferômetro, podem situar-se no topo da tecnologia CMM, sendo o interferômetro responsável por sinalizar o toque com a deflexão da própria ponteira, eliminando assim qualquer erro que possa existir no acionamento do gatilho.

As "*trigger probes*" já são tecnologia mais recente e têm na sua constituição um dispositivo que deteta o contato entre a máquina e a peça, reduzindo assim o fator humano na medição. Para além do dispositivo que deteta o toque existe também um sensor piezoelétrico que transmite a deflexão da sonda, reduzindo assim também os erros associados à deflexão da sonda[17]. O esquema deste tipo de sondas pode ser encontrado na Figura 3.9.

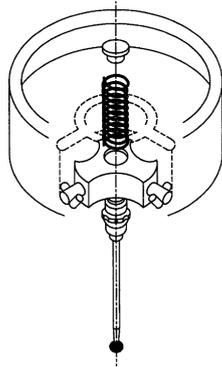


Figura 3.9: Diagrama Esquemático de uma "*Trigger Probe*" [18].

Sondas Laser

Já as sondas utilizadas na tecnologia a laser (Figura 3.10) não precisam de características mecânicas tão rigorosas, embora necessitem de rigidez suficiente para vencer os efeitos inerciais associados ao movimento da sonda. Nesta sonda existe uma fonte luminosa e sensores capazes de detetar a luz refletida na coordenada que se deseja analisar[19].

Como se pode observar na Figura 3.10, a sonda com a tecnologia laser pode ser montada numa cabeça convencional. Muitas vezes existem duas cabeças para que o sistema de contato e o sistema laser se complementem.



Figura 3.10: Sonda Laser[20].

3.1.3 Sistema de Controlo da Máquina

A CMM pode ser controlada manualmente ou através de rotinas, mas a tecnologia que está por detrás do movimento da máquina é a de CNC (Comando Numérico Computorizado). O comando numérico funciona à base de coordenadas[21], permitindo à máquina obter coordenadas convertíveis em valores comparáveis aos existentes no desenho técnico. Com a tecnologia CNC pode-se assim realizar uma comparação entre a peça a avaliar e o seu desenho, feito com a ajuda de ferramentas de *Computer-Aided Design* (CAD) e *Computer-Aided Manufacturing* (CAM). Torna-se assim mais fácil a verificação dos parâmetros requeridos por GD&T.

A criação de rotinas serve para que seja possível repetir o mesmo processo, tentando minimizar o fator humano da equação. Neste sentido, o operador só necessita de executar uma vez a rotina e posteriormente programar a máquina para reproduzir essa rotina as vezes necessárias, possibilitando a verificação de várias peças sem desvios nos parâmetros de avaliação[22].

3.2 Calibração

Pode surgir a dúvida se uma máquina controlada por CNC é capaz de verificar a peça que foi produzida por outra, visto tratar-se da mesma tecnologia. Embora se trate da mesma tecnologia é necessário ter em conta por exemplo o facto de um centro de maquinagem estar sujeito a forças enormes quando realiza o corte por arranque de apara e outras tecnologias controladas por CNC também têm os seus inconvenientes como a deformação do material, como se pode verificar num processo aditivo de *Fused Deposition Modeling* (FDM) que consiste na adição de um termo-plástico por camadas de modo a formar uma peça. Ao contrário dos processos descritos anteriormente o objetivo principal de uma CMM é ter o mínimo de interferência entre a máquina e a peça, em que todas as forças associadas ao processo são reduzidas.

Mesmo sendo construídas com tolerâncias muito apertadas, as CMM não têm as dimensões nominais do projeto. Todo o processo está sujeito a tolerâncias, por consequências desvios, e para minimizar o erro associado a tolerâncias de construção da máquina, existe a compensação volumétrica que tenta minimizar a existência de erros associados à construção da máquina. Para tal é construído um mapa de erros que, para todas as coordenadas do volume de trabalho da máquina, gera um valor de compensação de acordo com o desvio da posição da ponteira em relação ao valor real[24].

Para a verificação dos desvios da ponteira utiliza-se o processo com o nome de interferometria que consiste na comparação de comprimentos de onda de dois feixes de laser[25]. Neste processo são verificados vários tipos de erro e desvio que podem existir na máquina, que estão representados na Figura 3.11.

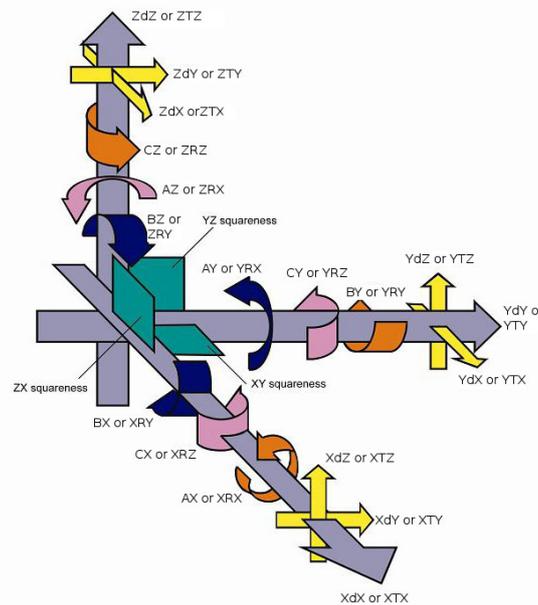


Figura 3.11: Possíveis erros na calibração dos eixos da máquina[25].

Para verificar os desvios lineares registados a cinzento na Figura 3.11, utiliza-se um laser interferómetro com montagem linear, cujo o esquema de funcionamento se encontra na Figura 3.12 e a montagem encontra-se na Figura 3.13.

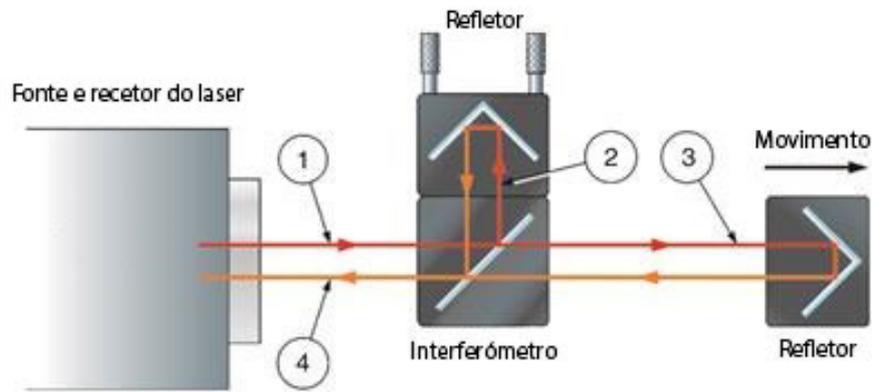


Figura 3.12: Esquema de um laser interferômetro com montagem linear[25].

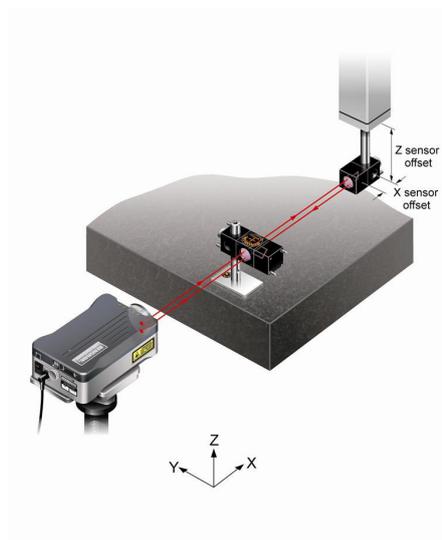


Figura 3.13: Montagem de um laser interferômetro com montagem linear[25].

Pode-se observar o percurso realizado pelo feixe de laser desde que sai da fonte laser até quando chega ao receptor. No ponto 1 tem-se o feixe original, no ponto 2 tem-se o feixe refletido no interferômetro, no ponto 3 tem-se o feixe que atravessou o espelho do interferômetro e vai acompanhar o movimento da máquina e, por último, no ponto 4 tem-se a junção dos dois feixes para que possam ser comparados. No receptor é analisado o comprimento de onda do feixe final. A soma dos dois feixes terá uma interferência construtiva ou destrutiva, consoante a sincronização das fases dos dois feixes. Visto ser um fenómeno que se repete, é possível verificar se a posição obtida pelo leitor da máquina coincide com a posição obtida pelo receptor do laser[26].

Para verificar os desvios angulares representados a azul e a rosa na Figura 3.11 são necessárias as montagens representadas nas Figuras 3.14 e 3.15.

Neste processo de verificação o interferômetro é posicionado no início do percurso, que se realiza no sentido X e -X, e os refletores angulares são posicionados na coluna. Ao contrário da verificação da componente linear os dois feixes são enviados para os

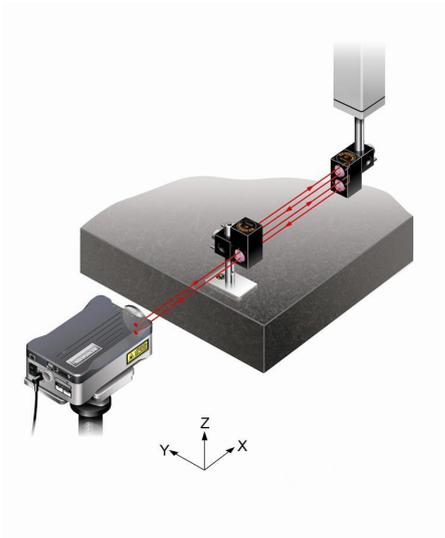


Figura 3.14: Montagem utilizada na verificação da rotação em torno do eixo Y[25].

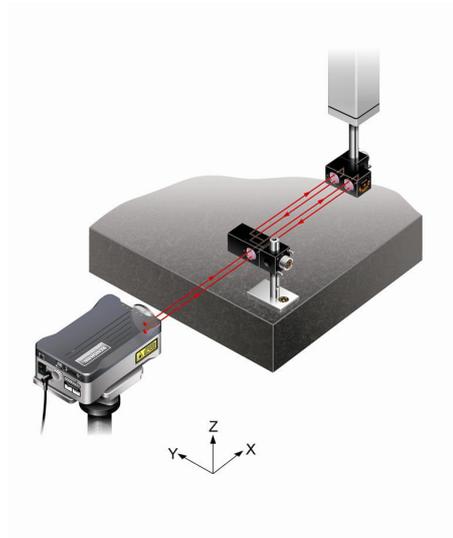


Figura 3.15: Montagem utilizada na verificação da rotação em torno do eixo Z[25].

refletores e, com o desfasamento entre a onda de cada um, se pode verificar a rotação da coluna conforme a posição da mesma[26].

Para verificar os desvios angulares representados a laranja é necessária a montagem representada na Figura 3.16.

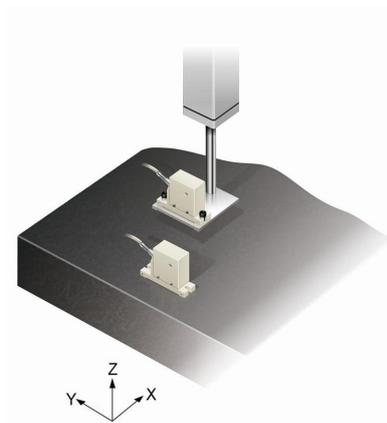


Figura 3.16: Montagem de um nível eletrônico para verificação de rotação com eixo em X[25].

A verificação consiste no posicionamento de dois níveis, um na mesa e outro na coluna, de seguida realiza-se o movimento no eixo X, para verificar a variação angular do valor obtido por um nível em relação ao outro[26].

A verificação do movimento translacional no eixo, representada pelas setas amarelas na imagem 3.11, e feita com as montagens representadas nas Figuras 3.17 e 3.18.

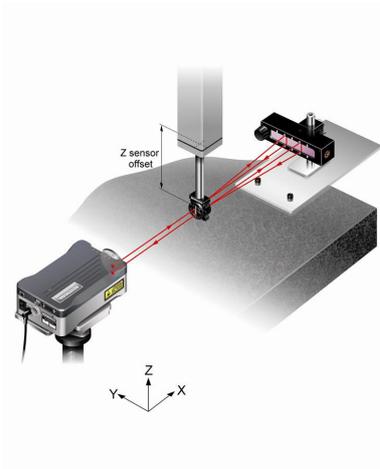


Figura 3.17: Montagem para a verificação da translação horizontal[25].

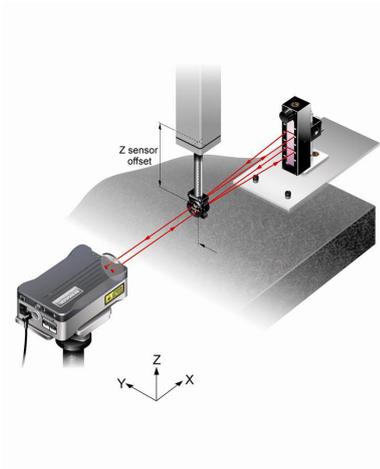


Figura 3.18: Montagem para a verificação da translação vertical[25].

Aqui, a montagem do interferómetro é feita na coluna da máquina e de seguida é posicionado um espelho no lado oposto do laser. Neste ensaio é o interferómetro que viaja segundo o eixo X e, visto que o espelho não se move, qualquer variação do sinal recebido é resultado de algum desvio da coordenada inicial[26].

Por último é feita uma verificação às esquadrias da máquina, que se encontra representada a azul claro na Figura 3.11. Esta pode ser realizada com um esquadro em granito, ou com a tecnologia *Machine Checking Gauge* (MCG). Um exemplo da montagem do MCG pode-se observar na Figura 3.19. Visto que a utilização do esquadro está ultrapassada, apenas se explica a verificação MCG.

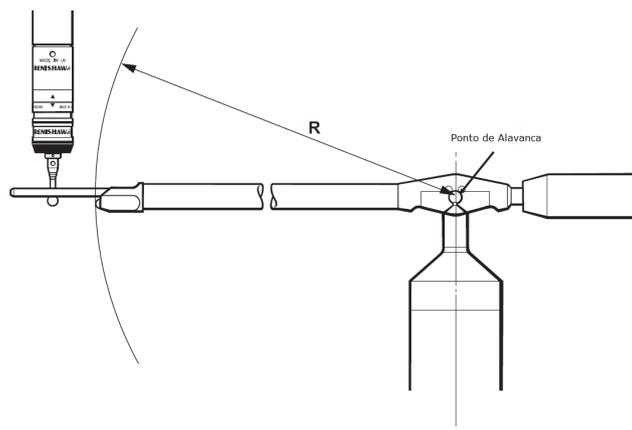


Figura 3.19: Montagem MCG[27].

Neste processo existe um braço contrabalançado que fica apoiado no apoio cinemático existente no topo do suporte, como se pode observar na Figura 3.19. Assim o braço pode rodar em torno do apoio. Na outra extremidade do braço existe uma localização cinemática formada por duas varas, uma esfera e a esfera da ponteira. São obtidos pontos

a 360° para a construção de um círculo, de seguida a ponteira eleva o braço para que este faça um ângulo de 45° , volta a construir outro círculo e por último faz o mesmo para um ângulo de -45° . O desvio existente nos pontos de cada círculo é resultado da existência de erros de esquadria, visto que o braço não mudou de comprimento[27].

3.3 Tecnologias de CMM

A metrologia 3D divide-se em duas categorias. A metrologia com contato e a metrologia sem contato. Como o nome indica a metrologia com contato requer a existência de um sistema mecânico onde exista contato com a peça enquanto a metrologia sem contato não o requer. Para que não exista contato entre a máquina e a peça é necessário o desenvolvimento de outras tecnologias como a tecnologia laser, a visão artificial ou a tomografia computadorizada.

A zona de conforto do funcionamento das CMM por contato acaba onde a zona de conforto das CMM por laser começa visto que a tecnologia laser só surgiu para combater as limitações existentes na medição por contato. Mas embora pareça tratarem-se de tecnologias muito diferentes as únicas diferenças entre a CMM por contato e por laser são a programação associada e o tipo de sonda utilizada para obter os pontos. Como seria de esperar a estrutura é a mesma nos dois casos, visto que o seu propósito é o mesmo.

Limitações da CMM com Contato

Como o nome indica, a tecnologia CMM com contato utiliza o toque para efetuar medições. Sendo assim, peças mais frágeis e que sofram de retorno elástico vão influenciar as medições negativamente, porque a força existente vai deformar a peça. Por muito pequena que seja essa deformação o objetivo da medição é verificar o objeto sem o alterar.

Outra limitação da tecnologia CMM por contato é o rácio entre tempo despendido e a informação obtida. Enquanto que, na tecnologia por contato tem que fazer a aproximação e o toque à peça, a tecnologia por laser apenas tem que fazer uma ligeira aproximação dos pontos a medir.

Por último existe o problema da acessibilidade e tomemos como exemplo a digitalização para determinar um perfil. Enquanto que a programação do varrimento por laser é relativamente simples por não ser tão inflexível quanto à distância entre a peça e a sonda, a programação do varrimento por contato é muito mais rígida porque se o perfil se aproximar demasiado da sonda esta pode partir ou danificar a peça e se se afastar demasiado da peça deixa de haver contato, o que resulta na não medição[28].

Limitações da CMM sem Contato

Esta tecnologia também tem as suas desvantagens como o facto de não conseguir uma repetibilidade tão boa como a tecnologia CMM por contato, porque, por vezes, se criarem artefactos na digitalização de pontos, devido a ambiguidades na nuvem de pontos criada. Os artefactos são pontos que não existem na peça, mas por alguma razão, como por exemplo um reflexo ou uma poeira no ar, se encontram digitalizados na nuvem de pontos.

Esta tecnologia é mais suscetível a variações ambientais visto que poeiras e fumos alteram a medição registada, o que não acontece tanto na tecnologia por contato.

Tirando este fator, já não existem grandes desvios provenientes de fatores ambientais, como é referido na secção 3.1 na parte da estrutura[29].

3.4 Métodos de Alinhamento

Para o funcionamento correto de uma *CMM*, de modo a obter medições exatas e precisas, é necessária a realização do alinhamento entre a máquina e a peça, para que se possa definir a posição em que a peça se encontra em relação à máquina.

Para que seja possível descrever o movimento e posições em que se encontra a sonda da *CMM* é necessária um "mapa" que contenha todas as localizações possíveis da sonda, obtidos a partir da referência da máquina. A isto se chama sistema de coordenadas da máquina[30].

Para além do sistema de coordenadas da máquina existe o sistema de coordenadas da peça, que é um sistema de referência local, a partir do qual se podem indicar as posições dos pontos que compõem a peça. Para fazer a ligação entre o sistema de coordenadas da máquina e o sistema de coordenadas da peça, existem diversos métodos de alinhamento. Esta funcionalidade permite a criação de um programa que realiza todas as medições necessárias, em que facilmente é repetido o processo depois de movida a peça. Depois de criado o programa, a única parte manual é o alinhamento porque as coordenadas das entidades a medir se encontram todas no referencial local criado.

Nos sub-tópicos abaixo encontram-se os tipos de alinhamento mais utilizados na tecnologia *CMM*.

3.4.1 Alinhamento Plano-Linha-Ponto

O alinhamento plano-linha-ponto(PLP), é muito utilizado em peças com características geométricas regulares ou prismáticas. Este consiste na criação de um plano numa face da peça, com a ajuda de pelo menos três pontos, de seguida define-se uma reta por onde passa um plano perpendicular ao primeiro e por fim um ponto para localizar um plano perpendicular aos dois primeiros. Assim torna-se possível referenciar o sistema de coordenadas da peça segundo o sistema de coordenadas da máquina[1].

Na Figura 3.20 encontra-se uma representação do alinhamento plano-linha-ponto.

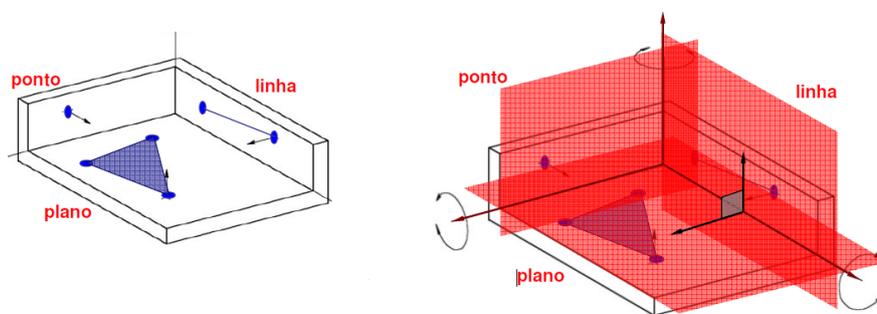


Figura 3.20: Alinhamento por Plano-Linha-Ponto[1].

3.4.2 Reference Point System

O alinhamento *Reference Point System* (RPS) é um tipo de alinhamento que utiliza como referência 3 ou mais características da peça a inspecionar[1], como por exemplo centros de furos ou eixos. Este tipo de alinhamento é muito útil para a comparação da peça com o desenho CAD, embora apenas permita retirar características a partir do ponto de referência. É muito utilizado para verificar distancias entre pontos chave da peça. É muito utilizado na industria automóvel na verificação final de medidas de veículos e a sua comparação com o projeto CAD[31].

3.4.3 Best Fit

O alinhamento *Best Fit* consiste na obtenção de vários pontos da peça de maneira a ser possível formar-se uma nuvem de pontos com a superfície da peça. Depois de formada a nuvem de pontos é possível alinhar a peça com o CAD, visto que já se tem uma aproximação do que as superfícies da peça aparentam ser. Este processo é feito de forma iterativa tendo como resultado ideal a distancia mínima entre os pontos de referencia e a peça real. Este tipo de alinhamento é mais utilizado em sistemas de visão embora a sua utilização também seja possível em sistemas que utilizam contato. Este processo é muito demorado e tem tendência para esconder os defeitos da peça obtida, bem como adicionar ruído desnecessário[32]. Só deve ser utilizado quando a peça em questão possui geometrias muito complexas e não pode ser alinhada pelos métodos PLP ou RPS.

3.5 Fatores Relevantes na Medição

Embora as medições realizadas atualmente sejam bastante exatas e precisas, existem sempre desvios que resultam da variação de fatores influentes ao processo de medição, tais como o gradiente térmico, a abordagem do utilizador, a velocidade de aproximação e trabalho ou tipo de sonda utilizado, entre outras. É pela existência destes erros que se tenta, cada vez mais, criar máquinas que resolvam ou compensem a sua existência.

O fator que mais influencia a medição é mesmo o fator humano. Quando se faz uma medição é necessário ter em conta a abordagem escolhida, a sonda e a ponteira utilizadas, o tipo de referência escolhido, os filtros aplicados, o número de pontos para conseguir obter a grandeza a medir. Todos estes pontos, são escolhas que dependem do operador e influenciam o valor medido.

3.5.1 Probe Lobing

O *probe lobing* consiste na variação do resultado obtido com a variação da orientação da sonda. Este fenómeno deve-se ao facto dos gatilhos estarem espaçados a 120° , sendo assim possível existirem disparos em que a força de toque é diferente tendo em conta a direção do toque em relação ao corpo da ponteira. Por vezes é necessário exercer mais força sobre a peça para que o gatilho seja disparado, como se pode observar na Figura 3.21.

Outro fenómeno que pode originar o *probe lobbing* é o fator de forma da esfera existente na ponta da ponteira, pois pode ter defeitos superficiais, embora seja uma ocorrência muito rara.

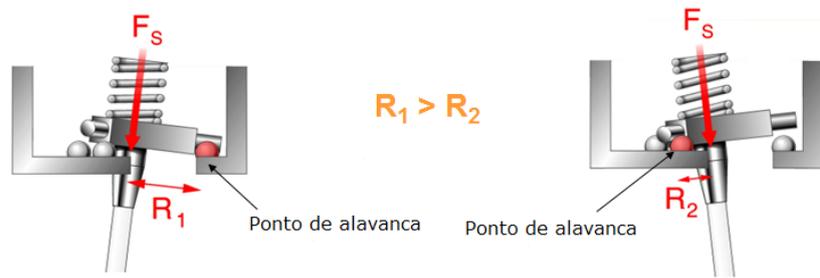


Figura 3.21: Comparação de diferentes orientações de disparo.

Um gráfico com a representação dos valores obtidos a partir de um ensaio em que apenas se variou o ângulo de toque pode-se encontrar na Figura 3.22. O gráfico representado é o resultado do ensaio realizado com uma ponteira com um comprimento de 50mm, um diâmetro de haste de 3mm e uma esfera de diâmetro de 6mm. Pode-se observar a variação do resultado obtido com a variação do ângulo (ângulo que se encontra no plano Oxy, que roda em torno do eixo Z) a que é feita a medição[18].

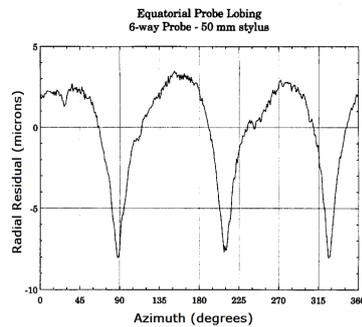


Figura 3.22: *Probe Lobing*[18].

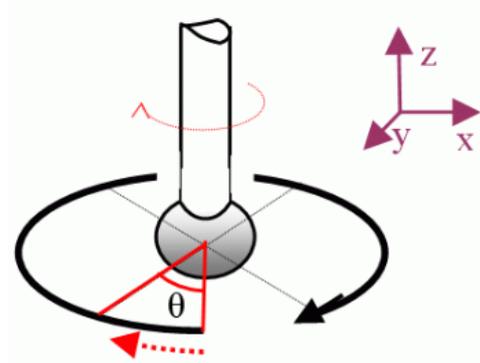


Figura 3.23: Variação do ângulo[17].

3.5.2 Velocidade de Contato

Para que a leitura seja efetuada, a sonda tem que se movimentar de ponto para ponto nas coordenadas da peça. No momento do toque forma-se um par de forças ação-reação entre a peça e a máquina. Para que a máquina entenda que existiu um toque essa força tem que vencer a força feita pela mola[18]. Para que o gatilho existente no corpo da sonda seja disparado, tem que existir apenas a força necessária para que o contato deixe de se realizar. Se a velocidade for elevada, o contato, para além de disparar o gatilho, irá provocar a flexão ou dobra da ponteira. Na Figura 3.24 podem-se observar as forças resultantes de um toque vertical.

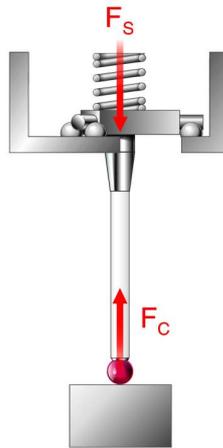


Figura 3.24: Esquema de forças existente no toque[33].

3.5.3 *Pre-Travel*

A expressão "*pré-travel*" tem dois significados, conforme o que se está a falar.

Do ponto de vista do programador é o intervalo de espaço entre o ponto teórico da medição e o ponto de aproximação em que a ponteira se movimenta à velocidade de medição. A existência de "*pré-travel*" deve-se ao facto de não existirem duas medições no mesmo sitio, quanto maior o "*pré-travel*", maior o espaço de procura pelo ponto a medir.

Do ponto de vista do fabricante, o "*pré-travel*" é a distância percorrida entre o toque real e o disparo do gatilho existente no corpo da ponteira. Para compensar esta ocorrência existe a calibração da ponteira, que consiste na medição de um objeto cujas características são conhecidas para se observar e compensar qualquer desvio relacionado com o disparo da sonda[34].

3.5.4 Temperatura

As máquinas CMM foram fabricadas para serem utilizadas em ambientes controlados, com temperaturas entre os 18°C e 22°C, com um gradiente máximo de 1°C/hora e 2°C/dia, isto considerando que os materiais utilizados na construção da máquina expandem com o aumento da temperatura[35].

Embora sejam máquinas sensíveis à temperatura, já existem softwares capazes de compensar os efeitos da temperatura. Estes utilizam a estrutura, os materiais utilizados e a temperatura medida em pontos críticos de funcionamento. Fazendo uma simulação numérica é possível prever as distorções existentes com a variação da temperatura. Para que a tecnologia funcione, o material utilizado na estrutura da máquina tem que ter uma capacidade de condução de calor grande, para a temperatura dentro da estrutura ser uniforme. Mas mesmo este sistema tem desvantagens, visto que considera que o material é homogêneo, o que muitas vezes não se verifica[36].

Parte II

Trabalho Realizado

Capítulo 4

Metodologia

4.1 Equipamento Utilizado

Para a realização dos ensaios experimentais foram disponibilizados dois equipamentos da marca Aberlink©, modelos Maxim(Figura 4.1) e Azimuth(Figura 4.2). O equipamento com o modelo Azimuth é de elevadas dimensões e tem uma área de trabalho de 1200mm, por 2000mm, por 1000mm. Embora tenha estas dimensões, a máquina tem uma resolução de escala na área da décima de micron e permite vetores de velocidade de 1300mm/s e vetores de aceleração de 1700mm/s². O equipamento com o modelo Axiom é idêntico ao modelo anterior, apenas com uma mesa de dimensões mais reduzidas.



Figura 4.1: Máquina existente no Departamento de Engenharia Mecânica da U. de Aveiro[37].



Figura 4.2: Máquina onde se realizaram os ensaios [37]

Ambos os equipamentos disponibilizam dois programas informáticos para o seu controlo e comando, o *Aberlink 3D* (Aberlink©) e o *PowerInspect* (Delcam©), bem como para a análise de resultados obtidos.

Os ensaios foram realizados num ambiente não controlado, embora a máquina tenha uma compensação térmica e apoios capazes de compensar vibrações.

O sistema de prova é composto pelo cabeçote Ph10T, o corpo da sonda TP20 (Figura 4.3) e as ponteiras e extensões representadas na tabela 4.1. As ponteiras têm uma haste em aço inoxidável e uma esfera de rubi e as extensões também são em aço inoxidável.



Figura 4.3: Exemplo da configuração com os componentes utilizados nos ensaios[38].

Tabela 4.1: Ponteiras e extensões utilizadas nos ensaios.

Elemento	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
Ponteira	1	20
Ponteira	2	20
Ponteira	3	20
Ponteira	4	10
Ponteira	4	20
Ponteira	6	20
Extensão	sem ponteira	10
Extensão	sem ponteira	20
Extensão	sem ponteira	40

De salientar que todo o sistema utilizado na medição foi calibrado ou aferido e encontra-se dentro do período de validade, nomeadamente o cabeçote, a sonda, as ponteiras e as extensões, bem como os programas informáticos.

As peças onde se realizaram os ensaios foram uma esfera de calibração com 19,05mm, uma esfera de calibração de 15,875mm de diâmetro e uma peça utilizada para a realização do tutorial de aprendizagem da máquina e que se encontra representada na Figura 4.4. Escolheram-se estas peças por se tratarem de peças em alumínio, obtidas por maquinação com tolerâncias apertadas e variações de forma pequenas, o que permite identificar

o impacto da variação de cada parâmetro na máquina, embora o alumínio tenha um coeficiente de expansão térmico elevado.

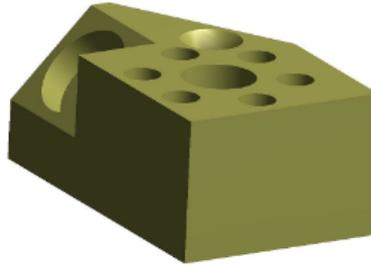


Figura 4.4: Peça tutorial da ©Aberlink [39].

4.2 Comparação entre o *Software Aberlink 3D* e *PowerInspect*

Nesta secção é feita uma descrição e uma comparação qualitativa entre os softwares *Aberlink 3D* e o *PowerInspect*. Foi avaliada a interface e a facilidade de utilização e programação.

4.2.1 Interface do Utilizador

No que diz respeito à interface, a primeira diferença que se verifica é o facto do *Aberlink 3D* não permitir uma apresentação da peça 3D. Este software pode-se considerar 2.5D, por apenas apresentar as vistas da peça, enquanto o *PowerInspect* tem uma interface 3D em que se visualiza toda a área da máquina e a localização da ponteira e coluna que a suporta. Outro fator de destaque para o *PowerInspect* é a divisão do ambiente de trabalho em três secções. A da medição, a do CAD e a da máquina. No separador alusivo à medição existem todos os elementos necessários à criação de entidades a medir, no separador do CAD, existe tudo relacionado com a importação de CADs e no separador máquina existem todos os menus para a calibração da ponteira, posicionamento da esfera de calibração, mudança de ferramentas, entre outros.

Logo aqui se encontra uma barreira à utilização do *Aberlink 3D*, por ter uma visualização menos intuitiva, logo menos "*user-friendly*" para o operador. Depois de utilizar o *Aberlink 3D*, pode-se concluir que este software está mais direcionado para trabalhos menos complexos.

Como se pode verificar em todos os "*softwares*" de medição, logo a seguir ao arranque é necessária a calibração dos componentes. No *PowerInspect* esse processo é todo realizado no separador "máquina" enquanto que no *Aberlink 3D* é necessário o acesso a 2 menus distintos, um para identificar a posição da esfera de calibração e outro para calibrar a ponteira na orientação desejada. A existência de dois menus distintos para a realização de tarefas complementares torna o *Aberlink 3D* menos fácil de utilizar.

Depois de realizada a calibração, é necessário um alinhamento para que as peças possam ser medidas várias vezes, sem comprometer a repetibilidade da medição.

No Aberlink 3D não existe nenhum menu de alinhamento, apenas existe a criação de um pontos de referência no programa, de modo a criar um alinhamento PLP. Todos os outros pontos medidos posteriormente, serão medidos tendo em conta estes pontos de referência. Embora seja mais simples por não existir nenhum menu para os alinhamentos, esta metodologia não permite outro tipo de alinhamento, nem a adição de mais alinhamentos do mesmo tipo, visto só ser possível criar uma referência para cada tipo de entidade.

No PowerInspect existe um menu de alinhamentos, no qual se pode escolher o tipo de alinhamento a utilizar. Depois de criado um alinhamento, todas as medições efetuadas nos grupos geométricos seguintes terão em conta o alinhamento feito. Neste software é possível a criação de mais alinhamentos, substituindo assim o alinhamento criado anteriormente.

4.2.2 Operação e Programação

Na programação CMM existem duas alternativas, nas quais o operador pode seguir. A programação "*teach and learn*" e a programação "*offline*".

A programação "*teach and learn*" é muito semelhante nos dois "*softwares*". Primeiro escolhe-se a entidade a medir e depois, com o "*joystick*", o operador conduz a ponteira a tocar na peça de modo a tocar na entidade a medir. De seguida, ao correr o programa em modo automático, o programa vai conduzir a ponteira para os pontos retirados em modo manual. O valores medidos no modo manual são apenas uma guia para o programa correr em modo automático, visto que nem a velocidade de toque, nem a direção do movimento são controlados, o que iria resultar numa medição imprecisa e inexata.

Para que seja possível realizar o movimento automático é necessária a definição de pontos de segurança porque o programa faz uma interpolação linear de ponto para ponto, o que pode ser prejudicial porque a ponteira pode colidir com partes da peça. Neste campo existe a diferença no modo de como o *software* cria um volume de segurança em torno da entidade medida. Se for medido um plano, o Aberlink 3D identifica que existe uma peça no plano medido com as dimensões máximas dos pontos retirados. Este volume de segurança vai sendo adaptado com a medição de mais entidades na peça, criando assim um volume no qual, supostamente, existe material onde a máquina não se poderá movimentar. Já o PowerInspect avisa que irá existir uma colisão, apenas se for realizada uma simulação do processo. Caso se execute o programa sem simular, a ponteira, o cabeçote ou a coluna poderá colidir com a peça. Mesmo assim o movimento para fora do volume de segurança poderá não ser o suficiente porque a peça pode ter partes que não são sujeitas a medição que não são consideradas para o volume de segurança.

A programação "*offline*" consiste na preparação do programa com o computador desligado da máquina. É neste tipo de programação que os "*softwares*" se afastam na maneira de realizar a mesma tarefa.

O Aberlink 3D é extremamente básico, mas não é necessariamente simples. O operador tem que escolher a entidade a medir, a orientação da medição e as coordenadas dos pontos a medir. Depois de calculadas as distâncias de aproximação toda a informação é disposta em forma de tabela com as coordenadas XYZ e o valor do vetor velocidade de cada ponto por qual a ponteira vai passar.

O PowerInspect é mais simples de utilizar, visto que nele é mais fácil de representar a peça em CAD por ter uma interface 3D e ter uma filosofia mais de "*point and click*". Aqui

apenas se escolhe a entidade e de seguida, com o rato, escolhem-se os pontos que se querem medir, na interface 3D. Depois de calculado o ataque à peça, o "*software*" representa o caminho através de uma linha, que visualmente é muito mais fácil de interpretar e de identificar possíveis colisões.

Em ambos é possível alterar os parâmetros de pre-travel e over-travel, velocidade de deslocamento, velocidade de toque, entre outros. Mas tanto o Aberlink 3D como o PowerInspect já têm esses valores predefinidos, para que o utilizador pouco experiente, não se ter que preocupar com esse detalhe.

Por último, também é importante referir que ambos os *softwares* possibilitam a criação de estudos estatísticos realizando várias vezes a mesma medição e armazenando os valores anteriores para que se possa analisar a dispersão dos valores obtidos.

Na tabela 4.2 encontra-se um resumo do que foi abordado nos capítulos 4.2.1 e 4.2.2.

Tabela 4.2: Comparação entre *Softwares*.

	Aberlink 3D	PowerInspect
Apresentação 3D da Peça	x	✓
Alinhamento	x	✓
Vários Alinhamentos Diferentes	x	✓
Realização de Programas Automáticos	✓	✓
Realização de Estudos Estatísticos	✓	✓
Criação de Volume de Segurança	✓	x

No final deste processo de aprendizagem e experimentação procedeu-se à elaboração de um manual de utilização do equipamento existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro para facilitar futuras utilizações.

Capítulo 5

Trabalho Experimental

5.1 Modelo de Estudo

Tal como referido anteriormente (capítulo 1.2), os resultados dos ensaios experimentais dependem de diversos fatores tais como a velocidade de toque, o *pre-travel*, o ângulo de ataque da ponteira, o ângulo do cabeçote, o número de pontos medidos, o comprimento da ponteira e o diâmetro da ponteira.

Para avaliar a influência destes fatores nos resultados da medição, foram feitos estudos de sensibilidade, fazendo variar um dos fatores dentro de determinados limites, mantendo constantes todos os restantes fatores.

Para cada estudo foram realizadas cinquenta repetições, numero considerado suficiente, de modo a obter resultados mais consistentes e permitir a realização de estudos estatísticos e respetivas tendências.

Neste capítulo encontram-se descritas as metodologias utilizadas e os resultados obtidos para cada um dos tipos de ensaio.

5.2 Formato dos Resultados Obtidos

Os resultados dos ensaios realizados encontram-se representados em gráficos e tabelas numéricas. Tendo em conta o volume da informação obtida apenas se apresentam, para cada um dos parâmetros, exemplos tipo dos referidos gráficos e tabelas.

Para a avaliação dos parâmetros de *pre-travel* os resultados obtidos estão representados na forma de gráfico, como por exemplo os indicados na Figura 5.1.

As unidades de medida presentes no eixo X são segundos (s) e no eixo Y são milímetros por segundo (mm/s).

Para os restantes parâmetros os resultados obtidos encontram-se em forma de tabela e gráfico, como mostra o exemplo da Figura 5.2. Pode-se observar a flutuação dos valores nas cinquenta repetições para um ensaio aleatório.

As unidades de medida presentes no eixo X são os números do ensaio (s) e no eixo Y são os diâmetros medidos (mm/s).

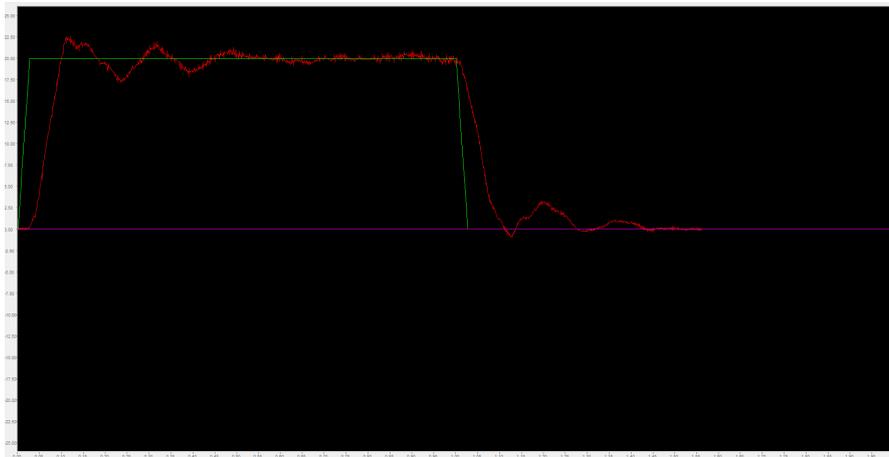


Figura 5.1: Exemplo do *output* do ensaio do *pre-travel*.

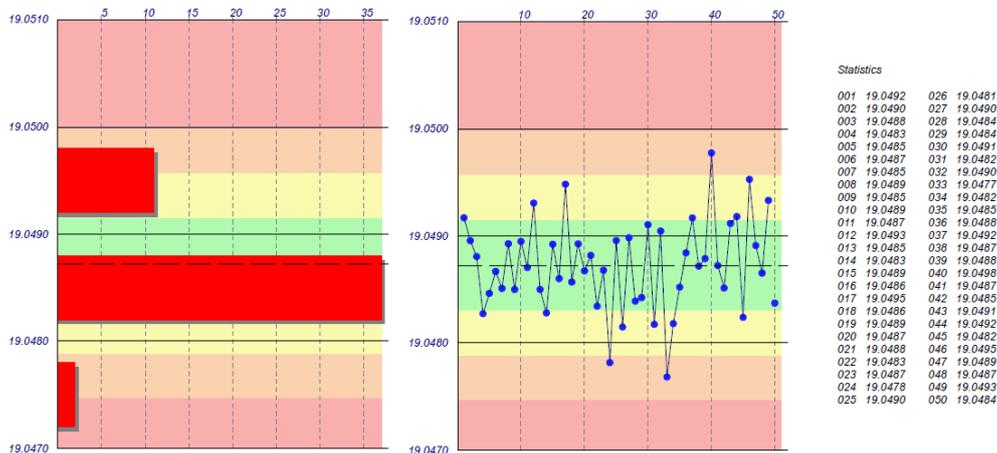


Figura 5.2: Exemplo do *output* do ensaio de medição.

5.3 Verificação da Influência da Velocidade de Toque na Medição

5.3.1 Metodologia

Para a realização do ensaio de verificação da influência da velocidade de toque utilizou-se uma ponteira de 20mm de comprimento e 3mm de diâmetro. Foram feitas várias medições de uma esfera de calibração, com o diâmetro de 19,05mm e registados os diâmetros medidos.

O ensaio consiste na medição da esfera através do toque de 5 pontos, mais um do que o mínimo necessário. Os pontos-alvo encontram-se no topo da esfera e na sua linha do Equador, desfasados 90 graus. O único parâmetro alterado foi a velocidade de toque, variando de 1mm/s até 13mm/s. O *pre-travel* tem um valor de 4mm, a velocidade de deslocação tem um valor de 150mm/s, os ângulos do cabeçote são $A=0$ e $B=0$ (ver Figura 3.5) e o ângulo de ataque da ponteira perpendicular à superfície medida.

5.3.2 Resultados Obtidos

Os resultados numéricos obtidos para as diferentes velocidades de toque e para cada uma das cinquenta repetições encontram-se descritos nas tabelas existentes no anexo B.

Nas Figuras 5.3 e 5.4 encontra-se uma representação gráfica dos resultados das medições do diâmetro da esfera.

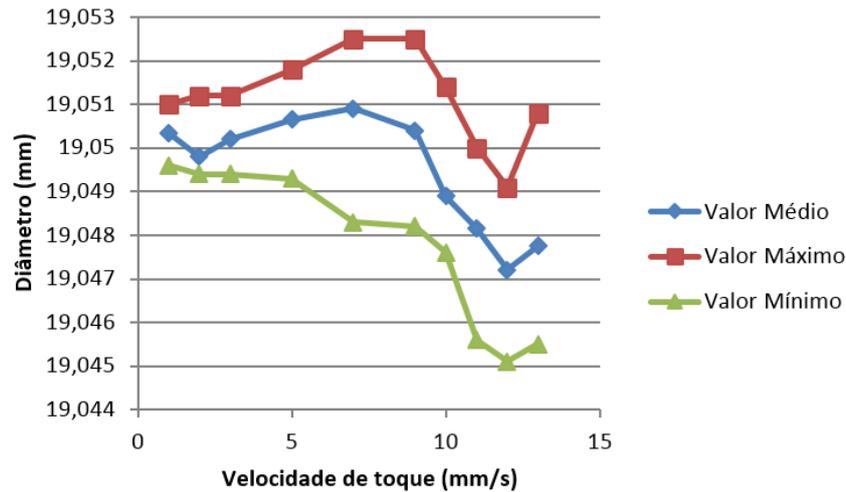


Figura 5.3: Representação gráfica da variação do diâmetro medido com o aumento da velocidade de toque.

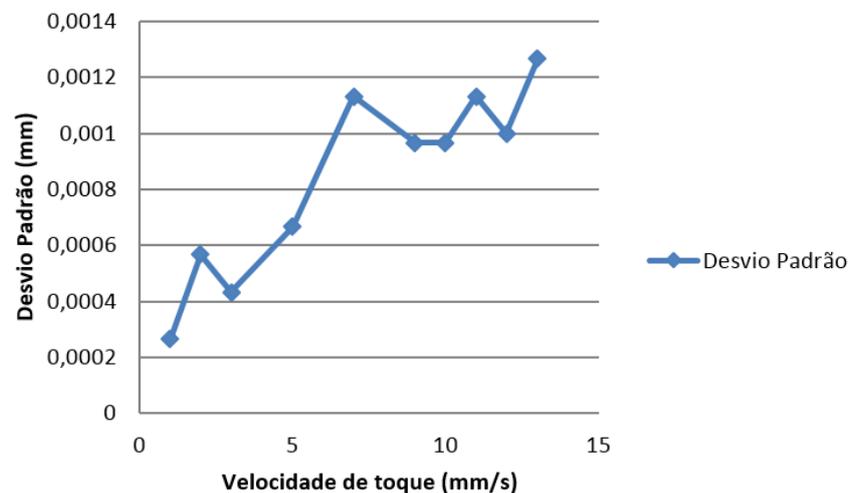


Figura 5.4: Representação gráfica da variação do desvio padrão com o aumento da velocidade de toque.

Da análise das curvas de comportamento pode-se verificar que existe um patamar, com uma inclinação pouco significativa, para velocidades até 7mm/s em que os valores máximos e mínimos estão perto do valor médio, o que justifica os valores reduzidos do desvio padrão. Para velocidades superiores a 7mm/s a curva apresenta uma inclinação

mais acentuada, sendo assim o diâmetro médio medido inferior. Este fenómeno deve-se a um contato mais violento entre a ponteira e a peça, o que pode levar a uma deformação de ambas as peças no momento da impacto.

Apesar dos valores de desvio padrão serem muito pequenos e inferiores a um valor de incerteza de medição aceitável, existe contudo uma tendência de aumento daquele valor com o aumento da velocidade de toque.

Estes resultados sugerem que as medições devem ser realizadas com uma velocidade de toque não superior a 7mm/s.

5.4 Determinação do Comprimento de *Pre-travel* mais adequado na Medição

5.4.1 Metodologia

O objetivo deste ensaio foi verificar a que distância do ponto inicial do seu movimento o vetor velocidade estabiliza o seu valor. Visto que, para uma medição correta, o toque não se deve realizar quando a ponteira ainda vai em aceleração ou a estabilizar o sinal dos motores, pois o resultado da compensação não será o mais acertado. Só se realiza este ensaio por o sistema de controlo ser um sistema PID, e a posição da ponteira ser controlada pela diferença entre a posição atual e a posição ideal. Na figura 5.5 encontra-se um exemplo do comportamento da ponteira, em relação ao tempo. A verde encontra-se uma linha traçada com o sinal ideal e a vermelho encontra-se uma linha com o sinal medido.

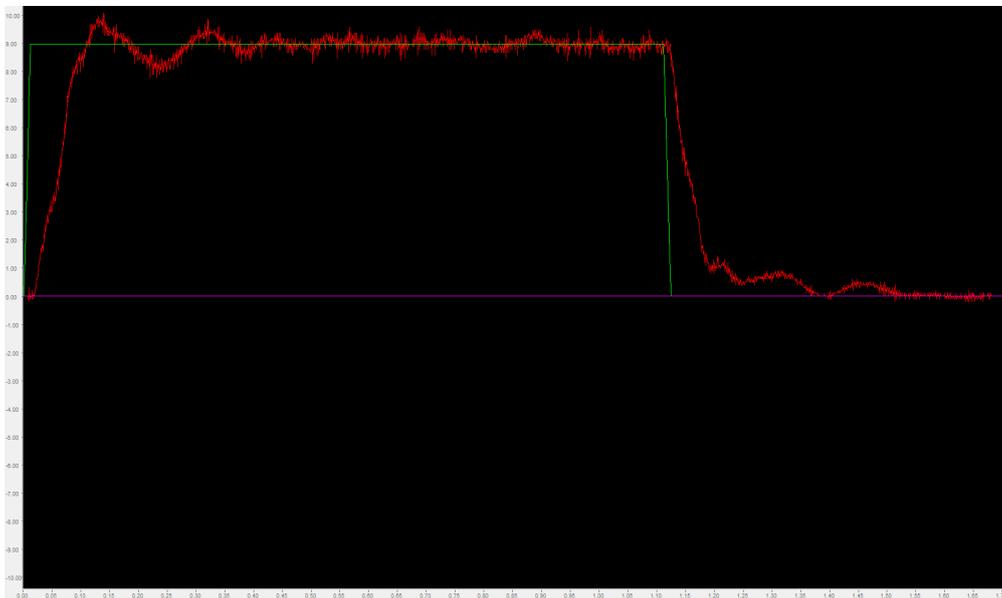


Figura 5.5: Imagem de um ensaio registado a 10mm/s.

Ao observar o gráfico é possível identificar a zona de aceleração, o "*overshot*", a zona de estabilização e a zona em que o sinal se encontra estabilizado.

Para a realização do ensaio foi necessária a utilização de um programa de diagnóstico em que o operador envia uma instrução para a máquina, dando a coordenada inicial, a

coordenada final e a velocidade do movimento. A máquina executa a ordem e os sensores vão comparando a posição real da ponteira com a posição ideal, sendo assim possível avaliar o movimento.

Este ensaio teve como objetivo avaliar o movimento nos eixos em separado, pois só assim se pode comparar o movimento realizado por cada motor. Este consiste na execução de um percurso por parte da máquina, em reta (100mm), em aceleração máxima até à velocidade desejada, como aconteceria no momento da medição. Os movimentos avaliados têm a direção segundo X, -X, Y, -Y, Z e -Z. Variou-se a velocidade do movimento para ver a influência no tipo de movimento e resultante aumento de *pre-travel*. A distância percorrida pela ponteira foi sempre de 100mm, com a exceção do ensaio realizada à velocidade de 20mm/s que foi de 200mm. Os ângulos do cabeçote têm os valores de $A=0$ e $B=0$ (ver Figura 3.5).

Os valores do tempo de estabilização do sinal, distância de estabilização do sinal, *overshot* e o *pre-travel* foram obtidos através da medição sobre os respetivos gráficos, semelhantes ao representado na figura 5.5, sendo que o valor de *pre-travel* o valor da distância de estabilização de sinal multiplicada por três.

5.4.2 Resultados Obtidos

Os resultados numéricos obtidos para a variação da velocidade de deslocamento da ponteira em cada eixo encontram-se nas tabelas do anexo C.

Estes resultados foram organizados e divididos em três partes e, em cada uma delas, encontram-se os gráficos com os resultados obtidos nos ensaios realizados para o movimento no eixo X, Y e Z, respetivamente.

A primeira parte dos resultados, tem como objetivo o estudo do movimento do eixo X. Nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 encontram-se os gráficos que representam o *overshoot* do sinal existente no início do movimento, o tempo de estabilização do sinal e a distância de estabilização do sinal, respetivamente.

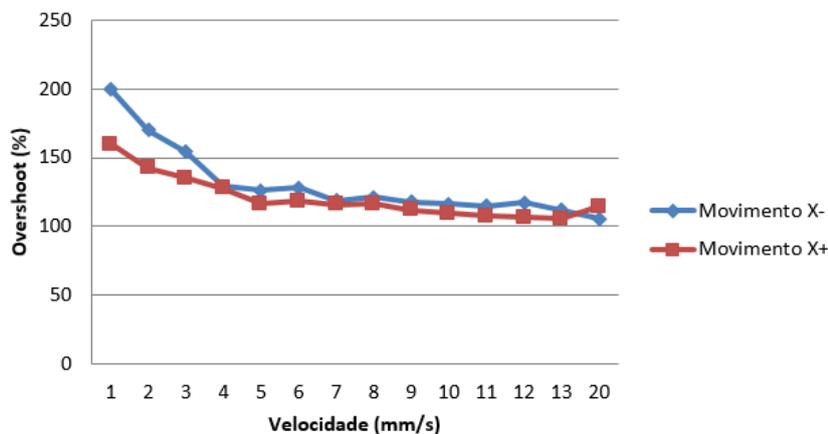


Figura 5.6: Representação gráfica da variação do *Overshoot* no eixo X com o aumento da velocidade do movimento.

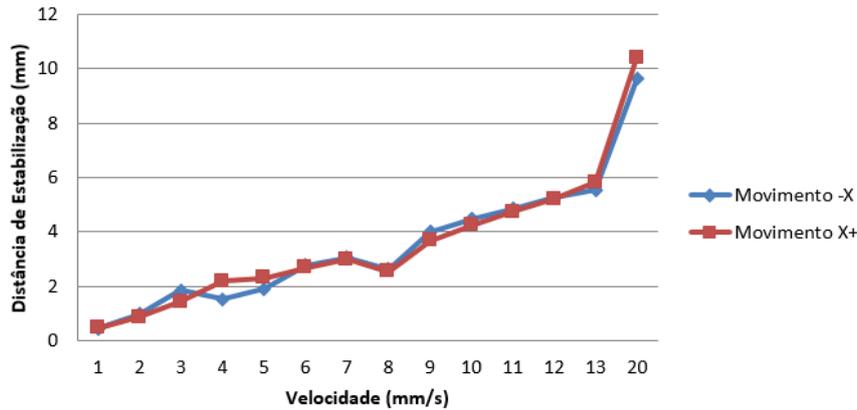


Figura 5.7: Representação gráfica da variação da distância de estabilização no eixo X com o aumento da velocidade do movimento.

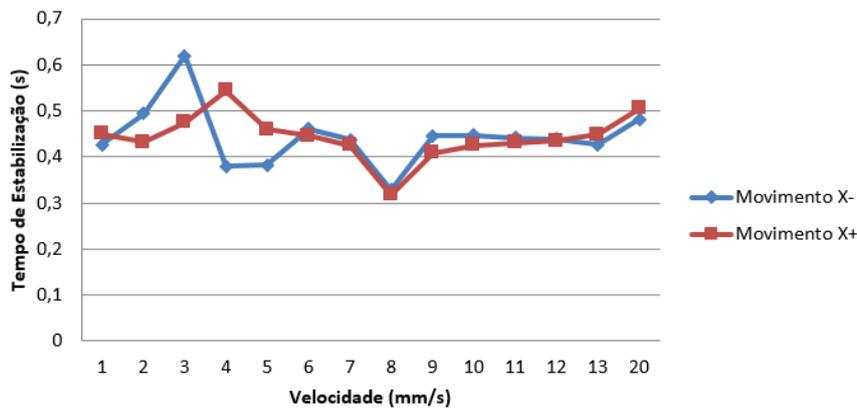


Figura 5.8: Representação gráfica da variação do tempo de estabilização no eixo X com o aumento da velocidade do movimento.

Ao observar a Figura 5.6 pode-se verificar que o valor percentual do *overshoot* vai baixando com o aumento da velocidade, mas o seu valor numérico é quase sempre constante com o valor igual a 1mm/s, ou seja, no início do movimento o vetor de velocidade da ponta ultrapassa o valor desejado em 1mm/s e depois vai estabilizando o seu valor.

Na Figura 5.7 pode-se observar que a relação entre a distância de estabilização e a velocidade do movimento é linear, o que seria expectável porque o movimento realiza-se a uma velocidade que se encontra muito abaixo da velocidade máxima do motor.

A Figura 5.8, onde se encontra o gráfico que representa a evolução do tempo de estabilização do movimento, apenas vem comprovar o que foi dito em relação ao gráfico presente na Figura 5.7, porque o tempo de estabilização da velocidade manteve-se constante com o aumento da velocidade do movimento.

Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 encontram-se os gráficos relativos ao movimento segundo o eixo Y.

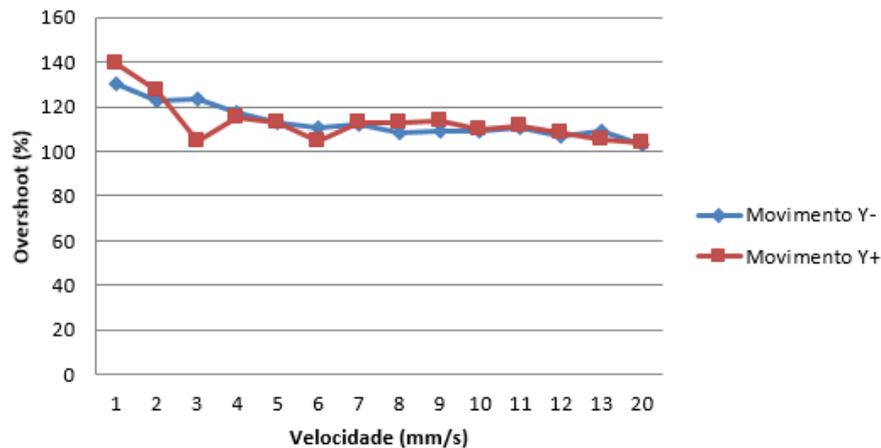


Figura 5.9: Representação gráfica da variação do *Overshoot* no eixo Y com o aumento da velocidade do movimento.

Na Figura 5.9 encontra-se o gráfico que contém a evolução da percentagem de *overshoot* sofrido no início do movimento do eixo Y. Este valor percentual também se vai aproximando dos 100% com o aumento da velocidade do movimento, tal como no caso anterior. Os valores iniciais do *overshoot* no eixo Y são ligeiramente inferiores aos do eixo X, bem como aos do eixo Z (referido subsequentemente), por se tratar de um eixo com uma inércia maior (os motores que movimentam o eixo Y suportam toda a estrutura de ponte da máquina).

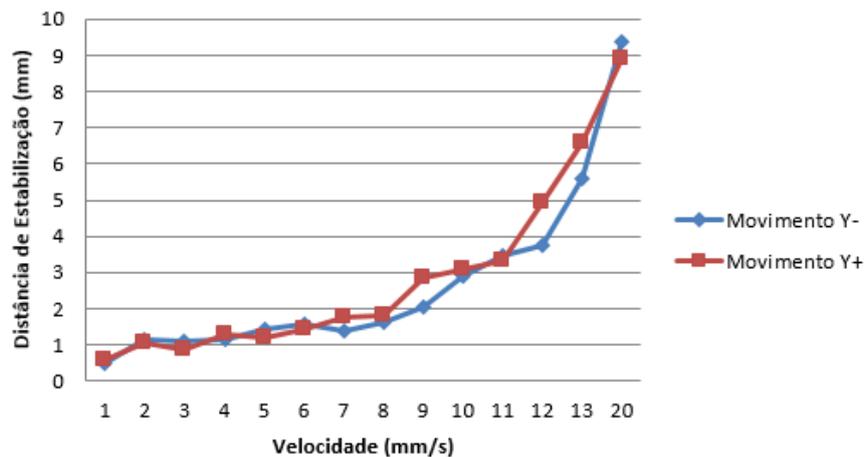


Figura 5.10: Representação gráfica da variação da distância de estabilização no eixo Y com o aumento da velocidade do movimento.

Como se pode verificar ao observar a Figura 5.10, no movimento no eixo Y, ao contrário do movimento no eixo X, a relação entre valores da distância de estabilização e da velocidade do movimento não é linear, por se tratar de um eixo que tem suportado nele todo o peso da ponte da máquina, como referido anteriormente.

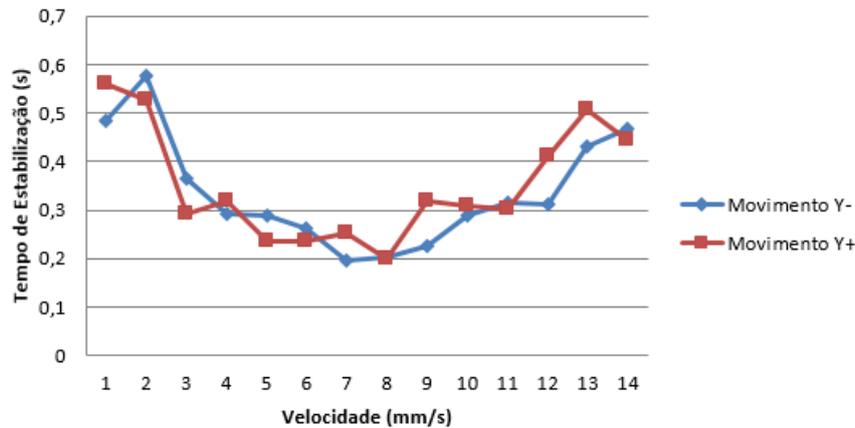


Figura 5.11: Representação gráfica da variação do tempo de estabilização no eixo Y com o aumento da velocidade do movimento.

Na Figura 5.11 encontra-se representado o gráfico que relaciona o tempo de estabilização do vetor velocidade no movimento da ponteira com a velocidade do movimento. Pode-se observar uma zona de conforto no movimento visto que a curva tem valores mais baixos no centro do gráfico. Este fenómeno deve-se à elevada inércia do eixo, o que vai exigir uma afinação diferente do motor que controla o movimento segundo o mesmo.

Nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 encontram-se os gráficos relativos ao movimento segundo o eixo Z.

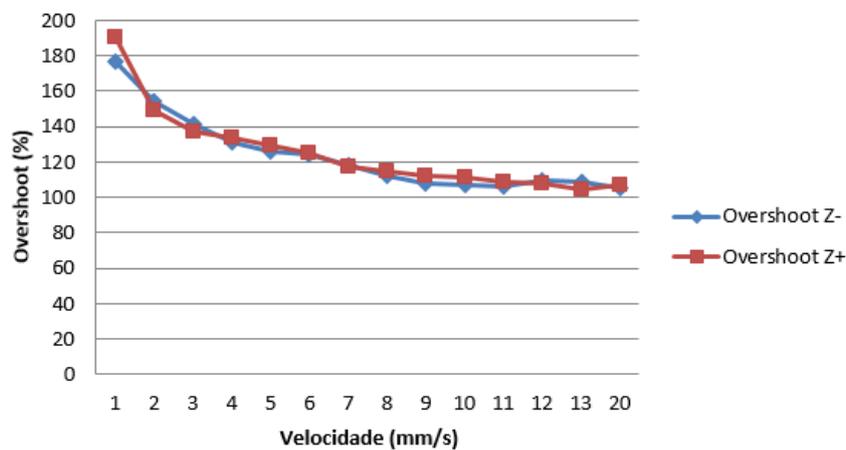


Figura 5.12: Representação gráfica da variação *overshoot* no eixo Z com o aumento da velocidade do movimento.

Ao observar a Figura 5.12 pode-se verificar que o *overshoot*, tal como nos outros casos este valor percentual diminui com o aumento da velocidade mas o seu valor numérico tem valores na ordem de 1mm/s.

Na Figura 5.13 pode-se observar a variação da distância de estabilização com o aumento da velocidade do movimento. A curva representativa do movimento com o sentido negativo em Z tem valores mais atípicos, porque o movimento é realizado parcialmente

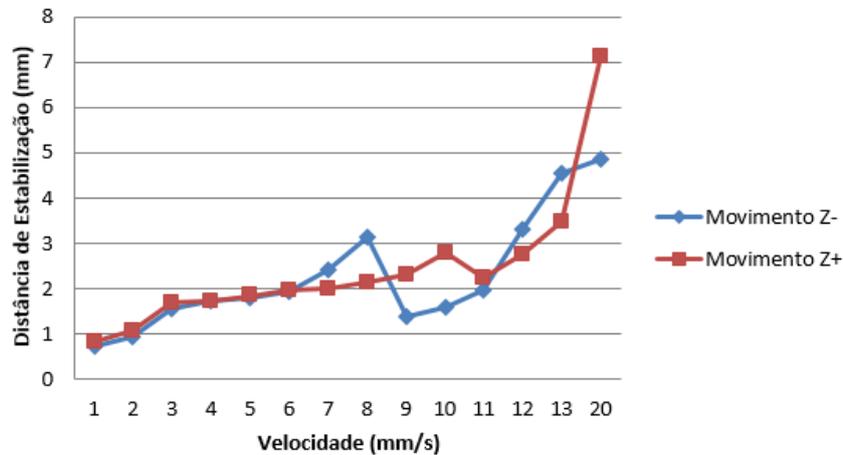


Figura 5.13: Representação gráfica da variação da distância de estabilização no eixo Z com o aumento da velocidade do movimento.

por uma válvula de escape que aproveita o peso da coluna para realizar o movimento.

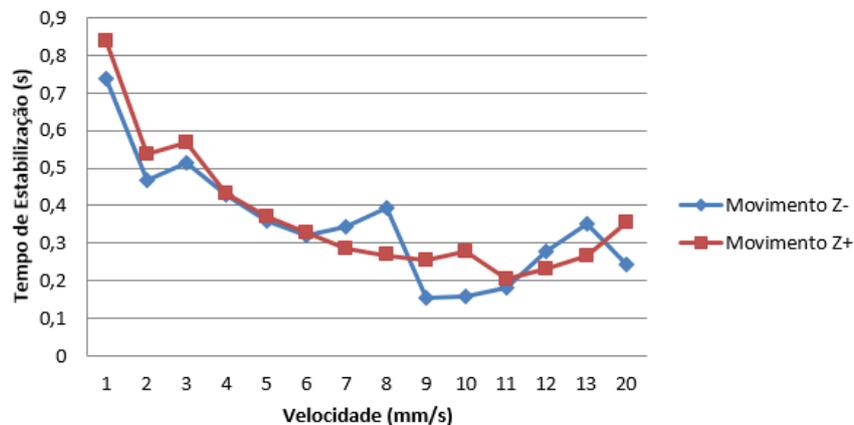


Figura 5.14: Representação gráfica da variação do tempo de estabilização no eixo Z com o aumento da velocidade do movimento.

A Figura 5.14 contém a variação do tempo de estabilização da velocidade do movimento. Pode-se observar um decréscimo no valor nominal do tempo de estabilização com o aumento da velocidade do movimento. Este decréscimo deve-se ao fato de se tratar do eixo com a menor inércia, visto só ter acoplada a coluna que contém o sistema de prova.

Depois de avaliado o movimento nos três eixos, foi possível a construção da tabela 5.1 com os valores de *pre-travel* onde a velocidade do movimento da ponteira é constante.

Estes valores obtiveram-se através da multiplicação da distância de estabilização por três. Os valores obtidos foram arredondados para cima para que seja garantida a estabilidade do sinal.

Tabela 5.1: Valores mínimos obtidos na avaliação dos resultados dos ensaios da verificação da influência do *pre-travel*.

Velocidade (mm/s)	Pre-travel X (mm)	Pre-travel Y (mm)	Pre-travel Z (mm)
1	2	2	2
2	3	4	3
3	6	4	4
4	7	4	4
5	7	5	4
6	8	5	4
7	10	6	5
8	8	6	7
9	12	9	5
10	14	10	6
11	15	11	5
12	16	15	7
13	18	20	10
20	32	28	14

Como existe alguma variação nos valores obtidos em sentidos diferentes, para garantir que os valores de *pre-travel* são suficientes para que o movimento estabilize, utilizou-se o valor maior obtido para cada velocidade.

Alguns dos valores apresentados nessa mesma tabela flutuam, devido algum erro que pode ser associado ao fato do ambiente não ser controlado e a máquina estar sujeita a vibrações, ou mesmo à interpretação dos valores obtidos a partir dos gráficos.

5.5 Verificação da Influência do Ângulo de Ataque na Medição

5.5.1 Metodologia

Neste ensaio verificou-se a influência da variação do ângulo de toque da ponteira no objeto, para tal utilizou-se a mesma ponteira de 20mm de comprimento e 3mm de diâmetro. O objeto medido foi uma esfera com o diâmetro de 19,05mm.

Neste ensaio apenas se variou o ângulo de ataque segundo os três eixos, fixando a velocidade de toque a 3mm/s e mantendo todos os outros restantes parâmetros.

Para verificar a variação no plano OXY mediram-se quatro pontos na linha do equador da esfera e construiu-se uma circunferência, para depois se verificar se o diâmetro se aproximava do valor real.

De seguida variou-se o ângulo de ataque no plano OYZ, para tal apenas se mediram três pontos, por não se conseguir aceder à zona inferior da esfera. Como feito anteriormente, foi construída uma circunferência definida pelos pontos e, mais uma vez, verificou-se o diâmetro medido.

Por último variou-se o ângulo de ataque no plano OXZ, mediram-se 3 pontos novamente e construiu-se uma circunferência. O esquema do ensaio encontra-se representado na Figura 5.15.

Para ângulos de ataque escolheram-se valores entre os 10 graus e os 170 graus, em relação à superfície tangente da esfera, com intervalos de 10 em 10 graus. Adicionalmente, fez-se uma avaliação com o ângulo de 45 graus.

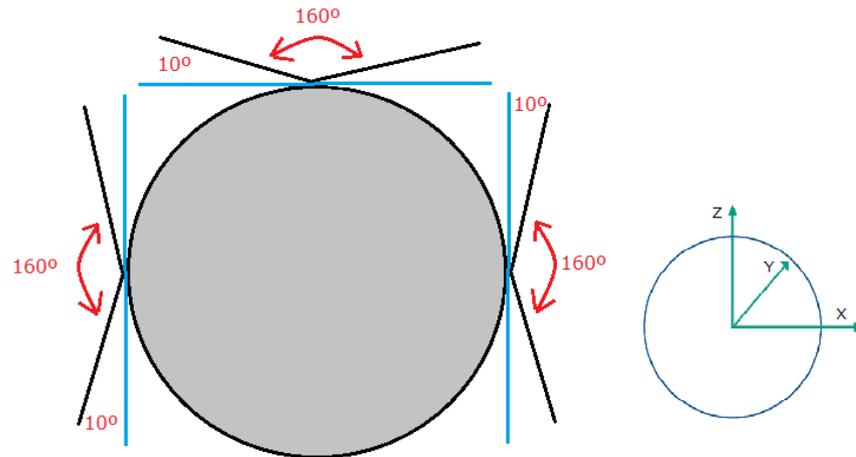


Figura 5.15: Exemplo do variação do ângulo do aproximação no plano OXZ.

5.5.2 Resultados Obtidos

Os resultados numéricos obtidos no ensaio com o objetivo a determinação da influência do ângulo de ataque na medição encontram-se nas tabelas do anexo D.

Nesta secção apresenta-se a tabela 5.2 com valores de desvio entre os diâmetros medidos e o diâmetro nominal. Como referido no capítulo anterior, foram construídos três círculos que intercetam a esfera em planos paralelos a OXY, OXZ e OYZ, respetivamente. Todos estes planos passavam pelo centro teórico da esfera.

O objeto medido foi uma esfera com um diâmetro de 19,05mm, daí se estudar a diferença entre o valor medido e o valor nominal. Assume-se que o valor de diâmetro da esfera é o acima referido mas existe a possibilidade deste valor não ser o verdadeiro por se tratar de uma peça não rastreada.

Tabela 5.2: Desvio entre o valor medido e a cota nominal.

Ângulo de Ataque	Desvio em OXY (mm)	Desvio em OXZ (mm)	Desvio em OYZ (mm)
10°	0,2367	0,4919	0,2344
20°	0,1559	0,1228	0,1192
30°	0,0719	0,0666	0,0621
40°	0,0393	0,0296	0,0301
45°	0,0292	0,0205	0,0210
50°	0,0224	0,0138	0,0118
60°	0,0119	0,0023	0,0021
70°	0,0045	-0,0040	-0,0035
80°	0,0006	-0,0073	-0,0071
90°	-0,0006	-0,0095	-0,0067
100°	0,0008	-0,0085	-0,0040
110°	0,0048	-0,0050	-0,0012
120°	0,0106	0,0009	0,0036
130°	0,0202	0,0088	0,0131
140°	0,0378	0,0264	0,0218
150°	0,0725	0,0584	0,0626
160°	0,1265	0,1166	0,1248
170°	0,2277	0,2237	0,5116

Tendo em conta que o objetivo do ensaio foi a verificação da influência do ângulo de ataque na medição, os resultados obtidos foram de encontro ao esperado, pois existe uma variação significativa de resultados, na casa das décimas de milímetro, para os ângulos extremos da medição.

Tendo em conta que a incerteza da medição da máquina ronda os dez *micron*, de referir que todos os valores inferiores a $\pm 0.01\text{mm}$ estão dentro desta mesma incerteza (representados a azul).

5.6 Verificação da Influência do Ângulo da Cabeça Motorizada na Medição

5.6.1 Metodologia

Para a realização deste ensaio utilizou-se a ponteira de 20mm de comprimento e 3mm de diâmetro e a peça utilizada no tutorial da Aberlink©. Para se verificar a influência do ângulo da cabeça motorizada com a ponteira, retiraram-se elementos geométricos da peça padrão mantendo o ataque normal à superfície da peça e a velocidade de toque a 3mm/s e o pre-travel de 4mm. Os elementos obtidos foram o paralelismo e a perpendicularidade.

Para a obtenção do paralelismo utilizaram-se duas faces laterais da peça, com orientações opostas. Retirou-se o valor de referência com 3 pontos na face com a referência **A** (ver Figura 5.16), estando a ponteira a uma orientação de $A=0$ e $B=0$, enquanto que na face oposta, com a referência **B** (ver Figura 5.16), retirou-se outro plano com 3 pontos. Os ângulos utilizados para obter o segundo plano foram de 0, 45, 90 e 105 graus, no eixo A (ver Figura 3.5), enquanto o ângulo do eixo B (ver Figura 3.5) se manteve constante.

Para a obtenção da perpendicularidade utilizou-se, mais uma vez, a face de referência **A** (ver Figura 5.16), mas agora a face alvo do ensaio foi a de topo, com a referência **C** (ver Figura 5.16). Para a obtenção dos 3 pontos na face de topo, o ângulo A (ver Figura 3.5) teve os valores de 0, 45 e 90 graus, enquanto o ângulo B (ver Figura 3.5) se manteve constante.

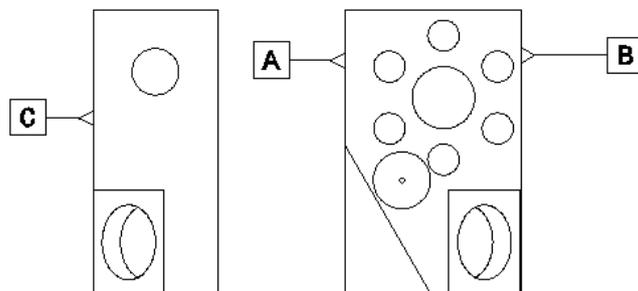


Figura 5.16: Vista de topo e vista lateral direita da peça.

5.6.2 Resultados Obtidos

Os resultados numéricos obtidos no ensaio com o objetivo a determinação da influência do ângulo do cabeçote na medição encontram-se no anexo E.

Nas figuras 5.17 e 5.18 encontram-se as representações gráficas dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

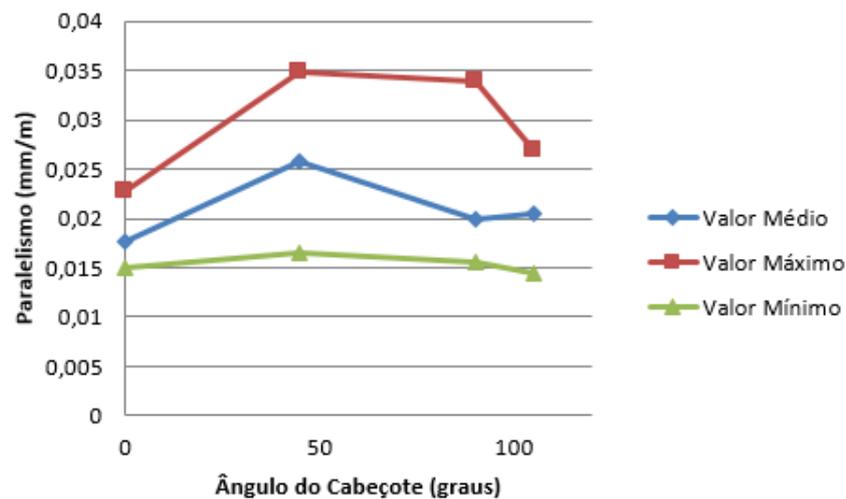


Figura 5.17: Representação gráfica da variação do valor medido do paralelismo com a variação do ângulo (A) do cabeçote.

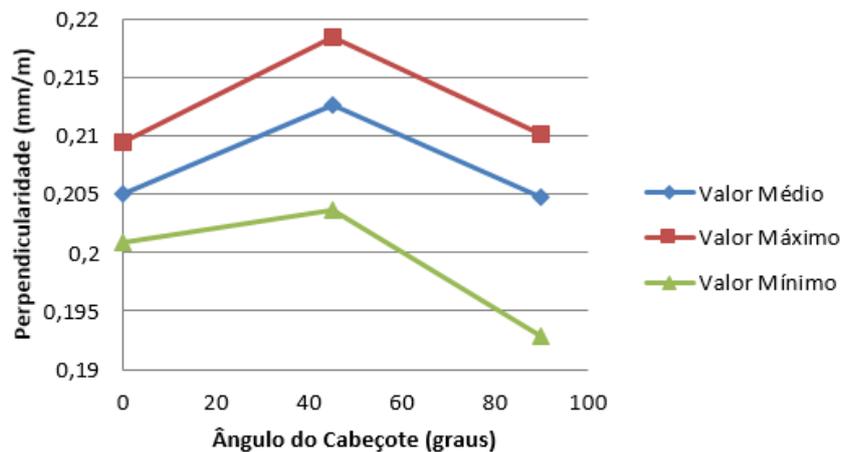


Figura 5.18: Representação gráfica da variação do valor medido da perpendicularidade com a variação do ângulo (A) do cabeçote.

Ao observar as figuras 5.17 e 5.18, pode-se verificar que o ângulo do cabeçote não tem impacto na medição. Embora os gráficos possam indicar o contrário, é necessário ter em conta o tamanho da peça e as unidades utilizadas para caracterizar o paralelismo e a perpendicularidade. Como a peça medida foi obtida por maquinação, esta tem desvios

de forma baixos, como se pode avaliar ao observar ambos os gráficos. Tem-se o exemplo do paralelismo em que os valores médios da medição foram 0.02 mm de desvio em cada metro de plano.

5.7 Verificação do Número Mínimo de Pontos Necessários Para Definir uma Entidade Corretamente

5.7.1 Metodologia

Para este ensaio utilizou-se a ponteira de 20mm de comprimento e 3mm de diâmetro e os objetos medidos foram a esfera de calibração com 15,875mm de diâmetro e a peça do tutorial da Aberlink[©](as entidades medidas foram a circunferência e o cilindro existentes no furo central com 12mm de diâmetro). A velocidade do toque foi de 3mm/s, o *pre-travel* foi de 4mm, o ataque foi feito perpendicularmente à superfície da peça e os ângulos do cabeçote foram A=0 e B=0 (ver Figura 3.5).

Para o estudo de sensibilidade da variação do número de pontos medidos para a construção do cilindro presente no furo de 12mm foram feitas leituras com um número variável de pontos entre cinco e catorze.

Para o estudo da circunferência e da esfera, as leituras variaram entre três e doze pontos e entre cinco e trinta e três pontos(5, 9, 13, 17, 25 e 33), respetivamente.

5.7.2 Resultados Obtidos

Os resultados numéricos obtidos no ensaio com o objetivo da verificação do número de pontos para definir uma entidade corretamente encontram-se no anexo F.

Como neste ensaio se fizeram medições para a construção de três entidades, o círculo, a esfera e o cilindro, os resultados obtidos encontram-se divididos em três partes.

Na primeira parte encontram-se representados os resultados sob forma de gráfico para o círculo. Os valores relativos aos diâmetros médios da amostra e à tolerância média encontram-se apresentados nas Figuras 5.19 e 5.20.

Ao observar a Figura 5.19 pode-se concluir que o valor do diâmetro medido estabiliza a partir dos sete pontos. Apesar de existir um desvio maior dos valores obtidos relativamente à média para os ensaios em que se utilizaram seis, dez e onze pontos, através da análise das curvas de valores máximos e mínimos, na generalidade pode-se verificar que as variações dos valores obtidos nas cinquenta repetições são muito pequenas, inferiores a dez *microns*.

Através da interpretação da Figura 5.20 pode-se concluir que o valor obtido vai convergindo para um valor que se pode afirmar como sendo o real. Esta afirmação baseia-se no fato de que com o aumento do número de pontos utilizados existe um aumento de informação que descreve a geometria.

Ambos os gráficos começam com valores de zero por se ter utilizado o valor mínimo de pontos para a identificação da geometria, não se podendo assim obter conclusões acerca do seu erro de forma.

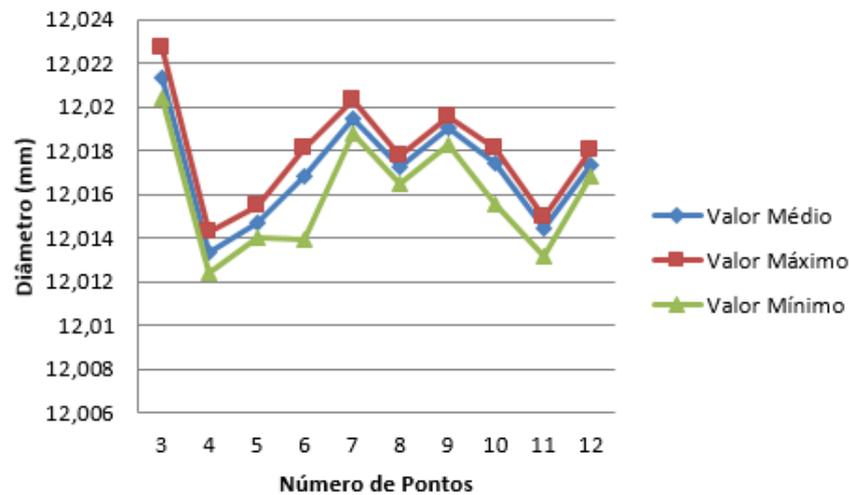


Figura 5.19: Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido do círculo com a variação do número de pontos obtidos.

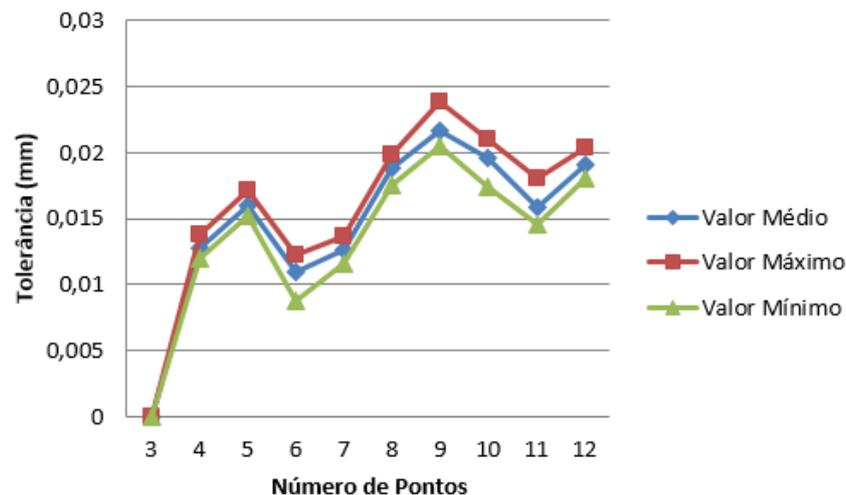


Figura 5.20: Representação gráfica da variação do valor da tolerância medida do círculo com a variação do número de pontos obtidos.

Na segunda parte do ensaio obtiveram-se o diâmetro e a tolerância, mas desta vez a entidade medida foi a esfera. Os valores relativos aos diâmetros e tolerância média encontram-se representados nas Figuras 5.21 e 5.22.

Ao observar a Figura 5.21 pode-se concluir que, com o aumento de pontos medidos, existe um aumento de precisão, que se pode verificar com a aproximação das curvas dos valores máximo e mínimo. A curva que representa a evolução do diâmetro medido demonstra que ainda não existe convergência para o valor ideal. Talvez por ser necessário um maior número de pontos para o valor medido estabilizar, mas mesmo assim todos os valores médios apresentam um erro muito baixo em relação ao valor nominal da esfera,

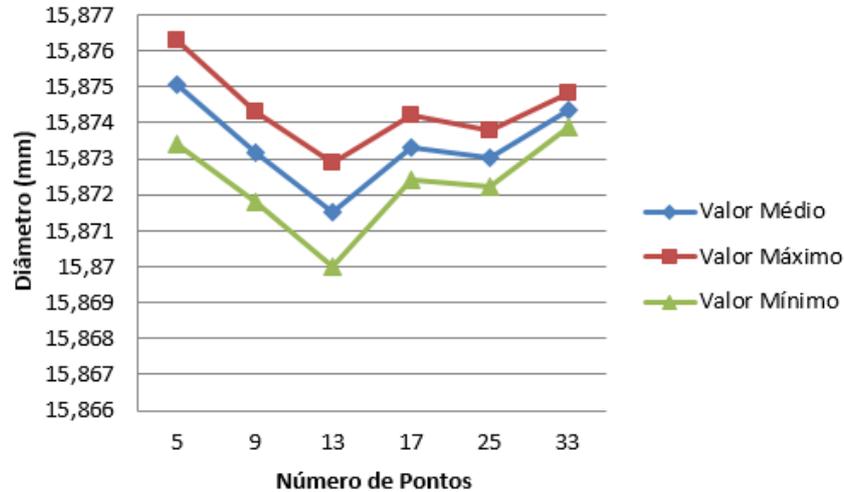


Figura 5.21: Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido da esfera com a variação do número de pontos obtidos.

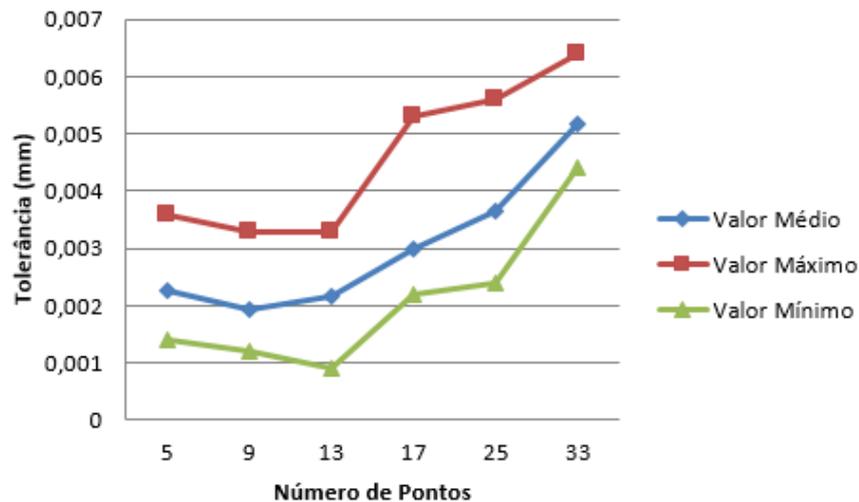


Figura 5.22: Representação gráfica da variação do valor da tolerância medida da esfera com a variação do número de pontos obtidos.

o que leva a crer que o número de pontos necessário para representar uma esfera é cinco.

Não se realizaram mais estudos porque não é razoável medir uma entidade geométrica com mais de trinta e três pontos.

Com a Figura 5.22 é possível reforçar o que foi dito anteriormente porque não existe qualquer sinal de estabilização dos valores de tolerância medidos.

A última parte do ensaio consiste na medição dos diâmetros e tolerâncias das amostras para a geometria cilíndrica.

Os gráficos com os resultados obtidos encontram-se representados nas Figuras 5.23 e 5.24.

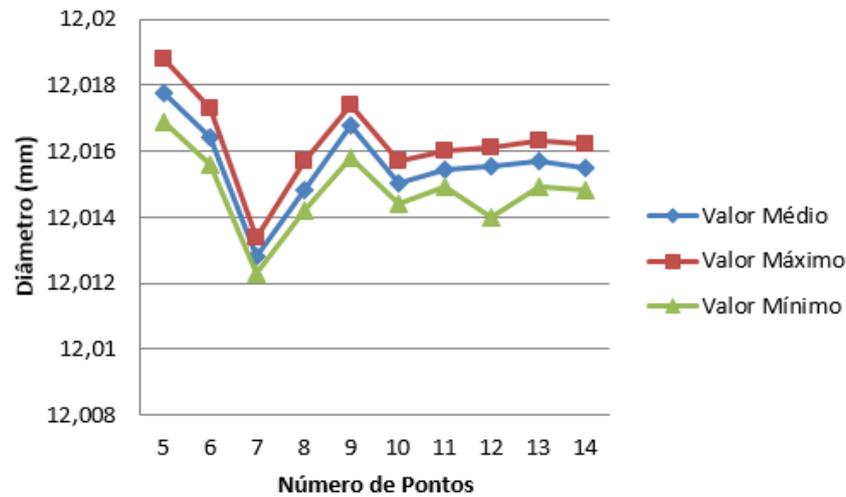


Figura 5.23: Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido do cilindro com a variação do número de pontos obtidos.

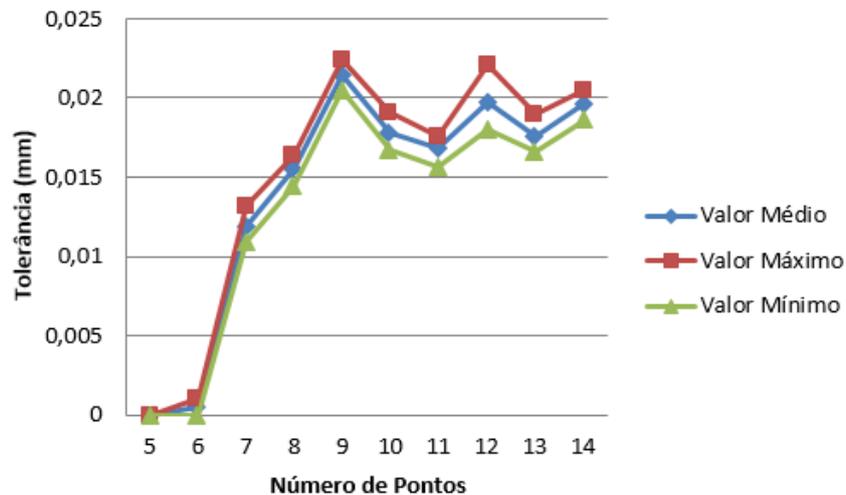


Figura 5.24: Representação gráfica da variação do valor da tolerância medida do cilindro com a variação do número de pontos obtidos.

Nessas mesmas figuras, onde se encontra representado o gráfico que retrata a evolução do valor do diâmetro medido e a sua tolerância com o aumento do número de pontos utilizados para a medição, pode-se observar que o valor de diâmetro medido se torna constante a partir do momento em que se utiliza um número de pontos superior a nove.

5.8 Verificação da Influência do Comprimento da Ponteira na Medição

5.8.1 Metodologia

Para o ensaio relativo à verificação da influência do comprimento da ponteira na medição (ponteira + extensão), utilizou-se a ponteira com 10mm de comprimento e 4mm de diâmetro e as extensões de 10mm, 20mm e 40mm. O objeto medido foi a esfera de calibração com um diâmetro de 19,05mm.

Fizeram-se várias medições ao diâmetro da esfera, mantendo todas as características do ensaio constantes, com a exceção do comprimento da ponteira, que variou de 10mm até 80mm (de 10mm em 10mm). A velocidade de toque foi de 3mm/s, o *pre-travel* foi 4mm, o contato da ponteira com a peça foi perpendicular à sua superfície e o ângulo do cabeçote foi $A=0$ e $B=0$ (ver Figura 3.5).

5.8.2 Resultados Obtidos

Os resultados numéricos obtidos no ensaio com o objetivo a determinação da influência do comprimento da ponteira na medição encontram-se no anexo G.

Nas Figuras 5.25 e 5.26 encontra-se uma representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio.

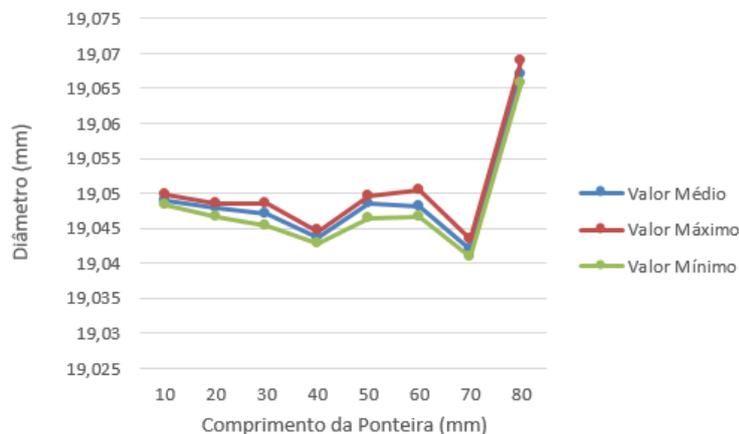


Figura 5.25: Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido com o aumento do comprimento da ponteira.

Na Figura 5.25 pode-se observar uma maior variação do diâmetro medido a partir de valores de comprimento de ponteira superiores a 60mm.

Na Figura 5.26, embora se tratem de valores muito inferiores ao limiar da incerteza da medição, pode-se verificar um aumento no desvio padrão da amostra, o que leva a crer que com o aumento do comprimento da ponteira os resultados obtidos encontrar-se-ão mais espaçados. Daqui se pode concluir que, a ponteira deve ser o mais curta possível.

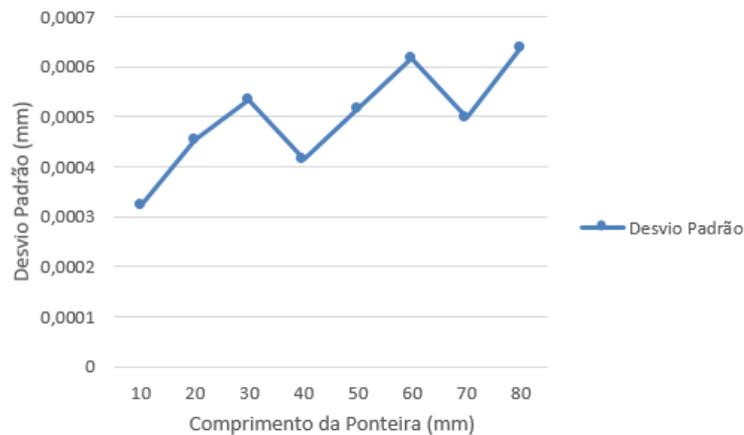


Figura 5.26: Representação gráfica do desvio padrão da amostra utilizada na Figura 5.25.

5.9 Ensaio para a verificação da influência do diâmetro da ponteira na medição

5.9.1 Metodologia

Para a realização do ensaio como objetivo a verificação da influência do diâmetro da ponteira na medição utilizaram-se as ponteiras com os diâmetros de 1mm, 2mm, 3mm, 4mm e 6mm, todas com 10mm de comprimento. Não se utilizou a ponteira com 5mm de diâmetro por não estar disponível. O objeto medido foi a esfera de calibração com um diâmetro de 19,05mm.

Fizeram-se várias medições ao diâmetro da esfera, mantendo todas as características do ensaio constantes, com a exceção do diâmetro da ponteira, que variou de 1mm até 6mm. A velocidade de toque foi de 3mm/s, o *pre-travel* foi 4mm e o contato com a peça foi perpendicular à sua superfície.

5.9.2 Resultados Obtidos

Os resultados numéricos obtidos no ensaio com o objetivo a determinação da influência do diâmetro da ponteira na medição encontram-se no anexo H.

Nas figuras 5.27 e 5.28 encontra-se a representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio.

Ao observar as Figuras 5.27 e 5.28 pode-se concluir que não existem variações com o aumento do diâmetro da ponteira, por existir uma variação na ordem dos *microns* que se pode facilmente atribuir a um gradiente de temperatura na altura do ensaio.

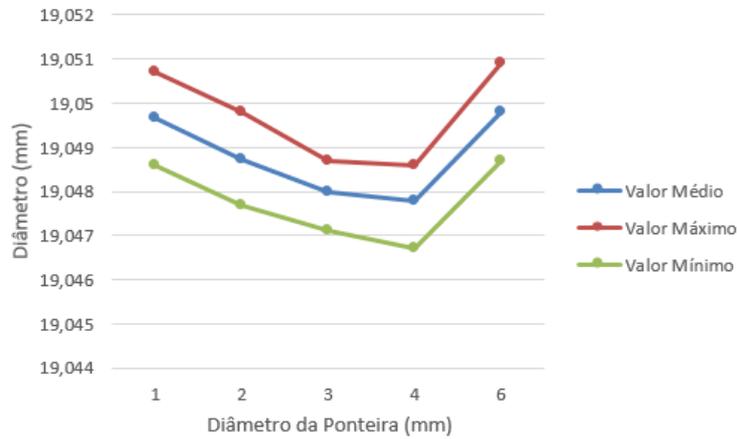


Figura 5.27: Representação gráfica da variação do valor do diâmetro medido com o aumento do diâmetro da ponteira.

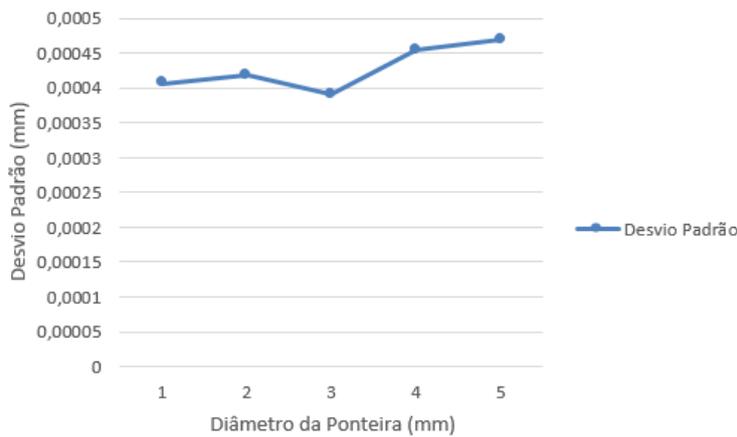


Figura 5.28: Representação gráfica do desvio padrão da amostra utilizada na Figura 5.27.

Parte III
Conclusões

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta dissertação teve como objetivo a verificação da influência dos diversos fatores presentes na medição de peças com a tecnologia CMM e a formulação de procedimentos de modo a minimizar os erros associados a todo o processo metrológico.

Apesar da pesquisa feita através de todos os meios disponíveis, a bibliografia especializada não se encontra suficientemente divulgada, pelo que o trabalho desenvolvido está limitado ao apoio dado pelo orientador e pelos técnicos da empresa Micronsense que acompanharam os trabalhos práticos da dissertação.

Uma das primeiras etapas do trabalho foi a aquisição de conhecimentos sobre a operação e manutenção do equipamento, que culminou com elaboração de um manual de utilização do equipamento existente na Universidade de Aveiro.

Posteriormente foram definidos os parâmetros de operação para os estudos de sensibilidade com o objetivo de avaliar a sua influência nos resultados das leituras, nomeadamente a velocidade de toque, o *pre-travel*, o ângulo de ataque, o ângulo da cabeça motorizada, o número mínimo de pontos a utilizar, o comprimento e o diâmetro da ponteira.

Para cada parâmetro foram definidos e executados um ou mais ensaios e para cada ensaio foram feitas cinquenta repetições. Os ensaios visam englobar todo o espetro da medição e o elevado número de repetições destina-se a desenvolver um estudo estatístico para que todo o processo seja o mais exato possível e deste modo estabelecer um conjunto de critérios de operação e programação que o operador deve respeitar ou considerar.

Para o parâmetro da velocidade de toque pode-se concluir que o operador deve escolher valores abaixo dos 7mm/s, dado que acima desse valor a inclinação do gráfico de comportamento leitura/velocidade começa a desviar do patamar de estabilização aumentando significativamente o seu valor.

Também se pode verificar uma disparidade maior entre os valores máximos e mínimos em relação à média a partir da velocidade de toque de 5mm/s. No entanto estes desvios estão dentro do intervalo da incerteza do equipamento.

Os resultados dos ensaios permitiram concluir que o valor de *pre-travel* varia com a velocidade do movimento da ponteira e com a direção do movimento. Os valores mínimos definidos na tabela 5.1 para as três direções e para velocidades até 7mm/s variam entre 2 e 10mm/s, 6mm/s e 5mm/s respetivamente para as direções X,Y e Z.

Relativamente ao ângulo de ataque pode-se concluir que não existem desvios significativos para ângulos entre os 70° e os 120° . Sempre que possível as medições devem ser realizadas com o contato normal (90°) à superfície. Nas situações em que tal não é possível os ângulos de ataque não devem sair fora do intervalo indicado anteriormente.

Os resultados obtidos no ensaio com o objetivo da verificação da influência do ângulo da cabeça motorizada na medição indicam que não existem variações significativas no valor medido. Esta constatação vai no sentido do elevado critério de aceitação a que a cabeça motorizada está sujeita por parte do fabricante.

O número de pontos de leitura é um dos fatores que mais condiciona o tempo total da medição. Para cada uma das entidades a medir (círculo, cilindro e esfera) é possível identificar um número de pontos de medição a partir do qual se verifica uma estabilização dos resultados, ou seja, um maior número de pontos de leitura, e conseqüentemente uma maior duração de todo o processo metrológico, não irá aumentar a eficiência do mesmo.

Finalmente os resultados referentes ao comprimento e ao diâmetro da ponteira permitem concluir que a partir de comprimentos de ponteira superiores a 60mm os resultados começam a divergir enquanto que o diâmetro da ponteira não tem qualquer influência nos resultados obtidos. Contudo importa referir que o diâmetro da ponteira pode ter influência significativa em medições em que a peça apresenta um acabamento superficial de qualidade grosseira, como por exemplo a penetração de ponteiras com diâmetros inferior nas irregularidades da superfície medida.

Em género de conclusão global, todas as metas propostas no plano de trabalhos foram atingidas e os resultados obtidos estavam dentro do esperado, com a exceção dos ensaios relativos à velocidade de toque, em que se esperava uma diminuição de precisão para velocidades baixas (1mm/s). Também não era esperada uma flutuação tão grande no ensaio do *pre-travel* e da variação do ângulo de ataque.

6.2 Trabalhos Futuros

Os trabalhos desenvolvidos incidiram sobre peças metálicas obtidas por maquinaria cujas características mecânicas são favoráveis ao processo de medição por contato, por se tratarem de peças rígidas e com um acabamento superficial fino. Seria do interesse geral verificar a influência da variação dos parâmetros utilizados nesta dissertação em peças de outros materiais, como por exemplo plástico e/ou obtidas por processos de fabrico diferentes, como por exemplo fundição ou injeção.

Todos os estudos realizados nesta dissertação foram realizados com peças não rastreadas. Seria do interesse geral o rastreamento das peças medidas para que seja possível uma melhor determinação no tipo de influência que cada parâmetro tem no processo metrológico.

Devido à impossibilidade financeira, não foi possível a utilização de espaços climatizados na realização dos ensaios. Embora as máquinas tenham compensação térmica, as peças sofrem alterações tendo em conta o ambiente em que se encontram e, ao controlar a temperatura e a humidade, seria possível obter resultados mais fiáveis.

Por último, o estudo da escala também seria interessante, ou seja, verificar se a influência de cada parâmetro afeta a entidade geométrica da mesma maneira tendo em conta a sua dimensão.

Referências Bibliográficas

- [1] Carlos Relvas, 2014, "Slides das aulas teóricas de Engenharia e Desenvolvimento do Produto".
- [2] Joint Committee for Guides in Metrology, 2012, "*International Vocabulary of Metrology*".
- [3] G. K. Vijayaraghavan, R. Rajappan, 2009, "*Engineering Metrology and Measurements*".
- [4] PUC-Rio, 2015, "Fundamentos da Medição por Coordenadas".
- [5] Wenzel UK, 2015, "*History of CMM machines*",
URL: <http://www.wenzel-cmm.co.uk/history-of-cmm/118>, acessido a 15 de Setembro de 2015.
- [6] Carlos Sousa, 2010, "Metrologia Notas Históricas", Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica.
- [7] Robert J. Hocken, Paulo H. Pereira, 2011, "*Coordinate Measuring Machines and Systems, Second Edition*".
- [8] Laboratório Nacional De Metrologia, 2015,
URL: <http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Pages/Entrada0.aspx>, acessido a 24 de Março de 2015.
- [9] *Advanced Dimensional Management LLCJ*, 2015, "*Justification for GD&T*",
URL: <http://www.advanceddimensionalmanagement.com/justification-for-gdt/>, acessido a 24 de Março de 2015.
- [10] Simões Morais, 2006, "Desenho Técnico Básico", Porto Editora.
- [11] Anónimo, "*Coordinate Measuring Machines*",
URL: <http://www.ignou.ac.in/upload/Unit-8-62.pdf>, acessido a 30 de Março de 2015.
- [12] © *Renishaw plc*, 2015,
URL: <http://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/ph10t-17184>, acessido a 30 de Março de 2015.
- [13] © *Renishaw plc*, 2014, "*Renishaw - TP200 User's Guide*".

- [14] ©Renishaw plc, 2015, "*Renishaw 5 Axis Systems*",
URL: <http://www.renishaw.com/en/5-axis-systems-13413>, acessado a 30 de Março de 2015.
- [15] ©Renishaw plc, 2008, "*Renishaw - Precision Styli*".
- [16] ©Renishaw plc, 2015, "*Renishaw: At the sharp end - a guide to CMM stylus selection*",
URL: <http://www.renishaw.com/en/at-the-sharp-end-a-guide-to-cmm-stylus-selection-10927>, acessado a 2 de Abril de 2015.
- [17] Salah H. R. Ali, 2010, "*Probing System Characteristics in Coordinate Metrology*", *Engineering and Surface Metrology Lab, Egypt*.
- [18] W. Tyler Estler, S. D. Phillips, B. Borchardt, T. Hopp, C. Witzgall, M. Levenson, K. Eberhardt, M. McClain, Y. Shen, X. Zhangl, 1996, "*Error Compensation for CMM Touch Trigger Probes*", *National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA*
- [19] ©Hexagon Metrology, 2015, "*Vision Sensor*",
URL: <http://hexagonmetrology.us/products/multisensor-optical-systems/sensors-for-optim/vision-sensor>, acessado a 15 de Setembro de 2015.
- [20] ©Laser Design, 2015, "*SLP Scanning Probe*",
URL: <http://www.laserdesign.com/products/slp-scanning-probe/>, acessado a 3 de Abril de 2015
- [21] ©Carlson Manufacturing Inc., 2014,
URL: <http://carlsonmfg.com/industrial-resources-articles/18-cnc-code-programming>, acessado a 3 de Abril de 2015.
- [22] J. V. Valentino, J. Goldenberg, 2008, "*Introduction to Computer Numerical Control(CNC)*", *Fourth Edition*.
- [23] Iwan Zein, Dietmar W. Huttmacher, Kim Cheng Tan, Swee Hin Teoh, 2002, "*Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications*".
- [24] ©Hexagon Metrology, 2015, "*Intro to coordinate metrology*",
URL: <http://www.hexagonmetrology.us/applications/technical-resources/metrology-101/727-intro-to-coordinate-metrology?start=8>, acessado a 6 de Abril de 2015.
- [25] ©Renishaw plc, 2015, "help files - UCC assist MK2".
- [26] ©Renishaw plc, 2015, "XL-80 Laser Measurement System".
- [27] ©Renishaw plc, 2002-2007, "*Machine Checking Gauge(MCG), User Guide*".
- [28] ©Coord3, 2015, "*Benefits of CMM laser scanning*",
URL: <http://www.coord3-cmm.com/benefits-of-cmm-laser-scanning/>, acessado a 10 de Abril de 2015.

- [29] G. Turley, E. Kiraci, A. Attridge, M. A. Williams, 2014, "*Optimising and Validating on - CMM laser scanning technologies for automotive applications*", *University of Warwick*.
- [30] Hexagon Metrology, *Intro to Coordinate Metrology*, ©Hexagon Metrology, 2015,
URL: <http://www.hexagonmetrology.us/applications/technical-resources/metrology-101/727-intro-to-coordinate-metrology?showall=1&limitstart=>,
acedido a 21 de Abril de 2015.
- [31] S. Pretorius, K. H. du Preez, T. van Niekerk, 2013, *Flexible Measurement System dor Modern Automobile Production*, *Nelson Mandela Metropolitan University*.
- [32] Patrick C. Hammett, Luis M. Garcia-Guzman, Steven W. Geddes, Patrick T. Walsh, 2009, *Quantifying Alignment Effects In 3D Coordinate Measurement*, *University of Michigan*.
- [33] ©Renishaw plc, 2014,
URL: [http://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=gen & data=8938&btn=1](http://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=gen&data=8938&btn=1),
acedido a 17 de Agosto de 2015.
- [34] ©Renishaw plc, 2015,
URL: <http://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/probe-operation-15811>,
acedido a 19 de Agosto de 2015.
- [35] ©Aberlink, 2015,
URL: <https://www.aberlink.com/products/cmm/azimuth/>,
acedido a 15 de Setembro de 2015.
- [36] Quality Magazine, 2015,
URL: <http://www.qualitymag.com/articles/83928-quality-measurement-cmms-create-flexible-feedback>,
acedido a 17 de Setembro de 2015.
- [37] hellopro uk ©, 2015,
URL: <http://www.hellopro.co.uk/images/produit-2/7/4/3/maxim-revolution-in-3d-inspection-47347.jpg>,
acedido a 17 de Novembro de 2015.
- [38] CMM Technology Inc., 2015,
URL: http://www.cmmtechnology.com/cmmweb/images/ph10_pic_165x360.jpg,
acedido a 17 de Novembro de 2015.
- [39] ©Aberlink, "*Aberlink 3D Mk3 Measurement Software Manual*".

Anexo A

Guia de Utilização da Máquina de Medição por Coordenadas

Guia de Utilização da Máquina de Medição por Coordenadas

Daniel Quartau

29/04/2015

Conteúdo

1	Modo de Funcionamento do Controlador	2
2	Hotkeys do Rato e Teclado	4
3	Ligar a Máquina	5
4	Verificar a Calibração da Máquina	7
5	Alterar a Orientação do Apalpador	11
6	Comparação com o Modelo CAD	13
7	Efetuar Medições	18

Capítulo 1

Modo de Funcionamento do Controlador

Para controlar manualmente o conjunto cabeçote/apalpador existe um "*Joystick*" que se encontra à direita da máquina. Na figura 1.1 encontra-se uma imagem do mesmo para que se possa explicar o seu funcionamento.

- Para movimentar o cabeçote na direção X ou Y basta empurrar ou puxar a manche na direção desejada.
- Para controlar o cabeçote na direção do eixo Z basta rodar a manche de acordo com a regra da mão esquerda.
No sentido contra-horário o cabeçote irá descer.
No sentido horário o cabeçote irá subir.
- Para realizar uma medição em que o apalpador faz um movimento descendente (eixo Z), o utilizador terá que premir a tecla com a identificação **1**.
- Para realizar uma medição em que o apalpador faz um movimento ascendente (eixo Z), o utilizador terá que premir a tecla com a identificação **4**.
- Para realizar uma medição em que o apalpador faz um movimento lateral (eixo X ou eixo y), o utilizador terá que movimentar o cursor com a identificação **2** no sentido desejado.
- Para mudar a velocidade de movimento do cabeçote, o utilizador terá que rodar o seletor com a identificação **3**.
- Para bloquear o movimento nos eixos X, Y ou Z, o utilizador deverá premir as teclas com a identificação 5, 6 ou 7, respetivamente.



Figura 1.1: *Joystick* utilizado no controlo manual da CMM.

Capítulo 2

Hotkeys do Rato e Teclado

Várias Hotkeys existentes no PowerInspect:

- Se o operador premir o botão esquerdo do rato e arrastar o mesmo, a imagem irá deslocar-se na direção desejada(Pan).
- Se o operador rodar a roda que se encontra no centro das teclas do rato, o software irá fazer Zoom.
- Se o operador premir a roda que se encontra no centro das teclas do rato e o arrastar de seguida, a imagem irá rodar em torno de um ponto que se encontra no centro do monitor.
- **F1** - Inicia a ajuda do Programa.
- **F2** - Coloca a peça em modelo de arames(Wireframe).
- **F3** - Coloca a peça em vista sombreada(Render).
- **F4** - Coloca a peça em Vista sem linhas sobrepostas.
- **F9** - Esconde/Mostra a estrutura da máquina.
- **F10** - Esconde/mostra o cabeçote.
- **F11** - Esconde/mostra o apalpador.

Capítulo 3

Ligar a Máquina

Para ligar correctamente a máquina é necessário seguir os seguintes passos:

1. Ligar o computador
2. Desactivar o botão de segurança que se encontra no topo esquerdo da máquina, rodando-o.
3. Iniciar o Software "*Aberlink 3D*"
NOTA - Aparecerá uma mensagem a indicar que a máquina se encontra fora da garantia. Dever-se-á clicar no botão "Ok" para continuar.
4. Aparecerá um mensagem a perguntar:
"*Okay to switch on the air?*" à qual se deverá responder "*Yes*".
5. Aparecerá um mensagem a perguntar:
"*Okay to close the drives?*" à qual se deverá responder "*Yes*".
NOTA - Um fluxo de ar irá começar a percorrer a máquina, o que significa que esta está operacional. Para verificar a pressão do ar existe um mostrador ao pé da torneira junto ao chão do lado direito. Este deve situar-se entre os 3.5bar e 4.0bar.
6. Ira aparecer uma interface a verde que pede para deslocar o apalpador para a origem da máquina. Carregue "Ok".
ATENÇÃO - O apalpador irá mover-se para a origem de coordenadas da máquina, que se situa no canto superior direito da parte traseira da máquina, certifique-se que o caminho não contem nenhum obstáculo.
7. Experimente o "*Joystick*" movimentado o apalpador para o centro da máquina.
8. Fechar o Software "*Aberlink 3D*"
NOTA - O caudal de ar irá parar, não tem problema pois os passos até à data serviram apenas para carregar os drivers.
9. Iniciar o Software "*PowerInspect*"
10. Irá aparecer uma mensagem a perguntar que tipo licença é que está disponível. Dever-se-á escolher a Versão completa - CNC e premir "Ok".

11. Irá aparecer a interface do programa, com uma mensagem no topo a dizer "Não Conectado" a vermelho. Para voltar a ativar a máquina dever-se-á carregar no ícone com se encontra com um círculo à volta na figura 3.1.



Figura 3.1: Não conectado.

NOTA - A máquina ficará funcional mais uma vez e será possível de controlar com o "*Joystick*".

Agora a máquina encontra-se pronta a utilizar.

Capítulo 4

Verificar a Calibração da Máquina

O seguinte passo é apenas uma verificação de que todos os elementos que se encontram na máquina estão em concordância com os elementos simulados no programa, como o cabeçote e o apalpador.

1. Iniciar um novo projeto, clicando no ícone da folha em branco, que se encontra no canto superior esquerdo da interface do programa.



Figura 4.1: Iniciar um novo Projeto.

NOTA - Depois de aberto o novo projeto o "*status*" da máquina irá passar para "Documento *offline*", como se pode ver na figura 4.2. Tal significa que o simulador está desconectado na máquina.



Figura 4.2: Documento *Offline*.

O modo "documento *Offline*" aparece sempre que se realizar uma simulação no *software*.

2. Selecionar o separador "Máquina", como se pode ver na figura 4.3, e verificar se os componentes que existem no simulador são os mesmos que estão colocados na máquina.

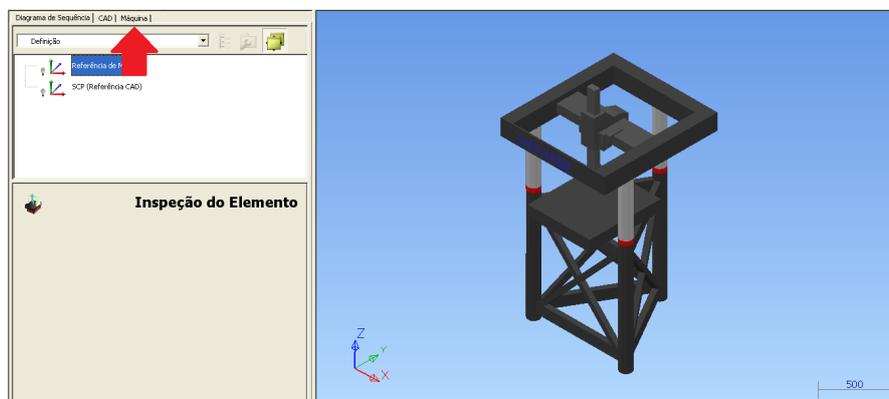


Figura 4.3: Verificação dos componentes.

3. Se a máquina tiver sido desligada desde a última calibração é necessário sempre a calibração do cabeçote e da ponteira, mesmo que estes tenham um "certo" ao pé do nome do cabeçote e orientações de ponteira, como se pode observar na figura 4.4.



Figura 4.4: Calibração.

4. Na figura 4.5 tem-se uma situação em que o cabeçote/apalpador não se encontram calibrados.

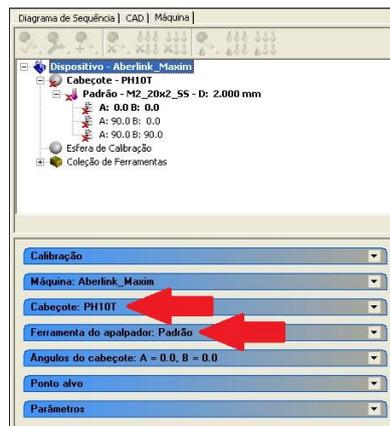


Figura 4.5: Conjunto Cabeçote/Apalpador não calibrado.

5. Antes de se proceder à calibração é necessário verificar que as ferramentas escolhidas pelo *Software* coincidem com as ferramentas que se encontram na máquina. Para tal é necessário abrir o separador com o nome "Ferramenta do Apalpador" e verificar que a ferramenta "virtual" tem as mesmas dimensões que a real. Este procedimento encontra-se representado na figura 4.6.



Figura 4.6: Escolha do apalpador.

6. Depois de se ter acedido ao menu "Editar" o operador irá verificar que todos os componentes que se encontram na lista são os mesmos que se encontram na máquina.
NOTA - Caso se deseje mudar o apalpador deverá remover o parâmetro que diz "ponta" e adicionar um que tenha as especificações desejadas, como se pode observar na figura 4.7.

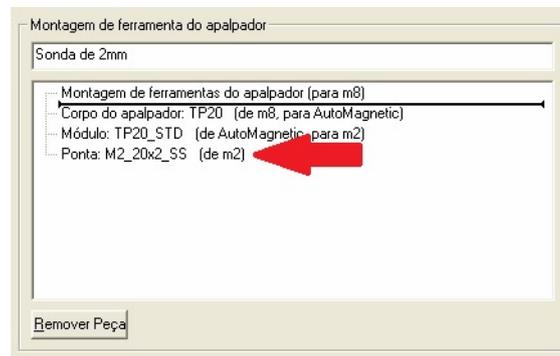


Figura 4.7: Componentes do Apalpador.

- De seguida deve-se proceder à verificação do cabeçote e sua devida calibração. Para tal o operador deve aceder ao separador "Cabeçote", como representado na figura 4.5 e verificar se o nome do cabeçote do programa coincide com o cabeçote real. Se tal não se suceder deve proceder-se à escolha do cabeçote como se pode observar na figura 4.8.



Figura 4.8: Verificação e Calibração do Cabeçote.

- Depois de realizados todos estas etapas a máquina encontra-se calibrada para operar corretamente.

Capítulo 5

Alterar a Orientação do Apalpador

Por defeito o apalpador calibra 3 orientações, as mais básicas de utilizar. O ataque segundo o eixo Z, X e Y. Para realizar medições em que seja necessário outro ataque do apalpador, é necessária a calibração do mesmo para que os valores obtidos sejam consistentes.

Para é necessário que se siga o seguinte protocolo:

1. O operador deve aceder ao separador "Máquina" e observar quais as orientações que se encontram calibradas, com se pode ver na figura 5.1.

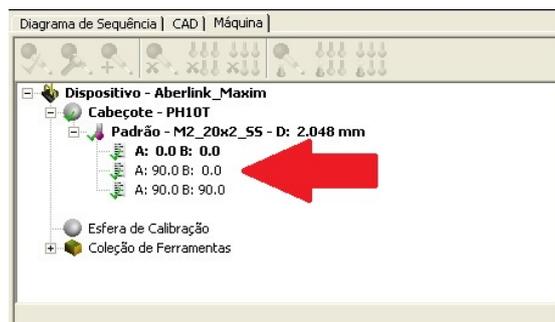


Figura 5.1: Orientações Calibradas.

2. Caso o status da máquina seja "máquina Ok", o operador terá que clicar no botão com o nome de "Conectar a máquina ao documento" para colocar a status da máquina em "Documento Offline" de modo a conseguir alterar as orientações do apalpador.
3. Para adicionar mais orientações ao conjunto que se pode visualizar na figura 5.2 o operador terá aceder ao separador "Ângulos do Cabeçote", alterar os valores de A e B e clicar no botão com o nome "Criar". O alcance da variação dos valores do cabeçote encontra-se representado no mesmo ($0 < A < 105$ e $-180 < B < 180$). Ao escolher uma nova orientação irá aparecer o "X calibrado", indicando que é necessária a calibração da nova orientação.

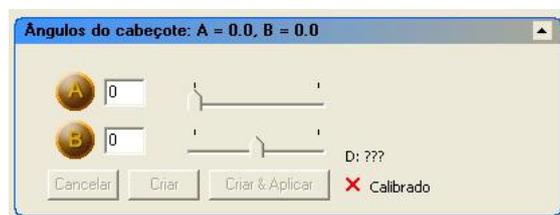


Figura 5.2: Escolha da orientação.

4. De seguida terá que clicar no botão com o nome "Ligar documento à máquina" de novo de modo a obter o status "Máquina Ok".
5. O operador terá que posicionar o apalpador sensivelmente 20cm por cima da esfera de calibração e selecionar a orientação que acabou de criou no ponto 3, para de seguida clicar no botão com o nome "Calibrar item selecionado".
6. Depois, é apenas necessário seguir os passos sugeridos pelo programa.
7. Agora a nova orientação encontra-se calibrada.

Capítulo 6

Comparação com o Modelo CAD

Existem dois tipos de medição. A medição simples que consiste apenas na medição das características da peça sem nenhum tipo de comparação, e a comparação com o modelo CAD da peça, que consiste na medição de parâmetros da peça com a ajuda do modelo CAD, que serve de comparação.

No tópico que se segue ir-se-á fazer a abordagem tendo em conta a comparação com o CAD.

1. O operador irá aceder ao separador "CAD" onde encontrará o atalho com o nome "Adicionar CAD", como se pode observar na figura 6.1. Aqui poderá procurar o ficheiro onde se encontra o modelo CAD.



Figura 6.1: Adicionar CAD.

2. Depois de escolhido o ficheiro CAD este deverá aparecer no simulador, embora se encontre no referencial da máquina (canto superior direito traseiro).
3. Para posicionar o CAD no sitio onde se encontra a peça real é necessário efetuar um alinhamento. Existem vários tipos de alinhamentos mas o que se irá abordar neste tutorial é o alinhamento Plano-Linha-Ponto geométrico. O Operador deve-se agora dirigir ao separador com o nome "Diagrama de Sequência" e abrir um grupo geométrico, como se pode observar na figura 6.2.



Figura 6.2: Abrir grupo geométrico.

- Para entrar e sair do grupo geométrico o operador deverá clicar no botão que se encontra representado na figura 6.3.



Figura 6.3: Entrar/Sair do grupo geométrico.

- De seguida segue-se a escolha do plano. Neste caso ir-se-á utilizar o topo da peça. O operador irá clicar no Separador com o nome de "Planos", como se pode observar na figura 6.4 e de seguida escolher "Plano Capturado".



Figura 6.4: Escolha do Plano.

- Depois irá aparecer uma interface como a que se pode observar na figura 6.5 e o operador deverá escolher os pontos que definem o plano, clicando duas vezes sobre eles na interface do simulador e, de seguida, dando o "OK" para completar a ação.

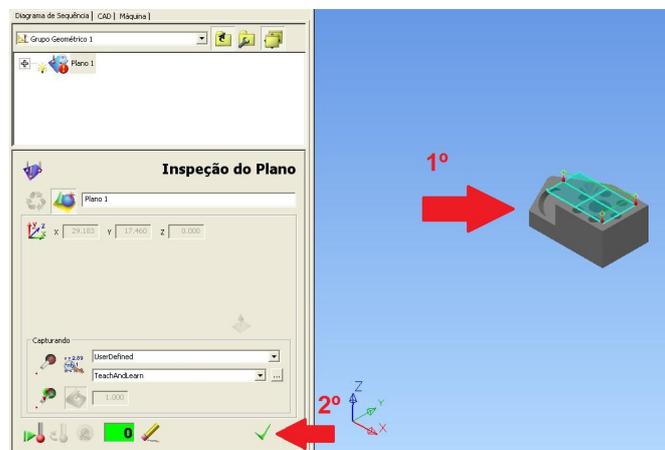


Figura 6.5: Criação do Plano.

- De seguida é necessária a criação da linha. Esta linha é composta por dois pontos que são o centro geométrico de dois furos da peça. Para definir os furos, o operador deve clicar no separador com o nome de "Elementos", que se encontra na mesma barra do separador "Planos" e escolher "Círculo Capturado". Deve-se escolher o círculo central e fazer "OK" (figura 6.7). Para ajudar a escolher o círculo deve-se mudar a aparência do modelo para "Wireframe" (F4).

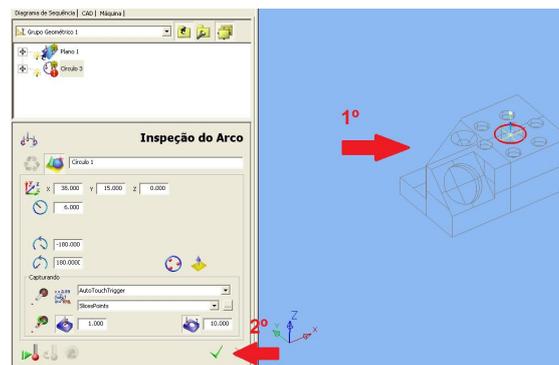


Figura 6.6: Criação do círculo 1.

- Repetir o paço anterior para o círculo que se encontra mais à direita no CAD

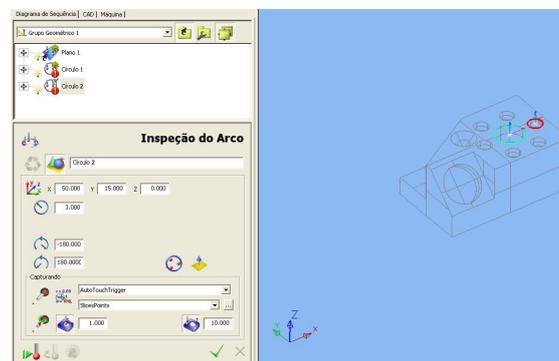


Figura 6.7: Criação do Círculo 2.

- Por ultimo o operador terá que aceder ao separador "Linhas" e escolher o botão "Linha:Dois Pontos". Irá surgir uma caixa para que possam ser indicados os dois pontos. Estes pontos são os centros geométricos dos círculos obtidos nos dois pontos anteriores.
- O operador terá agora que sair do "Grupo Geométrico" e clicar no botão com o nome de "Iniciar Tudo", como se pode observar na figura 6.8.

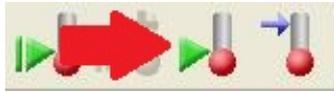


Figura 6.8: Iniciar a Verificação dos Componentes.

11. Aqui o "*Software*" irá passar ao modo de ecrã inteiro e irá ser pedido ao operador que desloque o apalpador para as posições indicadas no monitor.

NOTA - É necessário muito cuidado na manipulação do apalpador, visto tratar-se de um objeto frágil e de precisão.

1º - Será pedido que este obtenha os 3 pontos que definem o plano.

2º - Será pedido que este obtenha os 3 pontos que definem o 1 círculo e clique no Visto a verde que se encontra no monitor.

3º - Será pedido que este obtenha os 3 pontos que definem o 2 círculo e clique no Visto a verde que se encontra no monitor.

12. De seguida o operador terá que abrir o separador "Alinhamentos", como se pode observar na figura 6.9, e escolher o "Alinhamento Geométrico PLP".



Figura 6.9: Escolher o Alinhamento.

13. Surgirá uma janela com a aparência da figura 6.10 e o operador deverá verificar todos os componentes que vão compor o alinhamentos (o plano, a linha e o ponto) e definir o "Offset", na ordem representada na figura 6.10.



Figura 6.10: Componentes do Alinhamento.

14. Agora a peça encontra-se alinhada. Para verificar, o operador pode carregar na lâmpada que se encontra ao pé do símbolo do alinhamento Geométrico, na árvore de trabalho, e verificar se o referencial realizado no simulador se encontra no sitio do referencial do modelo CAD.

- Esta linha, por vezes, pode penetrar a peça ou componentes da máquina. Tal indica que, muito provavelmente, que irá existir uma colisão no decorrer do processo. Para evitar estas colisões, o operador terá que criar pontos de segurança entre coordenadas. Para tal terá que fazer o indicado na figura 7.2.

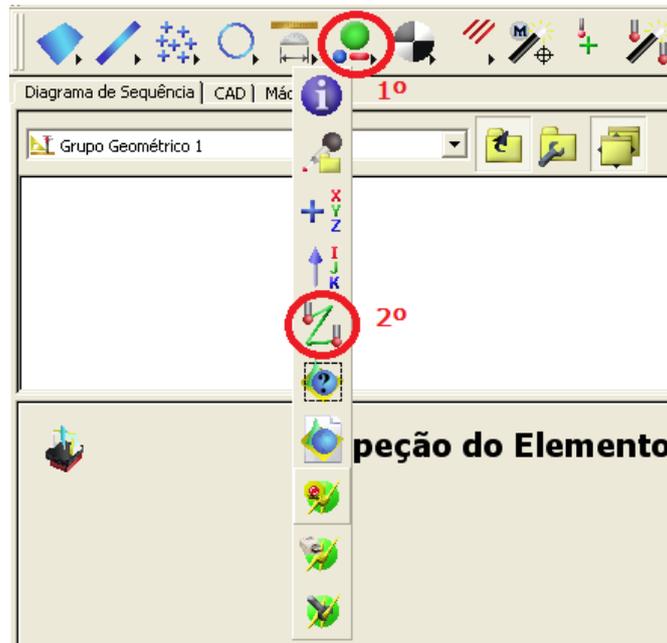


Figura 7.2: Menu para a Criação de Pontos de Segurança.

- Depois, o operador terá que identificar o posição do ponto de segurança, posicionando-o na interface gráfica.
- No fim de criada a rotina que irá efetuar a medição é necessário simular o movimento da máquina para verificar se existem colisões ou movimentos indesejados. Para tal o operador terá que mudar para o separador "Simular Programa" que se encontra no canto inferior esquerdo da interface, como se pode verificar na Figura 7.3.
- Se a simulação não indicar que existiram colisões e os movimentos efetuados pela ponteira forem os desejados pelo operador, pode-se então passar à execução do programa na realidade. Para tal o operador terá que aceder ao separador "Executar Programa", como se pode observar na figura 7.4.

ATENÇÃO - A máquina irá iniciar o movimento. Aconselha-se que o operador baixe a velocidade no *joystick* e mantenha a mão no botão de emergência para o caso de alguma anomalia do programa.

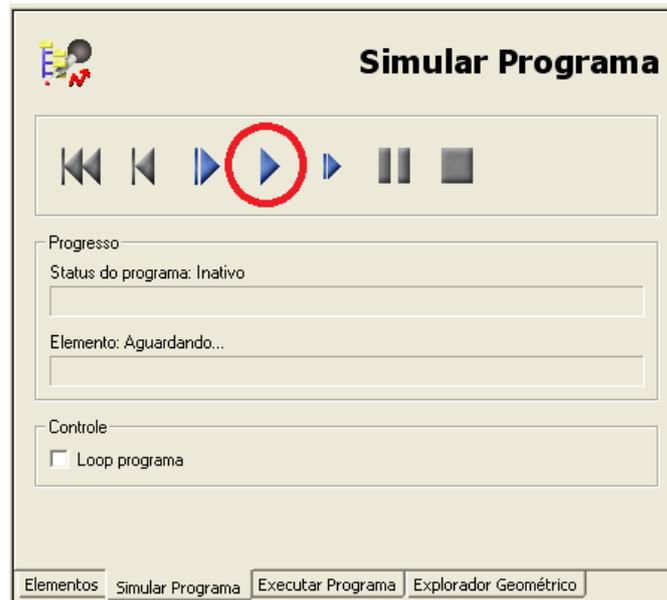


Figura 7.3: Menu de Simulação do Programa

10. Agora todos os elementos geométricos se encontram medidos. Para fazer a verificação de distâncias e elementos GD&T o operador terá que aceder ao menu "Medições" ou "Assistente GD&T", que se encontram à esquerda dos menus de identificação dos elementos geométricos, na mesma *toolbar*.
11. A partir deste ponto o próprio *software* torna-se auto-explicativo.

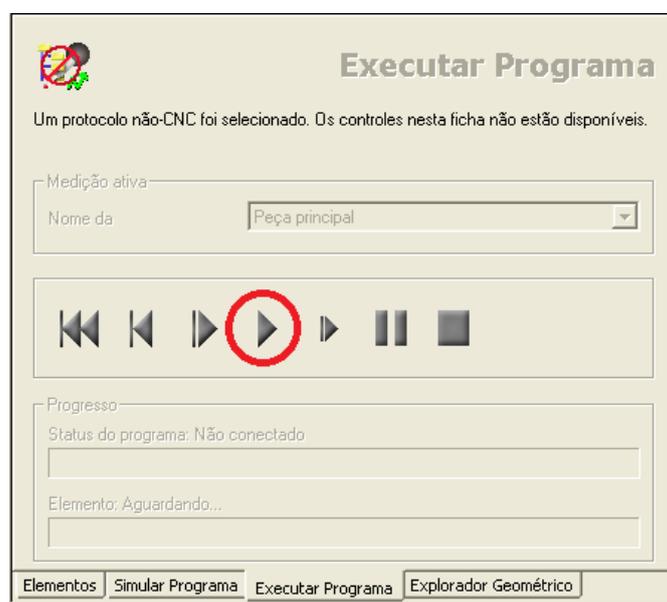


Figura 7.4: Menu de Execução do Programa

Anexo B

Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência da Velocidade de Toque na Medição

Tabela B.1: Resultados numéricos do ensaio com o objetivo de verificar a influência da velocidade na medição

Velocidade de Toque (mm/s)	1	2	3	5	7
Temperatura (°C)	23,47	23,79	22,85	23,00	23,19
1	19,0510	19,0496	19,0494	19,0508	19,0501
2	19,0507	19,0494	19,0499	19,0509	19,0508
3	19,0504	19,0495	19,0503	19,0512	19,0516
4	19,0503	19,0498	19,0494	19,0518	19,0520
5	19,0508	19,0490	19,0497	19,0508	19,0525
6	19,0506	19,0497	19,0501	19,0514	19,0519
7	19,0500	19,0494	19,0498	19,0509	19,0513
8	19,0501	19,0494	19,0503	19,0507	19,0500
9	19,0506	19,0495	19,0495	19,0510	19,0499
10	19,0503	19,0490	19,0503	19,0512	19,0498
11	19,0504	19,0492	19,0499	19,0493	19,0508
12	19,0506	19,0490	19,0496	19,0505	19,0514
13	19,0501	19,0490	19,0507	19,0508	19,0524
14	19,0505	19,0492	19,0503	19,0508	19,0521
15	19,0502	19,0514	19,0504	19,0509	19,0512
16	19,0497	19,0498	19,0503	19,0497	19,0513
17	19,0502	19,0498	19,0496	19,0497	19,0508
18	19,0504	19,0499	19,0502	19,0500	19,0483
19	19,0504	19,0499	19,0512	19,0513	19,0490
20	19,0505	19,0506	19,0504	19,0512	19,0495
21	19,0503	19,0509	19,0497	19,0517	19,0504
22	19,0504	19,0498	19,0504	19,0504	19,0517
23	19,0504	19,0501	19,0497	19,0511	19,0516
24	19,0504	19,0495	19,0503	19,0498	19,0518
25	19,0500	19,0510	19,0503	19,0497	19,0510
26	19,0505	19,0498	19,0510	19,0504	19,0506
27	19,0503	19,0511	19,0498	19,0505	19,0493
28	19,0500	19,0497	19,0502	19,0505	19,0490
29	19,0504	19,0505	19,0501	19,0499	19,0495
30	19,0507	19,0505	19,0497	19,0510	19,0505
31	19,0502	19,0497	19,0501	19,0506	19,0513
32	19,0503	19,0500	19,0503	19,0517	19,0517
33	19,0505	19,0498	19,0502	19,0506	19,0525
34	19,0503	19,0501	19,0495	19,0502	19,0523
35	19,0506	19,0507	19,0500	19,0505	19,0519
36	19,0496	19,0494	19,0502	19,0496	19,0511
37	19,0504	19,0507	19,0496	19,0504	19,0506
38	19,0504	19,0498	19,0497	19,0504	19,0500
39	19,0502	19,0503	19,0501	19,0505	19,0497
40	19,0503	19,0499	19,0506	19,0515	19,0491
41	19,0501	19,0495	19,0503	19,0503	19,0496
42	19,0503	19,0504	19,0502	19,0516	19,0500
43	19,0504	19,0497	19,0504	19,0511	19,0512
44	19,0504	19,0495	19,0506	19,0495	19,0522
45	19,0502	19,0508	19,0504	19,0496	19,0523
46	19,0510	19,0500	19,0509	19,0505	19,0523
47	19,0503	19,0499	19,0505	19,0506	19,0519
48	19,0500	19,0499	19,0509	19,0516	19,0498
49	19,0502	19,0504	19,0503	19,0515	19,0496
50	19,0501	19,0497	19,0498	19,0518	19,0497
Valor Médio	19,0504	19,0498	19,0502	19,0507	19,0509
Desvio Padrão	0,00027	0,00057	0,00043	0,00067	0,00113
Valor Máximo	19,0510	19,0512	19,0512	19,0518	19,0525
Valor Mínimo	19,0496	19,0494	19,0494	19,0493	19,0483

Tabela B.2: Continuação da Tabela B.1.

Velocidade de Toque (mm/s)	9	10	11	12	13
Temperatura (°C)	23,41	23,79	23,50	23,90	24,11
1	19,0495	19,0502	19,0471	19,0474	19,0480
2	19,0493	19,0494	19,0460	19,0461	19,0473
3	19,0492	19,0490	19,0463	19,0472	19,0477
4	19,0494	19,0483	19,0470	19,0479	19,0479
5	19,0495	19,0482	19,0468	19,0483	19,0483
6	19,0500	19,0480	19,0475	19,0485	19,0490
7	19,0507	19,0477	19,0485	19,0478	19,0488
8	19,0505	19,0490	19,0491	19,0474	19,0491
9	19,0512	19,0490	19,0496	19,0469	19,0480
10	19,0501	19,0491	19,0497	19,0479	19,0482
11	19,0502	19,0496	19,0492	19,0471	19,0480
12	19,0494	19,0496	19,0492	19,0471	19,0479
13	19,0498	19,0494	19,0489	19,0474	19,0473
14	19,0490	19,0491	19,0484	19,0478	19,0475
15	19,0487	19,0487	19,0477	19,0475	19,0478
16	19,0490	19,0481	19,0471	19,0478	19,0470
17	19,0504	19,0477	19,0472	19,0481	19,0475
18	19,0511	19,0480	19,0471	19,0475	19,0478
19	19,0516	19,0476	19,0472	19,0474	19,0474
20	19,0518	19,0479	19,0482	19,0472	19,0465
21	19,0518	19,0486	19,0485	19,0457	19,0467
22	19,0510	19,0499	19,0481	19,0462	19,0455
23	19,0503	19,0506	19,0486	19,0461	19,0458
24	19,0499	19,0514	19,0481	19,0454	19,0463
25	19,0497	19,0509	19,0482	19,0459	19,0467
26	19,0505	19,0498	19,0477	19,0461	19,0478
27	19,0504	19,0507	19,0475	19,0467	19,0484
28	19,0514	19,0490	19,0477	19,0470	19,0487
29	19,0507	19,0481	19,0478	19,0478	19,0494
30	19,0511	19,0477	19,0473	19,0481	19,0502
31	19,0506	19,0486	19,0482	19,0486	19,0508
32	19,0507	19,0480	19,0487	19,0484	19,0502
33	19,0502	19,0484	19,0496	19,0487	19,0489
34	19,0496	19,0480	19,0500	19,0478	19,0493
35	19,0502	19,0488	19,0495	19,0468	19,0485
36	19,0504	19,0499	19,0489	19,0455	19,0474
37	19,0510	19,0494	19,0489	19,0451	19,0468
38	19,0525	19,0502	19,0478	19,0452	19,0467
39	19,0521	19,0499	19,0462	19,0455	19,0462
40	19,0516	19,0493	19,0458	19,0462	19,0460
41	19,0504	19,0482	19,0456	19,0464	19,0457
42	19,0500	19,0481	19,0465	19,0468	19,0459
43	19,0490	19,0479	19,0470	19,0472	19,0456
44	19,0482	19,0480	19,0478	19,0467	19,0462
45	19,0490	19,0483	19,0485	19,0476	19,0463
46	19,0507	19,0481	19,0490	19,0485	19,0470
47	19,0508	19,0487	19,0499	19,0491	19,0474
48	19,0518	19,0496	19,0496	19,0489	19,0480
49	19,0519	19,0497	19,0494	19,0472	19,0490
50	19,0511	19,0507	19,0484	19,0471	19,0491
Valor Médio	19,0504	19,0489	19,0482	19,0472	19,0478
Desvio Padrão	0,0029	0,0029	0,0034	0,0030	0,0038
Valor Máximo	19,0525	19,0514	19,0500	19,0491	19,0508
Valor Mínimo	19,0482	19,0476	19,0456	19,0451	19,0483

Anexo C

Resultados Números do Ensaio para a Identificação o *Pre-travel* Mínimo

Tabela C.1: Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o *pre-travel* ideal para o movimento em X-.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7
Temperatura (°c)	20,13	20,21	20,16	20,26	20,30	20,36	20,42
Velocidade (mm/s)	1	2	3	4	5	6	7
Tempo de Estabilização (s)	0,4272	0,4946	0,6196	0,3797	0,3828	0,4615	0,4375
Distância de Estabilização (mm)	0,4272	0,9892	1,8587	1,5188	1,9142	2,7688	3,0627
Overshoot (%)	199,6	170,1	154,2	129,2	126,1	128,0	118,8
Pre-Travel (mm)	1,2815	2,9675	5,5761	4,5565	5,7427	8,3064	9,1882

Tabela C.2: Continuação da Tabela C.1.

Ensaio	8	9	10	11	12	13	14
Temperatura (°c)	20,45	20,46	20,52	20,60	20,58	20,65	20,72
Velocidade (mm/s)	8	9	10	11	12	13	20
Tempo de Estabilização (s)	0,3286	0,4457	0,4471	0,4415	0,4390	0,4271	0,4819
Distância de Estabilização (mm)	2,6289	4,0114	4,4712	4,8565	5,2684	5,5526	9,6373
Overshoot (%)	121,3	117,9	116,5	115,0	117,1	112,0	105,7
Pre-Travel (mm)	7,8867	12,0341	13,4136	14,5695	15,8052	16,6577	28,9119

Tabela C.3: Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o *pre-travel* ideal para o movimento em X+.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7
Temperatura (°c)	20,13	20,21	20,16	20,26	20,30	20,36	20,42
Velocidade (mm/s)	1	2	3	4	5	6	7
Tempo de Estabilização (s)	0,4506	0,4313	0,4744	0,5440	0,4598	0,4456	0,4253
Distância de Estabilização (mm)	0,4506	4,0114	1,4231	2,1761	2,2991	2,6736	2,9770
Overshoot (%)	159,8	142,5	134,9	127,9	116,5	118,1	115,8
Pre-Travel (mm)	1,3517	2,5879	4,2693	6,5284	6,8974	8,0209	8,9310

Tabela C.4: Continuação da Tabela C.3.

Ensaio	8	9	10	11	12	13	14
Temperatura (°c)	20,45	20,46	20,52	20,60	20,58	20,65	20,72
Velocidade (mm/s)	8	9	10	11	12	13	20
Tempo de Estabilização (s)	0,3175	0,4084	0,4250	0,4305	0,4349	0,4481	0,5056
Distância de Estabilização (mm)	2,5401	3,6752	4,2497	4,7356	5,2190	5,8255	10,4118
Overshoot (%)	116,3	111,8	109,7	107,5	106,5	105,7	114,1
Pre-Travel (mm)	7,6203	11,0256	12,7492	14,2069	15,6571	17,4765	31,2355

Tabela C.5: Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o *pre-travel* ideal para o movimento em Y-.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7
Temperatura (°c)	21,03	21,04	21,10	21,12	21,20	21,21	21,27
Velocidade (mm/s)	1	2	3	4	5	6	7
Tempo de Estabilização (s)	0,4845	0,5783	0,3638	0,2916	0,2880	0,2622	0,1956
Distância de Estabilização (mm)	0,4845	1,1565	1,0913	1,1663	1,4399	1,5729	1,3694
Overshoot (%)	130,1	123,0	123,5	117,4	112,6	110,5	111,8
Pre-Travel (mm)	1,4536	3,4696	3,2738	3,4990	4,3198	4,7188	4,1081

Tabela C.6: Continuação da Tabela C.5.

Ensaio	8	9	10	11	12	13	14
Temperatura (°c)	21,31	21,38	21,39	21,47	21,45	21,49	21,54
Velocidade (mm/s)	8	9	10	11	12	13	20
Tempo de Estabilização (s)	0,2036	0,2269	0,2874	0,3170	0,3124	0,4308	0,4684
Distância de Estabilização (mm)	1,6287	2,0418	2,9045	3,4868	3,7484	5,6000	9,3679
Overshoot (%)	108,6	109,4	108,7	110,3	106,5	109,1	102,7
Pre-Travel (mm)	4,8861	6,1254	8,7136	10,4603	11,2453	16,8000	28,1036

Tabela C.7: Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o *pre-travel* ideal para o movimento em $Y+$.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7
Temperatura (°c)	21,03	21,04	21,10	21,12	21,20	21,21	21,27
Velocidade (mm/s)	1	2	3	4	5	6	7
Tempo de Estabilização (s)	0,5617	0,5265	0,2918	0,3190	0,2359	0,2363	0,2531
Distância de Estabilização (mm)	0,5617	1,0530	0,8754	1,2762	1,1793	1,4177	1,7717
Overshoot (%)	139,6	127,0	104,4	115,3	113,0	104,4	113,0
Pre-Travel (mm)	1,6852	3,1589	2,6262	3,8286	3,5378	4,2531	5,3150

Tabela C.8: Continuação da Tabela C.7.

Ensaio	8	9	10	11	12	13	14
Temperatura (°c)	21,31	21,38	21,39	21,47	21,45	21,49	21,54
Velocidade (mm/s)	8	9	10	11	12	13	20
Tempo de Estabilização (s)	0,1983	0,3179	0,3099	0,3006	0,4104	0,5060	0,4456
Distância de Estabilização (mm)	1,8090	2,8612	3,0995	3,3065	4,9252	6,5776	8,9119
Overshoot (%)	112,8	113,3	110,0	111,1	108,3	105,4	103,5
Pre-Travel (mm)	5,4269	8,5836	9,2984	9,9196	14,7756	19,7328	26,7358

Tabela C.9: Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o *pre-travel* ideal para o movimento em $Z-$.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7
Temperatura (°c)	21,87	21,96	21,97	21,96	21,94	21,95	21,92
Velocidade (mm/s)	1	2	3	4	5	6	7
Tempo de Estabilização (s)	0,7373	0,4671	0,5141	0,4297	0,3606	0,3200	0,3432
Distância de Estabilização (mm)	0,7373	0,9341	1,5424	1,7187	1,8030	1,9198	2,4021
Overshoot (%)	176,4	154,1	141,2	130,7	125,8	124,3	117,9
Pre-Travel (mm)	1,4745	1,8682	3,0848	3,4373	3,6060	3,8395	4,8041

Tabela C.10: Continuação da Tabela C.9.

Ensaio	8	9	10	11	12	13	14
Temperatura (°c)	21,84	21,82	21,76	21,71	21,70	21,73	21,69
Velocidade (mm/s)	8	9	10	11	12	13	20
Tempo de Estabilização (s)	0,3917	0,1538	0,1588	0,1795	0,2764	0,3499	0,2434
Distância de Estabilização (mm)	3,1340	1,3839	1,5878	1,9518	3,3166	4,5491	4,8676
Overshoot (%)	112,0	108,0	106,9	105,9	109,8	108,7	105,4
Pre-Travel (mm)	6,2679	2,7678	3,1756	3,9036	6,6333	9,0983	9,7352

Tabela C.11: Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar o *pre-travel* ideal para o movimento em $Z+$.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7
Temperatura (°c)	21,87	21,96	21,97	21,96	21,94	21,95	21,92
Velocidade (mm/s)	1	2	3	4	5	6	7
Tempo de Estabilização (s)	0,8367	0,5349	0,5666	0,4324	0,3691	0,3283	0,2872
Distância de Estabilização (mm)	0,8367	1,0698	1,6997	1,7294	1,8457	1,9696	2,0103
Overshoot (%)	190,4	149,5	137,1	133,3	129,4	125,2	117,1
Pre-Travel (mm)	1,6735	2,1397	3,3994	3,4588	3,6913	3,9391	4,0207

Tabela C.12: Continuação da Tabela C.11.

Ensaio	8	9	10	11	12	13	14
Temperatura (°c)	21,84	21,82	21,76	21,71	21,70	21,73	21,69
Velocidade (mm/s)	8	9	10	11	12	13	20
Tempo de Estabilização (s)	0,2679	0,2559	0,2785	0,2031	0,2299	0,2667	0,3554
Distância de Estabilização (mm)	2,1435	2,3033	2,7853	2,2346	2,7591	3,4677	7,1084
Overshoot (%)	114,6	112,4	111,2	108,3	108,0	104,7	107,1
Pre-Travel (mm)	4,2869	4,6066	5,5707	4,4693	5,5181	6,9355	14,2169

Anexo D

Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Ângulo de Ataque

Tabela D.1: Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar a influência do ângulo de ataque no plano OXY.

Ângulo (graus)	10	20	30	40	45	50	60	70	80
Temperatura (°C)	21,16	21,35	21,42	21,46	21,53	21,55	21,61	21,67	21,71
1	19,2853	19,2062	19,1227	19,0901	19,0790	19,0726	19,0624	19,0538	19,0513
2	19,2857	19,2056	19,1224	19,0896	19,0800	19,0726	19,0617	19,0543	19,0503
3	19,2863	19,2057	19,1230	19,0895	19,0800	19,0718	19,0624	19,0540	19,0509
4	19,2866	19,2054	19,1227	19,0906	19,0796	19,0730	19,0621	19,0543	19,0508
5	19,2862	19,2051	19,1221	19,0898	19,0798	19,0728	19,0617	19,0553	19,0514
6	19,2865	19,2062	19,1223	19,0898	19,0797	19,0728	19,0616	19,0540	19,0505
7	19,2856	19,2056	19,1218	19,0897	19,0794	19,0726	19,0615	19,0544	19,0506
8	19,2864	19,2053	19,1223	19,0900	19,0792	19,0726	19,0616	19,0542	19,0504
9	19,2865	19,2051	19,1226	19,0900	19,0789	19,0725	19,0617	19,0540	19,0501
10	19,2859	19,2048	19,1224	19,0896	19,0787	19,0724	19,0614	19,0546	19,0499
11	19,2866	19,2056	19,1217	19,0894	19,0789	19,0727	19,0616	19,0550	19,0504
12	19,2859	19,2057	19,1216	19,0894	19,0789	19,0724	19,0612	19,0544	19,0505
13	19,2872	19,2058	19,1218	19,0889	19,0785	19,0724	19,0618	19,0549	19,0508
14	19,2861	19,2056	19,1222	19,0891	19,0789	19,0730	19,0608	19,0543	19,0506
15	19,2864	19,2059	19,1217	19,0890	19,0792	19,0724	19,0613	19,0544	19,0509
16	19,2861	19,2062	19,1223	19,0894	19,0795	19,0724	19,0615	19,0543	19,0507
17	19,2862	19,2064	19,1219	19,0894	19,0798	19,0730	19,0623	19,0544	19,0504
18	19,2860	19,2062	19,1215	19,0889	19,0788	19,0722	19,0621	19,0546	19,0506
19	19,2861	19,2062	19,1216	19,0889	19,0790	19,0719	19,0612	19,0542	19,0507
20	19,2872	19,2062	19,1212	19,0891	19,0796	19,0723	19,0618	19,0547	19,0501
21	19,2876	19,2065	19,1218	19,0896	19,0797	19,0725	19,0618	19,0549	19,0508
22	19,2869	19,2063	19,1223	19,0903	19,0792	19,0723	19,0620	19,0544	19,0510
23	19,2875	19,2068	19,1215	19,0898	19,0790	19,0717	19,0622	19,0544	19,0508
24	19,2880	19,2065	19,1220	19,0893	19,0794	19,0722	19,0617	19,0534	19,0509
25	19,2870	19,2066	19,1215	19,0898	19,0793	19,0729	19,0615	19,0544	19,0511
26	19,2877	19,2069	19,1217	19,0893	19,0790	19,0723	19,0620	19,0547	19,0500
27	19,2882	19,2070	19,1213	19,0894	19,0793	19,0719	19,0615	19,0546	19,0511
28	19,2874	19,2064	19,1213	19,0894	19,0794	19,0720	19,0614	19,0548	19,0513
29	19,2873	19,2068	19,1215	19,0896	19,0794	19,0722	19,0621	19,0549	19,0499
30	19,2876	19,2060	19,1220	19,0895	19,0793	19,0720	19,0616	19,0548	19,0508
31	19,2879	19,2062	19,1212	19,0892	19,0787	19,0722	19,0616	19,0553	19,0502
32	19,2877	19,2066	19,1218	19,0895	19,0785	19,0727	19,0619	19,0557	19,0508
33	19,2876	19,2069	19,1214	19,0898	19,0785	19,0728	19,0617	19,0550	19,0501
34	19,2879	19,2068	19,1220	19,0896	19,0787	19,0724	19,0620	19,0549	19,0507
35	19,2872	19,2057	19,1215	19,0893	19,0795	19,0729	19,0615	19,0545	19,0501
36	19,2870	19,2060	19,1217	19,0889	19,0794	19,0726	19,0617	19,0544	19,0502
37	19,2869	19,2056	19,1209	19,0889	19,0793	19,0722	19,0628	19,0548	19,0509
38	19,2869	19,2053	19,1215	19,0883	19,0793	19,0726	19,0625	19,0549	19,0505
39	19,2872	19,2054	19,1219	19,0884	19,0787	19,0720	19,0623	19,0540	19,0512
40	19,2861	19,2053	19,1223	19,0890	19,0793	19,0721	19,0624	19,0549	19,0513
41	19,2863	19,2055	19,1223	19,0883	19,0794	19,0724	19,0627	19,0547	19,0508
42	19,2870	19,2052	19,1222	19,0880	19,0790	19,0718	19,0630	19,0543	19,0505
43	19,2867	19,2052	19,1223	19,0889	19,0792	19,0718	19,0625	19,0545	19,0506
44	19,2864	19,2054	19,1224	19,0881	19,0791	19,0724	19,0620	19,0544	19,0507
45	19,2865	19,2050	19,1221	19,0887	19,0797	19,0726	19,0621	19,0546	19,0503
46	19,2864	19,2051	19,1222	19,0897	19,0793	19,0727	19,0621	19,0545	19,0505
47	19,2861	19,2052	19,1221	19,0891	19,0792	19,0720	19,0617	19,0549	19,0506
48	19,2858	19,2056	19,1222	19,0894	19,0788	19,0727	19,0621	19,0541	19,0508
49	19,2866	19,2053	19,1222	19,0892	19,0792	19,0722	19,0627	19,0545	19,0504
50	19,2866	19,2052	19,1221	19,0885	19,0794	19,0726	19,0628	19,0545	19,0506
Valor Médio (mm)	19,2867	19,2059	19,1219	19,0893	19,0792	19,0724	19,0619	19,0545	19,0506
Desvio Padrão (mm)	0,0007	0,0006	0,0004	0,0005	0,0004	0,0003	0,0005	0,0004	0,0004
Valor Máximo (mm)	19,2882	19,2070	19,1230	19,0906	19,0800	19,0730	19,0630	19,0557	19,0514
Valor Mínimo (mm)	19,2853	19,2048	19,1209	19,0880	19,0785	19,0717	19,0608	19,0534	19,0499

Tabela D.2: Continuação da tabela D.1.

Ângulo (graus)	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Temperatura (°C)	21,97	22,07	22,14	22,16	22,23	22,25	22,26	22,34	22,36
1	19,0492	19,0513	19,0553	19,0606	19,0706	19,0884	19,1237	19,1766	19,2796
2	19,0496	19,0520	19,0555	19,0603	19,0711	19,0877	19,1233	19,1760	19,2779
3	19,0493	19,0509	19,0556	19,0604	19,0712	19,0881	19,1232	19,1768	19,2793
4	19,0500	19,0510	19,0556	19,0606	19,0709	19,0886	19,1226	19,1760	19,2781
5	19,0498	19,0516	19,0553	19,0595	19,0706	19,0876	19,1225	19,1755	19,2769
6	19,0502	19,0507	19,0554	19,0604	19,0704	19,0883	19,1224	19,1762	19,2750
7	19,0500	19,0515	19,0554	19,0608	19,0705	19,0881	19,1230	19,1761	19,2759
8	19,0498	19,0517	19,0561	19,0608	19,0704	19,0883	19,1228	19,1766	19,2753
9	19,0493	19,0519	19,0547	19,0610	19,0706	19,0892	19,1227	19,1765	19,2761
10	19,0493	19,0522	19,0547	19,0603	19,0706	19,0881	19,1218	19,1766	19,2767
11	19,0494	19,0513	19,0548	19,0605	19,0701	19,0879	19,1226	19,1762	19,2772
12	19,0497	19,0506	19,0545	19,0605	19,0700	19,0876	19,1223	19,1765	19,2772
13	19,0498	19,0506	19,0545	19,0601	19,0701	19,0881	19,1223	19,1766	19,2780
14	19,0498	19,0500	19,0541	19,0610	19,0706	19,0870	19,1227	19,1773	19,2764
15	19,0495	19,0515	19,0550	19,0605	19,0704	19,0880	19,1223	19,1768	19,2757
16	19,0493	19,0515	19,0542	19,0600	19,0705	19,0879	19,1222	19,1762	19,2765
17	19,0492	19,0506	19,0542	19,0605	19,0703	19,0882	19,1221	19,1764	19,2755
18	19,0494	19,0514	19,0547	19,0605	19,0701	19,0882	19,1221	19,1769	19,2753
19	19,0489	19,0513	19,0553	19,0602	19,0701	19,0875	19,1219	19,1768	19,2771
20	19,0491	19,0511	19,0544	19,0605	19,0701	19,0874	19,1223	19,1765	19,2765
21	19,0490	19,0505	19,0553	19,0608	19,0703	19,0872	19,1218	19,1770	19,2769
22	19,0492	19,0506	19,0541	19,0600	19,0704	19,0876	19,1223	19,1766	19,2768
23	19,0493	19,0505	19,0552	19,0600	19,0697	19,0880	19,1226	19,1768	19,2773
24	19,0497	19,0507	19,0550	19,0602	19,0692	19,0876	19,1218	19,1769	19,2771
25	19,0498	19,0512	19,0550	19,0599	19,0694	19,0880	19,1219	19,1771	19,2783
26	19,0505	19,0509	19,0550	19,0606	19,0695	19,0883	19,1220	19,1768	19,2777
27	19,0497	19,0513	19,0553	19,0601	19,0698	19,0877	19,1223	19,1771	19,2784
28	19,0491	19,0512	19,0548	19,0608	19,0700	19,0882	19,1221	19,1768	19,2791
29	19,0488	19,0512	19,0543	19,0609	19,0698	19,0882	19,1223	19,1761	19,2792
30	19,0489	19,0504	19,0547	19,0608	19,0697	19,0879	19,1226	19,1766	19,2796
31	19,0486	19,0506	19,0548	19,0609	19,0695	19,0885	19,1221	19,1769	19,2793
32	19,0492	19,0511	19,0554	19,0610	19,0697	19,0881	19,1224	19,1766	19,2801
33	19,0496	19,0503	19,0546	19,0604	19,0695	19,0878	19,1226	19,1766	19,2802
34	19,0490	19,0499	19,0540	19,0605	19,0700	19,0880	19,1220	19,1763	19,2798
35	19,0492	19,0510	19,0546	19,0605	19,0702	19,0877	19,1224	19,1772	19,2782
36	19,0496	19,0512	19,0543	19,0611	19,0702	19,0876	19,1225	19,1772	19,2783
37	19,0493	19,0511	19,0539	19,0608	19,0697	19,0873	19,1227	19,1763	19,2790
38	19,0494	19,0509	19,0544	19,0603	19,0700	19,0871	19,1229	19,1765	19,2792
39	19,0485	19,0507	19,0554	19,0609	19,0708	19,0871	19,1225	19,1761	19,2787
40	19,0490	19,0505	19,0552	19,0611	19,0698	19,0879	19,1232	19,1761	19,2778
41	19,0498	19,0497	19,0544	19,0611	19,0699	19,0874	19,1233	19,1768	19,2787
42	19,0496	19,0497	19,0554	19,0612	19,0703	19,0865	19,1230	19,1767	19,2774
43	19,0491	19,0504	19,0547	19,0612	19,0695	19,0879	19,1235	19,1764	19,2774
44	19,0493	19,0503	19,0545	19,0610	19,0704	19,0874	19,1221	19,1774	19,2776
45	19,0497	19,0499	19,0549	19,0603	19,0700	19,0874	19,1234	19,1767	19,2780
46	19,0498	19,0503	19,0544	19,0598	19,0710	19,0878	19,1229	19,1762	19,2778
47	19,0498	19,0503	19,0541	19,0611	19,0701	19,0875	19,1229	19,1760	19,2774
48	19,0499	19,0506	19,0552	19,0607	19,0706	19,0872	19,1229	19,1760	19,2775
49	19,0493	19,0499	19,0547	19,0600	19,0703	19,0879	19,1228	19,1762	19,2770
50	19,0495	19,0500	19,0554	19,0609	19,0708	19,0878	19,1224	19,1764	19,2777
Valor Médio (mm)	19,0494	19,0508	19,0548	19,0606	19,0702	19,0878	19,1225	19,1765	19,2777
Desvio Padrão (mm)	0,0004	0,0006	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0013
Valor Máximo (mm)	19,0505	19,0522	19,0561	19,0612	19,0712	19,0892	19,1237	19,1774	19,2802
Valor Mínimo (mm)	19,0485	19,0497	19,0539	19,0595	19,0692	19,0865	19,1218	19,1755	19,2750

Tabela D.3: Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar a influência do ângulo de ataque no plano OYZ.

Ângulo (graus)	10	20	30	40	45	50	60	70	80
Temperatura (°C)	22,40	22,42	22,43	22,40	22,38	22,34	22,30	22,29	22,26
1	19,2852	19,1704	19,1124	19,0808	19,0710	19,0614	19,0526	19,0458	19,0426
2	19,2844	19,1702	19,1124	19,0804	19,0714	19,0616	19,0532	19,0462	19,0422
3	19,2828	19,1686	19,1118	19,0806	19,0716	19,0612	19,0524	19,0468	19,0416
4	19,2822	19,1690	19,1116	19,0806	19,0710	19,0620	19,0518	19,0468	19,0436
5	19,2824	19,1692	19,1114	19,0806	19,0716	19,0616	19,0526	19,0470	19,0430
6	19,2820	19,1694	19,1116	19,0802	19,0712	19,0616	19,0522	19,0466	19,0424
7	19,2824	19,1686	19,1118	19,0806	19,0712	19,0622	19,0524	19,0454	19,0432
8	19,2838	19,1694	19,1118	19,0802	19,0724	19,0622	19,0524	19,0464	19,0426
9	19,2828	19,1684	19,1118	19,0812	19,0710	19,0614	19,0522	19,0466	19,0434
10	19,2834	19,1690	19,1122	19,0808	19,0706	19,0616	19,0518	19,0466	19,0442
11	19,2846	19,1694	19,1124	19,0806	19,0712	19,0616	19,0518	19,0466	19,0428
12	19,2852	19,1688	19,1124	19,0804	19,0710	19,0620	19,0528	19,0474	19,0416
13	19,2850	19,1682	19,1132	19,0806	19,0718	19,0624	19,0524	19,0466	19,0436
14	19,2860	19,1692	19,1130	19,0806	19,0714	19,0620	19,0520	19,0470	19,0422
15	19,2848	19,1690	19,1124	19,0798	19,0704	19,0622	19,0530	19,0476	19,0422
16	19,2854	19,1688	19,1130	19,0802	19,0714	19,0618	19,0534	19,0474	19,0432
17	19,2856	19,1680	19,1122	19,0794	19,0704	19,0622	19,0524	19,0472	19,0432
18	19,2838	19,1676	19,1130	19,0796	19,0704	19,0624	19,0524	19,0474	19,0430
19	19,2834	19,1686	19,1132	19,0792	19,0702	19,0622	19,0522	19,0462	19,0426
20	19,2834	19,1686	19,1134	19,0796	19,0710	19,0610	19,0518	19,0470	19,0414
21	19,2844	19,1692	19,1122	19,0796	19,0708	19,0614	19,0520	19,0466	19,0414
22	19,2846	19,1688	19,1126	19,0794	19,0712	19,0622	19,0524	19,0464	19,0428
23	19,2848	19,1696	19,1132	19,0794	19,0692	19,0616	19,0516	19,0466	19,0418
24	19,2848	19,1690	19,1116	19,0800	19,0710	19,0624	19,0522	19,0468	19,0430
25	19,2850	19,1702	19,1114	19,0802	19,0712	19,0620	19,0516	19,0458	19,0442
26	19,2842	19,1696	19,1118	19,0796	19,0710	19,0616	19,0526	19,0460	19,0428
27	19,2848	19,1702	19,1116	19,0796	19,0712	19,0616	19,0510	19,0468	19,0436
28	19,2848	19,1692	19,1112	19,0798	19,0708	19,0612	19,0520	19,0466	19,0436
29	19,2852	19,1702	19,1110	19,0794	19,0702	19,0618	19,0518	19,0464	19,0418
30	19,2842	19,1690	19,1120	19,0794	19,0718	19,0618	19,0514	19,0472	19,0438
31	19,2842	19,1692	19,1114	19,0800	19,0706	19,0616	19,0520	19,0472	19,0426
32	19,2844	19,1692	19,1118	19,0792	19,0710	19,0618	19,0528	19,0470	19,0430
33	19,2830	19,1704	19,1126	19,0800	19,0714	19,0622	19,0528	19,0466	19,0430
34	19,2826	19,1702	19,1126	19,0810	19,0708	19,0616	19,0516	19,0458	19,0426
35	19,2832	19,1696	19,1124	19,0808	19,0706	19,0624	19,0518	19,0466	19,0420
36	19,2840	19,1696	19,1126	19,0794	19,0704	19,0622	19,0520	19,0458	19,0428
37	19,2850	19,1692	19,1126	19,0802	19,0712	19,0618	19,0516	19,0456	19,0438
38	19,2842	19,1696	19,1126	19,0798	19,0702	19,0622	19,0516	19,0462	19,0428
39	19,2854	19,1696	19,1130	19,0796	19,0712	19,0620	19,0516	19,0460	19,0438
40	19,2854	19,1698	19,1128	19,0798	19,0708	19,0612	19,0512	19,0456	19,0446
41	19,2860	19,1700	19,1124	19,0794	19,0712	19,0620	19,0522	19,0462	19,0436
42	19,2860	19,1692	19,1122	19,0794	19,0718	19,0618	19,0514	19,0454	19,0440
43	19,2862	19,1682	19,1122	19,0800	19,0710	19,0618	19,0516	19,0468	19,0426
44	19,2862	19,1684	19,1108	19,0802	19,0708	19,0616	19,0518	19,0466	19,0436
45	19,2846	19,1686	19,1112	19,0806	19,0710	19,0612	19,0518	19,0470	19,0426
46	19,2846	19,1694	19,1120	19,0802	19,0708	19,0604	19,0514	19,0472	19,0434
47	19,2848	19,1700	19,1110	19,0800	19,0702	19,0614	19,0522	19,0468	19,0426
48	19,2840	19,1690	19,1112	19,0808	19,0716	19,0622	19,0522	19,0468	19,0424
49	19,2846	19,1692	19,1110	19,0802	19,0716	19,0624	19,0532	19,0456	19,0434
50	19,2856	19,1690	19,1118	19,0798	19,0712	19,0620	19,0524	19,0468	19,0416
Valor Médio (mm)	19,2844	19,1692	19,1121	19,0801	19,0710	19,0618	19,0521	19,0465	19,0429
Desvio Padrão (mm)	0,0011	0,0006	0,0007	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005	0,0006	0,0008
Valor Máximo (mm)	19,2862	19,1704	19,1134	19,0812	19,0724	19,0624	19,0534	19,0476	19,0446
Valor Mínimo (mm)	19,2820	19,1676	19,1108	19,0792	19,0692	19,0604	19,0510	19,0454	19,0414

Tabela D.4: Continuação da tabela D.3.

Ângulo (graus)	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Temperatura (°C)	22,18	22,14	22,13	22,11	22,06	22,01	21,98	21,89	21,83
1	19,0424	19,0464	19,0524	19,0536	19,0636	19,0722	19,1148	19,1744	19,5609
2	19,0432	19,0470	19,0520	19,0542	19,0630	19,0714	19,1142	19,1756	19,5625
3	19,0434	19,0466	19,0514	19,0538	19,0636	19,0714	19,1142	19,1760	19,5633
4	19,0440	19,0462	19,0506	19,0542	19,0630	19,0712	19,1130	19,1756	19,5618
5	19,0432	19,0458	19,0500	19,0542	19,0628	19,0720	19,1128	19,1746	19,5631
6	19,0434	19,0470	19,0502	19,0536	19,0638	19,0710	19,1134	19,1752	19,5613
7	19,0438	19,0456	19,0496	19,0540	19,0640	19,0718	19,1126	19,1752	19,5607
8	19,0434	19,0456	19,0488	19,0528	19,0634	19,0718	19,1120	19,1742	19,5591
9	19,0430	19,0466	19,0492	19,0538	19,0632	19,0714	19,1122	19,1748	19,5614
10	19,0436	19,0460	19,0494	19,0536	19,0626	19,0710	19,1114	19,1754	19,5603
11	19,0436	19,0456	19,0490	19,0536	19,0630	19,0714	19,1114	19,1752	19,5613
12	19,0426	19,0466	19,0476	19,0546	19,0634	19,0720	19,1118	19,1756	19,5622
13	19,0432	19,0458	19,0480	19,0530	19,0634	19,0718	19,1118	19,1752	19,5626
14	19,0434	19,0460	19,0486	19,0532	19,0638	19,0714	19,1118	19,1748	19,5635
15	19,0432	19,0466	19,0476	19,0528	19,0630	19,0720	19,1128	19,1752	19,5635
16	19,0432	19,0460	19,0484	19,0536	19,0636	19,0724	19,1126	19,1752	19,5605
17	19,0434	19,0464	19,0488	19,0528	19,0626	19,0720	19,1138	19,1752	19,5604
18	19,0434	19,0456	19,0478	19,0542	19,0638	19,0716	19,1144	19,1760	19,5600
19	19,0434	19,0462	19,0478	19,0542	19,0632	19,0714	19,1136	19,1750	19,5612
20	19,0436	19,0462	19,0478	19,0546	19,0634	19,0708	19,1130	19,1758	19,5605
21	19,0440	19,0446	19,0476	19,0536	19,0638	19,0714	19,1132	19,1756	19,5613
22	19,0434	19,0454	19,0484	19,0544	19,0638	19,0722	19,1130	19,1756	19,5630
23	19,0440	19,0456	19,0488	19,0538	19,0630	19,0714	19,1132	19,1752	19,5632
24	19,0430	19,0458	19,0488	19,0526	19,0626	19,0724	19,1126	19,1744	19,5633
25	19,0440	19,0450	19,0482	19,0540	19,0624	19,0712	19,1126	19,1758	19,5633
26	19,0436	19,0448	19,0492	19,0532	19,0632	19,0712	19,1118	19,1746	19,5628
27	19,0424	19,0462	19,0488	19,0534	19,0634	19,0718	19,1112	19,1744	19,5631
28	19,0428	19,0458	19,0490	19,0526	19,0628	19,0726	19,1126	19,1742	19,5602
29	19,0420	19,0462	19,0488	19,0526	19,0630	19,0724	19,1116	19,1744	19,5607
30	19,0428	19,0474	19,0490	19,0528	19,0628	19,0722	19,1112	19,1748	19,5624
31	19,0432	19,0458	19,0484	19,0520	19,0624	19,0712	19,1128	19,1750	19,5628
32	19,0426	19,0466	19,0486	19,0530	19,0628	19,0714	19,1136	19,1746	19,5613
33	19,0434	19,0454	19,0474	19,0536	19,0626	19,0720	19,1126	19,1744	19,5610
34	19,0438	19,0462	19,0482	19,0540	19,0624	19,0708	19,1134	19,1736	19,5628
35	19,0432	19,0454	19,0478	19,0540	19,0624	19,0714	19,1134	19,1742	19,5628
36	19,0438	19,0454	19,0474	19,0540	19,0634	19,0714	19,1144	19,1752	19,5615
37	19,0428	19,0458	19,0494	19,0538	19,0622	19,0724	19,1124	19,1736	19,5608
38	19,0440	19,0456	19,0488	19,0526	19,0636	19,0718	19,1122	19,1740	19,5595
39	19,0430	19,0458	19,0494	19,0536	19,0632	19,0714	19,1126	19,1740	19,5596
40	19,0434	19,0450	19,0486	19,0530	19,0620	19,0716	19,1134	19,1742	19,5610
41	19,0432	19,0458	19,0494	19,0546	19,0630	19,0712	19,1110	19,1740	19,5602
42	19,0432	19,0466	19,0486	19,0538	19,0626	19,0722	19,1114	19,1742	19,5602
43	19,0430	19,0462	19,0498	19,0530	19,0626	19,0718	19,1108	19,1738	19,5631
44	19,0432	19,0462	19,0494	19,0530	19,0632	19,0722	19,1116	19,1742	19,5623
45	19,0432	19,0460	19,0490	19,0536	19,0622	19,0726	19,1122	19,1744	19,5630
46	19,0436	19,0452	19,0486	19,0538	19,0642	19,0730	19,1122	19,1752	19,5600
47	19,0432	19,0474	19,0484	19,0536	19,0620	19,0732	19,1116	19,1742	19,5609
48	19,0426	19,0462	19,0470	19,0544	19,0628	19,0724	19,1118	19,1744	19,5603
49	19,0434	19,0458	19,0486	19,0536	19,0636	19,0718	19,1120	19,1746	19,5602
50	19,0430	19,0466	19,0468	19,0546	19,0632	19,0722	19,1124	19,1758	19,5610
Valor Médio (mm)	19,0433	19,0460	19,0488	19,0536	19,0631	19,0718	19,1126	19,1748	19,5616
Desvio Padrão (mm)	0,0004	0,0006	0,0011	0,0006	0,0005	0,0005	0,0010	0,0006	0,0012
Valor Máximo (mm)	19,0440	19,0474	19,0524	19,0546	19,0642	19,0732	19,1148	19,1760	19,5635
Valor Mínimo (mm)	19,0420	19,0446	19,0468	19,0520	19,0620	19,0708	19,1108	19,1736	19,5591

Tabela D.5: Resultados numéricos para o ensaio com o objetivo de identificar a influência do ângulo de ataque no plano OXZ.

Ângulo (graus)	10	20	30	40	45	50	60	70	80
Temperatura (°C)	21,68	21,65	21,63	21,60	21,51	21,53	21,50	21,45	21,43
1	19,5215	19,1738	19,1194	19,0808	19,0700	19,0644	19,0546	19,0470	19,0452
2	19,5411	19,1732	19,1176	19,0808	19,0710	19,0634	19,0528	19,0462	19,0434
3	19,5374	19,1728	19,1172	19,0798	19,0714	19,0628	19,0528	19,0478	19,0436
4	19,5372	19,1726	19,1160	19,0802	19,0706	19,0636	19,0536	19,0450	19,0438
5	19,5418	19,1718	19,1178	19,0792	19,0706	19,0640	19,0522	19,0464	19,0438
6	19,5418	19,1728	19,1182	19,0804	19,0692	19,0642	19,0530	19,0462	19,0438
7	19,5356	19,1724	19,1168	19,0792	19,0700	19,0638	19,0526	19,0460	19,0428
8	19,5380	19,1726	19,1166	19,0798	19,0692	19,0638	19,0528	19,0472	19,0422
9	19,5399	19,1732	19,1176	19,0796	19,0698	19,0640	19,0532	19,0462	19,0414
10	19,5408	19,1734	19,1158	19,0794	19,0692	19,0626	19,0542	19,0454	19,0420
11	19,5413	19,1722	19,1154	19,0800	19,0694	19,0630	19,0496	19,0448	19,0434
12	19,5414	19,1724	19,1174	19,0800	19,0700	19,0638	19,0514	19,0456	19,0426
13	19,5427	19,1722	19,1164	19,0798	19,0692	19,0636	19,0506	19,0456	19,0416
14	19,5448	19,1718	19,1156	19,0792	19,0706	19,0636	19,0518	19,0462	19,0424
15	19,5416	19,1726	19,1178	19,0798	19,0704	19,0638	19,0520	19,0462	19,0430
16	19,5428	19,1732	19,1170	19,0792	19,0708	19,0640	19,0516	19,0462	19,0436
17	19,5410	19,1736	19,1164	19,0784	19,0710	19,0640	19,0524	19,0464	19,0412
18	19,5442	19,1728	19,1164	19,0784	19,0706	19,0636	19,0530	19,0456	19,0416
19	19,5444	19,1724	19,1176	19,0792	19,0698	19,0636	19,0518	19,0468	19,0422
20	19,5454	19,1724	19,1168	19,0800	19,0702	19,0646	19,0524	19,0458	19,0420
21	19,5366	19,1722	19,1176	19,0794	19,0706	19,0632	19,0522	19,0478	19,0434
22	19,5458	19,1740	19,1186	19,0810	19,0696	19,0640	19,0518	19,0464	19,0436
23	19,5446	19,1724	19,1166	19,0796	19,0702	19,0634	19,0516	19,0454	19,0418
24	19,5434	19,1714	19,1174	19,0802	19,0704	19,0638	19,0530	19,0460	19,0424
25	19,5464	19,1724	19,1176	19,0800	19,0700	19,0642	19,0540	19,0472	19,0430
26	19,5430	19,1728	19,1156	19,0782	19,0718	19,0626	19,0536	19,0474	19,0442
27	19,5436	19,1724	19,1148	19,0802	19,0706	19,0644	19,0516	19,0442	19,0434
28	19,5452	19,1728	19,1164	19,0796	19,0706	19,0638	19,0534	19,0456	19,0414
29	19,5474	19,1726	19,1168	19,0798	19,0714	19,0632	19,0516	19,0458	19,0410
30	19,5444	19,1722	19,1156	19,0800	19,0716	19,0620	19,0534	19,0460	19,0420
31	19,5458	19,1734	19,1166	19,0800	19,0714	19,0632	19,0512	19,0466	19,0420
32	19,5374	19,1744	19,1186	19,0794	19,0708	19,0644	19,0512	19,0454	19,0418
33	19,5381	19,1740	19,1172	19,0806	19,0708	19,0636	19,0522	19,0454	19,0426
34	19,5413	19,1734	19,1170	19,0790	19,0708	19,0630	19,0514	19,0464	19,0420
35	19,5426	19,1730	19,1172	19,0792	19,0704	19,0652	19,0510	19,0456	19,0432
36	19,5458	19,1728	19,1160	19,0794	19,0710	19,0630	19,0518	19,0458	19,0420
37	19,5408	19,1726	19,1160	19,0808	19,0708	19,0638	19,0522	19,0446	19,0420
38	19,5422	19,1722	19,1170	19,0790	19,0706	19,0638	19,0510	19,0460	19,0430
39	19,5444	19,1726	19,1144	19,0790	19,0712	19,0634	19,0520	19,0456	19,0420
40	19,5426	19,1728	19,1154	19,0798	19,0720	19,0646	19,0518	19,0454	19,0426
41	19,5358	19,1740	19,1152	19,0774	19,0712	19,0638	19,0520	19,0464	19,0424
42	19,5450	19,1720	19,1142	19,0782	19,0710	19,0652	19,0514	19,0452	19,0432
43	19,5414	19,1730	19,1164	19,0802	19,0710	19,0644	19,0512	19,0464	19,0434
44	19,5422	19,1730	19,1156	19,0800	19,0706	19,0648	19,0532	19,0458	19,0412
45	19,5438	19,1726	19,1166	19,0792	19,0700	19,0650	19,0524	19,0478	19,0430
46	19,5462	19,1730	19,1160	19,0790	19,0700	19,0640	19,0528	19,0462	19,0432
47	19,5432	19,1730	19,1158	19,0788	19,0720	19,0644	19,0532	19,0452	19,0424
48	19,5420	19,1722	19,1162	19,0790	19,0702	19,0640	19,0530	19,0450	19,0438
49	19,5466	19,1724	19,1164	19,0790	19,0688	19,0640	19,0530	19,0454	19,0432
50	19,5448	19,1724	19,1168	19,0800	19,0700	19,0634	19,0522	19,0446	19,0446
Valor Médio (mm)	19,5419	19,1728	19,1166	19,0796	19,0705	19,0638	19,0523	19,0460	19,0427
Desvio Padrão (mm)	0,0041	0,0006	0,0010	0,0007	0,0007	0,0006	0,0010	0,0008	0,0009
Valor Máximo (mm)	19,5474	19,1744	19,1194	19,0810	19,0720	19,0652	19,0546	19,0478	19,0452
Valor Mínimo (mm)	19,5215	19,1714	19,1142	19,0774	19,0688	19,0620	19,0496	19,0442	19,0410

Tabela D.6: Continuação da tabela D.5.

Ângulo (graus)	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Temperatura (°C)	21,41	21,36	21,33	21,30	21,28	21,24	21,23	21,19	21,14
1	19,0432	19,0420	19,0480	19,0510	19,0624	19,0774	19,1086	19,1630	19,2868
2	19,0410	19,0412	19,0442	19,0514	19,0598	19,0756	19,1090	19,1644	19,2736
3	19,0416	19,0418	19,0450	19,0504	19,0596	19,0768	19,1082	19,1674	19,2726
4	19,0408	19,0422	19,0446	19,0516	19,0598	19,0768	19,1096	19,1664	19,2754
5	19,0414	19,0426	19,0448	19,0522	19,0606	19,0776	19,1080	19,1682	19,2746
6	19,0406	19,0418	19,0448	19,0508	19,0594	19,0770	19,1072	19,1674	19,2750
7	19,0408	19,0424	19,0448	19,0498	19,0596	19,0768	19,1082	19,1664	19,2760
8	19,0424	19,0414	19,0440	19,0510	19,0584	19,0770	19,1078	19,1662	19,2740
9	19,0414	19,0408	19,0458	19,0512	19,0588	19,0776	19,1078	19,1662	19,2746
10	19,0422	19,0424	19,0448	19,0502	19,0590	19,0762	19,1074	19,1680	19,2744
11	19,0416	19,0404	19,0456	19,0520	19,0598	19,0762	19,1076	19,1656	19,2738
12	19,0414	19,0412	19,0446	19,0512	19,0588	19,0770	19,1086	19,1678	19,2752
13	19,0406	19,0406	19,0438	19,0512	19,0590	19,0762	19,1082	19,1676	19,2712
14	19,0406	19,0406	19,0440	19,0514	19,0592	19,0774	19,1086	19,1678	19,2746
15	19,0408	19,0426	19,0448	19,0514	19,0584	19,0752	19,1092	19,1670	19,2730
16	19,0394	19,0414	19,0450	19,0514	19,0602	19,0754	19,1082	19,1656	19,2726
17	19,0402	19,0420	19,0450	19,0508	19,0592	19,0764	19,1076	19,1672	19,2750
18	19,0400	19,0428	19,0450	19,0520	19,0592	19,0770	19,1076	19,1672	19,2750
19	19,0408	19,0416	19,0444	19,0498	19,0590	19,0762	19,1086	19,1686	19,2760
20	19,0406	19,0402	19,0458	19,0498	19,0592	19,0764	19,1092	19,1688	19,2776
21	19,0412	19,0424	19,0444	19,0506	19,0598	19,0776	19,1088	19,1680	19,2742
22	19,0404	19,0418	19,0458	19,0502	19,0590	19,0762	19,1078	19,1686	19,2754
23	19,0414	19,0426	19,0458	19,0506	19,0576	19,0754	19,1076	19,1676	19,2732
24	19,0396	19,0406	19,0450	19,0506	19,0582	19,0758	19,1096	19,1670	19,2750
25	19,0400	19,0416	19,0442	19,0510	19,0574	19,0774	19,1098	19,1682	19,2728
26	19,0410	19,0420	19,0452	19,0512	19,0566	19,0758	19,1086	19,1678	19,2730
27	19,0404	19,0408	19,0458	19,0512	19,0596	19,0774	19,1086	19,1674	19,2736
28	19,0404	19,0416	19,0452	19,0514	19,0592	19,0768	19,1090	19,1668	19,2738
29	19,0406	19,0416	19,0452	19,0506	19,0588	19,0758	19,1084	19,1672	19,2744
30	19,0408	19,0412	19,0440	19,0498	19,0584	19,0758	19,1086	19,1660	19,2740
31	19,0406	19,0406	19,0440	19,0504	19,0588	19,0762	19,1086	19,1660	19,2740
32	19,0414	19,0410	19,0450	19,0492	19,0592	19,0760	19,1082	19,1662	19,2748
33	19,0406	19,0406	19,0456	19,0510	19,0590	19,0772	19,1102	19,1656	19,2740
34	19,0408	19,0406	19,0450	19,0502	19,0594	19,0770	19,1084	19,1652	19,2704
35	19,0404	19,0420	19,0448	19,0510	19,0570	19,0764	19,1080	19,1684	19,2730
36	19,0408	19,0406	19,0458	19,0502	19,0590	19,0760	19,1096	19,1660	19,2734
37	19,0404	19,0416	19,0456	19,0504	19,0558	19,0762	19,1082	19,1668	19,2728
38	19,0400	19,0420	19,0452	19,0514	19,0564	19,0758	19,1092	19,1646	19,2710
39	19,0402	19,0416	19,0452	19,0506	19,0580	19,0760	19,1102	19,1652	19,2732
40	19,0398	19,0398	19,0454	19,0504	19,0588	19,0752	19,1086	19,1674	19,2736
41	19,0406	19,0396	19,0456	19,0512	19,0590	19,0760	19,1080	19,1658	19,2718
42	19,0390	19,0420	19,0452	19,0514	19,0590	19,0772	19,1078	19,1642	19,2714
43	19,0384	19,0420	19,0450	19,0514	19,0574	19,0758	19,1070	19,1658	19,2718
44	19,0396	19,0428	19,0454	19,0520	19,0600	19,0762	19,1078	19,1664	19,2710
45	19,0396	19,0416	19,0446	19,0518	19,0594	19,0768	19,1084	19,1660	19,2722
46	19,0392	19,0414	19,0454	19,0512	19,0584	19,0766	19,1084	19,1664	19,2704
47	19,0392	19,0418	19,0454	19,0520	19,0576	19,0756	19,1072	19,1678	19,2728
48	19,0396	19,0410	19,0440	19,0494	19,0568	19,0766	19,1072	19,1652	19,2698
49	19,0398	19,0402	19,0442	19,0500	19,0590	19,0762	19,1082	19,1658	19,2718
50	19,0392	19,0416	19,0460	19,0508	19,0594	19,0772	19,1074	19,1658	19,2730
Valor Médio (mm)	19,0405	19,0415	19,0450	19,0509	19,0588	19,0764	19,1084	19,1666	19,2737
Desvio Padrão (mm)	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0011	0,0007	0,0008	0,0012	0,0025
Valor Máximo (mm)	19,0432	19,0428	19,0480	19,0522	19,0624	19,0776	19,1102	19,1688	19,2868
Valor Mínimo (mm)	19,0384	19,0396	19,0438	19,0492	19,0558	19,0752	19,1070	19,1630	19,2698

Anexo E

Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Ângulo da Cabeça Motorizada

Tabela E.1: Resultados Numéricos para o Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Ângulo da Cabeça Motorizada(Paralelismo).

Ensaio	Temperatura (°C)	Ângulo (graus)			
		0	45	90	105
1	24,2	0,0168	0,0267	0,0179	0,0211
2	24,23	0,0163	0,0222	0,0162	0,0167
3	24,29	0,0165	0,0219	0,0164	0,0177
4	24,3	0,0176	0,0166	0,0177	0,0192
5	24,36	0,0163	0,0185	0,0181	0,0174
6	24,39	0,0180	0,0289	0,0317	0,0208
7	24,4	0,0172	0,0215	0,0181	0,0182
8	24,41	0,0163	0,0245	0,0187	0,0162
9	24,44	0,0198	0,0293	0,0203	0,0253
10	24,44	0,0161	0,0309	0,0162	0,0170
11	24,4	0,0187	0,0314	0,0177	0,0147
12	24,42	0,0158	0,0319	0,0161	0,0187
13	24,46	0,0172	0,0211	0,0203	0,0178
14	24,45	0,0180	0,0305	0,0340	0,0238
15	24,43	0,0215	0,0249	0,0305	0,0269
16	24,84	0,0169	0,0248	0,0246	0,0245
17	24,5	0,0180	0,0246	0,0285	0,0228
18	24,5	0,0212	0,0238	0,0192	0,0250
19	24,5	0,0184	0,0232	0,0182	0,0215
20	24,5	0,0166	0,0260	0,0325	0,0195
21	24,5	0,0168	0,0226	0,0239	0,0202
22	24,51	0,0168	0,0288	0,0184	0,0236
23	24,53	0,0168	0,0312	0,0221	0,0195
24	24,52	0,0181	0,0248	0,0208	0,0253
25	24,54	0,0159	0,0288	0,0157	0,0217
26	24,59	0,0170	0,0225	0,0236	0,0207
27	24,6	0,0157	0,0214	0,0171	0,0182
28	24,6	0,0169	0,0258	0,0172	0,0210
29	24,6	0,0203	0,0292	0,0162	0,0172
30	24,6	0,0223	0,0289	0,0201	0,0197
31	24,61	0,0160	0,0249	0,0217	0,0260
32	24,62	0,0201	0,0257	0,0208	0,0203
33	24,62	0,0218	0,0237	0,0169	0,0241
34	24,67	0,0176	0,0248	0,0208	0,0236
35	24,7	0,0176	0,0238	0,0166	0,0191
36	24,7	0,0157	0,0282	0,0164	0,0193
37	24,7	0,0180	0,0212	0,0167	0,0144
38	24,7	0,0164	0,0269	0,0179	0,0212
39	24,6	0,0178	0,0322	0,0175	0,0160
40	24,58	0,0227	0,0319	0,0188	0,0167
41	24,5	0,0150	0,0268	0,0231	0,0219
42	24,5	0,0174	0,0185	0,0194	0,0248
43	24,5	0,0203	0,0289	0,0166	0,0194
44	24,49	0,0176	0,0250	0,0167	0,0220
45	24,48	0,0156	0,0231	0,0156	0,0191
46	24,49	0,0180	0,0239	0,0170	0,0251
47	24,5	0,0154	0,0349	0,0186	0,0173
48	24,5	0,0154	0,0349	0,0186	0,0173
49	24,44	0,0153	0,0188	0,0237	0,0199
50	24,41	0,0184	0,0220	0,0156	0,0209
Valor Médio (mm/m)		0,0176	0,0257	0,0199	0,0204
Desvio Padrão (mm/m)		0,0019	0,0043	0,0046	0,0031
Valor Máximo (mm/m)		0,0227	0,0349	0,0340	0,0269
Valor Mínimo (mm/m)		0,0150	0,0166	0,0156	0,0144

Tabela E.2: Resultados Numéricos para o Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Ângulo da Cabeça Motorizada(Perpendicularidade).

Ensaio	Temperatura (°C)	Ângulo (graus)		
		0	45	90
1	24,2	Valores Inválidos		
2	24,23			
3	24,29			
4	24,3			
5	24,36			
6	24,39			
7	24,4			
8	24,41			
9	24,44			
10	24,44			
11	24,4			
12	24,42	0,2008	0,2037	0,2059
13	24,46	0,2016	0,2136	0,2032
14	24,45	0,2090	0,2167	0,2017
15	24,43	0,2077	0,2133	0,2031
16	24,84	0,2036	0,2117	0,1998
17	24,5	0,2008	0,2084	0,2027
18	24,5	0,2013	0,2135	0,2025
19	24,5	0,2037	0,2097	0,2067
20	24,5	0,2073	0,2099	0,2089
21	24,5	0,2058	0,2165	0,2040
22	24,51	0,2081	0,2112	0,2036
23	24,53	0,2031	0,2105	0,2012
24	24,52	0,2089	0,2177	0,2033
25	24,54	0,2091	0,2141	0,2082
26	24,59	0,2047	0,2170	0,2056
27	24,6	0,2034	0,2139	0,2060
28	24,6	0,2065	0,2149	0,2072
29	24,6	0,2030	0,2128	0,2029
30	24,6	0,2059	0,2119	0,2079
31	24,61	0,2045	0,2140	0,2039
32	24,62	0,2020	0,2076	0,2016
33	24,62	0,2073	0,2168	0,2033
34	24,67	0,2054	0,2105	0,2094
35	24,7	0,2095	0,2184	0,2101
36	24,7	0,2084	0,2176	0,2060
37	24,7	0,2046	0,2106	0,2058
38	24,7	0,2021	0,2107	0,2093
39	24,6	0,2067	0,2110	0,2073
40	24,58	0,2054	0,2134	0,2025
41	24,5	0,2013	0,2094	0,2048
42	24,5	0,2062	0,2101	0,2029
43	24,5	0,2026	0,2101	0,2068
44	24,49	0,2080	0,2135	0,1929
45	24,48	0,2065	0,2117	0,2062
46	24,49	0,2080	0,2163	0,2089
47	24,5	0,2027	0,2124	0,2066
48	24,5	0,2027	0,2124	0,2066
49	24,44	0,2043	0,2120	0,2068
50	24,41	0,2036	0,2108	0,1999
Valor Médio (mm/m)		0,2050	0,2126	0,2048
Desvio Padrão (mm/m)		0,0026	0,0031	0,0033
Valor Máximo (mm/m)		0,2095	0,2184	0,2101
Valor Mínimo (mm/m)		0,2008	0,2037	0,1929

Anexo F

Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar o Número Mínimo de Pontos Para Definir uma Entidade Corretamente

Tabela F.1: Resultados numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro do círculo.

Numero de Pontos	3	4	5	6	7
Temperatura (°C)	22,29	22,36	22,41	22,43	22,53
1	12,0222	12,0139	12,0146	12,0169	12,0192
2	12,0227	12,0132	12,0150	12,0156	12,0198
3	12,0215	12,0131	12,0146	12,0145	12,0191
4	12,0204	12,0128	12,0152	12,0155	12,0192
5	12,0207	12,0130	12,0143	12,0139	12,0190
6	12,0215	12,0132	12,0145	12,0146	12,0201
7	12,0213	12,0135	12,0141	12,0147	12,0199
8	12,0217	12,0134	12,0147	12,0145	12,0195
9	12,0218	12,0137	12,0154	12,0150	12,0203
10	12,0215	12,0131	12,0146	12,0151	12,0194
11	12,0219	12,0134	12,0140	12,0152	12,0192
12	12,0205	12,0127	12,0142	12,0155	12,0193
13	12,0210	12,0132	12,0153	12,0158	12,0197
14	12,0219	12,0125	12,0150	12,0164	12,0198
15	12,0215	12,0132	12,0149	12,0164	12,0194
16	12,0208	12,0133	12,0142	12,0167	12,0193
17	12,0220	12,0130	12,0147	12,0170	12,0192
18	12,0220	12,0128	12,0150	12,0176	12,0192
19	12,0207	12,0140	12,0147	12,0175	12,0198
20	12,0214	12,0138	12,0141	12,0172	12,0197
21	12,0220	12,0139	12,0145	12,0173	12,0192
22	12,0213	12,0140	12,0147	12,0174	12,0200
23	12,0210	12,0130	12,0149	12,0176	12,0190
24	12,0208	12,0138	12,0148	12,0178	12,0193
25	12,0218	12,0138	12,0148	12,0176	12,0188
26	12,0213	12,0125	12,0155	12,0177	12,0195
27	12,0211	12,0136	12,0152	12,0178	12,0191
28	12,0214	12,0135	12,0149	12,0176	12,0196
29	12,0217	12,0124	12,0148	12,0179	12,0195
30	12,0219	12,0129	12,0148	12,0175	12,0193
31	12,0215	12,0132	12,0147	12,0170	12,0193
32	12,0212	12,0130	12,0149	12,0175	12,0199
33	12,0213	12,0139	12,0141	12,0175	12,0195
34	12,0216	12,0143	12,0145	12,0175	12,0197
35	12,0211	12,0143	12,0146	12,0175	12,0195
36	12,0211	12,0136	12,0148	12,0179	12,0192
37	12,0220	12,0131	12,0145	12,0176	12,0192
38	12,0220	12,0134	12,0142	12,0181	12,0197
39	12,0214	12,0136	12,0146	12,0174	12,0198
40	12,0210	12,0130	12,0151	12,0177	12,0195
41	12,0214	12,0135	12,0145	12,0177	12,0199
42	12,0208	12,0129	12,0146	12,0177	12,0192
43	12,0212	12,0134	12,0147	12,0181	12,0193
44	12,0212	12,0131	12,0153	12,0176	12,0192
45	12,0208	12,0136	12,0154	12,0177	12,0198
46	12,0212	12,0126	12,0153	12,0175	12,0191
47	12,0204	12,0130	12,0144	12,0170	12,0192
48	12,0211	12,0138	12,0149	12,0176	12,0192
49	12,0205	12,0130	12,0145	12,0176	12,0195
50	12,0211	12,0134	12,0147	12,0173	12,0194
Valor Médio (mm)	12,0213	12,0133	12,0147	12,0169	12,0195
Desvio Padrão (mm)	0,0005	0,0005	0,0004	0,0011	0,0003
Valor Máximo (mm)	12,0227	12,0143	12,0155	12,0181	12,0203
Valor Mínimo (mm)	12,0204	12,0124	12,0140	12,0139	12,0188

Tabela F.2: Continuação da tabela F.1.

Numero de Pontos	8	9	10	11	12
Temperatura (°C)	22,59	22,67	22,72	22,73	22,76
1	12,0174	12,0183	12,0170	12,0132	12,0175
2	12,0171	12,0185	12,0175	12,0140	12,0173
3	12,0176	12,0188	12,0175	12,0144	12,0170
4	12,0171	12,0185	12,0178	12,0143	12,0174
5	12,0170	12,0193	12,0177	12,0145	12,0168
6	12,0171	12,0187	12,0174	12,0143	12,0170
7	12,0173	12,0189	12,0172	12,0143	12,0175
8	12,0174	12,0189	12,0177	12,0141	12,0173
9	12,0171	12,0195	12,0176	12,0143	12,0169
10	12,0173	12,0191	12,0156	12,0141	12,0169
11	12,0177	12,0189	12,0163	12,0140	12,0174
12	12,0172	12,0188	12,0160	12,0142	12,0172
13	12,0170	12,0189	12,0161	12,0142	12,0170
14	12,0173	12,0193	12,0174	12,0142	12,0172
15	12,0168	12,0188	12,0175	12,0139	12,0172
16	12,0171	12,0189	12,0174	12,0141	12,0173
17	12,0173	12,0194	12,0178	12,0141	12,0169
18	12,0170	12,0193	12,0174	12,0142	12,0175
19	12,0176	12,0194	12,0176	12,0145	12,0169
20	12,0174	12,0189	12,0177	12,0143	12,0173
21	12,0168	12,0194	12,0174	12,0149	12,0174
22	12,0172	12,0187	12,0174	12,0147	12,0173
23	12,0174	12,0190	12,0175	12,0148	12,0175
24	12,0173	12,0193	12,0181	12,0143	12,0173
25	12,0174	12,0192	12,0174	12,0147	12,0174
26	12,0170	12,0189	12,0179	12,0145	12,0173
27	12,0166	12,0192	12,0178	12,0146	12,0175
28	12,0172	12,0194	12,0174	12,0145	12,0177
29	12,0166	12,0194	12,0177	12,0147	12,0169
30	12,0167	12,0193	12,0177	12,0147	12,0173
31	12,0173	12,0196	12,0179	12,0143	12,0174
32	12,0166	12,0190	12,0180	12,0141	12,0174
33	12,0170	12,0190	12,0176	12,0148	12,0172
34	12,0171	12,0192	12,0174	12,0150	12,0175
35	12,0176	12,0194	12,0176	12,0145	12,0174
36	12,0165	12,0193	12,0174	12,0147	12,0176
37	12,0177	12,0193	12,0174	12,0143	12,0179
38	12,0172	12,0186	12,0175	12,0144	12,0176
39	12,0174	12,0193	12,0175	12,0146	12,0179
40	12,0178	12,0190	12,0171	12,0144	12,0179
41	12,0174	12,0189	12,0174	12,0146	12,0178
42	12,0176	12,0189	12,0173	12,0147	12,0180
43	12,0173	12,0188	12,0180	12,0148	12,0176
44	12,0173	12,0188	12,0177	12,0150	12,0178
45	12,0169	12,0193	12,0180	12,0150	12,0176
46	12,0176	12,0187	12,0179	12,0146	12,0174
47	12,0174	12,0189	12,0171	12,0148	12,0173
48	12,0173	12,0191	12,0173	12,0148	12,0177
49	12,0175	12,0189	12,0171	12,0149	12,0177
50	12,0175	12,0188	12,0171	12,0150	12,0175
Valor Médio (mm)	12,0172	12,0190	12,0174	12,0145	12,0174
Desvio Padrão (mm)	0,0003	0,0003	0,0005	0,0004	0,0003
Valor Máximo (mm)	12,0178	12,0196	12,0181	12,0150	12,0180
Valor Mínimo (mm)	12,0165	12,0183	12,0156	12,0132	12,0168

Tabela F.3: Resultados numéricos para o ensaio onde se mede a tolerância do círculo.

Numero de Pontos	3	4	5	6	7
Temperatura (°C)	22,29	22,36	22,41	22,43	22,53
1	0,0000	0,0128	0,0164	0,0117	0,0117
2	0,0000	0,0130	0,0167	0,0112	0,0119
3	0,0000	0,0129	0,0153	0,0090	0,0120
4	0,0000	0,0127	0,0154	0,0091	0,0129
5	0,0000	0,0125	0,0161	0,0092	0,0135
6	0,0000	0,0131	0,0155	0,0094	0,0129
7	0,0000	0,0132	0,0159	0,0087	0,0132
8	0,0000	0,0123	0,0156	0,0089	0,0122
9	0,0000	0,0131	0,0154	0,0101	0,0129
10	0,0000	0,0126	0,0152	0,0092	0,0128
11	0,0000	0,0131	0,0164	0,0099	0,0130
12	0,0000	0,0120	0,0155	0,0102	0,0127
13	0,0000	0,0128	0,0158	0,0101	0,0128
14	0,0000	0,0124	0,0158	0,0103	0,0125
15	0,0000	0,0121	0,0161	0,0103	0,0127
16	0,0000	0,0131	0,0160	0,0101	0,0135
17	0,0000	0,0124	0,0154	0,0106	0,0135
18	0,0000	0,0125	0,0153	0,0115	0,0129
19	0,0000	0,0124	0,0166	0,0123	0,0121
20	0,0000	0,0120	0,0161	0,0111	0,0117
21	0,0000	0,0122	0,0163	0,0122	0,0131
22	0,0000	0,0132	0,0162	0,0112	0,0132
23	0,0000	0,0126	0,0163	0,0106	0,0126
24	0,0000	0,0128	0,0154	0,0123	0,0126
25	0,0000	0,0128	0,0161	0,0120	0,0131
26	0,0000	0,0128	0,0160	0,0110	0,0123
27	0,0000	0,0137	0,0160	0,0111	0,0124
28	0,0000	0,0136	0,0156	0,0121	0,0127
29	0,0000	0,0138	0,0157	0,0118	0,0125
30	0,0000	0,0128	0,0169	0,0115	0,0128
31	0,0000	0,0124	0,0159	0,0116	0,0136
32	0,0000	0,0132	0,0164	0,0118	0,0116
33	0,0000	0,0126	0,0160	0,0114	0,0127
34	0,0000	0,0130	0,0158	0,0118	0,0126
35	0,0000	0,0132	0,0159	0,0110	0,0131
36	0,0000	0,0127	0,0156	0,0113	0,0128
37	0,0000	0,0132	0,0153	0,0123	0,0128
38	0,0000	0,0128	0,0154	0,0116	0,0121
39	0,0000	0,0131	0,0160	0,0116	0,0126
40	0,0000	0,0130	0,0160	0,0114	0,0126
41	0,0000	0,0134	0,0167	0,0115	0,0119
42	0,0000	0,0130	0,0171	0,0119	0,0123
43	0,0000	0,0128	0,0153	0,0114	0,0126
44	0,0000	0,0129	0,0157	0,0116	0,0122
45	0,0000	0,0128	0,0158	0,0117	0,0129
46	0,0000	0,0125	0,0159	0,0114	0,0120
47	0,0000	0,0124	0,0162	0,0113	0,0116
48	0,0000	0,0127	0,0157	0,0112	0,0135
49	0,0000	0,0128	0,0166	0,0115	0,0121
50	0,0000	0,0123	0,0167	0,0119	0,0130
Valor Médio (mm)	0,0000	0,0128	0,0159	0,0110	0,0126
Desvio Padrão (mm)	0,0000	0,0004	0,0005	0,0010	0,0005
Valor Máximo (mm)	0,0000	0,0138	0,0171	0,0123	0,0136
Valor Mínimo (mm)	0,0000	0,0120	0,0152	0,0087	0,0116

Tabela F.4: Continuação da tabela F.3.

Numero de Pontos	8	9	10	11	12
Temperatura (°C)	22,59	22,67	22,72	22,73	22,76
1	0,0182	0,0239	0,0174	0,0148	0,0196
2	0,0198	0,0226	0,0177	0,0159	0,0189
3	0,0193	0,0219	0,0184	0,0159	0,0191
4	0,0187	0,0220	0,0183	0,0158	0,0189
5	0,0184	0,0213	0,0186	0,0154	0,0197
6	0,0185	0,0213	0,0189	0,0159	0,0184
7	0,0196	0,0214	0,0190	0,0155	0,0200
8	0,0186	0,0218	0,0196	0,0156	0,0199
9	0,0188	0,0212	0,0188	0,0161	0,0189
10	0,0188	0,0219	0,0199	0,0167	0,0194
11	0,0192	0,0221	0,0198	0,0156	0,0189
12	0,0196	0,0218	0,0197	0,0155	0,0191
13	0,0175	0,0209	0,0208	0,0169	0,0195
14	0,0190	0,0215	0,0192	0,0153	0,0187
15	0,0193	0,0214	0,0197	0,0159	0,0189
16	0,0182	0,0218	0,0199	0,0165	0,0198
17	0,0192	0,0210	0,0194	0,0161	0,0189
18	0,0188	0,0219	0,0194	0,0164	0,0191
19	0,0181	0,0215	0,0198	0,0151	0,0198
20	0,0191	0,0210	0,0196	0,0154	0,0199
21	0,0187	0,0212	0,0192	0,0166	0,0191
22	0,0181	0,0212	0,0190	0,0157	0,0194
23	0,0198	0,0214	0,0199	0,0157	0,0189
24	0,0192	0,0205	0,0191	0,0150	0,0188
25	0,0181	0,0211	0,0186	0,0160	0,0188
26	0,0183	0,0205	0,0192	0,0161	0,0186
27	0,0190	0,0213	0,0197	0,0165	0,0193
28	0,0188	0,0211	0,0194	0,0177	0,0186
29	0,0187	0,0212	0,0200	0,0180	0,0187
30	0,0190	0,0207	0,0200	0,0160	0,0196
31	0,0188	0,0212	0,0199	0,0157	0,0190
32	0,0189	0,0213	0,0204	0,0154	0,0191
33	0,0192	0,0210	0,0201	0,0160	0,0191
34	0,0189	0,0216	0,0189	0,0157	0,0190
35	0,0184	0,0218	0,0203	0,0159	0,0187
36	0,0193	0,0214	0,0194	0,0164	0,0187
37	0,0186	0,0215	0,0210	0,0145	0,0188
38	0,0187	0,0214	0,0194	0,0160	0,0188
39	0,0195	0,0216	0,0195	0,0162	0,0192
40	0,0189	0,0221	0,0195	0,0155	0,0181
41	0,0184	0,0215	0,0203	0,0156	0,0193
42	0,0197	0,0222	0,0200	0,0150	0,0185
43	0,0188	0,0217	0,0200	0,0161	0,0188
44	0,0189	0,0218	0,0201	0,0158	0,0188
45	0,0196	0,0220	0,0207	0,0168	0,0196
46	0,0185	0,0223	0,0206	0,0161	0,0192
47	0,0189	0,0218	0,0193	0,0157	0,0190
48	0,0190	0,0222	0,0198	0,0152	0,0194
49	0,0191	0,0220	0,0190	0,0157	0,0203
50	0,0184	0,0226	0,0202	0,0162	0,0193
Valor Médio (mm)	0,0189	0,0216	0,0195	0,0159	0,0191
Desvio Padrão (mm)	0,0005	0,0006	0,0007	0,0006	0,0005
Valor Máximo (mm)	0,0198	0,0239	0,0210	0,0180	0,0203
Valor Mínimo (mm)	0,0175	0,0205	0,0174	0,0145	0,0181

Tabela F.5: Resultados numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro da esfera.

Numero de Pontos	5	9	13	17	25	33
Temperatura (°C)	22,29	22,36	22,41	22,43	22,53	22,59
1	15,8750	15,8743	15,8729	15,8738	15,8722	15,8739
2	15,8748	15,8742	15,8713	15,8740	15,8733	15,8742
3	15,8748	15,8731	15,8713	15,8733	15,8723	15,8745
4	15,8759	15,8727	15,8700	15,8736	15,8730	15,8747
5	15,8745	15,8729	15,8717	15,8738	15,8727	15,8745
6	15,8756	15,8733	15,8718	15,8737	15,8723	15,8744
7	15,8752	15,8740	15,8715	15,8734	15,8727	15,8746
8	15,8759	15,8725	15,8724	15,8732	15,8727	15,8745
9	15,8753	15,8730	15,8721	15,8734	15,8731	15,8743
10	15,8763	15,8733	15,8720	15,8730	15,8727	15,8744
11	15,8759	15,8724	15,8709	15,8728	15,8726	15,8740
12	15,8751	15,8738	15,8711	15,8733	15,8732	15,8743
13	15,8750	15,8735	15,8708	15,8731	15,8731	15,8744
14	15,8757	15,8729	15,8711	15,8733	15,8731	15,8744
15	15,8746	15,8731	15,8709	15,8738	15,8730	15,8745
16	15,8754	15,8732	15,8706	15,8724	15,8733	15,8741
17	15,8752	15,8728	15,8713	15,8737	15,8731	15,8745
18	15,8758	15,8729	15,8713	15,8732	15,8729	15,8743
19	15,8747	15,8726	15,8723	15,8734	15,8730	15,8742
20	15,8746	15,8728	15,8710	15,8739	15,8729	15,8743
21	15,8745	15,8741	15,8712	15,8732	15,8725	15,8743
22	15,8746	15,8743	15,8715	15,8733	15,8731	15,8744
23	15,8746	15,8731	15,8723	15,8733	15,8730	15,8743
24	15,8735	15,8731	15,8706	15,8725	15,8729	15,8743
25	15,8751	15,8728	15,8713	15,8732	15,8731	15,8742
26	15,8748	15,8729	15,8710	15,8733	15,8728	15,8743
27	15,8754	15,8736	15,8716	15,8733	15,8728	15,8743
28	15,8743	15,8734	15,8726	15,8730	15,8729	15,8746
29	15,8751	15,8733	15,8725	15,8734	15,8732	15,8743
30	15,8734	15,8730	15,8721	15,8732	15,8731	15,8740
31	15,8754	15,8732	15,8707	15,8734	15,8731	15,8743
32	15,8756	15,8731	15,8707	15,8742	15,8729	15,8745
33	15,8747	15,8733	15,8715	15,8733	15,8730	15,8745
34	15,8752	15,8733	15,8706	15,8733	15,8735	15,8743
35	15,8752	15,8735	15,8718	15,8735	15,8728	15,8742
36	15,8753	15,8732	15,8714	15,8732	15,8730	15,8743
37	15,8745	15,8736	15,8711	15,8734	15,8726	15,8746
38	15,8757	15,8718	15,8726	15,8733	15,8738	15,8745
39	15,8749	15,8728	15,8721	15,8735	15,8732	15,8743
40	15,8748	15,8738	15,8716	15,8735	15,8731	15,8741
41	15,8748	15,8731	15,8721	15,8732	15,8734	15,8744
42	15,8752	15,8735	15,8714	15,8737	15,8731	15,8745
43	15,8758	15,8729	15,8711	15,8733	15,8736	15,8746
44	15,8749	15,8732	15,8717	15,8732	15,8735	15,8743
45	15,8747	15,8731	15,8727	15,8736	15,8731	15,8745
46	15,8750	15,8728	15,8719	15,8729	15,8733	15,8740
47	15,8751	15,8728	15,8710	15,8731	15,8732	15,8745
48	15,8747	15,8730	15,8718	15,8732	15,8736	15,8745
49	15,8745	15,8733	15,8716	15,8726	15,8737	15,8748
50	15,8753	15,8729	15,8723	15,8731	15,8731	15,8743
Valor Médio (mm)	15,8750	15,8732	15,8715	15,8733	15,8730	15,8744
Desvio Padrão (mm)	0,0006	0,0005	0,0006	0,0003	0,0003	0,0002
Valor Máximo (mm)	15,8763	15,8743	15,8729	15,8742	15,8738	15,8748
Valor Mínimo (mm)	15,8734	15,8718	15,8700	15,8724	15,8722	15,8739

Tabela F.6: Resultados numéricos para o ensaio onde se mede a tolerância da esfera.

Numero de Pontos	5	9	13	17	25	33
Temperatura (°C)	22,29	22,36	22,41	22,43	22,53	22,59
1	0,0021	0,0018	0,0021	0,0053	0,0056	0,0048
2	0,0027	0,0021	0,0017	0,0027	0,0032	0,0050
3	0,0025	0,0022	0,0019	0,0038	0,0041	0,0053
4	0,0034	0,0019	0,0009	0,0034	0,0052	0,0055
5	0,0019	0,0022	0,0017	0,0034	0,0034	0,0061
6	0,0026	0,0013	0,0018	0,0033	0,0041	0,0050
7	0,0022	0,0015	0,0024	0,0029	0,0036	0,0046
8	0,0026	0,0015	0,0022	0,0032	0,0033	0,0051
9	0,0030	0,0020	0,0026	0,0032	0,0029	0,0044
10	0,0029	0,0015	0,0019	0,0026	0,0037	0,0056
11	0,0030	0,0020	0,0022	0,0041	0,0042	0,0054
12	0,0020	0,0021	0,0021	0,0032	0,0034	0,0052
13	0,0031	0,0015	0,0019	0,0034	0,0037	0,0048
14	0,0030	0,0026	0,0016	0,0032	0,0052	0,0050
15	0,0018	0,0033	0,0019	0,0026	0,0028	0,0054
16	0,0036	0,0029	0,0024	0,0031	0,0024	0,0056
17	0,0036	0,0022	0,0022	0,0027	0,0037	0,0046
18	0,0032	0,0017	0,0028	0,0030	0,0041	0,0050
19	0,0015	0,0023	0,0026	0,0028	0,0037	0,0055
20	0,0024	0,0018	0,0023	0,0025	0,0033	0,0055
21	0,0027	0,0019	0,0018	0,0035	0,0032	0,0052
22	0,0022	0,0022	0,0022	0,0023	0,0042	0,0048
23	0,0014	0,0022	0,0020	0,0027	0,0041	0,0054
24	0,0015	0,0023	0,0030	0,0030	0,0032	0,0056
25	0,0029	0,0018	0,0020	0,0023	0,0028	0,0064
26	0,0023	0,0017	0,0019	0,0028	0,0030	0,0056
27	0,0025	0,0021	0,0024	0,0024	0,0034	0,0055
28	0,0019	0,0015	0,0028	0,0034	0,0035	0,0045
29	0,0025	0,0016	0,0025	0,0028	0,0040	0,0058
30	0,0014	0,0023	0,0020	0,0029	0,0036	0,0057
31	0,0024	0,0018	0,0032	0,0028	0,0038	0,0051
32	0,0024	0,0015	0,0016	0,0031	0,0042	0,0045
33	0,0015	0,0024	0,0014	0,0026	0,0032	0,0044
34	0,0014	0,0018	0,0019	0,0025	0,0036	0,0052
35	0,0016	0,0021	0,0021	0,0029	0,0030	0,0053
36	0,0026	0,0019	0,0022	0,0025	0,0037	0,0061
37	0,0020	0,0018	0,0019	0,0025	0,0033	0,0047
38	0,0017	0,0024	0,0019	0,0028	0,0031	0,0050
39	0,0020	0,0018	0,0030	0,0035	0,0036	0,0050
40	0,0019	0,0020	0,0019	0,0031	0,0028	0,0053
41	0,0018	0,0019	0,0033	0,0028	0,0031	0,0046
42	0,0023	0,0016	0,0017	0,0022	0,0035	0,0048
43	0,0015	0,0017	0,0026	0,0028	0,0038	0,0049
44	0,0020	0,0016	0,0018	0,0028	0,0037	0,0056
45	0,0021	0,0016	0,0028	0,0027	0,0052	0,0050
46	0,0017	0,0012	0,0020	0,0031	0,0039	0,0047
47	0,0017	0,0020	0,0029	0,0026	0,0043	0,0048
48	0,0022	0,0012	0,0020	0,0033	0,0034	0,0050
49	0,0023	0,0018	0,0027	0,0031	0,0030	0,0046
50	0,0019	0,0017	0,0018	0,0032	0,0038	0,0061
Valor Médio (mm)	0,0023	0,0019	0,0022	0,0030	0,0037	0,0052
Desvio Padrão (mm)	0,0006	0,0004	0,0005	0,0005	0,0007	0,0005
Valor Máximo (mm)	0,0036	0,0033	0,0033	0,0053	0,0056	0,0064
Valor Mínimo (mm)	0,0014	0,0012	0,0009	0,0022	0,0024	0,0044

Tabela F.7: Resultados numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro do cilindro.

Numero de Pontos	5	6	7	8	9
Temperatura (°C)	22,29	22,36	22,41	22,43	22,53
1	12,0172	12,0164	12,0128	12,0147	12,0166
2	12,0182	12,0166	12,0124	12,0145	12,0166
3	12,0176	12,0158	12,0131	12,0145	12,0170
4	12,0175	12,0164	12,0125	12,0143	12,0171
5	12,0176	12,0169	12,0125	12,0142	12,0170
6	12,0183	12,0166	12,0132	12,0145	12,0174
7	12,0172	12,0166	12,0127	12,0147	12,0170
8	12,0176	12,0164	12,0127	12,0144	12,0168
9	12,0176	12,0166	12,0128	12,0145	12,0168
10	12,0182	12,0166	12,0131	12,0144	12,0164
11	12,0173	12,0165	12,0126	12,0146	12,0170
12	12,0172	12,0161	12,0132	12,0152	12,0170
13	12,0173	12,0163	12,0128	12,0150	12,0170
14	12,0182	12,0158	12,0129	12,0149	12,0170
15	12,0181	12,0166	12,0127	12,0145	12,0169
16	12,0181	12,0169	12,0126	12,0149	12,0165
17	12,0181	12,0164	12,0132	12,0145	12,0167
18	12,0183	12,0165	12,0127	12,0151	12,0172
19	12,0177	12,0170	12,0128	12,0150	12,0167
20	12,0180	12,0167	12,0127	12,0146	12,0164
21	12,0188	12,0166	12,0134	12,0150	12,0170
22	12,0178	12,0162	12,0125	12,0145	12,0168
23	12,0179	12,0162	12,0125	12,0146	12,0166
24	12,0179	12,0165	12,0126	12,0157	12,0174
25	12,0185	12,0166	12,0131	12,0144	12,0168
26	12,0176	12,0165	12,0128	12,0149	12,0169
27	12,0175	12,0166	12,0127	12,0145	12,0168
28	12,0183	12,0173	12,0129	12,0150	12,0158
29	12,0177	12,0162	12,0126	12,0147	12,0168
30	12,0173	12,0165	12,0125	12,0147	12,0172
31	12,0173	12,0168	12,0127	12,0150	12,0165
32	12,0181	12,0162	12,0123	12,0149	12,0172
33	12,0180	12,0164	12,0134	12,0145	12,0167
34	12,0172	12,0163	12,0130	12,0152	12,0168
35	12,0173	12,0166	12,0127	12,0150	12,0174
36	12,0174	12,0161	12,0124	12,0149	12,0169
37	12,0170	12,0165	12,0123	12,0149	12,0166
38	12,0181	12,0163	12,0128	12,0152	12,0166
39	12,0178	12,0163	12,0132	12,0148	12,0167
40	12,0174	12,0162	12,0129	12,0149	12,0169
41	12,0176	12,0165	12,0131	12,0149	12,0165
42	12,0176	12,0163	12,0127	12,0144	12,0167
43	12,0174	12,0156	12,0132	12,0147	12,0169
44	12,0174	12,0162	12,0128	12,0152	12,0169
45	12,0176	12,0163	12,0128	12,0147	12,0169
46	12,0179	12,0161	12,0123	12,0155	12,0162
47	12,0184	12,0163	12,0131	12,0147	12,0163
48	12,0180	12,0164	12,0130	12,0151	12,0166
49	12,0169	12,0161	12,0126	12,0150	12,0168
50	12,0184	12,0161	12,0127	12,0152	12,0169
Valor Médio (mm)	12,0177	12,0164	12,0128	12,0148	12,0168
Desvio Padrão (mm)	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Valor Máximo (mm)	12,0188	12,0173	12,0134	12,0157	12,0174
Valor Mínimo (mm)	12,0169	12,0156	12,0123	12,0142	12,0158

Tabela F.8: Continuação da tabela F.7.

Numero de Pontos	10	11	12	13	14
Temperatura (°C)	22,59	22,67	22,72	22,73	22,76
1	12,0144	12,0149	12,0140	12,0155	12,0152
2	12,0156	12,0154	12,0152	12,0159	12,0152
3	12,0150	12,0154	12,0155	12,0157	12,0148
4	12,0151	12,0154	12,0158	12,0159	12,0155
5	12,0150	12,0156	12,0155	12,0158	12,0153
6	12,0152	12,0153	12,0154	12,0156	12,0155
7	12,0150	12,0158	12,0156	12,0160	12,0150
8	12,0147	12,0155	12,0152	12,0155	12,0156
9	12,0150	12,0153	12,0157	12,0154	12,0153
10	12,0144	12,0152	12,0154	12,0158	12,0151
11	12,0150	12,0152	12,0152	12,0155	12,0156
12	12,0153	12,0154	12,0152	12,0157	12,0154
13	12,0146	12,0154	12,0154	12,0155	12,0152
14	12,0150	12,0150	12,0156	12,0154	12,0156
15	12,0155	12,0153	12,0155	12,0152	12,0155
16	12,0148	12,0155	12,0154	12,0149	12,0156
17	12,0149	12,0152	12,0156	12,0152	12,0157
18	12,0153	12,0153	12,0155	12,0155	12,0157
19	12,0149	12,0157	12,0154	12,0156	12,0158
20	12,0150	12,0154	12,0159	12,0153	12,0156
21	12,0152	12,0152	12,0157	12,0156	12,0155
22	12,0146	12,0151	12,0156	12,0158	12,0158
23	12,0149	12,0157	12,0157	12,0154	12,0158
24	12,0151	12,0156	12,0158	12,0156	12,0160
25	12,0147	12,0157	12,0159	12,0160	12,0156
26	12,0147	12,0151	12,0156	12,0159	12,0160
27	12,0153	12,0154	12,0159	12,0160	12,0156
28	12,0144	12,0154	12,0155	12,0158	12,0157
29	12,0150	12,0158	12,0152	12,0157	12,0152
30	12,0151	12,0153	12,0156	12,0157	12,0151
31	12,0144	12,0153	12,0153	12,0158	12,0154
32	12,0147	12,0152	12,0155	12,0155	12,0152
33	12,0149	12,0155	12,0157	12,0162	12,0153
34	12,0150	12,0157	12,0154	12,0160	12,0151
35	12,0150	12,0156	12,0154	12,0160	12,0153
36	12,0153	12,0158	12,0156	12,0157	12,0152
37	12,0152	12,0156	12,0157	12,0157	12,0156
38	12,0148	12,0155	12,0156	12,0159	12,0155
39	12,0150	12,0153	12,0154	12,0159	12,0155
40	12,0152	12,0157	12,0154	12,0158	12,0155
41	12,0157	12,0154	12,0152	12,0160	12,0159
42	12,0153	12,0152	12,0155	12,0157	12,0162
43	12,0150	12,0153	12,0157	12,0163	12,0155
44	12,0154	12,0153	12,0156	12,0161	12,0157
45	12,0150	12,0160	12,0157	12,0158	12,0157
46	12,0149	12,0157	12,0158	12,0155	12,0156
47	12,0154	12,0154	12,0161	12,0157	12,0160
48	12,0149	12,0157	12,0159	12,0156	12,0155
49	12,0148	12,0154	12,0157	12,0153	12,0157
50	12,0155	12,0154	12,0154	12,0160	12,0155
Valor Médio (mm)	12,0150	12,0154	12,0155	12,0157	12,0155
Desvio Padrão (mm)	0,0003	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003
Valor Máximo (mm)	12,0157	12,0160	12,0161	12,0163	12,0162
Valor Mínimo (mm)	12,0144	12,0149	12,0140	12,0149	12,0148

Tabela F.9: Resultados numéricos para o ensaio onde se mede a tolerância do cilindro.

Numero de Pontos	5	6	7	8	9
Temperatura (°C)	22,29	22,36	22,41	22,43	22,53
1	0,0000	0,0003	0,0120	0,0164	0,0205
2	0,0000	0,0001	0,0120	0,0162	0,0208
3	0,0000	0,0003	0,0120	0,0149	0,0215
4	0,0000	0,0000	0,0112	0,0146	0,0212
5	0,0000	0,0002	0,0116	0,0162	0,0213
6	0,0000	0,0005	0,0121	0,0153	0,0221
7	0,0000	0,0009	0,0120	0,0153	0,0215
8	0,0000	0,0010	0,0116	0,0154	0,0217
9	0,0000	0,0005	0,0117	0,0157	0,0221
10	0,0000	0,0010	0,0113	0,0155	0,0212
11	0,0000	0,0008	0,0114	0,0154	0,0221
12	0,0000	0,0005	0,0115	0,0154	0,0214
13	0,0000	0,0003	0,0112	0,0151	0,0217
14	0,0000	0,0006	0,0112	0,0155	0,0224
15	0,0000	0,0007	0,0124	0,0153	0,0222
16	0,0000	0,0006	0,0122	0,0160	0,0212
17	0,0000	0,0008	0,0115	0,0162	0,0215
18	0,0000	0,0005	0,0119	0,0158	0,0213
19	0,0000	0,0002	0,0122	0,0159	0,0222
20	0,0000	0,0004	0,0115	0,0151	0,0213
21	0,0000	0,0005	0,0116	0,0157	0,0210
22	0,0000	0,0008	0,0131	0,0149	0,0215
23	0,0000	0,0005	0,0123	0,0153	0,0206
24	0,0000	0,0008	0,0117	0,0160	0,0212
25	0,0000	0,0006	0,0120	0,0153	0,0209
26	0,0000	0,0006	0,0113	0,0152	0,0210
27	0,0000	0,0006	0,0121	0,0155	0,0214
28	0,0000	0,0010	0,0119	0,0160	0,0212
29	0,0000	0,0006	0,0116	0,0157	0,0215
30	0,0000	0,0006	0,0122	0,0158	0,0214
31	0,0000	0,0008	0,0120	0,0152	0,0208
32	0,0000	0,0003	0,0120	0,0156	0,0215
33	0,0000	0,0008	0,0119	0,0153	0,0213
34	0,0000	0,0002	0,0123	0,0155	0,0223
35	0,0000	0,0005	0,0109	0,0149	0,0224
36	0,0000	0,0010	0,0132	0,0158	0,0218
37	0,0000	0,0004	0,0121	0,0155	0,0205
38	0,0000	0,0007	0,0118	0,0155	0,0211
39	0,0000	0,0007	0,0118	0,0154	0,0210
40	0,0000	0,0004	0,0119	0,0145	0,0209
41	0,0000	0,0004	0,0121	0,0156	0,0212
42	0,0000	0,0002	0,0118	0,0157	0,0211
43	0,0000	0,0007	0,0123	0,0158	0,0206
44	0,0000	0,0004	0,0115	0,0160	0,0219
45	0,0000	0,0003	0,0125	0,0161	0,0213
46	0,0000	0,0003	0,0119	0,0153	0,0219
47	0,0000	0,0006	0,0118	0,0159	0,0224
48	0,0000	0,0008	0,0122	0,0155	0,0214
49	0,0000	0,0003	0,0128	0,0155	0,0209
50	0,0000	0,0003	0,0121	0,0155	0,0211
Valor Médio (mm)	0,0000	0,0005	0,0119	0,0155	0,0214
Desvio Padrão (mm)	0,0000	0,0003	0,0005	0,0004	0,0005
Valor Máximo (mm)	0,0000	0,0010	0,0132	0,0164	0,0224
Valor Mínimo (mm)	0,0000	0,0000	0,0109	0,0145	0,0205

Tabela F.10: Continuação da tabela F.9.

Numero de Pontos	10	11	12	13	14
Temperatura (°C)	22,59	22,67	22,72	22,73	22,76
1	0,0169	0,0168	0,0221	0,0176	0,0201
2	0,0184	0,0163	0,0209	0,0182	0,0196
3	0,0175	0,0167	0,0196	0,0178	0,0196
4	0,0184	0,0174	0,0211	0,0186	0,0192
5	0,0180	0,0169	0,0196	0,0190	0,0200
6	0,0183	0,0168	0,0196	0,0187	0,0198
7	0,0191	0,0171	0,0201	0,0183	0,0196
8	0,0172	0,0170	0,0195	0,0181	0,0195
9	0,0173	0,0165	0,0203	0,0174	0,0195
10	0,0172	0,0166	0,0200	0,0181	0,0191
11	0,0180	0,0169	0,0194	0,0169	0,0193
12	0,0180	0,0175	0,0191	0,0178	0,0195
13	0,0181	0,0169	0,0199	0,0168	0,0196
14	0,0174	0,0166	0,0197	0,0174	0,0195
15	0,0180	0,0174	0,0200	0,0175	0,0204
16	0,0178	0,0165	0,0190	0,0175	0,0204
17	0,0180	0,0164	0,0197	0,0173	0,0203
18	0,0170	0,0170	0,0193	0,0178	0,0192
19	0,0184	0,0174	0,0192	0,0174	0,0197
20	0,0179	0,0166	0,0202	0,0184	0,0194
21	0,0174	0,0167	0,0200	0,0171	0,0199
22	0,0173	0,0168	0,0197	0,0173	0,0199
23	0,0168	0,0164	0,0202	0,0179	0,0205
24	0,0172	0,0170	0,0195	0,0170	0,0199
25	0,0177	0,0159	0,0190	0,0178	0,0195
26	0,0171	0,0172	0,0202	0,0180	0,0200
27	0,0179	0,0171	0,0202	0,0166	0,0190
28	0,0180	0,0165	0,0201	0,0171	0,0197
29	0,0177	0,0170	0,0195	0,0174	0,0198
30	0,0172	0,0171	0,0199	0,0170	0,0193
31	0,0181	0,0169	0,0202	0,0171	0,0196
32	0,0167	0,0156	0,0198	0,0171	0,0197
33	0,0180	0,0169	0,0194	0,0178	0,0198
34	0,0181	0,0173	0,0195	0,0173	0,0198
35	0,0177	0,0158	0,0194	0,0175	0,0192
36	0,0180	0,0166	0,0204	0,0176	0,0198
37	0,0179	0,0171	0,0195	0,0171	0,0196
38	0,0179	0,0169	0,0195	0,0177	0,0195
39	0,0182	0,0163	0,0188	0,0170	0,0202
40	0,0179	0,0168	0,0194	0,0182	0,0187
41	0,0181	0,0164	0,0194	0,0169	0,0199
42	0,0180	0,0166	0,0202	0,0175	0,0193
43	0,0175	0,0168	0,0203	0,0178	0,0191
44	0,0176	0,0173	0,0198	0,0178	0,0194
45	0,0173	0,0173	0,0187	0,0169	0,0186
46	0,0180	0,0170	0,0197	0,0185	0,0196
47	0,0180	0,0172	0,0200	0,0184	0,0195
48	0,0181	0,0172	0,0180	0,0175	0,0197
49	0,0184	0,0168	0,0199	0,0167	0,0199
50	0,0179	0,0176	0,0192	0,0174	0,0195
Valor Médio (mm)	0,0178	0,0168	0,0198	0,0176	0,0196
Desvio Padrão (mm)	0,0005	0,0004	0,0006	0,0006	0,0004
Valor Máximo (mm)	0,0191	0,0176	0,0221	0,0190	0,0205
Valor Mínimo (mm)	0,0167	0,0156	0,0180	0,0166	0,0186

Anexo G

Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Comprimento da Ponteira

Tabela G.1: Resultados Numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro da esfera.

Comprimento (mm)	10	20	30	40
Temperatura (°C)	22,78	22,85	22,88	22,90
1	19,0492	19,0482	19,0485	19,0446
2	19,0489	19,0479	19,0468	19,0434
3	19,0496	19,0481	19,0479	19,0436
4	19,0491	19,0482	19,0475	19,0432
5	19,0491	19,0476	19,0476	19,0442
6	19,0493	19,0477	19,0462	19,0428
7	19,0490	19,0477	19,0471	19,0436
8	19,0487	19,0486	19,0472	19,0440
9	19,0492	19,0477	19,0469	19,0437
10	19,0494	19,0472	19,0469	19,0432
11	19,0494	19,0476	19,0466	19,0446
12	19,0487	19,0479	19,0474	19,0430
13	19,0491	19,0471	19,0476	19,0439
14	19,0486	19,0484	19,0464	19,0438
15	19,0490	19,0474	19,0471	19,0431
16	19,0483	19,0484	19,0473	19,0434
17	19,0486	19,0482	19,0472	19,0434
18	19,0490	19,0476	19,0465	19,0436
19	19,0490	19,0483	19,0471	19,0439
20	19,0486	19,0476	19,0471	19,0440
21	19,0485	19,0482	19,0471	19,0435
22	19,0492	19,0475	19,0461	19,0437
23	19,0485	19,0470	19,0469	19,0436
24	19,0493	19,0478	19,0474	19,0434
25	19,0489	19,0477	19,0465	19,0433
26	19,0491	19,0474	19,0477	19,0438
27	19,0493	19,0470	19,0466	19,0430
28	19,0492	19,0472	19,0468	19,0441
29	19,0497	19,0471	19,0470	19,0435
30	19,0492	19,0467	19,0476	19,0437
31	19,0495	19,0470	19,0468	19,0443
32	19,0493	19,0476	19,0474	19,0438
33	19,0485	19,0480	19,0468	19,0435
34	19,0491	19,0480	19,0469	19,0441
35	19,0492	19,0483	19,0466	19,0433
36	19,0488	19,0480	19,0469	19,0431
37	19,0493	19,0480	19,0477	19,0428
38	19,0491	19,0472	19,0473	19,0429
39	19,0497	19,0477	19,0466	19,0433
40	19,0492	19,0477	19,0466	19,0433
41	19,0488	19,0481	19,0469	19,0440
42	19,0492	19,0478	19,0454	19,0433
43	19,0490	19,0483	19,0467	19,0435
44	19,0494	19,0477	19,0468	19,0439
45	19,0486	19,0479	19,0459	19,0439
46	19,0490	19,0482	19,0471	19,0436
47	19,0489	19,0482	19,0463	19,0434
48	19,0489	19,0479	19,0475	19,0435
49	19,0487	19,0485	19,0466	19,0432
50	19,0493	19,0485	19,0467	19,0440
Valor Médio (mm)	19,0490	19,0478	19,0470	19,0436
Desvio Padrão (mm)	0,0003	0,0005	0,0005	0,0004
Valor Máximo (mm)	19,0497	19,0486	19,0485	19,0446
Valor Mínimo (mm)	19,0483	19,0467	19,0454	19,0428

Tabela G.2: Continuação da tabela G.1.

Comprimento (mm)	50	60	70	80
Temperatura (°C)	22,93	22,84	22,79	22,72
1	19,0492	19,0505	19,0428	19,0690
2	19,0489	19,0497	19,0414	19,0675
3	19,0493	19,0484	19,0418	19,0681
4	19,0487	19,0484	19,0416	19,0679
5	19,0479	19,0486	19,0417	19,0676
6	19,0485	19,0485	19,0418	19,0672
7	19,0489	19,0479	19,0424	19,0674
8	19,0477	19,0478	19,0425	19,0663
9	19,0465	19,0482	19,0420	19,0675
10	19,0476	19,0479	19,0412	19,0670
11	19,0484	19,0482	19,0423	19,0673
12	19,0484	19,0484	19,0419	19,0671
13	19,0488	19,0488	19,0411	19,0675
14	19,0478	19,0477	19,0423	19,0671
15	19,0489	19,0470	19,0422	19,0666
16	19,0485	19,0477	19,0416	19,0670
17	19,0483	19,0480	19,0414	19,0669
18	19,0489	19,0478	19,0416	19,0662
19	19,0490	19,0474	19,0422	19,0664
20	19,0488	19,0482	19,0429	19,0671
21	19,0485	19,0484	19,0423	19,0670
22	19,0487	19,0484	19,0434	19,0666
23	19,0479	19,0480	19,0422	19,0662
24	19,0482	19,0481	19,0424	19,0666
25	19,0484	19,0476	19,0419	19,0669
26	19,0483	19,0480	19,0417	19,0665
27	19,0487	19,0481	19,0424	19,0667
28	19,0486	19,0478	19,0423	19,0674
29	19,0490	19,0486	19,0427	19,0669
30	19,0489	19,0481	19,0425	19,0673
31	19,0493	19,0477	19,0419	19,0671
32	19,0489	19,0479	19,0422	19,0670
33	19,0482	19,0482	19,0420	19,0674
34	19,0487	19,0474	19,0418	19,0680
35	19,0487	19,0477	19,0415	19,0679
36	19,0487	19,0475	19,0419	19,0672
37	19,0489	19,0479	19,0420	19,0667
38	19,0492	19,0481	19,0413	19,0676
39	19,0496	19,0482	19,0420	19,0676
40	19,0484	19,0472	19,0422	19,0658
41	19,0490	19,0474	19,0418	19,0675
42	19,0491	19,0476	19,0425	19,0662
43	19,0489	19,0477	19,0424	19,0660
44	19,0484	19,0487	19,0415	19,0664
45	19,0488	19,0483	19,0409	19,0666
46	19,0488	19,0476	19,0411	19,0658
47	19,0484	19,0477	19,0420	19,0678
48	19,0488	19,0471	19,0413	19,0674
49	19,0490	19,0479	19,0418	19,0662
50	19,0490	19,0467	19,0420	19,0667
Valor Médio (mm)	19,0486	19,0480	19,0420	19,0670
Desvio Padrão (mm)	0,0005	0,0006	0,0005	0,0006
Valor Máximo (mm)	19,0496	19,0505	19,0434	19,0690
Valor Mínimo (mm)	19,0465	19,0467	19,0409	19,0658

Anexo H

Resultados Numéricos do Ensaio com o Objetivo de Verificar a Influência do Diâmetro da Ponteira

Tabela H.1: Resultados numéricos para o ensaio onde se mede o diâmetro da esfera.

Diâmetro (mm)	1	2	3	4	6
Temperatura (°C)	21,57	21,63	21,67	21,80	21,86
1	19,0493	19,0492	19,0477	19,0482	19,0488
2	19,0498	19,0490	19,0484	19,0479	19,0502
3	19,0500	19,0488	19,0482	19,0481	19,0493
4	19,0494	19,0483	19,0480	19,0482	19,0500
5	19,0495	19,0485	19,0471	19,0476	19,0504
6	19,0491	19,0487	19,0475	19,0477	19,0508
7	19,0498	19,0485	19,0480	19,0477	19,0501
8	19,0491	19,0489	19,0473	19,0486	19,0491
9	19,0497	19,0485	19,0483	19,0477	19,0501
10	19,0486	19,0489	19,0482	19,0472	19,0496
11	19,0494	19,0487	19,0474	19,0476	19,0493
12	19,0491	19,0493	19,0477	19,0479	19,0498
13	19,0496	19,0485	19,0483	19,0471	19,0502
14	19,0495	19,0483	19,0484	19,0484	19,0495
15	19,0500	19,0489	19,0480	19,0474	19,0504
16	19,0494	19,0486	19,0483	19,0484	19,0495
17	19,0495	19,0495	19,0479	19,0482	19,0509
18	19,0497	19,0486	19,0473	19,0476	19,0504
19	19,0498	19,0489	19,0474	19,0483	19,0487
20	19,0498	19,0487	19,0486	19,0476	19,0500
21	19,0498	19,0488	19,0483	19,0482	19,0496
22	19,0497	19,0483	19,0479	19,0475	19,0504
23	19,0491	19,0487	19,0482	19,0470	19,0496
24	19,0504	19,0478	19,0476	19,0478	19,0503
25	19,0498	19,0490	19,0482	19,0477	19,0497
26	19,0503	19,0481	19,0487	19,0474	19,0506
27	19,0502	19,0490	19,0480	19,0470	19,0504
28	19,0498	19,0484	19,0485	19,0472	19,0500
29	19,0501	19,0484	19,0475	19,0471	19,0495
30	19,0493	19,0491	19,0475	19,0467	19,0495
31	19,0500	19,0482	19,0484	19,0470	19,0495
32	19,0503	19,0490	19,0480	19,0476	19,0495
33	19,0507	19,0477	19,0478	19,0480	19,0496
34	19,0495	19,0482	19,0480	19,0480	19,0494
35	19,0501	19,0485	19,0475	19,0483	19,0496
36	19,0497	19,0488	19,0486	19,0480	19,0496
37	19,0498	19,0492	19,0482	19,0480	19,0500
38	19,0503	19,0487	19,0484	19,0472	19,0499
39	19,0500	19,0488	19,0477	19,0477	19,0494
40	19,0497	19,0498	19,0480	19,0477	19,0496
41	19,0492	19,0487	19,0480	19,0481	19,0503
42	19,0502	19,0485	19,0477	19,0478	19,0495
43	19,0490	19,0491	19,0483	19,0483	19,0495
44	19,0495	19,0492	19,0477	19,0477	19,0501
45	19,0496	19,0482	19,0485	19,0479	19,0497
46	19,0499	19,0495	19,0475	19,0482	19,0502
47	19,0493	19,0489	19,0479	19,0482	19,0493
48	19,0495	19,0487	19,0481	19,0479	19,0498
49	19,0496	19,0493	19,0484	19,0485	19,0496
50	19,0496	19,0484	19,0482	19,0485	19,0494
Valor Médio (mm)	19,0497	19,0487	19,0480	19,0478	19,0498
Desvio Padrão (mm)	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005
Valor Máximo (mm)	19,0507	19,0498	19,0487	19,0486	19,0509
Valor Mínimo (mm)	19,0486	19,0477	19,0471	19,0467	19,0487