



METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE ROBÔS ANTROPOMÓRFICOS DE 6 OU MAIS EIXOS:

UM CASO DE ESTUDO DESENVOLVIDO NO CEiiA

LUÍS OLIVEIRA RAMOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CANDIDATO	Luís Oliveira Ramos		Código 200800780
TÍTULO	METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE ROBÔS ANTROPOMÓRFICOS DE 6 OU MAIS EIXOS: UM CASO DE ESTUDO DESENVOLVIDO NO CEiiA		
JÚRI	Presidente	Laura Maria Melo Ribeiro	DEMM-FEUP
	Arguente	Carlos Alberto Moura Relvas	DEM - UA
	Orientador	Vítor Manuel Branco Martins Augusto	DEMM-FEUP
DATA	21 de fevereiro de 2020		
HORA	14h30		
SALA	F106 - DEMM - FEUP		

Resumo

O presente trabalho surge no âmbito da dissertação relativa à obtenção do grau de mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este reporta ao estágio curricular realizado no CEiiA que consistiu no desenvolvimento de uma nova metodologia para calibração de robôs antropomórficos de 6 ou mais eixos.

Numa primeira fase desta dissertação, é feita uma revisão ao estado da arte dos robôs industriais, analisando mais em pormenor o tipo de robôs antropomórficos, o seu design, modelo cinemático e principais características para operações de maquinação.

Seguidamente é feita uma análise da calibração de robôs industriais, das técnicas e equipamentos existentes para a realização e controlo desta.

Sendo o principal objetivo desta dissertação o desenvolvimento de uma metodologia de calibração de um robô industrial de 6 ou mais eixos, após feito este estudo, é examinado o caso prático realizado no CEiiA, com a demonstração dos equipamentos, softwares e materiais utilizados, os procedimentos efetuados e apresentados e analisados os resultados obtidos, demonstrando que foi possível a calibração de um robô antropomórfico com repetibilidade final de 0,189 mm e precisão de 0,560 mm, melhorada em mais de 10 vezes em relação à precisão inicial do mesmo robô.

Por fim, são concretizadas as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido, apresentada a melhor solução testada que satisfaz o desafio inicial desta dissertação, e tecidas algumas recomendações futuras no âmbito da calibração de robôs industriais.

Palavras-Chave

Robôs Industriais; Robôs antropomórficos; Calibração; Precisão; Maquinação

Abstract

The present work was developed in the scope of the dissertation regarding the obtention of the master's degree in Metallurgical and Materials Engineering, by the Faculty of Engineering at the University of Porto. This study reports to the internship at CEiiA, which consisted on developing a new methodology for calibration of anthropomorphic robots with 6 or more axis.

In a first stage of this dissertation, a review is made on the state of the art of industrial robots, with a deeper analysis of the anthropomorphic robots, their design, kinematic model and main characteristics for machining operations.

Afterwards, a study is done on industrial robot calibration, the existing techniques and equipment for its execution and control.

Since the main objective of this thesis is the development of a methodology capable of calibrating an industrial robot with 6 or more axis, the case study at CEiiA is examined, presenting the equipment, software and materials used, the procedures performed and presented and analysed the results obtained, showing that the calibration of an anthropomorphic robot was possible, with the final repeatability capacity of 0,189 mm and a precision of 0,560 mm, more than 10 times lower than the initial measured in the same robot.

At last, some final considerations about the developed work are done, presenting the best solution tested that satisfies the initial challenge of the dissertation, and some future recommendations are done in the scope of industrial robots calibration.

Agradecimentos

Nesta etapa final da minha carreira académica no Mestrado Integrado de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, gostaria de agradecer a algumas pessoas que contribuíram para esta.

Não teria sido possível realizar esta dissertação sem o meu orientador, Professor Vítor Martins Augusto, que confiou em mim para a realização deste trabalho, e demonstrou apoio ao longo de todo o meu percurso na FEUP.

Ao Engenheiro Manuel Oliveira e Engenheiro Bruno Rodrigues, coorientadores no CEiiA, agradeço a disponibilidade, confiança, autonomia e ferramentas disponibilizadas para efetuar este trabalho. À Sandra Fortuna, Alberto Couto, Ricardo Guimarães, André Moura, e todos os restantes colaboradores do CEiiA que fizeram parte do meu dia a dia neste centro, agradeço toda a disponibilidade, incentivo e ajuda.

Ao Engenheiro Bruno Couto, Engenheiro Bruno Peixoto e Engenheiro Pedro Vieira de Castro da Norcam, agradeço toda a disponibilidade e apoio na utilização das suas instalações e equipamento durante todo o meu estágio.

Ao Nuno Louro e José Miguel Rodrigues da Roboplan agradeço a oportunidade de formação e disponibilidade de equipamento.

Ao Engenheiro Gerhard Trapp da Yaskawa Europa agradeço a disponibilidade total dos softwares desta empresa assim como todo o apoio e esclarecimento às questões realizadas ao longo do tempo.

Aos meus pais por me terem ensinado que na vida devemos lutar diariamente de forma a atingir os nossos objetivos, que nada na vida é garantido, e que por vezes dar um passo atrás para poder saltar uma dificuldade é mais do que aceitável. E claro, por todos os valores que me inculcaram ao longo da minha vida.

À minha irmã Inês. És uma fonte de inspiração para mim, agradeço-te por todo o apoio incondicional e ajuda, literalmente desde sempre, mesmo quando as coisas correm menos bem.

À Rita, Luana, João, Vicente, Bernardo, Diana e aos lisboetas João e Joana, agradeço pela paciência, entreaajuda e amizade que, independentemente do tempo a que já nos conhecemos, ficará para toda a vida.

A toda a minha família, agradeço por me terem apoiado sempre no meu percurso até me tornar engenheiro.

A todos os que não foram contemplados, mas que direta ou indiretamente me ajudaram a chegar até aqui, obrigado.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Apresentação do CEiiA.....	1
1.2 Âmbito e objetivos da dissertação.....	1
1.3 Contributo do trabalho	1
1.4 Metodologia de trabalho	2
1.5 Estrutura da dissertação.....	3
2. Estado da Arte.....	3
2.1 Robôs Industriais.....	3
2.1.1 Enquadramento histórico	4
2.1.2 Classificação de robôs Industriais	8
2.2 Robôs Antropomórfico - 6 Eixos	11
2.2.4 Unidades lineares de transferência de robôs (RTUs)- 7º Eixo	20
2.3 Calibração de robôs industriais	22
2.3.1 Importância da calibração de robôs industriais	23
2.3.2 Masterização.....	24
2.3.3 Calibração Cinemática	25
2.3.4 Equipamentos e Sistemas para Masterização e Calibração Cinemática	28
2.3.5 Técnicas de medição de desempenho de precisão e repetibilidade de robôs antropomórficos	35
3. Caso Prático	37
3.1 Equipamentos e <i>softwares</i> e materiais utilizados.....	38
3.1.1 Equipamentos Yaskawa Motoman	38
3.1.2 <i>Softwares</i> utilizados.....	39
3.1.3 Equipamentos de Engenharia Inversa e Metrologia	41
3.1.4 Materiais utilizados.....	42
3.2 Calibração dos equipamentos Yaskawa Motoman	43
3.2.1 Desenvolvimento do modelo e percursos de maquinação.....	43
3.2.2 Calibração da ferramenta.....	44
3.2.3 Maquinação e análise do 1º modelo	45
3.2.4 Análise e calibração do carril	46
3.2.5 Maquinação e análise do 2º modelo	48
3.2.6 Masterização Manual	49

3.2.7	Maquinação e análise do 3º modelo	50
3.2.8	Masterização e calibração com <i>software</i> MotocalV EG 2019	50
3.2.9	Maquinação e análise do 4º modelo	51
3.3	Análise da repetibilidade do robô Yaskawa Motoman ES-165D	52
3.3.1	Análise de repetibilidade com aquecimento	53
3.3.2	Análise de repetibilidade com incremento de ciclos	55
3.4	Teste do <i>plugin</i> de cálculo de TCP do Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020.....	56
4	Considerações Finais	58
5	Recomendações Futuras	59
6	Bibliografia	61
7	Anexos.....	67

Lista de figuras

Figura 1.	Distribuição de vendas anuais de robôs industriais no mundo de 2008 a 2018.	6
Figura 2.	Número de robôs instalados mundialmente por indústria entre 2016 e 2018.....	7
Figura 3.	Exemplo de área de trabalho de um robô cartesiano.	9
Figura 4.	Exemplo de robô cartesiano	9
Figura 5.	Exemplo da área de trabalho de um robô SCARA.	9
Figura 6.	Exemplo de um robô SCARA.....	9
Figura 7.	Exemplo da área de trabalho de um robô cartesiano.	10
Figura 8.	Exemplo de um robô cartesiano.	10
Figura 9.	Exemplo de um robô tipo DELTA	11
Figura 10.	Exemplo de um robô tipo DELTA.....	11
Figura 11.	Exemplo de um robô cilíndrico e a sua área de trabalho.....	11
Figura 12.	Representação de um robô antropomórfico.....	13
Figura 13.	Esquema representativo das operações envolvidas no movimento de um robô antropomórfico.	14
Figura 14.	Esquematização da relação entre 2 sistemas de coordenadas.....	15
Figura 16.	Centro de maquinação do fabricante Bermaq.	19
Figura 15.	Centro de maquinação do fabricante Belotti.	19
Figura 17.	Exemplo de cavidade de masterização.....	25
Figura 18.	Exemplo de marcação de pré-masterização.....	25
Figura 19.	Exemplo do procedimento de masterização com sistema Zeroing da Yaskawa Motoman.	30

Figura 20. Sistema SEMD KUKA.	30
Figura 21. Sistema MEMD KUKA.	30
Figura 22. Modelo de ponteiras para calibração.	31
Figura 23. Modelo de ponteiras para calibração.	31
Figura 24. Diferentes orientações da ferramenta no processo de calibração.	31
Figura 25. Iterações do cálculo da calibração com MotocalV EG.	32
Figura 26. Comparação entre definições antigos e novas, gerados pela calibração via software.	32
Figura 27. Esquema das diferentes posturas para calibração.	33
Figura 28. Exemplo de valores calculados pela função "Judgment-Job".	33
Figura 29. Equipamento para teste Ball-bar.	36
Figura 30. Teste Ball-Bar.	36
Figura 31. Representação de cubo ISO da norma ISO 9283:1998.	37
Figura 32. Robô Yaskawa Motoman ES-165D	38
Figura 33. Spindle Styrotec KM 2.	38
Figura 34. Carril Yaskawa Motoman TSL 2000.	39
Figura 35. Plugin do robô Yaskawa Motoman ES-165D no software Autodesk ® PowerMill® Ultimate 2020	40
Figura 36. Vista isométrica do modelo desenvolvido para teste de maquinação.	44
Figura 37. Exemplo de procedimento de calibração de ferramenta.	45
Figura 38. Identificação das faces dos modelos maquinados.	45
Figura 39. Zona do carril sem suporte.	46
Figura 40. Zona do carril sem suporte.	46
Figura 42. Calibração do carril com recurso ao Metronor Solo.	47
Figura 41. Calibração do carril com recurso ao Metronor Solo.	47
Figura 43. Digitalização do carril com T-Scan Lv + Optotrack Pro series 2000	47
Figura 44. Novos dados de posição absoluta do robô inseridos no controlador DX-100.	49
Figura 45. Exemplo de alinhamento dos eixos do robô na posição de pré-masterização.	49
Figura 46. Exemplo de alinhamento dos eixos do robô na posição de pré-masterização.	49
Figura 47. Dados obtidos na calibração com recurso ao software MotocalV EG 2019	51
Figura 48. Sistema desenvolvido para análise de repetibilidade do robô Yaskawa Motoman ES-165D.	52
Figura 49. Valores de desvio no eixo Z nas diferentes medições.	54
Figura 51. Valores de desvio no eixo Y nas diferentes medições.	54
Figura 50. Valores de desvio no eixo X nas diferentes medições.	54
Figura 54. Valores de desvio no eixo X nas diferentes medições.	55
Figura 52. Valores de desvio no eixo Z nas diferentes medições.	55

Figura 53. Valores de desvio no eixo Y nas diferentes medições.....	55
Figura 55. Configuração do plugin de cálculo de TCP.....	57
Figura 56. Coordenadas TCP gerados no controlador Dx100 após calibração da ponteira.....	57
Figura 57. Coordenadas TCP geradas no Plugin com a indicação da dimensão da ferramenta. ...	57

Lista de tabelas

Tabela 1. Parâmetros monitorizados que afetam o desempenho de robôs antropomórficos.	27
Tabela 2. Principais fabricantes de equipamentos de calibração não proprietários.	34
Tabela 3. Desvios máximos nas diferentes faces do 1º modelo maquinado.	46
Tabela 4. Dados da planeza e ângulo entre o carril e a base do robô.....	48
Tabela 5. Desvios máximos nas diferentes faces do 2º modelo maquinado.	48
Tabela 6. Desvios médios nas diferentes faces do 4º modelo maquinado.	52
Tabela 7. Relação de nomenclatura do tipo de percurso no texto e nos gráficos.	53
Tabela 8. Cálculo da repetibilidade média do robô.....	56

1. Introdução

1.1 Apresentação do CEiiA

O CEiiA, Centro de Engenharia e Desenvolvimento do Produto, foi criado em 1999 com o objetivo de aumentar a competitividade da indústria automóvel em Portugal dando suporte à mesma. Ao longo dos anos a atividade do CEiiA expandiu, focando-se em diferentes áreas como aeronáutica, naval e *offshore*, aeroespacial e mobilidade urbana, desenvolvendo soluções com vista a melhoria da mobilidade.

Hoje, o CEiiA é uma referência mundial em investigação, design, testes, desenvolvimento e fabrico produtos e soluções para as variadas indústrias da área da mobilidade, tendo a capacidade de assegurar por completo o ciclo de desenvolvimento de um novo produto, desde a definição de requisitos, criação de protótipos, variados processos de engenharia e homologação e certificação.

1.2 Âmbito e objetivos da dissertação

Esta dissertação e estágio curricular realizaram-se no âmbito da obtenção do grau de mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia para calibração de robôs antropomórficos de 6 ou mais eixos, para isso foram testadas várias soluções com o robô de 6 + 1 eixos da marca Yaskawa, disponível no CEiiA. Nesta esta visou-se estudar uma alternativa às metodologias até agora desenvolvidas para calibração e testes de desempenho e identificação de falhas, de forma a reduzir o tempo despendido nestas assim como realizar uma calibração mais correta de equipamentos e obter uma melhor prestação deste e consecutivamente melhor produto final.

1.3 Contributo do trabalho

Além de atingir os objetivos ou a resolução do problema colocado pelo CEiiA, esta dissertação é um contributo para a indústria na forma como são analisados e testados alguns dos métodos de calibração, desenvolvendo uma metodologia de calibração que resulta na melhoria do desempenho de precisão e repetibilidade que são comuns e transversais a todos os utilizadores e integradores de células robóticas de 6 ou mais eixos com recurso a programação *off-line*.

Para além disto, este estudo de certa forma demonstra as especiais necessidades de calibração para este tipo de equipamentos quando comparados ao que recorrem a

operações *teach & learn* (programação de posições diretamente no controlador do robô), criando uma base onde os utilizadores e integradores de células robóticas, utilizadas para este tipo de operação, possam desenvolver e aplicar novos métodos de controlo e mitigação de erros durante os seus processos de fabrico, melhorando assim o desempenho dos seus equipamentos e qualidade dos seus produtos.

1.4 Metodologia de trabalho

A fase inicial deste trabalho consistiu num estudo aprofundado sobre robôs industriais, mais concretamente robôs antropomórficos, o seu funcionamento e metodologias de calibração, de forma a ser possível o desenvolvimento de uma técnica de calibração para o robô deste tipo presente no CEiiA.

Foram consultadas as empresas Norcam e Roboplan de modo a obter algumas informações relativas ao equipamento a calibrar, bem como possíveis abordagens para o desenvolvimento desta nova metodologia. A Norcam - Engenharia e Design Industrial Lda tem como principal atividade o desenvolvimento e implementação de sistemas CAD/CAM/CAE, integrando *softwares* CAD/CAM da Autodesk *Manufacturing*, entre outras soluções tecnológicas industriais avançadas, atuando neste momento a nível internacional. A Roboplan é uma empresa integradora perita em robótica industrial e automação, dispondo de uma equipa qualificada na implementação, programação e manutenção de sistemas de automação e robótica. São também os representantes da marca de robôs industriais Yaskawa em Portugal.

O passo seguinte foi o planeamento de um processo de maquinação capaz de refletir alterações na precisão do robô durante a mesma, ajudando a identificar os locais e direções dos possíveis desvios existentes.

O restante trabalho consistiu em iterações de diferentes tipos de calibração física e via *software*, efetuando testes de maquinação entre estas de forma a avaliar o impacto de cada uma das alterações realizadas.

Por fim foi realizada uma última maquinação para análise da precisão atingida com o melhor processo de calibração e também testada a capacidade de repetibilidade do robô em diferentes condições. Com estes dados, foram identificadas as melhorias aplicadas a este robô, e analisado e definido qual o melhor processo de calibração para o mesmo. Como último passo foi realizado um teste a fim de determinar um possível erro no *plugin*

de cálculo de alturas de ferramenta disponível no *software* Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020.

1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos: Introdução, Estado da arte, Caso prático realizado no CEiiA, Considerações Finais e Recomendações futuras.

A introdução é igualmente dividida em 5 subcapítulos, iniciando com apresentação do CEiiA, seguido de uma breve descrição do âmbito e objetivos deste trabalho. É ainda explicado o contributo deste trabalho e por fim descrita a metodologia de trabalho e a estrutura da dissertação.

O estado da arte está dividido em dois tópicos com os temas mais relevantes para este trabalho. Primeiro é realizada uma abordagem aos robôs industriais, sendo feito um enquadramento histórico e de mercado, uma análise da classificação deste tipo de robôs, uma análise mais profunda dos robôs antropomórficos e a sua aplicabilidade para trabalhos de maquinação. Na segunda parte deste capítulo é desenvolvido o estudo da calibração de robôs industriais.

O caso prático realizado no CEiiA encontra-se separado em 3 partes, após uma breve introdução do trabalho são demonstrados os equipamentos, *softwares* e materiais utilizados durante este caso prático, seguido dos processos de calibração realizados nos equipamentos Yaskawa Motoman e por fim realizada uma análise da repetibilidade do robô calibrado.

A dissertação finaliza-se nos últimos dois capítulos com considerações finais relativas ao trabalho realizado e algumas recomendações futuras.

2. Estado da Arte

2.1 Robôs Industriais

Segundo a ISO 8373 lançada em 2013 pela Federação Internacional de Robótica, um robô industrial é definido como: um manipulador multiuso controlado e reprogramado de forma automática, capaz de movimentos em três ou mais eixos que pode ser fixo num local ou móvel para utilização em aplicações e sistemas de automação industrial. Devem ser consideradas as seguintes definições para os termos mencionados nesta ISO:

- Reprogramável: Movimentos e funções auxiliares podem ser modificados sem alterações físicas
- Multiuso: Capaz de se adaptar a diferentes aplicações, podendo ser necessário alterações físicas;
- Eixo: Um movimento individual de um elemento da estrutura do robô, que pode ser da forma linear ou rotacional.

Em adição a estes robôs multiusos, existem também uma série de robôs indústrias desenvolvidos exclusivamente para determinadas aplicações tais como por exemplo assistência a operações de outras máquinas, colaborativos, e montagem de circuitos eletrônicos impressos. Estes não cumprem a definição da ISO 8373 pois possuem uma única aplicação, não sendo, portanto, multiusos [1].

2.1.1 Enquadramento histórico

A história da automação industrial é caracterizada por períodos de rápida mudança de metodologias e equipamentos, quer como uma causa, ou talvez um efeito, estes períodos de mudança nas técnicas e equipamentos de automação está diretamente ligado à economia global.

A utilização de robôs industriais iniciou-se em 1961 quando a General Motors introduziu na sua fábrica um robô da marca Unimation, utilizando-o para o transporte de peças acabadas de fundir e soldadura de componentes em automóveis. Poucos anos depois, em 1969, Victor Scheinman, pioneiro na área da robótica, desenvolveu o Braço de Stanford, o primeiro braço articulado elétrico. Este foi visto como uma grande inovação pois operava em seis eixos, aumentando a liberdade de movimento comparado com os robôs de um ou dois eixos desenvolvidos até ao momento. O Braço de Stanford marcou o início da revolução dos robôs antropomórficos, transformando as linhas de montagem e fabrico e permitindo a criação de novas empresas como a KUKA e a ABB Robotics [2].

Como referido anteriormente, existe uma ligação entre a venda e aplicação de robôs industriais e o fator económico mundial. Como exemplo, durante a crise económica em 2009, houve uma quebra enorme nas vendas deste tipo de equipamentos, havendo um aumento de quase 40% em 2011, maioritariamente na indústria automóvel e metalúrgica [3].

De 2011 a 2018 o aumento foi de aproximadamente 395% em que em 2018 foram vendidas 422,271 unidades, representando um valor aproximado de 16.5 mil milhões de dólares (sem contabilizar *software* e equipamento acessório) [4].

À data de realização desta dissertação, os dados estatísticos mais recentes e fiáveis são relativos ao ano de 2018, sendo os dados relativos a 2019 meramente estimativos. Deve ser tido em consideração que o mundo está em constante mudança e a evoluir tecnologicamente a um ritmo cada vez mais elevado. É impossível prever com certeza que tipo de desafios as empresas vão encontrar nos próximos cinco anos. Ciclos de produção cada vez mais curtos em sistemas de produção mais eficientes e precisos de forma a reduzir custos e aumentar a produção são os principais requisitos das mais variadas indústrias que juntamente com a escassez de recursos e a volatilidade dos mercados são apenas alguns dos parâmetros que vão moldar o futuro da economia, não apenas, mas também, no mercado de robôs industriais.

Aqueles que pretenderem manter a sua liberdade empreendedora e lutar de forma a ver a sua empresa crescer necessitam responder a novas tendências e evoluções nos mercados de forma antecipada e flexível, criando margem de manobra para melhorar a qualidade dos seus produtos e assim afirmar e aumentar a sua presença no mercado.

As tecnologias robóticas inteligentes permitem às empresas reagir e responder de forma ágil e eficaz à mudança de condições nas infraestruturas, à variação dos requisitos a nível de capacidade de produção, à necessidade de maior variedade de produtos a fabricar e a novas tendências dos consumidores. Segundo a consultora PwC, é espectável que haja um crescimento nas vendas no setor dos robôs industriais devido aos recentes e cada vez mais numerosos conflitos comerciais a nível mundial. Estes referem que os anos de livre comércio global estável levou a que se estabelecessem cadeias de distribuição globais. Estas cadeias estão cada vez mais a ser afetadas pelas barreiras mencionadas, sendo necessário aumentar a flexibilidade na produção por parte das empresas, sendo um dos principais meios necessários para atingir este objetivo a implementação destas tecnologias [5].

Como mencionado anteriormente e visível na figura 1, 2018 foi o sexto ano consecutivo com o maior número de unidades vendidas, mais 6% comparado a 2017, em que mais de um terço (36%) foi instalado na China. No final de 2018 encontravam-se em operação aproximadamente 2,4 milhões de unidades, cerca de 26% dos robôs industriais existentes a nível mundial [6].

A nível de distribuição mundial, a Ásia, incluindo a Austrália e Nova Zelândia, continua a ser o principal mercado embora seja notória uma estagnação no crescimento de unidades vendidas nesta zona, este foi de apenas 1% relativamente a 2017. A Europa é o segundo principal mercado para este tipo de equipamento, o crescimento relativo ao ano anterior foi de 14% atingindo 75.560 unidades, um novo máximo pelo sexto ano consecutivo. O crescimento foi ainda maior no continente Americano, com cerca de 55.212 robôs instalados, 20% mais que no ano anterior [7].

Deve ser também mencionado que 74% do total de robôs industriais vendidos em 2018 foram para apenas cinco países, a China, Japão, Estados Unidos da América, Coreia do Sul e Alemanha [7].

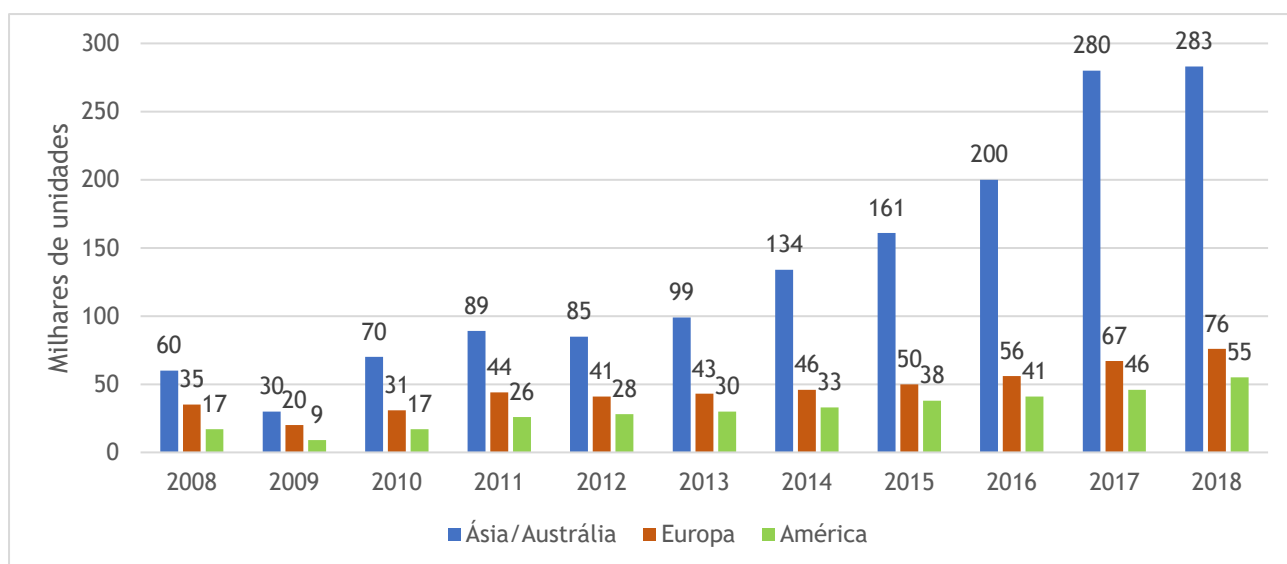


Figura 1. Distribuição de vendas anuais de robôs industriais no mundo de 2008 a 2018 [6].

Considerando as aplicações dos robôs por setor industrial, em 2018 seguiu-se o padrão dos anos anteriores, onde a indústria automóvel continua a ser o principal cliente com cerca de 30% do total de instalações, seguindo-se a indústria de produtos elétricos e eletrónicos (25%), metalurgia e maquinaria (10%), produtos químicos e plástico (5%) e indústria alimentar (3%). Nesta distribuição encontram-se 19% dos robôs industriais onde não existe informação sobre o tipo de indústria onde estão aplicados, este percentil é cinco pontos superior ao observado no ano anterior. A evolução do mercado nos três últimos anos pode ser analisada em pormenor na figura 2 [7].

Olhando para o futuro próximo, prevê-se que a aplicação e utilização de robôs industriais irá continuar a seguir o padrão de crescimento que tem vindo a ser observado,

estimando um crescimento de 12% por ano entre 2020 e 2022, representando a instalação de 2 milhões de novos robôs industriais a nível mundial [7].

Sendo o âmbito deste trabalho relativo a robôs industriais do tipo articulado, a definição destes por género será apresentado mais à frente no ponto 2.1.2, é importante realçar os dados relativamente a este tipo de equipamento em específico.

A venda deste tipo de robôs tem seguido a tendência do mercado global, sendo o crescimento anual estimado nas vendas na ordem dos 16% entre 2019 e 2023. Neste momento este tipo de robô é o mais comum em ambiente industrial, representando aproximadamente 60% dos robôs industriais instalados mundialmente [8,9,10,11].

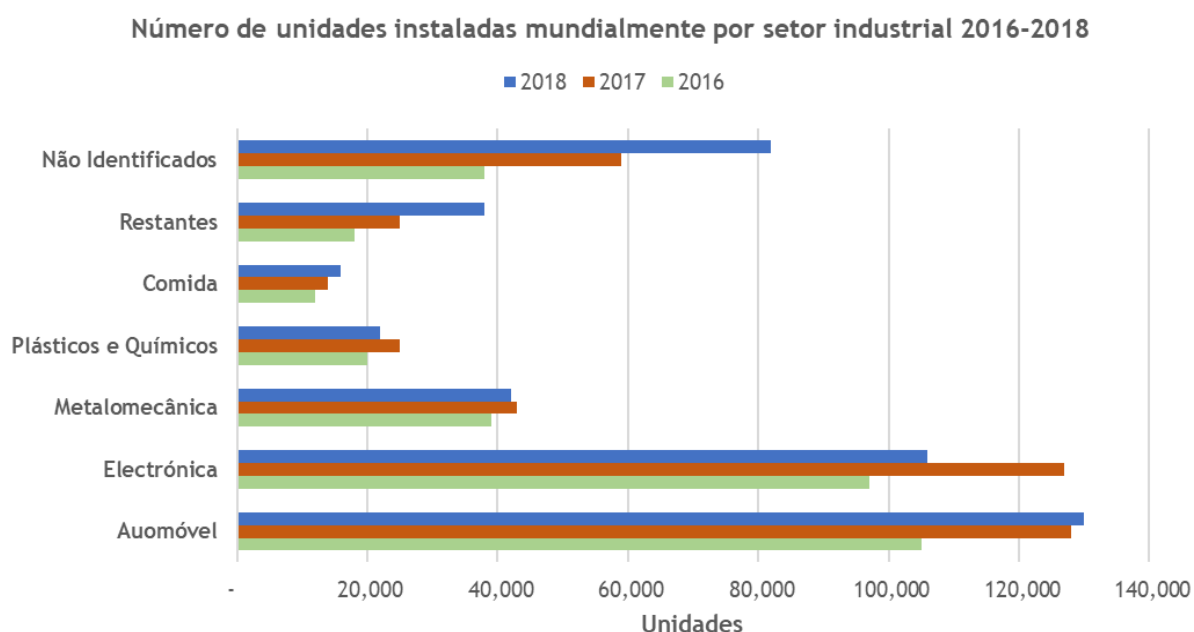


Figura 2. Número de robôs instalados mundialmente por indústria entre 2016 e 2018 [7].

Atualmente, estima-se que existam a nível global mais de 5,6 milhões de robôs articulados industriais, sendo que 78% são destinados a aplicações de manipulação de peças, soldadura e pintura, enquanto que para operações de maquinação é inferior a 5%. Uma das principais razões para este aumento é a redução do custo dos equipamentos e o aumento do preço da mão de obra. Para além de o custo destes estar a diminuir, estão também a ficar mais eficientes, rápidos, precisos e flexíveis a nível de aplicações e tarefas. Tendo em conta estes fatores, é natural que cada vez mais operações e trabalhos indústrias sejam candidatos à automação. Esta é a tendência mais importante que tem levado ao crescimento do mercado de robôs industriais. Outra razão a ser considerada é, com a evolução da tecnologia aplicada nos robôs, a sua capacidade para realizar cada vez

mais tarefas em menor tempo, e essencialmente realizar tarefas que poderiam ser perigosas ou até mesmo impossíveis para um operador [4, 11].

Um estudo realizado pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) em parceria com a construtora automóvel BMW demonstrou que equipas de trabalho formadas por robôs colaborativos (*COBOT*) e humanos são 85% mais produtivas a desempenhar certas tarefas do que realizadas individualmente [12].

2.1.2 Classificação de robôs Industriais

Segundo o acordo realizado em 2004 entre a Federação Internacional de Robótica e os diferentes fabricantes de robôs industriais, a classificação dos robôs deve ser apenas realizada segundo a sua configuração mecânica. Existem cinco tipos principais de robô com diferentes características em utilização em ambientes industriais. Estes podem ser robôs cartesianos (robôs *Gantry*), robôs de 6 eixos (antropomórficos), braços robóticos para montagem de conformidade seletiva (*SCARA*), robôs tipo *DELTA* ou paralelos e robôs cilíndricos [13,11].

Os robôs cartesianos são equipamentos mecatrónicos que recorrem a servos e atuadores lineares para posicionar a ferramenta. Estes realizam movimentos lineares em três eixos X, Y e Z ou seja, possuem três graus de liberdade (*degrees of freedom* ou *DoF*). Uma armação física cria uma estrutura que ancora e suporta os eixos e carga aplicada nestes. Algumas aplicações, tais como maquinação de peças com tolerâncias apertadas necessitam que o eixo base, normalmente eixo X, esteja completamente suportado e reforçado, em contraste com outras aplicações, tais como *pick & place*, pegar ou largar, de garrafas de um tapete de transporte, que requerem menos precisão e por isso o sistema base fornecido pelo fabricante do robô é suficiente. A área de trabalho para operação dos robôs cartesianos é limitada pela estrutura deste, sendo que a armação pode ser montada na horizontal ou na vertical ou ainda suspenso numa construção tipo ponte em certas configurações *Gantry*. Este tipo de robô é ideal para algumas indústrias devido à elevada capacidade de carga que podem carregar, podendo chegar aos 3000kg em algumas configurações *Gantry* [13,14,11].

Na figura 3 é visível um exemplo de um robô cartesiano e na figura 4 demonstrada a área de trabalho.

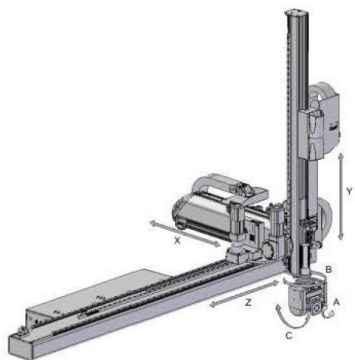


Figura 3. Exemplo de robô cartesiano [4].

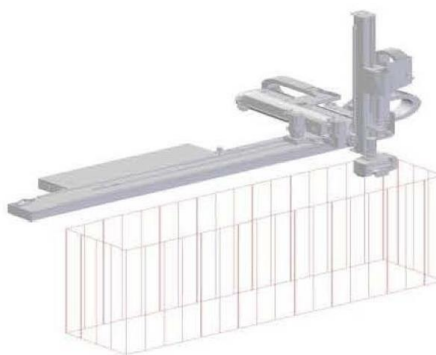


Figura 4. Exemplo de área de trabalho de um robô cartesiano [4].

Comparativamente, os robôs SCARA e antropomórficos tipicamente são montados fixos num pedestal. Os robôs SCARA operam como os robôs cartesianos nos planos X, Y, sendo quase na sua totalidade rígidos no eixo Z, de onde advém o nome seletivo. Estes podem incorporar também um eixo *THETA* no final do plano Z de forma a rodar o terminal do braço onde está aplicada a ferramenta. Isto torna os robôs SCARA ideais para operações segundo o eixo vertical como por exemplo a inserção de pinos em furos. Contudo, o braço é na sua essência uma alavanca, o que limita o alcance deste tipo de robô. As uniões são pontos de carga que necessitam utilizar rolamentos de elevada resistência mecânica e motores com elevado *torque* de forma a aguentarem as cargas aplicadas quando o braço é estendido. Exemplos de um robô SCARA e a da área de trabalho são visíveis nas figuras 5 e 6 respetivamente [4,11,13,14,15].

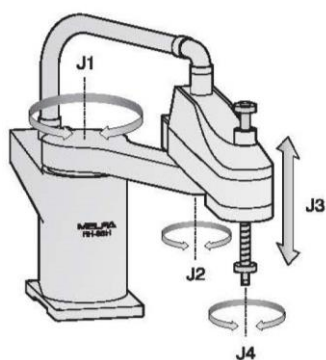


Figura 5. Exemplo de um robô SCARA [4].

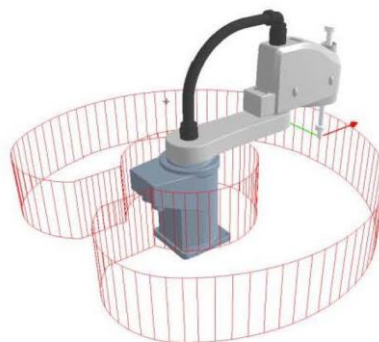


Figura 6. Exemplo da área de trabalho de um robô SCARA [4].

Os robôs antropomórficos, na sua maioria de 6 eixos, por definição são robôs cujo braço tem pelo menos três articulações de revolução ou prismáticas. Estes podem movimentar-se para a frente e para trás, para cima e para baixo e realizar movimento de rotação do *end-effector*, local onde é colocada a ferramenta, paralelamente e perpendicularmente

ao último eixo, permitindo um maior controlo direcional comparado com os SCARA. Isto permite movimentos complexos que conseguem simular o comportamento de um braço humano, como por exemplo alcançar uma peça pela superfície inferior e colocar no topo de um tapete rolante. Possuem a capacidade de conseguir chegar a um ponto no espaço de trabalho em mais do que uma configuração e posicionar o *end-effector* numa qualquer orientação desejada. A programação dos seus movimentos em três dimensões é complexa e realizada via *software* [11,13,14,15].

Na figura 7 é visível um exemplo de um robô antropomórfico de 6 eixos e na figura 8 a sua área de trabalho.

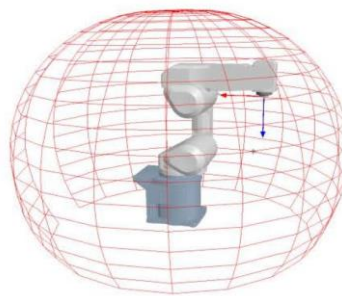
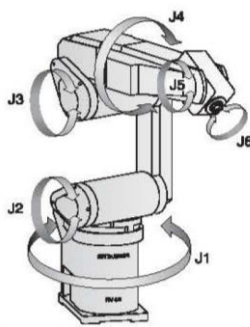


Figura 7. Exemplo de um robô cartesiano [4]. Figura 8. Exemplo da área de trabalho de um robô cartesiano [4].

Os robôs tipo *DELTA* são uma configuração de robôs algo recente, são caracterizados por articulações paralelas, com formato prismático ou rotativo, e foram desenvolvidos para serem colocados e operarem por cima da área de trabalho, estando os motores que movem os braços aplicados na estrutura base como visível nas figuras 9 e 10. Esta configuração tem o benefício de reduzir o peso dos braços e assim permitir acelerações e velocidades de operação elevadas, contudo a capacidade de carga é reduzida, tipicamente menor que 8 kg, sendo a sua maior utilização em operações de *pick & place* normalmente nas linhas de embalagem, e em algumas operações de montagem de componentes eletrónicos [11,13,14,15].

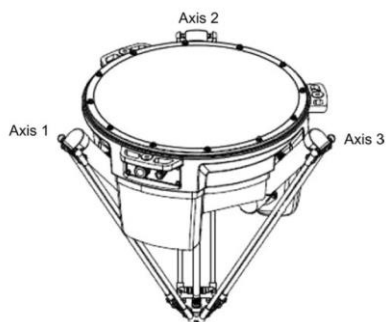


Figura 9. Exemplo de um robô tipo DELTA [4].

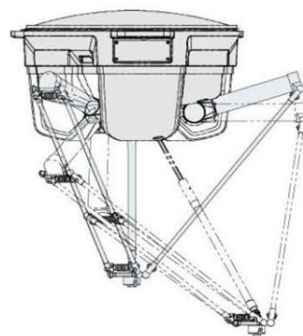


Figura 10. Perfil de um robô tipo DELTA [4].

Os robôs cilíndricos são robôs cujos eixos formam um sistema de coordenadas cilíndrico. Possuem uma combinação de eixos lineares e de revolução, tipicamente com rotação da base seguido de eixos vertical e horizontal lineares, com eixos de revolução no pulso. Estes permitem ter uma estrutura rígida e obter acesso a cavidades pequenas e são fáceis de programar. Contudo, necessitam de espaço na parte de trás dos braços de forma a não haver colisões quando movimentam o eixo vertical e horizontal. São normalmente utilizados em aplicações de apoio em linhas de montagem e *pick & place* maioritariamente na industrial de componentes eletrónicos em ambientes controlados como salas limpas [11,13,14,15].

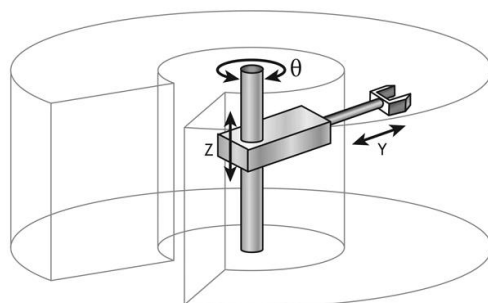


Figura 11. Exemplo de um robô cilíndrico e a sua área de trabalho [4].

2.2 Robôs Antropomórfico - 6 Eixos

2.2.3.1 Design Antropomórfico

Na sua fórmula genérica, a arquitetura de um robô antropomórfico consiste num conjunto de ligações rígidas interligadas com articulações. Por uma questão de simplicidade no controlo e fabrico levou a que estes robôs possuam apenas articulações

de revolução ou prismáticas e cujos eixos sejam ortogonais, paralelos ou de interseção [16].

São designados antropomórficos no sentido em que possuem um “ombro”, as primeiras duas articulações, um “cotovelo”, a terceira articulação e um “pulso”, as restantes três articulações. Sendo assim, possuem os seis *DoF*, necessários para trabalhar em qualquer posição e orientação arbitrária.

Como referido, quase todos os robôs antropomórficos comerciais possuem apenas articulações de revolução. Comparadas às prismáticas, este tipo de articulações são mais baratas e permitem uma área de trabalho maior para o mesmo volume de robô.

Os robôs antropomórficos são pesados, comparando com o máximo de carga que conseguem movimentar sem perder precisão. O rácio entre este e o seu peso é superior a 1/10. Esta diferença de peso é devida à necessidade de ter ligações rígidas sem qualquer tipo de flexibilidade. Ligações flexíveis levariam a deformações e consequentemente a erro na posição e orientação do terminal do robô [16,17].

A simplicidade da cinemática direta e inversa e a velocidade dos movimentos sempre foi um dos principais critérios para o design de robôs industriais, explicando o facto de quase todos os modelos de robô possuírem uma estrutura cinemática semelhante, a maioria segue um design 321 como o apresentado na figura 12 [16].

Como referido, tendo as articulações de revolução boas propriedades espaciais e como, seguindo uma sequência de 3 articulações introduz simplicidade no algoritmo cinemático, a maioria dos robôs industriais possuem uma estrutura cinemática como a que está representada na figura 12. Este design é representativo de um manipulador 6R, com um “pulso”, e cujas 2ª e 3ª articulações são paralelas e ortogonais à 1ª articulação. Esta é a razão pela qual o design se intitula de “Estrutura 321”: as 3 articulações de “pulso” intercetam-se, as 2 articulações “ombro” e “cotovelo” são paralelas, não há interceção, e a 1ª articulação interceta a 1ª articulação do “ombro” ortogonalmente [16,17].

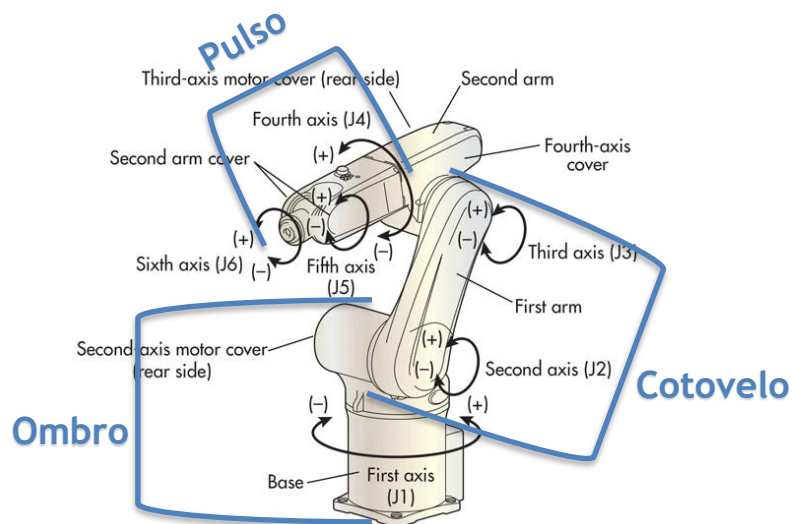


Figura 12. Arquitetura de um robô antropomórfico [16].

2.2.3.2 Modelo Cinemático (*kinematic Model*)

Um modelo cinemático é uma descrição matemática da geometria e do movimento de um robô tendo em consideração a sua estrutura cinemática. Ao longo dos anos têm sido diversos os métodos de desenvolvimento de modelos cinemáticos propostos como o modelo *S-model*, o *Zero-reference model*, modelo de *Hayati-Roberts*, sendo o modelo *Denavit - Hartenberg* o mais popular e mais utilizado entre os autores dos diversos documentos consultados na realização desta dissertação, encontrando-se os principais na bibliografia. Baseado na convenção e parâmetros identificados por Jacques Denavit e Richard Hartenberg em 1955. Este modelo, também conhecido como representação D-H, baseia-se na utilização de matrizes de transformação homogêneas. Contudo, este modelo não é perfeito e ao longo do tempo vários autores propuseram modificações ao original, existindo variados modelos modificados de forma a se adaptarem melhor a cada utilização [17,18].

Para melhor compreensão do funcionamento do modelo cinemático é importante perceber o que está envolvido quando é calculada a posição do robô e executado o movimento do mesmo ao longo de um percurso pré-determinado. Este caminho definido é percorrido pela ponta da ferramenta, cujo sistema coordenadas é chamado de TCP (*tool Center Point*). Analisando o esquema representado na Figura 13 podemos ver que entre a referência do sistema de coordenadas base e a referência do sistema de coordenadas TCP ocorrem no mínimo seis alterações de sistemas de coordenadas. Estes sistemas estão

normalmente associados aos braços e articulações existentes no robô. Estas transformações podem ser chamadas de transformações rígidas e utilizam o modelo cinemático, aplicando matrizes de transformação de forma a traduzir o posicionamento de cada uma das articulações permitindo obter a posição da ferramenta denominado *end-point* ou também TCP [17,18,19,20].

Para o correto desenvolvimento deste modelo é necessário definir parâmetros que vão traduzir de forma correta esta transformação, e permitir o preenchimento da matriz transformação A_i , que é referente ao braço i e articulação i e aos seus movimentos de rotação (Rot) e transladação (Trans).

De acordo com diversos autores os parâmetros definidos são quatro: a_i , α_i , d_i e θ_i respectivamente o comprimento do braço entre articulações, o ângulo de torção do braço, o *offset* ou deslocamento do braço e o ângulo em que se encontra a articulação. Como referido, estas variáveis são parâmetros que relacionam geometricamente dois sistemas de coordenadas, e como a matriz A_i é a função de apenas uma variável, temos que três das variáveis a cima referidas são constantes para um determinado braço i , enquanto que o quarto parâmetro, θ_i no caso de uma articulação de revolução e d_i no caso de uma articulação prismática, é a variável da articulação [17,18].

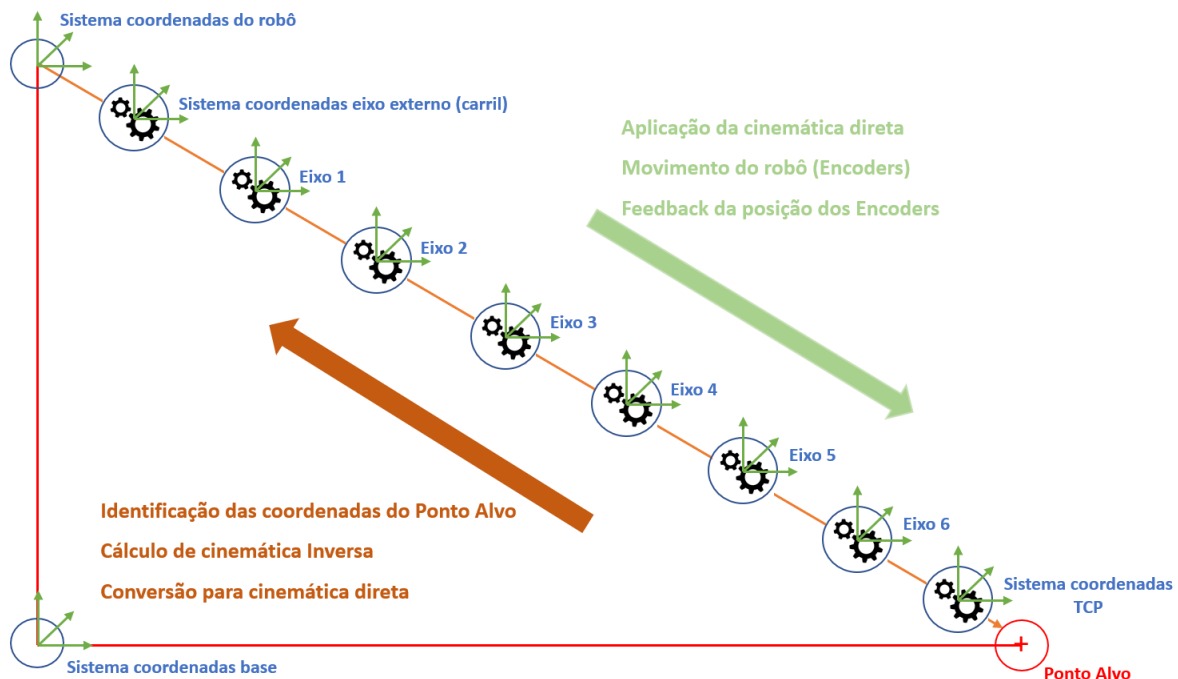


Figura 13. Esquema representativo das operações envolvidas no movimento de um robô antropomórfico.

Sendo assim a matriz transformação A_i tem a forma:

$$A_i = \text{Rot}_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,a_i} \text{Rot}_{x,\alpha_i}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

No caso de outros sistemas e modelos cinemáticos, são aplicadas matrizes de transformação caracterizadas por seis números, como por exemplo três números para definir a quarta coluna da matriz e três ângulos Euler, que descrevem a orientação do braço, para definir a matriz 3x3 superior esquerda. Na representação D-H são apenas considerados quatro parâmetros o que simplifica os cálculos. A razão para esta simplificação poder ser feita é que, enquanto é necessário que o braço i se encontre rigidamente ligado à articulação i , existe liberdade para a escolha da origem dos eixos de coordenadas. Por exemplo, não é necessário que a origem, O_i , do sistema de eixos i se encontre no limite físico do braço i . Aliás, não é necessário que esteja colocada de todo no braço i , pode-se encontrar no espaço, desde que seja certo que o braço i e a articulação i estejam ligadas de forma sólida. Através de uma correta escolha da origem e eixos de coordenadas é possível reduzir assim o número de parâmetros necessários de seis para quatro, ou até menos em alguns casos. De forma a ser possível utilizar este modelo cinemático é necessário então que haja uma relação entre os dois sistemas de coordenadas para o qual se pretende fazer a transformação. Considerando um caso em que temos dois sistemas de coordenadas, o sistema 1 e o sistema 0, exemplificados na figura 14 [17,18,19,20,21].

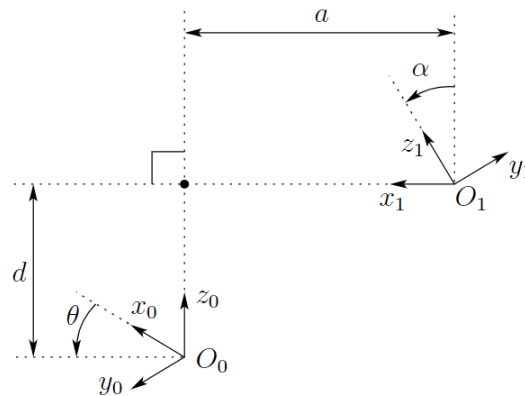


Figura 14. Esquematização da relação entre 2 sistemas de coordenadas [20].

Podemos definir que estes sistemas de coordenadas podem ser correlacionados da seguinte forma:

(DH1) O eixo x_1 é perpendicular ao eixo z_0 ;

(DH2) O eixo x_1 intercepta o eixo z_0 .

Segundo estas condições, pode-se afirmar que existem números únicos a , α , d e θ (Sendo que α e θ , ângulos, são números únicos quando multiplicados por 2π) de forma a que:

$$A_i = R_{z,\theta} \text{Trans}_{z,d} \text{Trans}_{x,a} R_{x,\alpha}$$

Um resumo dos passos dados de forma a chegar a esta equação para a adaptar a um qualquer manipulador do tipo antropomórfico pode ser visto no anexo A deste trabalho [17,18,19,20,21].

Como referido, esta simplificação no cálculo das matrizes torna assim mais rápida a transformação entre diferentes sistemas de coordenadas e dá azo a menor erro no cálculo e movimentação do robô. Como é visível no sistema representado na figura 14, as coordenadas do alvo, onde se pretende o posicionamento correto do *end-effector*, são transformadas utilizando este sistema cinemático. Este processo de transformação é chamado de cinemática inversa (*inverse Kinematics*) e permite ao controlador associado ao robô determinar quais as variações necessárias em cada um dos sistemas de coordenadas de forma a que este se desloque da posição em que se encontra para a posição desejada, alvo. Após serem determinados quais os movimentos necessários em graus, estes são então convertidos em pulsos para os motores (*encoders*) respetivos a cada eixo e realizado o movimento destes, sendo chamado este processo de cinemática direta (*forward kinematics*). O progresso deste movimento é controlado pelo constante feedback de informação dos *encoders* para com o controlador, de forma a garantir o correto posicionamento do *end-effector* [17,18,19,20,21].

2.2.3.3 Robôs Antropomórficos para maquinaria

Um dos grandes desafios na aplicação de robôs antropomórficos a nível industrial prende-se na sua capacidade de maquinaria, principalmente maquinaria a 5 ou mais

eixos. Antes de mais é necessário compreender dois conceitos base para sistemas de maquinação, a precisão e a repetibilidade. No caso dos robôs e tornos com controlo numérico computadorizado (CNC), a precisão é definida pela certeza do movimento em caminhos pré-definidos que a máquina executa quando sobre carga. A repetibilidade é definida como a certeza com que a máquina, sobre carga, consegue replicar o mesmo movimento, durante vários ciclos ao longo de um turno em operação [22].

Este tipo de robô possui elevada capacidade a nível de repetibilidade, característica ótima para operações de *pick & place* ou soldadura em locais pré-determinados, normalmente programados manualmente utilizando funções *teach & learn*, que no caso de maquinação são muito demoradas ou na maioria das situações de todo impossível. A complexidade dos movimentos realizados e a própria estrutura deste tipo de robô leva a que a precisão dos mesmos seja extremamente difícil de garantir, mais uma vez notória nas operações de maquinação. Para o caso da maquinação, o processo de programação é chamado de programação *off-line* ou fora da linha, recorrendo a *softwares* externos CAM (*computer aided manufacture*) para calcular o percurso de maquinação.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma pesquisa extensa entre diferentes marcas e modelos de robôs antropomórficos relativamente à precisão dos mesmos, sendo que não foi avançado por nenhum fabricante qual a precisão dos seus modelos, nem no caso dos principais representantes no mercado como a ABB, KUKA, FANUC e YASKAWA, focando-se apenas em demonstrar a elevada capacidade de repetibilidade dos mesmos.

Mais à frente neste estudo será descrito o caso prático utilizado para desenvolver uma metodologia de calibração de um robô antropomórfico, sendo que a relevância deste tópico para o trabalho está relacionada com a função para o qual este é utilizado, única e exclusivamente maquinação de materiais macios, maioritariamente para o desenvolvimento de maquetes e modelos.

De seguida são abordados alguns conceitos importantes a ter em consideração para robôs antropomórficos utilizados para maquinação, fazendo algumas comparações diretas com outros sistemas, tornos CNC, mais utilizados com semelhante área de trabalho e para realizar as mesmas operações.

2.2.3.3.1 Precisão

Precisão na maquinação é provavelmente o requisito principal para quem utiliza mecanismos de maquinação. Como referido, como a programação deste tipo de operação recorre a *softwares* externos é necessário que haja uma boa correspondência entre o modelo virtual do robô que está a ser utilizado e a realidade, sendo a precisão um fator de elevada importância para este tipo de operação correr de forma correta.

No caso de equipamentos CNCs de alto desempenho, a precisão ronda os 0,02 e 0,05 mm. A precisão de robôs antropomórficos tem vindo a aumentar nos últimos anos, aproximando-se dos seus valores de repetibilidade, por exemplo o robô KR210 da marca KUKA, que possui uma repetibilidade de 0,1 mm pode ser calibrado até 0,2 mm. Contudo é importante ter em conta que a precisão de robôs depende muito da qualidade da calibração efetuada e como esta depende do utilizador/ operador destes, a indústria de robôs tende a focar-se mais na capacidade de repetibilidade do que na precisão. Como mencionado, a dimensão do robô também é um fator extremamente relevante, pois, com o aumento desta também o erro do mesmo cresce, devido ao esforço aplicado quando o robô possui o braço na sua extensão máxima [23].

2.2.3.3.2 Área de trabalho

A área de trabalho útil de uma máquina, em termos de maquinação, é o espaço delimitado pelas posições limite conseguidas pela ferramenta, independentemente dos movimentos realizados para as alcançar, que no caso dos robôs podem ter variadas combinações [16].

Existem alguns casos de CNCs de cinco e seis eixos com configuração tipo *Gantry*, como os representados nas figuras 16 e 17, de variados fabricantes como por exemplo a Belloti, Bermaq, Matec e Cms. Estes possuem grandes áreas de trabalho, inclusive no eixo Z (vertical), podendo chegar aos 6000 mm. O compromisso deste tipo de máquina é o espaço real ocupado, que normalmente é mais do dobro da área útil de maquinação. Os robôs industriais por outro lado frequentemente possuem uma relação de área de trabalho versus dimensão do robô bastante boa, sendo que um robô de dimensões médias tem em média uma área entre sete a oito metros cúbicos. Outra vantagem é a possibilidade de adicionar eixos externos, até mesmo de forma modular, como por exemplo carris ou plataformas elevatórias, aumentando assim a sua área de trabalho consoante a necessidade [23,24,25,26,27,28].



Figura 15. Centro de maquinação do fabricante Belotti [25].



Figura 16. Centro de maquinação do fabricante Bermaq [26].

2.2.3.3.3 Versatilidade

Provavelmente a mais importante vantagem dos robôs antropomórficos é a sua versatilidade. É possível, e com relativa facilidade, movimentar um robô de uma operação para outra. Os CNCs são muito bons em tarefas específicas como por exemplo criação de furos e outras geometrias não complexas. Um robô pode fazer estas tarefas e muitas mais [23,24].

Os robôs podem também movimentar-se em percursos mais complexos que a maioria dos CNCs. Estes tendem a possuir 3 a 4 *DoF*, em alguns casos 3 + 2 graus e raramente 5 ou mais eixos contínuos, sendo os 3 *DoF* suficiente para a maioria das tarefas de maquinação, mas que pode ser restritivo em alguns casos. Os robôs antropomórficos possuem 6 *DoF* podendo virtualmente maquinar qualquer forma pretendida e em qualquer orientação de ferramenta [23,24].

2.2.3.3.4 Rigidez

A rigidez de máquinas e ferramentas em operações de maquinagem tem bastante influencia na precisão. Uma ferramenta com baixa rigidez pode mover-se e deformar em contacto com um material com dureza superior, o que leva a um corte impreciso. Os robôs por norma possuem menor rigidez que ferramentas de maquinação comparativas, podendo ser inferior a um Newton por micrómetro enquanto que as CNCs normalmente possuem mais de 50 Newtons por micrómetro [23,24].

Ferramentas com baixa rigidez por norma tendem a ter frequências naturais mais baixas, ou seja, a ferramenta vai vibrar menos quando entra em contacto com o material.

Os robôs possuem frequências na ordem dos 10 a 20 Hz, muito inferiores aos CNCs que podem chegar às centenas ou milhares de Hz [23,24].

A maquinação utilizando robôs pode facilmente lidar com materiais macios como espuma, madeira, polímeros entre outros, contudo em materiais mais duros como aço ou titânio podem ocorrer ressaltos no robô, afetando certamente a sua precisão podendo em algumas situações comprometer a própria estrutura do robô [23,24].

2.2.3.3.5 Acessibilidade/Custo

Ambos os tipos de equipamento mencionados podem ter elevados custos, sendo que para semelhantes aplicações e áreas de trabalho, alguns autores estimam que um robô antropomórfico pode ser no mínimo 30% mais barato que uma CNC. Após pesquisa e pedido de orçamentos a diferentes fabricantes e fornecedores conclui-se o custo é em média 4 a 5 vezes superior no caso de uma CNC. Deve ser tido em conta também a capacidade do robô em maquinar objetos de, virtualmente, qualquer dimensão, forma e complexidade, representando outra mais valia para uma empresa por um menor custo [23,24].

2.2.4 Unidades lineares de transferência de robôs (RTUs)- 7º Eixo

Como referido anteriormente, sendo completamente programável, com custos cada vez menores em contraste com o aumento de capacidades e funcionalidades, os robôs permitem um retorno de investimento significativo nas operações de maquinação e fabrico, sendo ideais para processos que se baseiam na repetibilidade de operações, aumentando a produtividade da empresa.

Contudo, os robôs de 6 eixos tradicionais possuem uma limitação, geralmente são assemblados numa posição fixa, normalmente apertados numa base ou diretamente ao chão. Isto limita o seu alcance e potencial orientação numa determinada operação e por isso os limites das suas aplicações.

A adição de um sétimo eixo permite aumentar a utilidade e capacidade de um robô e por sua vez a sua produtividade.

O movimento neste sétimo eixo é realizado por uma unidade de transferência de robôs (RTUs), também denominado de carril de movimento linear, carril de posicionamento de robô, *slider* de robô ou *shuttle* de transferência de robô [29].

O conjunto de robô de 6 eixos e unidade de transferência de robôs é por norma denominado um robô de 7 eixos [29].

Este aumento da capacidade de trabalho do robô traduz-se numa ampliação do alcance deste para operações como maquinação, pintura ou, com algumas tarefas com mais precisão como adição de *pinstriping* em objetos de elevadas dimensões. Permite também que o robô opere entre múltiplas estações de trabalho, permitindo o avanço e transporte de um componente entre diferentes locais. Os exemplos mais comuns são o movimento de peças ao longo de postos de maquinação e inspeção de forma a acelerar os processos de produção. A adição da unidade de transferência linear leva a que o robô agora tenha a capacidade de mover a peça sem ter de alterar a orientação da mesma. Outro exemplo da utilidade deste sistema é em aplicações de *pick & place* de paletes ou outras aplicações de armazém semelhantes, onde a utilização de uma unidade de transferência permite que um robô de 6 eixos de menor dimensão e custo possa realizar as mesmas tarefas que normalmente apenas seriam capazes por robôs de maiores dimensões e maior alcance. Permite também que o mesmo robô realize múltiplas funções ao longo de uma linha de montagem sendo que o posicionamento do robô é realizado ao longo do carril nas diferentes posições, mais uma vez não sendo necessário variados robôs, reduzindo assim o custo total dos equipamentos [29].

Robôs de 7 eixos são utilizados na indústria automóvel, aeroespacial, de embalagens, solar/eólica, medicina, indústrias de bens de consumo, entre outras. Nestas indústrias melhoram operações como perfuração e maquinação, aplicação de compósitos, soldadura, montagem, pintura e revestimentos [29,30].

A escolha correta de um sistema de 7º eixo tem de incluir uma análise cuidada dos requisitos de precisão e repetibilidade nas operações em que estes vão ser implicados. A precisão final depende em parte no tipo de mecanismo de movimento integrado no sistema de transferência. A manutenção desta ao longo do tempo e de variados ciclos aumenta os custos de design e fabrico, que pode ser na ordem dos milhares de euros para um sistema algo simples. Uma unidade de transferência algo básica com um sistema de movimento de pinhão e cremalheira com precisão de 0,036 mm por metro, por exemplo, pode possuir um erro superior, na ordem 0,240mm ou superior ao longo de uma distância de 15 metros, que um sistema com precisão de 0,02 mm ou melhor por metro [31,32].

Isto pode acontecer pois a precisão de unidades de transferência depende de:

- Como já mencionado, folgas nos sistemas de engrenagem, tipicamente observados entre 1 e 18 minutos de arco e as folgas entre o pinhão e roda coroa no sistema de movimento;
- Na quantidade de pré-carga no alinhamento do sistema de pinhão e roda coroa;
- Na contagem por revolução do motor do encoder, assim como o correto comissionamento dos servos dos motores AC que controlam os parâmetros de movimento destes;
- As guias lineares do sistema em questão.

De facto, as guias lineares (e as suas especificações para manter precisão e conseguir garantir capacidade de carga) são componentes chave no design nos sistemas de transferência lineares. Alguns fornecedores oferecem soluções de integração com paralelismos desde 9 μm até mais de 30 μm numa distância de 3,000 mm. Outros parâmetros a ter em consideração são o peso total a ser transportado, a velocidade a que a carga necessita ser movimentada (expressa normalmente m/s), o centro de massa da carga a ser movimentada, a existência e qual o grau do movimento de rotação ou inclinação e os ciclos de utilização, tempo de vida e ambiente em que irão estar a atuar. O correto dimensionamento das guias vai depender do rigor na determinação dos fatores mencionados. Outras especificações e requisitos no design e montagem das unidades de transferência vão depender da sua aplicação final. Podem ser por exemplo guias de cabos especificamente desenhadas, ou motores à prova de explosão ou fogo e coberturas completas no caso de aplicações de braços de pintura [29,30]

2.3 Calibração de robôs industriais

A calibração é utilizada para melhorar a precisão do posicionamento, recorrendo normalmente a *software*, evitando alterações a nível de componentes mecânicos, de design ou do sistema de controlo do robô. Como qualquer outro componente ou dispositivo mecânico, os robôs estão sujeitos às alterações e desvios causados normalmente por desgaste de componentes, desvios dimensionais, tolerâncias e até mesmo troca de componentes. Fatores externos não geométricos como erros de montagem, de preparação de ferramentas, alterações no ambiente, etc. Sendo que o ato de calibração pode minimizar o risco de ser necessário realizar alterações na programação e

planeamento de trabalhos, como por exemplo a realização de um percurso de maquinação sendo este processo mais notório em atividades que envolvam elevado número de tarefas.

Todos estes fatores levam a uma inconsistência entre os valores nominais fornecidos pelo controlador e os valores reais. Segundo pesquisas realizadas, 95% dos erros obtidos na utilização de robôs industriais são devidos aos fatores referidos [31,32].

2.3.1 Importância da calibração de robôs industriais

Atualmente, a calibração de robôs tem um papel cada vez mais importante em diversas indústrias como a de maquinação e de montagem podendo levar a uma melhoria substancial na precisão e/ou redução de custo de operações, situações exemplificadas de seguida:

A) Implementação de tarefas desenvolvidas e simuladas *off-line*:

A calibração de robôs tornou possível o planeamento, programação e simulação de tarefas previamente a estas serem realizadas fisicamente por um robô. Isto permite uma redução de tempo, libertar o robô durante a fase de programação e possivelmente evitar erros que poderiam refletir um custo elevado para a empresa. Para isto ser possível, é necessário que as dimensões do robô e instrumentos presentes na área de trabalho sejam o mais próximos possível dos reais, qualquer diferença vai ser demonstrada como erros de posicionamento do robô quando este estiver em operação no chão de fábrica [16,31].

B) Melhoria de controlo e simulação de movimentos do robô:

Outro campo de melhoria proporcionado pela calibração é no controlo e simulação de movimentos do robô, nomeadamente algumas características físicas deste como parâmetros inerciais, forças de fricção, e rigidez estrutural [16,31].

C) Avaliação das características do robô ao longo do tempo:

Assim que um robô entra em operação num sistema de fabrico algo flexível, o desgaste de componentes assim como operações de manutenção e reparação afetam a precisão no posicionamento do robô. Normalmente, encontra-se presente nos manuais de utilizador destes equipamentos um planeamento de inspeção e manutenção, como é exemplo o presente no anexo B. Estes devem ser seguidos com rigor de forma a garantir a correta operação e longevidade do equipamento [16,31].

Porém, nem sempre estes procedimentos são suficientes, como referido podem ocorrer erros na operação do equipamento que levam a que seja necessária uma intervenção. Através de um processo de calibração periódico é possível determinar se é necessário efetuar alguma reparação ou apenas calibração deste e ajuste de parâmetros no *software* de operação do robô de forma a colocar o mesmo novamente em operação de forma correta, as situações em que poderá ser necessário algumas destas operações são mencionadas no próximo tópico [16,31,33].

De uma forma geral, podem ser considerados dois tipos de calibrações, calibração nível 1 não paramétrica também chamada de masterização física, ou apenas masterização e calibração paramétrica ou de modelo cinemático, também chamada de calibração nível 2. Como referido anteriormente no tópico 2.2.3.2, a maioria dos trabalhos realizados até ao momento seguindo a calibração modelo cinemático tem por base o modelo *Denavit - Hartenberg* [16,17,18].

2.3.2 Masterização

Todos os robôs necessitam de ser masterizados. Só quando este foi submetido a este processo é que se pode mover corretamente para posições programadas e movimentado utilizando coordenadas cartesianas. Durante a masterização, as posições mecânica e eletrónica do robô são alinhadas. De forma a conseguir este alinhamento, o robô é movimentado para uma posição mecânica pré-definida, a posição de masterização. Os impulsos eletrónicos, ou pulsos, do *encoder* de cada eixo são avaliados quanto à velocidade de rotação e depois salvos. A posição de masterização é similar, mas não idêntica, em todos os robôs antropomórficos, a posição exata pode variar até para o mesmo modelo de robô.

A masterização necessita ser efetuada nos seguintes casos, alguns já referidos anteriormente:

- Durante o fabrico e montagem destes como passo final;
- Após trabalhos de manutenção nos quais o robô perca a sua masterização, p.e. a troca de um motor;
- Quando um robô é movimentado sem estar conectado ao controlador, p.e. desembraiado;

- Após a troca de um componente mecânico, p.e. carreto;
- Após uma colisão com a ponteira a mais de 250mm/s;
- Após uma colisão em qualquer das áreas do robô;

Antes de realizar a masterização os eixos devem ser movidos para a posição de pré-masterização, normalmente identificada por marcações exteriores de alinhamento, com furos em ambas as partes de rotação do eixo podendo ser realizado este pré-alinhamento com cavilhas [34].

Um exemplo deste tipo de furações e marcações de alinhamento são visíveis nas figuras 17 e 18.



Figura 17. Exemplo de marcação de pré-masterização.



Figura 18. Exemplo de cavidade de masterização.

2.3.3 Calibração Cinemática

Na calibração cinemática são aplicados fatores geométricos de forma a identificar os parâmetros do modelo. A maioria dos autores consideram que todos os fatores não geométricos representam apenas 10% do erro total e restringem assim a sua análise aos erros geométricos, o facto de se considerar estes fatores menos relevantes simplifica as equações de cálculo realizadas. Porém, outros referem que os erros não geométricos são tão significativos como os geométricos, afetando de igual modo a precisão do robô em condições normais [31].

Para a realização deste trabalho não foram considerados estes fatores, não apenas pela dificuldade de corretamente identificar e controlar alguns deles, mas também pelos métodos utilizados para a calibração do robô, que não os têm em conta.

Em ambas as situações anteriores, a calibração consiste em quatro passos sequenciais identificados e descritos de seguida:

2.3.3.1 Modelação

Como referido anteriormente no ponto 2.1.3.2, um modelo cinemático é uma descrição matemática da geometria e do movimento de um robô. A escolha correta do modelo e parâmetros é imperativa, pelas razões já mencionadas [16, 17, 18].

2.3.3.2 Medição

A fase de medição envolve a determinação e descrição das posições do terminal do robô ou da ferramenta nele aplicada. Estas posições são comparadas com as posições previstas no modelo teórico de forma a determinar os erros presentes.

Geralmente, pois poderão existir situações pontuais em que não sejam suficientes, são necessários seis parâmetros de forma a ser possível determinar a posição de um corpo rígido. A fase de medição é a mais difícil e demorada de todo o processo de calibração. O processo de medição deve determinar os parâmetros individuais do modelo de forma a que seja possível ao sistema de medição identificar possíveis variações que afetem os mesmos. Um bom modelo de medição é inútil sem um sistema e processo de medição ajustado a este. Atualmente, diversos métodos de medição podem ser encontrados no mercado, como *hardware* e *software* proprietário do fabricante de cada modelo de robô, ou independentes como *softwares* e *hardwares* que podem ser sensores acústicos, sensores visuais, máquinas de medição por coordenadas e teodolitos manuais e automáticos.

As técnicas e os dispositivos de medição associados variam consideravelmente consoante a sua precisão, custo e facilidade de utilização, mas todos partilham as seguintes desvantagens:

- São necessários operadores qualificados para utilizar corretamente os equipamentos de medição;
- A recolha de dados é cansativa, demorada e difícil de automatizar;

- As técnicas de medição são maioritariamente desenvolvidas para a calibração de robôs em ambiente laboratorial;

- Os processos de preparação e medição requerem elevada intervenção humana, o que torna mais complicado realizar calibrações de robôs em ambiente industrial [16, 17, 18].

Vários autores provaram que não é necessário realizar uma medição completa da posição da ferramenta, sendo suficiente a realização de várias medições parciais. A introdução deste procedimento de medição parcial, devido ao seu baixo custo e eliminação de dispositivos de medição externos e de grande dimensão, é uma mais valia para aplicações *on-site*. Contudo este procedimento é 100% manual e requer intervenção humana elevada [16, 17, 18].

2.3.3.3 Identificação

A identificação de parâmetros que afetam o desempenho de um robô antropomórfico segue por norma o mesmo conjunto de parâmetros para os mais variados modelos de robô, sendo possível dividir estes pela forma de identificação, estática ou cinemática. Estes estão representados na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros monitorizados que afetam o desempenho de robôs antropomórficos. [34]

Parâmetros Monitorizados	Identificação cinemática		Identificação Estática
	Peso final no TCP	Comprimento dos braços	Danos físicos
	Fricção nos componentes mecânicos	Excentricidade das engrenagens	Rácio das engrenagens
	Rigidez	Folgas nas engrenagens	Flexibilidade

A identificação de parâmetros de forma estática pode ser alcançada por processos manuais, ou utilizando equipamentos de medição direta. No caso da identificação de parâmetros cinemáticos envolve métodos numéricos. É necessário que estes métodos sejam fidedignos de forma a que seja possível obter uma solução mantendo um nível de confiança razoável nos valores dos parâmetros medidos [16, 17, 18].

Como referido anteriormente, a identificação de parâmetros de um modelo cinemático de robô é uma questão que tem sido debatida e estudada por vários autores recorrendo a uma variedade de modelos e métodos de identificação. Nesta fase, os erros dos parâmetros cinemáticos são identificados através da minimização das imprecisões espaciais seguindo algoritmos *LMS* (*least mean square*) [16, 17, 18].

É sabido que a identificação cinemática é um processo não linear ou linear *LMS*. Quando um algoritmo *LMS* é aplicado são requeridos menos recursos e tempo computacional para obter um resultado, tendo o custo de problemas numéricos de mau condicionamento de identificação jacobiana. De forma a superar este problema, têm sido aplicadas técnicas de minimização tais como o algoritmo de Levenberg-Marquardt. Outros autores aplicaram técnicas de filtro Kalman de forma a determinar a relação entre a precisão da calibração e ruído na medição [16, 17, 18].

2.3.3.4 Compensação e Correção

Este é o processo final e decisivo na calibração cinemática de robôs, consistindo na implementação do novo modelo no *software* de controlo da posição do robô. Devido à dificuldade na modificação dos parâmetros cinemáticos diretamente no controlador do robô, um conjunto de correções são feitas nos valores lidos pelo *encoder* no robô, obtidas através da resolução das cinemáticas inversas do robô calibrado.

Como a cinemática inversa de um robô calibrado geralmente não pode ser resolvida analiticamente, são aplicados algoritmos numéricos tais como o Denavit-Hartenberg de forma a realizar as correções necessárias à compensação dos erros cartesianos [16, 17, 18].

2.3.4 Equipamentos e Sistemas para Masterização e Calibração Cinemática

Por norma, os fabricantes de robôs industriais possuem, quer integrados no próprio robô, quer sobre a forma de acessório, equipamentos e sistemas que permitem efetuar tanto a masterização como a calibração cinemática. Existem também soluções externas que podem ser integradas, sendo que cabe ao utilizador e integrador decidir qual destes métodos é o mais viável para a sua empresa, podendo retirar o máximo rendimento e

desempenho do seu robô, com o menor custo de investimento possível. De seguida são apresentados alguns exemplos de sistemas comuns no mercado.

2.3.4.1 Equipamentos Proprietários de Masterização

Como referido, existem disponíveis no mercado opções para calibração vendidas pelos próprios fabricantes dos robôs. No caso da masterização, as soluções oferecidas são semelhantes em quase todos os fabricantes e são sistemas MEMD, Sistemas Micro Eletrónicos de Masterização ou SEMD, Sistemas Standard Eletrónicos de Masterização. A metodologia oferecida por estes consiste na realização do alinhamento mecânico do robô e identificação destas posições e da posição dos *encoders* como a posição absoluta ou zero do robô. Este alinhamento físico é conseguido através da inserção de sonda de medição de profundidade em locais pré-definidos no robô. Estes locais encontram-se em zonas onde o braço ou eixo que efetua o movimento no robô se sobrepõe ao eixo fixo ou referência. Na zona onde há sobreposição, no eixo exterior existe uma rosca interna, normalmente tapada por um parafuso, onde o sensor deve ser apertado, e no eixo interior existe uma cavidade maquinada onde o centro desta, ponto mais fundo, representa o zero físico do respetivo eixo do robô definido pelo fabricante. O procedimento normal para a utilização deste equipamento é a realização deste alinhamento eixo a eixo, iniciando no mais próximo da base do robô até ao final, junto ao TCP. Através da conexão deste sensor ao robô e identificado no controlador qual o eixo que se pretende calibrar, este executa movimentos em ambos os sentidos de rotação do eixo na velocidade mínima até determinar qual a posição onde o sensor se encontra no ponto mais baixo da cavidade, sendo esse correspondente ao zero do respetivo eixo. No esquema representado na figura 19 é visível um exemplo de um destes procedimentos de masterização, desde o equipamento necessário (a), pré-alinhamento ou pré-masterização (b), identificação do local onde colocar o sensor e preparação deste (c), colocação do sensor (d), e a alinhamento da posição de masterização realizada no controlador do robô (e) e confirmação da mesma no *software* do controlador (f). Este esquema demonstra o sistema Zeroing fornecido pela Yaskawa para robôs Motoman, e o exemplo da sua utilização na masterização do eixo “S” de um robô Motoman MH80 pareado com um controlador DX100, realizado aquando da formação cedida pela Roboplan nas suas instalações em Aveiro

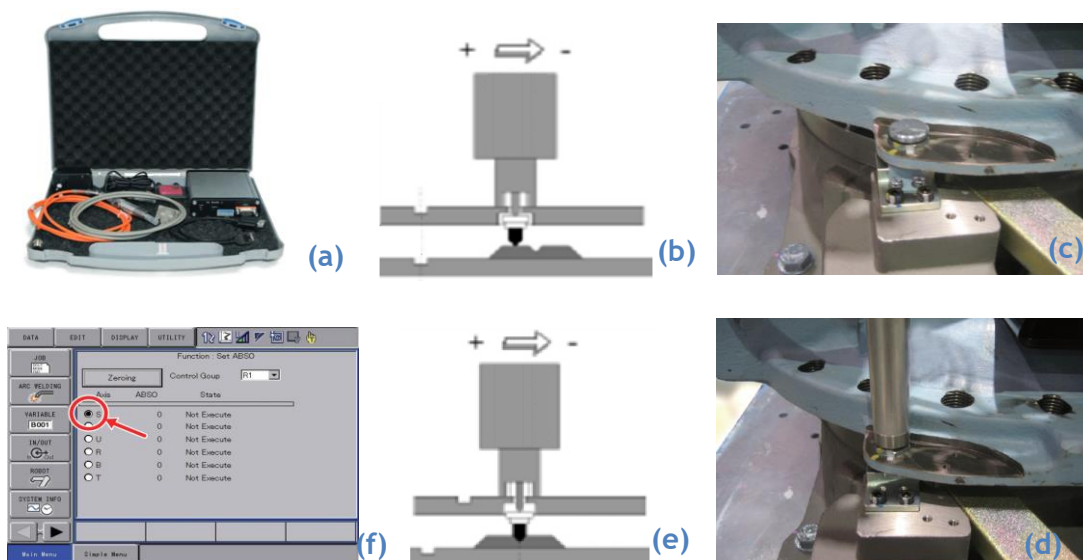


Figura 19. Exemplo do procedimento de masterização com sistema Zeroing da Yaskawa Motoman.

durante a execução deste trabalho. No anexo C estão representados todos os pontos de calibração existentes neste robô de 6 eixos, sendo semelhante em diferentes modelos e marcas. É possível ver em utilização na figura 20 e figura 21 o sistema MEMD e o sistema SEMD, disponibilizados pelo fabricante de robôs KUKA. O fabricante de robôs ABB possui um sistema semelhante aos anteriores a nível de operação chamado Pendulo de Calibração [35, 36].



Figura 20. Sistema MEMD KUKA [34].



Figura 21. Sistema SEMD KUKA [34].

2.3.4.2 Equipamentos Proprietários de Calibração Cinemática

No caso da calibração cinemática, existem também equipamentos e *softwares* disponibilizados pelos diferentes fabricantes de robôs. No caso da Yaskawa, o sistema oferecido é o MotocalV EG. Este sistema consiste num *software* proprietário apenas disponibilizado para integradores dos diferentes robôs da marca, e um manual com indicações de operação e instruções para o desenvolvimento do equipamento físico

necessário para efetuar a calibração. Um exemplo deste modelo fabricado pela Roboplan e disponibilizado para o desenvolvimento deste trabalho é visível nas figuras 22 e 23.

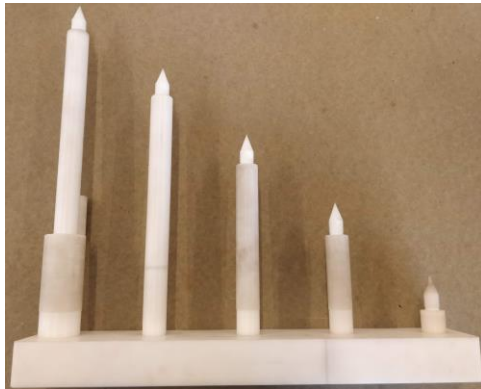


Figura 3. Modelo de ponteiros para calibração.

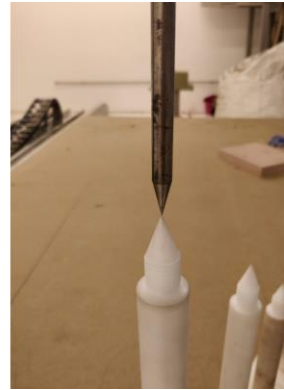


Figura 4. Modelo de ponteiros para calibração.

O procedimento de calibração utilizando esta solução consiste na criação de um ficheiro de trabalho de nome ROBOT no formato .JBI (formato proprietário dos robôs Yaskawa), com 5 posições no tipo de movimento linear (*MOVL*) em diferentes orientações da ferramenta colocada no robô como representado na figura 24, neste caso uma ponteira com uma extremidade afiada em bico, e realizar o mesmo procedimento nas 5 ponteira do modelo fixo à mesa, figura 22. Durante este processo o modelo deve encontrar-se na diagonal face ao robô, de forma a possibilitar a variação da posição da ferramenta nos eixos X e Y sem colidir com o modelo. Um exemplo do ficheiro de trabalho calibração ROBOT.JBI pode ser visto no anexo D [37].

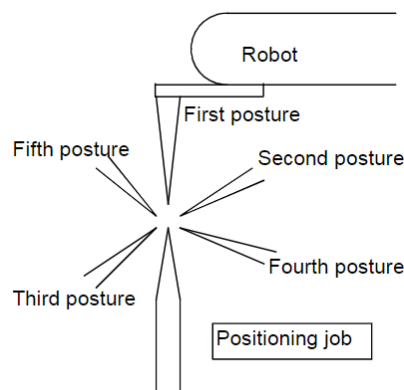


Figura 5. Diferentes orientações da ferramenta no processo de calibração [37].

Após este passo estar concluído é necessário importar para o computador os ficheiros presentes no robô:

- ALL.PRM - Dados paramétricos do robô;
- ABSLO.DAT - Dados de posição absoluta do robô;

- TOOL.CND - Dados da Ferramenta;
- ROBOT.JBI - O ficheiro de trabalho com as posições de calibração.

No computador, com o *software* MotocalV EG é possível importar os ficheiros mencionados, assim como definir o modelo específico de robô da Motoman que se pretende calibrar [37].

Tendo isto, podemos executar a calibração. Este é um processo iterativo que calcula combinações de posição absoluta dos diferentes eixos e também orientação da ferramenta, de forma a que ocorra alinhamento dos 5 movimentos gravados em cada um dos 5 pontos. Na figura 25 encontra-se um exemplo deste processo e o seu resultado [37].

Calculation finish

	Average	dS	dL	dU	dR	dB	dT	dX(mm)	dY(mm)	dZ(mm)
1	1.591	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000
2	0.413	0	90	-12	0	-274	10	-1.005	-0.077	1.626
3	0.396	0	84	0	3	-285	6	-1.006	-0.077	1.827
4	0.397	0	74	7	3	-285	6	-1.006	-0.077	1.827
5										
6										

EXIT

Time 22(sec)

Figura 25. Iterações do cálculo da calibração com MotocalV EG.

O resultado do processo de calibração é apresentado no menu seguinte, com os novos dados de posição absoluta e da ferramenta a serem inseridos no robô, por via manual nas opções do controlador, ou copiando os novos ficheiros gerados pelo *software*. É apresentado também a diferença entre o erro teórico antes e após este processo de calibração. Um exemplo deste menu é visível na figura 26 [37].

File(F) Option(O)

ABSO Data										☒	Select Job
	S	L	U	R	B	T	C	W		☒	Select Robot
Old:	3879	-68909	-35870	3045	84619	82848	0	0		☒	Select Control Group
New:	3879	-68834	-35862	3041	84333	82854	0	0		☒	Check File
TOOL Data										☒	Execute Calibration
	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Rx(deg)	Ry(deg)	Rz(deg)				☐	Select Judgement-Job
Old:	-248.703	0.234	234.890	0.0	0.0	0.0				☐	Execute Judgement
New:	-249.709	0.157	236.717	0.0	0.0	0.0					
Average Error (Theoretical Result by Calibration)											
Before:	1.591	(mm)	➡	After:	0.397	(mm)					

Figura 26. Comparação entre definições antigas e novas, gerados pela calibração via software.

Após inserir estes dados no robô deve ser realizado um novo ficheiro de trabalho com o nome P7-NEW.JBI onde, com a mesma ferramenta com que foi efetuada a calibração anterior, devem ser gravadas 7 posturas diferentes da ferramenta com esta alinhada no mesmo ponto à semelhança do processo feito anteriormente. As posturas devem seguir o exemplo na figura 27.

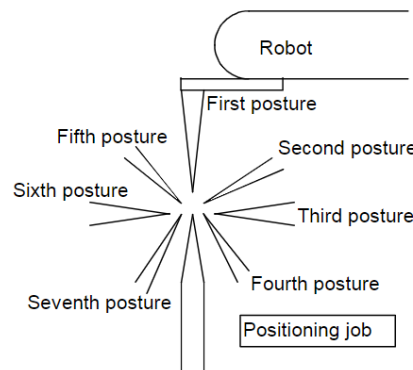


Figura 27. Esquema das diferentes posturas para calibração [37].

Este novo ficheiro deve ser então novamente carregado no *software* e realizado um processo de avaliação do erro com as novas configurações, *Judgement-Job*. Após selecionar esta opção no *software* e o respetivo ficheiro, é calculado o desvio de cada posição realizada face ao ponto médio das medições, e apresentado numa tabela visível na figura 28. Caso os valores de distância de cada ponto ao ponto médio sejam inferiores ao valor considerado padrão de 0,6 mm definido pelo fabricante, a calibração é considerada bem-sucedida e o robô encontra-se calibrado. Caso haja um valor superior, surge uma notificação e o processo deve ser realizado novamente e um novo conjunto de dados de posição absoluta do robô e dados de ferramenta devem ser calculados [37].

Este *software* permite também fazer diretamente e apenas a calibração da ferramenta, sendo que esta opção normalmente pode ser feita também utilizando apenas

STEP	Distance	X	Y	Z	Tx	Ty	Tz
Mean		2172.320	-105.992	1304.328	25.714	0.000	5.357
C0000	0.426	2172.737	-105.958	1304.250	-180.000	0.000	3.740
C0001	0.585	2172.850	-105.773	1304.212	-180.000	0.000	-33.218
C0002	0.539	2172.418	-105.464	1304.284	180.000	0.000	-94.045
C0003	0.586	2171.776	-106.044	1304.539	180.000	0.000	-147.178
C0004	0.597	2171.783	-106.094	1304.569	180.000	0.000	157.314
C0005	0.465	2172.029	-106.349	1304.267	180.000	0.000	101.888
C0006	0.451	2172.647	-106.262	1304.176	-180.000	0.000	48.999

Figura 28. Exemplo de valores calculados pela função "Judgment-Job".

o robô, com a vantagem de não ser necessário a transferência de ficheiros do controlador para o computador e vice-versa.

Existem diferentes soluções disponíveis por cada fabricante para a calibração cinemática dos seus robôs indústrias, recorrendo a variadas tecnologias para a realizar, como o caso do fabricante KUKA que utiliza a tecnologia laser no sistema TRACC para identificar a posição da TCP de forma mais precisa quando comparada ao sistema da Yaskawa, que depende muito do erro humano proveniente do operador [36].

2.2.4.3 Equipamentos não proprietários de calibração

Neste momento existem variados equipamentos de calibração que podem ser adaptados a diferentes modelos de robô, alguns permitindo que se realize a masterização, calibração cinemática e calibração da ferramenta e alguns limitados apenas à calibração da ferramenta. Existem algumas razões pelas quais este tipo de sistemas podem ser uma opção comparativamente às soluções apresentadas anteriormente. Já mencionada, a flexibilidade a nível de modelos de robô que podem calibrar permite a uma empresa que possua diferentes equipamentos, mesmo de vários fabricantes, realizar a calibração apenas com uma solução, reduzindo o custo de aquisição de equipamento e de formação de operadores. Contudo, a mais relevante é o tempo de operação de calibração. Dependendo do equipamento este pode ser inferior a 1/5 do tempo de operação utilizando equipamento proprietário. Na tabela 2 estão resumidos os principais fabricantes deste tipo de sistema, e identificado o tipo de tecnologia utilizada, o tipo de calibração que permitem executar, o modo de operação quanto à necessidade de intervenção do operador e o custo, este orçamentado durante a execução deste trabalho incluindo instalação e formação de até 3 operadores, requisitos normais nas variadas indústrias onde são utilizados robôs industriais [38, 39, 40,41].

Tabela 2. Principais fabricantes de equipamentos de calibração não proprietários.

Fabricante	Modelo	Tecnologia	Tipo de Calibração	Operação de Calibração	Custo (€)
Wiest-EG	LaserLAB	Laser cruzado	Todas	Automática	27.500
Zis-Cutting	Zis-TCP	Sensores de toque	Ferramenta	Manual	4.200 + formação
Leoni	Leoni-TCP	Laser cruzado	Ferramenta	Semi-automática	15.499
RoboDk	RoboDk	Laser tracker	Todas	Manual	14.995 + laser tracker

Dentro deste grupo de sistemas destacam-se o LaserLAB do fabricante Wiest-EG, que permite executar a masterização, calibração cinemática e calibração da ferramenta da maioria dos modelos dos principais fabricantes. No caso dos robôs Yaskawa, o processo que utiliza é semelhante ao disponibilizado pela marca no MotocalV EG, com a vantagem de o processo ser automático e recorrer a tecnologia laser para determinar a posição da ferramenta, levando a que seja mais preciso e rápido que este.

2.3.5 Técnicas de medição de desempenho de precisão e repetibilidade de robôs antropomórficos

A calibração de robôs antropomórficos deve ser passível de confirmação através de testes e técnicas de medição do desempenho destes tanto em precisão como de repetibilidade.

Todos os métodos de medição encontrados durante a realização deste trabalho recorrem a meios e equipamentos de medição e *softwares* externos. A maioria destes requerem um *laser tracker* ou uma sonda, equipamentos não disponíveis no CEiiA onde o trabalho prático foi executado e por isso não aprofundado no desenvolvimento deste. Foi ponderado a requisição de um destes equipamentos e utilizar o *software* da empresa RoboDK para a medição destes, mas tendo em consideração a incerteza da possibilidade da calibração do equipamento em tempo útil, o valor de empréstimo de cada um dos equipamentos e a aquisição do *software*, cuja versão que possibilita realizar estes testes foi orçamentado em 9900€ tendo em conta que seria para o desenvolvimento desta dissertação, e mais uma vez a impossibilidade de desenvolver um *software* que utilizasse um destes sistemas dentro do tempo disponível. Para contornar esta situação foram desenvolvidas duas técnicas que permitissem, com os materiais e equipamentos disponíveis no centro, realizar testes de repetibilidade e precisão do robô, a última com a vantagem de ser realizada considerando o processo de maquinação [41].

Os dois métodos mais utilizados e que recorrem às tecnologias mencionadas no tópico anterior são o teste *ballbar*, normalmente utilizado para calibração em CNCs podendo ser aplicado também em robô de forma a determinar o seu desempenho, degradação e desgaste, e os testes definidos na norma ISO 9283:1998 que define critérios e testes de desempenho para robôs industriais [41, 42].

O teste *ballbar* é um sistema de medida compreendido por duas esferas de 0,5 polegadas de diâmetro. Este teste determina o erro, repetibilidade e *backlash* de um percurso circular. O dispositivo mais comum para realizar o teste é uma sonda Renishaw QC20-W junto com um kit de suporte apresentado na figura 29 que, através de um suporte aplicado no robô e uma base fixa numa superfície visível na figura 30, com movimentos circulares do robô em torno desta base é possível verificar as variações de distância em relação ao centro em cada um dos pontos, obtendo no final um gráfico com os desvios obtidos [41].



Figura 29. Equipamento para teste Ball-bar [41].



Figura 30. Teste Ball-Bar [41].

A norma ISO 9283:1998, como referido, define critérios e testes de desempenho quer para medição de repetibilidade como de precisão. Os testes sugeridos são semelhantes, apenas os dados recolhidos são diferentes para cada uma. Estes devem ser realizados dentro de um espaço definido como cubo ISO, e este deve ter a dimensão máxima possível dentro da área de trabalho do robô. Este cubo deve ser programado num percurso NC com estas medidas, obedecendo ao esquema representado na figura 31, em que os pontos C representam as arestas limite do cubo e os pontos P pontos de referência para os testes. Estes testes requerem a aplicação no robô de um alvo do qual seja possível monitorizar o movimento ao longo do percurso definido utilizando um sistema de medição externo como um *laser tracker* [42].

No caso do teste de repetibilidade, são efetuadas variadas passagens pelo percurso a diferentes velocidades, direções de movimento, cargas aplicadas, temperatura de operação, e temperatura dos mecanismos do robô, fazendo pausas em cada ponto P e retiradas as coordenadas destes em cada uma das operações. A comparação é feita entre as variações das coordenadas medidas em cada ponto e condição.

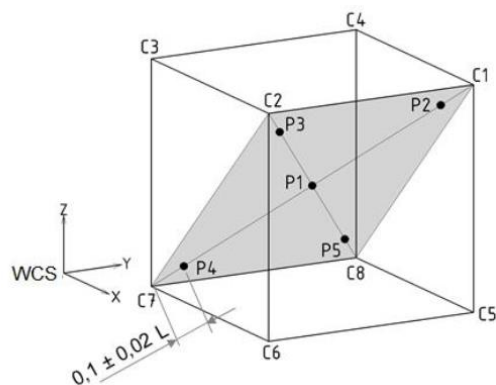


Figura 31. Representação de cubo ISO da norma ISO 9283:1998 [42].

Para o teste de precisão são realizados os mesmos percursos e as mesmas condições, sendo que é feito o controlo do rastro realizado pelo alvo ao longo do percurso, na sua totalidade ou na passagem pelos pontos P, e comparando mais uma vez as variações em cada uma das diferentes condições implementadas. Embora a norma ISO 9283:1998 tenha sido descontinuada em 2001, não existindo atualmente nenhuma que a substitua, os princípios de desempenho do robô definidos por esta continuam a ser utilizados [43].

3. Caso Prático

O caso prático e desafio proposto pelo CEiiA, que deu origem à temática desta dissertação centrou-se no desenvolvimento de uma metodologia para calibração de robôs antropomórficos de 6 ou mais eixos, nomeadamente para a calibração do robô existente no centro de engenharia para maquinaria de materiais macios, um robô Yaskawa modelo Motoman ES-165D. Este está aplicado num carril Yaskawa Motoman TSL 2000. Como referido anteriormente, este robô é utilizado para maquinaria de materiais macios e de elevadas dimensões, maioritariamente moldes para produção de peças à base de fibras. Este tópico está dividido em 3 partes, inicialmente serão apresentados os equipamentos que se pretendeu calibrar, *softwares*, equipamentos de engenharia inversa e metrologia e materiais utilizados durante a execução do caso prático. No tópico seguinte são apresentadas as técnicas, metodologias e dados obtidos, utilizados para a análise das condições e estado do robô e dos seus componentes e das alterações realizadas ao longo das variadas etapas do processo de calibração, nomeadamente a melhoria do seu desempenho a nível de precisão. Para finalizar são apresentados os testes de repetibilidade realizados em diferentes condições de forma a poder realizar uma melhor análise do estado final da calibração do robô.

3.1 Equipamentos e *softwares* e materiais utilizados

3.1.1 Equipamentos Yaskawa Motoman

- Robô Yaskawa Motoman ES-165D

Como mencionado, o equipamento disponível no CEiiA para maquinação a 6 eixos é um robô Yaskawa Motoman ES-165D figura 32.

Este robô é um robô de 6 eixos de elevada velocidade que oferece um desempenho superior na manipulação de materiais, apoio a maquinação e apoio a prensas. O ES-165D permite um alcance máximo de trabalho de 2,651mm e elevado momento de inércia permitindo na mesma uma elevada repetibilidade posicional, de $\pm 0,2\text{mm}$. A elevada velocidade e aceleração axial permitem ciclos de produção mais eficientes, com menor tempo e maior *output*. O design compacto e fino permite o alcance em espaços confinados, aumentando a aplicabilidade e produtividade do sistema. Neste robô está aplicado um *spindle* Styrotec KM 2, figura 33 com baixo consumo energético e vibração, desenvolvido especificamente para maquinação de materiais macios [33, 44].



Figura 32. Robô Yaskawa Motoman ES-165D [33].



Figura 33. Spindle Styrotec KM 2 [44].

- Carril Yaskawa Motoman TSL 2000

O robô encontra-se montado num carril TSL 2000, representado na figura 34, com 8 metros de comprimento, sob a forma de 2 módulos de 4 metros unidos. Este carril é aplicado diretamente no chão de fábrica e permite elevadas velocidades de movimento no 7º eixo, com baixo ruído e assegurando elevada capacidade de carga. O carril possui algumas opções que são vantajosas em termos de operações de manutenção e calibração,

sendo as suas guias e carris auto lubrificados, e possui a capacidade de ser efetuada a masterização do mesmo utilizando o Sistema Zeroing da Yaskawa apresentado no tópico 2.2.4.2 deste trabalho. Este equipamento possui uma repetibilidade de posicionamento no 7º eixo de $\pm 0,08$ mm. [45]



Figura 34. Carril Yaskawa Motoman TSL 2000 [45].

- Controlador Yaskawa Motoman Dx100

O controlador utilizado conjuntamente com os dois equipamentos mencionados é Yaskawa Motoman DX100. Este controlador possui a capacidade de controlar até 8 robôs ou 72 eixos em simultâneo, utilizar até 40 inputs e outputs para adição de diferentes módulos de comunicação e operações. O comando de controlo e a sua interface são simples de utilizar e permitem a transferência de ficheiros via USB ou rede (ligação Ethernet no controlador), a última permitindo a monitorização e diagnóstico em tempo real dos sistemas a estes conectados. A função ARM, função de Controlo Avançado de Movimento do Robô utiliza cálculos dinâmicos de esforços e cargas aplicados em cada eixo do robô de forma a melhorar a precisão e velocidade nos movimentos de cada eixo, assim como ter um sistema de deteção de colisão altamente sensível [46].

3.1.2 Softwares utilizados

Para o desenvolvimento CAD e CAM de diferentes elementos necessários ao longo da componente prática deste trabalho foram utilizados *softwares* da Autodesk, cujas licenças são disponibilizadas aos alunos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Para desenho e planeamento CAD foi utilizado o Autodesk® Inventor® e Autodesk® Fusion 360®, e para programação de maquinaria o *software* CAM Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020. A utilização deste ecossistema Autodesk® e a sua simplicidade de interface

e interpretação e utilização de funções, assim como importação e exportação de ficheiros entre estes, permitiu minimizar os problemas encontrados ao longo do desenvolvimento do trabalho que poderiam ser barreiras caso fossem utilizados outros *softwares*, e permitiu também desenvolver soluções para outros problemas encontrados durante o decorrer do trabalho, como o desenho de suportes para o carril e alteração da disposição do equipamento de controlo do robô e do *spindle*, desenvolvendo uma estrutura de suporte para ambos, cortados a jato de água e quinados, algo que não era objetivo deste trabalho mas melhorou tanto a nível funcional como esteticamente a disposição do equipamento no espaço reservado para este. O Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020 inclusive possui um *Plugin* onde é possível configurar diretamente o equipamento que pretendemos utilizar e as configurações deste, estando disponíveis modelos dos principais fabricantes, sendo que o Yaskawa Motoman ES-165D está presente, juntamente com o carril TSL 2000, como visível na figura 35 [47].

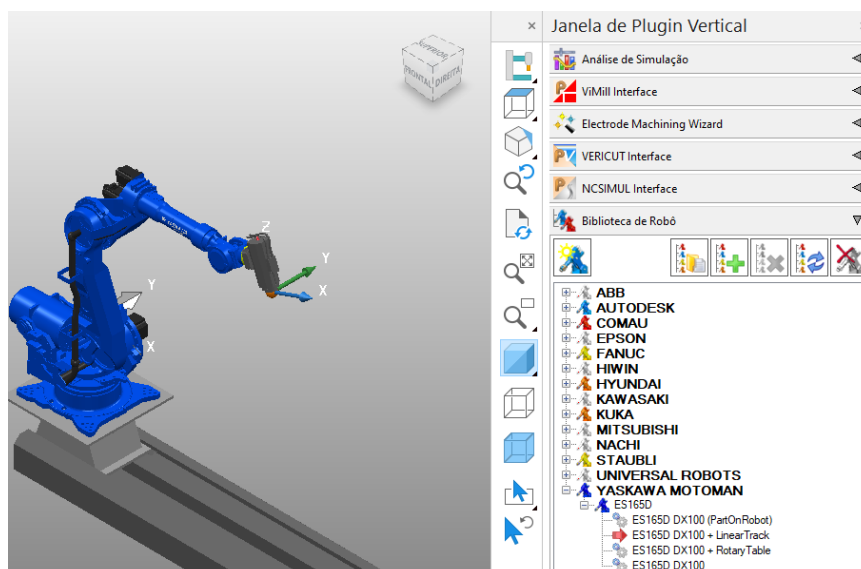


Figura 35. Plugin do robô Yaskawa Motoman ES-165D no software Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020

Na componente de metrologia e controlo dimensional foram utilizados também variados *softwares*.

Dentro do mesmo ecossistema da Autodesk® foi utilizado o Autodesk® PowerInspect® Ultimate 2020. Este permitiu a ligação e interação com variados equipamentos de controlo dimensional ao longo do trabalho, permitindo um melhor desenvolvimento do trabalho, utilizando mais uma vez a interface simplista e funcional dos *softwares* deste grupo. Além da aquisição de dados, foi também possível realizar a análise em tempo real destes, assim como fazer relatórios posteriormente de forma clara e simples. Também dentro desta

componente foi utilizado o *software* InspectPlus da Steinbichler disponível no CEiiA para utilização com equipamentos de engenharia inversa e controlo dimensional. Sendo o número de licenças deste *software* disponíveis no centro de engenharia algo limitado para a disponibilização continua durante este trabalho, foi utilizada também uma licença temporária do GOM Inspect 2019, gentilmente cedida pela GOM para a execução desta dissertação. Este *software* é similar a nível de opções e interface relativamente ao InspectPlus, com algumas melhorias a nível de opções e criação de relatórios de metrologia [47, 48, 49].

Para o processo de calibração foi utilizado novamente o Autodesk® PowerInspect®, e os *softwares* proprietários da Yaskawa, o MotocalV EG 2019, já mencionado no tópico 2.2.4.2 deste trabalho, e o MotoSim EG 2019, ambos cedidos a título de empréstimo pela Yaskawa Europa para o desenvolvimento deste trabalho [50].

3.1.3 Equipamentos de Engenharia Inversa e Metrologia

Foram utilizados equipamentos de engenharia inversa e metrologia para a determinação de anomalias e erros no robô, carril e processo de maquinagem.

Os equipamentos de engenharia inversa disponíveis no CEiiA e utilizados durante o trabalho foram o Comet L3D 2M, que utiliza a tecnologia de luz estruturada e o T-Scan Lv, este de triangulação laser e utilizado em conjunto com o rastreador ótico Optotrack Pro series 2000. Estes equipamentos de digitalização são produzidos e distribuídos pela Zeiss Optotechnik GmbH.

O Comet L3D 2M possui um sensor de 2 megapixéis e um conjunto de lentes que permitem diferentes campos de profundidade, alterando a resolução deste, sendo máxima de 0,06 mm para uma área de digitalização de 100x75 mm e mínima de 0,25 mm para uma área de 400x300 mm [51].

O T-Scan Lv é um equipamento “point and shoot” ou de varrimento e possui uma resolução máxima de 0,08 mm e uma velocidade de aquisição de 210.000 pontos/segundo. Este equipamento recorre à utilização do rastreador ótico Optotrack Pro series 2000 para funcionar, sendo um sistema que opera em modo de referência dinâmica. Este possibilita que se utilize o scanner de uma forma descontínua em relação à peça, por exemplo em ambientes sujeitos a vibrações como o chão de fábrica. O rastreador ótico Optotrack possui um volume de digitalização de 20 m³ [51].

Este tipo de equipamento é ideal para a digitalização de objetos de grandes dimensões como automóveis, *jigs* e ferramentas de linhas de produção sujeitos a movimentos [51].

Os equipamentos de metrologia utilizados neste trabalho foram o sistema de medição por coordenadas (CMM) Metronor SOLO e o braço de medição FaroArm® Fusion.

O Metronor SOLO é um sistema de medição por coordenadas (CMM) portátil baseada na tecnologia patenteada pela Metronor que permite elevada precisão em medições 3D utilizando apenas uma câmara e uma sonda portátil. O sistema SOLO oferece um sistema completo de funções de controlo e análise GD&T, idealmente utilizado em situações onde uma montagem rápida, facilidade de manuseamento e elevada portabilidade são críticas, o sistema SOLO possui um volume de trabalho elevado e pode ser operado através de uma conexão sem fios. Este equipamento possui uma precisão de $\pm 0,06$ mm para medições de planeza, e $\pm 0,0033^\circ$ em paralelismo, sendo estes os parâmetros de interesse para a função desempenhada neste trabalho. O equipamento Metronor foi disponibilizado pela empresa Norcam, assim como o apoio dos seus colaboradores. A sua utilização foi simples e intuitiva assim como a sua conectividade e utilização com o *software* Autodesk® PowerInspect® Ultimate 2020.

O braço de medição Faro Fusion, disponível no CEiiA, é um equipamento bastante versátil e de fácil utilização. Facilmente foi transportado e assembled em diferentes locais para a aquisição de dados durante este trabalho. Possui uma precisão de $\pm 0,064$ mm na medição de peças inferiores a 1,8 metros e uma repetibilidade de $\pm 0,051$ mm em 2,4 metros. Tal como o sistema Metronor, a sua utilização com o *software* Autodesk® PowerInspect® Ultimate 2020 foi perfeita [52,53].

3.1.4 Materiais utilizados

Durante a realização deste trabalho foi utilizado apenas um material extra em relação aos equipamentos e *softwares*. Este foi a espuma de poliuretano rígida de alta densidade Sikablock M700. Este material, com uma densidade de 0.70 g/cm^3 e elevada qualidade de acabamento superficial em processos de maquinaria, é normalmente utilizado para o desenvolvimento de moldes de injeção de baixa pressão, maquetes e especificamente para modelos de controlo dimensional, tornando-o ideal para a execução deste trabalho prático. Na totalidade foram disponibilizadas pelo CEiiA duas placas de $1500 \times 500 \times 50$ mm [54].

3.2 Calibração dos equipamentos Yaskawa Motoman

Sendo o objetivo deste trabalho obter uma melhoria conjunta de todos os elementos que contribuem para o erro de precisão gerado no processo de maquinação utilizando o robô Yaskawa Motoman ES-165D, foi importante estabelecer uma ordem de procedimentos de forma a garantir a correta identificação dos erros gerados no processo de maquinação por diferentes elementos e a sua correção. Esta metodologia foi sendo alterada com o decorrer do trabalho conforme os problemas e soluções para os mesmos foram surgindo. Os procedimentos realizados para a calibração estão apresentados seguidamente por ordem cronológica da sua realização.

3.2.1 Desenvolvimento do modelo e percursos de maquinação

De forma a realizar a melhor análise possível dos erros foi analisado e definido, juntamente com o principal operador do robô e o orientador deste trabalho no CEiiA, um conjunto as geometrias essenciais e dimensões que melhor representariam as operações normais de maquinação efetuadas, e obrigassem ao trabalho do robô movimentando todos os seus eixos e realizar geometrias de certa forma simples, mas que demonstrassem a precisão do robô durante o processo de maquinação, e fossem fáceis de analisar recorrendo aos equipamentos de metrologia existentes no centro.

Com base nas informações referidas, foi então desenvolvido um modelo com geometrias que permitiriam observar diferenças entre o idealizado e o real maquinado. Esta peça foi então idealizada e realizado um modelo CAD no *software* Autodesk® Inventor®, com as geometrias demonstradas na vista isométrica na figura 36. O desenho técnico deste modelo está disponível no anexo E. Como pode ser visto, estas geometrias incluem o facejamento e maquinação em todas as superfícies de um retângulo, excluindo a inferior onde o robô não teria acesso durante a maquinação e que não reflete uma posição que seja utilizada ou pretendida no futuro pelo operador.

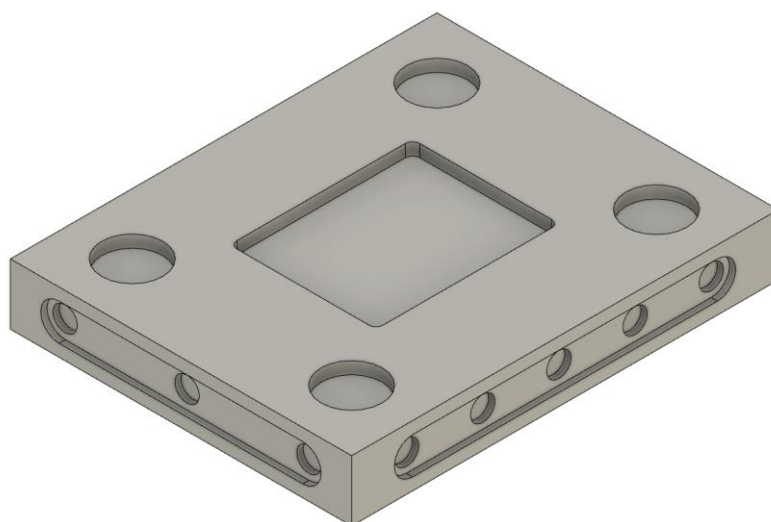


Figura 36. Vista isométrica do modelo desenvolvido para teste de maquinação.

Mais uma vez juntamente com o operador do robô, foram desenvolvidos percursos de maquinação no *software* Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020. No desenvolvimento destes foi tido em conta as características do material a maquinar e posição da ferramenta face à superfície. Foram assim criados 3 percursos de maquinação para cada superfície com a mesma ordem. Primeiro efetuado um desbaste inicial, seguido da maquinação das geometrias pretendidas e finalmente um percurso de acabamento.

3.2.2 Calibração da ferramenta

O passo seguinte deste trabalho foi a calibração da ferramenta a utilizar durante os processos de maquinação. Para isto foi utilizada a função de calibração integrada no controlador do robô denominada de *tool calibration*. Após a montagem da fresa a utilizar, neste caso uma fresa de diâmetro 20 mm. A ferramenta foi montada no robô e feito o procedimento de calibração. Este procedimento é visível na figura 37, e consiste na calibração da ferramenta recorrendo a uma ponteira, à semelhança da técnica mencionada no tópico 2.2.4.2, mas sendo esta limitada a 5 orientações da ferramenta. Este inclui também a calibração gravítica da ferramenta. Após terminado, iniciou-se o procedimento de maquinação.

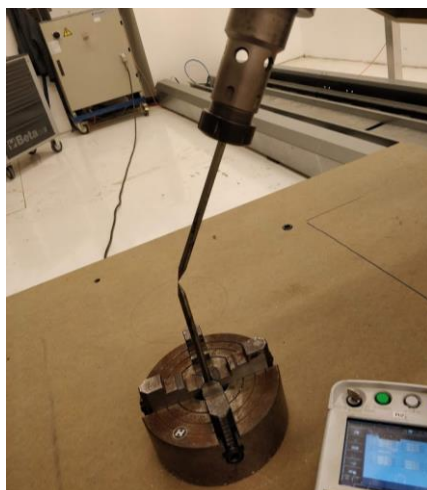


Figura 37. Exemplo de procedimento de calibração de ferramenta.

3.2.3 Maquinação e análise do 1º modelo

A maquinação foi realizada com as condições definidas no ponto 3.2.1. para isso foi cortado um bloco com dimensões superiores em 3 mm no comprimento, de forma a garantir que não existiriam irregularidades nas superfícies após a maquinação causadas por erros no corte da deste. Após a fixação da peça ao suporte com parafusos, foi definido o novo sistema de coordenadas a utilizar no bloco, recorrendo à função existente no robô.

Após a maquinação concluída, o bloco maquinado foi digitalizado recorrendo ao equipamento Comet L3D 2M. Gerado o ficheiro de digitalização, este foi alinhado com o ficheiro CAD original do modelo e retiradas os primeiros resultados de precisão do robô no estado inicial pré-calibração.

A identificação dos lados demonstrada na figura 38 será a referência para todos os modelos maquilados no decorrer do caso prático, sendo o lado 4, a face que se encontra virado para o robô, como é visível na mesma figura.

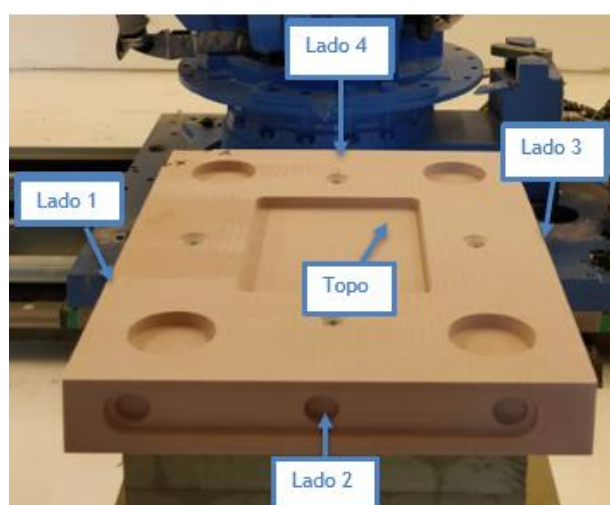


Figura 38. Identificação das faces dos modelos maquilados.

Os resultados foram analisados recorrendo ao *software* GOM Inspect 2019. Através deste *software* foi possível determinar os desvios apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Desvios máximos nas diferentes faces do 1º modelo maquinado.

Face Maquinada	Desvio máximo (mm)
Topo	0,600
Face 1	5,960
Face 2	5,190
Face 3	6,890
Face 4	6,020

Como podemos ver na tabela anterior, os desvios na peça são consideráveis tendo em conta o volume de peça maquinado, justificando assim a necessidade de executar procedimentos de calibração no equipamento.

A totalidade dos desvios neste 1º modelo e as suas direções são visíveis no relatório obtido no GOM Inspect 2019, presente no anexo F.

3.2.4 Análise e calibração do carril

Após a primeira maquinação ter sido efetuada, foi possível proceder à análise do carril e medição do carril.

Removidas as proteções do carril, foi visualmente detetado que este não se encontrava corretamente apertado ao chão de fábrica. Os mecanismos de aperto encontravam-se soltos, e algumas zonas do carril não tinha base para apoio das travessas deste, encontrando-se no ar, como é visível na figura 39 e 40. Também eram evidentes marcas em algumas zonas da lateral do carril onde as guias do robô teriam estado em contato, evidenciando um possível empeno do mesmo.

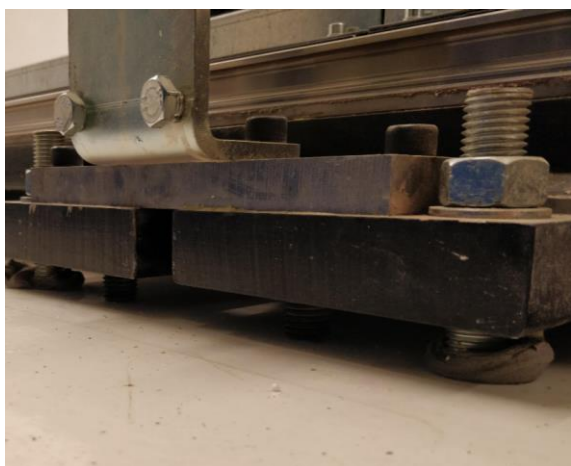


Figura 39. Pormenor 1 da zona do carril sem suporte.



Figura 40. Pormenor 2 da zona do carril sem suporte.

Para uma análise correta dos desvios presentes neste, foi utilizado o equipamento de digitalização T-Scan Lv juntamente com o Optotrack Pro series 2000, e foi digitalizada a superfície do carril. O ficheiro resultante desta digitalização é visível na figura 41. No *software* InspectPlus, foram criados dois planos coincidentes com cada uma das superfícies do carril, e analisada a variação de altura destes em todo o seu comprimento. Nesta análise foi detetada uma variação entre os extremos de 1,3 mm, sendo que o carril se encontrava mais baixo na zona central, onde não tinha suporte, e onde normalmente são realizadas operações de maquinação com o robô quando não é necessário o movimento do 7º eixo.

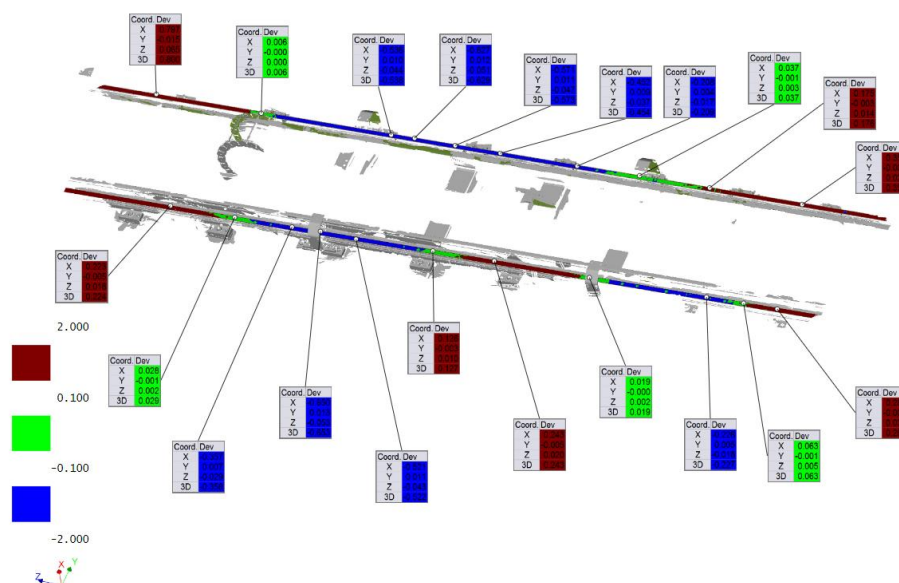


Figura 41. Digitalização do carril com T-Scan Lv + Optotrack Pro series 2000

Com esta informação foi tomada a decisão de desapertar o carril na sua totalidade, deixando o mesmo repousar 72h de forma a aliviar as tensões possíveis e proceder a novo aperto e calibração recorrendo ao equipamento de metrologia Metronor Solo, figuras 42 e 43.



Figura 42. Calibração do carril com recurso ao Metronor Solo.



Figura 43. Pormenor da calibração do carril com recurso ao Metronor

Para proceder a esta calibração, foi realizada uma medição inicial de forma a identificar a planeza das linhas do carril. Após terminada, foi realizado o aperto do carril em apertos cruzados entre linhas, iniciando numa ponta do carril até ao final deste. À medida que ia sendo realizado o aperto e contra aperto do carril, iam sendo efetuadas medições do carril, tendo sido definido uma gama de $\pm 0,2$ mm em cada ponto. Efetuados os 22 pontos de aperto, foi novamente verificada a planeza do carril, assim como o ângulo entre a base do robô e a superfície do carril, podendo ser vistos estes dados na tabela 4.

Tabela 4. Dados da planeza e ângulo entre o carril e a base do robô.

	Planeza (mm)	Ângulo carril-base do robô (°)
Pré-Calibração	2,469	N/A
Pós Calibração	0,481	0,019

Como é visível, a planeza foi consideravelmente reduzida permitindo realizar novo teste de maquinação.

Os dados obtidos na medição realizada com o Metronor Solo podem ser vistos no relatório realizado no PowerInspect® Ultimate 2020, presente no anexo F.

3.2.5 Maquinação e análise do 2º modelo

Para este teste de maquinação, mais uma vez foi realizada a calibração da ferramenta à semelhança da primeira maquinação. Definido também o novo sistema de coordenadas, efetuaram-se os mesmos percursos de maquinação.

Após esta ser concluída, o modelo foi digitalizado utilizando novamente o Comet L3D 2M e feita a análise desta vez no *software* InspectPlus. Os dados de desvio máximo encontram-se representados na tabela 5.

Tabela 5. Desvios máximos nas diferentes faces do 2º modelo maquinado.

Face Maquinada	Desvio máximo (mm)
Topo	0.572
Face 1	4,464
Face 2	4,023
Face 3	4,163
Face 4	4,558

Fazendo uma análise comparativa entre os valores na tabela 3 e 5, é possível identificar uma melhoria e redução entre 1 e 2 mm dos desvios presentes nas superfícies

maquinada a 3 + 2 eixos, sendo que na maquinação a 3 eixos do topo da peça não foi evidente nenhuma melhoria.

A totalidade dos desvios neste 2º modelo é visível no relatório obtido no InspectPlus, presente no anexo F.

3.2.6 Masterização Manual

À data em que este passo foi realizado ainda não tinha sido disponibilizado o *software* MotocalV EG pela Yaskawa Europa, sendo que o objetivo deste seria simular manualmente o processo de masterização realizado pelo sistema Zeroing também deste fabricante. Este processo consistiu no alinhamento dos eixos através da técnica de cavilha, onde estes foram alinhados para a sua posição de pré-masterização, como são visíveis nas figuras 45 e 46 2 dos alinhamentos realizados. Após realizados os alinhamentos de pré-masterização em todos os eixos, foi definido a nova posição absoluta do robô no *software* do controlador DX-100 como demonstrado na figura 44. procedeu-se a nova calibração da ferramenta igual às realizadas anteriormente, e preparada nova maquinação.



Figura 44. Exemplo de alinhamento dos eixos do robô na posição de pré-masterização.



Figura 45. Exemplo de alinhamento dos eixos do robô na posição de pré-masterização.

HOME POSITIONING		ABSOLUTE DATA
SELECT		
R1 :S	☒	1166
L	☐	-789
U	☐	1576
R	☐	8566
B	☐	160846
T	☐	-79639

Figura 46. Novos dados de posição absoluta do robô inseridos no controlador DX-100.

3.2.7 Maquinação e análise do 3º modelo

Verificadas todas as condições de maquinação idênticas às anteriores e definido novo sistema de coordenadas, esta foi iniciada com os mesmos percursos de maquinação anteriores.

A maquinação a 3 eixos da superfície e desbaste lateral foram efetuados sem qualquer percalço, mas quando foi iniciada a maquinação a 3 + 2 eixos, o robô iniciou a maquinação distanciada da peça em cerca de 15 milímetros na face 1. Interrompido o processo foi iniciada a maquinação da face 2, sendo que esta também se encontrou distanciada em cerca de 6 mm. Para efeitos de teste, foi iniciado o percurso de maquinação da face 3, tendo sido de imediato cancelado pois foi evidente que a ferramenta iria colidir com o bloco.

Face este problema, foi decidido restaurar as configurações anteriores de posição absoluta do robô e procurar novas soluções de calibração.

3.2.8 Masterização e calibração com *software* MotocalV EG 2019

Próximo do limite de conclusão do tempo para a finalização e entrega deste trabalho, foi disponibilizado pela Yaskawa Europa o *software* MotocalV EG 2019, assim como efetuado novo contato da parte dos representantes nacionais da marca para a realização de uma formação em calibração destes equipamentos, utilizando este mesmo *software*.

Após realizada a formação, onde foi possível questionar e debater algumas dúvidas existentes em relação a estes equipamentos, foi disponibilizado para a calibração do robô do centro a ferramenta física de 5 ponteiros demonstrada no tópico 2.2.4.2 deste trabalho, evitando assim a necessidade de fabricar uma para este teste de maquinação.

Foi assim realizada nova calibração, esta compreendida por uma masterização e calibração cinemática e de ferramenta numa só operação, esta já descrita no mesmo tópico já referido.

Após este processo foram obtidos novos dados de calibração a inserir no controlador do robô, podendo ser comparados os dados iniciais e finais de posição absoluta do robô, configuração de ferramenta e o desvio estimado na figura 47.

ABSO Data								
	S	L	U	R	B	T	C	W
Old:	1093	-84	1675	8566	160591	-79628	0	0
New:	1093	-975	1747	9058	160797	-79272	0	0

TOOL Data						
	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Rx(deg)	Ry(deg)	Rz(deg)
Old:	-543,665	4,972	248,459	0,0	0,0	0,0
New:	-543,913	4,973	250,020	0,0	0,0	0,0

Average Error (Theoretical Result by Calibration)

Before: 2,107 (mm)  After: 0,380 (mm)

Figura 47. Dados obtidos na calibração com recurso ao software MotocalV EG 2019

Como é visível, o desvio estimado foi reduzido de 2,107 mm para 0,380 mm, redução substancial após a primeira calibração utilizando este *software*. Foram realizadas mais duas calibrações utilizando este *software* com o intuito de reduzir o desvio estimado, mas em nenhuma das duas este foi melhorado, acabando por se utilizar no processo de maquinação do 4º modelo os dados obtidos no *software* aquando da primeira calibração.

3.2.9 Maquinação e análise do 4º modelo

Criadas a condições semelhantes às maquinações anteriores, iniciou-se a maquinação do 4º modelo. Desta vez, o alinhamento do robô com a peça na maquinação em 3 + 2 eixos foi perfeito, iniciando a maquinação à distância programada.

Finalizada a maquinação, foi medido o modelo maquinado, desta vez recorrendo ao braço de medição FaroArm® Fusion em conjunto com o *software* PowerInspect® Ultimate 2020, pois ambos os equipamentos de digitalização disponíveis no centro foram enviados para aferição e reparações. A análise com recurso a este *software* foi mais demorada, mas com menor erro podendo ser analisados em melhor detalhe os dados obtidos. Estes dados encontram-se representados na tabela 6. Tendo sido efetuada a medição em comparação direta com o CAD utilizando este sistema, o alinhamento do modelo real com o virtual foi efetuado por melhor ajuste por pontos retirados nas 5 superfícies maquinadas do modelo. Tendo em conta isto, é mais correto assumir e analisar o valor médio dos desvios de cada face comparativamente com os valores máximos referidos anteriormente, podendo na mesma estes valores serem consultados no relatório gerado no *software* PowerInspect® Ultimate 2020 presente no anexo F.

Tabela 6. Desvios médios nas diferentes faces do 4º modelo maquinado.

Face Maquinada	Desvio médio (mm)
Topo	0,329
Face 1	0,560
Face 2	0,227
Face 3	0,415
Face 4	0,236

Como pode ser analisado, o desvio médio apresenta um valor máximo de 0,560 mm, sendo superior a um fator de 10 quando comparado à primeira calibração. É evidente a melhoria da precisão de maquinação recorrendo a este processo de calibração utilizando o equipamento e *software* disponibilizado pela Yaskawa.

3.3 Análise da repetibilidade do robô Yaskawa Motoman ES-165D

De forma a melhor determinar a qualidade da calibração efetuada e o desempenho do robô, foi decidido realizar uma série de testes de repetibilidade em variadas condições. Para isso, foi desenvolvido e programado no computador um percurso a ser efetuado pelo robô, com movimentos osciloscópicos, rotações de todos os eixos e em todas as direções, terminando sempre este no mesmo local. Foram também desenvolvidos dois novos ciclos de aquecimento do robô, um incluindo o movimento do 7 eixo, melhorado em relação ao utilizado até ao momento, de forma a que todos os elementos do robô sejam movimentados durante este percurso. Para este teste foi maquinado um tubo com rosca interior M4, de forma a ser possível apertar o suporte de calibração de ponteiros do braço de medição, obtendo o sistema demonstrado na figura 48.

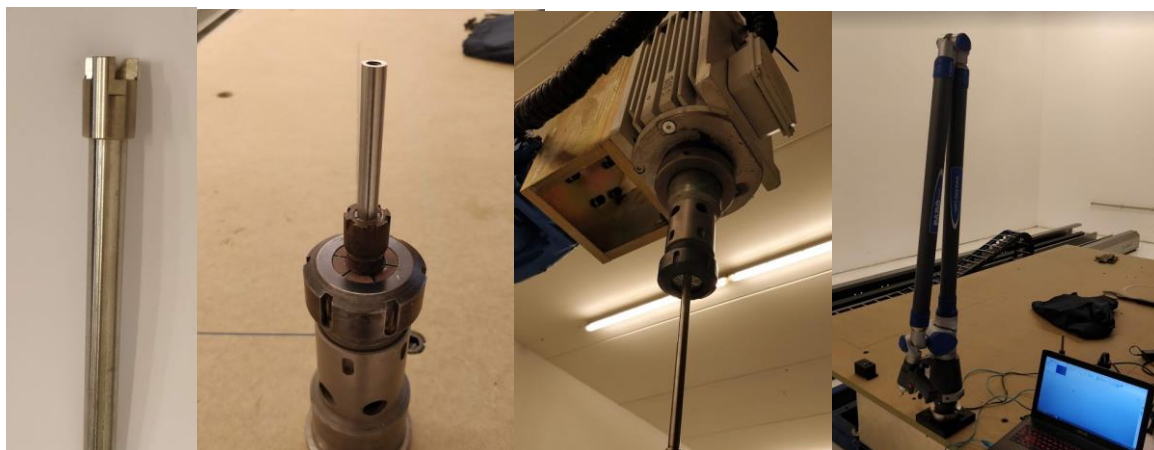


Figura 48. Sistema desenvolvido para análise de repetibilidade do robô Yaskawa Motoman ES-165D.

Estando este aplicado no robô e o braço de faro corretamente suportado na base de forma a conseguir retirar a medição no ponto inicial definido, foi possível realizar os testes de repetibilidade. As variáveis definidas neste teste foram a temperatura a que se encontra o robô a operar, iniciando com ele à temperatura ambiente após 12 horas parado, e realizados vários ciclos de aquecimento de forma a determinar a variação desvios provocada pelo aquecimento deste, e a segunda variável o tempo de operação, realizando medições em incrementos de 5 ciclos por cada medição, até ao total de 25 ciclos, sendo que estes possuem um tempo de operação de 3 minutos cada. Os procedimentos em detalhe e os dados obtidos são apresentados seguidamente.

3.3.1 Análise de repetibilidade com aquecimento

Como referido, esta análise foi iniciada com o robô à temperatura ambiente, 15°C ± 1 , colocado o mesmo na posição referência e realizado 1 ciclo de aquecimento seguido do percurso de teste de repetibilidade desenvolvido. Após este terminar, foi retirada a posição do ponto e realizados 2 novos ciclos de aquecimento do robô e novo percurso de teste. Foi feito o mesmo procedimento para 1 ciclo de aquecimento do robô e carril e para 25 ciclos de aquecimento do robô e carril.

Os dados obtidos são apresentados de seguida sob a forma de gráfico para cada eixo de coordenadas e na tabela 7 a relação entre os gráficos e os percursos realizados.

Tabela 7. Relação de nomenclatura do tipo de percurso no texto e nos gráficos.

Tipo de percurso	Identificação nos gráficos
Teste sem aquecimento	1
1 ciclo de aquecimento do robô	2
2 ciclos de aquecimento do robô	3
1 ciclo de aquecimento do robô + carril	4
25 ciclos de aquecimento do robô + carril	5

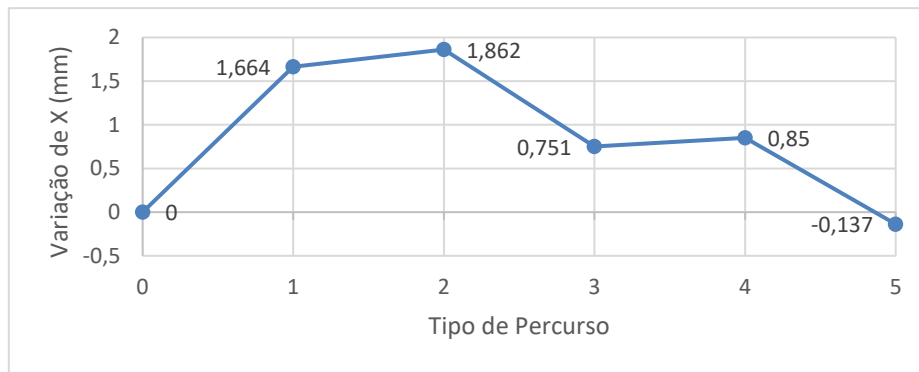


Figura 49. Valores de desvio no eixo X nas diferentes medições.

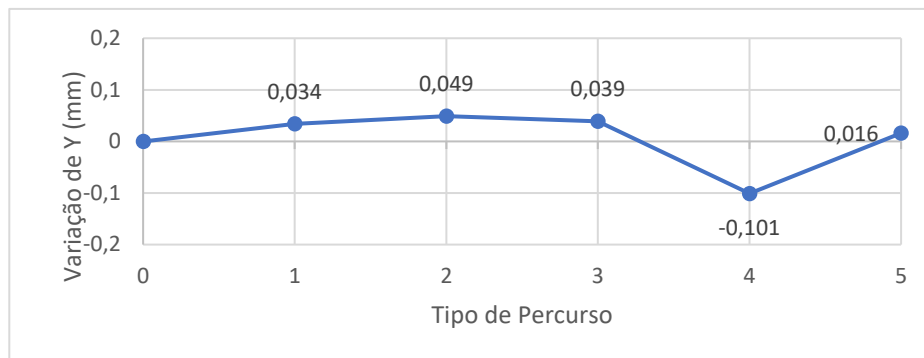


Figura 50. Valores de desvio no eixo Y nas diferentes medições.

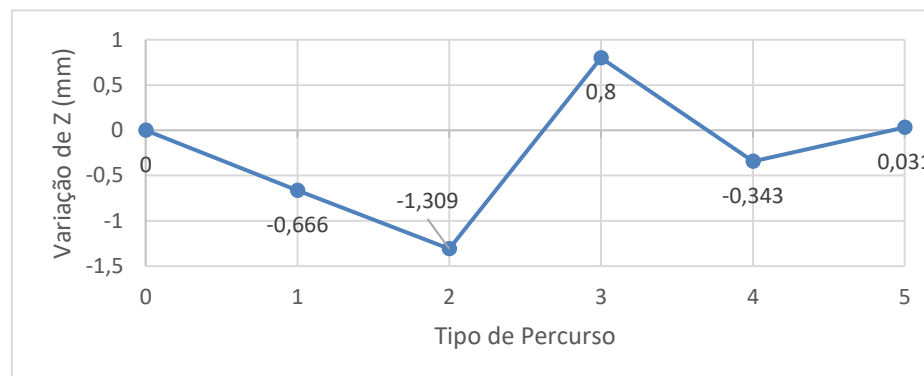


Figura 51. Valores de desvio no eixo Z nas diferentes medições.

Através da análise dos gráficos anteriores, podemos ver que a tendência dos desvios nos 3 eixos X, Y, Z é diminuir à medida que o robô e o carril são aquecidos desde a temperatura ambiente até à temperatura de operação. Através da análise dos dados obtidos, o desvio máximo registado com o robô à temperatura normal de operação foi 0,137 mm no eixo X, abaixo do valor referência de 0,2 mm indicado como limite máximo pelo fabricante do robô.

3.3.2 Análise de repetibilidade com incremento de ciclos

Para melhor determinar as capacidades de repetibilidade do robô ao longo do tempo de operação, foram realizados testes com este à temperatura de operação, utilizando os ciclos desenvolvidos mencionados anteriormente, e realizando incrementos de 5 ciclos até perfazer 25 ciclos, um tempo total de operação de aproximadamente 2h25 minutos. Os desvios nos 3 eixos foram medidos e apresentados nos gráficos seguintes.

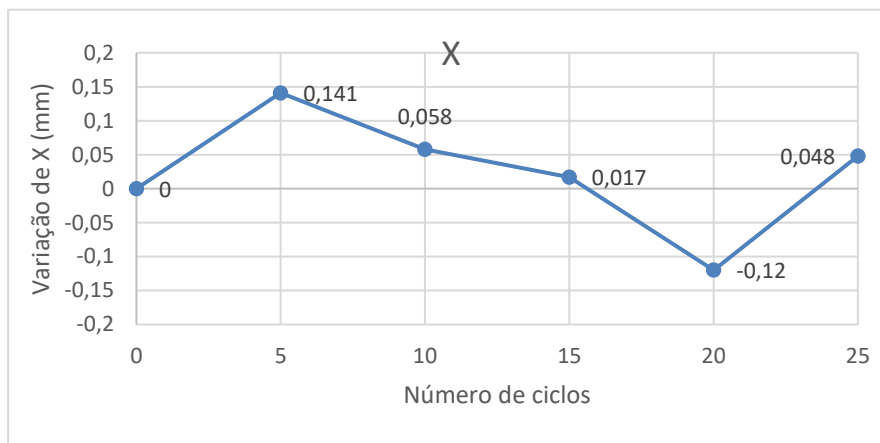


Figura 52. Valores de desvio no eixo X nas diferentes medições.

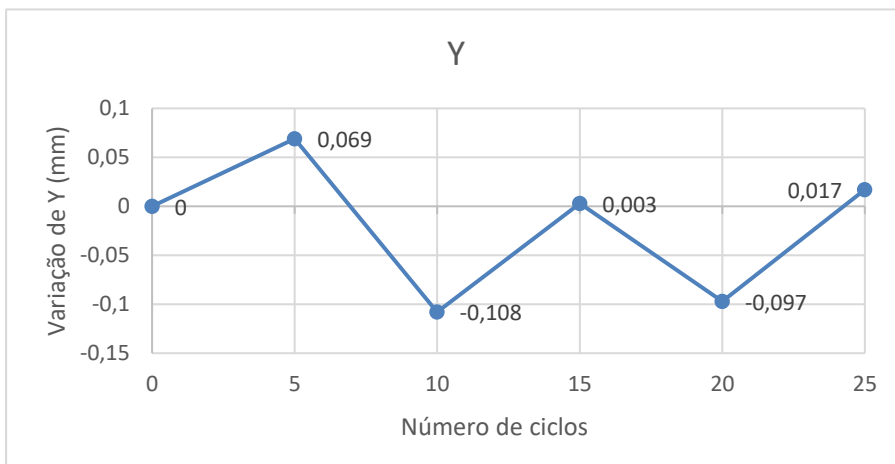


Figura 53. Valores de desvio no eixo Y nas diferentes medições.

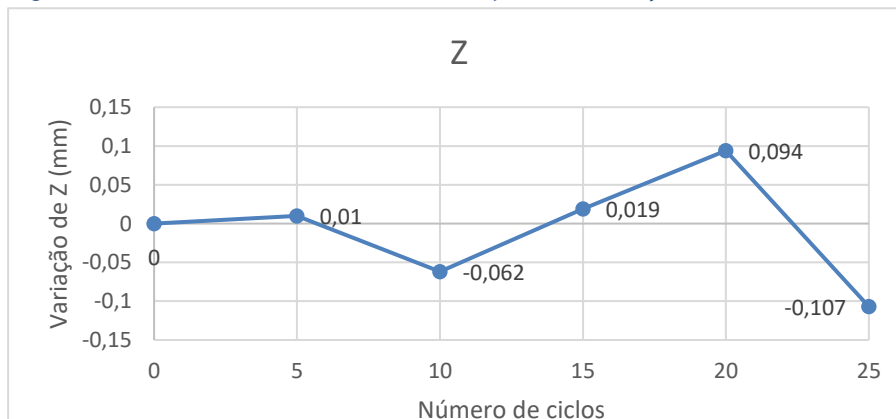


Figura 54. Valores de desvio no eixo Z nas diferentes medições.

Através da análise dos gráficos anteriores, é possível concluir que a repetibilidade deste robô não é afetada com o tempo de operação de trabalho quando se encontra à temperatura normal de trabalho.

Tendo sido estes dados obtidos a uma temperatura semelhante, podemos realizar um cálculo do desvio médio e a capacidade de repetibilidade do robô nesta gama de operação. Os dados e método utilizados estão descritos na tabela 8.

Tabela 8. Cálculo da repetibilidade média do robô.

Elemento de TCP	Diferença entre valor mínimo e máximo (mm)
TCP_x	0,124
TCP_y	0,105
TCP_z	0,097
$\sqrt{TCP_x^2 + TCP_y^2 + TCP_z^2}$	0,189

Pode ser então concluído, que, ao longo do aquecimento do robô, o erro de repetibilidade deste vai diminuindo, e quando quente, o valor de desvio obtido foi de 0,189 mm dentro do valor referência do fabricante de 0,2 mm.

3.4 Teste do *plugin* de cálculo de TCP do Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020

No *software* Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020, assim como em versões anteriores do mesmo, existe um *plugin* que ajuda ao cálculo de TCP da ferramenta através do input de alguns dados obtidos através de operações realizadas no robô. Esta funcionalidade é bastante útil para robôs utilizados em maquinação, nomeadamente no CEiiA, onde a troca de ferramenta é bastante usual, consoante a densidade do material e dimensão da peça a maquinar.

No início do trabalho, um dos problemas reportados pelo operador do robô foi o erro deste não ser estimável, sendo diferente consoante a ferramenta aplicada, mesmo utilizando a mesma fresa apenas aplicada em alturas diferentes.

O modo como este *plugin* opera é através da inserção de dados obtidos com a calibração de 2 ponteiros utilizando a função de calibração de ferramentas do próprio robô, uma com dimensão superior à maior a ser utilizada no robô e uma menor que a mais pequena. Este procedimento deve ser realizado 3 vezes para cada ponteira, de forma a

realizar uma média, tal como é exemplo na figura 55, que representa a janela de configuração desta ferramenta. Como se pode ver na mesma figura, foi indicado as dimensões das ponteiros e as respetivas coordenadas X, Y, Z, do TCP de cada uma destas, calculadas utilizando o *software* MotocalV EG, e seguindo o procedimento indicado no tópico 2.2.4.1.

Calibração de eixo

Apalpador curto

Compr. ☒ 216.58

	X	Y	Z
Ensinar 1	-404.416	3.771	250.315
Ensinar 2	-404.54	3.762	250.095
Ensinar 3	-404.307	3.989	250.056
Medição média	-404.421	3.841	250.155

Erro médio (mm): 0.18

Apalpador longo

Compr. ☒ 355.52

	X	Y	Z
Ensinar 1	-543.788	4.973	250.019
Ensinar 2	-543.649	5.181	250.465
Ensinar 3	-543.837	4.811	250.325
Medição média	-543.758	4.988	250.27

Erro médio (mm): 0.25

Orientação plano trab. ferr.

Definir eixo X ☐ Definir eixo Y ☒ XY ☐ YZ ☒ ZX ☐ Inverter ☒

Direção eixo Y plano trab. ferr. (no plano de trabalho 6º eixo do robô) ☐ Outro ☐ I ☐ J ☐ K

Definição de ponto de fixação do cabeçote

<head_attach_point PART="head" X="1984.978" Y="-2.058" Z="1211.951" I="-0.000821" J="0.008236" K="0.999966" U="1" V="0" W="0.000821" />

Nome: Calibração CEiiA 13012020 MotocalV

Informação de eixo

	I	J	K
Vetor de eixo ferramenta	0.999966	-0.008236	-0.000821
Vetor eixo X do plano de trabalho da ferramenta	0.000821	0	1
Pto fixação ferr.	X	Y	Z
	-188.049	2.058	249.978

Erro médio (mm): 0.201

Substituir informação de eixo ☐

Notas

Usar essa calibração de eixo por padrão ☒

Verificar Salvar Cancelar

Figura 55. Configuração do plugin de cálculo de TCP.

Inseridos estes dados, foi calibrada uma nova ponteira com uma altura de 217,48 mm, dentro da gama das anteriores, e obtidos os dados do TCP da mesma através da calibração direta no robô, figura 56. Estes dados foram então comparados com os obtidos no *plugin* para a mesma altura de ferramenta, figura 57.

TOOL

TOOL NO. : 2 / 64

NAME: PONTTESTE217.48

X	-403.773 mm	Rx	179.5280 deg.
Y	3.882 mm	Ry	-89.9530 deg.
Z	250.081 mm	Rz	0.0000 deg.

W: 65.135 kg

Xg	-8.962 mm	Ix	0.000 kg.m2
Yg	28.651 mm	Iy	0.000 kg.m2
Zg	216.959 mm	Iz	0.000 kg.m2

Figura 56. Coordenadas TCP gerados no controlador Dx100 após calibração da ponteira.

Calibração de ferramenta

Calibração de eixo

Calibração CEiiA 13012020 MotocalV

Selecionar ferramenta para carregar seu comprimento

Compr. ferramenta: 217.48 mm

Nº ferramenta: 0

Informação da ferramenta

	X	Y	Z
Coordenadas pta da ferr.	-405.522	3.85	250.156
Orientação plano trab. ferr.	Rx	Ry	Rz
	179.528	-89.953	0

Q1 Q2 Q3 Q4

Ferramenta ☐ Carregar para lista de parâmetro de

Figura 57. Coordenadas TCP geradas no Plugin com a indicação da dimensão da ferramenta.

Como pode ser observado nas figuras 56 e 57, existe uma diferença nas coordenadas calculadas pelo *plugin*, nos 3 eixos, em relação à real medida no robô. A diferença mais relevante é no eixo de coordenadas X, que no sistema de coordenadas TCP corresponde à altura da ferramenta, sendo esta diferença de 1,749 mm. Num processo de maquinação a 3 eixos, esta diferença não seria notória, pois a maquinação seria corretamente efetuada, apenas aproximadamente de 2 mm mais baixa que o previsto. Seria apenas evidente caso se pretende-se criar uma peça na face superior e inferior, neste caso a altura deste ficaria perto de 4 mm mais curta.

De forma a garantir que o erro seria oriundo mesmo do cálculo do *plugin* e não um fator de cálculo errado ou de compensação na programação do robô, foi realizado um último teste, desta vez apenas utilizando o método de calibração de ferramentas do robô. Este consistiu em montar no robô duas ponteiras com uma diferença exata de 50 mm, executar o procedimento de calibração para cada uma destas, e comparar os as coordenadas X do TCP de ambas. Esta comparação demonstrou uma diferença dos mesmo 50 mm nas coordenadas apresentadas no controlador do robô, levando a concluir que existe mesmo um erro no processamento do TCP através do comprimento de ferramenta no *plugin* existente para este mesmo efeito no *software* Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020. Não foi possível durante este trabalho analisar a causa exata deste desvio, sendo a solução provisória encontrada a realização da calibração de ferramenta com o próprio robô ou via *software* MotocalV EG 2019.

4 Considerações Finais

Na presente dissertação, foi atingido com sucesso o objetivo de desenvolvimento de uma metodologia, baseada num conjunto de operações de calibração, capaz de melhorar a precisão de uma célula robótica de 6 ou mais eixos.

Durante este trabalho, realizado no robô antropomórfico Yaskawa Motoman ES-165D aplicado no carril modelo TSL 2000 do mesmo fabricante disponíveis no CEiiA, foi possível aplicar um conjunto de procedimentos que permitiu melhorar a sua precisão em operações de maquinação de materiais macios assim como garantir a sua repetibilidade de acordo com os valores indicados pelo fabricante. Mais concretamente, a precisão de maquinação foi melhorada num fator superior a 10, tendo sido reduzida de 5,960 mm para 0.560 mm e confirmado que a repetibilidade do robô, de 0,189 mm, se encontra dentro dos valores referência do fabricante, 0,2 mm.

O conjunto de resultados obtidos ao longo da realização da componente prática leva a concluir que, dos processos realizados, a combinação das seguintes operações de calibração deverão formar a metodologia de calibração de uma célula robótica Yaskawa Motoman de 6 ou mais eixos pela mesma ordem apresentada:

- Calibração da planeza da unidade de transferência;
- Masterização e calibração cinemática do robô recorrendo ao *software* Yaskawa Motoman MotocalV EG;
- Calibração da ferramenta com recurso ao mesmo *software* mencionado.

Ao longo da realização deste trabalho foi também evidente a falta de conhecimento e prática por parte dos variados integradores de células robóticas sobre as necessidades específicas de calibração deste tipo de equipamento que trabalha com recurso a programação *off-line* e não apenas *teach & learn*. Para robôs que operam nestas condições, o erro pode ser gerado, por exemplo, pela imprecisa leitura do movimento no *encoder*. Ao contrário de outras máquinas, os robôs não possuem uma função zero máquina, sendo que os erros são acumulados ao longo do tempo de operação do robô. Podemos concluir então que este não é um problema presente unicamente neste centro de engenharia, mas sim transversal a todos os centros tecnológicos e empresas a operar nas mais diversas indústrias que utilizem células robóticas com recurso a programação *off-line*.

Pode ser também concluído que os robôs antropomórficos necessitam de calibrações periódicas de forma a mitigar os erros em maquinação.

5 Recomendações Futuras

Como nota final neste trabalho, podem ser apresentadas algumas sugestões e recomendações futuras, podendo estas ser aplicadas por utilizadores de diferentes modelos de células robóticas de 6 ou mais eixos bem como pelos seus integradores.

Como referido, é elevada a necessidade de especial cuidado e melhor definição de planeamentos de intervenções de calibração deste tipo de equipamentos, devendo este ser realizado e melhor definido no futuro com base nos seguintes fatores:

- Número e severidade de colisões do robô;
- A cada operação de troca de ferramenta;

- Após determinado número de horas de operação do robô;
- Mau desempenho obtido na realização de testes de repetibilidade e precisão do robô;

Todos os fatores elencados podem ser facilmente implementados por cada uma das entidades mencionadas, melhorando assim o desempenho da célula robótica nas operações para o qual é destinado. No caso das colisões, troca de ferramenta e horas de operação, este planejamento pode ser diretamente definido e posto em prática pois estes aspetos são controlados pelo operador do robô. A criação de uma nova norma para testes de repetibilidade e precisão para células robóticas no geral e em específicos para aquelas que operam de forma programada *off-line*, pode permitir a realização de testes em intervalos curtos de tempo, de forma fácil e eficaz.

Sugere-se ainda a revisão do *Plugin* de calibração de ferramenta presente no *software Autodesk® PowerMill® Ultimate 2020*, tendo sido observado neste trabalho uma falha na correta definição das coordenadas TCP, parte essencial para precisão em operações programadas *off-line*.

6 Bibliografia

- [1] “International Federation of Robotics - ISO 8373 2013: Robots and robotic devices – Vocabulary” [Online]. Available at: <https://www.iso.org/standard/55890.html>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [2] “RSA - The Age of Automation: Artificial intelligence, robotics and the future of low-skilled work” [Online]. Available at: <https://www.thersa.org/discover/publications-and-articles/reports/the-age-of-automation>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [3] Iglesias, I., Sebastián, M. A., Ares, J.E.. “Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential”. *Procedia Engineering*, vol. 132, pp. 911-917, 2015.
- [4] “International Federation of Robotics - World Robotics Report for 2018” [Online]. Available at: <https://ifr.org/free-downloads>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [5] “PwC - Industrial Manufacturing Trends 2019” [Online]. Available at: <https://www.pwc.com/gx/en/ceo-survey/2019/Theme-assets/reports/industrial-manufacturing-trends-report-2019.pdf>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [6] “International Federation of Robotics - Foreword By: Dr. Andreas Bauer, Chairman IFR Industrial Robot Suppliers Committee” [Online]. Available at: <https://ifr.org/free-downloads>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [7] “International Federation of Robotics - Executive Summary World Robotics 2019 Industrial Robots” [Online]. Available at: <https://ifr.org/free-downloads>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [8] “Technavio - Global Articulated Robots Market - Size, Growth, Trends, and Forecast for 2019-2023” [Online]. Available at: <https://www.technavio.com/report/global-articulated-robots-market-industry-analysis>. [Last accessed: 10-Jan-2020].

- [18] Daher, M., Donelan, P.. “Invariant Properties of the Denavit-Hartenberg Parameters”. Interdisciplinary Applications of Kinematics, Mechanisms and Machine Science, Springer Int. Pub., vol 26, pp 43- 51, 2015.
- [19] Hongyi, L.. “Environment for Industrial Robot Performance Evaluation” Master’s Thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [20] Hallenberg, Johan “Robot Tool Center Point Calibration using Computer Vision” Master’s Thesis, Linköping University, 2007.
- [21] Nikon “Robot Accuracy: Considerations to make when using robots in high accuracy applications and programming robots off-line” [Online]. Available at: <https://us.v-cdn.net/6027406/uploads/editor/1v/3p4g3t9rl01s.pdf>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [22] “Understanding CNC Machine Accuracy and Repeatability” [Online]. Available at: <https://www.mmsonline.com/articles/understanding-cnc-machine-accuracy-and-repeatability>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [23] “Can a Robot Outperform a CNC Machine for Robot Machining?” [Online]. Available at: [24] <https://robodk.com/blog/robot-machining-vs-cnc/>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [25] Belotti- Cnc machining centers [Online]. Available at: <http://www.belotti.com/en/index.aspx>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [26] Bermaq - Cnc machines [Online]. Available at: <https://www.bermaq.com/en/machines/milling-machines/>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [27] Matec - Gantry machines [Online]. Available at: <https://www.matec.de/en/Machining-Centers/Portalmaschinen>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [28] Cms - Advanced materials technology [Online]. Available at: <https://www.scmgroup.com/en/cmsadvancedmaterials/products/composite-material-aluminium-and-advanced-material-working-systems.c12350/high-speed-5-axis-cnc-machining-centres.12351>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [29] “Guide to linear robot transfer units” [Online]. Available at: <https://resources.lazerc.com/guide-to-robot-transfer-units-rtu>. [Last accessed: 10-Jan-2020].

- [30] “Robot-transfer unit (RTU) and other linear-transfer system considerations” [Online]. Available at: <https://www.linearmotiontips.com/robot-transfer-unit-rtu-linear-transfer-system-considerations/>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [31] Roth, Z. S., Ravani, B.. “An Overview of Robot Calibration”, Information technology Journal, vol 3, pp. 74-78, 2004.
- [32] Judd, R.P., Knasinski, A.B. “A technique to calibrate industrial robots with experimental verification”, IEEE Trans. Robotics Automation, vol 6, pp. 20-30, 1990.
- [33] Instructions manual Yaskawa Motoman ES-165D [Online]. Available at: <https://www.manualslib.com/manual/1270044/Yaskawa-Motoman-Es165d.html>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [34] Mako, P. “Principles of Mastering at KUKA Robots” International Scientific Journal about Mechatronics, vol 2, pp. 7-12, 2017.
- [35] ABB Pendulum Calibration tool [Online]. Available at: <https://new.abb.com/products/3HAC15716-1/cal-pendulum>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [36] KUKA Industrial Robots [Online]. Available at: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [37] Manual MotocalV EG [Online]. Available at: <https://www.motoman.com/getmedia/5076CDB0-0677-4DB7-9C2E-6F3D2F9CEAC4/152646-1cd.pdf.aspx?ext=.pdf>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [38] Wiest AG - LaserLAB [Online]. Available at: <https://www.wiest-ag.de/en/laserlab.html>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [39] Zis-Cutting - ZIS Robot Calibration Unit [Online]. Available at: <https://www.zis-cutting.de/en/machine-components/robot-calibration-unit/>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [40] Leoni advintec TCP [Online]. Available at: <https://www.leoni-factory-automation.com/en/products-and-services/calibration-of-robotic-tools-fixtures/>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [41] RoboDk- Simulation and Programming [Online]. Available at: <https://robodk.com/>. [Last accessed: 10-Jan-2020].

- [42] ISO 9283:1998 Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods [Online]. Available at: <https://www.iso.org/standard/22244.html>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [43] Kunicakova, D., Tlach, V., Cisar, M. “Testing the Performance Characteristics of Manipulating Industrial Robots”, Transactions of the VSB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series, vol 62, pp. 39-50, 2016.
- [44] Styrotec km 2 Spindle [Online]. Available at: <https://www.styrotec.de/en/zubehoer/styropor-hohlfraesspindeln/>. [Last Accessed: 10-Jan-2020].
- [45] Yaskawa TSL 2000 Track [Online]. Available at: <https://www.roboplan.pt/en/products/positioners/yaskawa-motoman-linear-track-tsl-tsl>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [46] Yaskawa Dx100 Controller [Online]. Available at: <https://www.yaskawa.eu.com/en/products/robotics/controller/>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [47] Autodesk Software Products [Online]. Available at: <https://www.autodesk.com/products>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [48] InspectPlus Software [Online]. Available at: <https://optotechnik.zeiss.com/pt/108-pt/produkte/software/inspectplus>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [49] Gom Inspect 2019 Software [Online]. Available at: <https://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>. [Last accessed: 10-Jan-2020]
- [50] Yaskawa Software - Motosim EG [Online]. Available at: <https://www.yaskawa.eu.com/en/products/robotics/software/offline-tools/>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [51] Optotechnik.zeiss [Online]. Available at: <https://optotechnik.zeiss.com/en/?Itemid=>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [52] Metronor Solo [Online]. Available at: <https://www.metronor.com/industrial/products/solo/>. [Last accessed: 10-Jan-2020].
- [53] Technical Specification Sheet for the Faro Fusion [Online]. Available: https://knowledge.faro.com/Hardware/Legacy-Hardware/Legacy_USB_FaroArm-

ScanArm/Technical_Specification_Sheet_for_the_Fusion. [Last accessed: 10-Jan-2020].

[54] SIKABLOCK® M700 [Online]. Available at: https://advanced-resins.sika.com/content/sikaaxson/main/en/solutions_products/product-groups/block-materials/model-and-tooling-boards/sikablock-m700.html. [Last accessed: 10-Jan-2020].

7 Anexos

Anexo A - resumo dos passos de forma a desenvolver a equação e adaptar a um qualquer manipulador do tipo antropomórfico

3.2.3 Summary

We may summarize the above procedure based on the D-H convention in the following algorithm for deriving the forward kinematics for any manipulator.

Step 1: Locate and label the joint axes $z_0, \dots, z_{n-1}$.

Step 2: Establish the base frame. Set the origin anywhere on the z_0 -axis. The x_0 and y_0 axes are chosen conveniently to form a right-hand frame. For $i = 1, \dots, n-1$, perform Steps 3 to 5.

Step 3: Locate the origin O_i where the common normal to z_i and z_{i-1} intersects z_i . If z_i intersects z_{i-1} locate O_i at this intersection. If z_i and z_{i-1} are parallel, locate O_i in any convenient position along z_i .

Step 4: Establish x_i along the common normal between z_{i-1} and z_i through O_i , or in the direction normal to the $z_{i-1} - z_i$ plane if z_{i-1} and z_i intersect.

Step 5: Establish y_i to complete a right-hand frame.

Step 6: Establish the end-effector frame $o_n x_n y_n z_n$. Assuming the n -th joint is revolute, set $z_n = \mathbf{a}$ along the direction z_{n-1} . Establish the origin O_n conveniently along z_n , preferably at the center of the gripper or at the tip of any tool that the manipulator may be carrying. Set $y_n = \mathbf{s}$ in the direction of the gripper closure and set $x_n = \mathbf{n}$ as $\mathbf{s} \times \mathbf{a}$. If the tool is not a simple gripper set x_n and y_n conveniently to form a right-hand frame.

Step 7: Create a table of link parameters $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$.

a_i = distance along x_i from O_i to the intersection of the x_i and z_{i-1} axes.

d_i = distance along z_{i-1} from O_{i-1} to the intersection of the x_i and z_{i-1} axes. d_i is variable if joint i is prismatic.

α_i = the angle between z_{i-1} and z_i measured about x_i (see Figure 3.3).

θ_i = the angle between x_{i-1} and x_i measured about z_{i-1} (see Figure 3.3). θ_i is variable if joint i is revolute.

Step 8: Form the homogeneous transformation matrices A_i by substituting the above parameters into (3.10).

Anexo B - Planeamento de inspeção e manutenção de um robô antropomórfico

ES165D

9 Maintenance and Inspection
9.1 Inspection Schedule

155976-1CD

56 of 92

Table 9-1: Inspection Items (Sheet 1 of 2)

Items ¹⁾	Schedule					Method	Operation	Inspection Charge		
	Daily	1000HCycle	6000HCycle	12000HCycle	24000H	36000H		Specified Personnel	Licensee	Service Company
1 Alignment mark	●					Visual	Check alignment mark accordance at the home position. Check for damage.	●	●	●
2 External lead	●					Visual	Check for damage and deterioration of leads.	●	●	●
3 Working area and manipulator	●					Visual	Clean the work area if dust or spatter is present. Check for damage and outside cracks.	●	●	●
4 Motors for L- and U-axes	●					Visual	Check for grease leakage. ²⁾	●	●	●
5 Baseplate mounting bolts		●				Spanner Wrench	Tighten loose bolts. Replace if necessary.	●	●	●
6 Cover mounting screws			●			Screwdriver, Wrench	Tighten loose bolts. Replace if necessary.	●	●	●
7 S-, L-, U-axes motor connector		●				Manual	Check for loose connectors and tighten if necessary.	●	●	●
8 Connector base				●		Manual	Check for loose connectors.	●	●	●
9 Balancer			●			Grease Gun	Supply grease. See Chap. section 9.3.5.	●	●	●
10 Wire harness in manipulator (SLU-axis wires) (RBT-axis wires)			●			Visual, Multimeter	Check for conduction between the main connector of base and intermediate connector with manually shaking the wires. Check for wear of protective spring. ³⁾	●	●	●
11 Battery pack in manipulator					●		Replace ⁴⁾ Replace the battery pack when the battery alarm occurs or the manipulator drove for 36000H.	●	●	●
12 S-axis speed reducer, S-axis gear			●			Grease Gun	Check for malfunction. (Replace if necessary.) Supply grease ⁵⁾ . (6000H cycle) See section 9.3.1. Replace grease ⁵⁾ . (12000H cycle) See section 9.3.1.	●	●	●
13 L-axis speed reducer,			●			Grease Gun	Check for malfunction. (Replace if necessary.) Supply grease ⁵⁾ . (6000H cycle) See section 9.3.2. Replace grease ⁵⁾ . (12000H cycle) See section 9.3.2.	●	●	●
14 U-axis speed reducer,			●			Grease Gun	Check for malfunction. (Replace if necessary.) Supply grease ⁵⁾ . (6000H cycle) See section 9.3.3. Replace grease ⁵⁾ . (12000H cycle) See section 9.3.3.	●	●	●

Table 9-1: Inspection Items (Sheet 2 of 2)

Items ¹⁾	Schedule	Method					Operation	Inspection Charge			
		Daily	1000HCycle	6000HCycle	12000HCycle	24000H		36000H	Specified Personnel	Licensee	Service Company
15 R-axis speed reducer				●	●			Grease Gun	Check for malfunction. (Replace if necessary.) Supply grease ⁵⁾ . (6000H cycle) See section 9.3.4. Replace grease ⁵⁾ . (12000H cycle) See section 9.3.4.	●	●
16 B- and T-axes speed reducer, B- and T-axes gear				●	●			Grease Gun	Check for malfunction. (Replace if necessary.) Supply grease ⁵⁾ . (6000H cycle) See section 9.3.4. Replace grease ⁵⁾ . (12000H cycle) See section 9.3.4.	●	●
17 Overhaul											●

1 Inspection No. correspond to the numbers in Fig. 9-1 "Inspection Items".

2 The occurrence of a grease leakage indicates the possibility that grease has seeped into the motor. This can cause a motor breakdown. Contact your YASKAWA representative.

3 When checking for conduction with multimeter, connect the battery to "BAT" and "OBT" of connectors on the motor side for each axis, and then remove connectors on detector side for each axis from the motor. Otherwise, the home position may be lost. (Refer to section 9.3.6 "Notes for Maintenance")

4 Wire harness in manipulator to be replaced at 24000H inspection.

5 For the grease, refer to Table 9-2 "Inspection Parts and Grease Used".

Fig. 9-1: Inspection Items

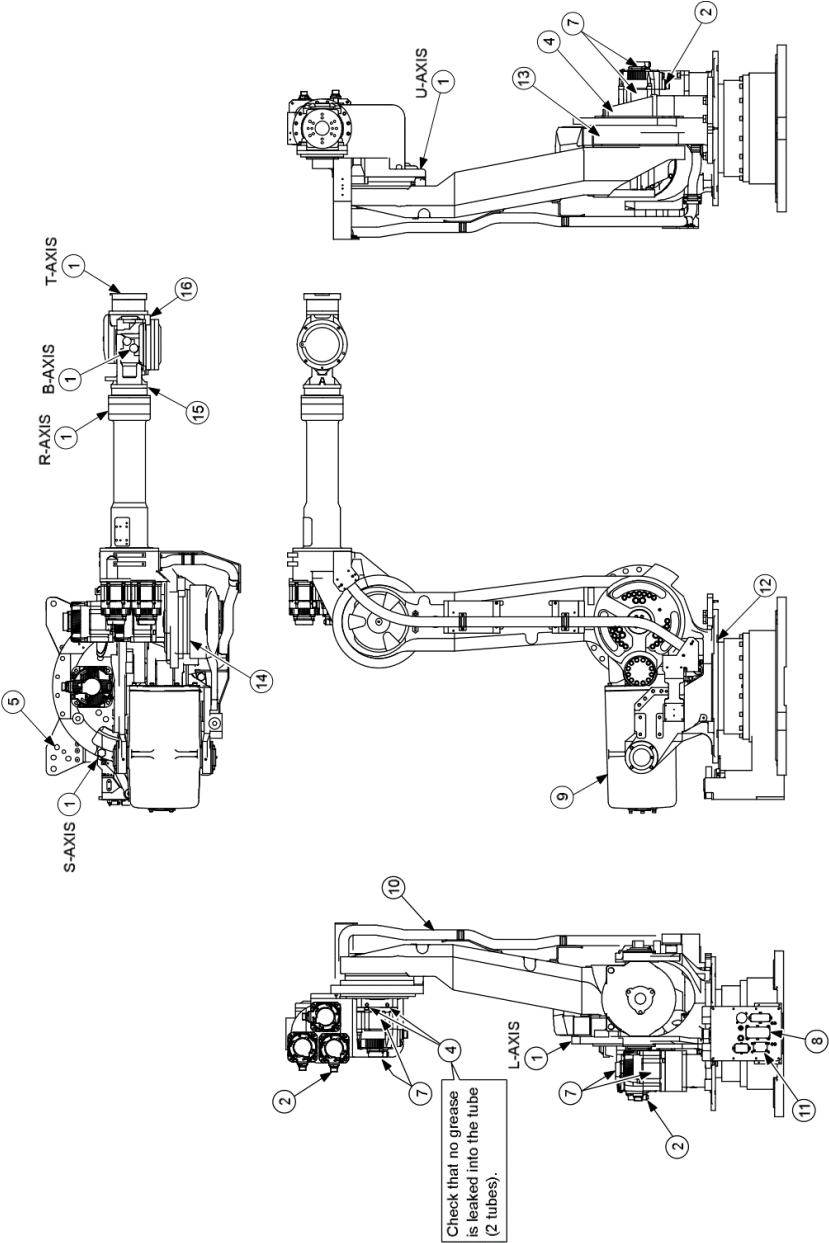
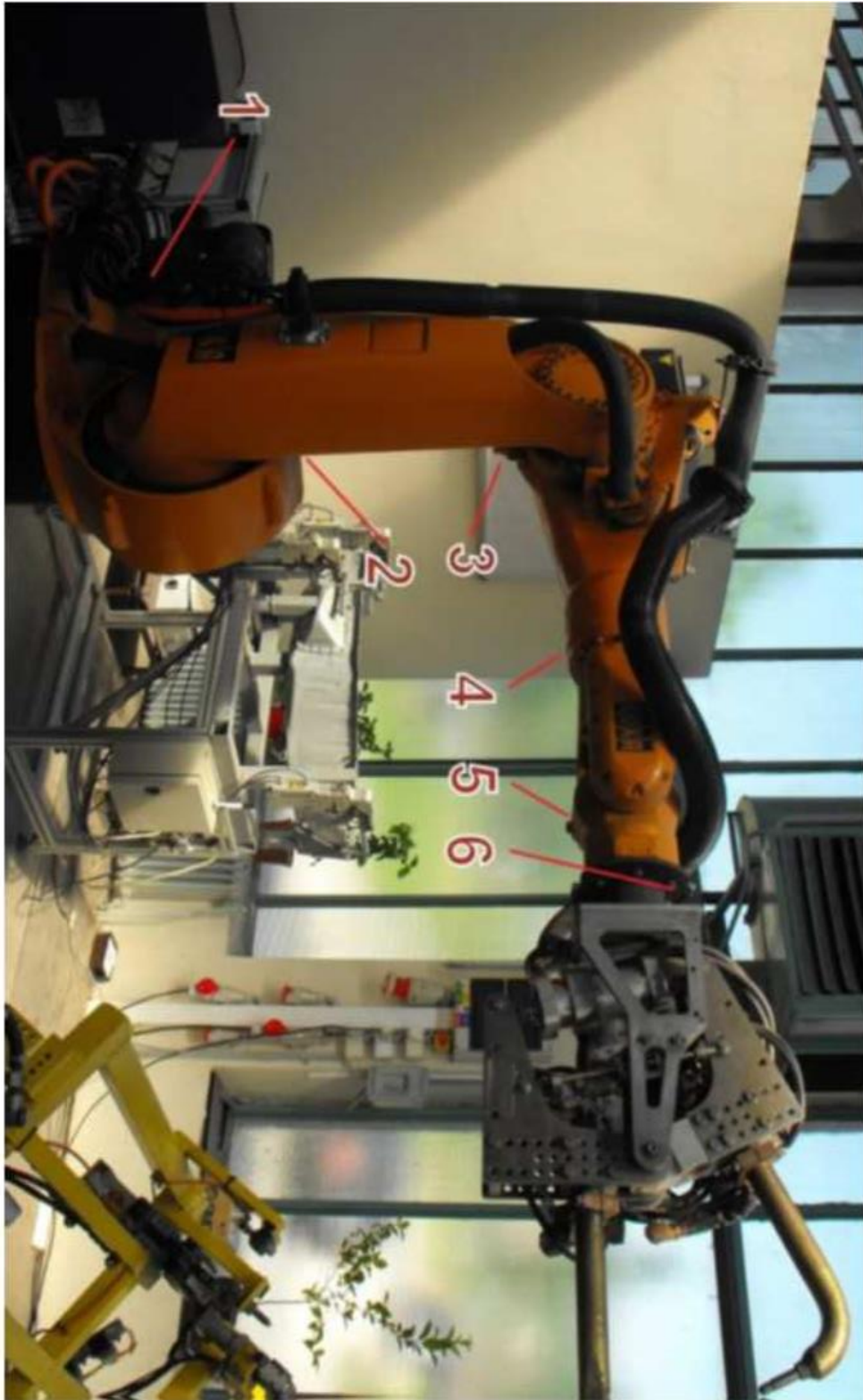


Table 9-2: Inspection Parts and Grease Used

No.	Grease Used	Inspected Parts
12, 13, 14, 15, 16	Molywhite RE No. 00	Speed Reducers for all Axes R-, B-, and T-Axes gears
9	Alvania EP Grease 2	L-Axis Balancer

The numbers in the above table correspond to the numbers in Table 9-1
"Inspection Items"

Anexo C - Exemplo de pontos de calibração de um robô antropomórfico.



Anexo D - Exemplo de ficheiro de trabalho para calibração com *software* MotocalV

NOP

MOVJ C0000 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0001 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0002 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0003 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0004 VJ=0.78 PL=0

*2

MOVJ C0005 VJ=0.78 PL=0

MOV.I C0006 V.I=0.78 PL=0

MOVJ C0003 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0007 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0008 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0009 VJ=0.78 PL=0

*2

3
 NOV 1999 10 11 2 50 PM '99

MOVJ C0010 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0011 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0012 VJ=0.78 PL=0

MOV L C0013 V/I=0.78 PL=0

MOVJ C0013 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0014 VJ=0.78 PL=0

*4

MOV LC0015 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0013 VJ=0.78 FL=0

MOVJ C0016 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0017 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0018 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0010 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0019 VJ=0.78 PL=0

*5

MOVJ C0020 VJ=0.78 PL=0

MOV LC0021 V.I.=0.78 PL=0

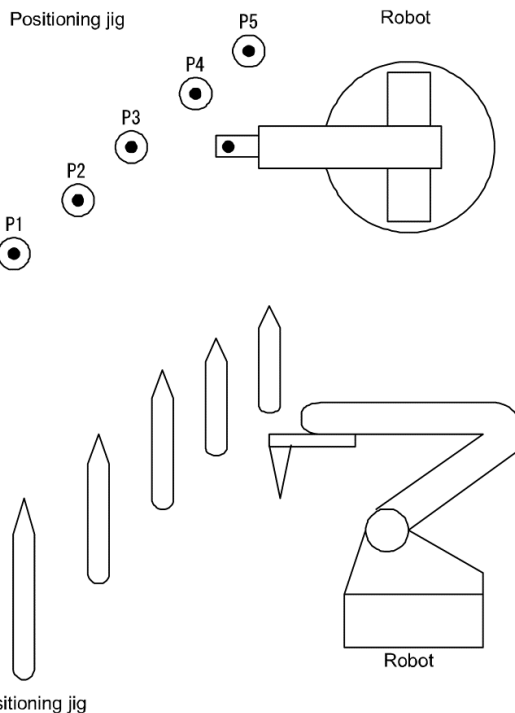
MOVJ C0021 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0022 VJ=0.78 PL=0

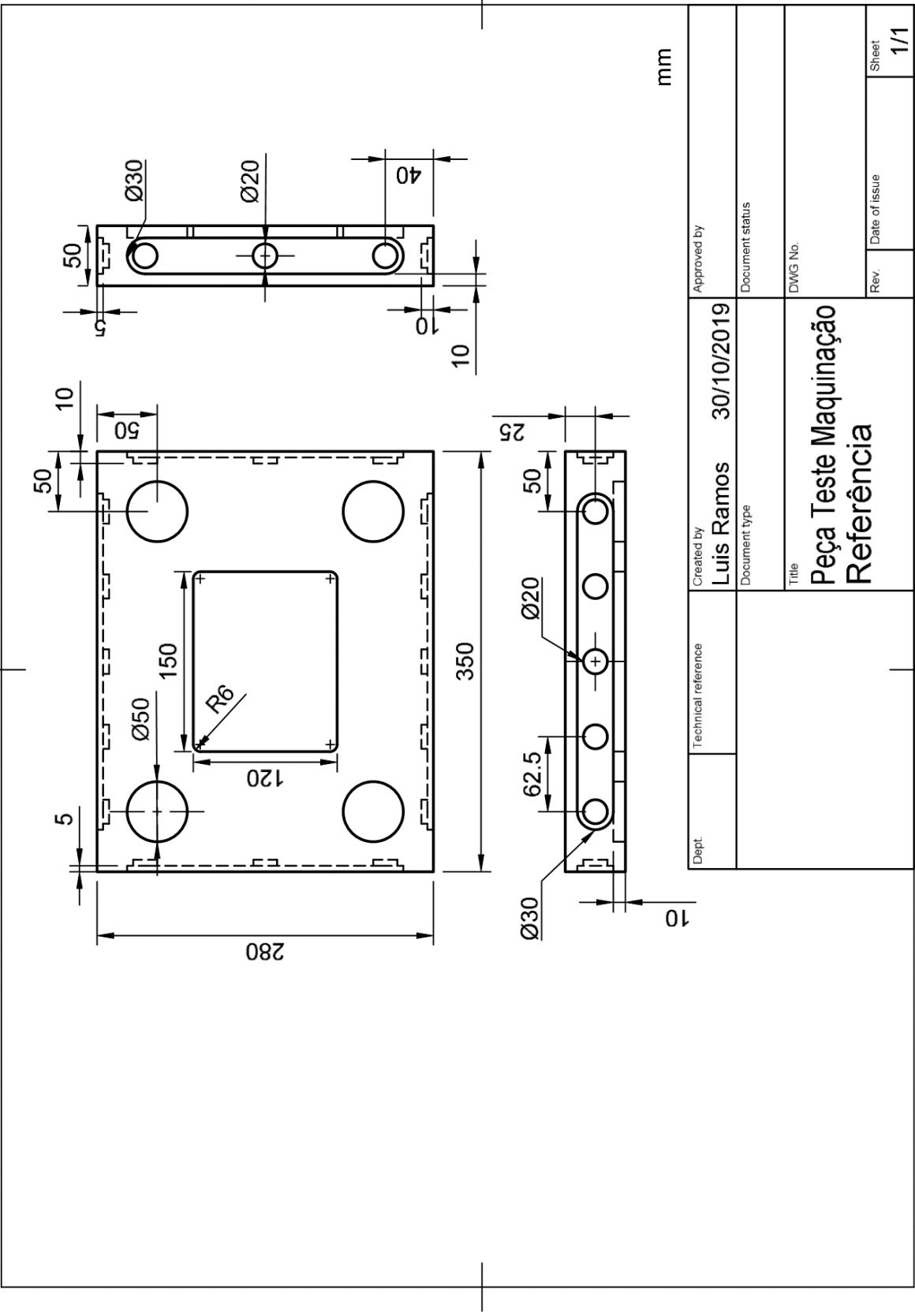
MOVJ C0023 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C0024 VJ=0.78 PL=0

END

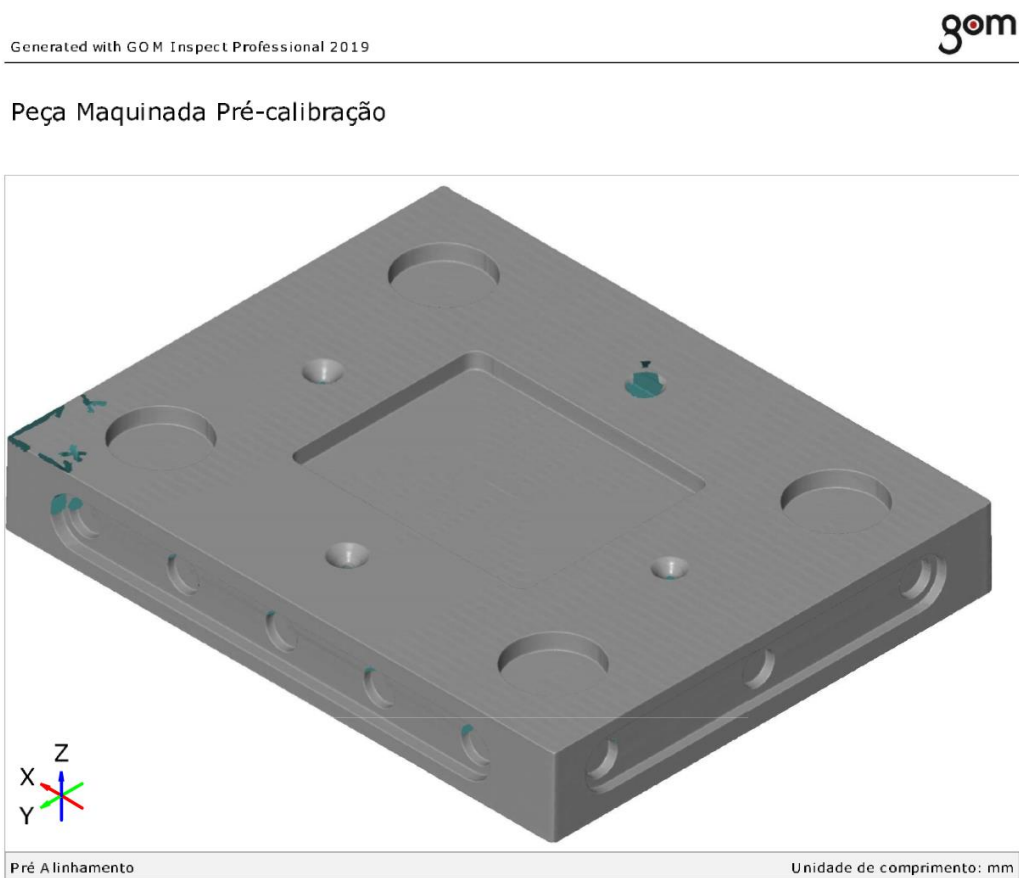


Anexo E - Desenho técnico do modelo a maquinar



Anexo F - Dados obtidos no software GOM Inspect 2019, InspectPlus e Autodesk® PowerInspect® 2020

Anexo F.1. Dado de medição do 1º modelo



Inspetor:

Empresa:

Departamento:

Localização:

Data: 04/11/2019

Projeto:

Peça:

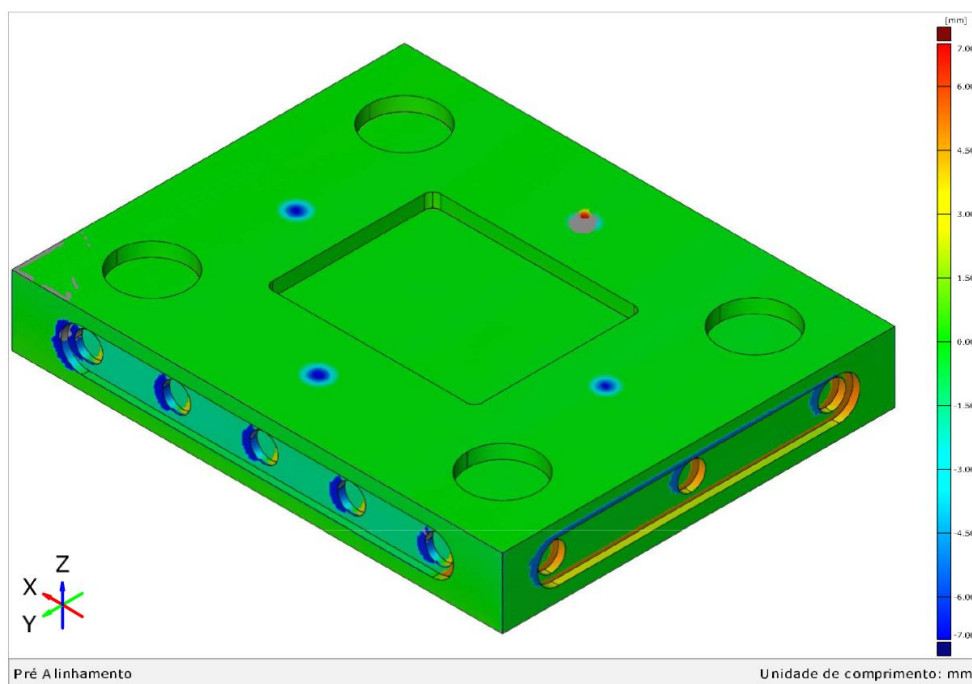
N. da peça:

Versão:

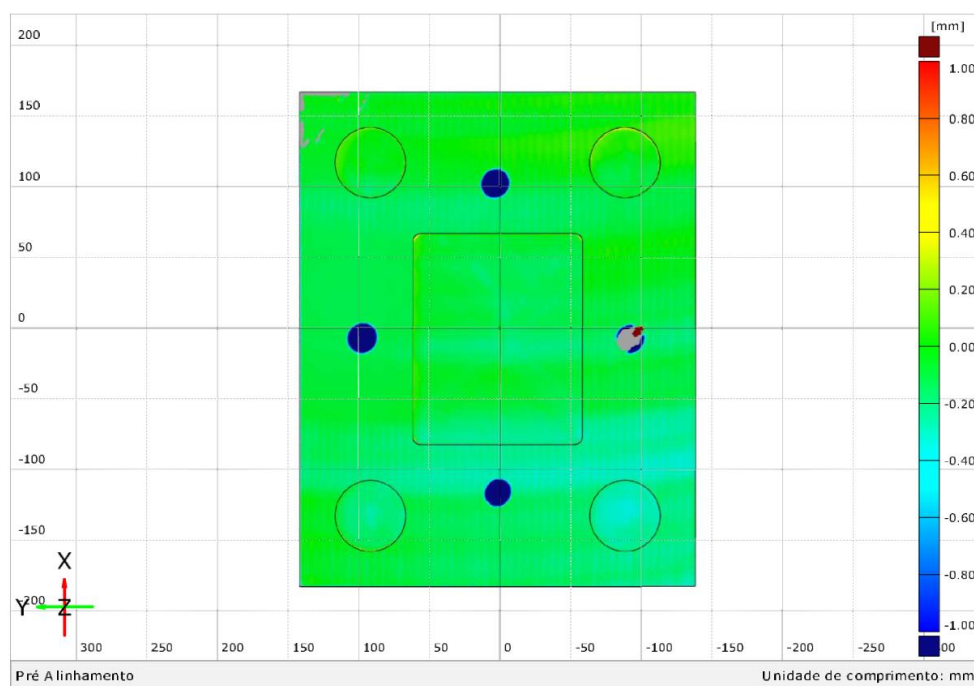
N. do lote:

Sistema:

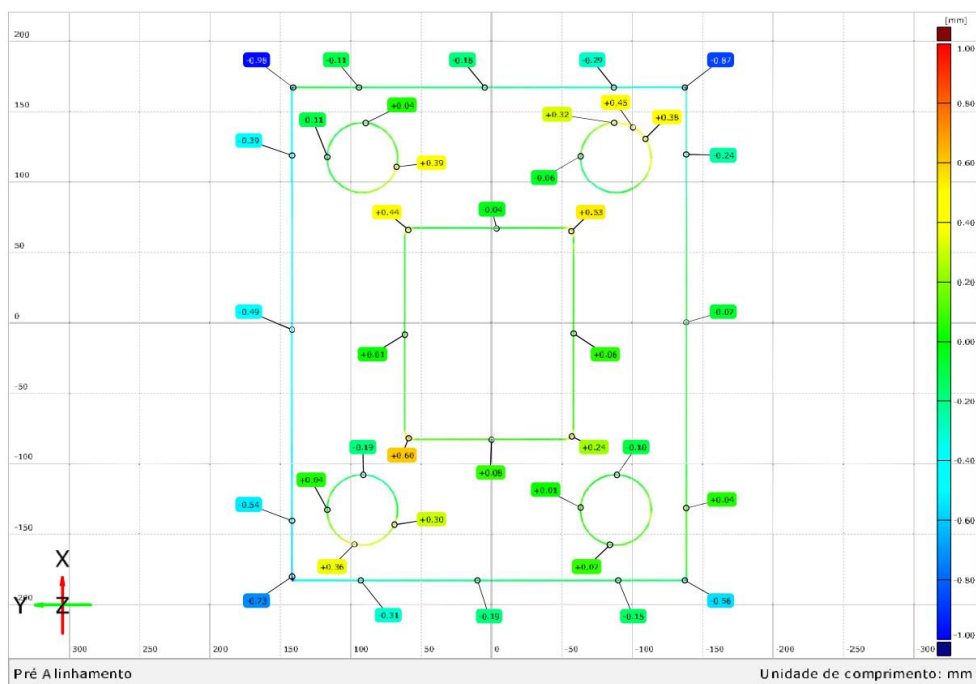
Desvios Gerais Peça

**Inspetor:****Empresa:****Departamento:****Localização:****Data:** 04/11/2019**Projeto:****Peça:****N. da peça:****Versão:****N. do lote:****Sistema:**

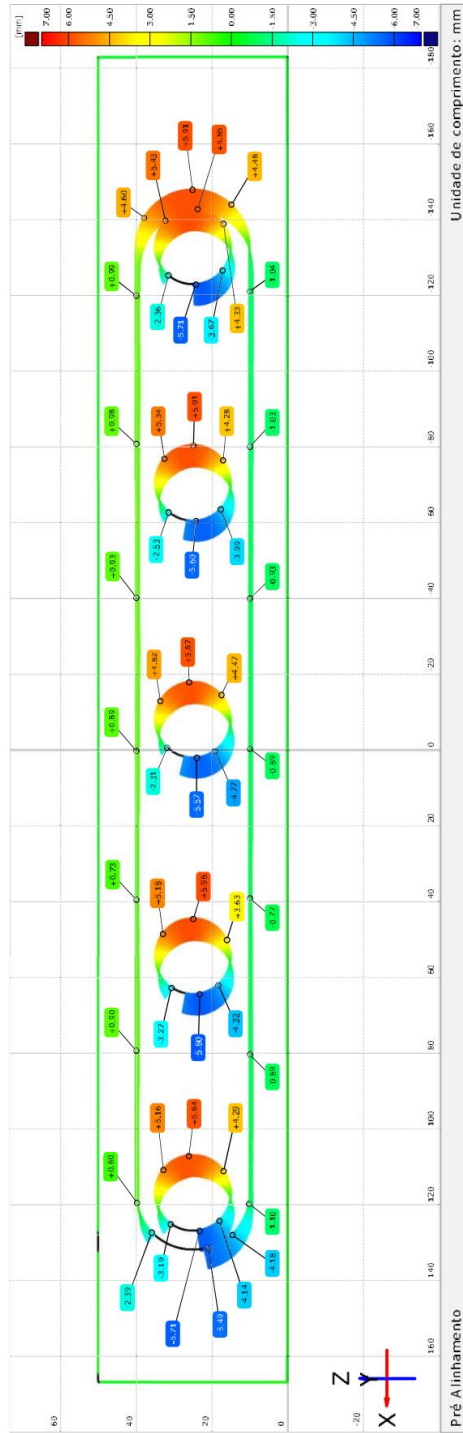
Topo

**Inspetor:****Empresa:****Departamento:****Localização:****Data:** 04/11/2019**Projeto:****Peça:****N. da peça:****Versão:****N. do lote:****Sistema:**

Superfície Z

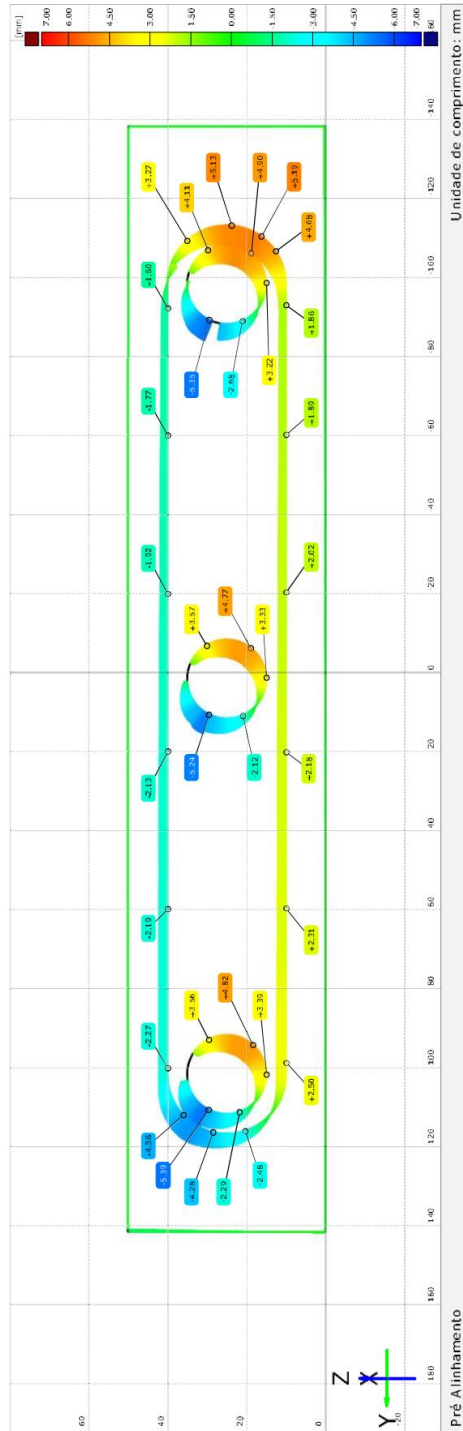
**Inspetor:****Empresa:****Departamento:****Localização:****Data:** 04/11/2019**Projeto:****Peça:****N. da peça:****Versão:****N. do lote:****Sistema:**

Lado 1



Inspetor:	Peça:
Empresa:	N. da peça:
Departamento:	Versão:
Localização:	N. do lote:
Data: 04/11/2019	Sistema:
Projeto:	

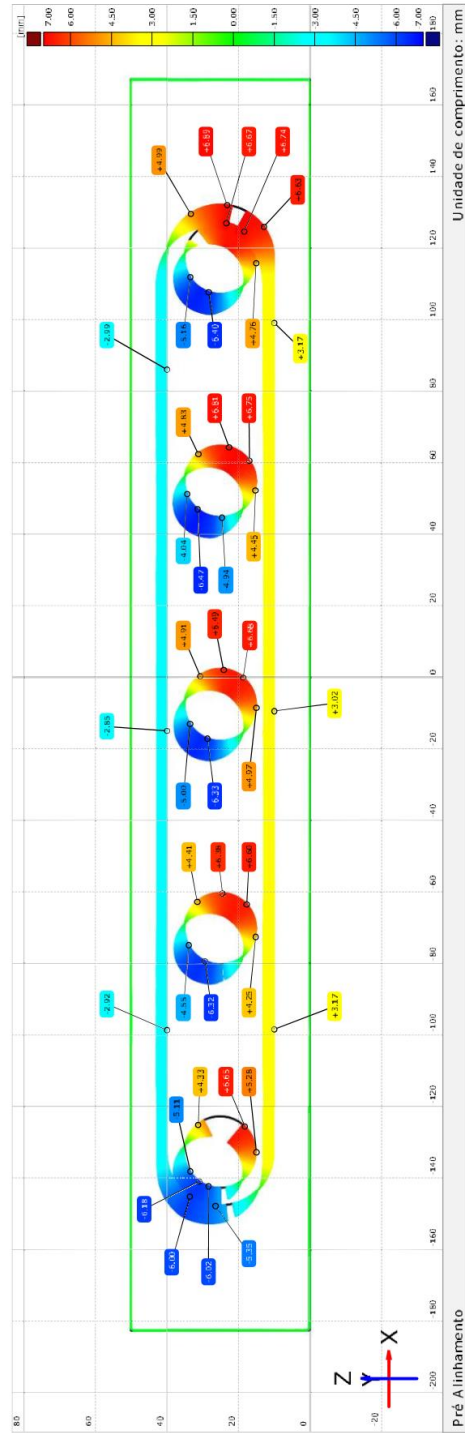
Lado 2



Inspetor:
Empresa:
Departamento:
Localização:
Data: 04/11/2019
Projeto:

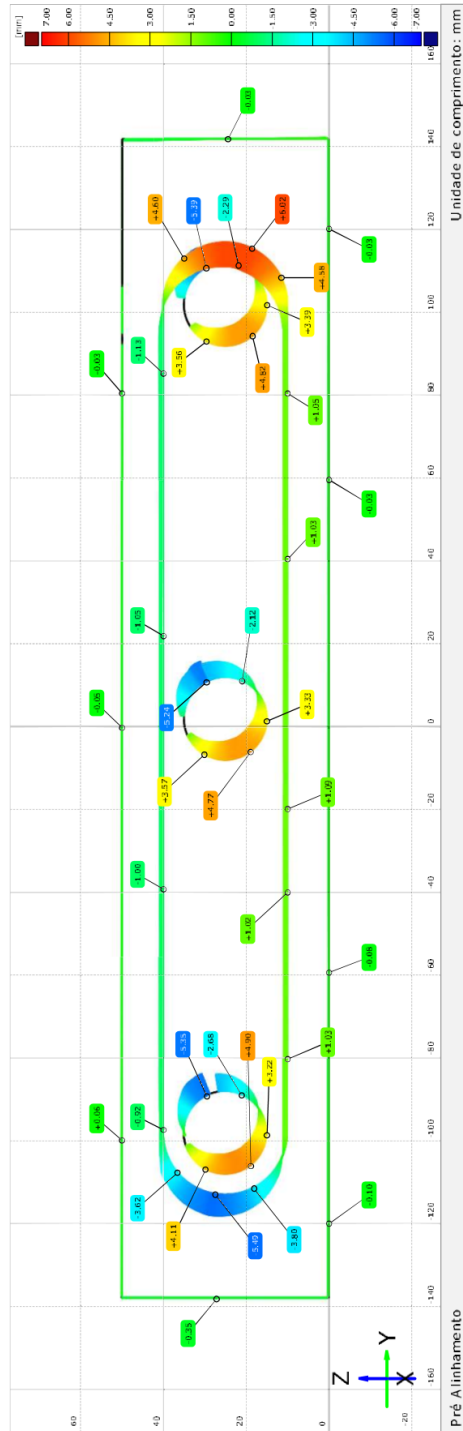
Peca:
N. da peca:
Versão:
N. do lote:
Sistema:

Lado 3



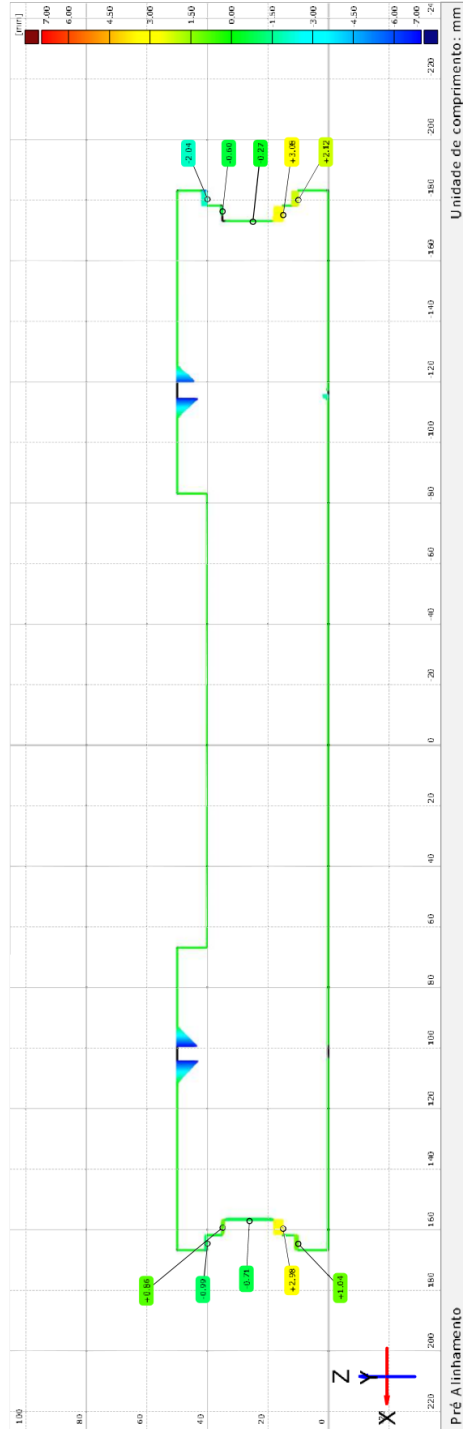
Inspetor:	Peca:
Empresa:	N. da peca:
Departamento:	Versão:
Localização:	N. do lote:
Data: 04/11/2019	Sistema:
Projeto:	

Lado 4



Inspetor:	Peca:
Empresa:	N. da peca:
Departamento:	Versão:
Localização:	N. do lote:
Data: 04/11/2019	Sistema:
Projeto:	

Corte Peça Eixo Y=0



Inspetor:	Peça:
Empresa:	N. da peça:
Departamento:	Versão:
Localização:	N. do lote:
Data: 04/11/2019	Sistema:
Projeto:	

Anexo F.2. Dados de medição da planeza do carril



Customer	Your customer company name here	Inspector	Your inspector's name here
Description	Your part description here	Customer contact	Your contact person
Part No.	Your part number	Customer phone No.	Your customer phone No.
Drawing number	Your drawing number	Customer fax No.	Your customer fax No.
Datum	Your Datum	Report Type	Your type here
Measure: Master part			

Circle 1 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Centre	X	-----	-----	-----	450,956	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	175,257	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	103,415	-----	-----
Diameter		-----	-----	-----	15,718	-----	-----
Number of points: 4							

Circle 2 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Centre	X	-----	-----	-----	1030,856	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	175,384	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	103,265	-----	-----
Diameter		-----	-----	-----	16,075	-----	-----
Number of points: 4							

Line x robot (Datum - Geometric PLP Alignment 1)						
	Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Distance	-----	-----	-----	579,900	-----	-----

Alinhamento Carril dados Iniciais							
Pré-Calibração (Datum - <i>Geometric PLP Alignment 1 (used in alignment definition)</i>)							
Normal Vector	I	Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
	J	-----	-----	-----	0,00000	-----	-----
	K	-----	-----	-----	0,00000	-----	-----
		-----	-----	-----	1,00000	-----	-----
Flatness		Maximum		Measured		Error	
		0,100		2,469			
Fitting Algorithm: Least Square							
Number of points: 13							

Alinhamento Carril dados Iniciais							
Point 1 (Datum - Geometric PLP Alignment 1 (used in alignment definition))							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Point	X	-----	-----	-----	-0,000	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	-0,000	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Dados Finais de Alinhamento do Carril							
Angle entre guias (References: Linha 1 Carril, Linha 2 Carril)							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Angle		-----	-----	-----	0,001°	-----	-----

Angle guia com robot (References: Linha 1 Carril, Line x robot)							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Angle		-----	-----	-----	0,019°	-----	-----

Alinhamento (Datum - Geometric PLP Alignment 1)							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Normal Vector	I	-----	-----	-----	-0,00003	-----	-----
	J	-----	-----	-----	-0,00005	-----	-----
	K	-----	-----	-----	1,00000	-----	-----
		Maximum		Measured		Error	
Flatness		0,100		0,407		0,307	
Fitting Algorithm: Least Square							
Number of points: 18							

RP 1 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	106,264	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	27,271	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,046	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----
Number of points: 1							

RP 2 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	119,669	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	909,902	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,086	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----
Number of points: 1							

RP 3 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	721,369	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	26,998	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	1,916	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----
Number of points: 1							

RP 4 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)							
		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	725,839	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	911,632	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	1,789	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----
Number of points: 1							

Dados Finais de Alinhamento do Carril

RP 5 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	1357,329	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	24,201	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,094	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 6 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	1357,864	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	910,809	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	1,918	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 7 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	1986,872	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	22,102	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,203	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	-0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 8 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	1986,134	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	908,236	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	1,766	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 9 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	2615,053	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	21,820	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	1,971	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 10 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	2620,117	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	908,523	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,107	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 11 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	3240,823	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	23,182	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,019	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

Dados Finais de Alinhamento do Carril

RP 12 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	3266,406	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	912,483	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,155	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 13 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	4075,821	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	25,758	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	1,940	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	-0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 14 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	4075,018	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	915,269	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	1,887	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 15 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	4715,906	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	22,962	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,027	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	-0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 16 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	4718,411	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	911,369	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,080	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	-0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 17 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	5353,936	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	20,849	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	1,952	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 18 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	5360,050	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	911,078	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,144	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	-0,000	-----	-----

Number of points: 1

Dados Finais de Alinhamento do Carril

RP 19 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	5986,564	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	22,061	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,039	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 20 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	5993,755	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	910,732	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,316	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

Number of points: 1

RP 21 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	6626,150	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	22,039	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	1,957	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	-0,000	-----	-----

Number of points: 1

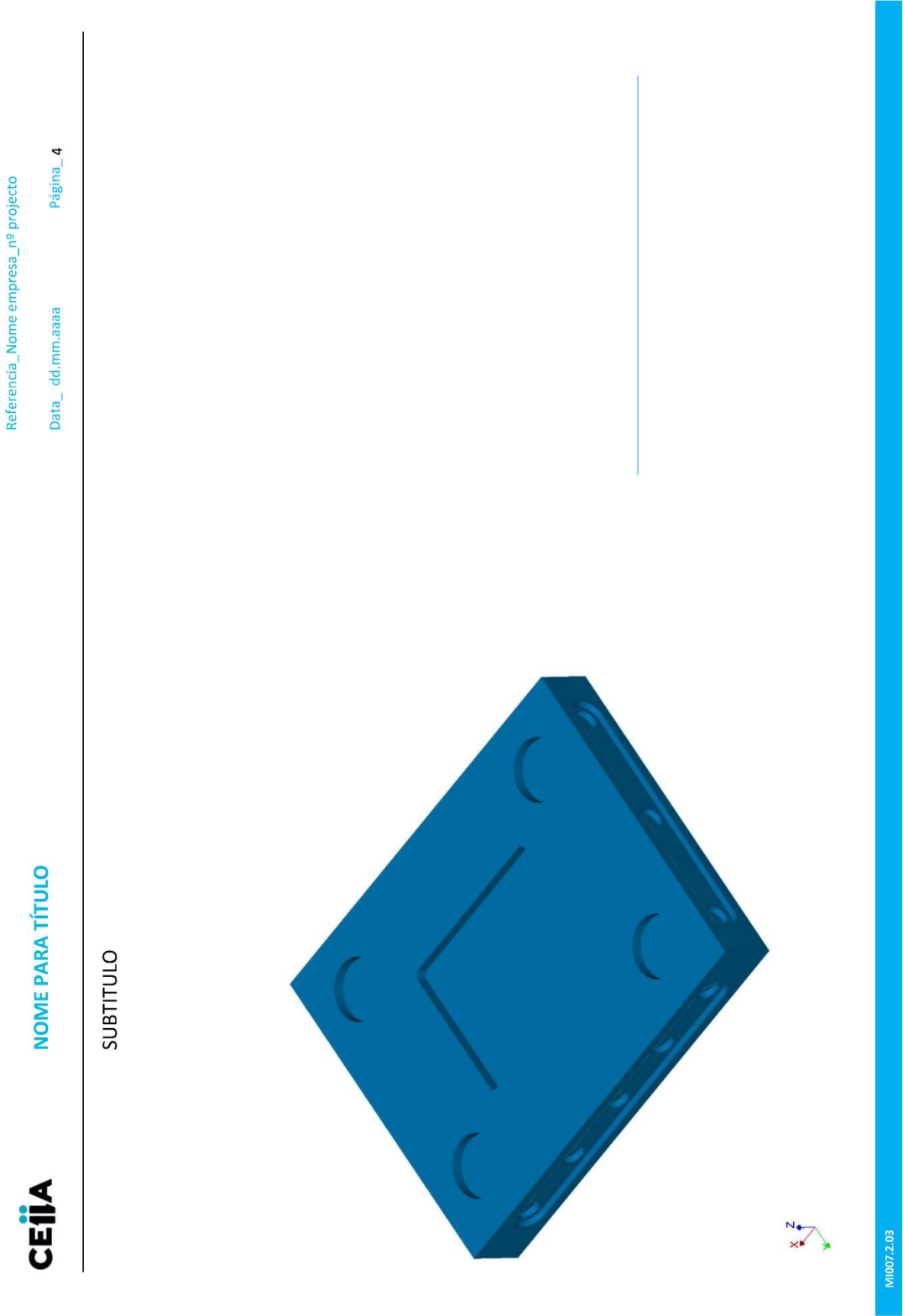
RP 22 (Datum - Geometric PLP Alignment 1)

		Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Target Point	X	-----	-----	-----	6628,978	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	906,873	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	2,108	-----	-----
Distance to Target Plane		-----	-----	-----	0,000	-----	-----

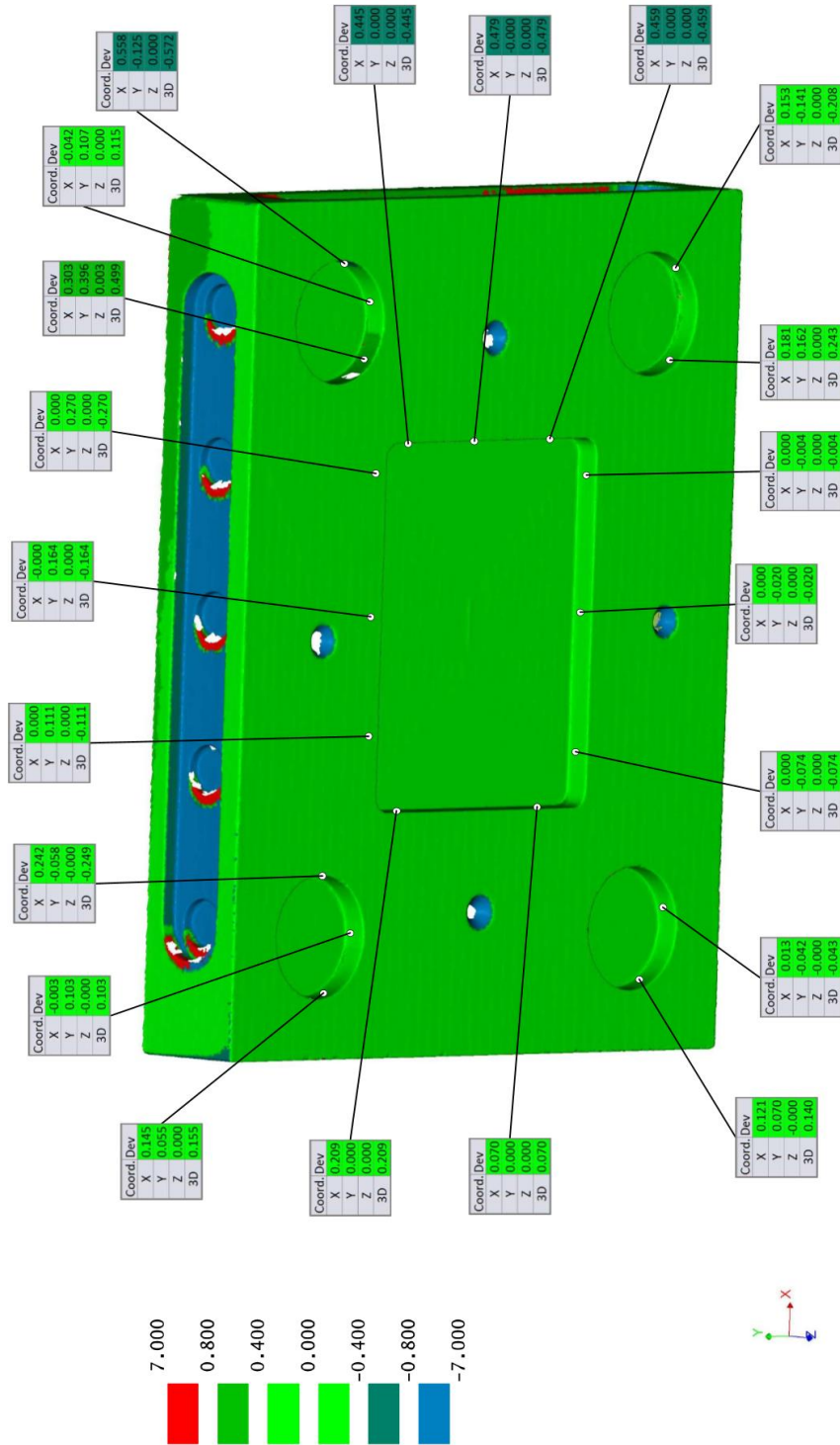
Number of points: 1

Angle carril- robot_move (References: Linha 1 Carril, Line Robot- move)

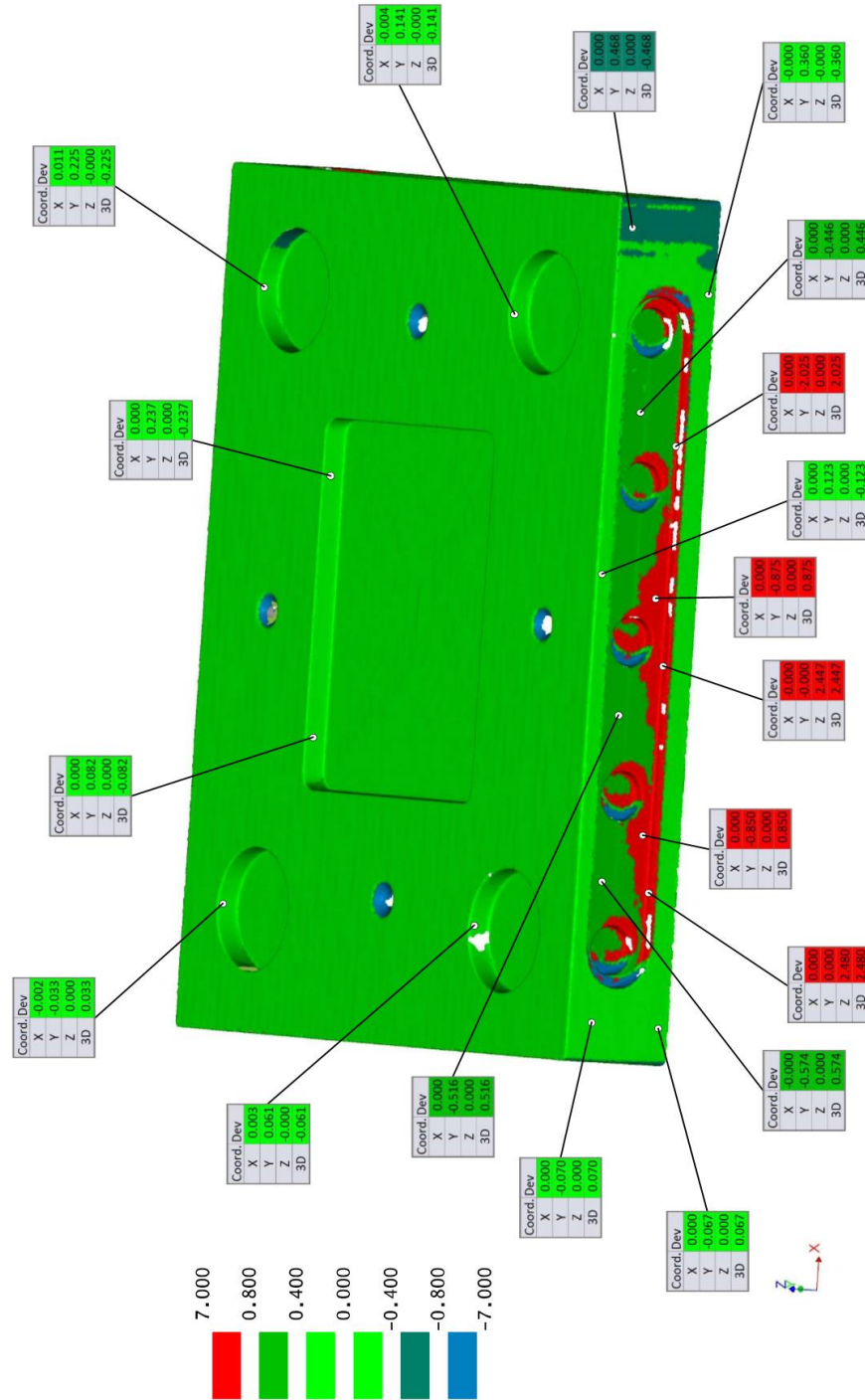
	Lo-Tol	Hi-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Angle	-----	-----	-----	0,030°	-----	-----



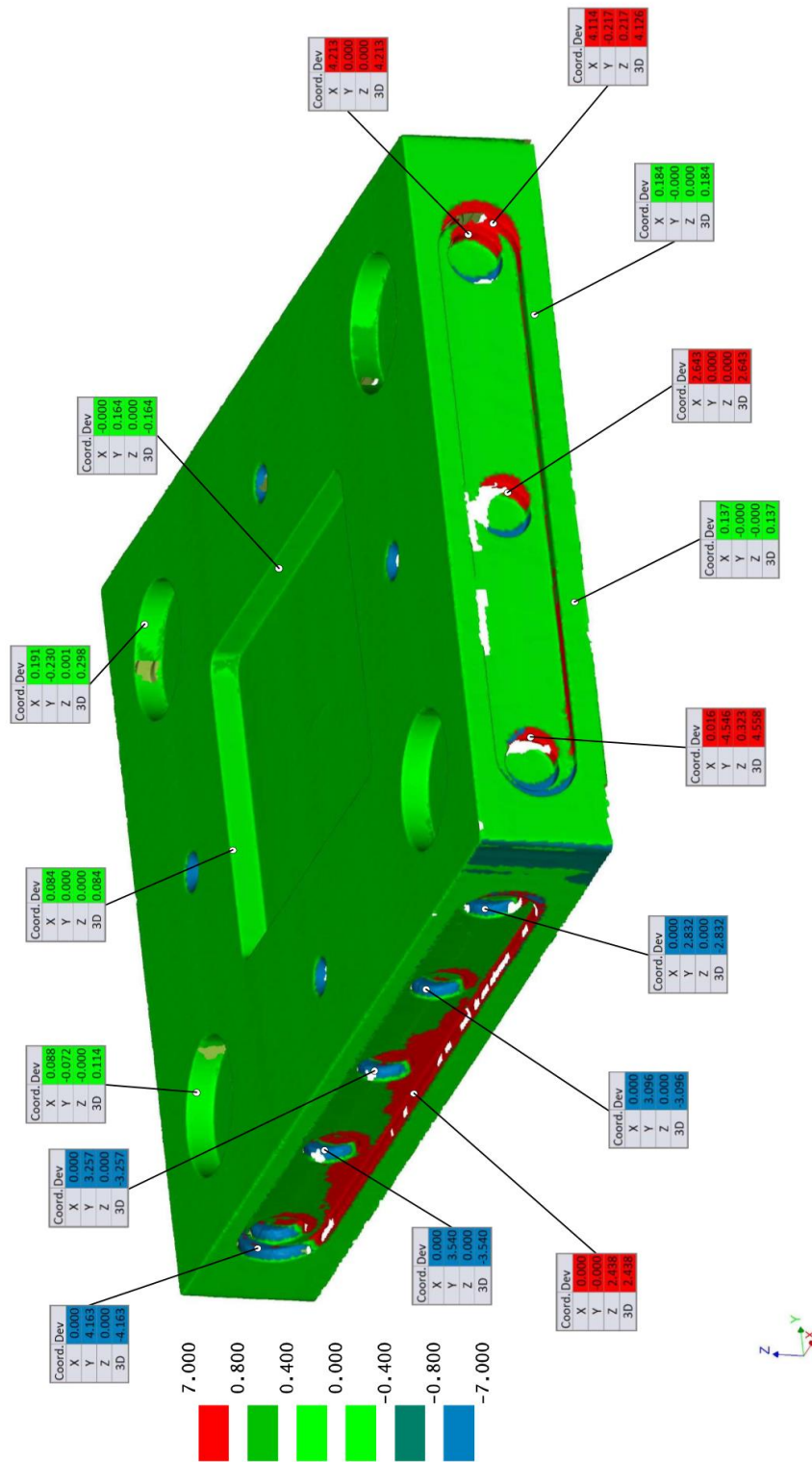
SUBTITULO



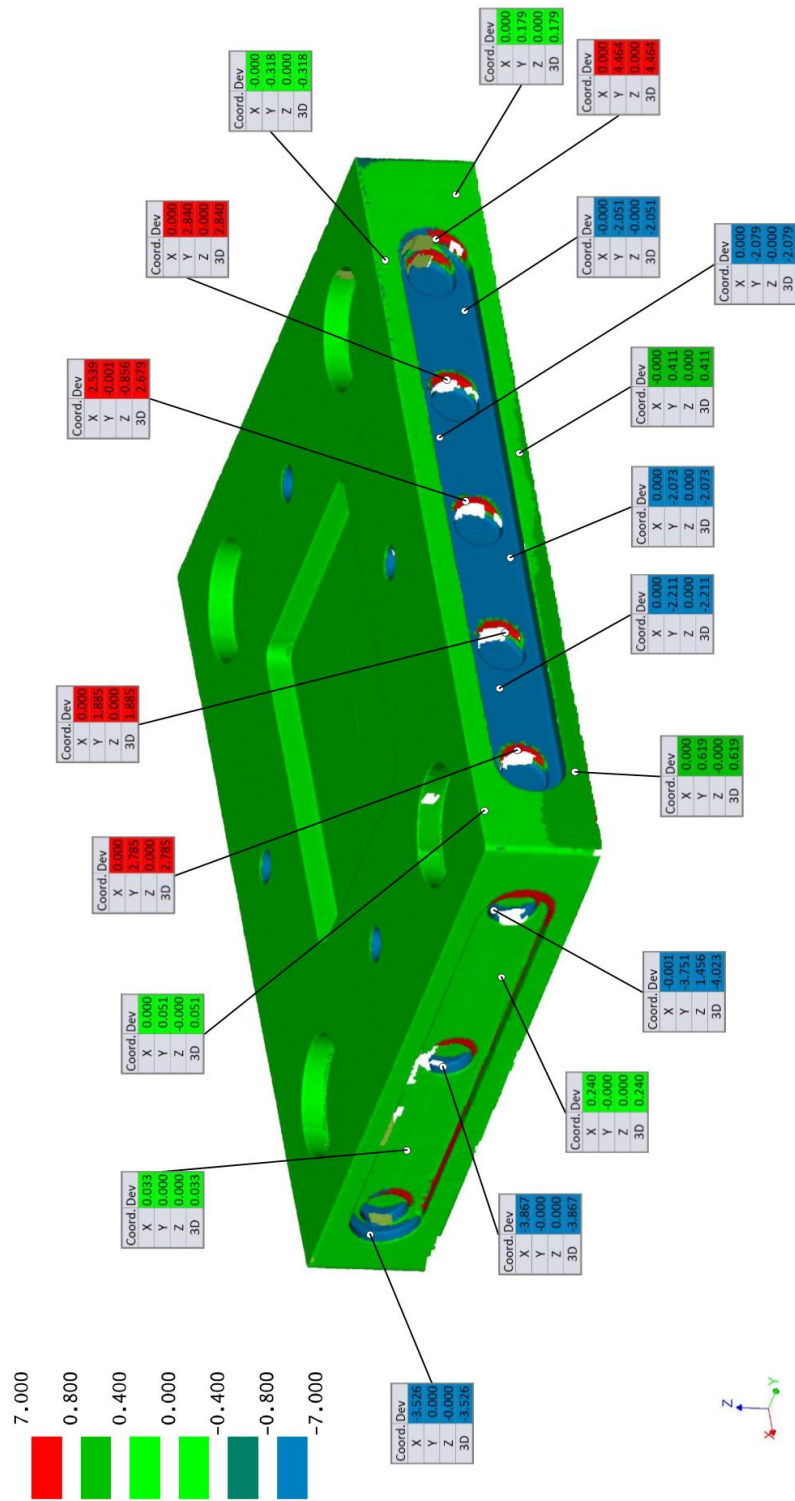
SUBTÍTULO



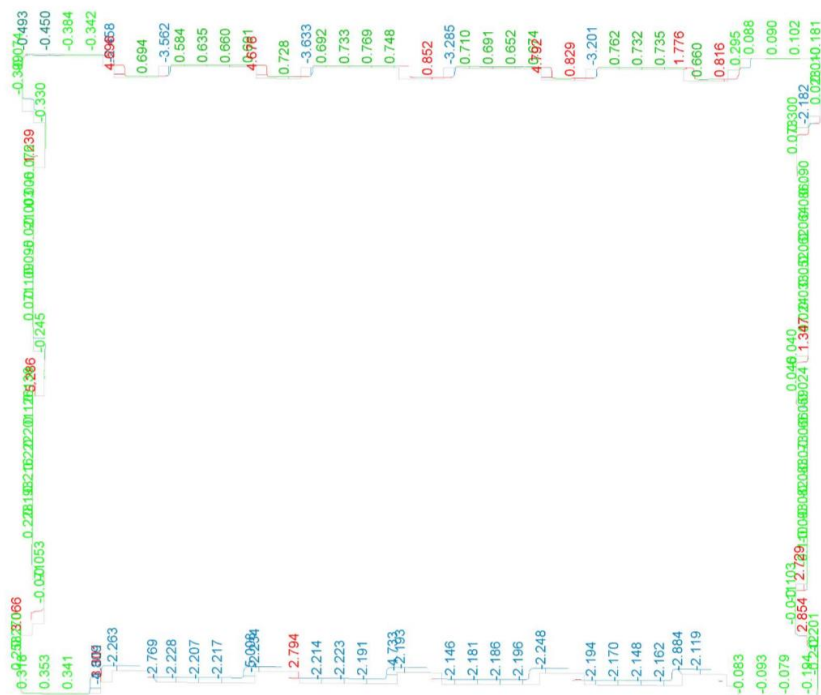
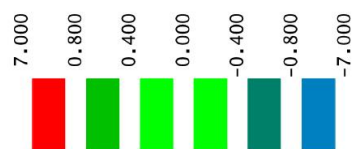
SUBTITULO



SUBTITULO

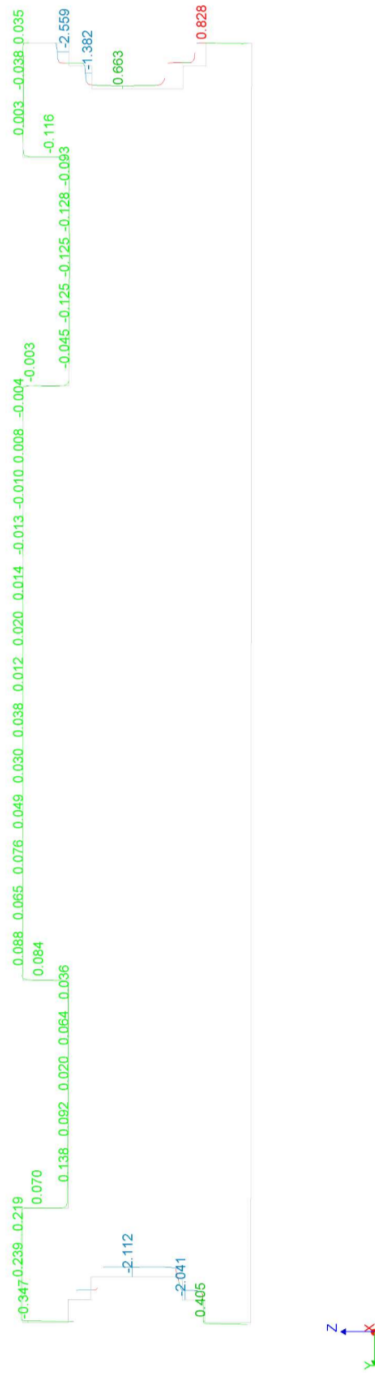
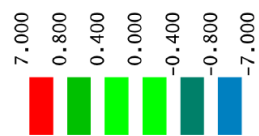


SUBTITULO

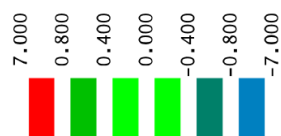
 $Z = 27\text{mm}$ 

SUBTÍTULO

X= - 133mm



SUBTITULO

$$Y = 0\text{mm}$$


Anexo F.4. Dados de medição do 4º modelo

robotultima.pwi

Page 1 of 13



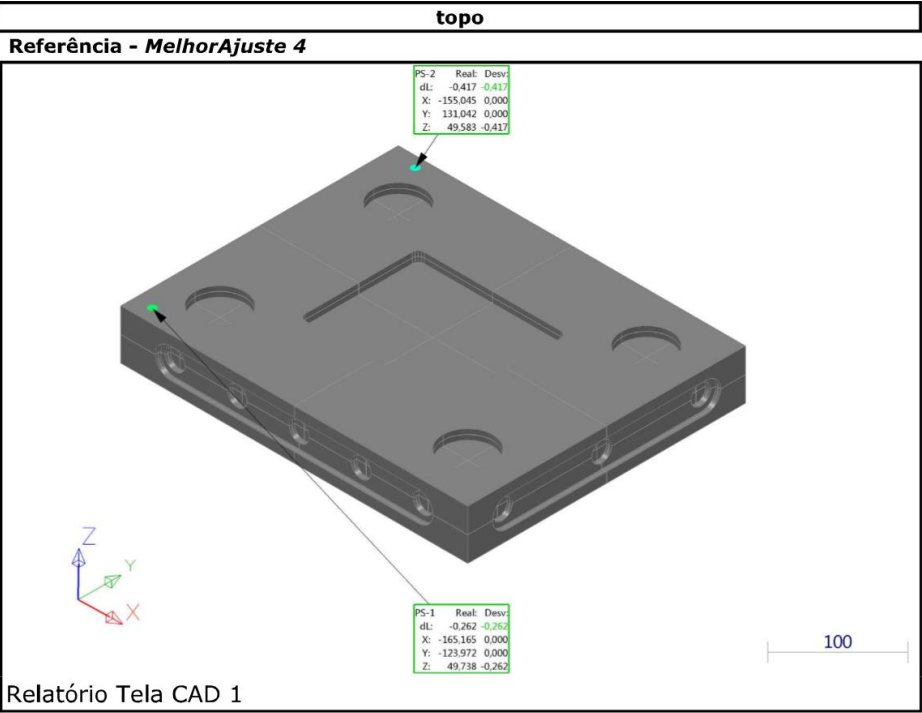
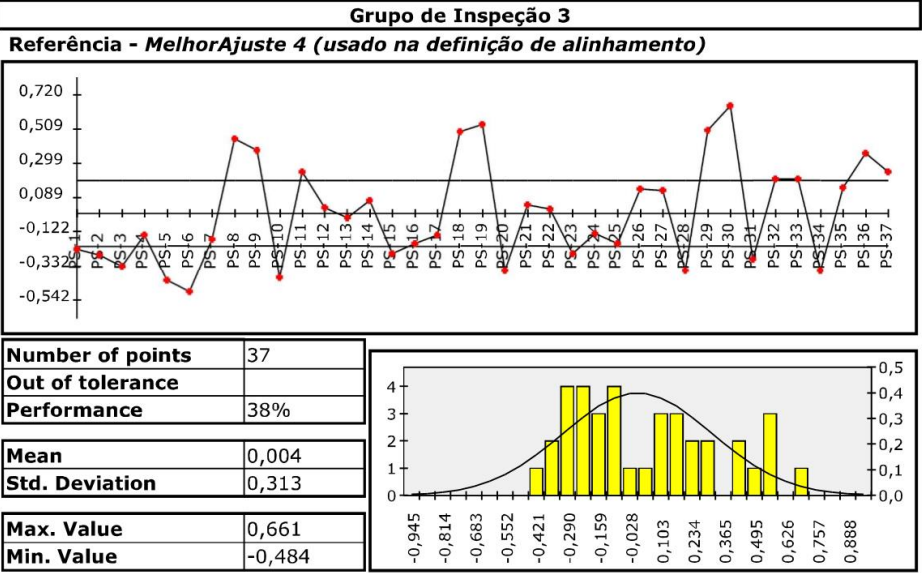
Av. Dom Afonso Henriques, 1825
4450-017 Matosinhos
Portugal

Project	Passaro - wp4	
Inspector	Ricardo Guimarães	Customer Ceia
Description	Medição Bot_endplate	Customer contact
Part No.		Equipment Faro Fusion
Drawing/CAD		Software Power Inspect
Temperature/Humidity	19c/49%	Report Type Controlo dimencional
Validation	Sandra Fortuna	
Validation Date	01-03-2019	
Measure: Peça principal		

Grupo de Inspeção 3

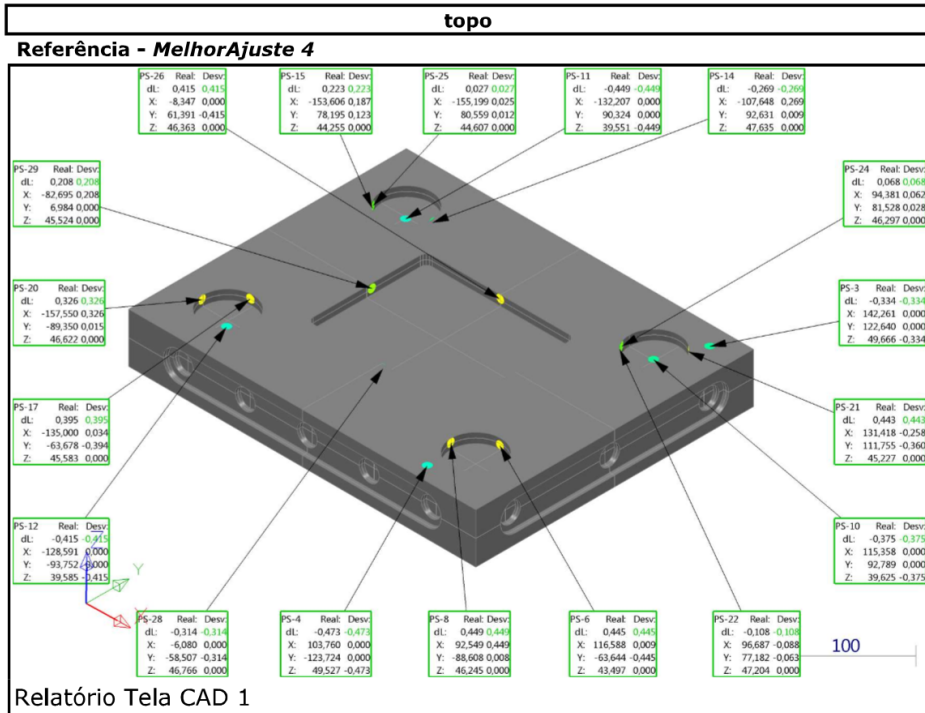
Referência - MelhorAjuste 4 (usado na definição de alinhamento)

Nome	Offset	Tol.In	Tol.Sup.	X	Y	Z	dX	dY	dZ	DL
PS-1	0,000	-0,200	0,200	-167,051	-127,860	50,000	0,000	0,000	-0,215	-0,215
PS-2	0,000	-0,200	0,200	-159,713	-4,786	50,000	0,000	0,000	-0,256	-0,256
PS-3	0,000	-0,200	0,200	-153,053	122,711	50,000	0,000	0,000	-0,321	-0,321
PS-4	0,000	-0,200	0,200	52,004	119,727	50,000	0,000	0,000	-0,132	-0,132
PS-5	0,000	-0,200	0,200	24,607	-96,613	50,000	-0,000	0,000	-0,414	-0,414
PS-6	0,000	-0,200	0,200	134,666	28,702	50,000	0,000	0,000	-0,484	-0,484
PS-7	0,000	-0,200	0,200	67,097	0,784	44,959	0,154	0,000	0,000	-0,154
PS-8	0,000	-0,200	0,200	-5,006	61,806	46,236	0,000	-0,459	0,000	0,459
PS-9	0,000	-0,200	0,200	-82,903	4,120	44,351	0,386	0,000	0,000	0,386
PS-10	0,000	-0,200	0,200	-2,130	-58,194	46,185	0,000	-0,392	0,000	-0,392
PS-11	0,000	-0,200	0,200	-173,573	-138,194	27,726	0,000	-0,252	0,000	0,252
PS-12	0,000	-0,200	0,200	155,654	-138,194	27,655	0,000	-0,037	0,000	0,037
PS-13	0,000	-0,200	0,200	101,782	-137,007	10,000	0,000	0,000	-0,030	-0,030
PS-14	0,000	-0,200	0,200	-77,402	-136,776	10,000	0,000	0,000	0,077	0,077
PS-15	0,000	-0,200	0,200	-95,278	-137,786	40,000	0,000	0,000	0,245	-0,245
PS-16	0,000	-0,200	0,200	31,347	-137,363	40,000	0,000	0,000	0,182	-0,182
PS-17	0,000	-0,200	0,200	-182,903	-127,588	28,651	0,131	0,000	0,000	-0,131
PS-18	0,000	-0,200	0,200	-177,903	-46,056	28,708	-0,497	0,000	0,000	0,497
PS-19	0,000	-0,200	0,200	-177,903	43,971	20,392	-0,547	0,000	0,000	0,547
PS-20	0,000	-0,200	0,200	-182,903	121,065	24,218	0,353	0,000	0,000	-0,353
PS-21	0,000	-0,200	0,200	-180,818	-57,407	10,000	0,000	0,000	0,056	0,056
PS-22	0,000	-0,200	0,200	-180,251	59,710	10,000	0,000	0,000	0,023	0,023
PS-23	0,000	-0,200	0,200	-182,034	-50,378	40,000	0,000	0,000	0,241	-0,241
PS-24	0,000	-0,200	0,200	-181,628	62,156	40,000	0,000	0,000	0,125	-0,125
PS-25	0,000	-0,200	0,200	-170,010	141,806	27,009	-0,000	-0,181	0,000	-0,181
PS-26	0,000	-0,200	0,200	-44,209	136,806	25,654	0,000	0,151	0,000	0,151
PS-27	0,000	-0,200	0,200	17,853	136,806	24,343	0,000	0,141	0,000	0,141
PS-28	0,000	-0,200	0,200	144,126	141,806	26,636	0,000	-0,352	0,000	-0,352
PS-29	0,000	-0,200	0,200	83,722	136,806	11,856	0,000	0,513	0,000	0,513
PS-30	0,000	-0,200	0,200	-87,376	136,806	11,740	0,000	0,661	0,000	0,661
PS-31	0,000	-0,200	0,200	-99,187	140,497	40,000	0,000	0,000	0,278	-0,278
PS-32	0,000	-0,200	0,200	81,855	136,806	38,723	0,000	0,208	0,000	0,208
PS-33	0,000	-0,200	0,200	167,097	127,494	31,486	0,208	0,000	0,000	0,208
PS-34	0,000	-0,200	0,200	162,097	38,790	30,386	-0,351	0,000	0,000	-0,351
PS-35	0,000	-0,200	0,200	167,097	-126,178	27,881	0,162	0,000	0,000	0,162
PS-36	0,000	-0,200	0,200	165,090	56,371	10,000	0,000	0,369	0,000	0,369
PS-37	0,000	-0,200	0,200	164,735	-80,496	10,000	0,000	0,000	0,255	0,255

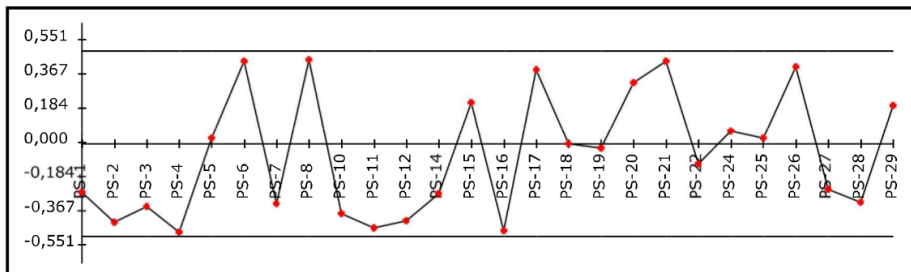
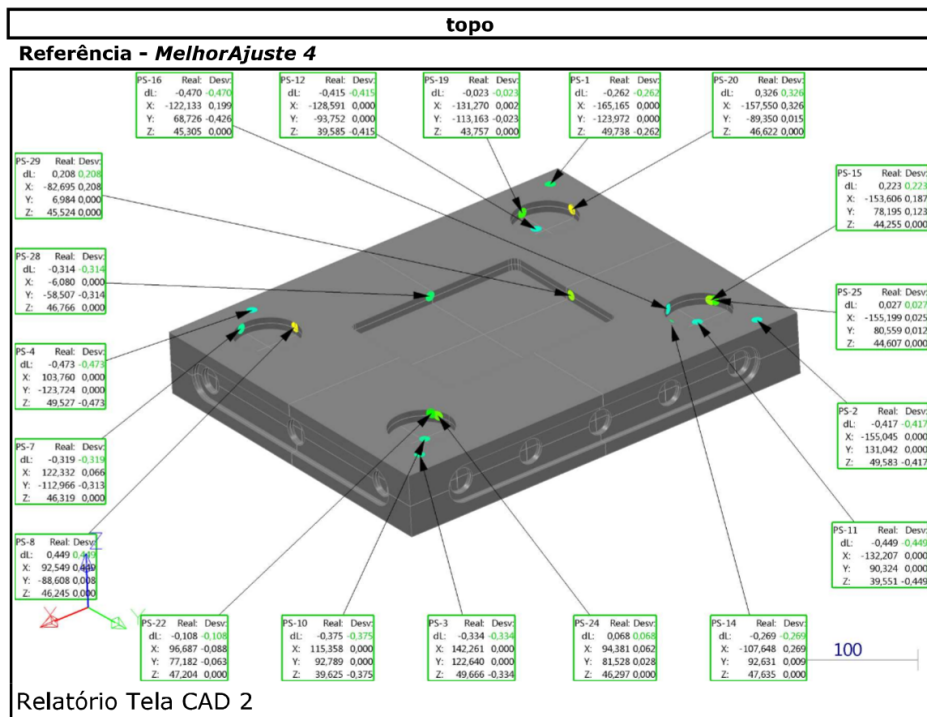


Relatório Tela CAD 1

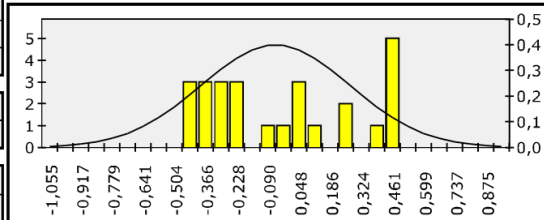
Nome	Offset	Tol.Inf	Tol.Sup.	X	Y	Z	dX	dY	dZ	DL
PS-1	0,000	-0,500	0,500	-165,165	-123,972	50,000	0,000	0,000	-0,262	-0,262
PS-2	0,000	-0,500	0,500	-155,045	131,042	50,000	0,000	0,000	-0,417	-0,417



Nome	Offset	Tol.In	Tol.Sup.	X	Y	Z	dX	dY	dZ	DL
PS-3	0,000	-0,500	0,500	142,261	122,640	50,000	0,000	0,000	-0,334	-0,334
PS-4	0,000	-0,500	0,500	103,760	-123,724	50,000	0,000	0,000	-0,473	-0,473
PS-5	0,000	-0,500	0,500	141,970	-85,682	45,966	-0,030	-0,003	0,000	0,030
PS-6	0,000	-0,500	0,500	116,579	-63,199	43,497	0,009	-0,445	0,000	0,445
PS-7	0,000	-0,500	0,500	122,266	-112,653	46,319	0,066	-0,313	0,000	-0,319
PS-8	0,000	-0,500	0,500	92,100	-88,616	46,245	0,449	0,008	0,000	0,449
PS-10	0,000	-0,500	0,500	115,358	92,789	40,000	0,000	0,000	-0,375	-0,375
PS-11	0,000	-0,500	0,500	-132,207	90,324	40,000	0,000	0,000	-0,449	-0,449
PS-12	0,000	-0,500	0,500	-128,591	-93,752	40,000	0,000	0,000	-0,415	-0,415
PS-14	0,000	-0,500	0,500	-107,917	92,622	47,635	0,269	0,009	0,000	-0,269
PS-15	0,000	-0,500	0,500	-153,793	78,073	44,255	0,187	0,123	0,000	0,223
PS-16	0,000	-0,500	0,500	-122,331	69,152	45,305	0,199	-0,426	0,000	-0,470
PS-17	0,000	-0,500	0,500	-135,034	-63,284	45,583	0,034	-0,394	0,000	0,395
PS-18	0,000	-0,500	0,500	-107,907	-88,608	46,214	0,002	-0,000	0,000	-0,002
PS-19	0,000	-0,500	0,500	-131,271	-113,140	43,757	0,002	-0,023	0,000	-0,023
PS-20	0,000	-0,500	0,500	-157,876	-89,365	46,622	0,326	0,015	0,000	0,326
PS-21	0,000	-0,500	0,500	131,676	112,115	45,227	-0,258	-0,360	0,000	0,443
PS-22	0,000	-0,500	0,500	96,775	77,245	47,204	-0,088	-0,063	0,000	-0,108
PS-24	0,000	-0,500	0,500	94,320	81,501	46,297	0,062	0,028	0,000	0,068
PS-25	0,000	-0,500	0,500	-155,224	80,547	44,607	0,025	0,012	0,000	0,027
PS-26	0,000	-0,500	0,500	-8,347	61,806	46,363	0,000	-0,415	0,000	0,415
PS-27	0,000	-0,500	0,500	67,097	-1,824	44,683	0,244	0,000	0,000	-0,244
PS-28	0,000	-0,500	0,500	-6,080	-58,194	46,766	0,000	-0,314	0,000	-0,314
PS-29	0,000	-0,500	0,500	-82,903	6,984	45,524	0,208	0,000	0,000	0,208

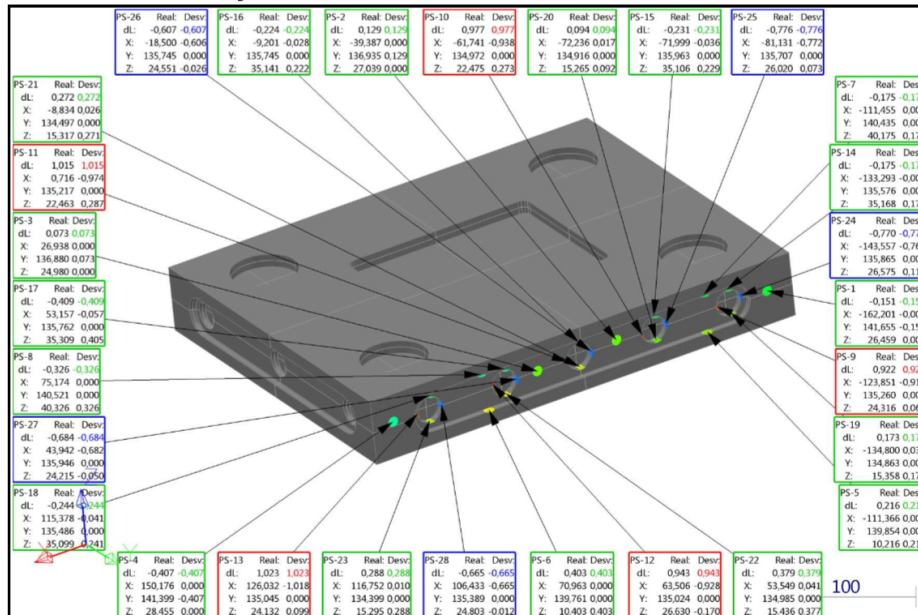


Number of points	26
Out of tolerance	
Performance	100%
Mean	-0,056
Std. Deviation	0,329
Max. Value	0,449
Min. Value	-0,473



1

Referência - MelhorAjuste 4

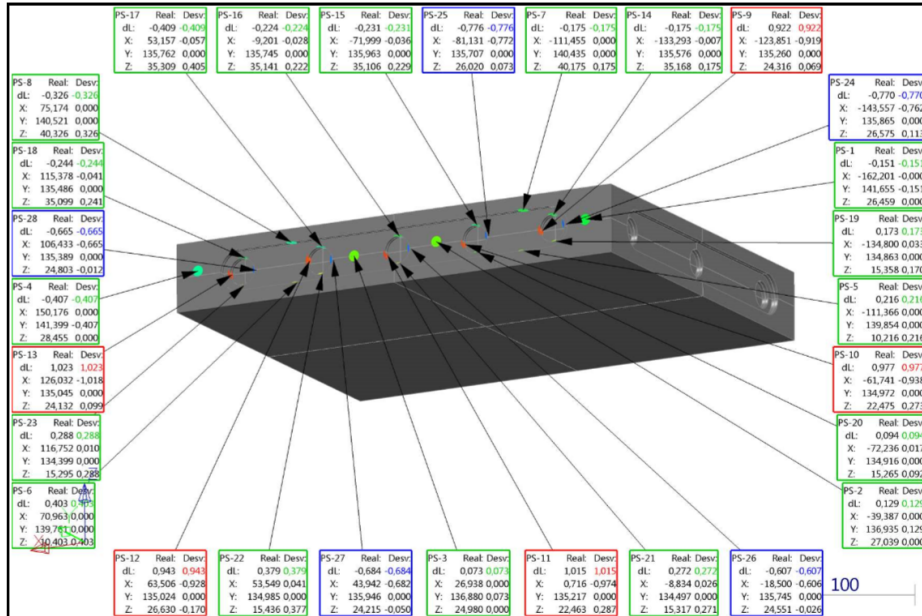


Relatório Tela CAD 3

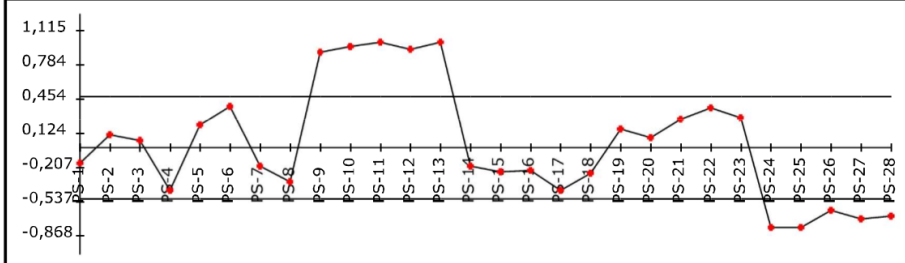
Nome	Offset	Tol.In	Tol.Sup.	X	Y	Z	dX	dY	dZ	DL
PS-1	0,000	-0,500	0,500	-162,201	141,806	26,459	-0,000	-0,151	0,000	-0,151
PS-2	0,000	-0,500	0,500	-39,387	136,806	27,039	0,000	0,129	0,000	0,129
PS-3	0,000	-0,500	0,500	26,938	136,806	24,980	0,000	0,073	0,000	0,073
PS-4	0,000	-0,500	0,500	150,176	141,806	28,455	0,000	-0,407	0,000	-0,407
PS-5	0,000	-0,500	0,500	-111,366	139,854	10,000	0,000	0,000	0,216	0,216
PS-6	0,000	-0,500	0,500	70,963	139,761	10,000	0,000	0,000	0,403	0,403
PS-7	0,000	-0,500	0,500	-111,455	140,435	40,000	0,000	0,000	0,175	-0,175
PS-8	0,000	-0,500	0,500	75,174	140,521	40,000	0,000	0,000	0,326	-0,326
PS-9	0,000	-0,500	0,500	-122,932	135,260	24,247	-0,919	0,000	0,069	0,922
PS-10	0,000	-0,500	0,500	-60,803	134,972	22,202	-0,938	0,000	0,273	0,977
PS-11	0,000	-0,500	0,500	1,690	135,217	22,176	-0,974	0,000	0,287	1,015
PS-12	0,000	-0,500	0,500	64,434	135,024	26,799	-0,928	0,000	-0,170	0,943
PS-13	0,000	-0,500	0,500	127,050	135,045	24,033	-1,018	0,000	0,099	1,023
PS-14	0,000	-0,500	0,500	-133,286	135,576	34,993	-0,007	0,000	0,175	-0,175
PS-15	0,000	-0,500	0,500	-71,963	135,963	34,878	-0,036	0,000	0,229	-0,231
PS-16	0,000	-0,500	0,500	-9,173	135,745	34,919	-0,028	0,000	0,222	-0,224
PS-17	0,000	-0,500	0,500	53,214	135,762	34,904	-0,057	0,000	0,405	-0,409
PS-18	0,000	-0,500	0,500	115,419	135,486	34,858	-0,041	0,000	0,241	-0,244
PS-19	0,000	-0,500	0,500	-134,834	134,863	15,188	0,033	0,000	0,170	0,173
PS-20	0,000	-0,500	0,500	-72,253	134,916	15,173	0,017	0,000	0,092	0,094
PS-21	0,000	-0,500	0,500	-8,860	134,497	15,046	0,026	0,000	0,271	0,272
PS-22	0,000	-0,500	0,500	53,508	134,985	15,059	0,041	0,000	0,377	0,379
PS-23	0,000	-0,500	0,500	116,742	134,399	15,006	0,010	0,000	0,288	0,288
PS-24	0,000	-0,500	0,500	-142,796	135,865	26,462	-0,762	0,000	0,113	-0,770
PS-25	0,000	-0,500	0,500	-80,358	135,707	25,947	-0,772	0,000	0,073	-0,776
PS-26	0,000	-0,500	0,500	-17,894	135,745	24,577	-0,606	0,000	-0,026	-0,607
PS-27	0,000	-0,500	0,500	44,624	135,946	24,265	-0,682	0,000	-0,050	-0,684
PS-28	0,000	-0,500	0,500	107,098	135,389	24,815	-0,665	0,000	-0,012	-0,665

1

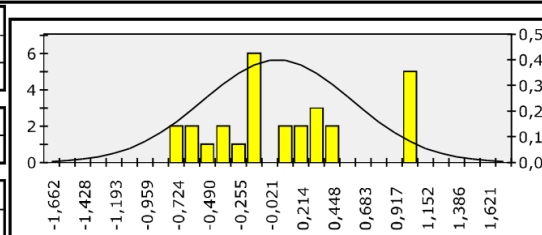
Referência - MelhorAjuste 4



Relatório Tela CAD 4

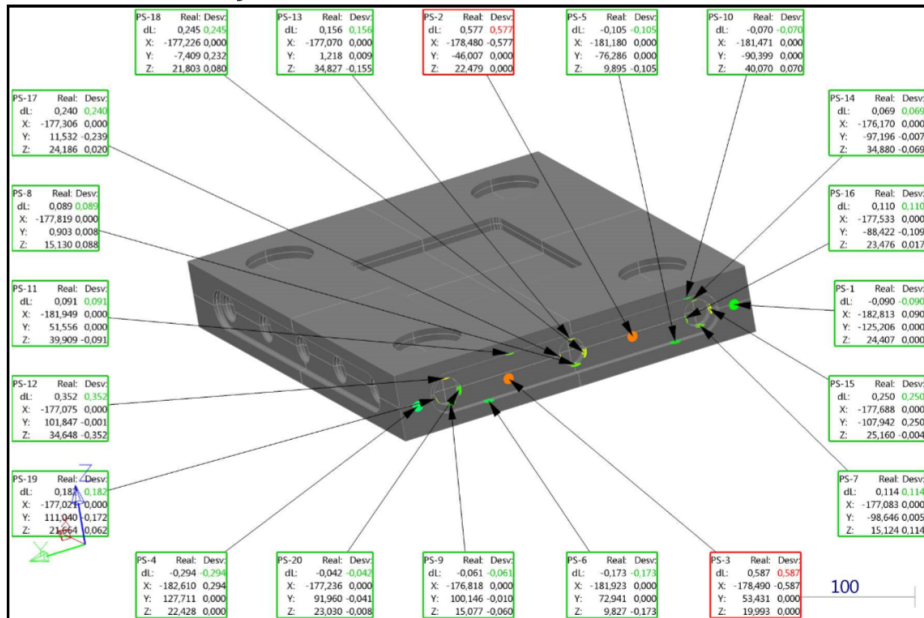


Number of points	28
Out of tolerance	
Performance	64%
Mean	0,038
Std. Deviation	0,560
Max. Value	1,023
Min. Value	-0,776



2

Referência - MelhorAjuste 4

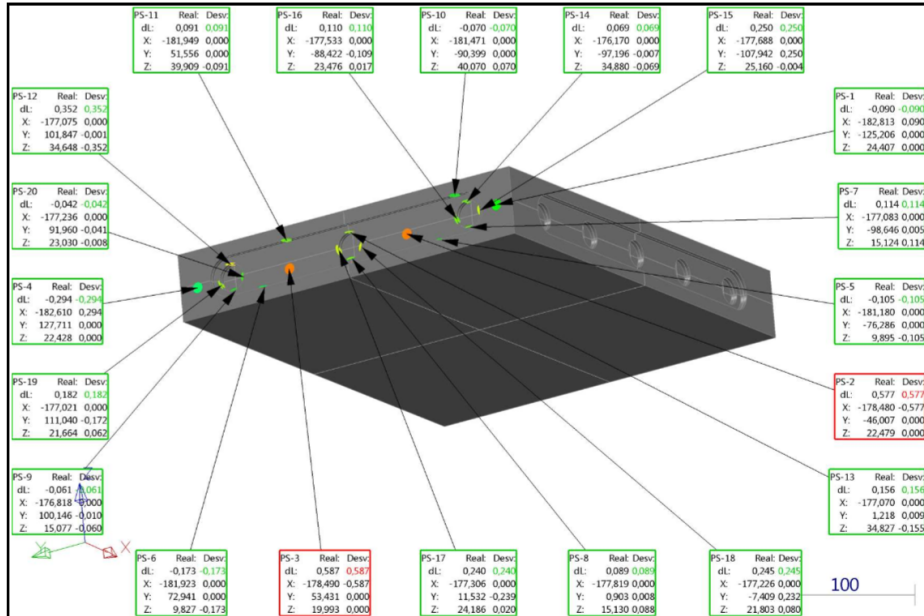


Relatório Tela CAD 5

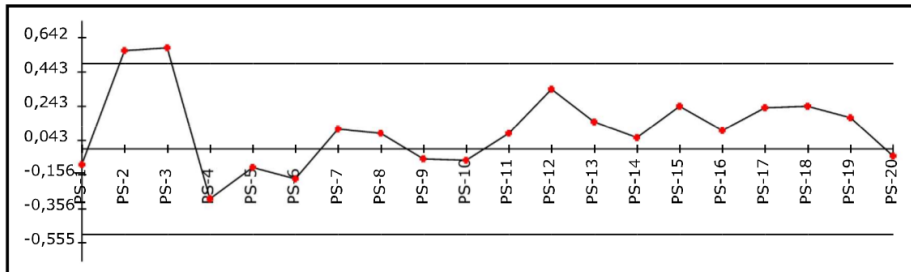
Nome	Offset	Tol.Inf	Tol.Sup.	X	Y	Z	dX	dY	dZ	DL
PS-1	0,000	-0,500	0,500	-182,903	-125,206	24,407	0,090	0,000	0,000	-0,090
PS-2	0,000	-0,500	0,500	-177,903	-46,007	22,479	-0,577	0,000	0,000	0,577
PS-3	0,000	-0,500	0,500	-177,903	53,431	19,993	-0,587	0,000	0,000	0,587
PS-4	0,000	-0,500	0,500	-182,903	127,711	22,428	0,294	0,000	0,000	-0,294
PS-5	0,000	-0,500	0,500	-181,180	-76,286	10,000	0,000	0,000	-0,105	-0,105
PS-6	0,000	-0,500	0,500	-181,923	72,941	10,000	0,000	0,000	-0,173	-0,173
PS-7	0,000	-0,500	0,500	-177,083	-98,651	15,010	0,000	0,005	0,114	0,114
PS-8	0,000	-0,500	0,500	-177,819	0,895	15,042	0,000	0,008	0,089	0,089
PS-9	0,000	-0,500	0,500	-176,818	100,156	15,137	0,000	-0,010	-0,060	-0,060
PS-10	0,000	-0,500	0,500	-181,471	-90,399	40,000	0,000	0,000	0,070	-0,070
PS-11	0,000	-0,500	0,500	-181,949	51,556	40,000	0,000	0,000	-0,091	0,091
PS-12	0,000	-0,500	0,500	-177,075	101,849	35,000	0,000	-0,001	-0,352	0,352
PS-13	0,000	-0,500	0,500	-177,070	1,208	34,982	0,000	0,009	-0,155	0,155
PS-14	0,000	-0,500	0,500	-176,170	-97,189	34,949	0,000	-0,007	-0,069	0,069
PS-15	0,000	-0,500	0,500	-177,688	-108,192	25,164	0,000	0,250	-0,004	0,250
PS-16	0,000	-0,500	0,500	-177,533	-88,313	23,459	0,000	-0,109	0,017	0,110
PS-17	0,000	-0,500	0,500	-177,306	11,772	24,166	0,000	-0,239	0,020	0,240
PS-18	0,000	-0,500	0,500	-177,226	-7,641	21,723	0,000	0,232	0,080	0,245
PS-19	0,000	-0,500	0,500	-177,021	111,212	21,602	0,000	-0,172	0,062	0,182
PS-20	0,000	-0,500	0,500	-177,236	92,001	23,039	0,000	-0,041	-0,008	-0,042

2

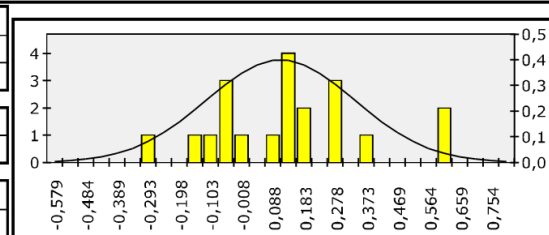
Referência - MelhorAjuste 4



Relatório Tela CAD 6

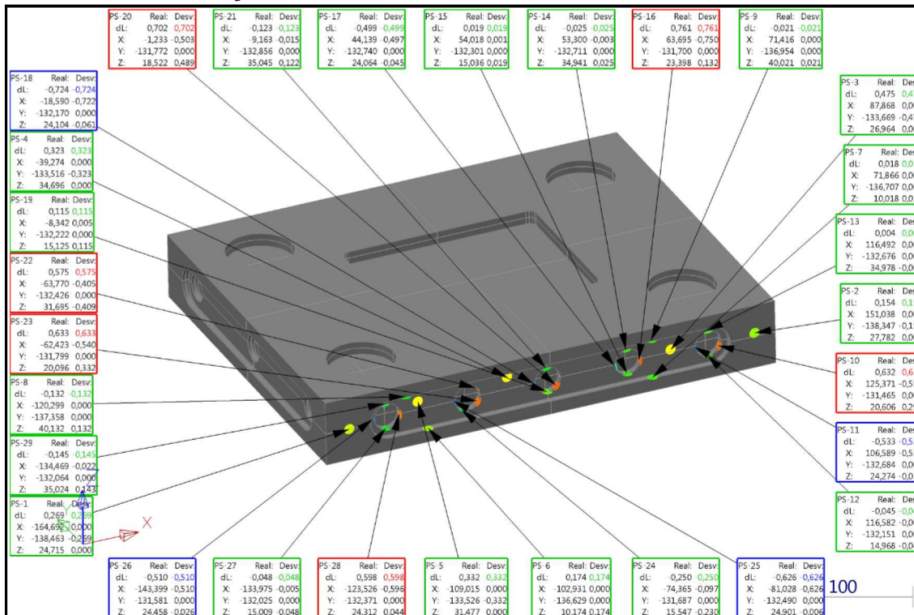


Number of points	20
Out of tolerance	
Performance	90%
Mean	0,111
Std. Deviation	0,227
Max. Value	0,587
Min. Value	-0,294



3

Referência - MelhorAjuste 4

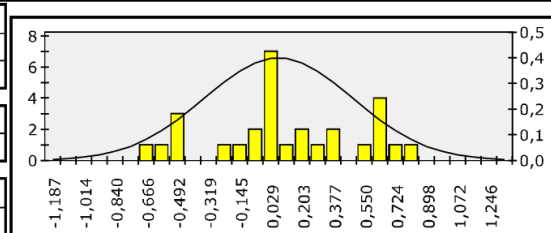
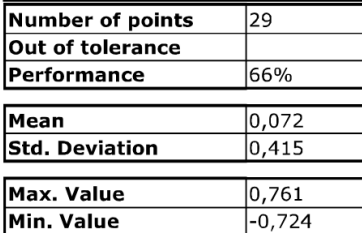
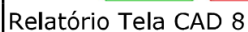


Relatório Tela CAD 7

Nome	Offset	Tol.In	Tol.Sup.	X	Y	Z	dX	dY	dZ	DL
PS-1	0,000	-0,500	0,500	-164,692	-138,194	24,715	0,000	-0,269	0,000	0,269
PS-2	0,000	-0,500	0,500	151,038	-138,194	27,782	0,000	-0,154	0,000	0,154
PS-3	0,000	-0,500	0,500	87,868	-133,194	26,964	0,000	-0,475	0,000	0,475
PS-4	0,000	-0,500	0,500	-39,274	-133,194	34,696	0,000	-0,323	0,000	0,323
PS-5	0,000	-0,500	0,500	-109,015	-133,194	31,477	0,000	-0,332	0,000	0,332
PS-6	0,000	-0,500	0,500	-102,931	-136,629	10,000	0,000	0,000	0,174	0,174
PS-7	0,000	-0,500	0,500	71,866	-136,707	10,000	0,000	0,000	0,018	0,018
PS-8	0,000	-0,500	0,500	-120,299	-137,358	40,000	0,000	0,000	0,132	-0,132
PS-9	0,000	-0,500	0,500	71,416	-136,954	40,000	0,000	0,000	0,021	-0,021
PS-10	0,000	-0,500	0,500	125,928	-131,465	20,309	-0,558	0,000	0,296	0,632
PS-11	0,000	-0,500	0,500	107,121	-132,684	24,311	-0,532	0,000	-0,037	-0,533
PS-12	0,000	-0,500	0,500	116,584	-132,151	15,013	-0,002	0,000	-0,045	-0,045
PS-13	0,000	-0,500	0,500	116,492	-132,676	34,982	0,000	0,000	-0,004	0,004
PS-14	0,000	-0,500	0,500	53,303	-132,711	34,916	-0,003	0,000	0,025	-0,025
PS-15	0,000	-0,500	0,500	54,017	-132,301	15,017	0,001	0,000	0,019	0,019
PS-16	0,000	-0,500	0,500	64,445	-131,700	23,266	-0,750	0,000	0,132	0,761
PS-17	0,000	-0,500	0,500	44,637	-132,740	24,109	-0,497	0,000	-0,045	-0,499
PS-18	0,000	-0,500	0,500	-17,868	-132,170	24,164	-0,722	0,000	-0,061	-0,724
PS-19	0,000	-0,500	0,500	-8,347	-132,222	15,010	0,005	0,000	0,115	0,115
PS-20	0,000	-0,500	0,500	-0,730	-131,772	18,033	-0,503	0,000	0,489	0,702
PS-21	0,000	-0,500	0,500	-9,148	-132,856	34,922	-0,015	0,000	0,122	-0,123
PS-22	0,000	-0,500	0,500	-63,365	-132,426	32,103	-0,405	0,000	-0,409	0,575
PS-23	0,000	-0,500	0,500	-61,883	-131,799	19,765	-0,540	0,000	0,332	0,633
PS-24	0,000	-0,500	0,500	-74,268	-131,687	15,777	-0,097	0,000	-0,230	-0,250
PS-25	0,000	-0,500	0,500	-80,403	-132,490	24,907	-0,626	0,000	-0,006	-0,626
PS-26	0,000	-0,500	0,500	-142,890	-131,581	24,484	-0,510	0,000	-0,026	-0,510
PS-27	0,000	-0,500	0,500	-133,970	-132,025	15,057	-0,005	0,000	-0,048	-0,048
PS-28	0,000	-0,500	0,500	-122,930	-132,371	24,268	-0,596	0,000	0,044	0,598
PS-29	0,000	-0,500	0,500	-134,447	-132,064	34,880	-0,022	0,000	0,143	-0,145

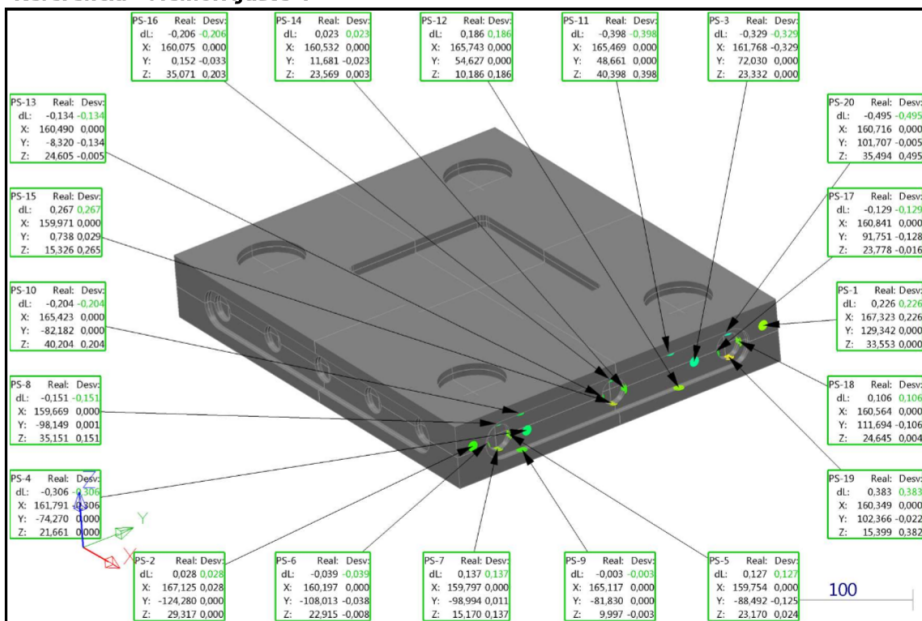
3

PS-25	Real: Desv	PS-22	Real: Desv
-------	------------	-------	------------



4

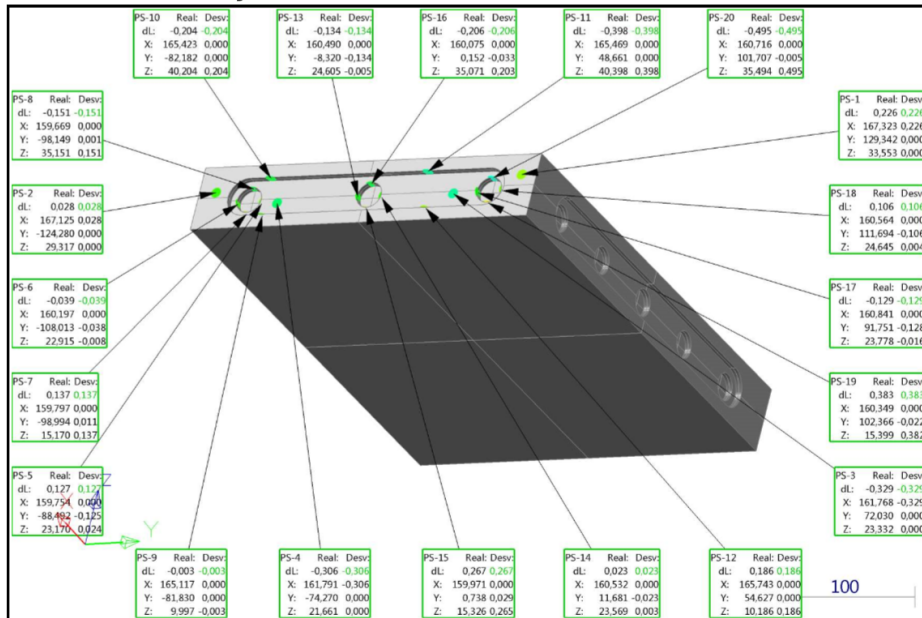
Referência - MelhorAjuste 4



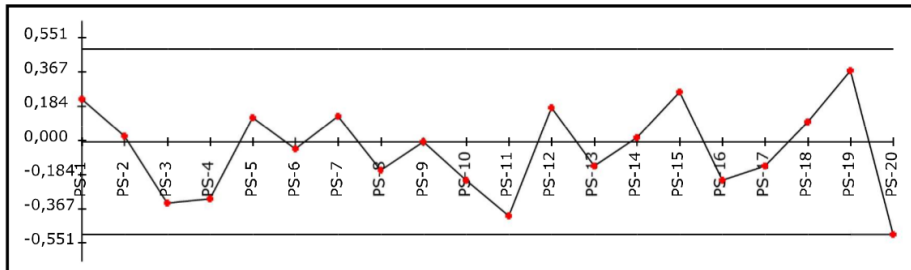
Relatório Tela CAD 9

Nome	Offset	Tol.Inf	Tol.Sup.	X	Y	Z	dX	dY	dZ	DL
PS-1	0,000	-0,500	0,500	167,097	129,342	33,553	0,226	0,000	0,000	0,226
PS-2	0,000	-0,500	0,500	167,097	-124,280	29,317	0,028	0,000	0,000	0,028
PS-3	0,000	-0,500	0,500	162,097	72,030	23,332	-0,329	0,000	0,000	-0,329
PS-4	0,000	-0,500	0,500	162,097	-74,270	21,661	-0,306	0,000	0,000	-0,306
PS-5	0,000	-0,500	0,500	159,754	-88,367	23,147	0,000	-0,125	0,024	0,127
PS-6	0,000	-0,500	0,500	160,197	-107,975	22,923	0,000	-0,038	-0,008	-0,039
PS-7	0,000	-0,500	0,500	159,797	-99,005	15,033	0,000	0,011	0,137	0,137
PS-8	0,000	-0,500	0,500	159,669	-98,149	35,000	0,000	0,001	0,151	-0,151
PS-9	0,000	-0,500	0,500	165,117	-81,830	10,000	0,000	0,000	-0,003	-0,003
PS-10	0,000	-0,500	0,500	165,423	-82,182	40,000	0,000	0,000	0,204	-0,204
PS-11	0,000	-0,500	0,500	165,469	48,661	40,000	0,000	0,000	0,398	-0,398
PS-12	0,000	-0,500	0,500	165,743	54,627	10,000	0,000	0,000	0,186	0,186
PS-13	0,000	-0,500	0,500	160,490	-8,186	24,610	0,000	-0,134	-0,005	-0,134
PS-14	0,000	-0,500	0,500	160,532	11,703	23,566	0,000	-0,023	0,003	0,023
PS-15	0,000	-0,500	0,500	159,971	0,709	15,060	0,000	0,029	0,265	0,267
PS-16	0,000	-0,500	0,500	160,075	0,186	34,868	0,000	-0,033	0,203	-0,206
PS-17	0,000	-0,500	0,500	160,841	91,880	23,793	0,000	-0,128	-0,016	-0,129
PS-18	0,000	-0,500	0,500	160,564	111,800	24,641	0,000	-0,106	0,004	0,106
PS-19	0,000	-0,500	0,500	160,349	102,388	15,017	0,000	-0,022	0,382	0,383
PS-20	0,000	-0,500	0,500	160,716	101,712	35,000	0,000	-0,005	0,495	-0,495

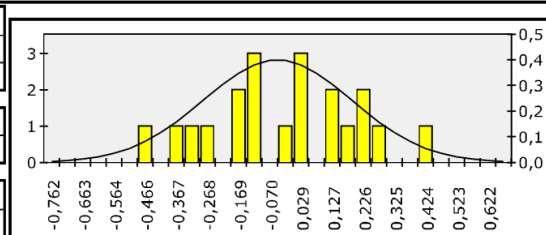
4

Referência - MelhorAjuste 4

Relatório Tela CAD 10



Number of points	20
Out of tolerance	
Performance	100%
Mean	-0,046
Std. Deviation	0,236
Max. Value	0,383
Min. Value	-0,495

**Grupo Geométrico 2****Cilindro 3 (Datum - MelhorAjuste 4)**

	Hi-Tol	Lo-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Diâmetro	----	----	----	49,781	----	----

Cilindro 4 (Datum - MelhorAjuste 4)

	Hi-Tol	Lo-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Diâmetro	-----	-----	-----	49,679	-----	-----

Ponto 1 (Datum - MelhorAjuste 4)

		Hi-Tol	Lo-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Ponto	X	-----	-----	-----	117,303	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	91,250	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	49,131	-----	-----

Ponto 2 (Datum - MelhorAjuste 4)

		Hi-Tol	Lo-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Ponto	X	-----	-----	-----	-132,477	-----	-----
	Y	-----	-----	-----	-88,215	-----	-----
	Z	-----	-----	-----	49,515	-----	-----

Linha 1 (Datum - MelhorAjuste 4)

	Hi-Tol	Lo-Tol	Nominal	Measured	Deviation	Error
Distância	-----	-----	-----	307,567	-----	-----

Number of controlled parts	1
Inspector's name	Ricardo Guimarães

