

U. PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

M 2014

Desenvolvimento de Metodologia para Determinação de Alinhamentos em Metrologia

Filipe Leal Ferreira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ORIENTADOR

VÍTOR MANUEL BRANCO MARTINS AUGUSTO

CANDIDATO	Filipe Leal Ferreira	Código	201003086
------------------	----------------------	--------	-----------

TÍTULO	Desenvolvimento de metodologia para determinação de alinhamentos		
---------------	--	--	--

DATA	22 de Setembro de 2017		
-------------	------------------------	--	--

LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F106 - 16:00h		
--------------	---	--	--

JÚRI	Presidente	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira	DEMM/FEUP
	Arguente	Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas	DEM - UA
	Orientador	Professor Vitor Manuel Branco Martins Augusto	DEMM/FEUP

Resumo

No contexto empresarial da atualidade, é cada vez mais importante o foco na qualidade dos produtos. A qualidade dos produtos passa por sua vez por uma melhor qualidade de produção e de controlo da mesma.

Nesta dissertação, realizada em conjunto com o CINFU - Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição, e com colaboração da empresa Ricardo & Barbosa - Fábrica de ferramentas mecânicas de precisão, Lda, e a Norcam - Engenharia e Design Industrial, tem-se como objetivo reduzir erros de medição causados por aplicação incorreta de alinhamentos em máquinas de medição de coordenadas, determinando-se uma metodologia simples para a aplicação dos mesmos.

Este estudo teve como início uma adaptação à máquina utilizada no mesmo, aprendendo-se as aplicações desta e desenvolvendo aptidões para programação no software utilizado pela máquina (PC-DMIS).

Após a familiarização com o ambiente de trabalho, foram estudados os possíveis erros causados pela aplicação de diferentes alinhamentos em peças diversas, e utilizando os resultados obtidos por este estudo, foi possível delinear-se uma metodologia que pode ser seguida em diferentes cenários, para aplicação de alinhamentos em metrologia.

Abstract

In today's business context, the focus on product quality is increasingly important. With this in mind, it is equally relevant for the production and control of the products to have higher standards.

On this thesis, carried out jointly with CINFU - Professional Formation Center of the Foundry Industry, and with the collaboration of Ricardo & Barbosa - Precision Mechanical Tools Factory, Lda and Norcam - Industrial Engineering and Design, It is intended to reduce measurement errors caused by incorrect application of alignments in coordinate measuring machines, by determining a simple methodology for it's application.

This study started with a familiarization to the coordinate measuring machine, learning it's applications, and developing programming skills for the software used by the machine (PC-DMIS).

After familiarization with the work environment, the possible errors caused by the application of different alignments in different work pieces were studied, and using the results obtained by this study, a methodology was formed so that it can be followed in different scenarios for the application of alignments in metrology.

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado contou com importantes apoios, pelos quais estou muito grato, e sem os quais esta não se teria tornado uma realidade.

Gostaria de agradecer ao Professor Vítor Martins Augusto pela sua orientação, apoio e disponibilidade, e por todas as palavras de incentivo.

Ao CINFU, pela oportunidade de realizar a dissertação em ambiente empresarial, e especialmente ao Engenheiro Paulo Aguiar por me ter apoiado durante a duração da mesma.

Por último, a todos os amigos e família, pelo companheirismo, força e apoio em momentos mais difíceis. Por sempre desejarem o meu sucesso, e por fazerem de mim a pessoa que sou hoje.

Índice

RESUMO	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMENTOS.....	III
ÍNDICE	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	IX
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>Objetivo</i>	2
1.2 <i>Âmbito</i>	2
1.3 <i>Plano de trabalho</i>	3
1.4 <i>Estrutura da dissertação</i>	3
CAPÍTULO 2	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 <i>Metrologia</i>	4
2.2 <i>GD&T</i>	4
2.3 <i>Máquinas de medir por coordenadas</i>	10
2.4 <i>Alinhamentos em CMM</i>	13
2.5 <i>Alinhamento PLP no software PC-DMIS</i>	15
CAPÍTULO 3	18
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	18
3.1 <i>Peça 1 – CINFU</i>	18
3.2 <i>Peça 2 - Ricardo & Barbosa</i>	20
3.3 <i>Peça 3 - Ricardo & Barbosa</i>	24
3.4 <i>Peça 4 – Ricardo & Barbosa</i>	27
3.5 <i>Peça 5 - Norcam</i>	30
3.6 <i>Alinhamento Best-Fit</i>	37
CAPÍTULO 4	39
ESTUDO DOS RESULTADOS.....	39
4.1 <i>Influência da escolha do alinhamento nos resultados</i>	39
4.2 <i>Comparação entre pontos estudados e alinhamentos</i>	42
4.3 <i>Desenvolvimento de metodologia para alinhamento</i>	50
CONCLUSÃO	52
BIBLIOGRAFIA	54
ANEXO A.....	56

ANEXO B	58
ANEXO C	62
ANEXO D	64
ANEXO E	65
ANEXO F	67
ANEXO G	69
ANEXO H	71

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de caixa de controlo utilizada em GD&T.....	5
Figura 2 - Radiação do laser He-Ne estabilizado por absorção molecular no iodo [12].	8
Figura 3 - Blocos-padrão classe K em aço temperado [14].	9
Figura 4 - Sistema de sondagem [25].	12
Figura 5 - Tipos de CMM: a. Ponte Móvel; b. Coluna; c. Cantilever; d. Gantry [24].	13
Figura 6 - Nivelamento do plano Z e translação da origem de Z em PC-DMIS.	16
Figura 7 - Rotação do eixo Y e translação da origem de X em PC-DMIS.	16
Figura 8 - Alinhamento PLP completo.....	17
Figura 9 - Representação dos elementos utilizados no alinhamento (Pontos de Origem X,Y - Centro dos círculos a azul; Vetores de alinhamento a vermelho).....	19
Figura 10 - Planos a partir do qual se fez nivelamento em Z do alinhamento (a partir do plano representado na esquerda foram feitos dois nivelamentos, contendo o plano 2 maior número de pontos amostrais) para a peça 2.	20
Figura 11 - Vetores a partir dos quais foi fixada a rotação dos eixos X e Y para a peça 2.	20
Figura 12 - Entidades selecionadas para medição da sua localização (centro dos círculos a azul) na peça 2. ..	21
Figura 13 - Alinhamento com melhores resultados para a peça 2.....	23
Figura 14 - Planos de nivelamento em Z para a peça 3.	24
Figura 15 - Vetores a partir dos quais foi fixada a rotação dos eixos X e Y para a peça 3.	24
Figura 16 - Pontos analisados na peça 3.	25
Figura 17 - Planos de nivelamento em Z da peça 4.	27
Figura 18 – Vetores a partir dos quais foi fixada a rotação dos eixos X e Y para a peça 4.	28
Figura 19 - Pontos analisados na peça 4.	28
Figura 20 – Planos de nivelamento em Z da peça 4 (à esquerda a azul).	31
Figura 21 - Vetores a partir dos quais foi fixada a rotação dos eixos X e Y para a peça 5.	31
Figura 22 - Pontos analisados na peça 5.	32
Figura 23 - Pontos utilizados como origem de Z.	36
Figura 24 - Esquema dos pontos analisados na peça 5.....	36
Figura 25 - Esquema (exagerado) da variação obtida pelo afastamento de pontos amostrais.	40
Figura 26 - Esquema (exagerado) da variação obtida pelo afastamento dos pontos a ser analisados ao datum usado no alinhamento (Azul peça real; Laranja – desvio causado por alinhamento).....	41
Figura 27 – Datums usados num dos alinhamentos da peça 3 (ponto 5).....	43
Figura 28 – Datums usados num alinhamento da peça 3 (pontos 7 e 9).	43
Figura 29 – Pontos estudados e datums utilizados no alinhamento da peça 4.....	45
Figura 30 – À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 1, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.	47
Figura 31 – À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 2, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento	47
Figura 32 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 3, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.	48
Figura 33 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 4, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.	48
Figura 34 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 4, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.	49
Figura 35 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 4, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.	49
Figura 36 - Relatório de verificação d CMM (parte 1).	58

Figura 37 - Relatório de verificação d CMM (parte 2).	59
Figura 38 - Relatório de verificação d CMM (parte 3).	60
Figura 39 - Relatório de verificação d CMM (parte 4).	61

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dispersão de valores peça (a azul os valores que se encontram dentro do erro da máquina).	22
Tabela 2 - Média de desvio das cotas em Z variando apenas a linha de fixação do eixo de rotação X e Y para a peça 2.	23
Tabela 3 - Média de desvio das cotas em X e Y variando apenas o plano de nivelamento em Z na peça 2.	23
Tabela 4 - Dispersão de valores da Peça 3 (a azul os valores que se encontram dentro do erro da máquina; sublinhados os valores de maior variação para cada cota).....	26
Tabela 5 - Média de desvio das cotas em Z variando apenas a linha de fixação do eixo de rotação X e Y para a peça 3.	26
Tabela 6 - Média de desvio das cotas em X e Y variando apenas o plano de nivelamento em Z na peça 3.	27
Tabela 7 – Dispersão de cotas para a peça 4 (a azul os valores que se encontram dentro do erro da máquina; sublinhados os valores de maior variação para cada cota).....	29
Tabela 8 - Média de desvio das cotas em Z variando apenas o vetor de fixação do eixo de rotação X e Y para a peça 4.	29
Tabela 9 - Média de desvio das cotas em X e Y variando apenas o plano de nivelamento em Z na peça 4.	30
Tabela 10 - Dispersão de valores para a peça 5 (sublinhados os valores de maior variação para cada cota)...	33
Tabela 11 - Média de desvio das cotas em Z variando apenas o vetor de fixação do eixo de rotação X e Y para a peça 5.	34
Tabela 12 - Média de desvio das cotas em X e Y variando apenas o plano de nivelamento em Z na peça 5....	34
Tabela 13 – Distribuição de melhores datums de cada alinhamento para cada ponto analisado na peça 5....	35
Tabela 14 - Comparação de desvios entre alinhamento PLP e alinhamento Best-Fit (a verde as cotas em que o desvio foi menor com o alinhamento Best-Fit).	37
Tabela 15 – Medições retiradas na peça 1.	62
Tabela 16 - Medições retiradas na peça 2.....	64
Tabela 17 - Medições retiradas na peça 3.....	65
Tabela 18 - Medições retiradas na peça 4.....	67
Tabela 19 - Medições retiradas na peça 5.....	69
Tabela 20 - Medições retiradas na peça 5 - 2º estudo.	71

Abreviaturas e Símbolos

BIPM - Bureau International des Poids et Mesures

CAD - Computer Aided Design

CMM - Coordinate Measuring Machine (Máquina de Medir Coordenadas)

CNC - Computer Numerical Control

IPQ - Instituto Português de Qualidade

PLP - Plano Linha Ponto

Capítulo 1

Introdução

Segundo o BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), uma organização intergovernamental através da qual os estados membros atuam em conjunto no que diz respeito a ciência e *standards* de medição, a metrologia é uma ciência de medição, abrangendo as determinações experimentais e teóricas em qualquer nível de incerteza e em qualquer campo da ciência e tecnologia [1].

A metrologia torna a capacidade de medir relevante, fornecendo a habilidade de comparar medições individuais com rigor e consensualidade. O primeiro registro de um *standard* permanente data de 2900 A.C., com a criação do cúbito egípcio, feito em granito. Este *standard* apresentava o comprimento do antebraço e mão do faraó, sendo este fornecido aos construtores e apresentando sucesso significativo, evidenciado na construção das pirâmides, que diferem em comprimento das bases por apenas 0.05% [2].

A metrologia moderna tem como base a revolução francesa, havendo motivação política para consensualizar as unidades de medida em todo o país. Em 1791 foi definido o metro, sendo esta medida não arbitrária e não exclusiva a um único país. Entre 1795 e 1875, cada vez mais países adotam o sistema métrico, e de maneira a assegurar conformidade entre países, é fundado o BIPM. A metrologia dá um novo passo na modernização com a criação do Sistema Internacional de Unidades (SI) em 1960 [2], [3].

Atualmente, na produção de peças, o controle dos parâmetros dimensionais é a característica de qualidade mais aplicada. De maneira a testar a conformidade

destes parâmetros, é necessário sondar a superfície, para este processo existem vários métodos, utilizando diferentes máquinas de medição (CMM - *Coordinate Measuring Machine*). Estas máquinas têm de estar calibradas de maneira a assegurar a repetibilidade das medições e conformidade com os padrões internacionais. Nesta dissertação será estudada a influência do alinhamento da peça - uma variável no processo de medições utilizando este tipo de máquinas - na informação obtida através do software [4].

1.1 Objetivo

O objetivo da dissertação é a criação de uma metodologia, um procedimento, que permita a realização de um alinhamento ideal em inspeção 3D.

Este procedimento iria facilitar a operários ou metrólogos, a aplicação de um sistema de alinhamento que melhorasse os resultados apresentados, tendo em conta diversas variáveis que possam afetar os desvios apresentados pelas medições.

1.2 Âmbito

Esta dissertação surge da falta de informação no alinhamento das peças relativamente ao modelo 3D numa CMM. De maneira a possibilitar o estudo foram assimilados conhecimentos no software PC-DMIS com o objetivo de possibilitar autonomia no uso da CMM.

É então estudada a influência do alinhamento nos resultados obtidos na medição de várias peças, de maneira a que se possa determinar um processo inicial para a escolha de um alinhamento que apresente os melhores resultados possíveis, sendo que neste caso, o ideal seria um alinhamento que apresente os menores desvios possíveis dos valores desejados.

1.3 Plano de trabalho

De forma a atingir o objetivo final da dissertação, delineou-se uma metodologia para a realização da mesma:

1. Aprendizagem de metrologia em CMM;
2. Identificação de variáveis na aplicação de alinhamentos em CMM;
3. Estudo da variação das variáveis nas medições;
4. Elaboração de metodologia para aplicação de alinhamento;
5. Conclusão.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação apresenta como estrutura os seguintes pontos:

1. No primeiro capítulo é feita uma breve introdução ao projeto e aos temas relacionados, descrevendo resumidamente o tema geral e objetivos a alcançar;
2. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica mais aprofundada, sobre as áreas de conhecimento que serão abordadas de seguida;
3. No capítulo 3 é descrito o procedimento experimental, apresentando-se os resultados obtidos para cada objeto de estudo;
4. O capítulo 4 recolhe os pontos abordados nos capítulos 2 e 3, comparando os resultados obtidos com a revisão bibliográfica e apresenta uma análise dos resultados;
5. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, assim como o objetivo final que será a metodologia a seguir em alinhamentos em CMM.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Metrologia

2.1.1 Vocabulário utilizada em metrologia

Dos conceitos existentes no Vocabulário Internacional de Metrologia, criado de forma a unificar terminologia entre diversas áreas de estudo, foram escolhidos alguns, considerados de relevância para o caso específico da metrologia dimensional, os quais são descritos no anexo A [5].

Estes termos e conceitos revelam-se também de importância de maneira a compreender o ponto seguinte sobre o GD&T.

2.2 GD&T

O GD&T (*Geometric Dimensioning and Tolerancing*), é uma linguagem usada em engenharia, geralmente em desenhos técnicos, composta por símbolos que são aplicados de forma a evidenciar requisitos geométricos de uma forma clara e eficiente.

Existem mais de 40 normas ISO que descrevem os símbolos e definem as regras usadas no GD&T, as quais podem ser encontradas nas ISO/TC 10 - Technical Product Documentation, ISO/TC 213 - Dimensional and Geometrical Product Specifications and Verification e na ISO 10303 - Industrial Automation Systems and Integration, mostrando-se de relevância internacional também a norma americana ASME Y14.5-2009 [6].

As principais vantagens que o uso de GD&T apresenta são:

- Uniformidade na especificação e interpretação de desenhos;
- Eliminar ambiguidades na interpretação de documentos;
- Permitir que o desenho seja uma ferramenta contratual do projeto do produto;
- Assegura que haja uma língua comum, transversal aos profissionais do projeto, quer seja da qualidade ou da produção.

No DG&T a simbologia é apresentada numa caixa de controlo (figura 1) que especifica tolerância, referências datum e modificadores.

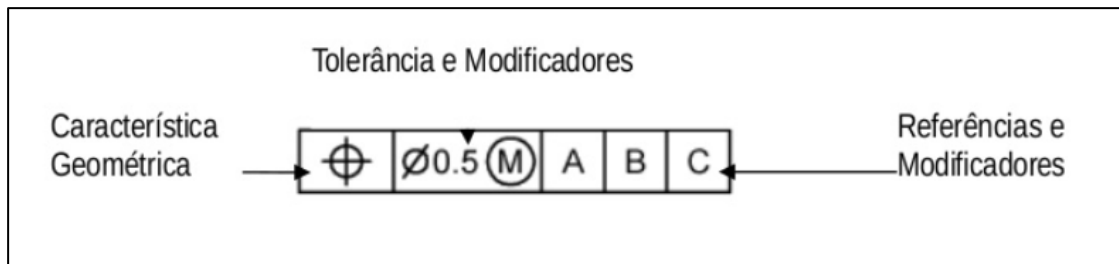


Figura 1 - Exemplo de caixa de controlo utilizada em GD&T.

2.2.1 Regras Fundamentais do GD&T

Para uma correta aplicação do GD&T existem algumas regras fundamentais que são transversais a todas as normas, com a exceção de algumas alterações ligeiras:

- Todas as dimensões devem apresentar uma tolerância. Qualquer característica numa peça está sujeita a variação, devendo então os limites da variação ser especificados. Havendo exceção para dimensões marcadas com máximo, mínimo, material em bruto ou referência;
- As dimensões definem o valor nominal da geometria e variação permitida. A medição e escala do desenho são proibidos exceto em determinados casos;
- Os desenhos técnicos definem os requisitos das peças acabadas. Todas as dimensões ou tolerâncias necessárias à definição da peça acabada devem constar no desenho. Dimensões e tolerâncias adicionais não são requeridas, mas de auxílio podem ser apresentadas como referência;

- As dimensões têm de ser aplicadas às características e dispostas de forma a evidenciar a função das mesmas;
- A geometria deve ser apresentada sem definir explicitamente o método de fabrico da peça;
- Se algumas dimensões forem exigidas durante o processo de fabrico mas não na geometria final (devido a encolhimento ou outros fatores), devem ser marcadas como não obrigatórias;
- Todas as cotas dimensionais e tolerâncias devem ser apresentadas de maneira a facilitar a leitura, devendo também ser aplicadas a linhas visíveis de perfis reais;
- Quando a geometria é controlada por tamanhos de calibres ou códigos, as dimensões devem apresentar logo por baixo o calibre ou código entre parênteses;
- Ângulos de 90° são inferidos quando linhas são mostradas em ângulos retos mas nenhuma dimensão é explicitamente mostrada (aplica-se também a ângulos ortogonais de 0°, 180°, 270° etc);
- As dimensões e tolerâncias são válidas para temperaturas de 20°C e pressões de 101.3kPA, a não ser que seja explícito outro caso;
- A não ser que seja referido, as dimensões e tolerâncias são válidas quando o produto está num estado livre;
- As dimensões e tolerâncias aplicam-se a todo o comprimento, largura e profundidade de uma característica, incluindo variações de forma;
- As dimensões e tolerâncias só se aplicam na zona do desenho onde são especificadas. Não é obrigatório que se apliquem noutros níveis do desenho a menos que se repitam nos níveis mais elevados do mesmo [7].

2.2.2 Tolerâncias

As tolerâncias em engenharia, mais especificamente neste caso de estudo, são os limites de variação de dimensões físicas.

A ideia sobre tolerâncias bilaterais mais comumente aceite em engenharia é a de que qualquer valor entre os dois limites opostos de uma tolerância é igualmente aceitável, no entanto, existe outra visão sobre este tópico, segundo Genichi

Taguchi, a função de perda de qualidade afirma que o melhor produto apresenta uma medição exatamente igual ao valor nominal [8], [9].

Nesta dissertação será seguida a visão de Genichi Taguchi, tentando-se sempre aproximar o valor da medição ao valor nominal.

2.2.3 Exatidão

A exatidão é o grau de conformidade de um valor calculado, ou medido, em relação ao seu valor nominal, ou a uma referência padrão [5].

Esta pode ser demonstrada pela comparação de resultados obtidos usando o material de referência padrão, ou através de um método cujo erro regular não seja significativo.

2.2.4 Repetibilidade

A repetibilidade designa-se como a variação nas medições, efetuadas por uma determinada pessoa, num determinado instrumento, na mesma peça, sob as mesmas condições e num curto período de tempo [5].

A existência de variações elevadas em testes repetidos segundo as circunstâncias descritas acima causa variabilidade de resultados para uma mesma medição, sendo importante que num estudo de metrologia, a repetibilidade seja elevada.

Para tal é necessário que o instrumento de medição utilizado apresente erros de medição reduzidos, e que todas as condições de teste sejam a mesma.

Neste caso de estudo, todos os testes foram realizados no mesmo instrumento de medição, modelo IOTA 0102 (DEA), apresentando a seguinte conformidade com as especificações (anexo B):

$$MPE_e = 0,005 + \frac{6 * L}{1000} \text{ (mm)}$$

$$MPE_p = 0,005 \text{ (mm)}$$

- MPEe - Equação de especificação da máquina para medidas lineares (erro máximo)
- MPEp - Máximo valor especificado de repetibilidade da máquina

A máquina encontra-se isolada do resto das fundações do edifício de maneira a evitar vibrações provenientes do exterior, e a sala onde esta se encontra apresenta temperatura controlada, de maneira a evitar variação de tamanho nas peças a estudar.

2.2.5 Rastreabilidade

Na metrologia, uma cadeia de rastreabilidade é a sequência de padrões e calibrações que é usada de forma a relacionar o resultado de uma medição com uma referência. Esta cadeia é definida por uma hierarquia de calibração, usada de forma a criar rastreabilidade metrológica de uma medição [10].

No caso da metrologia dimensional existem padrões primários, secundários e terciários.

No caso dos padrões primários, o sistema mais utilizado internacionalmente para a definição da unidade de base “metro” é a radiação de laser He-Ne (Figura 2), sendo este sistema utilizado por exemplo pela Instituição Nacional de Metrologia (IPQ) [11].

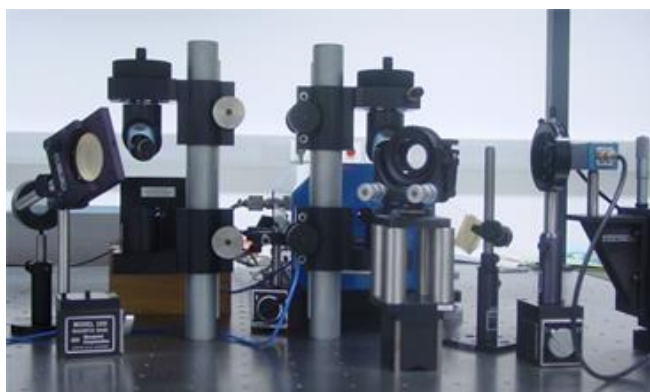


Figura 2 - Radiação do laser He-Ne estabilizado por absorção molecular no iodo [12].

Os padrões primários são utilizados como padrões de referência em medições interferométricas e para calibrações por comparação de outros lasers, blocos-padrão

e padrões secundários.

Os padrões secundários, também designados como blocos-padrão lineares de classe K, são normalmente compostos por aço temperado ou material cerâmico (Figura 3). Estes padrões apresentam distância conhecida entre faces planas e paralelas entre si com incerteza na ordem dos 0,1 μm . Os padrões secundários são normalmente utilizados em laboratórios de metrologia de apoio à indústria e para calibração de padrões terciários [13].



Figura 3 - Blocos-padrão classe K em aço temperado [14].

Os padrões de terciários (blocos padrão de classe 0 ou 1), também designados como padrões de trabalho, devem existir em todos os laboratórios de empresas, usados como calibradores de outros instrumentos de medição, como por exemplo paquímetros ou micrómetros [15].

A rastreabilidade metrológica é então uma propriedade de um resultado de medição, pela qual esse resultado pode, por meio de uma cadeia documentada de calibrações, sendo que a cada passo destes contribui para a incerteza da medição [1], [16].

Desta maneira é possível instrumentos menos exatos, se apresentam devidamente calibrados.

Em Portugal, é o IPQ (Instituto Português de Qualidade) que garante o rigor e a exatidão das medições realizadas, conferindo comparabilidade e rastreabilidade tanto a nível nacional como internacional. O IPQ garante a realização e desenvolvimento dos padrões nacionais das unidades de medida, participa nas comparações-chave do BIPM, e assegura também a garantia metrológica nos relacionamentos económicos, através de atividades como a elaboração de legislação, acompanhando a

coordenação do controlo metrológico ou formação de metrologistas [17].

No caso da CMM utilizada, esta encontra-se certificada segundo o C.E.M. (Centro Español de Metrologia) (anexo B).

2.2.6 Inspeção 3D vs Medição Geométrica

Utilizando uma CMM, pode-se abordar o estudo de uma peça segundo estas duas vertentes, inspeção 3D ou medição geométrica.

Na inspeção 3D, o software da máquina é capaz de comparar as medições com o modelo CAD da peça a estudar. A peça real é alinhada com o modelo CAD, e utilizando pontos medidos é estudada a congruência entre a posição do ponto na peça real e no modelo. Neste caso, é importante que a peça se encontre devidamente alinhada pois um incorreto alinhamento pode traduzir-se em erros de medição grosseiros [18].

No caso da medição geométrica, a informação a ser estudada não é relativa ao modelo CAD fornecido ao software. A máquina faz a medição por exemplo do raio de um círculo ou do comprimento de um segmento de reta, e este valor não é alterado com a variação do alinhamento da peça, dado que o valor resultante apenas implica a peça em si.

2.3 Máquinas de medir por coordenadas

Neste estudo, o instrumento de medição que será abordado, no âmbito da metrologia dimensional, será a máquina de medir por coordenadas, ou CMM (*Coordinate Measuring Machine*), neste ponto aprofunda-se um pouco o funcionamento e evolução deste instrumento de medição.

A medição de distâncias em peças baseia-se na comparação da distância de dois pontos da superfície desta e compará-los com um padrão. Os valores geométricos a ser medidos num objeto, como por exemplo o diâmetro de um círculo, perpendicularidade, ou distância entre dois planos, referem a distâncias ou posições de pontos de medição selecionados na superfície do objeto, assim, de modo a fazer estas medições a superfície tem de ser sondada, tocando-se na peça com um sensor,

nos pontos desejados (ou sem contacto utilizando outros métodos), e medindo a sua posição em relação a outros pontos reais na superfície ou a sistemas de referência (datums). O sistema de sondagem relaciona os pontos de referência com os pontos da superfície do objeto a ser medido [19], [20].

Os sistemas mais comuns de sondagem são as sondas por contacto (*touch-trigger probe*) e sensores óticos, mas devido à elevada variedade destes sistemas assim como implementações, este trabalho irá focar-se nas sondas por contacto.

As aplicações do controlo dimensional passam pelo controlo de qualidade, verificação de cotas especificadas pelo cliente, determinação de causas de erros no alinhamento de ferramentas ou a imposição pelo cliente de que seja entregue um relatório de inspeção dimensional [21].

As CMM permitem a medição de dimensões mais complexas do que o sistema mais rudimentar de calibres “passa/não passa”, no entanto, a utilização destas máquinas acarreta custos elevados, passando não só pelo custo da própria máquina mas também pela necessidade da mesma de um operário treinado para o efeito.

A base de funcionamento das CMM passa pela utilização de réguas óticas em três eixos. Um sensor conta as linhas microscópicas presentes na régua, determinando assim a posição da sonda em relação à mesa de trabalho. De maneira a que a máquina saiba a sua posição ao ser reiniciada ou após algum erro, existem também marcas especiais que marcam o “zero da máquina”, assim, deslocando a máquina ao seu ponto de referência zero, esta pode iniciar a contagem das linhas à medida que se desloca. A máquina reconhece o local onde dá o ponto na superfície através de uma sonda ativada por contacto [4], [17].

Nos princípios da medição por coordenadas, estas sondas eram movidas manualmente pelo operador até que esta entrasse em contacto com a peça a ser medida, no entanto, este método acarretava vulnerabilidade a vários erros, como o uso de diferente pressão por parte do operador, ou o uso de diferentes técnicas de medição. Com a adição de motores para cada eixo de movimentação, os operadores passaram a comandar a máquina através de um controlo com joysticks. A exatidão destas medições melhorou substancialmente com a invenção do sensor ativado eletronicamente, desenvolvido por David McMurtry, este sensor consistia numa esfera de aço (atualmente de rubi) ligada a uma mola, quando a esfera entra em contacto

com a superfície, são automaticamente enviadas as coordenadas do ponto para o computador [22]. Atualmente existem sondas de contacto que deslizam na superfície, enviando pontos para o computador após intervalos especificados [23], [24].

As CMM são então constituídas por três componentes principais:

1. Estrutura principal: inclui os eixos de movimento descritos acima, assim como a mesa de trabalho;
2. Sistema de sondagem (figura 4): atualmente este sistema é normalmente composto pela cabeça, sonda, extensão e palpador;
 - a. Cabeça: este componente é acoplado à estrutura principal e fornece a capacidade de rotação da sonda;
 - b. Sonda: funciona como um interruptor de elevada precisão;
 - c. Extensão: permite à sonda alcançar zonas apertadas ou buracos;
 - d. Palpador: localizado na ponta da extensão, o palpador é geralmente uma bola de rubi de tamanho conhecido.
3. Sistema de recolha de informação: geralmente composto pelo controlador da máquina, computador e software dedicado.



Figura 4 - Sistema de sondagem [25].

2.3.1 Tipos de CMM

De momento existem quatro tipos de CMM principais no mercado: ponte fixa ou móvel (máquinas similares mas no caso da ponte fixa um dos eixos de movimento é a própria mesa de trabalho), cantiléver, braço horizontal e gantry (figura 5) [26].

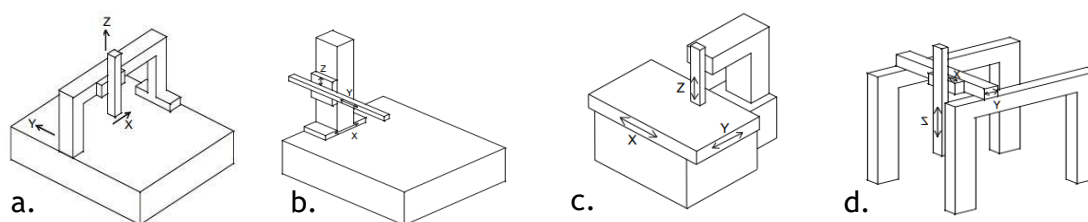


Figura 5 - Tipos de CMM: a. Ponte Móvel; b. Coluna; c. Cantilever; d. Gantry [24].

A escolha do tipo de CMM depende do tipo de peças a ser estudada, por exemplo, entre a ponte móvel e a ponte fixa um dos pontos que se deve ter em consideração é o peso das peças a ser estudadas, dado que uma CMM de ponte fixa não é capaz de suportar tanto peso como uma CMM de ponte móvel [24].

2.4 Alinhamentos em CMM

Um alinhamento, no contexto de uma CMM, consiste na definição de uma orientação e localização de um sistema de coordenadas 3D XYZ, relativamente à peça a ser medida.

Existem alguns tipos de alinhamento utilizados atualmente em CMM's, como alinhamento PLP, *Best Fit* ou *Iterative*, sendo o alinhamento 3-2-1, ou PLP (plano linha ponto), um dos mais utilizados [4].

2.4.1 Alinhamento Best Fit

Este tipo de alinhamento usa os elementos escolhidos e distribui o erro encontrado igualmente entre os mesmos.

É importante neste tipo de alinhamento que os elementos escolhidos controlem 6 graus de liberdade, se por exemplo, todos os elementos se encontrarem no mesmo plano, então nenhum deles poderá controlar rotação em torno do vetor normal a esse plano.

Neste tipo de alinhamento, o programa usa 4 pontos de 6 entidades geométricas especificadas para efetuar a iteração, não interessando a ordem das geométricas [27].

2.4.2 Alinhamento Iterativo 3-2-1

Este é um tipo de alinhamento Best Fit e PLP, com uma condição adicional, na qual os elementos do alinhamento são automaticamente remedidos de maneira a reduzir o erro. São retirados apenas os pontos ideais de cada um dos 2 datums selecionados para efetuar a iteração.

Este alinhamento apenas pode ser utilizado para 3 planos ortogonais, sendo que a ordem dos pontos datum escolhidos deve ser exatamente 3-2-1[27].

2.4.3 Alinhamento PLP

O alinhamento PLP, também conhecido como 3-2-1, ou Level-Rotate-Origin, é o tipo de alinhamento mais básico, sendo também um dos mais aplicados. Este alinhamento consiste na utilização de 3 datums, sendo estes normalmente um plano, um segmento de linha, e um ponto (daí a designação 3-2-1, pois são precisos 3, 2, e 1 ponto para criar um plano, um segmento de linha e um ponto respetivamente).

Estes datums são utilizados por ordem, fazendo-se primeiro o nivelamento em Z utilizando o plano e estabelecendo a origem de Z para o mesmo, depois segue-se a fixação dos eixos de rotação X e Y em torno de Z (com este passo é formado um plano perpendicular ao plano inicial), com auxílio do vetor e associa-se a origem de X ao mesmo, e por fim indica-se como origem de Y o ponto tirado (formando novamente um plano que é perpendicular aos dois planos previamente criados).

Estes passos permitem fixar os 6 graus de liberdade, finalizando assim o alinhamento.

2.1.2 Alinhamento RPS

O alinhamento RPS (*Reference Point System*), é normalmente usado em chapas metálicas, quando o sistema de coordenadas não é local à própria parte (faz parte de um modelo complexo, de um carro por exemplo), e quando o datum primário não é um plano simples.

As restrições RPS definem-se apenas por pontos, círculos e arcos. Quando um círculo ou um arco é introduzido no sistema, é tido em conta a posição do centro (um

ponto), no caso das restrições normais, quando é introduzido um arco ou círculo é tido em conta o seu eixo (uma linha) [28].

Para definir um alinhamento RPS é necessário:

- No primeiro eixo, três restrições RPS devem ser bloqueadas para definir um plano.
- No segundo eixo, duas restrições RPS devem ser bloqueadas para definir uma linha;
- No terceiro caso, uma restrição RPS é necessária pra definir um ponto de localização.

Em algumas situações, o alinhamento RPS pode levar a mais que uma solução, normalmente simetrias, e a solução apresentada pelo software pode ser diferente da esperada [29].

2.5 Alinhamento PLP no software PC-DMIS

Neste estudo, o software associado à máquina de medição por coordenadas é o PC-DMIS.

De forma a aplicar o alinhamento da peça são necessários 5 passos os quais serão descritos de seguida:

1. Nivelamento do plano Z (figura 6);
2. Translação da origem de Z para um selecionado (figura 6);
3. Rotação do eixo Y para um vetor (figura 7);
4. Translação da origem de X para um vetor (figura 7);
5. Translação da origem de Y para um ponto (figura 8);

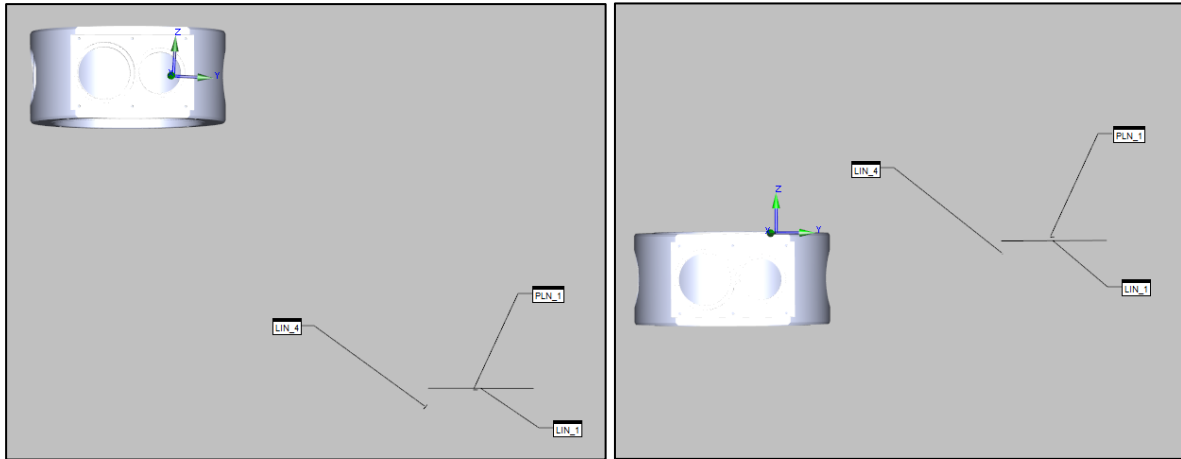


Figura 6 - Nivelamento do plano Z e translação da origem de Z em PC-DMIS.

Na figura 6, do lado esquerdo, pode-se observar o modelo CAD importado para o software, e o “plano linha e ponto” retirados manualmente que serão usados no alinhamento PLP. Do lado direito da mesma figura, já foram aplicados os dois primeiros passos: nivelamento em Z e translação da origem de Z

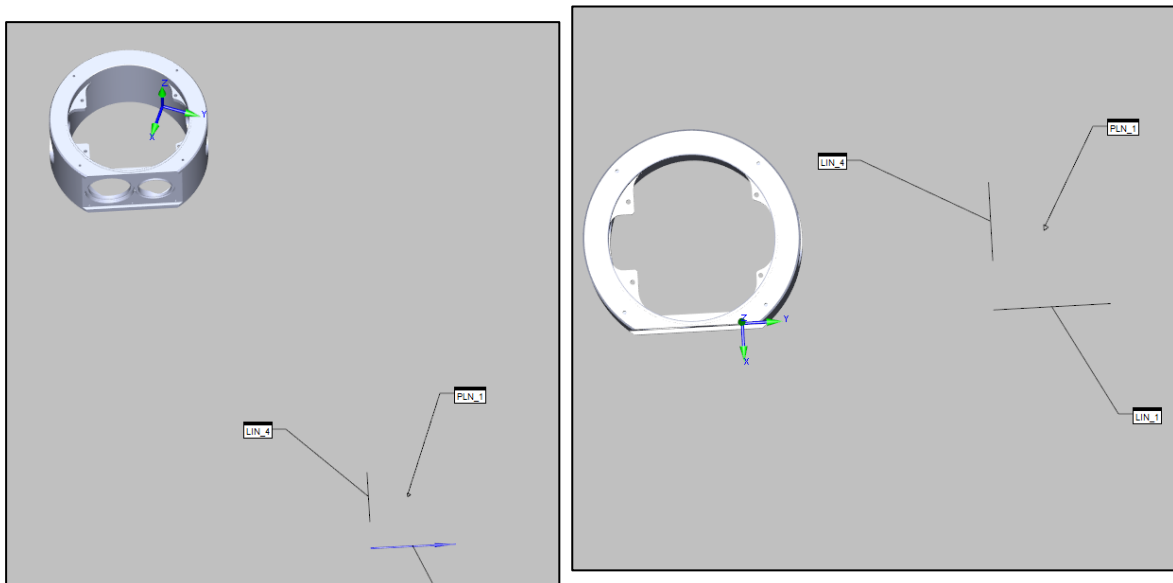


Figura 7 - Rotação do eixo Y e translação da origem de X em PC-DMIS.

Na figura 7, do lado esquerdo, o nivelamento de Z já se encontra aplicado, no entanto os pontos medidos ainda se apresentam deslocados da peça.

Do lado direito da figura são aplicados os passos 3 e 4, faltando apenas a translação da origem de Y para o ponto definido.

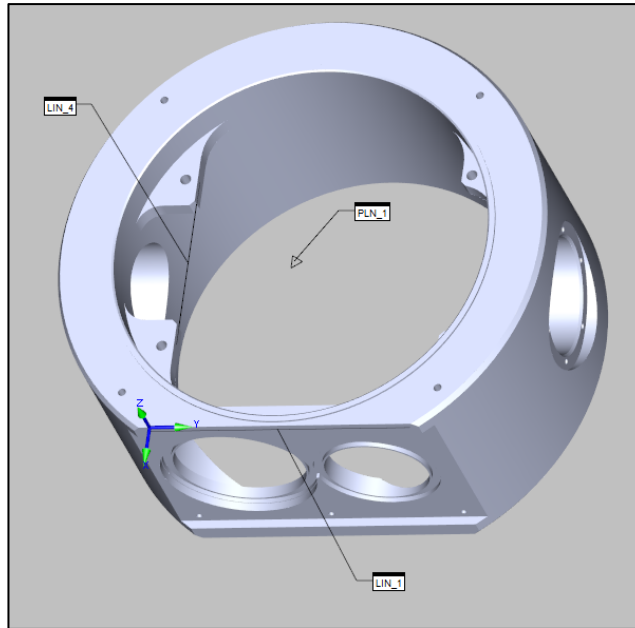


Figura 8 - Alinhamento PLP completo.

Na figura 8 o alinhamento PLP está completo e pode-se observar com clareza os datums escolhidos para o mesmo.

Após seleção do primeiro alinhamento a máquina é programada para estudar determinados pontos automaticamente, variando-se apenas os datums utilizados no alinhamento.

É depois analisada a influência da escolha dos datums para o alinhamento nas medições efetuadas, tentando-se otimizar este processo de forma a reduzir erros.

Capítulo 3

Procedimento Experimental

Neste projeto foram analisadas 5 peças distintas.

Para cada uma das peças o procedimento foi similar e seguiu os seguintes passos:

1. Determinação de datums a utilizar nos diferentes alinhamentos;
2. Determinação de datums a analisar;
3. Criação do programa de medição em PC-DMIS;
4. Execução do programa variando os alinhamentos escolhidos;
5. Exportação e análise dos resultados.

3.1 Peça 1 - CINFU

Foi estudada a influência do alinhamento utilizado na medição de distâncias numa peça.

Criou-se um programa na CMM para medir a peça fornecida pelo CINFU, o qual foi depois executado seguindo diferentes alinhamentos, e os resultados foram analisados.

Os alinhamentos utilizados foram criados a partir das referências de 2 planos diferentes, 3 vetores e 4 pontos de origem, sendo criados no total 24 alinhamentos diferentes, a partir dos quais foram obtidas 9 distâncias para cada um deles (figura 9).

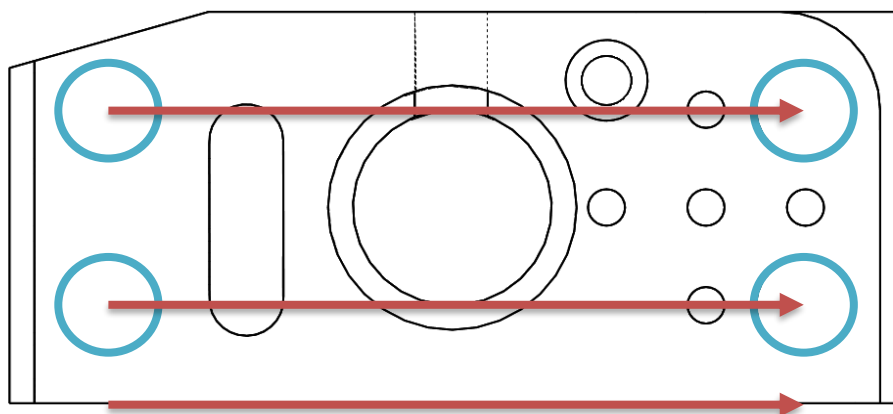


Figura 9 - Representação dos elementos utilizados no alinhamento (Pontos de Origem X,Y - Centro dos círculos a azul; Vetores de alinhamento a vermelho)

Foi estudada a distância entre os furos descritos a azul na Figura 9, sendo a distância medida calculada entre os centros dos raios de cada furo, a uma profundidade de 5mm.

Foi calculado o desvio médio para as medições obtidas, sendo que o valor máximo entre a mesma distância para medições no mesmo plano de nivelamento em Z foi de 0,00225 mm e o valor mínimo de 0 mm.

Comparando os valores medidos entre as mesmas distâncias, usando planos diferentes, mas variando o vetor de fixação do eixo de rotação X e Y, o valor máximo de desvio foi de 0,001125 mm, e o mínimo de 0,000391 mm (dados recolhidos no anexo C).

Os valores acima referidos indicam que a variação de referências para utilização no alinhamento não apresenta resultados significativos na medição de distâncias. Isto acontece, pois, o programa utiliza apenas os valores das referências individuais para fazer o cálculo de distâncias, não tendo em consideração o alinhamento utilizado.

Esta informação indica que no caso da medição geométrica, a variação de alinhamentos não apresenta grande influência, podendo no entanto esta variável ser relevante no caso da inspeção 3D.

Foi então feita uma nova abordagem ao problema, calculando não as distâncias entre datums, mas a posição relativa destes em relação aos valores nominais no modelo CAD.

3.2 Peça 2 - Ricardo & Barbosa

As peças fornecidas pela empresa Ricardo & Barbosa são peças de elevada precisão. Para estas peças foi facultado também o modelo CAD das mesmas, de maneira a que fosse possível a inspeção 3D.

Para esta peça foram criados 12 alinhamentos usando 3 planos como nivelamento em Z, e 4 linhas de orientação (figuras 10 e 11).

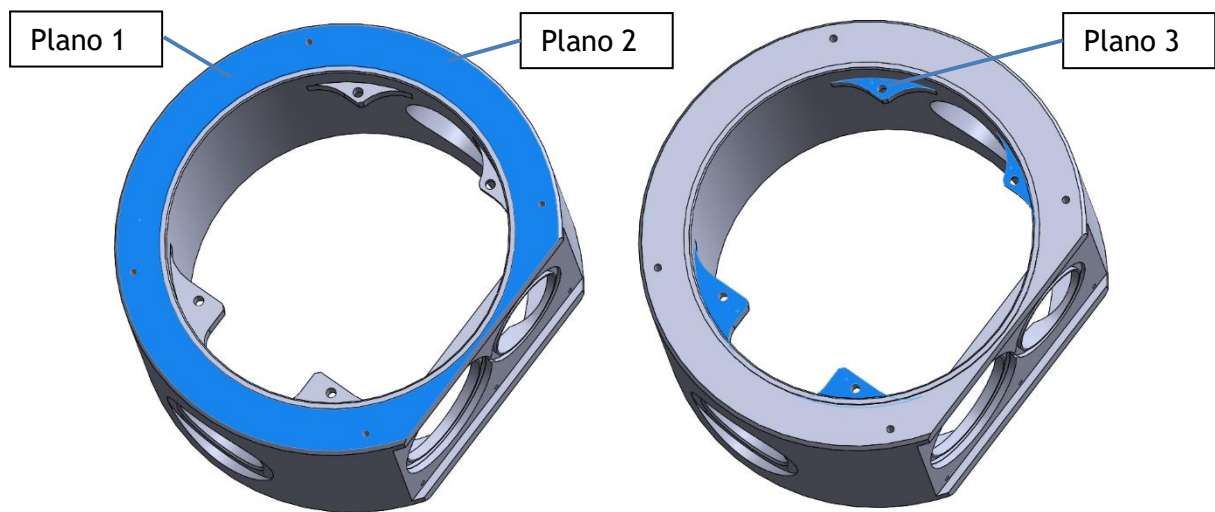


Figura 10 - Planos a partir do qual se fez nivelamento em Z do alinhamento (a partir do plano representado na esquerda foram feitos dois nivelamentos, contendo o plano 2 maior número de pontos amostrais) para a peça 2.

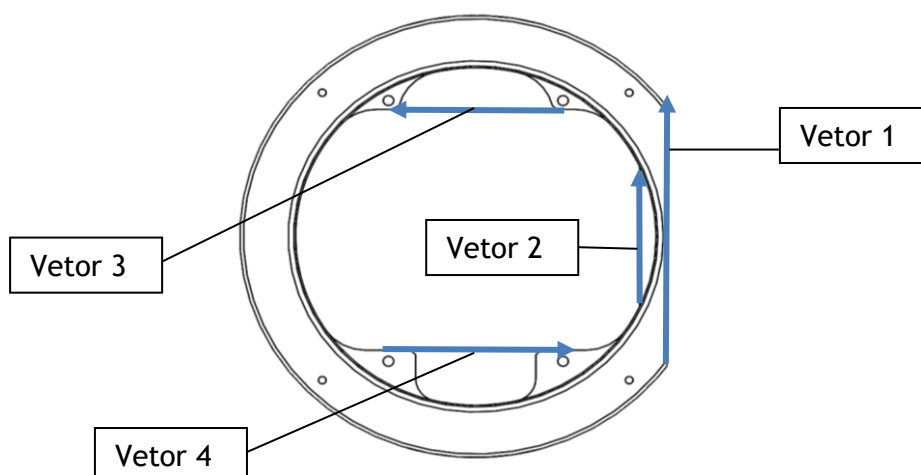


Figura 11 - Vetores a partir dos quais foi fixada a rotação dos eixos X e Y para a peça 2.

O ponto de origem foi mantido de maneira a ser possível comparar a localização das coordenadas de 6 entidades geométricas (figura 12).

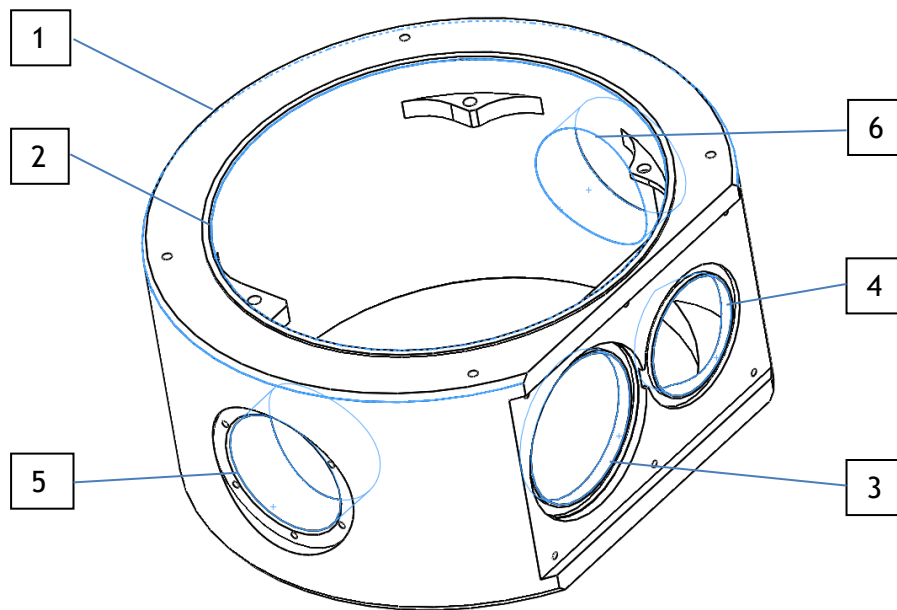


Figura 12 - Entidades selecionadas para medição da sua localização (centro dos círculos a azul) na peça 2.

Foi calculado o desvio médio total para cada uma das entidades em dois eixos (ao medir a localização de círculos não foi medida a localização respetiva ao eixo de profundidade do furo, pois este acarreta maiores desvios).

Foi também calculado o desvio médio das entidades geométricas respetivo apenas à mudança de plano utilizado para nivelamento em Z, assim como o desvio médio variando apenas os vetores de fixação de rotação dos eixos X e Y em torno de Z.

Comparando os desvios médios entre medições, obteve-se que as cotas em z são mais dispersas quando o plano de nivelamento é alterado, e as cotas em X e Y são mais dispersas quando o vetor para fixação da rotação de X e Y de rotação varia, demonstrado na tabela 1, onde se encontram sublinhados os valores de maior variação para cada cota. Apenas o valor de Y para entidade 2 não seguiu este padrão, no entanto este desvio encontra-se dentro do erro da máquina (dados recolhidos no anexo D).

Tabela 1 - Dispersão de valores peça (a azul os valores que se encontram dentro do erro da máquina).

Entidade Geométrica	Eixo	Desvio médio total (mm)	Média de desvios variando apenas eixo de rotação X e Y (mm)	Média de desvios variando apenas plano de nivelamento Z (mm)
1	X	0,0014	<u>0,0014</u>	0,0004
	Y	0,0010	<u>0,0005</u>	0,0009
2	X	0,0010	<u>0,0010</u>	0,0005
	Y	0,0012	0,0008	<u>0,0010</u>
3	Y	0,0248	<u>0,0248</u>	0,0024
	Z	0,0093	0,0011	<u>0,0093</u>
4	Y	0,0250	<u>0,0250</u>	0,0027
	Z	0,0101	0,0004	<u>0,0101</u>
5	X	0,0296	<u>0,0291</u>	0,0062
	Z	0,0080	0,0013	<u>0,0080</u>
6	X	0,0328	<u>0,0328</u>	0,0051
	Z	0,0077	0,0011	<u>0,0077</u>

Com base na informação de que os planos de nivelamento afetam com maior intensidade as cotas em Z, determinou-se o plano que apresentava menor desvio dos valores nominais apenas no eixo Z, sendo que este foi o plano 1 (tabela 2).

Tabela 2 - Média de desvio das cotas em Z variando apenas a linha de fixação do eixo de rotação X e Y para a peça 2.

	Plano 1 (mm)	Plano 2 (mm)	Plano 3 (mm)
Média de desvio das cotas em Z	<u>0,0663</u>	0,0711	0,0777

Da mesma forma determinou-se qual o vetor de fixação do eixo X e Y que apresenta menor valores de desvio apenas para os valores X e Y, sendo que este foi o vetor 1 (tabela 3).

Tabela 3 - Média de desvio das cotas em X e Y variando apenas o plano de nivelamento em Z na peça 2.

	Linha 1 (mm)	Linha 2 (mm)	Linha 3 (mm)	Linha 4 (mm)
Média de desvio das cotas em X e Y	<u>0,0320</u>	0,0440	0,0474	0,0480

Descobriu-se então quais os alinhamentos onde se obteve os valores mais próximos dos valores nominais para as entidades que apresentaram desvios fora do erro da máquina (3, 4, e 5).

Para estas entidades geométricas o melhor alinhamento utilizou o plano 1 como nivelamento, o vetor 1 como vetor de fixação, e o vetor 4 como zero do eixo X (figura 13).

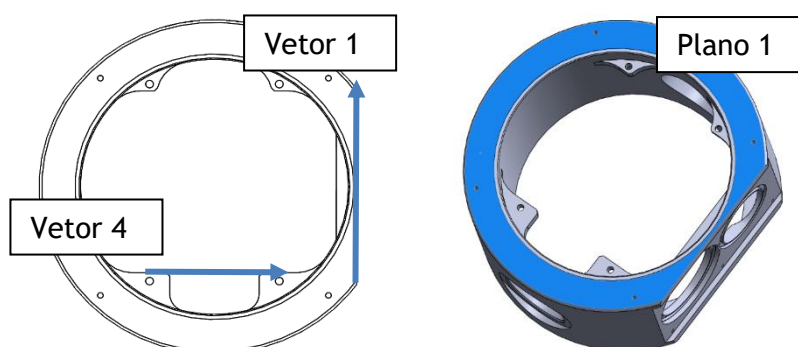


Figura 13 - Alinhamento com melhores resultados para a peça 2.

3.3 Peça 3 - Ricardo & Barbosa

O procedimento aplicado à peça circular (peça 2) foi repetido nesta peça. Foram estudados 9 pontos da peça, cada um apresentando apenas o valor da cota do plano normal ao qual foi dado o toque na peça.

Estes valores foram medidos variando-se os planos de nivelamento em Z, indicados na figura 14, e variando o eixo de rotação de X e Y em torno de Z indicados na figura 15.

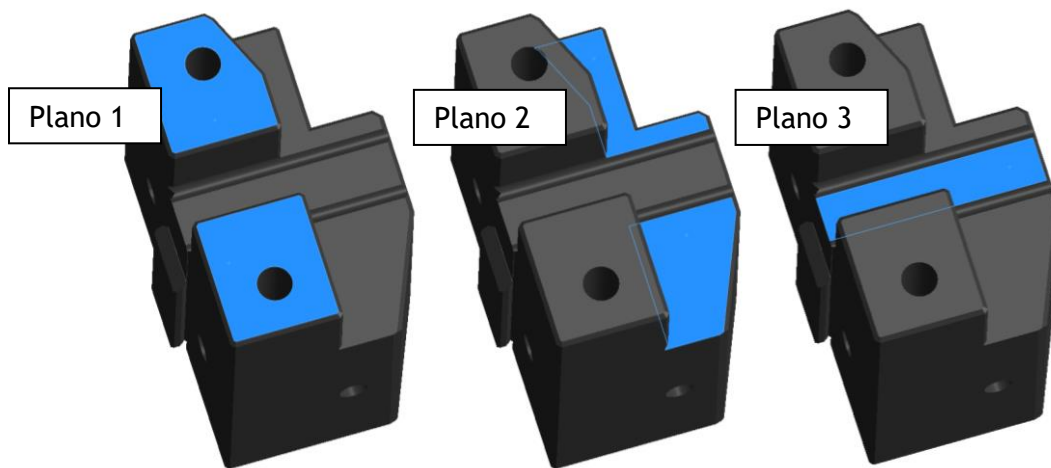


Figura 14 - Planos de nivelamento em Z para a peça 3.

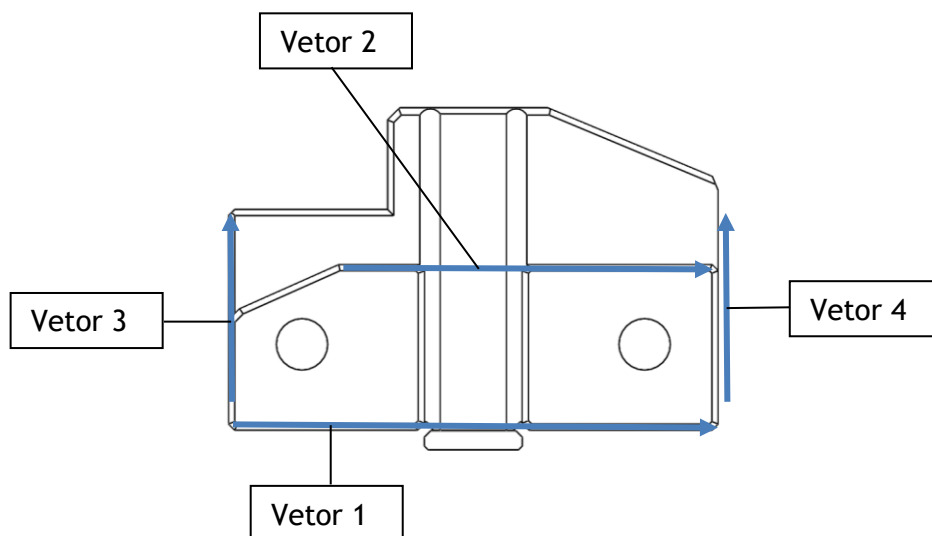


Figura 15 - Vetores a partir dos quais foi fixada a rotação dos eixos X e Y para a peça 3.

Foi também calculado o desvio médio dos datums para a variação dos planos de nivelamento em Z, e para a variação do vetor de fixação dos eixos X e Y (tabela 4) (dados recolhidos no anexo E).

O ponto usado como origem de Y no alinhamento foi o ponto 1, sendo por esta razão que o valor deste é zero em todos os casos de estudo.

Os restantes pontos seguem o padrão sugerido na peça anterior, apresentando neste caso duas exceções, os pontos 9 e 5, nos quais a maior média de desvio se apresentou na variação do plano de nivelamento em Z.

Os pontos analisados neste estudo aparecem representados graficamente na figura 16.

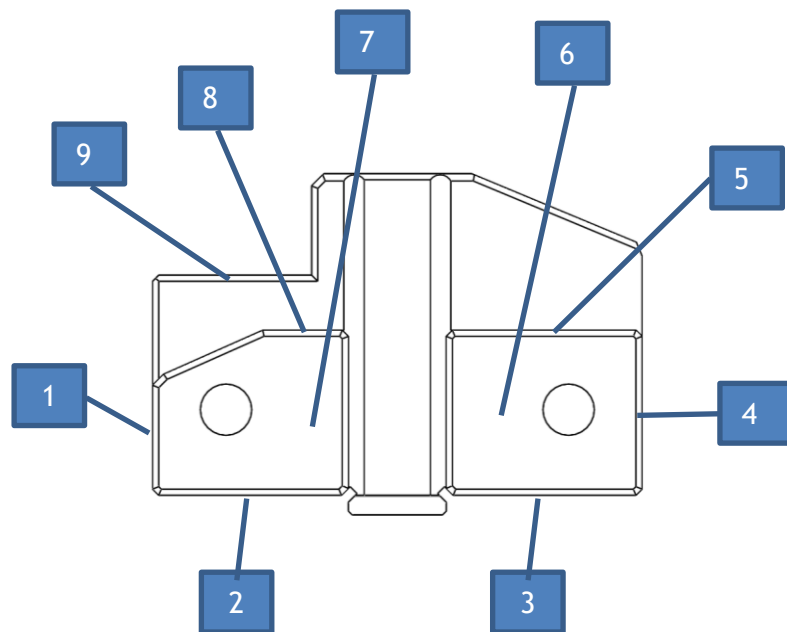


Figura 16 - Pontos analisados na peça 3.

Tabela 4 - Dispersão de valores da Peça 3 (a azul os valores que se encontram dentro do erro da máquina; sublinhados os valores de maior variação para cada cota).

Ponto	Eixo	Desvio médio total (mm)	Média de desvios variando apenas eixo de rotação X e Y (mm)	Média de desvios variando apenas plano de nivelamento Z (mm)
1	Y	0,0000	0,0000	0,0000
2	X	0,0078	<u>0,0072</u>	0,0039
3	X	0,0077	<u>0,0065</u>	0,0041
4	Y	0,0013	<u>0,0013</u>	0,0007
5	X	0,0112	0,0063	0,0094
6	Z	0,0030	0,0003	<u>0,0030</u>
7	Z	0,0106	0,0005	<u>0,0106</u>
8	X	0,0059	<u>0,0048</u>	0,0044
9	X	0,0391	0,0077	0,0391

Foi determinado também o plano que apresenta menor desvio em média das cotas em Z, variando o eixo de fixação de X e Y (Tabela 5). O plano em questão foi o plano 1.

Tabela 5 - Média de desvio das cotas em Z variando apenas a linha de fixação do eixo de rotação X e Y para a peça 3.

	Plano 1 (mm)	Plano 2 (mm)	Plano 3 mm)
Média de desvio das cotas em Z	<u>0,0146</u>	0,0270	0,0254

Neste caso, o vetor de fixação do eixo de rotação de X e Y para o qual são obtidos os menor desvios foi o vetor 1 (Tabela 6).

Tabela 6 - Média de desvio das cotas em X e Y variando apenas o plano de nivelamento em Z na peça 3.

	Linha 1 (mm)	Linha 2 (mm)	Linha 3 (mm)	Linha 4 (mm)
Média de desvio das cotas em X e Y	<u>0,0018</u>	0,0044	0,0021	0,0025

Foram estudados então os valores que se apresentam fora do erro da máquina, e comparados de maneira a se obter qual o melhor alinhamento utilizado.

Para o ponto 5, o alinhamento com menor desvio do valor nominal utilizou o plano 2 para nivelamento em Z, e o vetor 2 para fixação dos eixos X e Y.

O ponto 7 apresentou resultados semelhantes em vários alinhamentos, todos os quais utilizam para nivelamento em Z o plano 1.

O ponto 9 apresentou o melhor resultado com o alinhamento que utiliza como nivelamento em Z o plano 1, e como vetor de fixação dos eixos X e Y o vetor 1.

3.4 Peça 4 - Ricardo & Barbosa

O processo aplicado às peças anterior é replicado na peça 4, sendo criados 12 alinhamentos individuais, segundo os planos apresentados na figura 17, e os vetores apresentados na figura 18, estudando-se os pontos apresentados na figura 19.

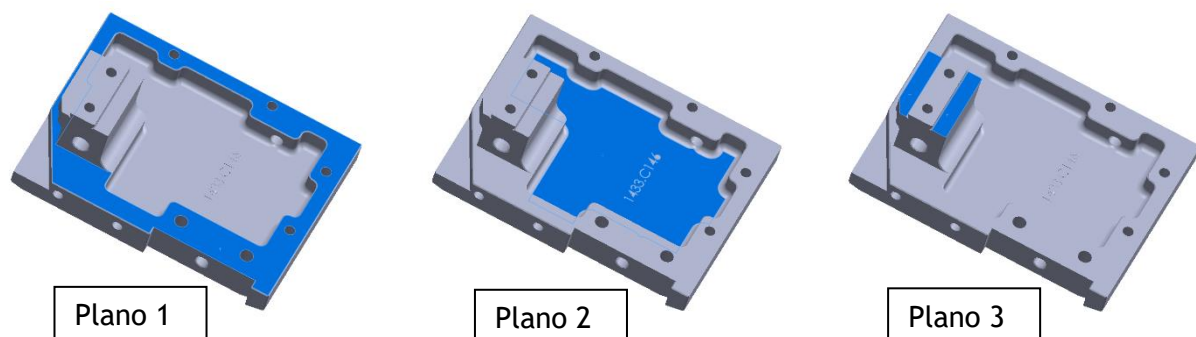


Figura 17 - Planos de nivelamento em Z da peça 4.

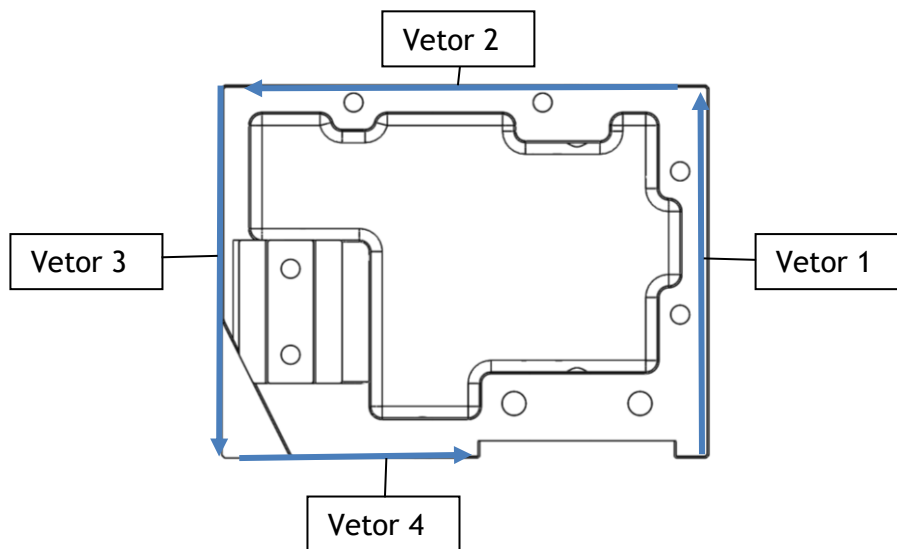


Figura 18 - Vetores a partir dos quais foi fixada a rotação dos eixos X e Y para a peça 4.

Foram novamente comparadas as médias dos desvios variando apenas o plano de nivelamento em z e variando apenas o eixo de rotação X e Y (tabela 7).

Neste caso os valores para as cotas em X e Y não seguiram o padrão descrito acima, sendo que quatro destes valores apresentaram maior média de desvios para os casos em que apenas é variado o plano de nivelamento (dados recolhidos no anexo F).

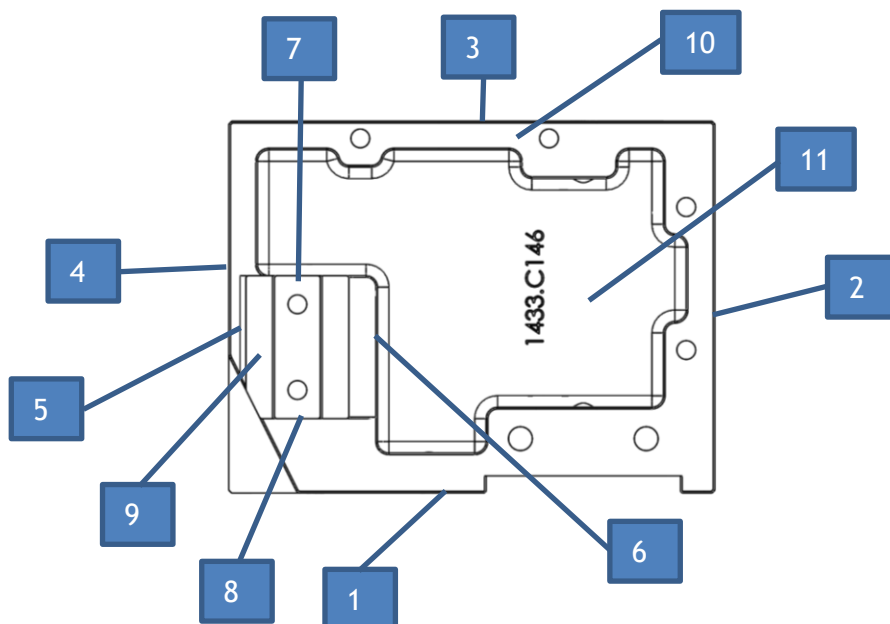


Figura 19 - Pontos analisados na peça 4.

Tabela 7 - Dispersão de cotas para a peça 4 (a azul os valores que se encontram dentro do erro da máquina; sublinhados os valores de maior variação para cada cota).

Ponto	Eixo	Desvio médio total (mm)	Média de desvios variando apenas eixo de rotação X e Y (mm)	Média de desvios variando apenas plano de nivelamento Z (mm)
1	Y	0,0378	0,0248	<u>0,0357</u>
2	X	0,0035	0,0022	<u>0,0031</u>
3	Y	0,0096	<u>0,0096</u>	0,0016
4	X	0,0046	<u>0,0044</u>	0,0027
5	X	0,0098	0,0034	<u>0,0092</u>
6	X	0,0101	0,0034	<u>0,0098</u>
7	Y	0,0166	<u>0,0166</u>	0,0018
8	Y	0,0161	<u>0,0161</u>	0,0017
9	Z	0,0115	0,0004	<u>0,0115</u>
10	Z	0,0106	0,0011	<u>0,0106</u>
11	Z	0,0132	0,0036	<u>0,0121</u>

Foi determinado o plano que apresenta menor desvio em média das cotas em Z, variando o eixo de fixação de X e Y (Tabela 8). O plano que apresentou menor variação foi o plano 2.

Tabela 8 - Média de desvio das cotas em Z variando apenas o vetor de fixação do eixo de rotação X e Y para a peça 4.

	Plano 1 (mm)	Plano 2 (mm)	Plano 3 (mm)
Média de desvio das cotas em Z	0,1332	<u>0,1240</u>	0,1253

Foi também determinada para que vetor de fixação do eixo de rotação de X e Y são obtidos os menores desvios, variando o plano de nivelamento em Z, sendo que

este foi o vetor 1 (Tabela 9).

Tabela 9 - Média de desvio das cotas em X e Y variando apenas o plano de nivelamento em Z na peça 4.

	Vetor 1 (mm)	Vetor 2 (mm)	Vetor 3 (mm)	Vetor 4 (mm)
Média de desvio das cotas em X e Y	<u>0,0115</u>	0,0150	0,0140	0,0164

Neste caso, o alinhamento utilizado que apresentou melhores resultados utilizou como plano de nivelamento em Z o plano 2, e como vetor de fixação dos eixos X e Y, o vetor 4, tendo os pontos 5, 6, 7 e 8 apresentado os valores mais próximos dos nominais.

Nos pontos em Z, 10 e 11, o alinhamento com melhores resultados utilizou como plano de nivelamento em Z o plano 2, e como vetor de fixação dos eixos X e Y o vetor 1.

Para os pontos 1 e 3, o melhor alinhamento usou o vetor 3 e 2 para fixação dos eixos X e Y respectivamente, e o plano 4 para nivelamento em Z.

3.5 Peça 5 - Norcam

Para esta peça foi repetido o processo anterior, no entanto, devido aos maiores valores de desvio apresentados pela mesma, foi também feito um estudo, repetindo-se oito vezes um programa com o mesmo alinhamento, de maneira a verificar o erro da máquina.

Foram feitos alinhamentos a partir de 4 planos de nivelamento em Z diferentes e 4 vetores de fixação do eixo de rotação de X e Y, para um total de 16 alinhamentos independentes (figuras 20 e 21).

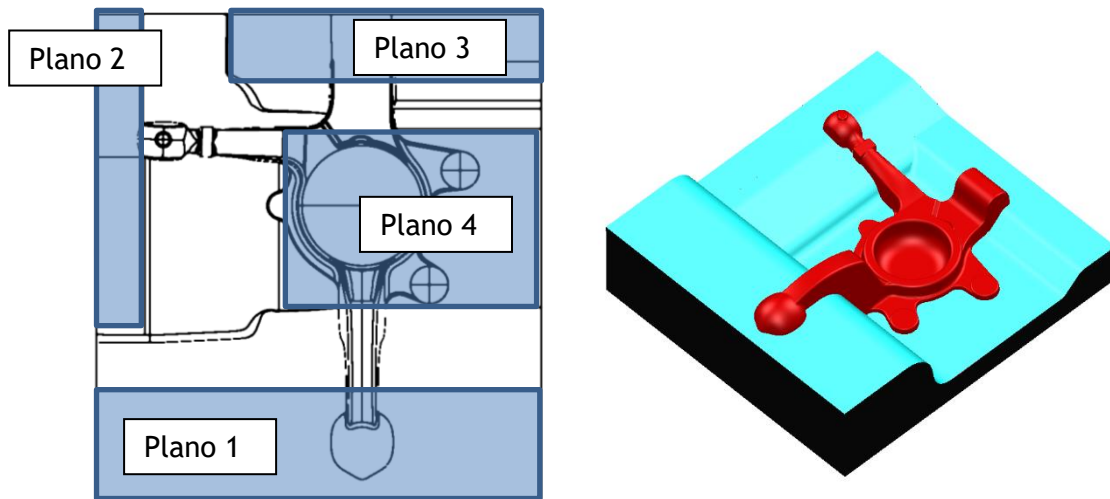


Figura 20 - Planos de nivelamento em Z da peça 4 (à esquerda a azul).

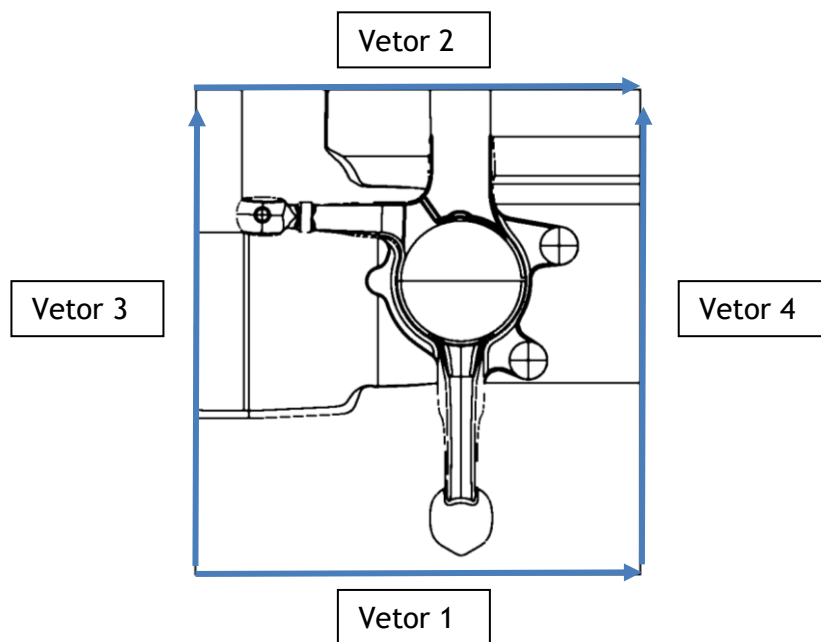


Figura 21 - Vetores a partir dos quais foi fixada a rotação dos eixos X e Y para a peça 5.

Foram depois medidas as posições do círculo no centro da peça, e dos 4 vértices superiores desta (figura 22), comparando-se a dispersão dos valores dos mesmos.

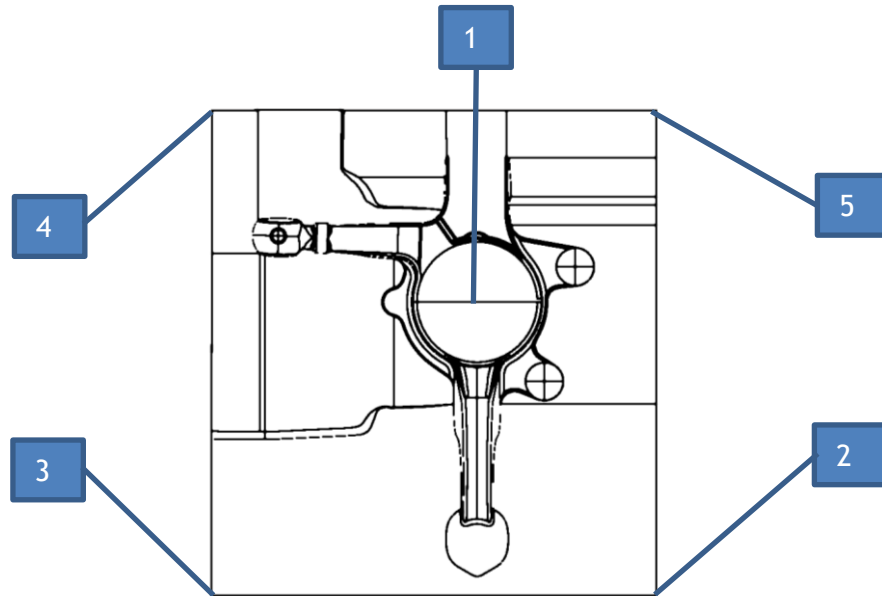


Figura 22 - Pontos analisados na peça 5.

Após execução dos programas estudou-se o desvio médio apresentado pelos pontos, de maneira idêntica à que foi feita nas peças anteriores (tabela 10) (dados recolhidos no anexo G).

Neste caso os valores seguiram o padrão sugerido na peça 2 (que os planos de nivelamento afetam com maior intensidade as cotas em Z e os vetores de fixação do eixo X e Y afetam com maior intensidade as cotas X e Y), havendo apenas um valor para o qual isto não sucede (ponto 2, em Y).

Tabela 10 - Dispersão de valores para a peça 5 (sublinhados os valores de maior variação para cada cota).

Ponto	Eixo	Desvio médio total (mm)	Média de desvios variando apenas eixo de rotação X e Y (mm)	Média de desvios variando apenas plano de nivelamento Z (mm)
1	X	0,0269	<u>0,0251</u>	0,0212
	Y	0,0256	<u>0,0264</u>	0,0230
2	X	0,0887	<u>0,0828</u>	0,0324
	Y	0,1004	0,1004	<u>0,0139</u>
	Z	0,0692	0,0095	<u>0,0698</u>
3	X	0,0437	<u>0,0437</u>	0,0147
	Y	0,0935	<u>0,0935</u>	0,0153
	Z	0,0675	0,0083	<u>0,0675</u>
4	X	0,0588	<u>0,0588</u>	0,0115
	Y	0,0626	<u>0,0565</u>	0,0381
	Z	0,1203	0,0078	<u>0,1203</u>
5	X	0,0863	<u>0,0827</u>	0,0342
	Y	0,0657	<u>0,0584</u>	0,0361
	Z	0,1046	0,0128	<u>0,1046</u>

Comparou-se também os valores médios dos desvios, fixando-se apenas o plano de nivelamento (tabela 11), ou o vetor de fixação (tabela 12). No caso dos planos de nivelamento em Z, o plano que apresentou melhores resultados foi o plano 4. Para os vetores de fixação dos eixos de rotação X e Y, o vetor que apresentou melhores resultados foi o vetor 3.

Tabela 11 - Média de desvio das cotas em Z variando apenas o vetor de fixação do eixo de rotação X e Y para a peça 5.

	Plano 1 (mm)	Plano 2 (mm)	Plano 3 (mm)	Plano 4 (mm)
Média de des- vio das cotas em Z	0,1876	0,2071	0,2210	<u>0,1801</u>

Tabela 12 - Média de desvio das cotas em X e Y variando apenas o plano de nivelamento em Z na peça 5.

	Linha 1 (mm)	Linha 2 (mm)	Linha 3 (mm)	Linha 4 (mm)
Média de des- vio das cotas em X e Y	0,1894	0,2006	<u>0,1892</u>	0,2166

Usando os 8 estudos repetidos, com o mesmo alinhamento, determinou-se o desvio médio para as cotas obtidas, sendo este bastante reduzido (0,0006), quando comparado com os desvios apresentados na tabela 10, ou até mesmo com o erro teórico da máquina.

Comparando os menores desvios para os pontos estudados com os alinhamentos utilizados, criou-se uma tabela de forma a melhor visualizar quais os melhores datums que apresentaram melhores resultados nos diferentes alinhamentos (tabela 13).

Tabela 13 - Distribuição de melhores datums de cada alinhamento para cada ponto analisado na peça 5.

Ponto	Alinhamento com menores desvios		Alinhamento com 2º menores desvios	
	Plano de nivelamento Z	Vetor de fixação X e Y	Plano de nivelamento Z	Vetor de fixação X e Y
1	3	1	3	3
2	2	1	2	2
3	4	3	1	3
4	3	1	3	3
5	3	2	3	4

Após análise dos alinhamentos, verifica-se que nesta peça os resultados não são conclusivos, podendo isto dever-se ao erro acrescido do cálculo dos vértices feito pela CMM. No entanto, destaca-se o melhor plano de nivelamento como o plano 3, apresentando estes bons resultados em vários alinhamentos.

3.5.1 Variação do ponto de origem em Z

Até este ponto, todas as peças analisadas usaram sempre o mesmo ponto de origem para os eixos X, Y, e Z.

Na peça 5 é estudada a variação da origem em Z, mantendo-se o mesmo plano de nivelamento em Z, o vetor de fixação dos eixos de rotação X e Y, e os pontos de origem para X e Y.

Foram utilizados:

- Plano de nivelamento em Z: plano 2 (figura 23);
- Vetor de fixação do eixo de rotação X e Y e origem de X: vetor 1 (figura 21);
- Origem de Y: vetor 3 (figura 21).

A origem em Z variou depois entre o plano inicial (plano 2), e os pontos A, B, C, D, e E (figura 23).

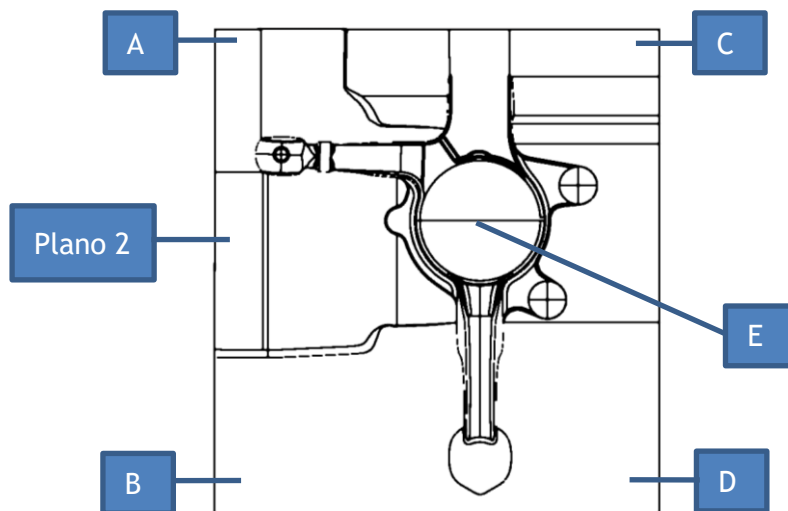


Figura 23 - Pontos utilizados como origem de Z.

Foram medidos 90 pontos a partir de cada alinhamento, tentando-se que estes abrangessem toda a superfície da peça. Os pontos estudados estão representados na figura 24, onde cada célula representa a zona em que cada ponto foi medido. Os resultados deste estudo são estudados em maior profundidade no capítulo 4.

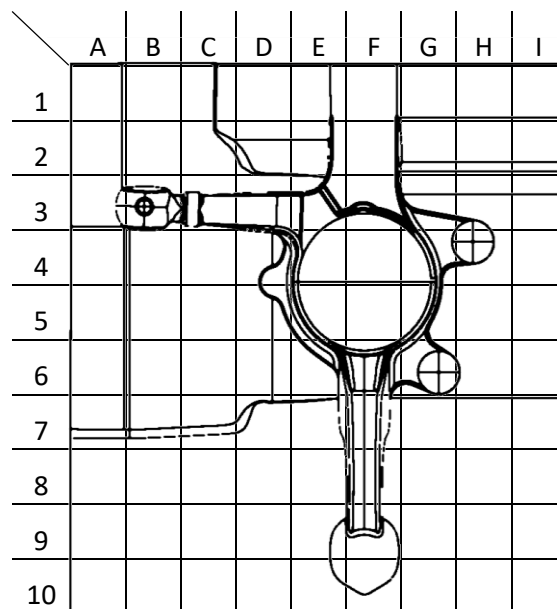


Figura 24 - Esquema dos pontos analisados na peça 5.

3.6 Alinhamento Best-Fit

Após realização de alinhamentos PLP a várias peças, variando os planos de nivelamento e vetores de fixação dos eixos, realizou-se o alinhamento Best-Fit à peça 2. Para este alinhamento foram utilizados como Datums os 6 círculos demonstrados na figura 11.

Após execução do programa na CMM, foi criada a tabela 14, comparando os desvios apresentados com alinhamento Best-Fit com a média de desvios obtidos com os alinhamentos PLP realizados à peça 2 (tabela 14).

Tabela 14 - Comparação de desvios entre alinhamento PLP e alinhamento Best-Fit (a verde as cotas em que o desvio foi menor com o alinhamento Best-Fit).

Datum	Eixo	Média de des- vios em alinha- mento PLP (mm)	Desvio em ali- nhamento Best Fit (mm)	Diferença (mm)
1	X	0,0703	0,0160	0,0543
	Y	0,0204	0,0050	0,0154
2	X	0,0724	0,0090	0,0634
	Y	0,0005	0,0260	-0,0255
3	Y	0,0362	0,0270	0,0092
	Z	0,0675	0,0200	0,0475
4	Y	0,0433	0,0020	0,0413
	Z	0,0606	0,0150	0,0456
5	X	0,1348	0,0790	0,0558
	Z	0,1120	0,2330	-0,1210
6	X	0,0339	0,1420	-0,1081
	Z	0,0466	0,2080	-0,1614

Analisando os resultados da tabela 14 pode-se observar que a maior parte dos pontos apresentaram desvio reduzido para o alinhamento best-fit, no entanto, devido ao número reduzido de amostras não se pode considerar este estudo como conclusivo.

Capítulo 4

Estudo dos Resultados

4.1 Influência da escolha do alinhamento nos resultados

O alinhamento pode influenciar os resultados obtidos por três principais razões:

1. Erro de medição ou irregularidade nos datums escolhidos para o alinhamento:

Estes desvios são muito difíceis de prever, pois não são normalmente visíveis a olho nú, a não ser que hajam superfícies com melhores acabamentos (superfície bruta de fundição vs superfície maquinada), podendo ser evitados apenas pela escolha de uma superfície menos irregular ou rugosa, ou pela escolha de pontos onde as tolerâncias previstas sejam mais reduzidas.

2. Distância entre pontos amostrais dos datums do alinhamento:

Quanto mais distanciados estiverem os pontos amostrais de um alinhamento, menor será o erro, como é exemplificado na figura 25.

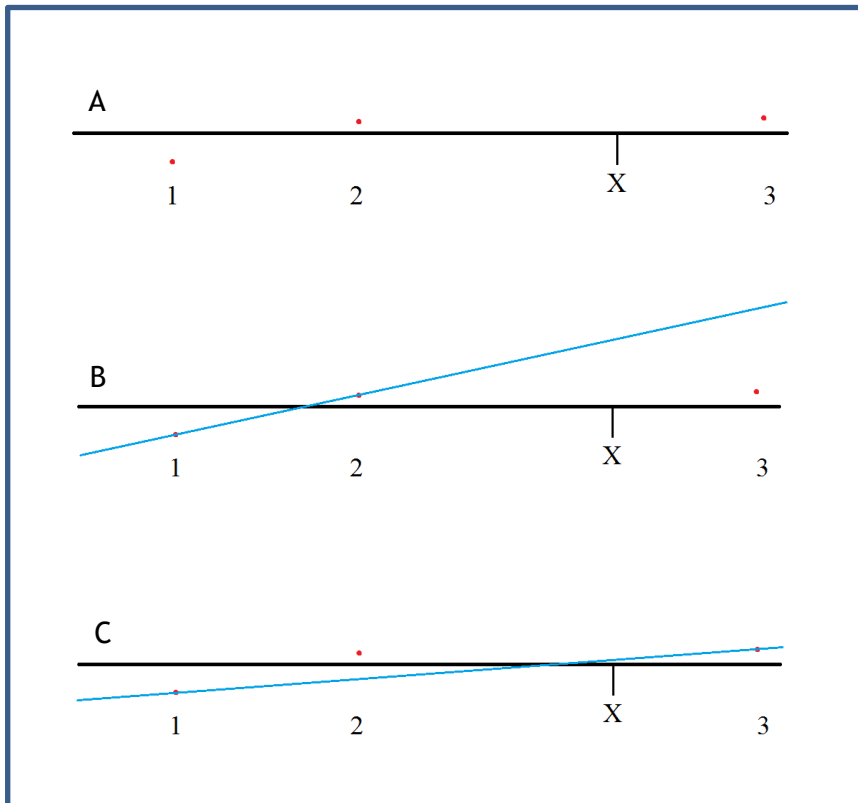


Figura 25 - Esquema (exagerado) da variação obtida pelo afastamento de pontos amostrais.

Como se pode observar, na figura 25, A, estão representados pontos amostrais a partir dos quais se irá fazer uma vetor para alinhamento, cada um apresentando um erro associado.

Na figura 25 - B, são escolhidos os pontos mais próximos, causando um maior desvio do vetor do que é na realidade a superfície da peça a analisar.

Na figura 25 - C, são escolhidos os pontos mais afastados, e apesar destes apresentarem desvios iguais ao caso B, o desvio apresentado quando analisando o ponto X é relativamente menor.

3. Distância entre os pontos a ser analisados e o plano de nivelamento ou vetor de fixação:

Esta variação de medição pode ser causada pelo afastamento de um ponto a ser analisado a um datum utilizado no alinhamento (figura 26).

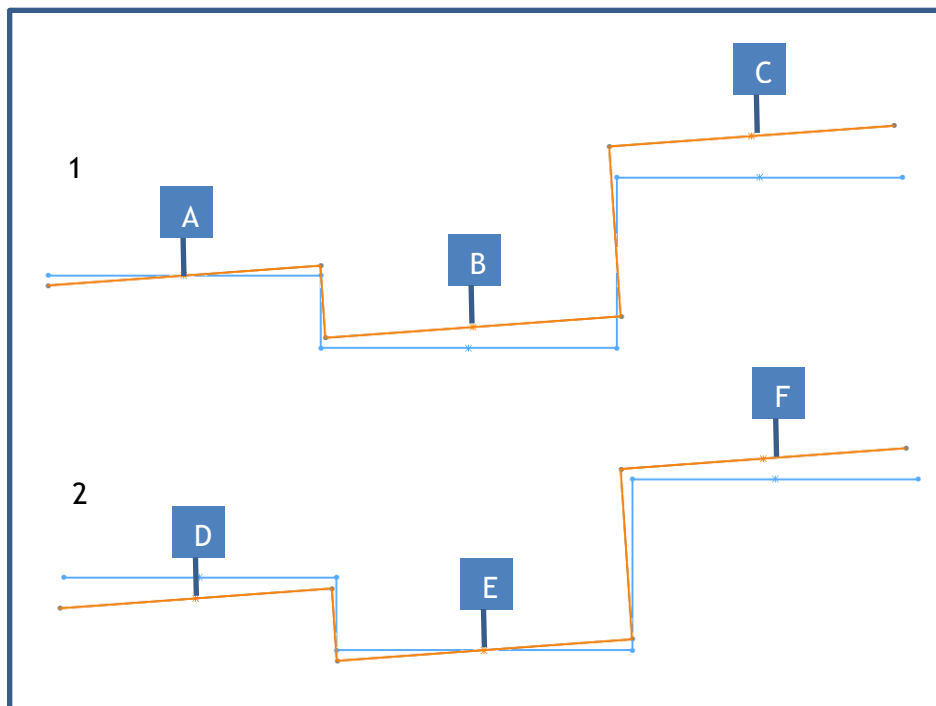


Figura 26 - Esquema (exagerado) da variação obtida pelo afastamento dos pontos a ser analisados ao datum usado no alinhamento (Azul peça real; Laranja - desvio causado por alinhamento).

No esquema acima representado temos dois alinhamentos utilizando um mesmo plano de nivelamento (resultando num mesmo declive), mas os quais apresentam diferentes origens. No caso 1, a origem encontra-se a meio do plano do plano esquerdo, resultando em valores para o ponto A muito próximos dos reais. No entanto, para o ponto B e C, estes valores vão-se afastando da realidade.

No caso 2, o plano de nivelamento tem como origem o plano central. Isto causa uma distribuição mais homogénea do erro pela peça, apresentando os pontos D e F um afastamento semelhante do da peça real.

4.2 Comparação entre pontos estudados e alinhamentos

4.2.1 - Peça 2 - Ricardo & Barbosa

Nesta peça, todos os datums (figura 12) que variaram para além do erro da máquina apresentaram como melhor alinhamento o alinhamento que usa:

- Plano de nivelamento: Plano 1
- Origem de Z: Plano 1
- Vetor de fixação do eixo X e Y: Vetor 1
- Origem de X: Vetor 1
- Origem de Y: Vetor 4

Nesta peça, como o centro do nivelamento em Z é basicamente o mesmo, não há grande diferença entre os planos utilizados, sendo que o plano 3 pode apresentar ainda mais variação devido à não contiguidade do mesmo.

O mesmo caso acontece para o vetor de fixação, sendo que os pontos amostrais do vetor 2 e do vetor 4 não são contíguos.

Entre o vetor 1 e o vetor 2, é o primeiro que apresenta maior distância entre pontos amostrais, podendo esta ser a razão que leva a uma redução no erro dos datums estudados.

4.2.3 - Peça 3 - Ricardo & Barbosa

Na peça 2, os pontos estudados que apresentaram variação relevante foram os pontos 5, 7, e 9.

No caso do ponto 5, este usa para o alinhamento (figura 27):

- Plano de nivelamento: Plano 2
- Origem de Z: Plano 1 (figura 14)
- Vetor de fixação do eixo X e Y: Vetor 2
- Origem de X: Vetor 1 (figura 15)
- Origem de Y: Ponto 1

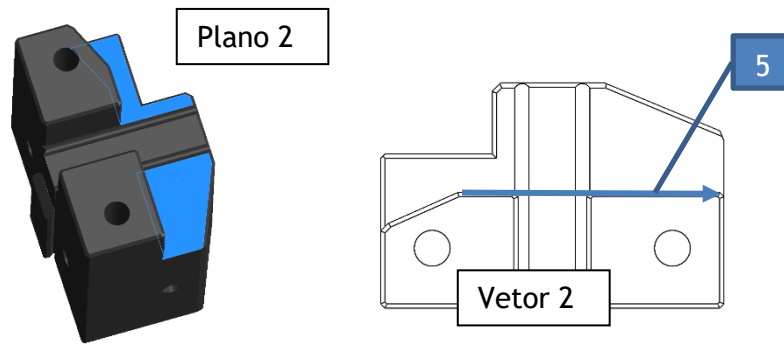


Figura 27 - Datums usados num dos alinhamentos da peça 3 (ponto 5).

Para este ponto, o principal motivo para a proximidade da medição com o valor nominal será provavelmente a proximidade com o vetor 2 de fixação usado no alinhamento.

Para os pontos 7 e 9, o alinhamento utilizado com menor desvios de medição foi o alinhamento que usa (figura 28):

- Plano de nivelamento: Plano 1
- Origem de Z: Plano 1
- Vetor de fixação do eixo X e Y: Vetor 1 (no caso do ponto 9 o vetor é indiferente)
- Origem de X: Vetor 1
- Origem de Y: Ponto 1

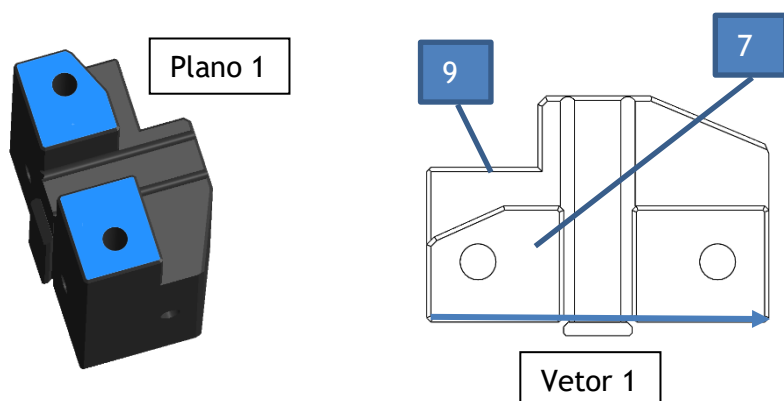


Figura 28 - Datums usados num alinhamento da peça 3 (pontos 7 e 9).

No caso do ponto 7, uma cota em Z, o ponto é coincidente com o plano a partir do qual se fez o alinhamento, sendo que o vetor de fixação se revelou de pouca importância nos valores apresentados pelo mesmo.

O ponto 9 tem como o vetor de fixação mais favorável o vetor 1, podendo isto dever-se à maior distância entre pontos amostrais do mesmo, no entanto, o vetor 3 (Figura 28), apresenta-se com o segundo valor mais próximo do nominal, por distância inferior ao erro da máquina.

4.2.3 - Peça 4 - Ricardo & Barbosa

Na peça 4 houve 8 pontos de variação relevante para o estudo. Em todos eles foi utilizado como origem de Z o plano 1, como origem de X o vetor 1, e como origem de Y o ponto 1.

No caso do Ponto 1, o alinhamento que apresenta menor erro utiliza o vetor 3 como vetor de fixação dos eixos X e Y, tendo este alinhamento usado como nivelamento em Z o plano 3.

Para o ponto 3, o alinhamento que apresenta menor erro usa o vetor de fixação adjacente ao ponto, ou seja, o vetor 2, e o plano 3 como plano de nivelamento.

Para os pontos 5, 6, 7, e 8, todos usam como plano de nivelamento em Z o plano 2, e como vetor de fixação dos eixos X e Y o vetor 4, podendo isto estar associado à proximidade entre os pontos e o vetor.

Para os pontos 10 e 11, cotas em Z, ambos utilizam como plano de nivelamento em Z o plano 2 e vetor de fixação dos eixos X e Y o vetor 1.

O facto de nenhum dos pontos apresentados com variação relevante apresentar um melhor alinhamento que utilize o plano de nivelamento em Z como sendo o plano 1 pode indicar que houve erros de medição ou irregularidades na superfície que não poderiam ser evitadas.

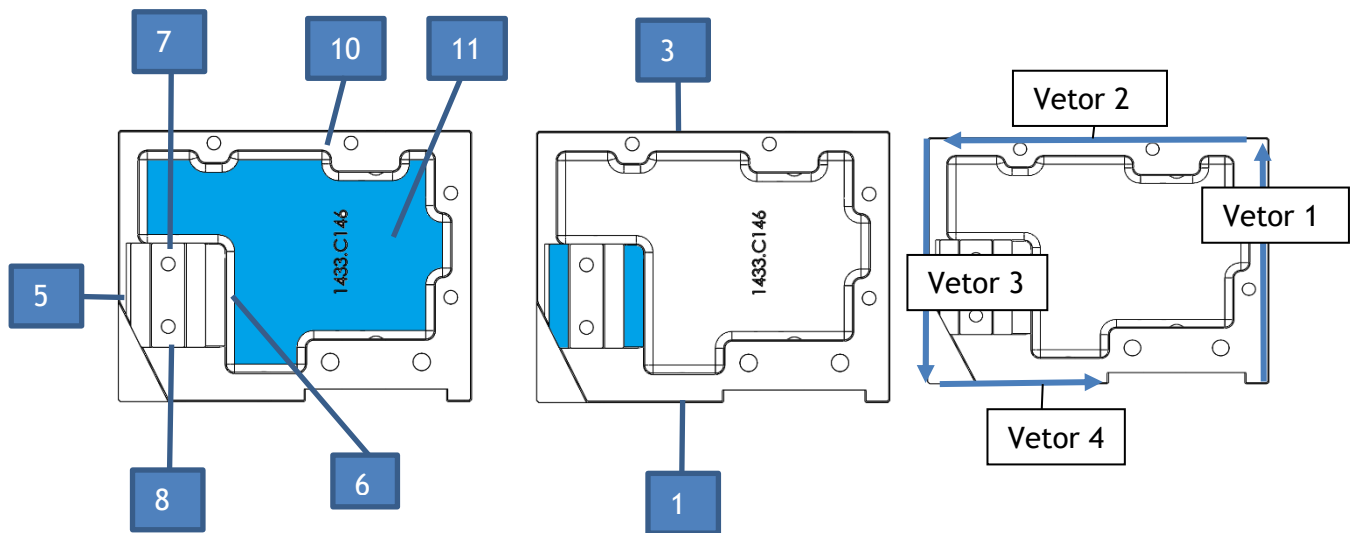


Figura 29 - Pontos estudados e datums utilizados no alinhamento da peça 4.

4.2.4 - Peça 5 - Norcam

De maneira a analisar a influência da distância entre pontos analisados e o plano de nivelamento, foi feito o estudo referido no ponto 3.5.1..

A partir dos 90 pontos retirados deste estudo, foi criado um *heatmap*, lado a lado ao esquema da peça, de maneira a melhor compreender a variação dos desvios. Desta maneira é possível visualizar-se mais facilmente a diferença de desvios, resultante da variação do alinhamento utilizado.

Nas figuras 30 a 35 apresentam-se os resultados referentes aos alinhamentos feitos neste estudo.

Alinhamento 1

Como se pode observar na figura 29, comparando a zona do alinhamento e os valores dos desvios, os desvios vão aumentando com o aumento da distância entre o centro da origem em Z e os pontos estudados.

Existem, no entanto, algumas exceções, como é o caso dos pontos D-6, F-6 e E-10, que se podem dever a defeitos na peça.

Alinhamento 2

Do alinhamento 1 para o alinhamento 2 não são apresentadas grandes variações nos desvios apresentados. No entanto os pontos D-6, F-6 e E-10 continuam a apresentar desvios elevados, reafirmando que se devem tratar de defeitos no fabrico da peça (Figura 30).

Alinhamento 3

No alinhamento 3, apesar de não ser evidente no heatmap apresentado na figura 31, pode-se observar em detalhe no anexo H que os desvios são menores no lado esquerdo da peça no ponto 10, aumentando até ao ponto 1.

Alinhamento 4

No alinhamento 4 é visível grande variação dos desvios apresentados, passando os menores valores para o lado direito da peça, mais perto da zona onde foi dada a origem de Z (Figura 32).

Alinhamento 5

No alinhamento 5, não é visível grande diferença quando comparado com o alinhamento 4, não podendo ser feita a distinção que se fez entre os alinhamentos 2 e 3, pois os valores apresentados são muito próximos (Figura 33).

Alinhamento 6

Para o alinhamento 6 (figura 34) tentou usar-se como origem de Z um ponto mais central na peça. Isto resultou numa variação mais homogénea entre os desvios. Não são encontrados desvios tão reduzidos como noutros alinhamentos, mas, no entanto, também não são encontrados desvios demasiado elevados (com exceção dos pontos D-6, F-6 e E-10, que como já se tinha referenciado devem resultar de defeitos na peça).

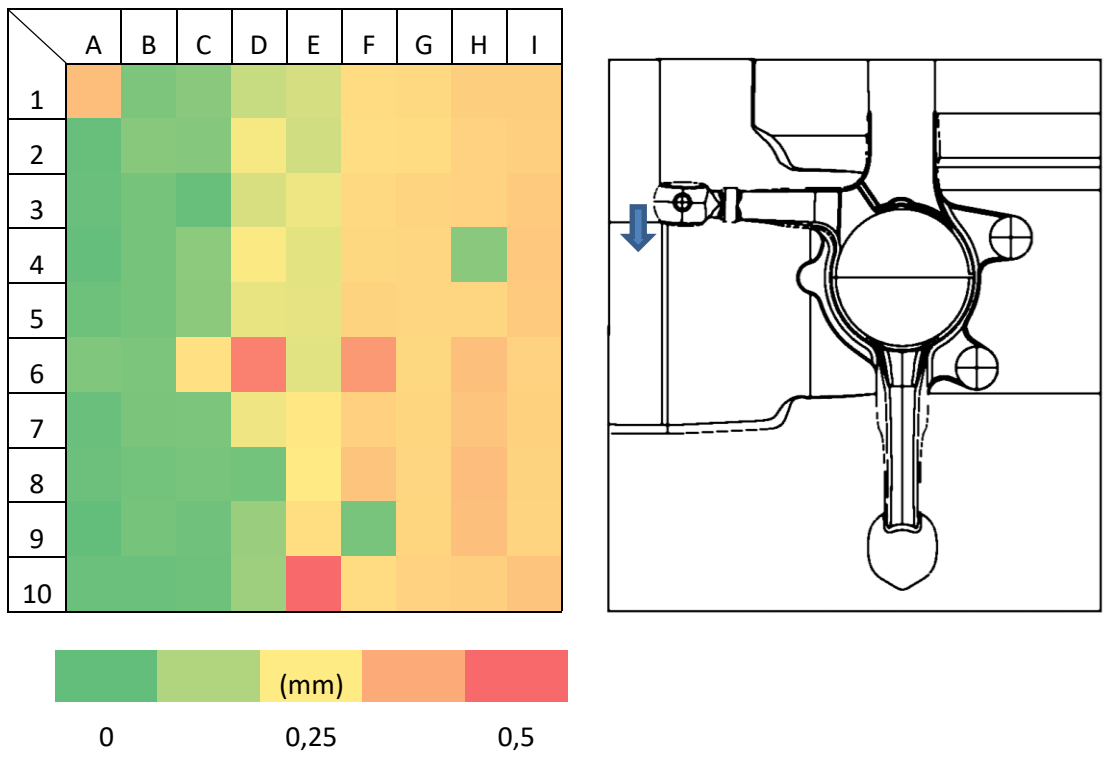


Figura 30 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 1, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.

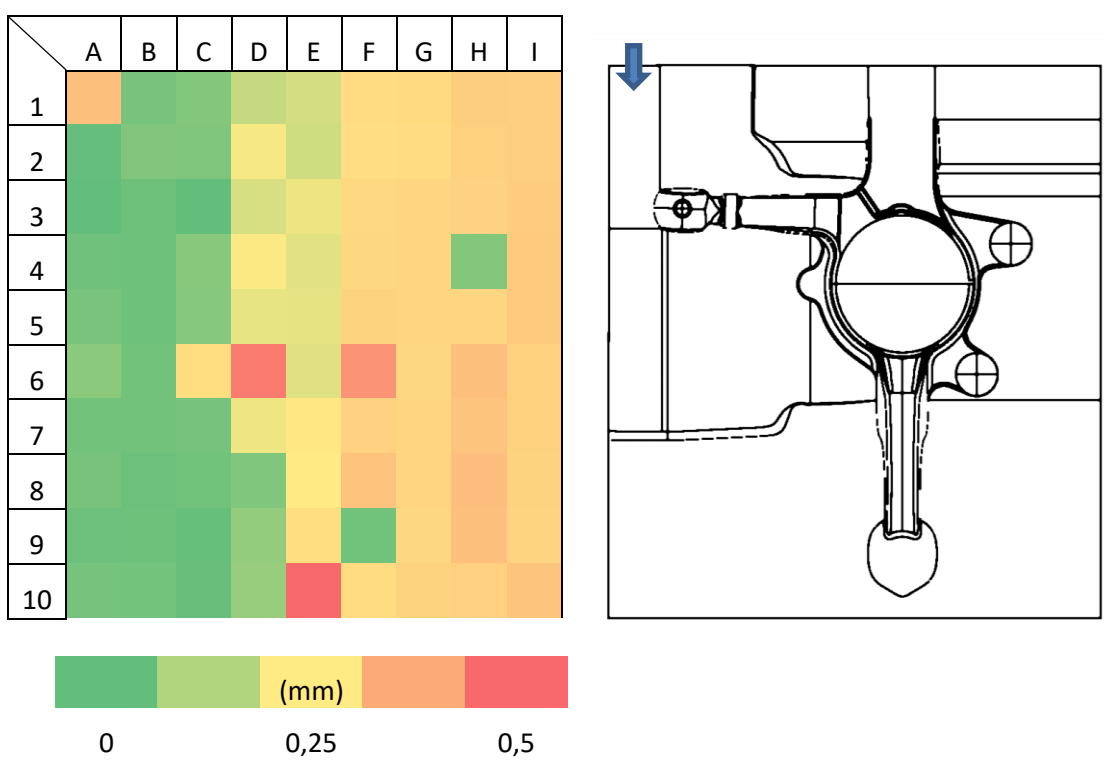


Figura 31 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 2, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento

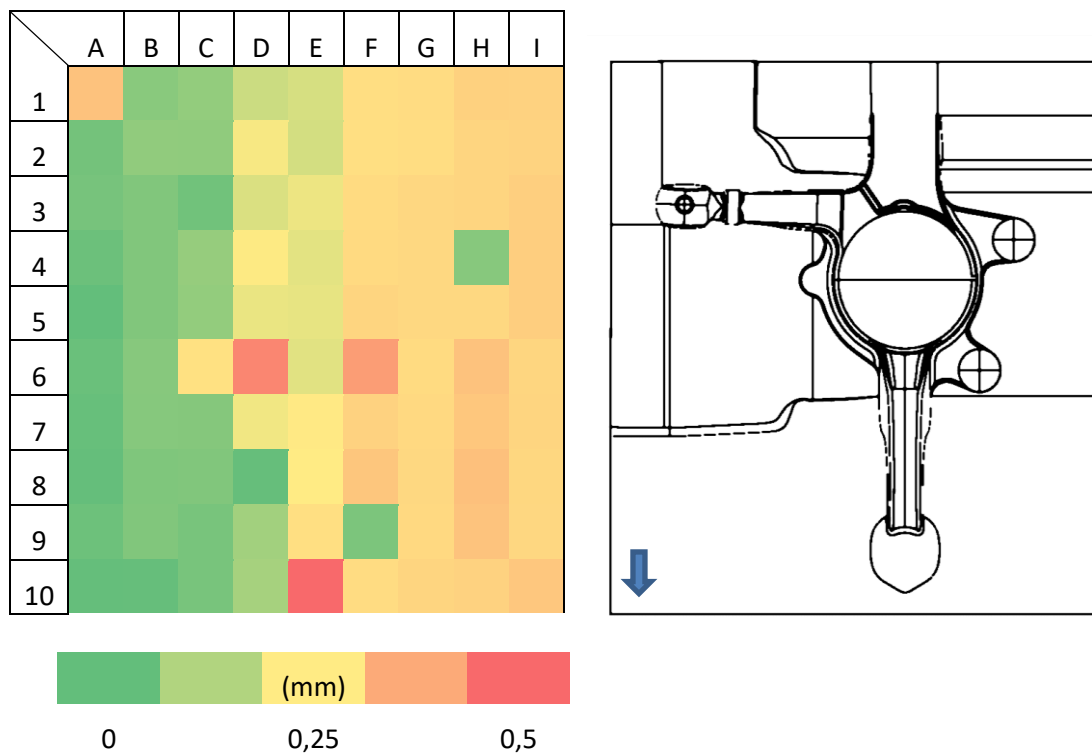


Figura 32 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 3, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.

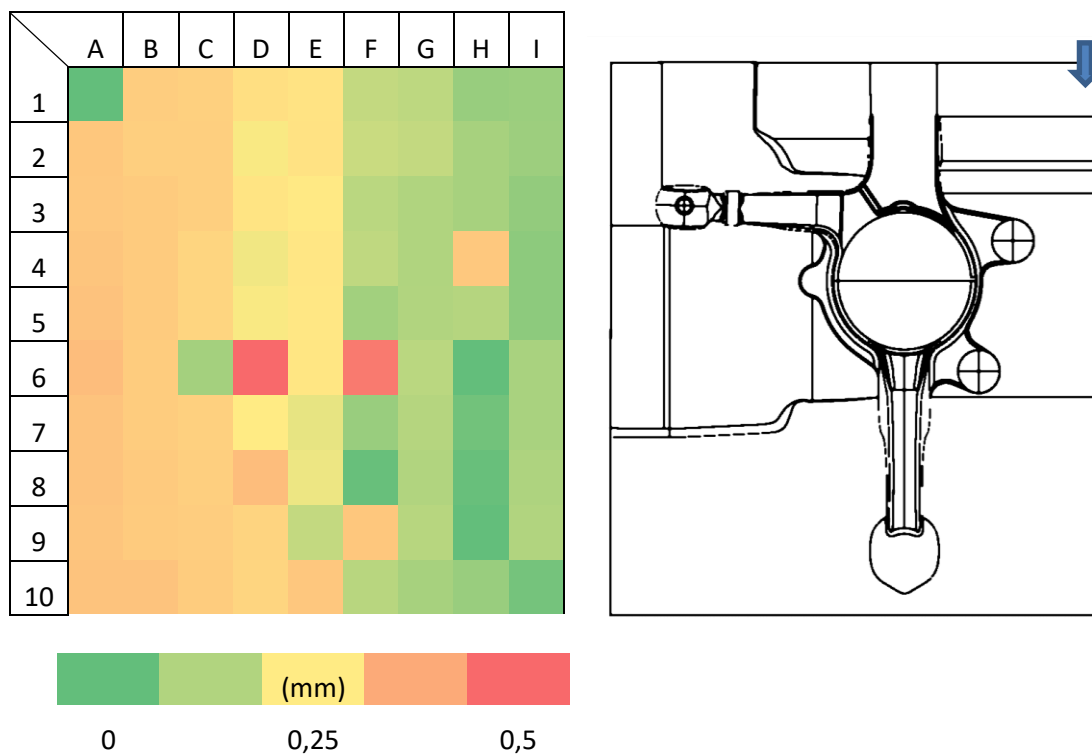


Figura 33 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 4, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.

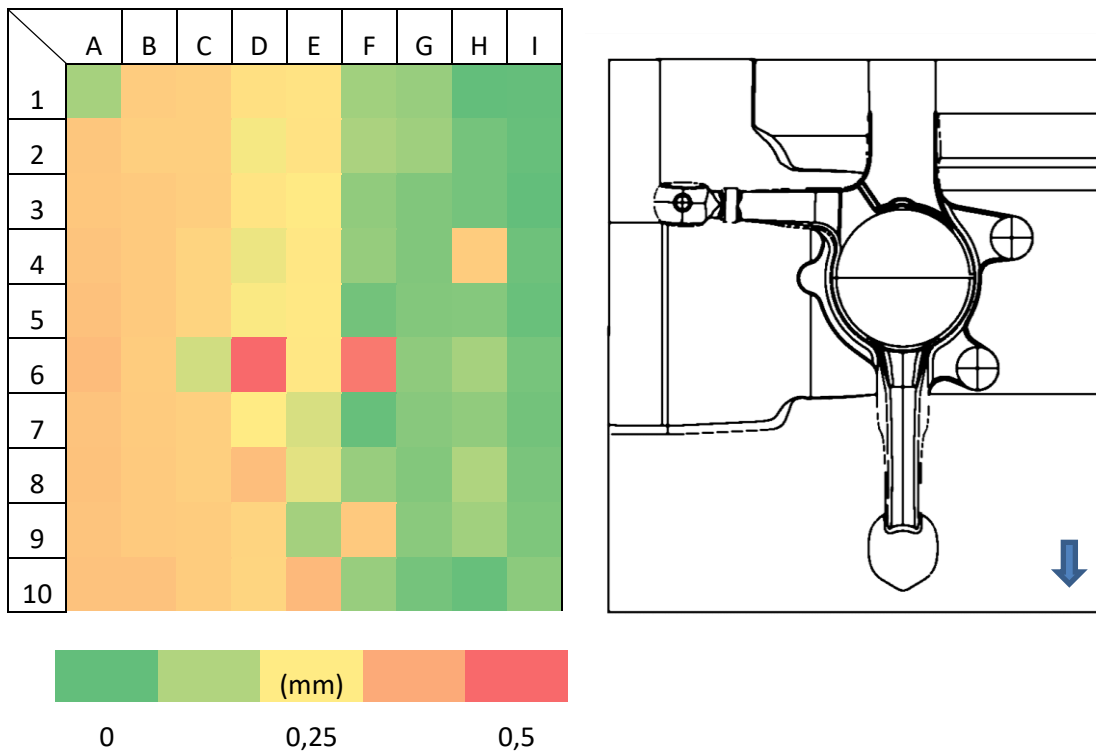


Figura 34 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 4, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.

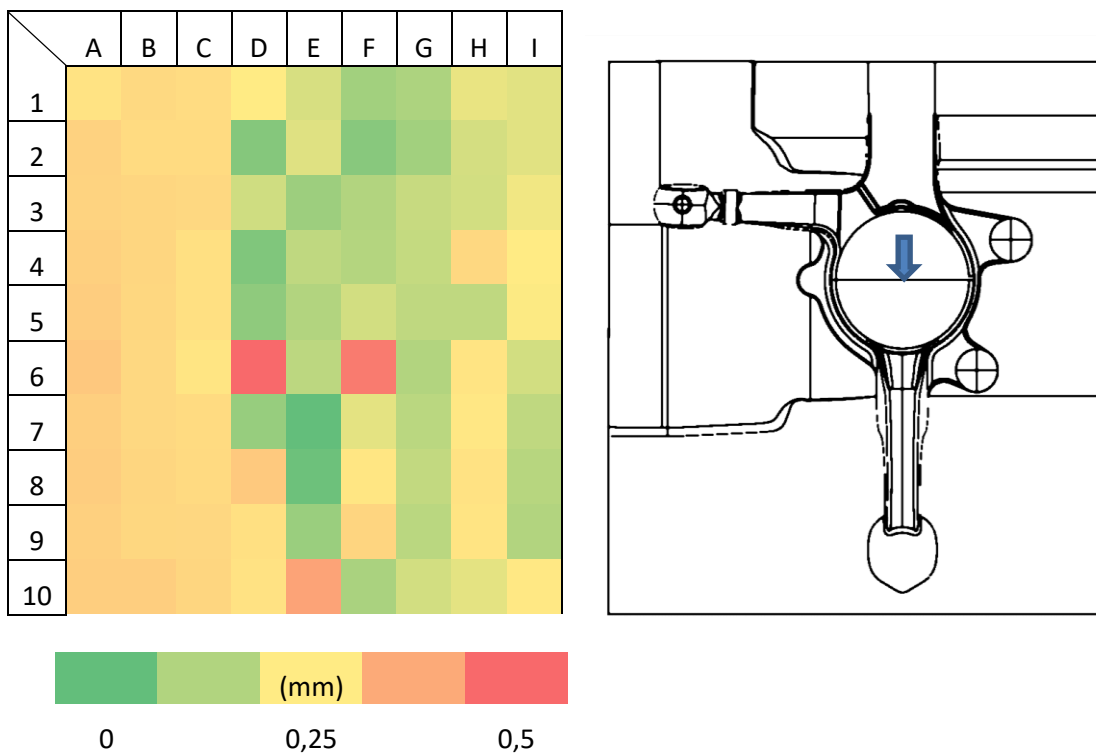


Figura 35 - À esquerda o heatmap dos pontos estudados na peça 5 com o alinhamento 4, à direita a azul o centro da origem em Z neste alinhamento.

O estudo destes alinhamentos vai de encontro à teoria sugerida no início deste capítulo, de que a distância entre os pontos a ser analisados e o plano de nivelamento ou vetor de fixação influencia os desvios estudados.

Neste caso, o ponto mais central na peça apresentou um melhor resultado, ou seja, desvios mais reduzidos.

4.3 Desenvolvimento de metodologia para alinhamento

Com base no estudo bibliográfico e recorrendo aos resultados obtidos nas peças analisadas, foi criado um fluxograma que tem como objetivo a redução de erros de medição na inspeção 3D para peças de um modo generalizado.

Este fluxograma apresenta-se dividido em 3 objetivos - plano, linha, ponto - de forma a completar o alinhamento PLP. Neste fluxograma não foram incluídos outros tipos de alinhamento devido à falta de resultados conclusivos neste estudo.

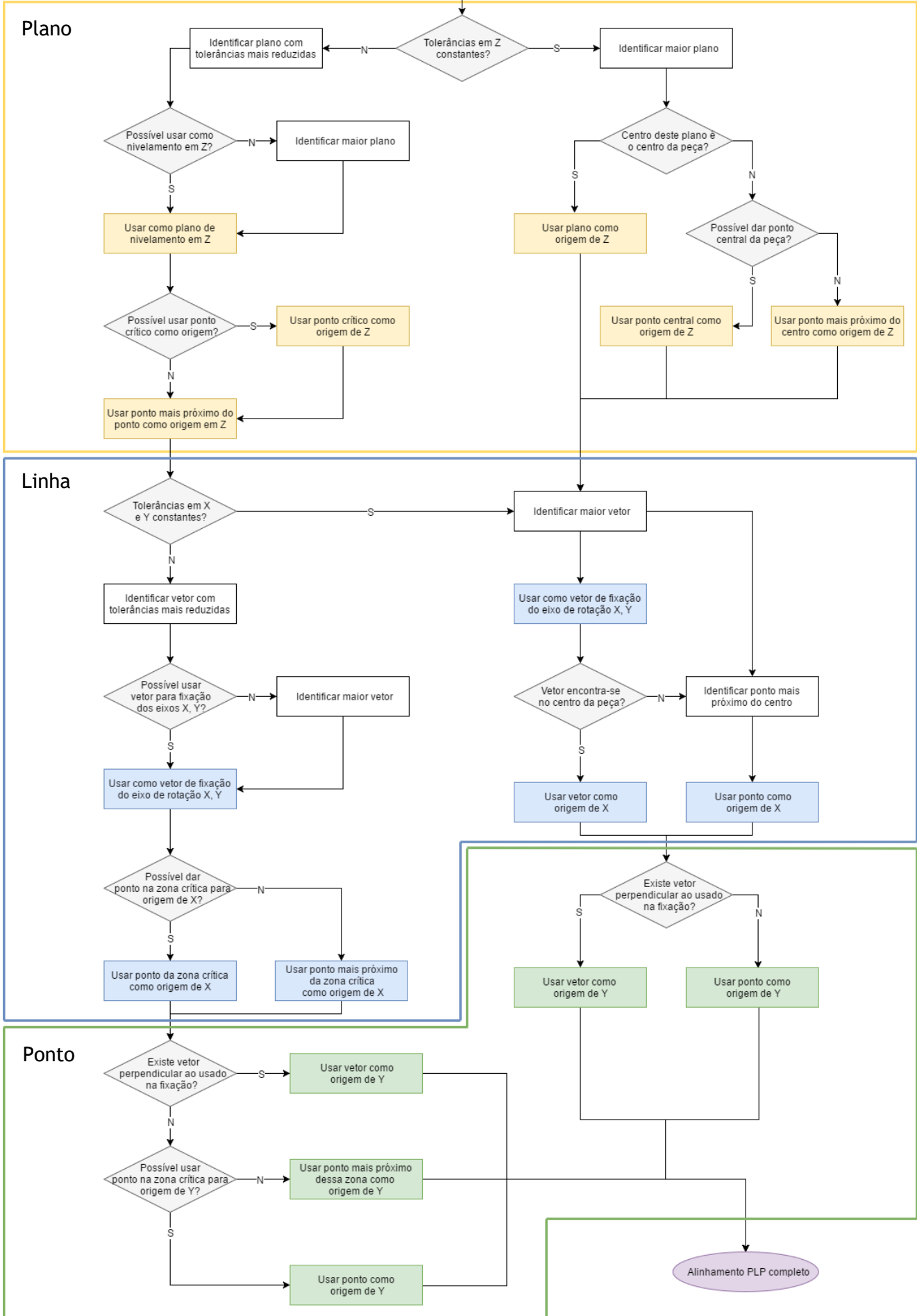
Dentro destes 3 objetivos é também tido em conta a uniformidade ou não das tolerâncias na peça, assim como a localização de zonas críticas (zonas em que as tolerâncias são mais reduzidas. Isto de forma a que nas peças em que as tolerâncias são uniformes, os erros se apresentem de forma distribuída pela peça, e que nas peças em que apresentam zonas críticas, o erro de medição seja mais reduzido na zona em questão.

De forma a facilitar a leitura do fluxograma alguns termos foram simplificados:

- Maior plano: Plano com pontos amostrais mais afastados;
- Eixo de fixação: Vetor de fixação dos eixos X e Y em torno de Z.

Em alguns casos é também questionado se o ponto é possível de ser utilizado, isto acontece, pois, em alguns casos podem existir declives demasiado acentuados, resultando em erros de medição exagerados.

Estudo de tolerâncias



Conclusão

No âmbito do desenvolvimento desta dissertação foram adquiridos conhecimentos na área da metrologia, incluindo a aprendizagem do software PC-DMIS da Hexagon, assim como da aprendizagem do funcionamento da CMM presente no CINFU. Estes conhecimentos, aliados aos previamente adquiridos no Mestrado Integrado em Engenharia de Materiais, mostraram-se de relevância neste estudo e permitiram uma análise compreensiva dos dados recolhidos.

Tendo como objetivo o estudo da influência do alinhamento em CMM, foi feito um estudo, comparando a utilização de diversos métodos, aplicando diferentes planos, vetores e pontos ao alinhamento de cada peça, e estudando os resultados obtidos com as medições utilizadas para cada alinhamento.

Pôde-se concluir que, a utilização de diferentes alinhamentos apresenta variação relevante na inspeção 3D, podendo reduzir o erro de inspeção, e permitindo assim uma análise posterior, sobre qual seria o melhor método a utilizar na escolha do alinhamento PLP.

Neste seguimento, as variáveis que podem ser controladas de forma a melhorar o alinhamento são:

- Distância entre pontos amostrais de um datum do alinhamento - quanto mais afastados os pontos, mais reduzido é o erro de medição.
- Distância entre os datums do alinhamento e os pontos a ser estudados - quanto mais afastadas as medições forem dos datums usados no alinhamento, maior será o erro de medição.
- Superfícies com tolerâncias mais reduzidas apresentam desvios menores - por exemplo quando comparando uma superfície maquinada a uma superfície bruta de fundição.

Seguindo o fluxograma apresentado previamente podem ser conseguidos alinhamentos que de uma forma geral apresentam menos erros de medição que um alinhamento selecionado sem qualquer tipo de preparação.

Revela-se ainda importante a comparação entre o alinhamento PLP e alinhamentos Best-Fit e Iterative, que não foram aprofundados neste estudo.

Bibliografia

1. BIPM. *Worldwide metrology*. 2017 [cited 2017 14 Mar]; Available from: <http://www.bipm.org/worldwide-metrology>.
2. MSC. *History of Metrology - MSC*. 2017 [cited 2017 17 Mar]; Available from: <http://www.msc-conf.com/history-of-metrology/>.
3. *Metre (m)*. Apr 28, 2014; Available from: <https://www.britannica.com/science/metre-measurement>.
4. Weckenmann, A., et al., *Probing systems in dimensional metrology*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004. **53**(2): p. 657-684.
5. De Bièvre, P., *The 2012 International Vocabulary of Metrology: "VIM"*. Accreditation and Quality Assurance, 2012. **17**(2): p. 231-232.
6. Madsen, D.A. and D.P. Madsen, *Geometric Dimensioning and Tolerancing*. 2012: Goodheart-Willcox Co.
7. Clément, A., et al., *The TTRSs: 13 constraints for dimensioning and tolerancing*, in *Geometric design tolerancing: theories, standards and applications*. 1998, Springer. p. 122-131.
8. Henzold, G., *Geometrical dimensioning and tolerancing for design, manufacturing and inspection: a handbook for geometrical product specification using ISO and ASME standards*. 2006: Butterworth-Heinemann.
9. Pillet, M., P.A. Adragna, and F. Germain, *Inertial tolerancing: the sorting problem*. Journal of Machine Engineering: Manufacturing Accuracy Increasing Problems, Optimization, 2006. **6**(1): p. 95-102.
10. Kotthaus, H., *Técnica da Produção Industrial - Medição e Controle Vol. 06*. 1971: Polígono.
11. Saraiva, F.E., L.; Gentil, S.; Filipe, E., *O laser na realização prática da definição do metro*. Gazeta de Física, 2011. **34**.
12. IPQ, *Laboratório de Comprimento*. 2017.
13. Cristofoletti, S.E. and A.J. Abackerli, *Blocos-Padrão: Características e normalização*. 2011, Unimep.
14. Hexagon, *Length and Angle Standards - TESA Gauge Block Set M122, metric | TESA Technology*. 2017.
15. Doiron, T. and J.S. Beers, *The Gage Block Handbook*. 1995: US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
16. Trapet, E., E. Savio, and L. De Chiffre, *New advances in traceability of CMMs for almost the entire range of industrial dimensional metrology needs*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004. **53**(1): p. 433-438.
17. Anthony, D.M., *Engineering metrology*. 1986: Pergamon.
18. ElKott, D.F. and S.C. Veldhuis, *CAD-based sampling for CMM inspection of models with sculptured features*. Engineering with computers, 2007. **23**(3): p. 187-206.
19. Neuschaefer-Rube, U., et al., *Tactile and optical microsensors: test procedures and standards*. Measurement Science and Technology, 2008. **19**(8): p. 084010.
20. Yang, Q. and C. Butler, *A 3-D noncontact trigger probe for coordinate measuring machines*. Measurement, 1996. **17**(1): p. 39-44.

21. Bucher, J.L., *The metrology handbook*. 2012: ASQ Quality Press.
22. Chen, S.-D. and T.-C. Kuo, *Touch trigger probe*. 2012, Google Patents.
23. *The History of the Coordinate Measuring Machine*. 2014.
24. Hocken, R.J. and P.H. Pereira, *Coordinate measuring machines and systems*. 2016: CRC Press.
25. Mitutoyo. *CMM Probes-Scanning probe system*. 2017; Available from: <http://ecatalog.mitutoyo.com/CMM-Probes-Scanning-probe-system-C1018.aspx>.
26. Zhao, Y., et al., *Dimensional metrology interoperability and standardization in manufacturing systems*. *Computer Standards & Interfaces*, 2011. **33**(6): p. 541-555.
27. Wilcox Associates, I., *PC-DMIS CMM User Guide, for PC-DMIS, 2012*.
28. *RPS Alignment - Example*. 2017; Available from: <https://cmmmanager.com/forum/viewtopic.php?f=30&t=173>.
29. *Aligning with RPS*. 2017; Available from: http://catiadoc.free.fr/online/dseug_C2/dseugat0104.htm.

Anexo A

Terminologia usada em metrologia:

Medição - Processo através do qual são obtidos valores de uma grandeza por métodos experimentais.

Mensuranda - Grandeza a ser medida.

Princípio de medição - fenômeno usado como base numa medição (exemplo: uso de uma régua para obter uma medição).

Método de medição - Descrição geral de uma série de processos com seguimento lógico usados numa medição.

Procedimento de medição - Descrição detalhada de uma medição, de acordo com um ou mais princípios de medição e um determinado método de medição, baseado num modelo de medição e incluindo os cálculos usados de modo a obter um resultado de medição.

Resultado de medição - valores atribuídos a uma mensuranda, aliados a informação pertinente à mesma.

Valor verdadeiro - valor consistente com a definição de determinado resultado de medição.

Valor medido - valor de uma grandeza representando o resultado de uma medição.

Exatidão - Proximidade entre o resultado de uma medição e o valor verdadeiro da mensuranda.

Erro de medição - Diferença entre um valor medido de uma grandeza e o respectivo valor de referência.

Erro de medição sistemático - Componente do erro de medição que em medições repetidas permanece constante ou varia de modo previsível.

Erro de medição aleatório - Componente do erro de medição que em medições repetidas varia de forma imprevisível.

Condições de repetibilidade - Condição de medição de um conjunto de condições

que inclui a o uso do mesmo procedimento de medição, mesmos operadores, mesmo sistema de medição e localização e medições sucessivas ao mesmo objeto durante um curto período de tempo.

Repetibilidade de uma medição - Nível de similaridade entre medições repetidas do mesmo objeto mantendo todas as condições de repetibilidade.

Reprodutibilidade - Nível de similaridade entre medições repetidas do mesmo objeto mantendo o mesmo método de medição, sobre peças semelhantes, em laboratórios com diferentes operadores e aparelhos de medição diferentes.

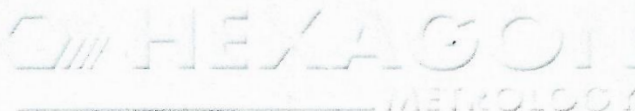
Anexo B

INFORME DE VERIFICACIÓN

Número: 1053/2005

Página 1 de 4 y dos anexos

DEA Brown & Sharpe S.A.
Parc Tecnològic del Vallès
C/Sabaters, 5
08290 CERDANYOLA
(Barcelona) España
Tel. + 34 93 5946922 - Fax. + 34 93 5946923
E-mail: laboratorio@bnsh.es



OBJETO:
Instrument

Maquina de medición por coordenadas

MARCA:
Manufacturer

DEA

MODELO:
Model

IOTA 0102

IDENTIFICACIÓN:
Serial Number

508

SOLICITANTE:
Customer

CINFU
R. Delfim Ferreira, 800
4100-199 - PORTO
PORTUGAL

FECHAS DE CALIBRACIÓN:
Dates of calibration

INICIO: 21/07/05
Start date

FINAL: 21/07/05
End date

Signatario/s autorizado/s
Authorized signatory/ies

Javier Muñoz Perea
Responsable de Laboratorio

Fecha de emisión
Date of issue



Figura 36 - Relatório de verificação d CMM (parte 1).

1.- MATERIAL CALIBRADO*Calibrated material*

Máquina de Medición por Coordenadas
 Modelo: IOTA 0102 S/N: 508 (DEA)

	Campo de medida :	División de escala:
Eje X :	915 [mm]	0.001 [mm]
Eje Y :	610 [mm]	0.001 [mm]
Eje Z :	410 [mm]	0.001 [mm]

2.- LUGAR DE LA CALIBRACIÓN*Place of calibration*

La calibración del instrumento citado ha sido realizada "In Situ"
 Dirección:

CINFU
R. Delfim Ferreira, 800
4100-199 - PORTO
PORTUGAL

3.- MÉTODO DE LA CALIBRACIÓN*Calibration method*

Los procedimientos internos empleados para la calibración han sido :
 PEC/01 - procedimiento para la calibración de máquinas medidoras por coordenadas.
 Según la norma EN ISO 10360-2 : 2001

[Para cualquiera de los diferentes patrones longitudinales utilizados en número "n" (n = 5) se repiten "M" (M = 3) mediciones en la misma alineación en 7 orientaciones diferentes. El valor de repetibilidad se ha obtenido palpando 25 puntos sobre una esfera patrón calibrada.]

4.- NOMENCLATURA DE RESULTADOS*Nomenclature of results*

NOMINAL : Valor certificado del patrón.
 MEDIDO : Valor indicado por la máquina.
 TOL. : Tolerancia o especificación. Valor del error máximo permitido.
 DESV. : Diferencia entre valor certificado del patrón y valor indicado por la máquina.
 F.T./Graf : Valores fuera de tolerancia. [FT: TOL - (| DESV | + U95L)]
 MPE_E : Ecuación de especificación de la máquina para medidas lineales (error max. Permitido) [A+B*L/1000]
 U₉₅L : Incertidumbre certificada para el patrón de nominal L
 MPE_p : Max. Valor especificado de repetibilidad de la máquina.

5.- CONFORMIDAD CON ESPECIFICACIONES*Conformity with specifications*

A partir de los resultados de la calibración, puede declararse conformidad con las siguientes especificaciones:

$$\begin{array}{ll} \mathbf{MPE_E = 5 + 6 L / 1000} & \mathbf{[Micrometros]} \\ \mathbf{MPE_p = 5} & \mathbf{[Micrometros]} \end{array}$$

En la declaración de conformidad con especificaciones se ha tenido en cuenta el valor de incertidumbre de los patrones.

Figura 37 - Relatório de verificação d CMM (parte 2).

6.- TRAZABILIDAD

Traceability

La trazabilidad en la calibración se refiere a :
C.E.M. (Centro Español de Metrología) (EUROMET)
Laboratorios europeos de referencia (EUROMET)
Laboratorios de calibración ENAC

7.- CONDICIONES AMBIENTALES DE LA CALIBRACIÓN

Environmental conditions of the calibration

Ver anexo adjunto.

8.- DESVIACIONES AL PROCEDIMIENTO

Deviations of the procedure

9.- RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN / PATRONES EMPLEADOS

Calibration results / Used gauges

(En páginas siguientes)

NOTA :

Los resultados contenidos en el presente documento se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las calibraciones. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que pudieran derivarse del uso inadecuado de los elementos calibrados. Cuando los valores de las magnitudes de influencia significativas existentes en el momento de utilización del elemento calibrado, difieran sensiblemente de los valores de las mismas durante la calibración, será responsabilidad del usuario decidir la aplicación de correcciones adicionales sobre el resultado de medida, así como el incremento correspondiente de su incertidumbre. La reproducción de este documento está permitida si se hace en su totalidad. Para su reproducción parcial es necesario autorización escrita del laboratorio emisor.

El juego de patrones empleado está identificado como juego CALA número 1

10.- OBSERVACIONES

Observations

Figura 38 - Relatório de verificação d CMM (parte 3).

ISO 10360-2 HOJA DE IDENTIFICACIÓN		Informe N° : 1053/2005
		Página 4 de 4 y dos anexos
INFORMACIÓN DE MAQUINA		
MAQUINA	: IOTA	TAMAÑO: 102
FABRICANTE	: DEA	
NUMERO DE SERIE	: 508	
SOFTWARE	: PCDMIS	VERSIÓN: 3.7MR1
ELECTRÓNICA	: B3P	
UBICACIÓN DE LA MAQ.	: CINFU	
	R. Delfim Ferreira, 800 4100-199-PORTO	
Espec. Fabr. $MPE_E = 5 + 6 L / 1000$		[Micrometros]
Espec. Fabr. $MPE_P = 5$		[Micrometros]
INFORMACIÓN DE PALPADORES		
TIPO DE CABEZAL	: PH9	S/N : C43655
TIPO DE SENSOR	: TP20	S/N : Y10411
LONGITUD DE PUNTA	: 20	[mm]
RADIO DE PALPADOR	: 2	[mm]
LONGITUD DE EXTENSIÓN	: 0	[mm]
INFORMACIÓN DE MEDICIÓN		
VELOCIDAD DE POSICIÓN	: 100	[% del máx.]
VELOCIDAD DE MEDICIÓN	: 3	[% del máx.]
ACELERACIÓN	: 100	[% del máx.]
DIST. APROXIMACIÓN	: 6	[mm]
COMPENSACIÓN TÉRMICA	: No aplicable	
INFORMACIÓN AMBIENTAL ADICIONAL :		

FECHAS DE LA CALIBRACIÓN:	Inicio 21/07/05	Final 21/07/05

Figura 39 - Relatório de verificação d CMM (parte 4).

Anexo C

Tabela 15 - Medições retiradas na peça 1.

Peça1 - CINFU								
Alinhamento	A1		A2		A3		A4	
	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
	1	50,782	1	50,782	1	50,782	1	50,784
	2	50,802	2	50,802	2	50,802	2	50,804
	3	177,8109	3	177,811	3	177,81	3	177,811
	4	177,8213	4	177,821	4	177,822	4	177,821
	5	184,9285	5	184,929	5	184,929	5	184,929
	6	184,9277	6	184,927	6	184,928	6	184,928
	7	227,9664	7	227,966	7	227,966	7	227,967
	8	215,9055	8	215,905	8	215,905	8	215,904
	9	101,6057	9	101,606	9	101,605	9	101,604
Alinhamento	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
	1	50,782	1	50,782	1	50,782	1	50,783
	2	50,803	2	50,802	2	50,803	2	50,803
	3	177,811	3	177,811	3	177,811	3	177,811
	4	177,821	4	177,821	4	177,82	4	177,821
	5	184,929	5	184,928	5	184,929	5	184,929
	6	184,927	6	184,927	6	184,927	6	184,928
	7	227,966	7	227,966	7	227,965	7	227,966
	8	215,903	8	215,903	8	215,903	8	215,904
	9	101,604	9	101,604	9	101,604	9	101,604
Alinhamento	C1		C2		C3		C4	
	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
	1	50,782	1	50,783	1	50,784	1	50,783
	2	50,804	2	50,804	2	50,805	2	50,804
	3	177,811	3	177,811	3	177,811	3	177,811
	4	177,821	4	177,822	4	177,821	4	177,821
	5	184,928	5	184,929	5	184,929	5	184,929
	6	184,928	6	184,928	6	184,928	6	184,928
	7	227,966	7	227,965	7	227,965	7	227,965
	8	215,904	8	215,904	8	215,904	8	215,903
	9	101,604	9	101,606	9	101,604	9	101,605

Tabela 15 - Medições retiradas na peça 1 (continuação).

Alinhamento	A1.2		A2.2		A3.2		A4.2	
	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
	1	50,784	1	50,783	1	50,784	1	50,783
	2	50,804	2	50,804	2	50,803	2	50,806
	3	177,811	3	177,81	3	177,811	3	177,813
	4	177,822	4	177,821	4	177,821	4	177,818
	5	184,929	5	184,928	5	184,928	5	184,929
	6	184,928	6	184,927	6	184,928	6	184,927
	7	227,965	7	227,965	7	227,965	7	227,962
	8	215,905	8	215,904	8	215,906	8	215,909
	9	101,604	9	101,604	9	101,604	9	101,604
Alinhamento	B1.2		B2.2		B3.2		B4.2	
	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
	1	50,783	1	50,783	1	50,783	1	50,783
	2	50,804	2	50,803	2	50,803	2	50,803
	3	177,811	3	177,811	3	177,811	3	177,811
	4	177,821	4	177,821	4	177,821	4	177,821
	5	184,929	5	184,928	5	184,929	5	184,929
	6	184,927	6	184,928	6	184,928	6	184,928
	7	227,967	7	227,966	7	227,967	7	227,966
	8	215,905	8	215,905	8	215,905	8	215,905
	9	101,604	9	101,604	9	101,604	9	101,605
Alinhamento	C1.2		C2.2		C3.2		C4.2	
	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
	1	50,783	1	50,783	1	50,783	1	50,783
	2	50,803	2	50,804	2	50,804	2	50,805
	3	177,81	3	177,811	3	177,811	3	177,812
	4	177,821	4	177,821	4	177,821	4	177,818
	5	184,928	5	184,929	5	184,928	5	184,929
	6	184,927	6	184,927	6	184,928	6	184,926
	7	227,965	7	227,965	7	227,965	7	227,965
	8	215,905	8	215,905	8	215,905	8	215,911
	9	101,604	9	101,604	9	101,605	9	101,605

Anexo D

Tabela 16 - Medições retiradas na peça 2.

Peça 2 – Ricardo & Barbosa									
Alinhamento	A1			A2			A3		
	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio
	1	X	-0,072	1	X	-0,073	1	X	-0,074
		Y	-0,019		Y	-0,021		Y	-0,019
	2	X	-0,073	2	X	-0,074	2	X	-0,076
		Y	0		Y	-0,002		Y	0
	3	Y	0,012	3	Y	0,017	3	Y	0,011
		Z	-0,055		Z	-0,073		Z	-0,081
	4	Y	0,005	4	Y	0,011	4	Y	0,004
		Z	-0,051		Z	-0,056		Z	-0,075
	5	X	-0,066	5	X	-0,077	5	X	-0,087
		Z	-0,108		Z	-0,128		Z	-0,108
	6	X	-0,025	6	X	-0,03	6	X	-0,04
		Z	-0,058		Z	-0,036		Z	-0,052
Alinhamento	B1			B2			B3		
	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio
	1	X	-0,07	1	X	-0,069	1	X	-0,069
		Y	-0,02		Y	-0,022		Y	-0,02
	2	X	-0,072	2	X	-0,072	2	X	-0,071
		Y	0,001		Y	-0,002		Y	0,001
	3	Y	-0,043	3	Y	-0,039	3	Y	-0,044
		Z	-0,053		Z	-0,069		Z	-0,079
	4	Y	-0,051	4	Y	-0,046	4	Y	-0,052
		Z	-0,05		Z	-0,056		Z	-0,076
	5	X	-0,132	5	X	-0,142	5	X	-0,149
		Z	-0,106		Z	-0,124		Z	-0,105
	6	X	0,048	6	X	0,043	6	X	0,035
		Z	-0,055		Z	-0,035		Z	-0,05
Alinhamento	C1			C2			C3		
	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio
	1	X	-0,07	1	X	-0,07	1	X	-0,069
		Y	-0,02		Y	-0,022		Y	-0,021
	2	X	-0,072	2	X	-0,072	2	X	-0,072
		Y	0,002		Y	0		Y	0,002
	3	Y	-0,058	3	Y	-0,052	3	Y	-0,058
		Z	-0,053		Z	-0,068		Z	-0,079
	4	Y	-0,065	4	Y	-0,059	4	Y	-0,065
		Z	-0,05		Z	-0,055		Z	-0,076
	5	X	-0,151	5	X	-0,158	5	X	-0,167
		Z	-0,106		Z	-0,122		Z	-0,105
	6	X	0,067	6	X	0,06	6	X	0,052
		Z	-0,053		Z	-0,035		Z	-0,049

Anexo E

Tabela 17 - Medições retiradas na peça 3.

Peça 3 – Ricardo & Barbosa									
Alinhamento	A1			A2			A3		
	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio
	1	Y	0,093	1	Y	0,093	1	Y	0,093
	2	X	-0,004	2	X	0,001	2	X	-0,004
	3	Y	0,197	3	Y	0,194	3	Y	0,195
	4	X	-0,343	4	X	-0,34	4	X	-0,342
	5	X	-0,352	5	X	-0,329	5	X	-0,353
	6	X	-0,119	6	X	-0,098	6	X	-0,121
	7	Y	0,168	7	Y	0,164	7	Y	0,167
	8	Y	0,256	8	Y	0,252	8	Y	0,255
	9	Z	0,018	9	Z	0,044	9	Z	0,017
	10	Z	0,035	10	Z	0,008	10	Z	0,036
	11	Z	0,346	11	Z	0,318	11	Z	0,347
Alinhamento	B1			B2			B3		
	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio
	1	Y	0,086	1	Y	0,089	1	Y	-0,005
	2	X	-0,005	2	X	0,001	2	X	0,001
	3	Y	0,193	3	Y	0,193	3	Y	0,188
	4	X	-0,343	4	X	-0,339	4	X	-0,332
	5	X	-0,353	5	X	-0,33	5	X	-0,349
	6	X	-0,12	6	X	-0,099	6	X	-0,126
	7	Y	0,172	7	Y	0,168	7	Y	0,173
	8	Y	0,26	8	Y	0,255	8	Y	0,263
	9	Z	0,019	9	Z	0,044	9	Z	0,017
	10	Z	0,035	10	Z	0,009	10	Z	0,031
	11	Z	0,346	11	Z	0,318	11	Z	0,32
Alinhamento	C1			C2			C3		
	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio
	1	Y	0,101	1	Y	0,096	1	Y	-0,001
	2	X	-0,003	2	X	0,007	2	X	0,001
	3	Y	0,198	3	Y	0,196	3	Y	0,193
	4	X	-0,344	4	X	-0,338	4	X	-0,332
	5	X	-0,35	5	X	-0,327	5	X	-0,346
	6	X	-0,117	6	X	-0,096	6	X	-0,121
	7	Y	0,163	7	Y	0,163	7	Y	0,165
	8	Y	0,251	8	Y	0,251	8	Y	0,254
	9	Z	0,019	9	Z	0,044	9	Z	0,017
	10	Z	0,035	10	Z	0,009	10	Z	0,031
	11	Z	0,346	11	Z	0,318	11	Z	0,32

Tabela 17 - Medições retiradas na peça 3 (continuação).

Alinhamento	D1			D2			D3		
	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio	Ponto	Cota	Desvio
	1	Y	0,149	1	Y	0,147	1	Y	0,019
	2	X	-0,003	2	X	0,003	2	X	-0,009
	3	Y	0,22	3	Y	0,218	3	Y	0,221
	4	X	-0,352	4	X	-0,349	4	X	-0,347
	5	X	-0,343	5	X	-0,323	5	X	-0,337
	6	X	-0,109	6	X	-0,091	6	X	-0,112
	7	Y	0,121	7	Y	0,12	7	Y	0,127
	8	Y	0,212	8	Y	0,211	8	Y	0,214
	9	Z	0,019	9	Z	0,044	9	Z	0,019
	10	Z	0,035	10	Z	0,012	10	Z	0,029
	11	Z	0,346	11	Z	0,32	11	Z	0,32

Anexo F

Tabela 18 - Medições retiradas na peça 4.

Peça 4 – Ricardo & Barbosa									
Alinhamento	A1			A2			A3		
	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio
	1	y	0	1	y	0	1	y	0
	2	x	0,006	2	x	-0,002	2	x	-0,002
	3	x	0,008	3	x	-0,004	3	x	-0,001
	4	y	-0,012	4	y	-0,009	4	y	-0,01
	5	x	0,121	5	x	0,097	5	x	0,098
	6	z	0,016	6	z	0,011	6	z	0,021
	7	z	0,013	7	z	0,043	7	z	0,029
	8	x	0,154	8	x	0,143	8	x	0,145
	9	x	-0,199	9	x	-0,286	9	x	-0,285
Alinhamento	B1			B2			B3		
	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio
	1	y	0	1	y	0	1	y	0
	2	x	-0,018	2	x	-0,026	2	x	-0,025
	3	x	0,03	3	x	0,019	3	x	0,021
	4	y	-0,007	4	y	-0,007	4	y	-0,007
	5	x	0,141	5	x	0,119	5	x	0,119
	6	z	0,016	6	z	0,011	6	z	0,019
	7	z	0,013	7	z	0,043	7	z	0,032
	8	x	0,138	8	x	0,128	8	x	0,129
	9	x	-0,224	9	x	-0,312	9	x	-0,311
Alinhamento	C1			C2			C3		
	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio
	1	y	0	1	y	0	1	y	0
	2	x	0,003	2	x	-0,011	2	x	-0,009
	3	x	0,013	3	x	0,006	3	x	0,006
	4	y	-0,01	4	y	-0,008	4	y	-0,008
	5	x	0,123	5	x	0,106	5	x	0,106
	6	z	0,016	6	z	0,011	6	z	0,019
	7	z	0,014	7	z	0,043	7	z	0,032
	8	x	0,151	8	x	0,138	8	x	0,141
	9	x	-0,203	9	x	-0,295	9	x	-0,294

Tabela 18 - Medições retiradas na peça 4 (continuação).

Alinhamento	D1			D2			D3		
	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio
	1	y	0	1	y	0	1	y	0
	2	x	-0,002	2	x	-0,01	2	x	-0,008
	3	x	0,015	3	x	0,006	3	x	0,005
	4	y	-0,009	4	y	-0,011	4	y	-0,009
	5	x	0,127	5	x	0,105	5	x	0,104
	6	z	0,016	6	z	0,011	6	z	0,019
	7	z	0,013	7	z	0,043	7	z	0,032
	8	x	0,149	8	x	0,139	8	x	0,141
	9	x	-0,207	9	x	-0,295	9	x	-0,292

Anexo G

Tabela 19 - Medições retiradas na peça 5.

Peça 5 – Norcam									
Alinhamento	A1			A2			A3		
	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio
	1	X	1,089	1	X	1,09	1	X	1,057
		Y	0,483		Y	0,491		Y	0,476
	2	X	-0,008	2	X	-0,008	2	X	-0,012
		Y	-0,692		Y	-0,731		Y	-0,685
		Z	-0,137		Z	0,022		Z	-0,207
	3	X	-0,198	3	X	-0,146	3	X	-0,195
		Y	0,551		Y	0,515		Y	0,558
		Z	-0,089		Z	-0,259		Z	-0,094
	4	X	1,383	4	X	1,383	4	X	1,364
		Y	0,075		Y	0,093		Y	0,053
		Z	-0,162		Z	-0,348		Z	0,08
	5	X	1,269	5	X	1,27	5	X	1,235
		Y	-0,637		Y	-0,627		Y	-0,641
		Z	-0,303		Z	-0,164		Z	-0,124
Alinhamento	A4			B1			B2		
	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio
	1	X	1,098	1	X	1,087	1	X	1,088
		Y	0,48		Y	0,48		Y	0,489
	2	X	-0,007	2	X	-0,005	2	X	-0,01
		Y	-0,685		Y	-0,701		Y	-0,734
		Z	-0,172		Z	-0,138		Z	0,022
	3	X	-0,185	3	X	-0,201	3	X	-0,147
		Y	0,56		Y	0,54		Y	0,512
		Z	-0,05		Z	-0,09		Z	-0,258
	4	X	1,386	4	X	1,377	4	X	1,381
		Y	0,079		Y	0,074		Y	0,091
		Z	-0,188		Z	-0,155		Z	-0,347
	5	X	1,276	5	X	1,272	5	X	1,27
		Y	-0,649		Y	-0,636		Y	-0,63
		Z	-0,406		Z	-0,297		Z	-0,163
Alinhamento	B3			B4			C1		
	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio
	1	X	1,117	1	X	1,1	1	X	1,132
		Y	0,545		Y	0,482		Y	0,443
	2	X	0,093	2	X	-0,001	2	X	0,191
		Y	-0,667		Y	-0,687		Y	-0,955
		Z	-0,189		Z	-0,169		Z	-0,123
	3	X	-0,195	3	X	-0,189	3	X	-0,299
		Y	0,555		Y	0,556		Y	0,305
		Z	-0,094		Z	-0,049		Z	-0,112
	4	X	1,39	4	X	1,384	4	X	1,231
		Y	0,163		Y	0,085		Y	0,187
		Z	0,073		Z	-0,184		Z	-0,152
	5	X	1,34	5	X	1,283	5	X	1,469
		Y	-0,53		Y	-0,641		Y	-0,514
		Z	-0,107		Z	-0,401		Z	-0,3

Tabela 19 - Medições retiradas na peça 5 (continuação).

Alinhamento	C2			C3			C4		
	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio
	1	X	1,197	1	X	1,104	1	X	1,136
		Y	0,511		Y	0,451		Y	0,434
	2	X	0,3	2	X	0,207	2	X	0,182
		Y	-0,982		Y	-0,945		Y	-0,949
		Z	-0,029		Z	-0,2		Z	-0,159
	3	X	-0,282	3	X	-0,306	3	X	-0,302
		Y	0,269		Y	0,31		Y	0,312
		Z	-0,279		Z	-0,117		Z	-0,071
	4	X	1,263	4	X	1,205	4	X	1,231
		Y	0,311		Y	0,188		Y	0,183
		Z	-0,349		Z	0,131		Z	-0,179
	5	X	1,578	5	X	1,447	5	X	1,469
		Y	-0,413		Y	-0,499		Y	-0,535
		Z	-0,24		Z	-0,082		Z	-0,407
Alinhamento	D1			D2			D3		
	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio	Ponto	Eixo	Desvio
	1	X	1,1	1	X	1,183	1	X	1,079
		Y	0,499		Y	0,602		Y	0,505
	2	X	0,005	2	X	0,143	2	X	0,019
		Y	-0,677		Y	-0,685		Y	-0,665
		Z	-0,136		Z	0,055		Z	-0,202
	3	X	-0,193	3	X	-0,147	3	X	-0,191
		Y	0,563		Y	0,527		Y	0,572
		Z	-0,091		Z	-0,257		Z	-0,093
	4	X	1,399	4	X	1,444	4	X	1,382
		Y	0,095		Y	0,264		Y	0,092
		Z	-0,16		Z	-0,359		Z	0,078
	5	X	1,283	5	X	1,423	5	X	1,267
		Y	-0,619		Y	-0,462		Y	-0,603
		Z	-0,295		Z	-0,136		Z	-0,115
Alinhamento	D4								
	Ponto	Eixo	Desvio						
	1	X	1,102						
		Y	0,491						
	2	X	-0,005						
		Y	-0,67						
		Z	-0,171						
	3	X	-0,182						
		Y	0,572						
		Z	-0,048						
	4	X	1,397						
		Y	0,088						
		Z	-0,181						
	5	X	1,278						
		Y	-0,641						
		Z	-0,396						

Anexo H

Tabela 20 - Medições retiradas na peça 5 - 2º estudo.

Peça 5 - Norcam (2º estudo)									
Alinhamento A1									
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0,239	0,025	0,036	0,091	0,103	0,176	0,181	0,206	0,204
B	0,005	0,034	0,032	0,133	0,100	0,172	0,177	0,197	0,203
C	0,007	0,018	0,006	0,106	0,126	0,182	0,192	0,197	0,211
D	0,003	0,018	0,039	0,137	0,117	0,184	0,190	0,036	0,215
E	0,011	0,018	0,038	0,121	0,119	0,194	0,189	0,190	0,213
F	0,027	0,024	0,166	0,374	0,114	0,321	0,184	0,238	0,197
G	0,007	0,022	0,024	0,127	0,150	0,200	0,187	0,228	0,198
H	0,010	0,017	0,020	0,017	0,144	0,228	0,190	0,242	0,195
I	0,001	0,018	0,012	0,051	0,170	0,020	0,187	0,235	0,193
J	0,009	0,009	0,011	0,054	0,425	0,176	0,196	0,203	0,227
Alinhamento A2									
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0,230	0,018	0,028	0,084	0,095	0,169	0,172	0,197	0,196
B	0,003	0,027	0,025	0,126	0,093	0,165	0,169	0,190	0,195
C	0,001	0,011	0,001	0,099	0,117	0,174	0,183	0,189	0,202
D	0,012	0,011	0,032	0,130	0,109	0,176	0,183	0,028	0,206
E	0,019	0,011	0,031	0,113	0,111	0,187	0,181	0,182	0,205
F	0,035	0,015	0,162	0,379	0,106	0,325	0,176	0,229	0,190
G	0,015	0,014	0,017	0,119	0,141	0,192	0,179	0,220	0,190
H	0,018	0,009	0,013	0,026	0,136	0,221	0,181	0,234	0,187
I	0,009	0,011	0,004	0,043	0,162	0,013	0,178	0,227	0,185
J	0,017	0,016	0,005	0,047	0,417	0,169	0,187	0,194	0,220
Alinhamento A3									
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0,240	0,040	0,050	0,102	0,112	0,180	0,184	0,208	0,206
B	0,020	0,048	0,047	0,143	0,110	0,177	0,181	0,199	0,204
C	0,023	0,033	0,018	0,116	0,134	0,186	0,194	0,199	0,212
D	0,013	0,033	0,052	0,149	0,125	0,189	0,193	0,038	0,215
E	0,004	0,033	0,050	0,131	0,128	0,199	0,193	0,192	0,214
F	0,011	0,038	0,174	0,371	0,123	0,320	0,187	0,240	0,198
G	0,008	0,037	0,036	0,138	0,156	0,205	0,190	0,230	0,199
H	0,006	0,031	0,033	0,007	0,152	0,233	0,193	0,245	0,196
I	0,014	0,033	0,024	0,064	0,178	0,028	0,190	0,238	0,194
J	0,006	0,007	0,024	0,067	0,433	0,184	0,199	0,206	0,229

Tabela 20 - Medições retiradas na peça 5 - 2º estudo (continuação).

Alinhamento A4									
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0,001	0,187	0,177	0,131	0,120	0,057	0,054	0,032	0,034
B	0,206	0,180	0,180	0,089	0,122	0,061	0,057	0,041	0,035
C	0,204	0,194	0,181	0,116	0,099	0,052	0,046	0,041	0,029
D	0,214	0,194	0,161	0,084	0,108	0,055	0,046	0,202	0,026
E	0,222	0,194	0,162	0,089	0,106	0,038	0,047	0,049	0,026
F	0,237	0,190	0,039	0,499	0,110	0,447	0,052	0,001	0,042
G	0,218	0,192	0,177	0,095	0,078	0,033	0,049	0,010	0,042
H	0,220	0,196	0,180	0,238	0,082	0,004	0,047	0,004	0,045
I	0,212	0,195	0,188	0,166	0,057	0,207	0,050	0,001	0,047
J	0,220	0,219	0,190	0,162	0,205	0,051	0,041	0,033	0,012
Alinhamento A5									
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0,031	0,169	0,159	0,107	0,096	0,029	0,025	0,002	0,003
B	0,189	0,161	0,162	0,065	0,098	0,033	0,028	0,010	0,004
C	0,187	0,175	0,163	0,092	0,075	0,022	0,015	0,010	0,002
D	0,196	0,176	0,143	0,061	0,083	0,024	0,015	0,171	0,007
E	0,204	0,176	0,144	0,067	0,081	0,009	0,016	0,017	0,005
F	0,220	0,171	0,049	0,486	0,085	0,435	0,021	0,031	0,011
G	0,200	0,172	0,159	0,071	0,052	0,004	0,018	0,022	0,009
H	0,203	0,177	0,162	0,216	0,057	0,025	0,016	0,035	0,012
I	0,195	0,175	0,170	0,145	0,030	0,180	0,019	0,029	0,014
J	0,202	0,201	0,171	0,141	0,231	0,025	0,010	0,004	0,020
Alinhamento A6									
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0,084	0,117	0,106	0,059	0,044	0,024	0,028	0,051	0,048
B	0,136	0,108	0,110	0,013	0,047	0,014	0,024	0,043	0,048
C	0,134	0,124	0,119	0,041	0,022	0,030	0,038	0,042	0,054
D	0,144	0,124	0,095	0,011	0,035	0,031	0,037	0,119	0,059
E	0,152	0,123	0,094	0,017	0,030	0,042	0,035	0,035	0,058
F	0,168	0,118	0,080	0,456	0,034	0,404	0,030	0,083	0,042
G	0,147	0,120	0,109	0,020	0,000	0,049	0,033	0,074	0,035
H	0,151	0,125	0,113	0,163	0,004	0,077	0,036	0,087	0,032
I	0,142	0,123	0,121	0,095	0,021	0,129	0,033	0,081	0,030
J	0,150	0,149	0,124	0,089	0,279	0,027	0,042	0,049	0,071