



**TECNOLOGIA
SETÚBAL**

ESCOLA SUPERIOR
POLITÉCNICO SETÚBAL

DAVID
ALEXANDRE
DUARTE
SOARES
201000422

**DESENVOLVIMENTO DE
FERRAMENTAS PARA PRENSA
HIDROFÓRMICA/BORRACHA COM
RECURSO AO FABRICO ADITIVO
METÁLICO**

Relatório de Projeto do Mestrado em
Engenharia de Produção

ORIENTADORES

Professor Doutor Ricardo Cláudio

Professor Doutor Carlos Fortes

Dezembro de 2025

Aos meus Pais, Irmão e Avó.

Agradecimentos

Na conclusão desta etapa tão significativa para mim, e após a realização do presente projeto, não poderia deixar expressa a minha gratidão pelas entidade e pessoas envolvidas que contribuíram com a sua ajuda e orientação, em especial:

Ao Prof. Dr. Ricardo Cláudio, na qualidade de orientador, a oportunidade de desenvolver este projeto, a sua disponibilidade permanente, as sugestões construtivas apresentadas ao longo de todo o processo e a revisão crítica do trabalho aqui realizado.

Ao Prof. Dr. Carlos Fortes, também na qualidade de orientador, pelo contributo científico durante o desenvolvimento do projeto, pela sua disponibilidade e pela revisão do trabalho realizado.

À LAUAK Portugal S.A., por ter possibilitado o desenvolvimento do projeto nas suas instalações, e pela disponibilização de máquinas importantes e equipamentos indispensáveis à realização do projeto.

À Escola Superior de Tecnologias de Setúbal, do Instituto Politécnico de Setúbal, pela disponibilidade dos laboratórios, instrumentos indispensáveis à realização dos ensaios e à sua equipa no apoio ao projeto.

Ao Eng. Paulo Cardoso, por ter permitido a minha integração na equipa de fabrico aditivo da Lauak.

Ao Eng. António Garcês, por toda ajuda e do muito apoio prestado durante o desenvolvimento do presente projeto.

Ao Eng. André Abreu e Eng. Yves Marcel, pela partilha de ideias e contribuições ao longo do projeto.

Ao Sr. Bruno Jorge no desenvolvimento dos programas de controlo para a CMM e os respetivos controlos.

Por fim, deixo o meu agradecimento à minha família, pelo apoio incondicional e pela motivação constante ao longo de toda a etapa.

Resumo

Este projeto propõe a implementação do fabrico aditivo metálico, utilizando o processo de Fusão em Camada de Pó (PBF), para produzir ferramentas de moldagem aplicadas em prensas de borracha e hidrofórmica, destinadas à moldagem de peças em chapa de alumínio para a indústria aeronáutica. O objetivo é avaliar a viabilidade desta tecnologia como alternativa aos métodos convencionais, visando reduzir significativamente o tempo de fabrico, simplificar a cadeia de produção e diminuir custos.

Inicialmente, foram desenvolvidos artefactos para validar tolerâncias dimensionais, geométricas e testar tratamentos de superfície. Paralelamente, estudaram-se estruturas à compressão, como reticulares, TPMS e *ISOGRID*, com o intuito de reduzir a densidade e aproveitar as vantagens do fabrico aditivo, economizando matéria-prima e tempo de produção. Como caso de estudo, adaptou-se uma ferramenta com estrutura interna *ISOGRID* (50% de densidade), tendo sido tratada superficialmente por pedras vibratórias. Após controlo dimensional e ensaios de moldagem, verificou-se que, apesar de algumas tolerâncias não terem sido cumpridas, devido a problemas de produção, foi possível moldar algumas peças dentro dos requisitos.

Os resultados confirmam que, com um desenho adequado ao fabrico aditivo e tratamentos corretos, é viável produzir este tipo de ferramentas por fabrico aditivo, obtendo-se uma expressiva redução no tempo de ciclo e custos competitivos, comprovando a aplicabilidade técnica desta tecnologia.

Palavras-chave: Fabrico aditivo metálico, Fusão em camada de pó, Ferramenta de moldagem, Prensa borracha/hidrofórmica, TPMS.

Abstract

This project proposes the implementation of metal additive manufacturing using the Powder Bed Fusion (PBF) process to produce moulding tools applied in rubber and hydroforming presses, for shaping aluminium sheet parts for the aerospace industry. The goal is to assess the feasibility of this technology as an alternative to conventional methods, aiming to significantly reduce manufacturing time, simplify the production chain, and lower costs.

Initially, artifacts were developed to validate dimensional and geometrical tolerances, and test surface treatments. In parallel, structures such as lattice, TPMS, and ISOGRID were studied under compression to reduce density and leverage the advantages of additive manufacturing, saving raw material and production time. As a case study, a tool was adapted with an internal ISOGRID structure (50% density) and treated with vibratory stones. After dimensional control and moulding tests, it was found that, despite some tolerances not being met due to production issues, it was possible to mould some parts within the required specifications.

The results confirm that, with a design tailored for additive manufacturing and proper treatments, it is feasible to produce this type of tool using additive processes, achieving a significant reduction in cycle time and competitive costs, thus proving the technical applicability of this technology.

Keywords: Metal additive manufacturing, Powder bed fusion, Forming tool, rubber/hydroform press, TPMS.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice.....	iv
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Siglas e Acrónimos	xii
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1. Introdução e Âmbito do Trabalho	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura do Trabalho.....	4
Capítulo 2.....	6
Revisão Bibliográfica.....	6
2.1. Fabrico Aditivo	7
<i>2.1.1. Etapas do Fabrico Aditivo.....</i>	<i>7</i>
<i>2.1.2. Terminologias Normalizadas – ISO/ASTM 52900.</i>	<i>8</i>
<i>2.1.3. Processo por Fusão em Camada de Pó - FCP(Powder Bed Fusion - PBF)..</i>	<i>8</i>
<i>2.1.4. Vantagens e Limitações do Processo.....</i>	<i>9</i>
2.2. Design for Additive Manufacturing (DfAM)	12
<i>2.2.1. Regras de Projeto.</i>	<i>13</i>
<i>2.2.2. Regras de Fabricação.....</i>	<i>14</i>
<i>2.2.3. Desafios e constrangimentos do processo PBF para o DfAM.</i>	<i>14</i>
2.3. Estruturas Reticulares e Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)	16
<i>2.3.1. Diferentes Estruturas.....</i>	<i>17</i>
<i>2.3.2. Parâmetros da Célula Unitária.....</i>	<i>18</i>
<i>2.3.3. Densidade Relativa.....</i>	<i>19</i>
<i>2.3.4. Desempenho das Estruturas TPMS à Compressão.</i>	<i>20</i>
2.4. Pós-Tratamento Superficial.....	23
<i>2.4.1. Tratamentos Subtrativos.....</i>	<i>23</i>

2.4.2. Tratamentos Não Subtrativos.	24
2.4.3. Tratamentos Híbridos.	25
Capítulo 3.....	27
Métodos e materiais.....	27
3.1. Processo de Produção pelo Método de PBF	28
3.2. Material.....	29
3.2.1. Parâmetros usados.	30
3.3. Validação Dimensional e Geométrica.....	31
3.3.1. Planeza.....	31
3.3.2. Ângulos de Compensação (Spring Back).	32
3.3.3. Diâmetro dos Furos.....	33
3.3.4. Distância Entre Furos.	34
3.3.5. Rugosidade de Várias Superfícies.	35
3.3.6. Posição de Furos	35
3.3.7. Raios de Moldagem	36
3.3.8. Curvaturas	36
3.3.9. Dimensões Lineares nos Eixos de Coordenadas X, Y e Z	37
3.3.10. Artefacto Produzido.....	37
3.4. Pós-Tratamento Superficial.....	41
3.5. Desenvolvimento da Estrutura para Preenchimento da Ferramenta ..	43
Capítulo 4.....	47
Resultados e Discussão	47
4.1. Validação Dimensional e Geométrica dos Artefactos produzidos	48
4.1.1. Planeza.....	48
4.1.2. Forma.....	49
4.1.3. Posição de furos.....	51
4.1.4. Dimensões gerais.....	52
4.1.5. Diâmetro de furos	53
4.1.6. Raios de moldagem.....	56
4.1.7. Ângulos de compensação.....	57
4.1.8. Distâncias entre furos.....	58
4.1.9. Distâncias lineares nos eixos de coordenadas X e Y.....	59
4.1.10. Distâncias lineares no eixo de coordenadas Z:.....	61
4.1.11. Análise de Resultados Relativamente Controlo Dimensional e Geométrica	

<i>dos Artefactos produzidos.....</i>	<i>62</i>
4.2. Resultados do Pós-Tratamento Superficial	64
4.3. Resultados dos Ensaios de Compressão às Estruturas	67
Capítulo 5.....	72
Apresentação do Caso de Estudo	72
5.1. Introdução.....	73
5.2. Ferramentas de Moldagem.....	74
<i>5.2.1. Ciclo de Desenvolvimento de Ferramentas.</i>	<i>76</i>
<i>5.2.2. Custo de Fabrico das Ferramentas.</i>	<i>77</i>
<i>5.2.3. Projeto da Ferramenta.</i>	<i>77</i>
<i>5.2.4. Aplicação da Estrutura em DfAM.</i>	<i>78</i>
<i>5.2.5. Fabricação da Ferramenta.....</i>	<i>79</i>
<i>5.2.6. Controlo Dimensional e Estado de Superfície.....</i>	<i>81</i>
5.3. Massa da Ferramenta Produzida	86
5.4. Ensaio de Moldagem e Aprovação Dimensional de Peças Produzidas	86
5.5. Análise Comparativa de Custos	91
Capítulo 6.....	93
Conclusões e Proposta de Trabalhos Futuros	93
6.1. Conclusões.....	94
6.2. Proposta de Trabalhos Futuros	97
Bibliografia	99
Anexo I	A.1
Desenho do Artefacto	A.1
Anexo II	A.2
Relatórios de Controlo Dimensional Dos Artefactos na Placa de Impressão	A.2
Anexo III	A.3
Relatórios de Controlo Dimensional Dos Artefactos Sem Placa de Impressão	A.3
Anexo IV.....	A.4
Relatórios de Controlo Dimensional Dos Artefactos Com Pós-Tratamento Superficial.....	A.4
Anexo V.....	A.5

Relatório de Controlo Dimensional Da Ferramenta	A.5
--	------------

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Processo por Fusão em Camada de Pó PBF (adaptado) [6].	9
Figura 2.2 – Exemplo de vários componentes redesenhados em um único (adaptado) [8].	10
Figura 2.3 – Exemplo de defeitos localizados, falta de fusão e fissuras (adaptado) [7].	11
Figura 2.4 – Fluxo do processo DfAM aplicado ao fabrico aditivo (adaptado) [8].	12
Figura 2.5 – Distorções térmicas: A) Ideal; B) fraca fusão do pó, descontinuidade térmica; C) sobreaquecimento; D) temperatura insuficiente (adaptado)[12].	15
Figura 2.6 – Os 4 desafios e constrangimentos críticos do PBF para o DfAM (adaptado)[12].	16
Figura 2.7 – Várias estruturas (adaptado do <i>3DExperience</i> e artigos) [8], [14], [15].	18
Figura 2.8 – Célula unitária em TPMS (adaptado) [8].	19
Figura 2.9 – Célula unitária com densidades relativas diferentes [14].	19
Figura 2.10 – Estruturas TPMS; a) <i>Diamond</i> ; b) <i>Gyroid</i> ; c) IWP; d) <i>Schwarz Primitive</i> [14].	20
Figura 2.11 – Resultados das estruturas TPMS à compressão (adaptado) [14].	22
Figura 2.12 – Pós-tratamentos de superfície (adaptado) [16], [17].	24
Figura 2.13 – Textura das superfícies resultantes do pós-tratamento (adaptado) [9].	25
Figura 2.14 – Rugosidade resultante do pós-tratamento (adaptado)[9].	26
Figura 3.1 – RENISHAW RenAM 500Q Ultra.	28
Figura 3.2 – Exemplo de ferramenta com as tolerâncias utilizadas geralmente.	32
Figura 3.3 – Exemplos de ângulos de compensação (Spring Back).	33
Figura 3.4 – Furos de ferramentas e as suas tolerâncias.	33
Figura 3.5 – Furos de ferramentas e as suas tolerâncias.	34

Figura 3.6 – Exemplo de como utilizar os furos referências.....	35
Figura 3.7 – Tolerância geométrica de posição dos furos.....	36
Figura 3.8 – Tolerância geométrica de forma na superfície funcional da ferramenta.....	37
Figura 3.9 – Artefacto projetado.....	38
Figura 3.10 – Os 4 artefactos a serem impressos identificados de L1 a L4.	39
Figura 3.11 – Suportes utilizados nos 4 artefactos.	39
Figura 3.12 – Máquina CMM KRONOS NT 40-15-13.	41
Figura 3.13 – Rugosímetro TESA RUGOSURF 20.....	42
Figura 3.14 – Zonas de medição de rugosidade nos artefactos.....	43
Figura 3.15 – Provetes fabricados por PBF.	45
Figura 3.16 – Ensaio de compressão.....	46
Figura 4.1 – Resultados do controlo da planeza.	49
Figura 4.2 – Resultados do controlo de forma.	50
Figura 4.3 – Suportes partidos.	51
Figura 4.4 – Resultados do controlo da posição de furos.	52
Figura 4.5 – Resultados do controlo das dimensões gerais.....	53
Figura 4.6 – Resultados do controlo dos diâmetros dos furos de Ø12.....	54
Figura 4.7 – Resultados do controlo dos diâmetros dos furos de Ø10, Ø6 e Ø5.	55
Figura 4.8 – Resultados do controlo dos raios de moldagem.	56
Figura 4.9 – Resultados do controlo dos ângulos.	57
Figura 4.10 – Resultados do controlo das distâncias entre furos.....	59
Figura 4.11 – Resultados do controlo das dimensões nos eixos X e Y....	60
Figura 4.12 – Resultados do controlo das dimensões no eixo Z.....	62
Figura 4.13 – Distorção dos artefactos após análise dimensional.	63
Figura 4.14 – Rugosidade dos artefactos antes e após tratamento superficial no topo.	65
Figura 4.15 – Rugosidade dos artefactos antes e após tratamento superficial na lateral.	65
Figura 4.16 – Resultados em percentagem de redução da rugosidade no topo.	66
Figura 4.17 – Resultados em percentagem de redução da rugosidade na	

lateral.	66
Figura 4.18 – Tensão de cedência à compressão.	69
Figura 4.19 – Módulo elástico à compressão.....	70
Figura 5.1 – Ferramenta selecionada para o caso de estudo.	75
Figura 5.2 – Base da ferramenta.....	75
Figura 5.3 – Ciclo de desenvolvimento de ferramentas.	76
Figura 5.4 – Aplicação da estrutura <i>ISOGRID</i> à ferramenta (vista pela base da ferramenta).....	78
Figura 5.5 – Suportes utilizados no fabrico da ferramenta.	79
Figura 5.6 – Fabricação da ferramenta.	80
Figura 5.7 – Ferramenta após fabricação.	80
Figura 5.8 – Pós-tratamento de superfície por pedras vibratórias.....	81
Figura 5.9 – Zonas de medição de rugosidade na ferramenta.....	82
Figura 5.10 – Ferramenta posicionada para controlo em CMM.	83
Figura 5.11 – Deformação em forma de U na base da ferramenta.	83
Figura 5.12 – Deformação em forma de U da parte superior da ferramenta.	84
Figura 5.13 – Contração da ferramenta na posição A.....	84
Figura 5.14 – Contração da ferramenta na posição B.....	85
Figura 5.15 – Diferença de coloração da ferramenta.	85
Figura 5.16 – Verificação da massa da ferramenta.....	86
Figura 5.17 – Ferramenta na prensa de borracha pronta para estampagem.	87
Figura 5.18 – Peça posicionada para moldagem e peça moldada na ferramenta.....	88
Figura 5.19 – Peças fabricadas de acordo com as posições da ferramenta.	88
Figura 5.20 – Zonas com marcas físicas provocadas pela rugosidade....	89
Figura 5.21 – Ferramenta de controlo.....	90
Figura 5.22 – Controlo das peças 1 e 2.	90
Figura 5.23 – Controlo das peças 3 e 4.	91

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades físicas dos provetes analisados (adaptado)[14].	21
Tabela 3.1 – Propriedades do pó da liga de alumínio AlSi10Mg e composição química [18].	29
Tabela 3.2 – Rugosidade padrão para as ferramentas de moldagem.	35
Tabela 3.3 – Itens do desenho com respetiva cota e tolerância.	40
Tabela 3.4 – Características e identificação dos provetes.	44
Tabela 4.1 – Resultados do controlo da planeza (valores em mm).	48
Tabela 4.2 – Resultados do controlo de forma (valores em mm).	50
Tabela 4.3 – Resultados do controlo da posição de furos.	51
Tabela 4.4 – Resultados do controlo das dimensões gerais.	52
Tabela 4.5 – Resultados do controlo dos diâmetros dos furos.	54
Tabela 4.6 – Resultados do controlo dos raios de moldagem.	56
Tabela 4.7 – Resultados do controlo dos ângulos.	57
Tabela 4.8 – Resultados do controlo das distâncias entre furos.	58
Tabela 4.9 – Resultados do controlo das dimensões nos eixos X e Y.	60
Tabela 4.10. – Resultados do controlo das dimensões no eixo Z.	61
Tabela 4.11 – Média aritmética da rugosidade (Ra) inicial e com pós- tratamento superficial.	64
Tabela 4.12 – Características físicas dos provetes após fabricação.	67
Tabela 5.1 – Redução de massa com a aplicação da estrutura prevista.	79
Tabela 5.2 – Rugosidade da ferramenta.	82
Tabela 5.3 – A massa da ferramenta fabricada em PBF e sua comparação.	86
Tabela 5.4 – Resultados do controlo das peças fabricadas.	91

Lista de Siglas e Acrónimos

3D	Três Dimensões	<i>Three Dimensions</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador	<i>Computer-Aided Design</i>
CMM	Máquina de Medição por Coordenadas	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
DA	Decapagem Ácida	<i>Acid Etching</i>
DED	Deposição com Energia Direcionada	<i>Directed Energy Deposition</i>
DfAM	Projeto para o Fabrico Aditivo	<i>Design for Additive Manufacturing</i>
EXM/MEX	Extrusão de Material	<i>Material Extrusion</i>
FAI	Inspeção do Primeiro Artigo	<i>First Article Inspection</i>
FCP/PBF	Fusão em Camada de Pó	<i>Powder Bed Fusion</i>
FPC/VPP	Fotopolimerização em Cuba	<i>Vat Photopolymerization</i>
JA	Jato de Areia	<i>Sandblasting</i>
JL/BJT	Jato Ligante	<i>Binder Jetting</i>
JMT/MJT	Jato de Material	<i>Material Jetting</i>
LF/SHL	Laminação de Folhas	<i>Sheet Lamination</i>
MA/AM	Manufatura Aditiva	<i>Additive Manufacturing</i>
NRC	Custo Não Recorrente	<i>Non-Recurring Cost</i>
PV	Acabamento por Pedras Vibratórias	<i>Turbo Finishing</i>
Ra	Média Aritmética da Rugosidade	<i>Arithmetic Mean Roughness</i>
SEA	Absorção Específica de Energia	<i>Specific Energy Absorption</i>
STL	Linguagem de Tesselação Padrão	<i>Standard Tessellation Language</i>
TPMS	Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas	<i>Triply Periodic Minimal Surfaces</i>

Lista de Símbolos

ρ^* Densidade da Estrutura da Célula Unitária

ρ_s Densidade do Material Sólido

Capítulo 1

Introdução

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao trabalho desenvolvido. Este está organizado em 3 subcapítulos onde é apresentada a introdução e âmbito do trabalho, os objetivos e a estrutura do documento.

1.1. Introdução e Âmbito do Trabalho

A crescente pressão competitiva a que a indústria transformadora está sujeita tem impulsionado a procura por soluções tecnológicas capazes de reduzir os ciclos de desenvolvimento e produção formas capazes de aumentar a competitividade de uma organização. São aspetos fundamentais para o desenvolvimento produtivo e crescimento no sector em que se insere. No setor aeronáutico, em particular no fabrico de ferramentas dedicadas ao fabrico de peças específicas, são processos com grande ciclo de projeto e fabricação, com a crescente exigência na redução do ciclo produtivo, sendo evidente a necessidade de implementação de tecnologias inovadoras. É neste contexto que o fabrico aditivo metálico surge, de forma a auxiliar e dar resposta como tecnologia capaz de tornar uma organização mais competitiva. É uma tecnologia com muito potencial e estratégica nos próximos tempos, que irá possibilitar novas formas de projeto e fabrico de componentes complexos, certamente com um tempo de ciclo produtivo mais curto, dada a simplificação do processo quando comparado com convencionais, com a maquinação CNC.

As ferramentas para processos de moldagem de peças através de prensa hidrofórmica ou prensa de borracha, são muito importantes na moldagem de peças com geometrias mais complexas. Geralmente são peças que apresentam curvaturas na qual somente através deste processo é possível fabricar este tipo de peças. Também permitem garantir maior repetibilidade no volume e tolerâncias, visto ser a ferramenta que determina a posição de moldagem da peça, aumentando a repetibilidade do processo. Contudo, o desenvolvimento de ferramentas por processos convencionais implica ciclos de fabricação maiores, desde a aquisição da matéria até à montagem das ferramentas. Estas limitações impactam diretamente na resposta de entrega das primeiras peças aos clientes tendo ciclos maiores, possíveis custos superiores e tornando o processo pouco competitivo.

O fabrico aditivo metálico, ao permitir a criação de geometrias complexas a partir de modelos em CAD, introduz um avanço no desenvolvimento e fabricação de ferramentas de produção. A possibilidade de integrar estruturas reticulares que permitam reduzir a massa sem comprometer o desempenho da ferramenta no ciclo produtivo, melhorar geometrias e a capacidade de transformar vários componentes num único traz melhorias significativas na competitividade do processo produtivo. Para que a integração completa

do fabrico aditivo é necessário a integração de conceitos de DfAM para que permita desenvolver geometrias inovadoras, somente possíveis pelo fabrico aditivo e que seja competitivo quando comparado com os processos convencionais.

Apesar do seu potencial na implementação do fabrico aditivo metálico no desenvolvimento e fabrico de ferramentas de moldagem, requer confirmação do potencial através de um projeto que estude os principais fatores no fabrico de ferramentas e a sua adaptação ao fabrico aditivo. Este projeto não deve somente focar no processo de fabrico, assim como no aspeto económico e ciclo de fabrico da ferramenta.

O presente projeto surge na potencialidade de aumentar a competitividade da organização Lauak no fabrico de componentes aeronáuticos que requerem o processo de moldagem através de prensas hidrofórmica ou de borracha, existentes nas suas fábricas instaladas em Portugal. O processo atualmente, após o projeto da ferramenta, passa à fase de fabricação da ferramenta pelo processo de maquinação subtrativa. A fabricação é realizada em subcontratação, neste processo existe sempre um período de orçamentação incluído ao tempo de fabricação que faz o tempo total de fabricação completo variar entre o mínimo de 5 a 9 semanas, este tempo de fabrico agregado ao ciclo de fabricação das peças.

Deste modo, este projeto pretende implementar o fabrico aditivo metálico, por fusão em camada de pó (*PBF*) no desenvolvimento de ferramentas utilizadas em prensas hidrofórmica e de borracha. Pretende-se, sobretudo, reduzir significativamente o ciclo de fabricação dessas ferramentas, possibilitando a entrega das peças aos clientes em prazos mais curtos, garantindo simultaneamente competitividade económica e eficiência produtiva.

1.2. Objetivos

O objetivo geral do presente projeto é desenvolver e fabricar e testar em ambiente industrial ferramentas produzidas com recurso ao processo de fabrico aditivo metálico, para a produção de componentes aeronáuticos através de prensa hidrofórmica/borracha, de forma que processo seja viável e competitivo.

Objetivos específicos:

Caracterização dimensional e geométrica. Quantificar tolerâncias e desvios geométricos em geometrias representativas das ferramentas de moldagem, fabricadas por PBF, e avaliar se são compatíveis com requisitos aeronáuticos ou eventualmente são possíveis de correção posterior;

Estruturas de preenchimento de ferramentas. Pretende-se redesenhar estas ferramentas de moldagem, com vista a tirar todo o potencial da tecnologia de fabrico por PBF, com base em princípios de *design for additive manufacturing* (DfAM), com a integração de estruturas inovadoras para o preenchimento interior da ferramenta. A implementação destas estruturas inovadoras tem como objetivos reduzir o material utilizado e o tempo de fabricação/custos das ferramentas;

Qualidade superficial e pós-processamento. Avaliar vários tratamentos existentes na Lauak, que permitam melhorar o acabamento superficial, (p. ex., jato de areia e pedras vibratórias), com o objetivo de reduzir a rugosidade e atingir níveis de acabamento compatíveis com as exigências aeronáuticas;

Caso de estudo industrial. Conceber, produzir, pós-processar e verificar uma ferramenta, segundo procedimentos aeronáuticos, produzida com base em resultados do presente estudo. Ensaia-la em ambiente industrial na produção de peças moldadas, analisando a viabilidade e aspetos relacionados com a competitividade deste processo de fabrico, comparativamente com processos convencionais.

1.3. Estrutura do Trabalho

O presente relatório está organizado em 5 capítulos, para além do presente.

No **presente capítulo** é apresentada a introdução do trabalho, na qual, é feito uma breve descrição do âmbito do trabalho, os objetivos e estrutura do documento.

No **segundo capítulo** é realizada uma revisão bibliográfica sobre o fabrico aditivo, sendo o foco no processo por fusão em camada de pó PBF. São citadas particularidades sobre o PBF, vantagens e limitações e os acabamentos de pós-processamento. Também são indicadas as particularidades do DfAM. São apresentadas várias estruturas para

possível preenchimento interno de ferramentas, como reticulares e TPMS, com enfoque na sua resistência estrutural à compressão. No final, são analisados vários tipos de acabamentos de superfícies aplicados ao processo de PBF.

No **terceiro capítulo** são apresentados os métodos e materiais, no sentido de desenvolver um processo de investigação que permita corresponder com os objetivos traçados e dar resposta em vários aspetos em que a revisão bibliográfica feita não permitiu tirar as devidas conclusões. Apresentam-se os detalhes do processo de fabrico, material e meios usados para o desenvolvimento experimental do presente trabalho, nomeadamente validação dimensional e geométrica, aplicação de diversos pós-tratamentos superficiais e o procedimento realizado para estudar o comportamento à compressão de diferentes estruturas destinadas ao preenchimento interno de ferramentas de estampagem.

No **quarto capítulo** são apresentados os resultados e discussão dos estudos conduzidos no capítulo anterior. Aborda-se o controlo dimensional e geométrico dos artefactos produzidos, o pós-tratamento superficial realizado aos artefactos e os resultados do ensaio de compressão a várias estruturas.

No **quinto capítulo** é apresentado um caso de estudo de uma ferramenta de moldagem, para prensa hidrofórmica/borracha, tendo em conta alguns resultados obtidos no capítulo quatro. A ferramenta foi produzida e testada em ambiente industrial, terminando-se este capítulo com uma análise em termos de viabilidade, custos e redução do tempo de fabrico.

O **sexto e último capítulo** apresenta as conclusões e as propostas de trabalhos futuros. Este capítulo faz a conclusão do trabalho realizado nos capítulos anteriores, sendo apresentadas as conclusões e perspetivas futuras do fabrico de ferramentas de moldagem através do processo de fusão em camada de pó.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre aspetos fundamentais do presente trabalho, nomeadamente abordagem ao processo de fabrico em cama de pó (PBF), conceitos de *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), comportamento à compressão de estruturas reticulares e *Triply Periodic Minimal Surface* (TPMS) e operações de pós-processamento com vista à melhoria de acabamento superficial de superfícies produzidas pelo processo de PBF.

2.1. Fabrico Aditivo

O processo de fabrico aditivo, também designado por manufatura aditiva (MA) pela norma NP EN ISO/ASTM 52900 [1] ou *additive manufacturing (AM)* pela ISO/ASTM 52900 [2], corresponde a um conjunto de tecnologias que produzem componentes tridimensionais pela adição sucessiva de material a partir de um modelo tridimensional 3D [3].

O interesse da introdução de tecnologias de fabrico aditivo na indústria está associado, sobretudo, ao potencial de melhoria dos processos de fabrico de componentes, nomeadamente através da redução de desperdícios, da diminuição dos prazos de fabrico, da elevada flexibilidade de produção, da possibilidade de obtenção de geometrias complexas e da redução do ciclo de desenvolvimento e de fabrico de produtos mais curtos [4].

2.1.1. Etapas do Fabrico Aditivo.

O fabrico aditivo pode ser estruturado em sete etapas fundamentais independentemente da tecnologia utilizada na fabricação. De forma geral, estas etapas são [5]:

1. **Projeto CAD.** O componente é concebido recorrendo a um *software* de modelação tridimensional (CAD);
2. **Criação de ficheiro STL.** O modelo tridimensional é convertido para o formato STL, de modo a tornar-se compatível com o equipamento de fabrico aditivo.
3. **Preparação da fabricação.** O ficheiro STL é importado para o *software* de preparação, onde as peças são posicionadas e orientadas no volume de construção, sendo posteriormente definidos os parâmetros de fabrico. Concluída esta fase, são geradas e transferidas para a máquina as instruções necessárias à produção;
4. **Fabricação.** O componente é fabricado segundo a tecnologia de fabrico aditivo selecionada, podendo o processo prolongar-se por várias horas;
5. **Remoção da peça e acabamento.** Após conclusão do fabrico, a peça é removida da placa, são removidos os suportes e realizam-se operações de acabamento e de pós-tratamento superficial.

6. **Controlo de qualidade.** O componente fabricado é inspecionado de forma a verificar a conformidade com os requisitos de projeto e a adequação à aplicação prevista.
7. **Aplicação.** O componente é integrado no sistema ou equipamento para o qual foi concebido.

2.1.2. Terminologias Normalizadas – ISO/ASTM 52900.

A norma ISO/ASTM 52900 foi desenvolvida com o propósito de estabelecer e definir um padrão nos termos utilizados pelas tecnologias de fabricação aditiva, e assim, facilitar a sua compreensão e harmonizar a comunicação destas tecnologias [1][2].

Os processos são referenciados pela norma em 7 categorias distintas, estas são [1][2]:

- Fusão em camada de pó (FCP) – *Powder bed fusion (PBF)*;
- Deposição com energia direcionada (DED) – *Directed energy deposition (DED)*;
- Extrusão de material (EXM) – *Material extrusion (MEX)*;
- Jato de material (JMT) – *Material jetting (MJT)*;
- Laminação de folhas (LF) – *Sheet lamination (SHL)*;
- Fotopolimerização em cuba (FPC) – *Vat photopolymerization (VPP)*;
- Jato ligante (JL) – *Binder jetting (BJT)*.

A tecnologia de fusão em camada de pó foi selecionada, de entre as sete categorias existentes, por se tratar de uma tecnologia disponível na organização e pela sua potencial aplicação no aumento da competitividade da Lauak na fabricação de ferramentas para prensa hidrofórmica/borracha. Neste contexto, torna-se necessário aprofundar o enquadramento teórico que sustenta a adoção desta tecnologia.

2.1.3. Processo por Fusão em Camada de Pó - FCP(Powder Bed Fusion - PBF).

O processo de fusão em camada de pó consiste na sinterização ou fusão sucessiva de camadas de pó metálico mediante da aplicação de energia de elevada intensidade. A fusão pode ser realizada por um ou vários feixes laser, sendo que, entre cada passagem, as camadas previamente depositadas devem estar solidificadas antes da fusão da camada

seguinte [3].

Na figura 2.1 é apresentado o processo, o qual assenta na fusão sucessiva de camadas de pó metálico, realizada de acordo com a geometria definida no modelo CAD da peça. Durante a fabricação, uma camada uniforme de pó é distribuída sobre a placa de construção através do alimentador; de seguida, o feixe (ou feixes) de laser funde a camada nas regiões correspondentes à geometria do componente, permanecendo o pó não fundido solto e a desempenhar a função de suporte das camadas subsequentes. Após cada camada, a plataforma desce ligeiramente, possibilitando uma nova camada de pó, repetindo-se o processo até que a peça esteja completamente fabricada. O pó não fundido pode ser recuperado e reutilizado. A câmara de impressão é mantida sob atmosfera inerte, geralmente árgon, e a temperatura é controlada ao longo de todo o processo[3] [6].

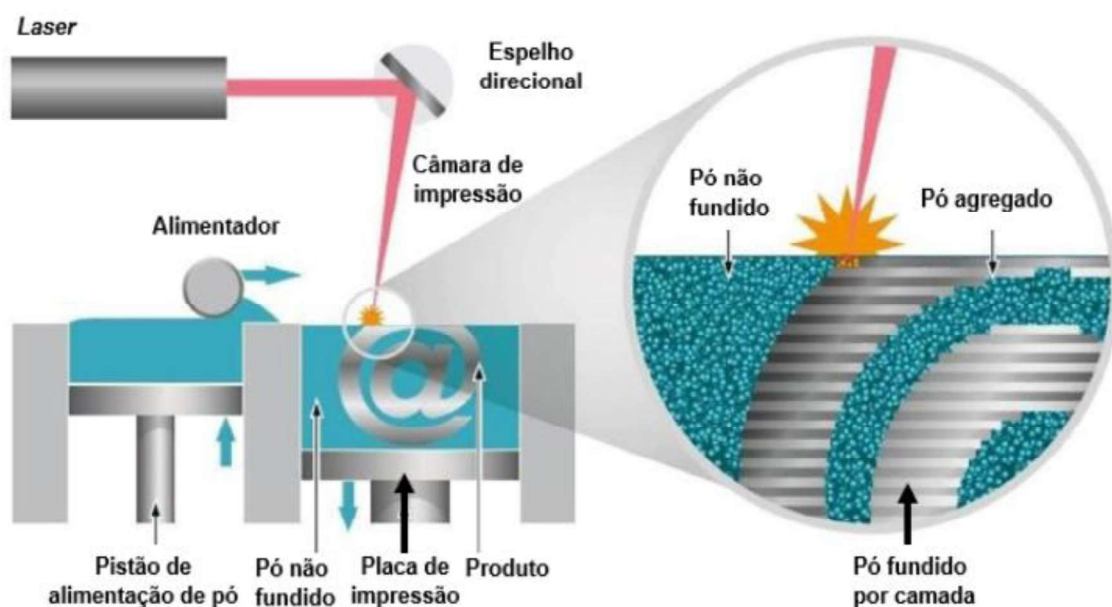


Figura 2.1 – Processo por Fusão em Camada de Pó PBF (adaptado) [6].

2.1.4. Vantagens e Limitações do Processo

O processo de fabrico aditivo PBF, contribui para o aumento de competitividade industrial, oferecendo um conjunto de vantagens que não podem ser alcançadas por métodos convencionais de fabrico. Apesar do seu potencial, o processo que apresenta igualmente limitações quando aplicado à produção de componentes industriais. De seguida, apresenta-se uma lista sistematizada das principais vantagens e limitações associadas ao processo [3], [7].

Vantagens do Processo [3]:

- **Boa precisão dimensional**, permitindo a produção de componentes com tolerâncias mais reduzidas em comparação com os processos convencionais.
- **Boa densidade**, possibilitando a obtenção de componentes com densidade muito próxima da densidade teórica do material.
- **Novas possibilidades de projeto**, viabilizando geometrias que seriam impossíveis através de processos convencionais, esta liberdade permite explorar a otimização topológica, reduzindo material e em alguns casos redução de dimensões necessárias, permite conceitos inovadores.
- **Redução de massa**, decorrente da utilização de topologias otimizadas, estruturas *Lattice*, TPMS ou outras que permite alcançar grandes percentagens de redução de massa em determinados componentes, o que reduz menos utilização de material e menos tempo de fabrico.
- **Redução do *lead time***, permitindo fabricar ferramentas e peças mais rapidamente do que os processos convencionais, não é necessária a utilização de ferramentas no processo e permite fabricar protótipos para validar outros processos.
- **Projeto de vários componentes em um só componente**, uma vez que, em processos convencionais, pode ser necessário fabricar várias peças em processos diferentes e posteriormente realizar uma montagem ou soldadura para unir os componentes, no PBF é possível desenvolver componentes únicos sem a necessidade de processos de união. Na figura 2.2 está indicado um exemplo de uma estrutura de vários componentes redesenhada em um único componente.

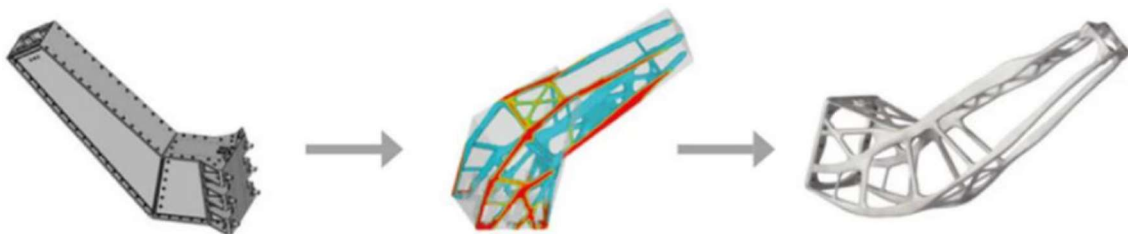


Figura 2.2 – Exemplo de vários componentes redesenhados em um único (adaptado) [8].

Limitações do processo[3][9]:

- **Custo elevado**, uma vez que o pó metálico apresenta, geralmente, um preço

superior ao das matérias-primas utilizadas nos processos convencionais, acrescido de custos de operação mais elevados.

- **Volume de construção limitado**, somente é possível fabricar componentes nas dimensões uteis da máquina, normalmente, são dimensões reduzidas.
- **Necessidade de pós-tratamento superficial**, são sempre necessárias etapas adicionais após o fabrico de componentes para remoção de suportes e acabamento superficial.
- **Superfícies rugosas e presença de defeitos localizados**, uma vez que os componentes produzidos exibem níveis de rugosidade elevada e podem existir defeitos localizados e podem afetar o desempenho mecânico dos componentes. A rugosidade Ra típica do processo é entre os 9 e 17 μm , mas pode atingir os 30 μm . Os defeitos localizados podem ser fissuras, falta de fusão, porosidade e aglomerados, na figura 2.3 está representado 2 exemplos de defeitos localizados [7].

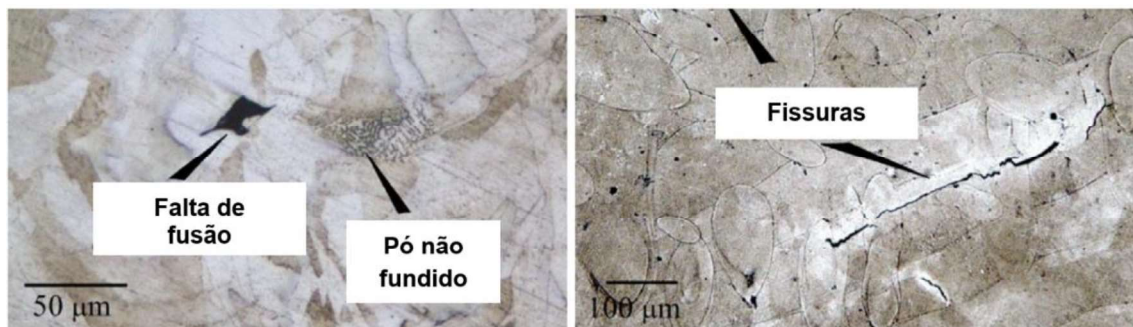


Figura 2.3 – Exemplo de defeitos localizados, falta de fusão e fissuras (adaptado) [7].

- **Dificuldade em manter o processo sob controlo**, existem vários parâmetros a serem monitorizados e controlados, o que obriga a existência de procedimentos e instruções técnicas claros e bem definidos, que indiquem as etapas a executar, mantendo o processo sob controlo antes, durante e após fabricação dos componentes. Os registos resultantes do processo são essenciais para a análise de possíveis anomalias.
- **Não indicado para a produção em série**, é um processo adequado para produção com baixo volume e elevado valor, não sendo indicado para grandes volumes produtivos.

2.2. Design for Additive Manufacturing (DfAM)

O *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) é a fase de projeto de um componente em CAD antes da fase de fabricação por fabricação aditiva, esta fase tem como objetivo obter componentes possíveis de serem fabricados pelas tecnologias de fabricação aditiva, melhorando a sua geometria, reduzindo tempo de fabricação, diminuir os custos associados e minimizando o material utilizado, tudo isto em comparação com o projeto de um componente para tecnologias convencionais [8].

O processo de DfAM melhorar o projeto convencional e adequa-lo ao fabricação aditivo. Numa primeira fase, é necessário conhecer os requerimentos de projeto para melhor aplicar as restrições do fabricação aditivo, para um projeto ideal, é necessário conhecer as necessidades do produto e as características do fabricação aditivo. As melhorias no produto podem incluir, por exemplo, a redução de massa através da aplicação de estruturas que diminuem a densidade do componente [8].

Na figura 2.4 encontra-se representado o fluxograma do processo de DfAM aplicado à redução de massa de um produto. O processo inicia-se com a definição dos requisitos de projeto, necessários para cumprir a finalidade do produto, seguem-se as regras de projeto de DfAM ao modelo, posteriormente, são aplicadas as regras de fabricação, como a orientação e a colocação de suportes. O produto é então fabricado e validado tendo em conta os requisitos definidos. Caso a redução de massa não seja satisfatória, o processo retorna à fase de projeto para redesenho, repetindo-se o ciclo até obter o produto final, respeitando os requisitos do projeto e do fabricação aditivo [8].

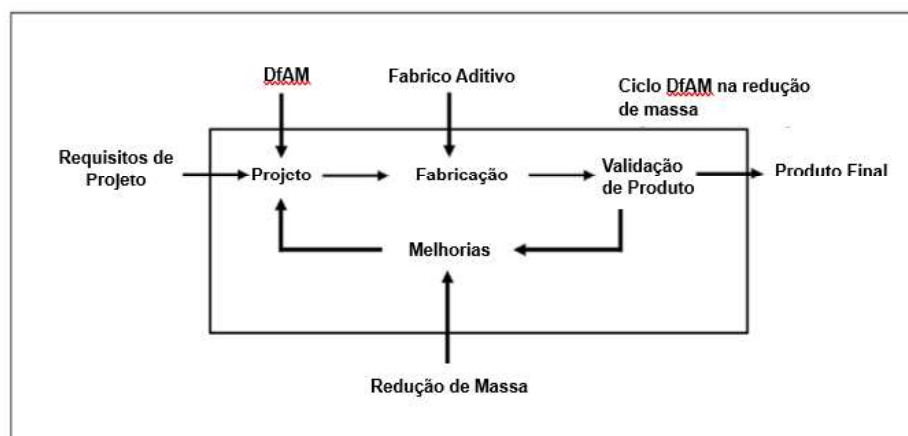


Figura 2.4 – Fluxo do processo DfAM aplicado ao fabricação aditivo (adaptado) [8].

Uma das fases importantes e fundamentais no fabrico aditivo é o projeto do componente a fabricar, nesta fase, o projetista deve conhecer as considerações específicas do fabrico aditivo, o que significa que deve selecionar a tecnologia de fabrico aditivo adequada e projetar tendo em conta as características desse processo[10].

No DfAM devem ser consideradas algumas regras durante a fase de projeto, de modo a mitigar problemas durante a fase de fabricação, estas regras podem incluir as seguintes[10][11]:

2.2.1. Regras de Projeto.

- Antes de projetar o componente, o seu objetivo dele deve ser claramente definido, permitindo selecionar a tecnologia de fabrico aditivo adequada.
- Ao projetar, deve ser contruído um modelo que permita reduzir a utilização de suportes.
- Ao projetar grandes pontes e zonas sem estruturas, é importante prever o uso de suportes na fabricação.
- O ficheiro resultando do projeto deve ser guardado em formato STL.
- Ao criar o ficheiro STL deve-se considerar os desvios de tolerância.
- A colocação de paredes entre os ângulos de 45° a 135° em relação à placa de impressão pode permitir a fabricação sem, ou com reduzida utilização de suportes.
- Devem ser verificadas as paredes de espessura finas, espessuras inferiores a 0,5 mm podem gerar problemas de fabricação, sendo recomendável utilizar valores superiores a 1 mm, sempre que possível.
- Furos posicionados a 90° relativamente à placa de fabricação terão melhor acabamento.
- O diâmetro dos furos fabricados será sempre inferior ao modelo CAD.
- Os cilindros devem ser fabricados com diâmetro superior a 1mm.
- Os furos devem ser fabricados com diâmetro superior a 0,8mm.
- A utilização de suportes é importante, quando a geometria o exige, o espaçamento máximo recomendado entre eles é de 2mm.

Não só as regras de projeto devem ser consideradas pelo projetista, dependendo da tecnologia selecionada, é importante conhecer as regras para a fabricação do componente em fabrico aditivo, como complemento às regras de projeto. Em baixo apresentam-se algumas das regras de fabricação a considerar[10][11].

2.2.2. Regras de Fabricação.

- Antes da fabricação, é obrigatório verificar se a geometria tem irregularidades, como superfícies abertas ou torcidas.
- A dimensão da peça deve corresponder à dimensão da máquina selecionada para a fabricação.
- A orientação da geometria pode afetar a qualidade da peça e o tempo de fabrico.
- Orientar a peça de maneira a tentar colocar os furos perpendiculares à placa de impressão, sempre que possível e desde que tal não comprometa a qualidade da fabricação.
- Na fabricação de superfícies curvas, deve-se escolher camadas mais finas para evitar o efeito escada, a utilização de suportes também pode melhorar o acabamento.
- Ao fabricar grandes pontes e saliências, deve-se verificar a melhor orientação para reduzir a utilização de suportes.
- Ao colocar suportes, deve-se otimizar a sua distribuição, tendo em conta a finalidade da peça.
- Ao fabricar elementos finos e altos, a velocidade da impressão deve ser reduzida.
- Deve-se evitar colocar paredes com ângulo inferior a 30°, de modo a evitar o efeito o efeito escada.

2.2.3. Desafios e constrangimentos do processo PBF para o DfAM.

No projeto de um componente idealizado para o fabrico aditivo por PBF existem quatro desafios e constrangimentos críticos a considerar durante o processo de conceção, pois os requisitos de projeto e utilização do componente podem gerar dificuldades no fabrico, tendo em conta as limitações do processo e a capacidade do fabrico aditivo. Para

o PBF, os principais desafios a considerar no âmbito do DfAM são: a resolução do processo, a distorção térmica do componente, a necessidade de utilização de suportes em zonas funcionais e a rugosidade superficial [12].

- **Resolução do processo**, no PBF deve ser considerado a espessura de cada camada de pó fundido. As camadas variam de acordo com a máquina, podem ser 30 μm 60 μm ou 90 μm . Veios ou furos orientados na vertical não apresentam problemas de resolução, mas quando estão inclinados ou posicionados na horizontal, é necessário efeitos nas tolerâncias da peça [12].
- **Distorção térmica**, são distorções geométricas nos componentes fabricados, provocadas por excesso ou a falta de temperatura durante a fusão do pó. Na figura 2.5 é possível observar três tipos de distorção provocadas pela variação térmica [13].

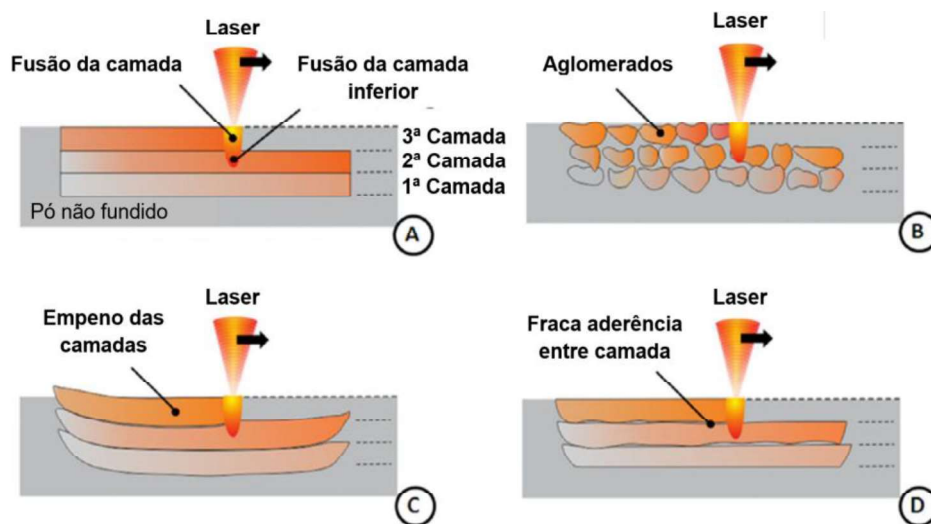


Figura 2.5 – Distorções térmicas: A) Ideal; B) fraca fusão do pó, descontinuidade térmica; C) sobreaquecimento; D) temperatura insuficiente (adaptado)[12].

- **Necessidade de suportes**, as peças necessitam de suportes externos e internos, dependendo da geometria a fabricar e da sua orientação. Os suportes têm como função manter a peça na posição correta e dissipar a energia térmica gerada. As zonas horizontais das peças devem ser sempre suportadas. Existem, contudo, regiões que, devido à sua função, não permitem a colocação de suportes, representando um desafio para a definição da estratégia de suporte [12].
- **Rugosidade superficial**, o processo PBF gera superfícies rugosas, que podem afetar o desempenho geométrico e a resistência à fadiga. É sempre

necessária a aplicação de pós-tratamento superficial para reduzir a rugosidade, sendo estes tratamentos depende da finalidade da peça. Existem dois tipos principais de rugosidade superficial, a primeira resulta da fusão sucessiva das camadas e a segunda decorre da aderência de partículas de pó às superfícies fundidas [7]

Na figura 2.6 estão representadas os quatro desafios e constrangimentos do PBF para o DfAM, os quais se encontram listados em seguida [12]:

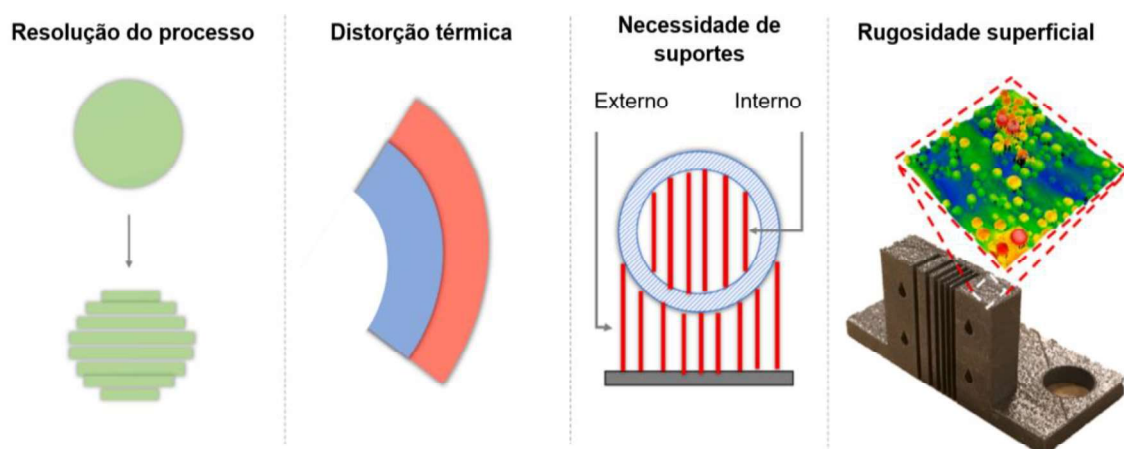


Figura 2.6 – Os 4 desafios e constrangimentos críticos do PBF para o DfAM (adaptado)[12].

2.3. Estruturas Reticulares e Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)

As estruturas TPMS são constituídas por células unitárias que são utilizadas para preenchimento espacial e podem ser aplicadas de forma repetida. Estas estruturas têm um elevado potencial na redução de peso dos componentes fabricados e apresentam benefícios na sua relação resistência-peso. Existem várias estruturas que podem possuir propriedades muito diferentes entre si, embora com a mesma finalidade, estas propriedades dependem da geometria da célula unitária[8].

As estruturas reticuladas são compostas por barras ou vigas conectadas em nós, formando uma rede. No caso das estruturas TPMS são superfícies contínuas, com geometria suave e periódica em três direções. [8].

Estas estruturas podem ser TPMS, reticuladas ou planas, nos próximos subcapítulos serão detalhadas e explicadas as suas características[8].

2.3.1. Diferentes Estruturas.

Existem várias estruturas utilizadas no fabrico aditivo, estas podem ser células unitárias baseadas em suportes ligados por nós, normalmente elementos finos, também designados de pilares, barras ou vigas, cujo conjunto formam treliças com diferentes geometrias, na figura 2.7 estão representadas oito células unitárias [8].

As estruturas unitárias baseadas em superfícies estão divididas em dois grupos: estruturas planas em rede, com parede perpendicular e estruturas TPMS. As estruturas planas suportam maior carga, mas apresentam maior dificuldade de fabrico. Na figura 2.7 são apresentadas as células unitárias baseadas em superfícies, incluindo os dois grupos existentes, no grupo TPMS são ainda apresentados dois subgrupos: estruturas TPMS de paredes finas, mais comuns no fabrico aditivo, e estruturas TPMS de paredes grossas, que não oferecem vantagem no fabrico aditivo devido às suas densidades relativas muito superiores, perdendo assim a vantagem da sua utilização [8].

A figura 2.7 apresenta, no total 27 estruturas diferentes possíveis de serem utilizadas em diversas aplicações [8].

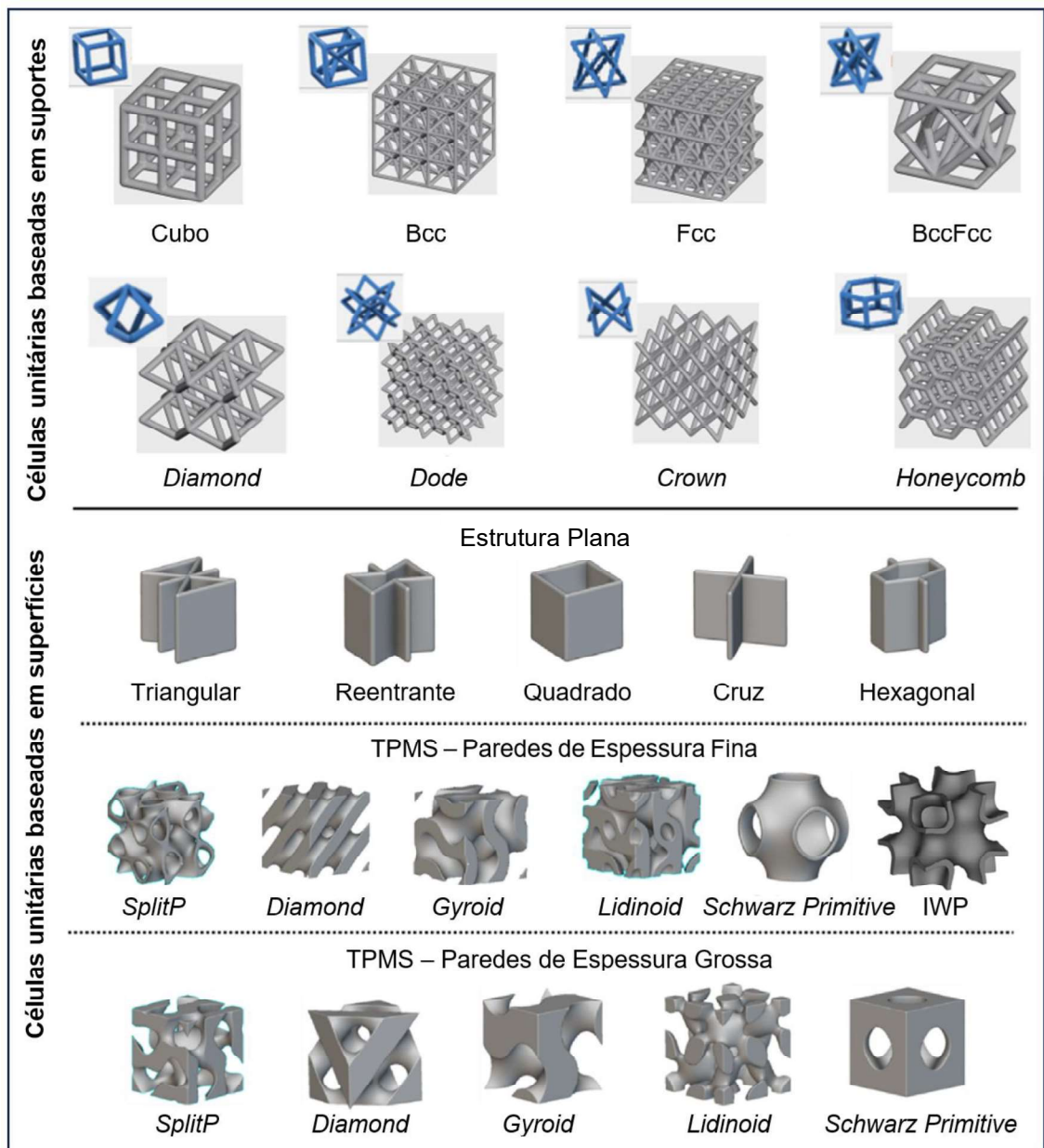


Figura 2.7 – Várias estruturas (adaptado do 3DExperience e artigos) [8], [14], [15].

2.3.2. Parâmetros da Célula Unitária.

A célula unitária é um cubo constituído por parâmetros como a dimensão do cubo, o tipo de estrutura e a espessura das paredes. A repetição de várias células unitárias iguais constitui a malha da estrutura, resultando numa configuração periódica. Na figura 2.8 está representada uma célula unitária e a sua repetição, constituindo uma estrutura periódica [8].

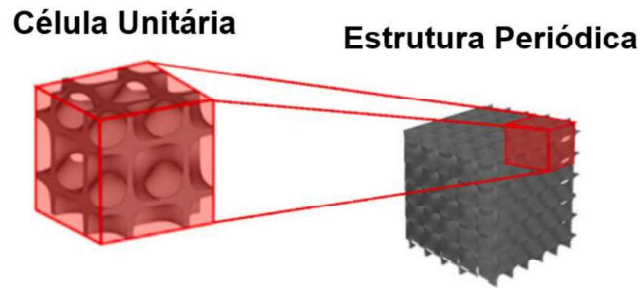


Figura 2.8 – Célula unitária em TPMS (adaptado) [8].

2.3.3. Densidade Relativa.

A densidade relativa, indicada como (ρ^*/ρ_s) , é determinada pela relação entre a densidade da estrutura da célula unitária (ρ^*) e a densidade do material sólido correspondente (ρ_s). Esta relação afeta de forma substancialmente as propriedades mecânicas e a resistência da estrutura TPMS [8].

Estruturas com baixa densidade relativa são mais flexíveis, tendem a deformar-se mais e apresentam menor resistência mecânica. Estruturas com alta densidade relativa oferecem maior rigidez e resistência mecânica, mas são mais suscetíveis a falhas abruptas[8].

Na figura 2.9 é possível observar a diferença entre uma célula unitária com baixa densidade relativa (a) e a mesma célula unitária com alta densidade relativa (b) [14].

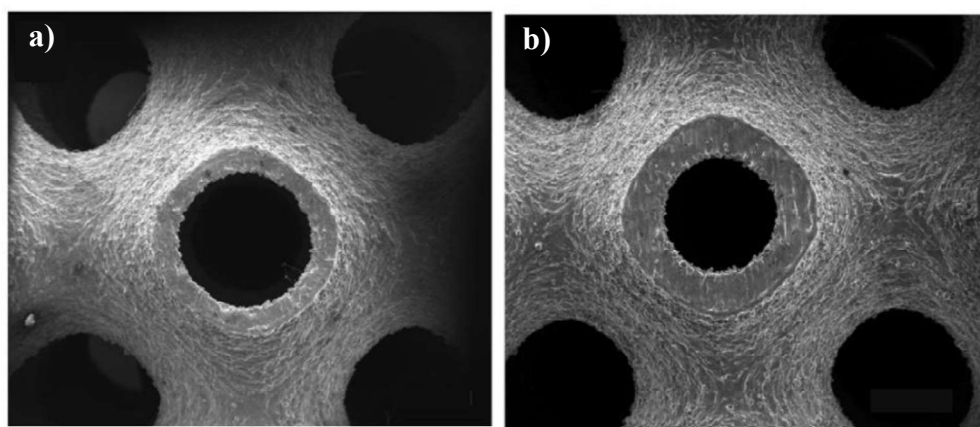


Figura 2.9 – Célula unitária com densidades relativas diferentes [14].

2.3.4. Desempenho das Estruturas TPMS à Compressão.

Existem alguns estudos sobre o desempenho mecânico das estruturas TPMS à compressão. Um desses estudos investiga o comportamento mecânico em compressão, tanto em regime *quasi-static* como em regime dinâmico, de estruturas celulares fabricadas pelo processo de fusão em camada de pó, utilizando o material aço inoxidável 316L[14].

Neste estudo foram analisadas quatro estruturas TPMS diferentes: *Diamond*, *Gyroid*, IWP e *Schwarz Primitive*. Cada estrutura foi fabricada com quatro densidades relativas distintas, de 13%, 16%, 19% e 21%. Os provetes apresentam dimensões de 20 mm de altura e 20 mm de diâmetro, como mostrado na figura 2.10 [14].

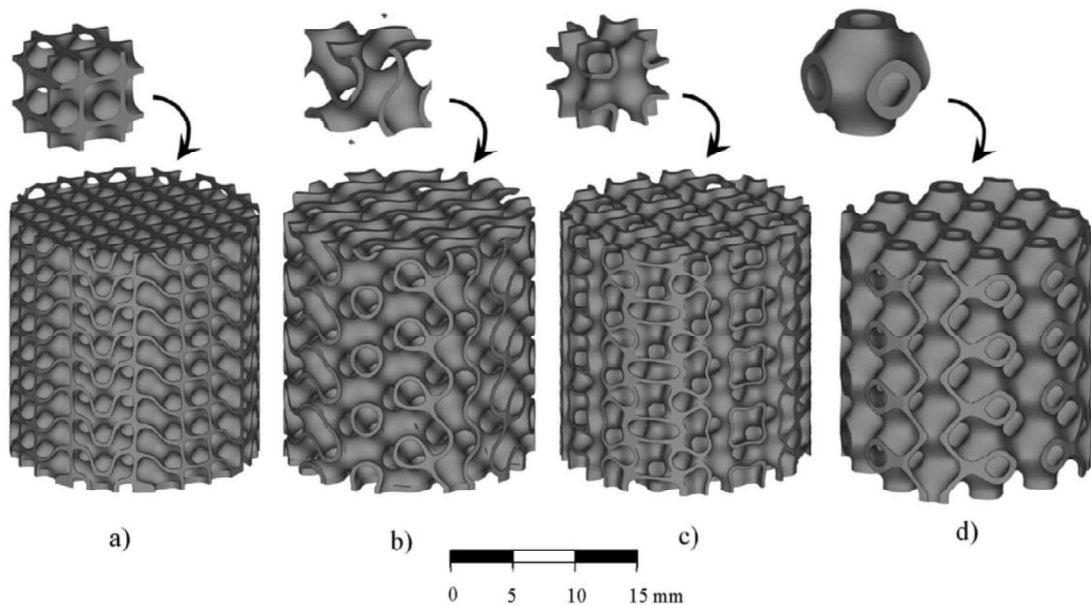


Figura 2.10 – Estruturas TPMS; a) *Diamond*; b) *Gyroid*; c) IWP; d) *Schwarz Primitive* [14].

Os provetes foram pesados e as densidades relativas reais foram obtidas, sendo possível verificar a existência de desvios relativamente ao valor projetado. Estas diferenças podem resultar de defeitos na geometria e da aderência de pó não fundido às superfícies dos provetes[14].

Tabela 2.1 – Propriedades físicas dos provetes analisados (adaptado)[14].

Estrutura	Dimensões (mm)	Massa (desvio padrão)	Densidade relativa (%)
Diamond	ø20 × 20	5,72 (0,04)	11,4
		7,57 (0,04)	15,0
		9,39 (0,04)	18,5
		10,99 (0,06)	21,8
Gyroid		6,19 (0,07)	12,4
		8,00 (0,07)	15,5
		9,59 (0,08)	19,0
		11,02 (0,07)	21,9
IWP		6,71 (0,07)	12,2
		8,84 (0,09)	17,6
		10,50 (0,09)	20,8
		11,54 (0,04)	22,9
Primitive		7,19 (0,04)	14,2
		8,68 (0,04)	17,2
		10,14 (0,06)	20,2
		11,09 (0,09)	22,1

Os ensaios de compressão foram realizados segundo a norma ISO 13314:2011 e têm como objetivo compreender o comportamento mecânico das estruturas TPMS à compressão. Esta comparação é efetuada através da avaliação da tensão e da absorção específica de energia (SEA). Os provetes são submetidos a cargas e foram obtidos resultados *quasi-static* e dinâmicos [14].

Os resultados são mostrados na figura 2.11 para a tensão e para a absorção específica de energia SEA, nas condições em *quasi-static* e dinâmica, tendo sido realizados com diferentes densidades relativas [14].

Da análise dos resultados, verifica-se que a estrutura *Diamond* apresenta a maior tensão à deformação, seguindo-se a estrutura *Gyroid*, depois a estrutura IWP e, por fim, a estrutura *Schwarz Primitive*. Os resultados da absorção específica de energia seguem a mesma tendência observada na tensão, ou seja, a estrutura *Diamond* absorve mais energia antes de se deformar, sendo esta tendência verificada nos ensaios *quasi-static* e dinâmicos[14].

A comparação entre os provetes com a densidade relativa baixa e alta revela diferenças significativas. De um modo geral, com densidade relativa mais baixa, observa-se maior deformações e esta não é uniforme ocorrendo sobretudo próximo das placas.

Quando a densidade relativa é mais elevada, a deformação é mais uniforme. Verifica-se igualmente que o aumento da densidade relativa, associado ao aumento da espessura das estruturas, conduz a um melhor desempenho mecânico à compressão, bem como a maior capacidade de absorver mais energia específica e suportar tensões superiores [14].

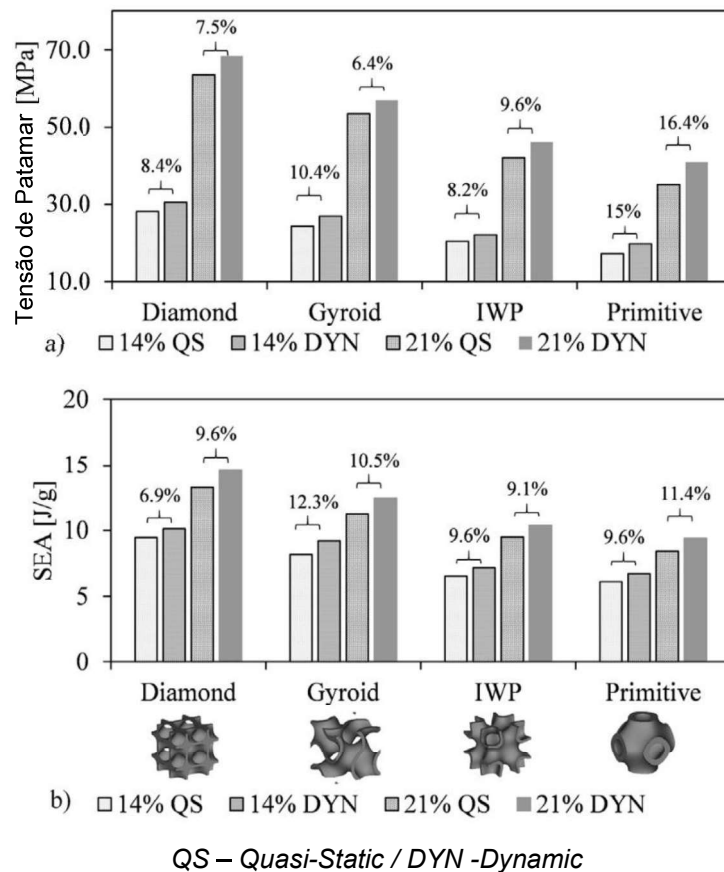


Figura 2.11 – Resultados das estruturas TPMS à compressão (adaptado) [14].

Por fim, com o aumento da densidade relativa, aumenta a capacidade de absorção de energia, a resistência à compressão é superior e as deformações tornam-se mais uniformes. Com densidades relativas mais baixas, as estruturas apresentam uma deformação inicial mais rápida[14].

Concluiu-se, por fim, que a estrutura TPMS do tipo *Diamond* foi a estrutura com melhor desempenho mecânico à compressão.

2.4. Pós-Tratamento Superficial

O pós-tratamento das peças após a impressão por PBF é importante para remover as imperfeições superficiais resultante do processo, estas imperfeições incluem a rugosidade gerada, as tensões residuais e as irregularidades da microestrutura, as quais podem afetar o desempenho mecânico dos componentes fabricados. A realização do tratamento superficial permite reduzir a rugosidade, melhorar a precisão dimensional e diminuir a concentração de tensões [9], [16].

Existem duas categorias de tratamentos possíveis: tratamentos subtrativos e tratamentos não subtrativos [16]. Os tratamentos podem também ser combinados de forma a obter melhores resultados, estes tratamentos são designados por híbridos, resultando da aplicação conjunta de mais de um tratamento subtrativo ou não subtrativo. Existem vários tratamentos disponíveis, sendo apresentados os mais revelantes [9].

2.4.1. Tratamentos Subtrativos.

O tratamento subtrativo consiste num processo de remoção de matéria superficial da peça impressa por PBF, estes tratamentos elimina os defeitos e têm como objetivo melhorar significativamente a rugosidade e o desempenho mecânico [16].

- **Maquinação**, é um processo comum de acabamento por arranque de aparta, a sua utilização é limitada quando não existe acessibilidade para as ferramentas de corte, devido a geometrias complexas resultantes do PBF. A rugosidade obtida é boa, mas este processo não é adequado para um acabamento completo das peças [16].
- **Polimento**, podem ser utilizadas várias técnicas, uma das mais usada é o polimento em pedras vibratórias. O polimento remove material superficial, tornando-se a superfície mais suave e com rugosidade muito baixa [16].
- **Decapagem química**, é um tratamento químico que permite remover material superficial de forma uniforme, mesmo com geometrias complexas. As peças são submersas numa solução química, com ou sem aplicação de corrente elétrica, sob tempos de submersão controlados [16].
- **Acabamento por pedras vibratórias**, é um tratamento realizado numa cuba contendo pedras ou materiais abrasivos, que se movimentam em conjunto

com os componentes para obter um acabamento superficial, reduzindo a rugosidade e originando uma superfície mais suave [17].

2.4.2. Tratamentos Não Subtrativos.

O tratamento não subtrativo consiste em modificar as propriedades superficiais das peças sem remoção de matéria, melhorando igualmente a rugosidade e o desempenho mecânico, tal como os tratamentos subtrativos [16].

- **Jato de areia**, utiliza partículas de areia aceleradas contra a superfície, limpando e alisando a superfície. Reduz a rugosidade de aproximadamente 20 μm para cerca de 15 μm e induz tensões superficiais [16].
- **Granalhagem**, semelhante ao jato de areia, mas com maior controlo dos parâmetros do processo. É realizada com esfera metálicas ou cerâmicas, sendo controlados parâmetros como diâmetro das esferas, velocidade de impacto, intensidade, distância e ângulo do bocal e área tratada. O tratamento aumenta a resistência à fadiga [16].
- **Tratamento por choque de laser**, utiliza pulsos de laser para induzir deformações plásticas superficiais. Proporciona melhor rugosidade superficial do que a granalhagem [16].

Na figura 2.12 é apresentada a ilustração dos vários tratamentos subtrativos e não-subtrativos mais utilizados após PBF.

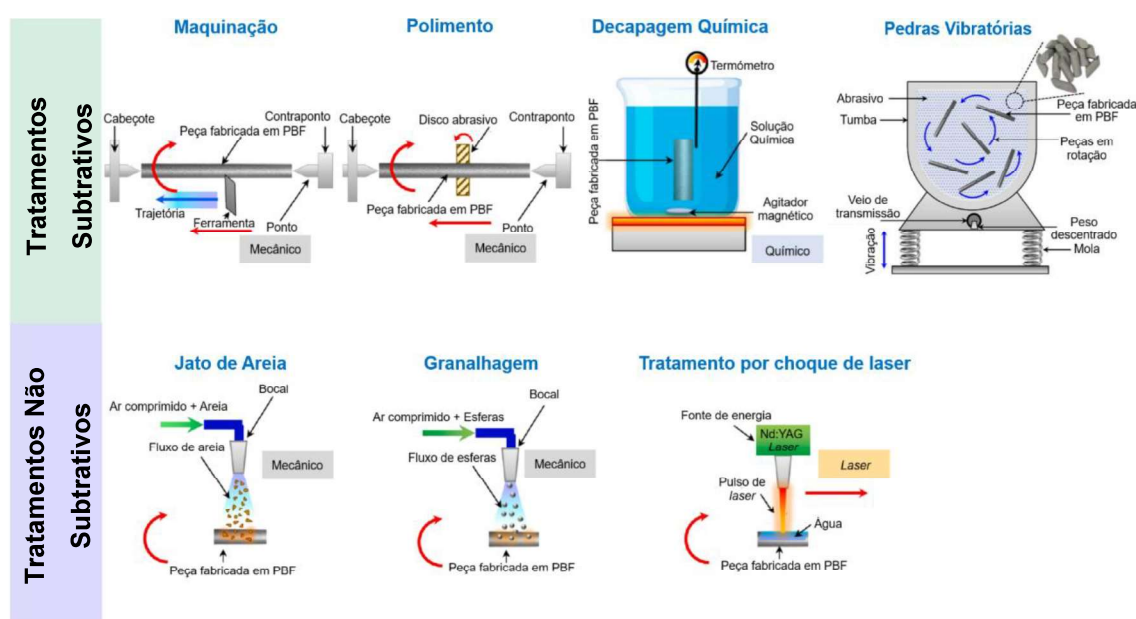


Figura 2.12 – Pós-tratamentos de superfície (adaptado) [16], [17].

2.4.3. Tratamentos Híbridos.

Os tratamentos híbridos podem resultar em melhores acabamentos superficiais, em comparação com a utilização isolada de um único tratamento [9].

Na figura 2.13 apresenta a textura das superfícies de provetes fabricados por PBF e no material AlSi10Mg. A textura superficial resultante do PBF apresenta elevada rugosidade que pode ser causada pela aderência de pó parcialmente fundido, por defeitos de solidificação e pela rugosidade típica do processo. Ao aplicar os tratamentos de superfície é possível reduzir a rugosidade e obter superfícies mais suaves. Observa-se que os tratamentos que melhoram mais eficazmente o estado superficial são:

- Acabamento por pedras vibratórias,
- Tratamento por choque laser,
- Decapagem ácida
- maquinação.

Quando aplicado os tratamentos híbridos, verifica-se que as melhores superfícies resultam das combinações:

- Pedras vibratórias + decapagem ácida
- Maquinação + polimento [9].

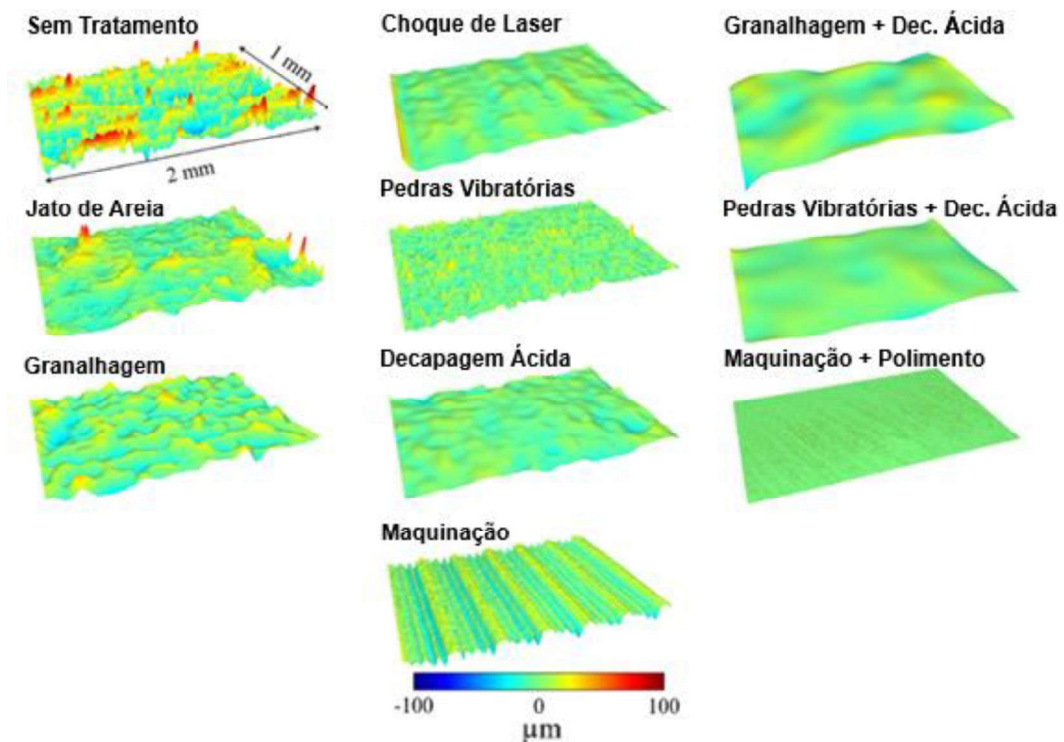


Figura 2.13 – Textura das superfícies resultantes do pós-tratamento (adaptado) [9].

Na figura 2.14, é possível analisar a rugosidade típica do processo PBF e rugosidade resultante após a aplicação dos tratamentos de superfície. Verifica-se que a rugosidade obtida por PBF se situa entre 9 e 10 μm , quando são aplicados os tratamentos de jato de areia e granalhagem, observa-se que a rugosidade desce para valores próximos de 5 μm . Já os tratamentos de choque por laser, pedras vibratórias, decapagem ácida e maquinação permitem atingir valores de rugosidade próximos de 2 μm . Quando aplicados os tratamentos são aplicados em conjunto, verifica-se que os conjuntos pedras vibratórias com decapagem ácida e de maquinação com polimento apresentam rugosidades próximas de 1,5 μm [9].

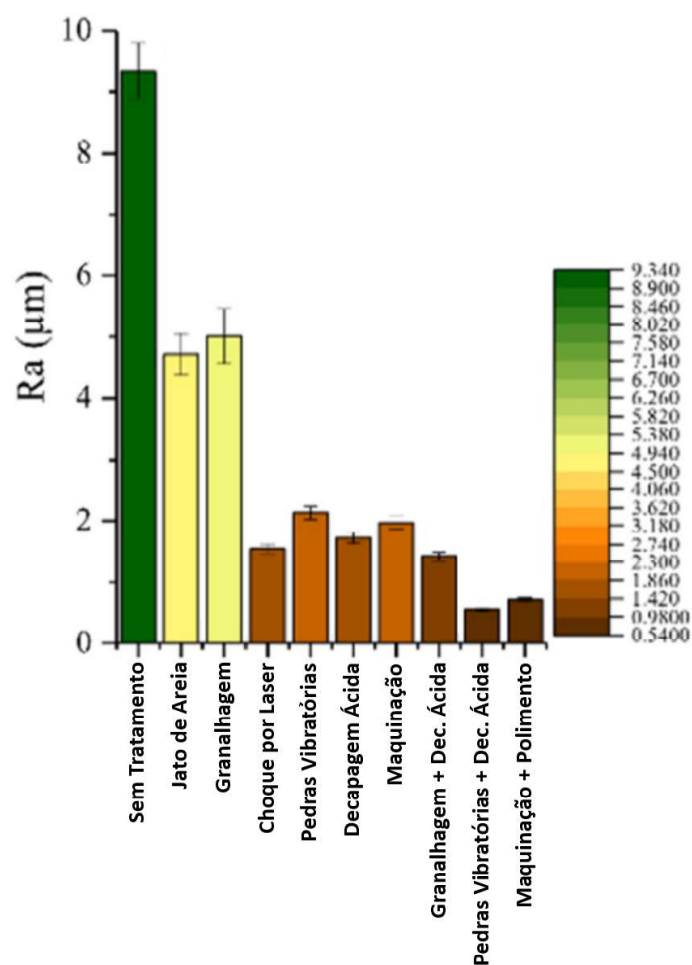


Figura 2.14 – Rugosidade resultante do pós-tratamento (adaptado)[9].

Capítulo 3

Métodos e materiais

Neste capítulo são apresentados o processo de produção pelo método PBF, o material utilizado, a validação dimensional e geométrica, a aplicação de diversos pós-tratamentos superficiais e o procedimento realizado para estudar o comportamento à compressão de diferentes estruturas destinadas ao preenchimento interno de ferramentas de estampagem.

3.1. Processo de Produção pelo Método de PBF

Foi utilizado o método de fabrico de PBF no desenvolvimento de provetes e ferramenta de moldagem, devido a ser o processo instalado na Lauak Portugal. É atualmente o único processo de fabrico aditivo metálico que permite produzir as ferramentas em questão, cumprindo requisitos, sem a necessidade de operações de pós-processamento complexas, como por exemplo maquinação posterior.

A máquina utilizada no fabrico de provetes e ferramenta de moldagem é a RENISHAW RenAM 500Q Ultra instalada na fábrica da Lauak em Grândola. Na figura 3.1 é apresentada a máquina utilizada no processo de fabrico PBF, no presente projeto.



Figura 3.12 – RENISHAW RenAM 500Q Ultra.

Caraterísticas gerais da máquina:

- Máquina: Renishaw RenAM 500Q Ultra: *Serial Number: 1QJ178*

- 4 *lasers*: 4×500 W com cobertura de 100% da área de trabalho;
- Diâmetro de spot do *laser*: 80 μm
- Data de calibração dos lasers: 2025-08-27
- Dimensões máximas de fabrico: 250 mm $\times$ 250 mm $\times$ 350 mm;
- Câmara de fabricação inerte com gás argon;
- Fluxo de argon: 190 m³/h;
- Nível de oxigénio máximo: 1000 ppm.
- Sistema avançado de
- TEMPUS module, que permite o *Recoating* em simultâneo.
- *Software* de *Slicing* e preparação do processo: QuantAM

3.2. Material

O material usado na fabricação de componentes por PBF, na presente máquina, é uma liga de alumínio AlSi10Mg, composta por uma fração em massa de 10% de Silício, com pequenas quantidades de Magnésio e outros elementos em menores quantidades.

Pó metálico: AlSi10Mg

Lote do pó: 25388402450003

Fornecedor: Renishaw Plc

Distribuição de partículas do pó: 20 μm to 63 μm .

Na tabela 3.1 estão indicadas propriedades do pó de alumínio utilizado.

Tabela 3.1 – Propriedades do pó da liga de alumínio AlSi10Mg e composição química [18].

Densidade	2,68 g/cm ³
Condutividade térmica	130 W/mK até 190 W/mK
Intervalo de fusão	570 °C até 590 °C
Coefficiente de expansão térmica	20 $\mu\text{m}/\text{mK}$ até 21 $\mu\text{m}/\text{mK}$ (entre os 20 °C e 100 °C)
Composição Química	
Aluminium	Balance
Silicon	9.00 to 11.00
Magnesium	0.25 to 0.45
Iron	≤ 0.25
Nitrogen	≤ 0.20
Oxygen	≤ 0.20
Titanium	≤ 0.15
Zinc	≤ 0.10
Manganese	≤ 0.10

Nickel	≤ 0.05
Copper	≤ 0.05
Lead	≤ 0.02
Tin	≤ 0.02
Residual elements	≤ 0.05 each, ≤ 0.05 total

O material utilizado tem por base o que é comum em processos de fabrico convencionais para o tipo de aplicações pretendido no âmbito deste trabalho, devido ao seu baixo custo, facilidade de maquinação e por todos os processos da Lauak Portugal estarem adequados a trabalharem com este tipo de material.

Relativamente aos pós convencionalmente usados em fabrico aditivo, este é um dos mais vulgares, devido ao baixo custo e facilidade de processamento, o que o torna especialmente competitivo para a aplicação em causa.

Apesar de se estar a usar um pó do fabricante Renishaw Plc, porque é o que está carregado na máquina, consegue-se facilmente encontrar outros fabricantes no mercado, com custos da ordem de 41 €/kg, preço usado como referência para os cálculos de custos inerentes.

3.2.1. *Parâmetros usados.*

Os parâmetros utilizados no processo de fabrico da ferramenta e provetes, foram os seguintes, tendo por base o material file da Renishaw Plc Material file: AlSi10Mg_500QS_B60_S_01_A.xml:

- 4 *lasers*
- Potência: 500 W (contínuo);
- Velocidade dos lasers: 2500 mm/s
- Espessura da camada de pó: 60 μm ;
- Temperatura da base: 170 °C
- Distância entre passagens do laser 90 μm (*hatch distance*)
- Ângulo incremental de preenchimento: 67° (*Hatch Increment Angle*)
- Número de contornos: 2
- Estratégia: *stripe*

Os parâmetros utilizados são parâmetros otimizados para produtividade, verificados através de estudos internos realizados na Lauak, mantendo a elevada qualidade, com densidades superiores a 99,5% [18].

Caraterísticas mecânicas à tração esperadas com base nos parâmetros apresentados [18]:

- Ultimate tensile strength (XY) = 418 MPa $\pm$ 14 MPa
- Ultimate tensile strength (Z) = 396 MPa $\pm$ 12 MPa
- Yield strength (XY) = 268 MPa $\pm$ 9 MPa
- Yield strength (Z) = 230 MPa $\pm$ 3 MPa
- Elongation after fracture (XY) = 8% $\pm$ 1%
- Elongation after fracture (Z) = 6% $\pm$ 1%
- Modulus of elasticity = 71 GPa $\pm$ 7 GPa
- Surface roughness (Z) = 14 μ m $\pm$ 2 μ m

3.3. Validação Dimensional e Geométrica

Para comprovar que o PBF pode ser aplicado à fabricação de ferramentas para moldagem, é necessário conhecer as características utilizadas pela Lauak Portugal na fabricação de ferramentas. Nos subcapítulos seguintes são apresentadas várias tolerâncias geométricas e dimensionais, aplicadas a ferramentas de moldagem, que necessitam ser comprovadas através da fabricação de artefactos, que vão ser projetados, tendo em conta caraterísticas típicas deste tipo de ferramentas.

3.3.1. *Planeza.*

A planeza utilizada nas superfícies de topo da base e do aperta chapas nas zonas de contacto com as peças é de 0,3, também pode ser utilizado 0,2, na figura 3.2 é identificado uma tolerância de planeza geral utilizada pelo projeto de ferramentas.

As superfícies de topo do artefacto são controladas com o objetivo de encontrarem-se abaixo de 0,3 de planeza.

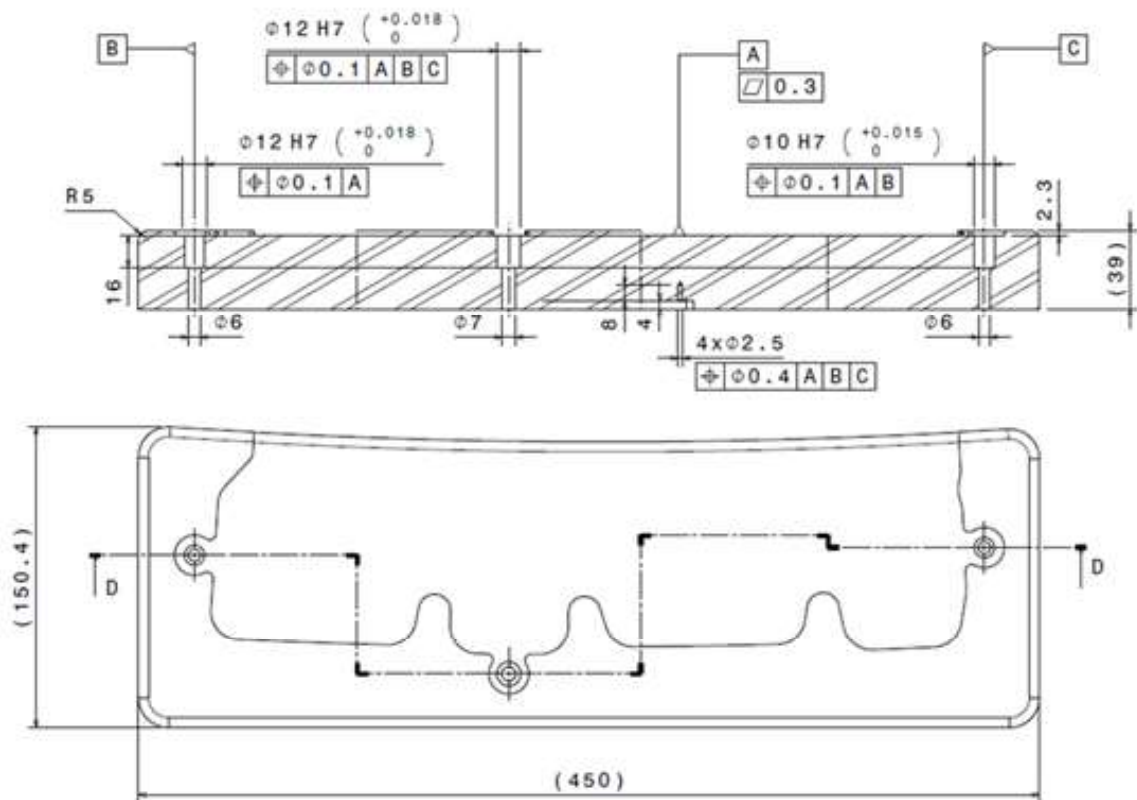


Figura 3.23 – Exemplo de ferramenta com as tolerâncias utilizadas geralmente.

3.3.2. Ângulos de Compensação (*Spring Back*).

O ângulo de compensação numa ferramenta é o valor em graus que deve ser subtraído do valor teórico do ângulo interno de uma peça, para compensar o efeito de retorno elástico (*spring back*). O ângulo de compensação é selecionado em função do ângulo, da espessura, do raio de moldagem da peça, do material, mas também do estado metalúrgico do material, estes valores existem do retorno de experiência.

Os valores mais utilizados na Lauak estão entre 2,5° e 8°, excluindo os valores mínimo e máximo, os ângulos mais utilizados são de 7,5° e 5°, assim, os 4 valores de compensação a utilizar são de 2,5°, 5°, 7,5° e 8°.

Exemplo de uma peça com raio de moldagem de 2,5mm, espessura de 1mm, ângulo de peça de 90°, altura de aba de 10mm e o estado metalúrgico O, o ângulo de compensação utilizado no projeto de ferramentas é de 2.5°, isto é, o ângulo entre o topo da ferramenta e a face lateral será de 87,5°

Os ângulos a serem testados e controlados pelo artefacto são os seguintes: 2,5°; 5°; 7,5°; 8°.

Na figura 3.3 está representado os ângulos de compensação e em linha vermelha descontinua a peça a ser moldada.

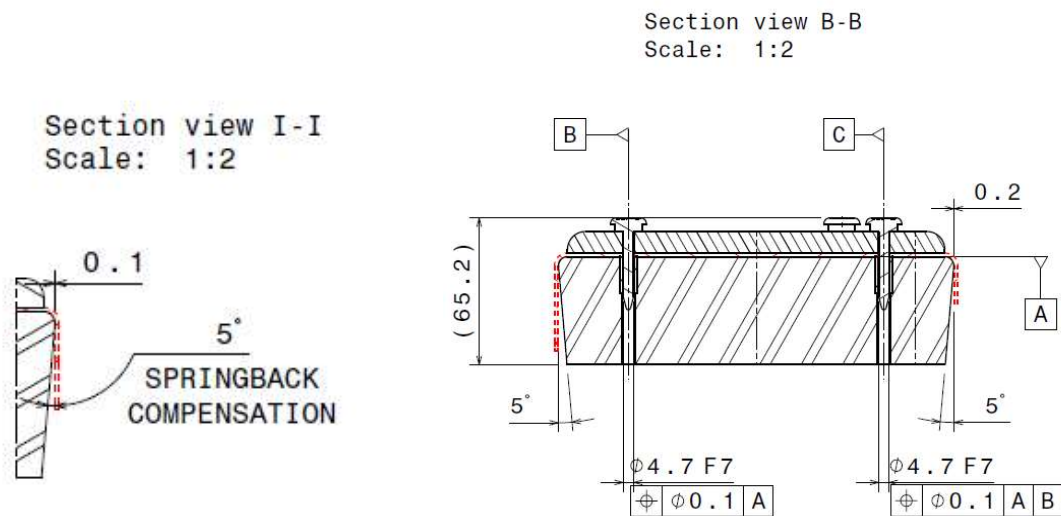


Figura 3.34 – Exemplos de ângulos de compensação (Spring Back).

3.3.3. Diâmetro dos Furos.

O posicionamento das peças na ferramenta pode ser utilizado pinos independentes da ferramenta ou cavilhas cravadas na matriz, estes furos são entre Ø5,1mm e Ø6,1mm. Na figura 3.4 e 3.5 está vários exemplos de tolerâncias para o diâmetro de furos.

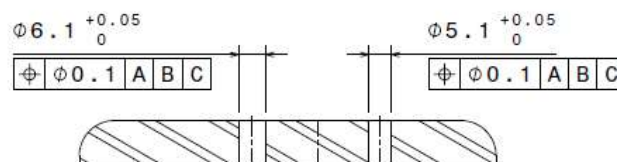


Figura 3.45 – Furos de ferramentas e as suas tolerâncias.

variação das cotas no eixo X e no eixo Y e assim confirmar as dimensões lineares em eixo X e no eixo Y.

Na figura 3.6 são representados exemplos dos furos que recebem os casquilhos e utilizados no controlo dimensional.

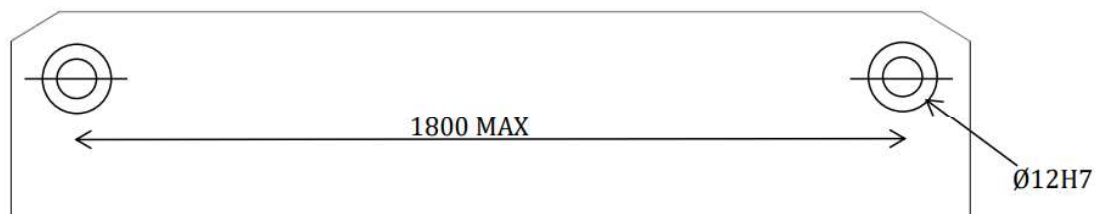


Figura 3.67 – Exemplo de como utilizar os furos referências.

3.3.5. Rugosidade de Várias Superfícies.

As superfícies funcionais das ferramentas devem estar limpas e sem riscos, de modo a não marcar a peça aquando da moldagem.

As superfícies funcionais das ferramentas devem ter no máximo a rugosidade de Ra 1,6 e as restantes superfícies não funcionais no máximo Ra 3,2 μm .

No artefacto será controlado a rugosidade após a impressão e depois serão realizados acabamentos de superfície de modo a atingir os valores objetivo. Na tabela 3.2 estão os valores de rugosidade padrão para as ferramentas de moldagem.

Tabela 3.22 – Rugosidade padrão para as ferramentas de moldagem.

Superfícies funcionais / <i>Functional surfaces</i>	Superfícies não funcionais / <i>Non-functional surfaces</i>
Ra 1.6	Ra < 3.2

3.3.6. Posição de Furos

Todos os furos funcionais nas ferramentas de moldagem têm de garantir a tolerância geométrica de posição 0,1 em relação aos referências identificados.

No artefacto todos os furos existentes serão controlados em relação aos 3 furos

Ø12H7 como referências e respeitando a tolerância de posição indicada na figura em baixo. Na figura 3.17 ó mostrado como é colocada a tolerância do furo funcional em relação ao referencial A.

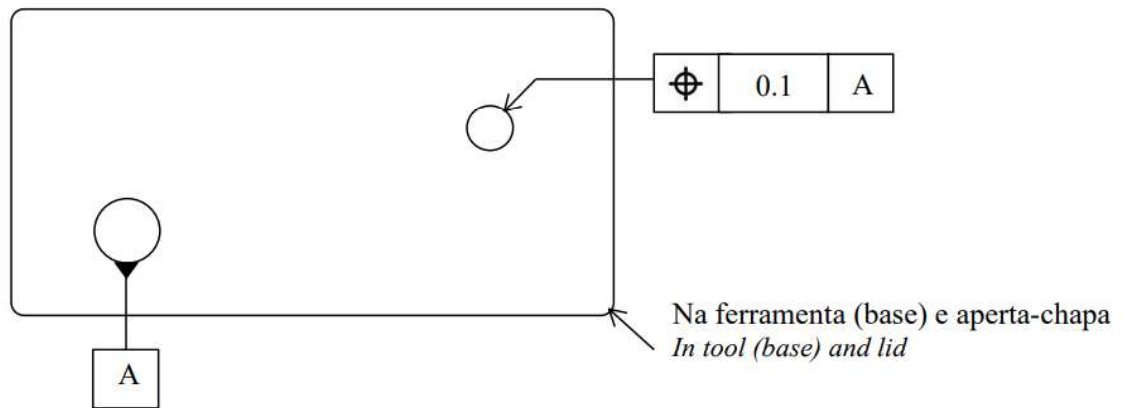


Figura 3.78 – Tolerância geométrica de posição dos furos.

3.3.7. Raios de Moldagem

Os raios de moldagem das peças podem ir de um raio mínimo de 2mm até a um raio máximo de 7,5mm, estes raios são indicados pelos desenhos das peças sendo replicados nas ferramentas de moldagem.

Estes raios devem ser respeitados assim como o estado metalúrgico de acordo com a espessura da chapa a moldar, de modo, a evitar fissuras durante o processo de moldagem, no projeto de ferramentas deve ser verificado se o raio mínimo está em conformidade com o estado metalúrgico e espessura da peça.

No presente trabalho, decidiu-se utilizar no artefacto os raios mais representativos que são os seguintes: 2mm, 2,5mm, 3mm e 4mm.

No artefacto o objetivo é conhecer o desvio que pode existir após a impressão e também após os acabamentos.

3.3.8. Curvaturas

A curvatura das peças é uma característica independente de cada peça podendo ser bastante diferente entre peças, desta forma, seleccionou-se exemplos existentes que sejam representativos para aplicar no artefacto.

Para o controlo do artefacto deverá ser tido em conta a tolerância geométrica de forma de 0,2 em relação aos furos Ø12H7. Na figura 3.8 está a aplicação da tolerância de forma.

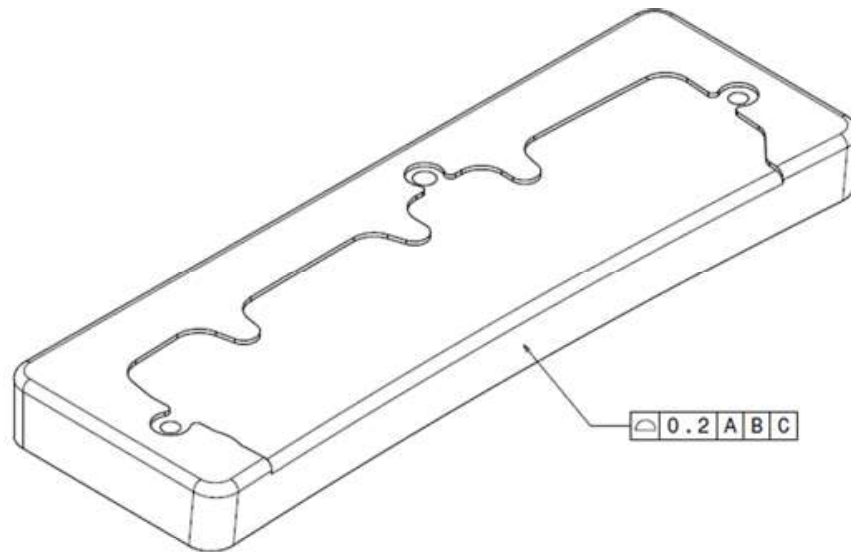


Figura 3.89 – Tolerância geométrica de forma na superfície funcional da ferramenta.

3.3.9. Dimensões Lineares nos Eixos de Coordenadas X, Y e Z

As dimensões lineares nos eixos X e Y serão testadas através da distância entre as faces laterais de cada braço do artefacto.

A dimensão linear no eixo em Z será testada através de 3 dimensões de altura, estas são de 10mm, 15mm e 25mm, estas dimensões também devem respeitar as dimensões mínimas para cada tipo de furo a ser fabricado, os 3 furos Ø12H7 referência devem estar na mesma superfície, o furo Ø10H7 e o furo Ø12H7 utilizados para casquilhos funcionais têm de estar no mínimo com a altura de 25mm, os restantes furos são colocados a uma altura de 10mm.

3.3.10. Artefacto Produzido.

Com o objetivo de identificar as tolerâncias que são possíveis de obter, foi desenvolvido um artefacto, seguindo os procedimentos da norma ASTM 52902 [19], que inclui características que são típicas em ferramentas de moldagem para a indústria aeronáutica. Entre estas características destacam-se vários furos de posicionamento e

centragem, alguns com caixa, várias distâncias interiores e exteriores e ângulos típicos para compensação do ângulo de recuperação elástica.

Na figura 3.9 é apresentado o artefacto projetado tendo em conta a informação indicada anteriormente.

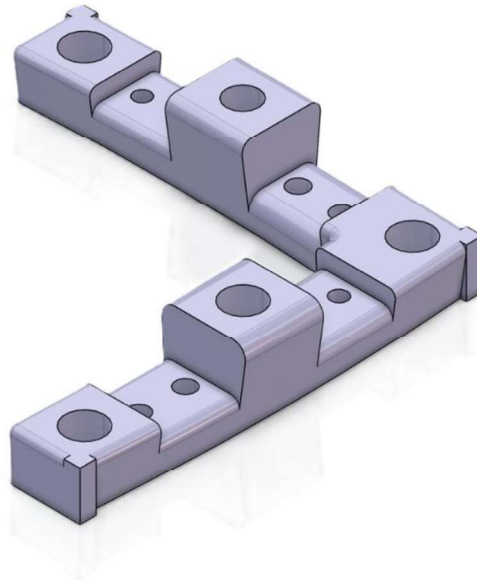


Figura 3.910 – Artefacto projetado.

Para testar os 4 *lasers* existentes e verificar a sua dispersão dimensional, cada laser fabricará um único artefacto, sendo estes posicionados na placa de impressão de acordo com a figura 3.10. Os artefactos serão apoiados por suportes, introduzidos através do *software* QuantAM, de forma a que possam ser facilmente removidos sem a necessidade de maquinaria ou outras operações de pós-processamento complexas.

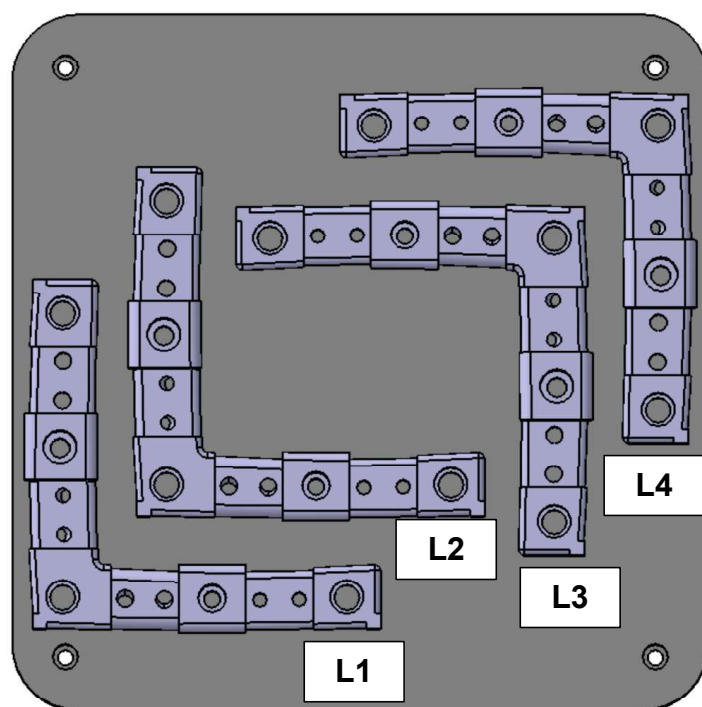


Figura 3.1011 – Os 4 artefactos a serem impressos identificados de L1 a L4.

O desenho detalhado dos artefactos assim como tolerâncias estão no Anexo A.1.

Os artefactos foram produzidos com suportes, de forma a serem facilmente removidos da placa de construção do equipamento de fabrico aditivo. Na figura 3.11 seguinte são apresentados os suportes que foram usados em ambos os casos.

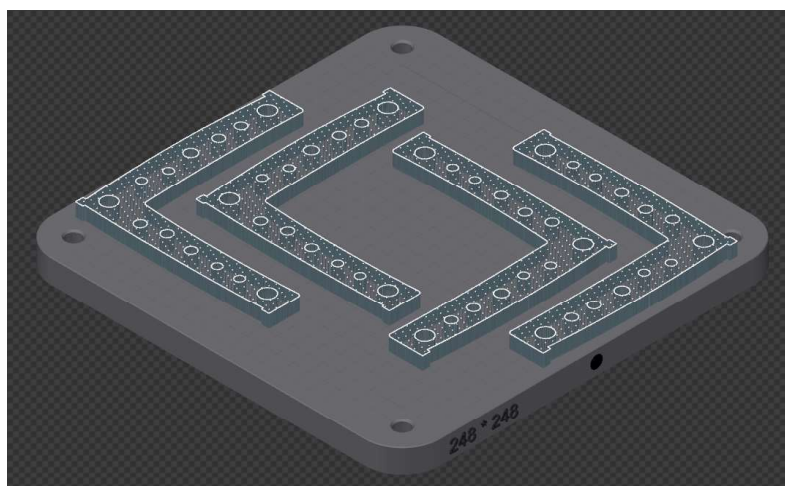


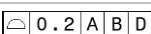
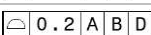
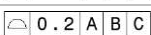
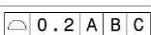
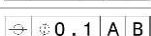
Figura 3.1112 – Suportes utilizados nos 4 artefactos.

Após produzidos, estes artefactos foram medidos antes e após o processo de pós-processamento, de forma a melhorar a qualidade superficial das superfícies obtidas,

conforme descrito no capítulo seguinte.

Na tabela 3.3 estão indicadas as cotas numeradas pelos itens de 1 a 73 estes itens estão identificados no desenho presente no anexo A.1.

Tabela 3.3 – Itens do desenho com respetiva cota e tolerância.

Item	Valor + Tol.	Item	Valor + Tol.	Item	Valor + Tol.	Item	Valor + Tol.
1	 0.3	20	123,8 ± 0,2	39	R3 (0/+1)	58	14 ± 0,1
2	 0.3	21	12H7	40	R2,5 (0/+1)	59	24 ± 0,2
3	 0.3	22	12H7	41	R2,5 (0/+1)	60	48 ± 0,2
4	 0.3	23	12H7	42	R2 (0/+1)	61	72 ± 0,2
5	 0.3	24	12H7	43	R2 (0/+1)	62	96 ± 0,2
6	 0.3	25	10H7	44	R4 (0/+1)	63	24 ± 0,2
7	 0.3	26	5,1 (0/+0,05)	45	R4 (0/+1)	64	48 ± 0,2
8	 0.3	27	6,1 (0/+0,05)	46	8° ± 1	65	72 ± 0,2
9	 0.3	28	R4 (0/+1)	47	2,5° ± 1	66	96 ± 0,2
10	 0.2 A B D	29	R4 (0/+1)	48	7,5° ± 1	67	15 ± 0,2
11	 0.2 A B D	30	R2,5 (0/+1)	49	5° ± 1	68	10 ± 0,2
12	 0.2 A B C	31	R2,5 (0/+1)	50	90° ± 1	69	25 ± 0,2
13	 0.2 A B C	32	R2 (0/+1)	51	90° ± 1	70	10 ± 0,2
14	 0.1 A B	33	R2 (0/+1)	52	143,1 ± 0,2	71	15 ± 0,2
15	 0.1 A	34	R3 (0/+1)	53	100,1 ± 0,2	72	15 ± 0,2
16	 0.1 A B	35	R3 (0/+1)	54	76,5 ± 0,2	73	10 ± 0,2
17	126 ± 0,2	36	R2 (0/+1)	55	14 ± 0,1		
18	127 ± 0,2	37	R2 (0/+1)	56	14 ± 0,1		
19	124,2 ± 0,2	38	R3 (0/+1)	57	14 ± 0,1		

A máquina de medição por coordenadas CMM utilizada para controlo dos artefactos está disponível na fábrica da Lauak em Grândola, foi realizado um programa específico para os artefactos. Na figura 3.12 é mostrada a máquina de controlo CMM.



Figura 3.1213 – Máquina CMM KRONOS NT 40-15-13.

Caraterísticas gerais da máquina:

- Fabricante: COORD3;
- Modelo: KRONOS NT 40-15-13;
- Número de série: 04686;
- Dimensões da Mesa: 5,92 m × 2,25 m;
- Ponteira única tipo Renishaw.

3.4. Pós-Tratamento Superficial

Os artefactos após fabricação e controlo dimensional, passaram pelo acabamento de superfície. Os acabamentos disponíveis na Lauak são o jato de areia (JA) realizado em França e pedras vibratórias (PV) e a decapagem (alcalina + ácida) (DA) ambos realizados em Portugal. Partindo destes tratamentos, serão realizados nos artefactos uma série de tratamentos e/ou combinação deles para identificar quais são os mais eficazes para atingir a rugosidade indicada para as ferramentas e impacto nas dimensões.

Os tratamentos a realizar são os seguintes:

- Artefacto L1 Sólido – Jato de areia (JA);
- Artefacto L2 Sólido – Pedras vibratórias (PV);
- Artefacto L3 Sólido – Pedras vibratórias (PV) + Decapagem (alcalina + ácida) (DA);

- Artefacto L4 Sólido – Jato de areia (JA) + Pedras vibratórias (PV):
- Artefacto L1 Sólido2 – Jato de areia (JA) + Decapagem (alcalina + ácida) (DA).

Parâmetros do processo utilizados:

- Jato de areia:
 - Areia: 180 *Mesh*;
 - Tempo: Passagem uniforme pela superfície da peça.
- Pedras vibratórias:
 - Pedras: Cilíndricas;
 - Tempo: 1 horas.
- Decapagem (alcalina + ácida):
 - Ficha de Sequência de Processo de Tratamentos de Superfície – N° 032 da Lauak Grândola, utilizada em peças maquinadas para decapar 5 μm ;
 - Tempo: sequência de 14 etapas que podem ir no total até: 1:30 horas.

O aparelho para medir a rugosidade Ra está identificado na figura 3.13.



Figura 3.1314 – Rugosímetro TESA RUGOSURF 20.

Caraterísticas gerais do rugosímetro:

- Fabricante: TESA;
- Modelo: RUGOSURF 20;
- Número de Série: 06930013;
- Resolução: 0,001 μm ;
- Material da sonda: Diamante;

- Faixa de medição; Z: $\pm 200 \mu\text{m}$, X: 16 mm.

A rugosidade foi medida nos artefactos conforme a figura 3.14.

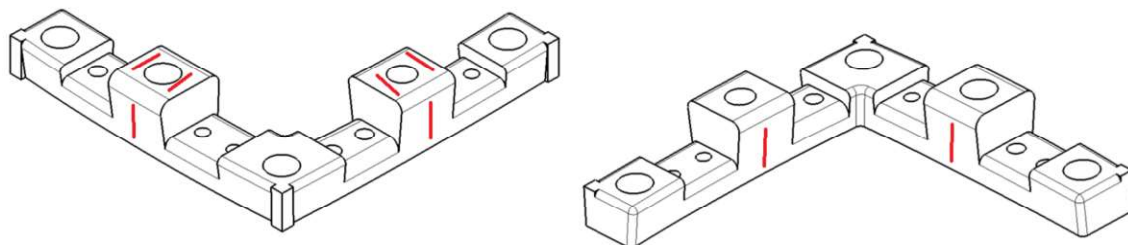


Figura 3.1415 – Zonas de medição de rugosidade nos artefactos.

3.5. Desenvolvimento da Estrutura para Preenchimento da Ferramenta

A ferramentas de moldagem são convencionalmente fabricadas por maquinação CNC, partindo-se geralmente de um bruto em forma paralelepípedica, que é debastado até atingir a sua forma final. O interior do volume da ferramenta fica maciço, uma vez que não faz sentido maquinar-se esta parte. Em termos estruturais, esta massa adicional tem apenas um contributo muito residual.

Em fabrico aditivo, devido à grande versatilidade deste processo, não faz sentido a produção da ferramenta de forma totalmente maciça, até porque tem um contributo significativo no consumo de matéria-prima, tempo de produção, entrega térmica (consequentemente desvios dimensionais e geométricos) e energia despendida. Neste sentido, seguindo-se os conceitos de DfAM, convém otimizar-se a forma de preenchimento interno, através da escolha adequada do tipo de estrutura.

As estruturas foram seleccionadas tendo em conta alguns critérios. Pela revisão bibliográfica as estruturas TPMS são as mais resistentes à compressão, as estruturas reticulares por serem mais adequadas ao fabrico e requererem menos suportes. A estruturas do tipo TPMS e reticuladas, apresentam um grande potencial para manufatura aditiva. São estruturas muito eficientes, que não são possíveis de ser produzidas por processos convencionais, que têm um potencial muito elevado neste tipo de aplicação, em que fundamentalmente estão sujeitas à compressão. Relativamente à estrutura

ISOGRID, é uma estrutura usada convencionalmente em aeronáutica, para reforço de painéis, que potencialmente também pode a ver a ser implementada no projeto de ferramentas.

Antes do projeto e fabricação da ferramenta utilizando estruturas TPMS ou reticulares, é importante conhecer se as estruturas suportam a pressão exercida pelas 2 prensas existentes na Lauak, prensa de borracha e prensa hidrofórmica, para que estas estruturas sejam validadas e possíveis de serem utilizadas no projeto de ferramenta devem superar os 450 bar ou 45 MPa.

Foram desenhados vários provetes para ensaios à compressão, de acordo com a norma ASTM E9 [20], com as dimensões de 20×20×20 mm, num total de 26 provetes, tipicamente 3 repetições de cada, conforme consta na tabela 3.4. Devido à extensão deste estudo, optou-se por fabricar a maioria das estruturas com uma densidade relativa 50%, de forma que se possam comparar. Para algumas geometrias devido a constrangimentos no desenho, teve-se de optar por outras densidades. Para se ter uma referência, testou-se também blocos com a densidade de 100%. Utilizou-se o aplicativo *Lattice Design* da Plataforma 3DExperiente (*Dassault Systemes*) para desenhar estas estruturas, que foram exportadas em formato .stl para o *software* de *slicing*.

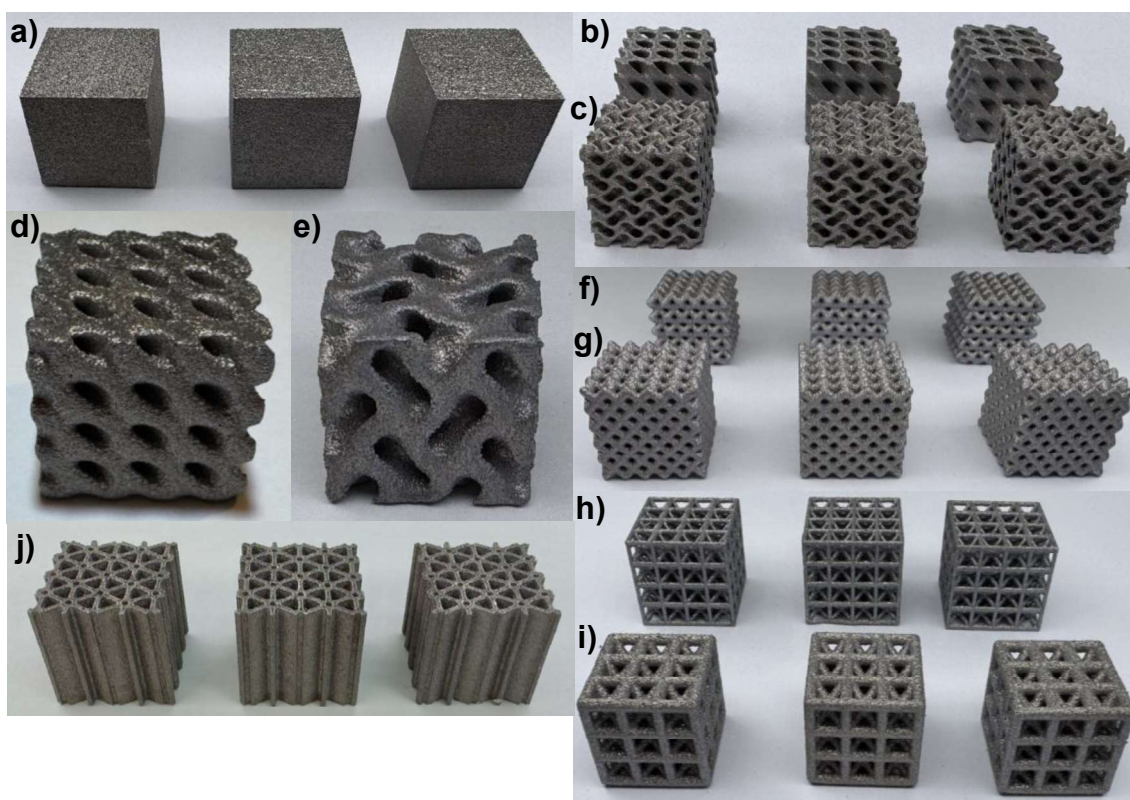
Os provetes foram produzidos pelo processo e com o material descritos anteriormente e testados logo após produção, sem acabamentos ou pós processamento posterior (apenas remoção de suportes e regularização dessas superfícies com lixa).

Tabela 3.44 – Características e identificação dos provetes.

Estrutura	Número do Provete	Dimensões (mm)	Densidade Relativa	Designação do Provete	Identificação na Figura 3.13
Sólido	1	20×20×20	100%	100% Sólido 1	a)
	2		100%	100% Sólido 2	
	3		100%	100% Sólido 3	
TPMS <i>Diamond</i>	1		50%	50% TPMS <i>Diamond</i> 1	b)
	2		50%	50% TPMS <i>Diamond</i> 2	
	3		50%	50% TPMS <i>Diamond</i> 3	
	4		67%	67% TPMS <i>Diamond</i> 4	d)
TPMS <i>Gyroid</i>	1		34%	34% TPMS <i>Gyroid</i> 1	c)
	2		34%	34% TPMS <i>Gyroid</i> 2	
	3		34%	34% TPMS <i>Gyroid</i> 3	
	4		56%	56% TPMS <i>Gyroid</i> 4	e)

<i>Lattice Diamond</i>	1		50%	50% <i>Lattice Diamond</i> 1	f)
	2		50%	50% <i>Lattice Diamond</i> 2	
	3		50%	50% <i>Lattice Diamond</i> 3	
<i>Lattice Crown</i>	1		50%	50% <i>Lattice Crown</i> 1	g)
	2		50%	50% <i>Lattice Crown</i> 2	
	3		50%	50% <i>Lattice Crown</i> 3	
<i>Lattice BCC</i>	1		22%	22% <i>Lattice BCC</i> 1	h)
	2		22%	22% <i>Lattice BCC</i> 2	
	3		22%	22% <i>Lattice BCC</i> 3	
	4		50%	50% <i>Lattice BCC</i> 4	i)
	5		50%	50% <i>Lattice BCC</i> 5	
	6		50%	50% <i>Lattice BCC</i> 6	
<i>ISOGRID</i>	1		50%	50% <i>ISOGRID</i> 1	j)
	2		50%	50% <i>ISOGRID</i> 2	
	3		50%	50% <i>ISOGRID</i> 3	

Na figura 3.15 estão identificados os 26 provetes fabricados pelo processo PBF e utilizados no ensaio de compressão.



- a) 100% Sólido. b) 50% TPMS *Diamond*. c) 34% TPMS *Gyroid*.
d) 67% TPMS *Diamond*. e) 56% TPMS *Gyroid*. f) 50% *Lattice Diamond*.
g) 50% *Lattice Crown*. h) 22% *Lattice BCC*. i) 50% *Lattice BCC*.
j) 50% *ISOGRID*.

Figura 3.1516 – Provetes fabricados por PBF.

Antes do ensaio, os provetes foram medidos com um paquímetro digital Mitutoyo

ref. 500-161-30 com uma resolução de 0.01 mm, e pesados com uma balança analítica Kern ADJ 200-4 (*serial number* WE24001325).

Os ensaios de compressão foram realizados na máquina de ensaios Servo Hidráulica Instron 1385 instalada no IPS, com uma célula de carga de ± 250 kN, com pratos de compressão rígidos (rigidez de todo o sistema 350 kN/mm). O ensaio foi realizado em controlo de deslocamento a velocidade constante. Foram utilizados os seguintes parâmetros: Velocidade de deslocamento constante de 1,3 mm/min e deformação máxima de 3 mm. Na figura 3.16 mostra o posicionamento do provete entre placas.

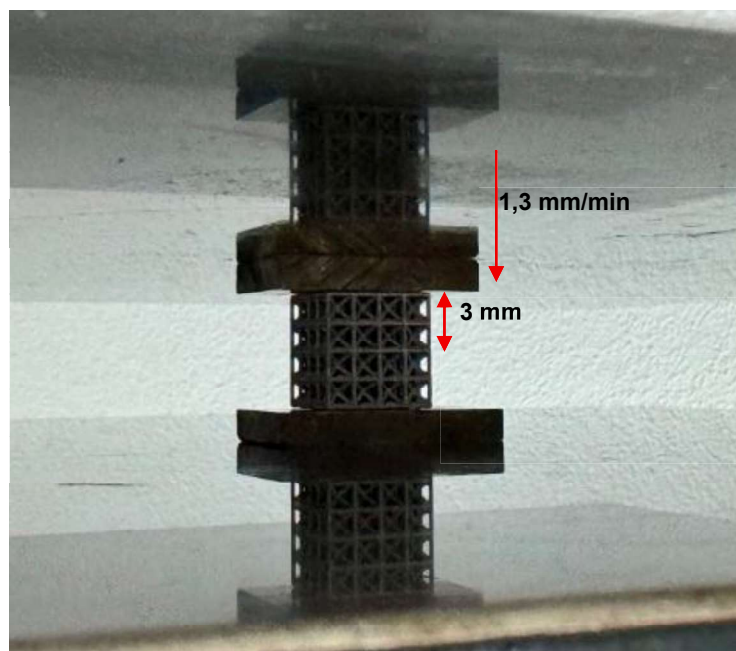


Figura 3.1617 – Ensaio de compressão.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

No presente capítulo apresentam-se os resultados e discussão dos estudos conduzidos no capítulo anterior. Em primeiro lugar aborda-se o controlo dimensional e geométrico dos artefactos produzidos, o pós-tratamento superficial realizado aos artefactos e os resultados do ensaio de compressão a várias estruturas. Estes resultados serão utilizados para desenho de uma ferramenta, como caso de estudo, a ser apresentado capítulo seguinte.

4.1. Validação Dimensional e Geométrica dos Artefactos produzidos

Após a produção dos artefactos, estes foram mantidos na placa de construção da máquina, tendo-se obtido as dimensões para cada artefacto a associado ao respetivo laser da máquina (L1 a L4). Nas tabelas seguintes e figuras esta dimensão está expressa com o prefixo “Placa”. Após remoção da placa, partindo os suportes e regularizando a superfície com lixa, todas as características foram medidas novamente, sendo apresentadas com o prefixo “S Placa”. Foram também efetuados tratamentos de superfície, conforme referido no capítulo 3.4, sendo estes resultados apresentados com o sufixo “Pós-Tratamento”. No sufixo “Pós-Tratamento” os controlos foram realizados somente em CMM.

São apresentados os relatórios do controlo dimensional nos anexos A.2, A.3 e A.4. O Anexo A.2 refere-se os artefactos na placa, o anexo A.3 para os artefactos sem a placa e no anexo A.4 após o pós-tratamentos realizados.

4.1.1. Planeza

O controlo geométrico da planeza nos artefactos foi realizado por uma máquina de medição por coordenadas (*coordinate measuring machine* CMM), este controlo é realizado às superfícies de topo dos artefactos de forma a verificar se estas superfícies são planas, na tabela 4.1 estão os resultados do controlo.

Tabela 4.1 – Resultados do controlo da planeza (valores em mm).

Item	L1 Placa	L2 Placa	L3 Placa	L4 Placa	L1 S. Placa	L2 S. Placa	L3 S. Placa	L4 S. Placa	L1 Pós-Tra.	L2 Pós-Tra.	L3 Pós-Tra.	L4 Pós-Tra.
1	0,0343	0,0526	0,0086	0,0226	0,0532	0,0059	0,0455	0,0178	0,0127	0,0128	0,0304	0,0243
2	0,0271	0,063	0,0243	0,0152	0,0184	0,0292	0,0108	0,0140	0,0152	0,0061	0,0046	0,028
3	0,0144	0,0357	0,0133	0,0078	0,025	0,0111	0,0239	0,0304	0,0127	0,0092	0,0116	0,0018
4	0,0036	0,0116	0,0004	0,0423	0,0236	0,0335	0,0359	0,0309	0,076	0,0136	0,0048	0,0182
5	0	0,0198	0,0146	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,0468	0,0163	0,0118	0,0185	0,0471	0,0022	0	0,0156	0,0305	0,008	0,0043	0,0253
7	0,0622	0,0054	0,0102	0,067	0,0228	0,0755	0,0375	0,0528	0,0177	0,034	0,0157	0,0308
8	0,0298	0,0139	0,0277	0,0186	0,0318	0,0236	0,0082	0,017	0,0203	0,0059	0,0065	0,021
9	0,0203	0,0154	0,0239	0,025	0,0017	0,042	0,0119	0,0204	0,0152	0,0305	0,0229	0,02

Na figura 4.1 estão indicados os resultados do controlo geométrico de planeza e respetiva tolerância.

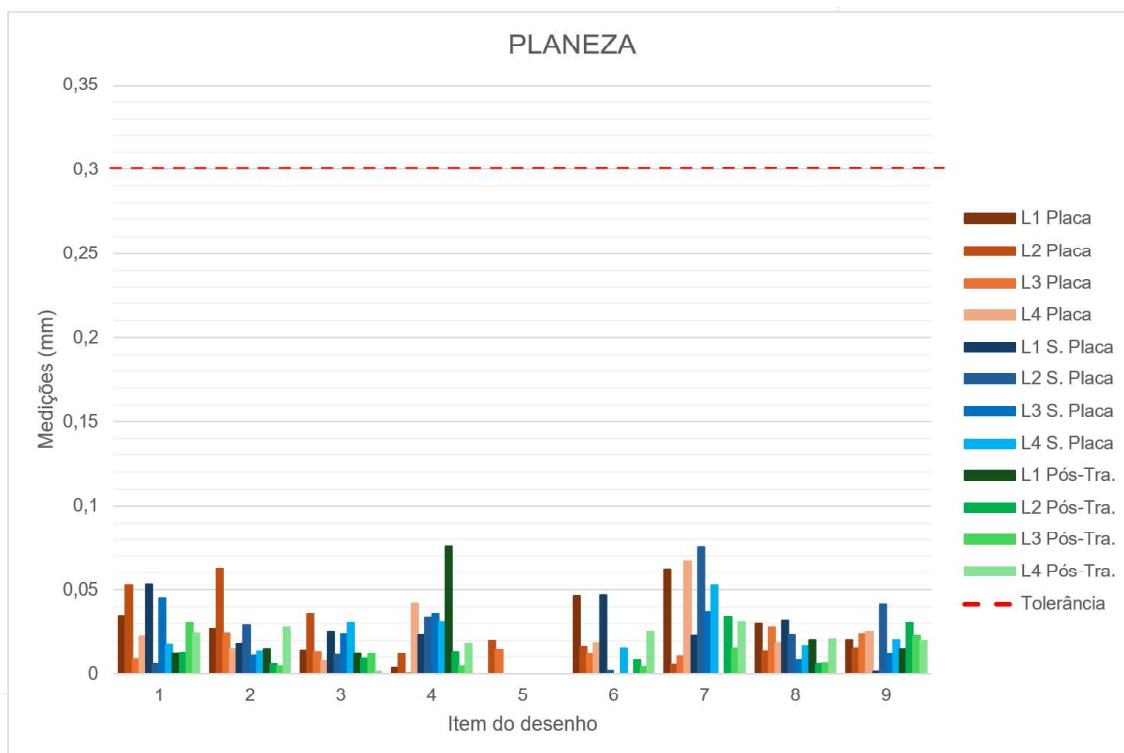


Figura 4.11 – Resultados do controlo da planeza.

Na tabela 4.1 e figura 4.1 é possível verificar que os resultados têm valores abaixo de 80 μm , o que indica tendo em conta a tolerância de 0,3 mm que as faces de topo dos artefactos são planas, portanto, a tolerância geométrica é respeitada para a fabricação de ferramentas. Para compreender o controlo em altura foi realizado as medições lineares no eixo de coordenadas Z, cujos resultados são apresentados de seguida.

4.1.2. Forma

O controlo geométrico de forma nos artefactos foi realizado por uma máquina de medição por coordenadas CMM, este controlo é realizado às superfícies laterais dos artefactos com curvaturas e ângulos de compensação para o retorno elástico. Esta tolerância geométrica é importante para a moldagem das abas das peças, na tabela 4.2 estão os resultados do controlo.

Tabela 4.22 – Resultados do controlo de forma (valores em mm).

Item	L1 Placa	L2 Placa	L3 Placa	L4 Placa	L1 S. Placa	L2 S. Placa	L3 S. Placa	L4 S. Placa	L1 Pós-Tra.	L2 Pós-Tra.	L3 Pós-Tra.	L4 Pós-Tra.
10	0,1692	0,2197	0,3199	0,152	0,1369	0,5052	0,2526	0,1906	0,2709	0,1149	0,1674	0,1154
11	0,1197	0,2163	0,2014	0,1747	0,1634	0,1346	0,2712	0,1847	0,1139	0,0672	0,2766	0,242
12	0,1333	0,2553	0,2395	0,241	0,1783	0,3378	0,1868	0,1972	0,2	0,1237	0,1891	0,1706
13	0,1328	0,0783	0,4023	0,2286	0,1455	0,5893	0,3763	0,2356	0,0784	0,1058	0,141	0,1332

Na figura 4.2 estão indicados os resultados do controlo geométrico de forma e respetiva tolerância.

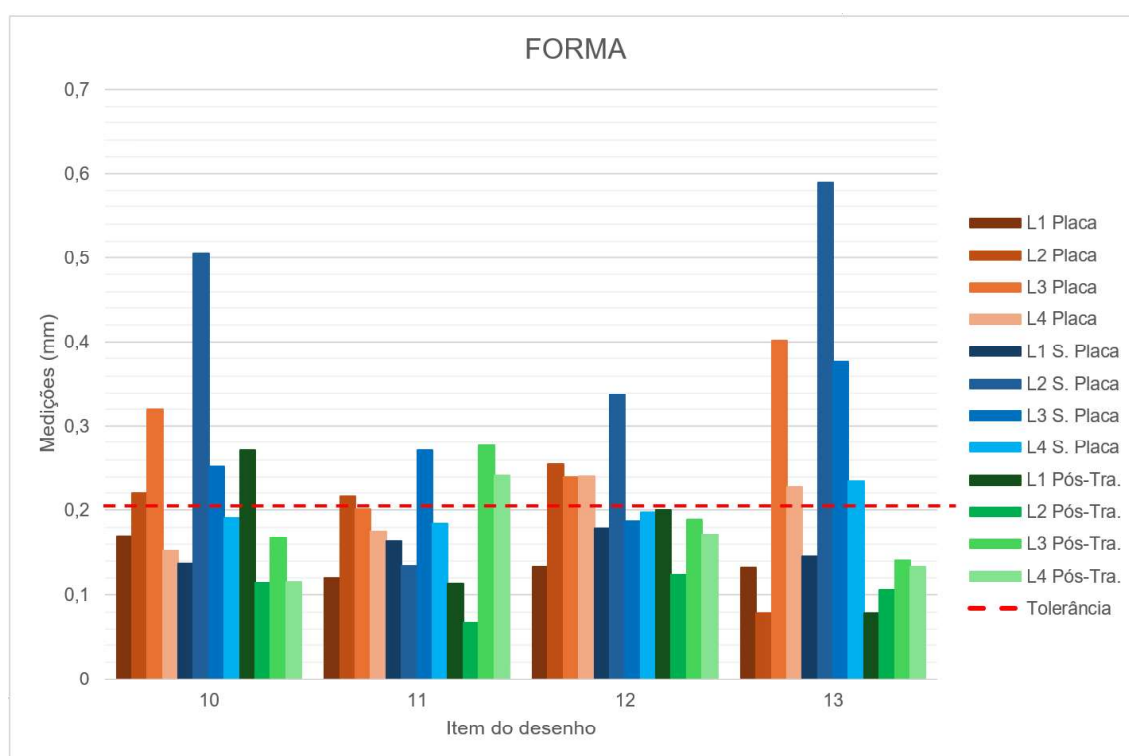


Figura 4.22 – Resultados do controlo de forma.

Pelos resultados indicados pela tabela 4.2 e a figura 4.2 existem artefactos com resultados conformes e outros com resultados não conformes, o artefacto fabricado pelo laser 1, L1, está completamente conforme, mas por contra, os restantes artefactos apresentam resultados conformes e não conformes, o artefacto com os piores resultados é o artefacto L2. Existiu alguma distorção das faces laterais dos artefactos, possivelmente por necessitar de mais suportes para dissipação de calor, conforme possível verificar pela figura 4.3, onde são suportes partidos e alguma distorção nas faces laterais. Também este controlo de forma é realizado em relação aos seus referenciais B, C e D (furos) que foram controlados para a sua posição e que estão todos fora de tolerância, sendo que deveriam

estar próximos da cota nominal para que exista um controlo correto da forma. O controlo posição destes furos é apresentado a seguir. Pelos resultados, verifica-se que não há uma relação direta entre as dimensões obtidas antes e após a remoção da placa de construção.

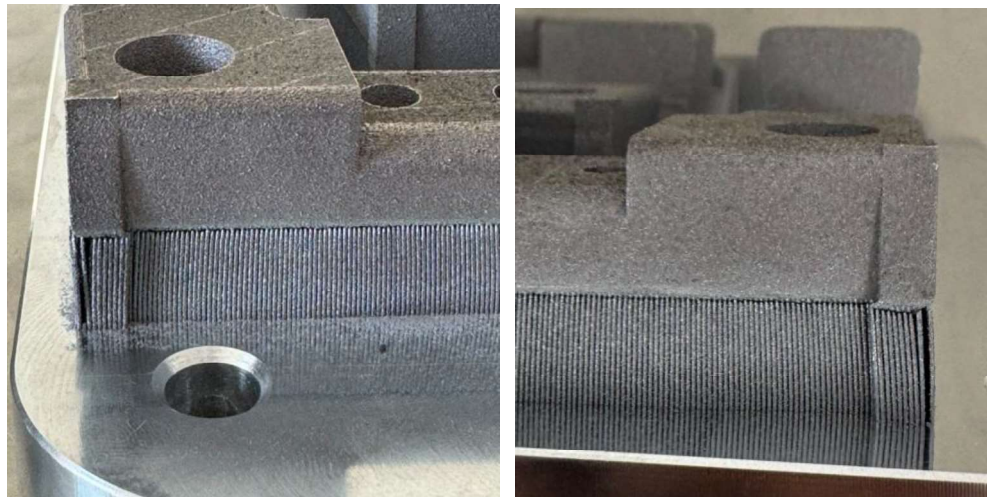


Figura 4.33 – Suportes partidos.

4.1.3. Posição de furos

O controlo geométrico de posição de furos utilizados nos artefactos como referências B, C e D foi realizado por uma máquina de medição por coordenadas CMM. Este controlo é realizado por pontos recolhidos no interior dos furos. Os furos nos referenciais C e D são controlados em relação ao referencial B, portanto é normal não existir dispersão de valores neste referencial, na tabela 4.3 estão os resultados do controlo.

Tabela 4.33 – Resultados do controlo da posição de furos.

Item	L1 Placa	L2 Placa	L3 Placa	L4 Placa	L1 S. Placa	L2 S. Placa	L3 S. Placa	L4 S. Placa	L1 Pós-Tra.	L2 Pós-Tra.	L3 Pós-Tra.	L4 Pós-Tra.
14	0,5079	0,4583	0,2931	0,3902	0,5093	0,5874	0,3622	0,3887	0,4769	0,5465	0,4328	0,4455
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0,4305	0,4452	0,4971	0,4473	0,4595	0,5618	0,5103	0,4603	0,4000	0,4933	0,4985	0,5500

Na figura 4.4 estão indicados os resultados do controlo geométrico de posição de furos e respetiva tolerância.

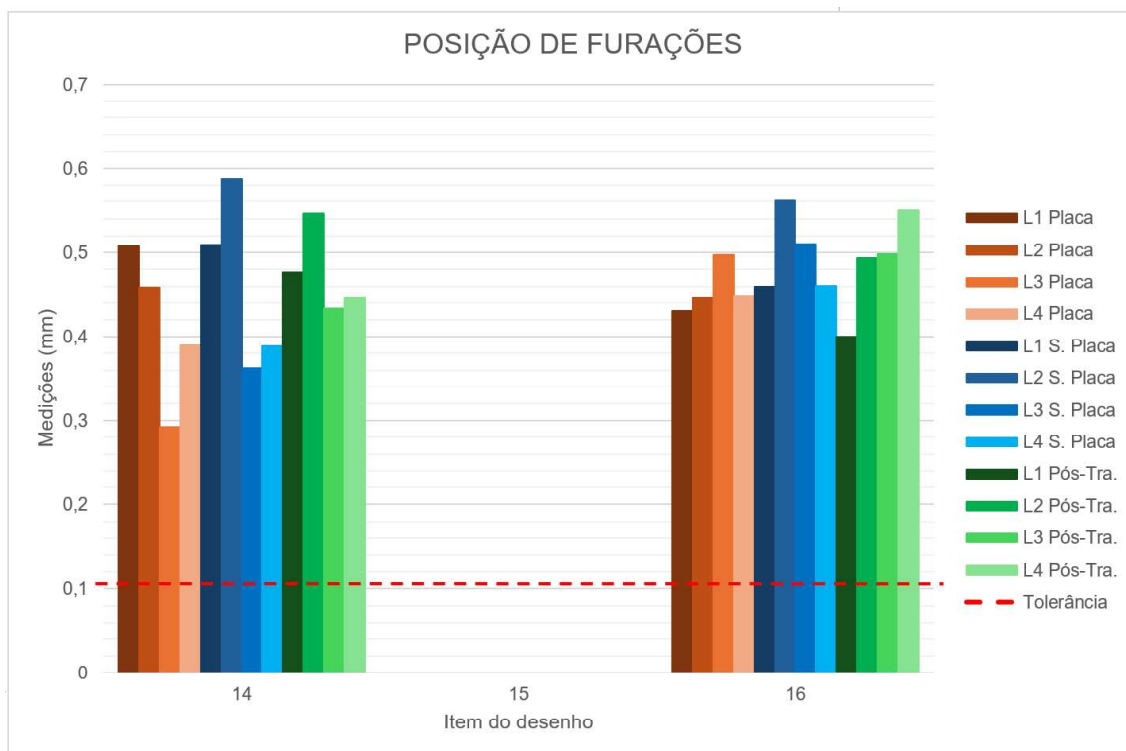


Figura 4.44 – Resultados do controlo da posição de furos.

De acordo com os resultados indicados na tabela 4.3 e a figura 4.4, mostra-se que a posição dos furos estão não conformes em relação ao referencial B, estando fora de tolerância. Pelos resultados verifica-se que os furos estão mais próximos do referencial B, o que pode ter ocorrido pela distorção térmica dos artefactos.

4.1.4. Dimensões gerais

Os controlos dimensionais das dimensões gerais dos artefactos foram realizados com CMM e paquímetro. As cotas 17 e 18 foram controladas com a CMM e as cotas 19 e 20 com paquímetro. As cotas controladas com a CMM foram utilizadas superfícies curvas e com ângulos de compensação enquanto as cotas de paquímetro foram controladas entre duas faces paralelas. Na tabela 4.4 estão os resultados do controlo.

Tabela 4.44 – Resultados do controlo das dimensões gerais.

Item	L1 Placa	L2 Placa	L3 Placa	L4 Placa	L1 S. Placa	L2 S. Placa	L3 S. Placa	L4 S. Placa	L1 Pós-Tra.	L2 Pós-Tra.	L3 Pós-Tra.	L4 Pós-Tra.
17	125,58	125,32	125,17	125,49	125,47	125,47	125,42	125,39	125,33	125,45	125,19	125,31
18	126,67	124,65	125,34	126,80	126,66	126,97	126,92	126,78	126,61	126,81	126,76	126,71
19	124,12	124,14	124,24	124,16	124,15	124,13	124,16	124,17				
20	123,77	123,74	123,75	123,80	123,73	123,73	123,76	123,74				

Na figura 4.5 estão indicados os resultados do controlo dimensional das dimensões gerais dos artefactos e respetivas tolerâncias.

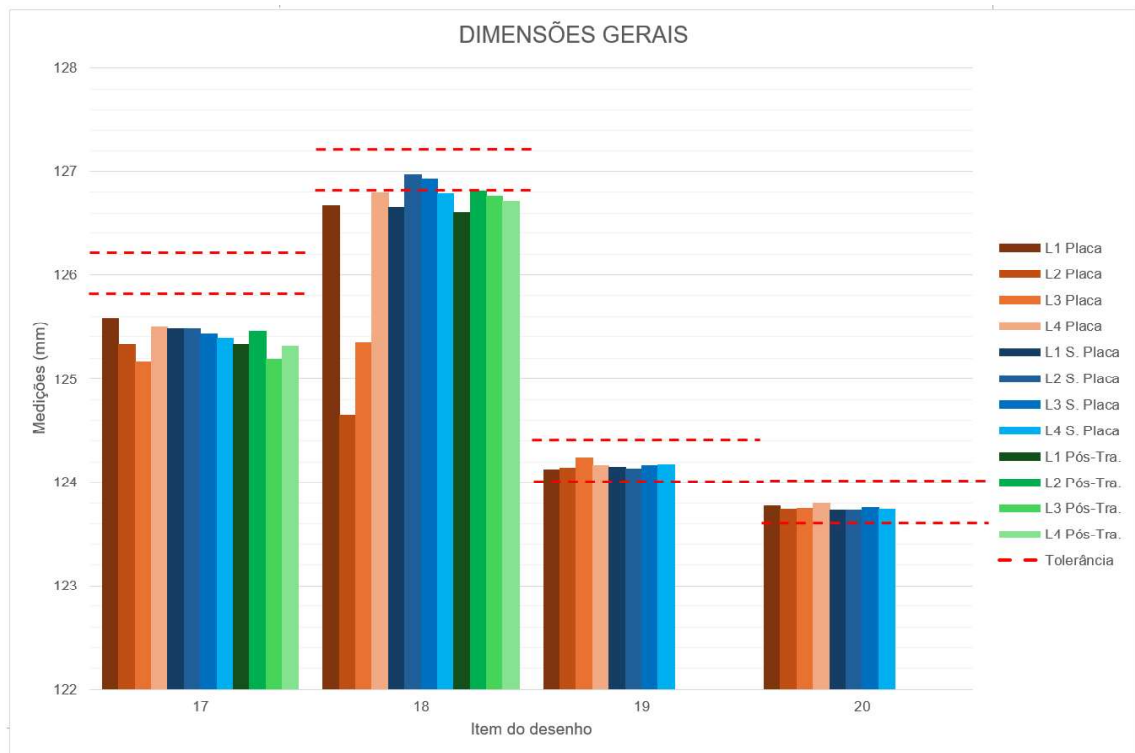


Figura 4.55 – Resultados do controlo das dimensões gerais.

Pelos resultados do controlo indicados, é possível comprovar que as cotas controladas por CMM ficam não conformes e abaixo da tolerância mínima. As cotas obtidas por paquímetros estão ligeiramente abaixo da cota nominal, mas dentro de tolerância. Uma das possíveis causas das cotas controladas em CMM estarem abaixo da tolerância é devido às causas de não conformidade do controlo geométrico de forma e posição dos furos, indicado anteriormente, o afeta este controlo também. Por contra, as cotas de paquímetro estão dentro de tolerância possivelmente devido existir pó agregado às superfícies de controlo colocando dentro de tolerância enquanto a CMM é controlo por pontos da peça.

4.1.5. Diâmetro de furos

O controlo dimensional dos furos utilizados na fabricação dos artefactos, foi feito

utilizado um micrómetro de interior para os furos Ø10H7 e Ø12H7 e um paquímetro para os furos de Ø5,1 mm e Ø6,1 mm. Na tabela 4.5 estão os resultados do controle.

Tabela 4.55 – Resultados do controle dos diâmetros dos furos.

Item	L1 Placa	L2 Placa	L3 Placa	L4 Placa	L1 S. Placa	L2 S. Placa	L3 S. Placa	L4 S. Placa	L1 Pós-Tra.	L2 Pós-Tra.	L3 Pós-Tra.	L4 Pós-Tra.
21	11,933	11,919	11,930	11,961	11,916	11,968	11,916	11,963				
22	11,936	11,934	11,916	11,918	11,967	11,939	11,948	11,951				
23	11,916	11,934	11,911	11,961	11,952	11,987	11,971	11,961				
24	11,905	11,944	11,933	11,948	11,916	11,948	11,916	11,940				
25	9,963	10,010	9,937	9,945	9,969	10,014	9,946	9,940				
26	4,99	4,99	5,01	5,01	4,99	4,99	4,99	5,00				
27	5,97	5,96	5,95	5,95	5,96	5,98	5,98	5,96				

Na figura 4.6 estão indicados os resultados do controle dimensional dos furos de Ø12H7 e respectiva tolerância.

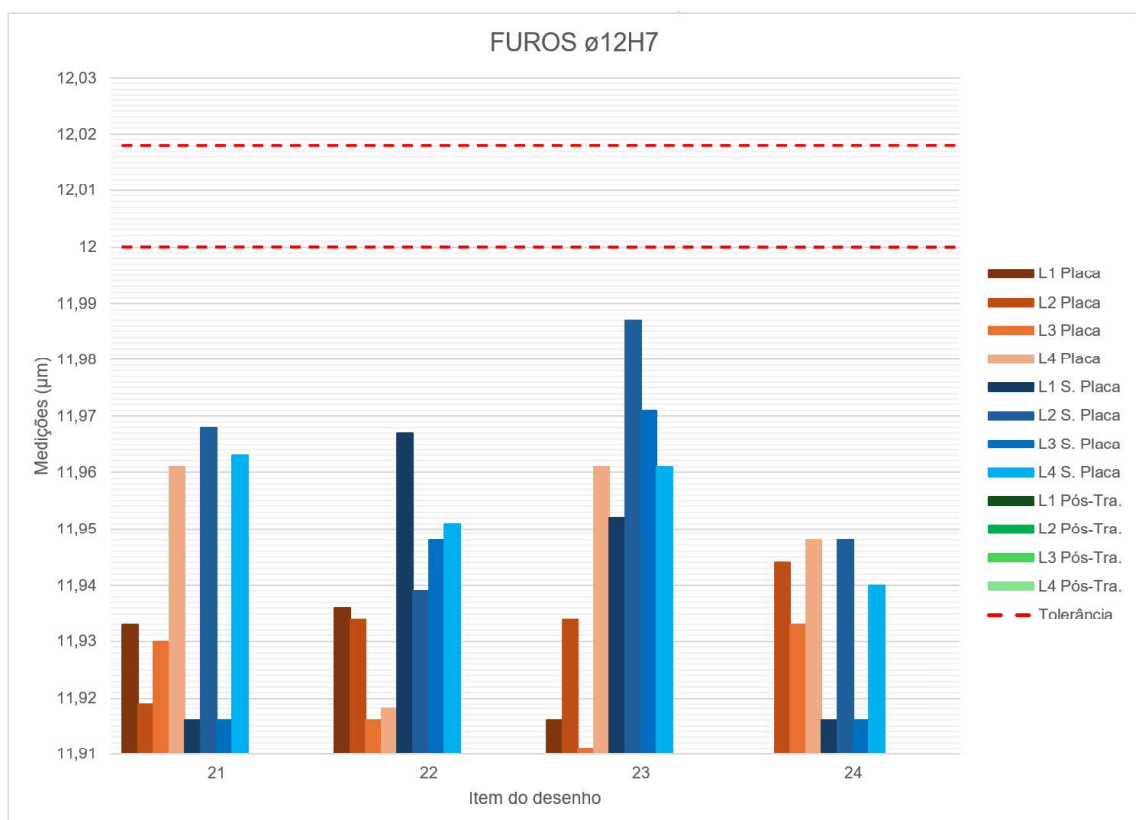


Figura 4.66 – Resultados do controle dos diâmetros dos furos de Ø12.

Na figura 4.7 estão indicados os resultados do controle dimensional dos restantes furos e respectivas tolerâncias.

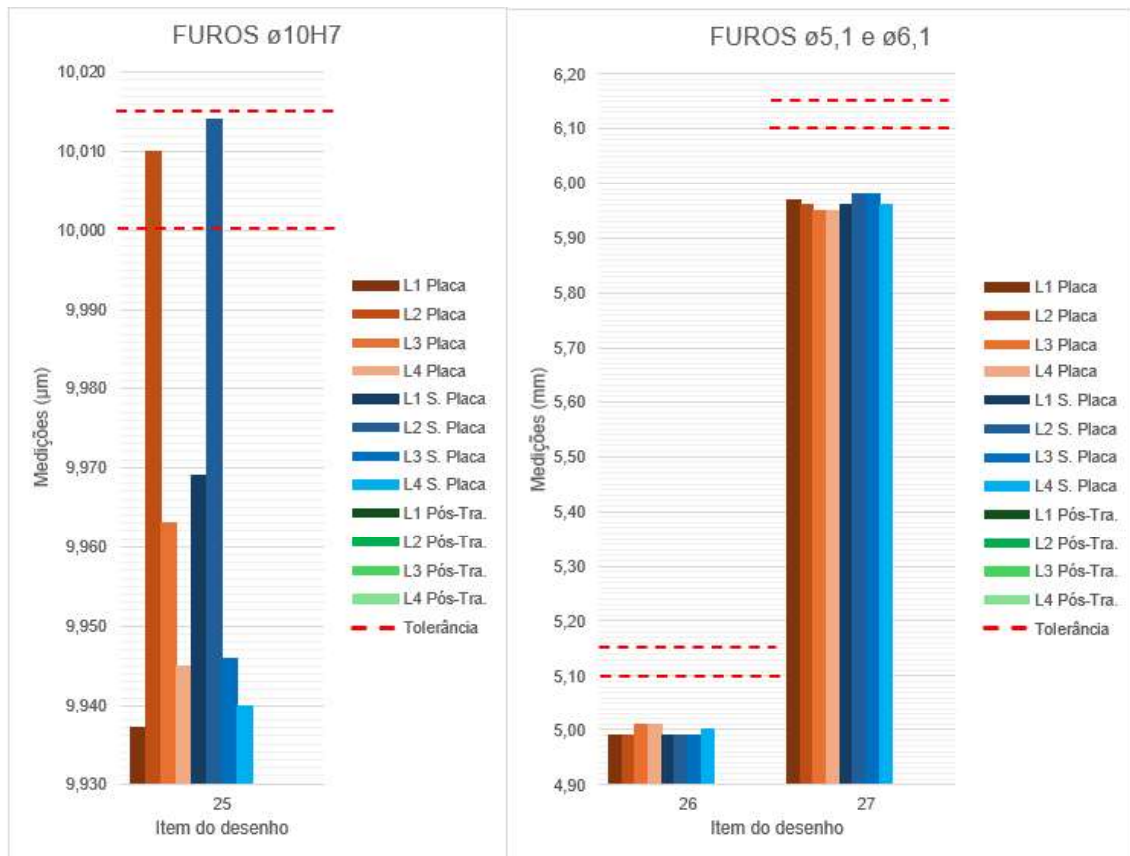


Figura 4.77 – Resultados do controlo dos diâmetros dos furos de Ø10, Ø6 e Ø5.

De acordo com a tabela 4.5, figura 4.6 e a figura 4.7 os resultados são não conformes para a fabricação da ferramenta, os furos Ø5,1 mm e Ø6,1 mm estão aproximadamente 0,13 mm a baixo da tolerância mínima, nos furos Ø10H7 e Ø12H7 todas as medições estão abaixo da tolerância mínima. Apesar do artefacto L2, no furo Ø10H7, estar dentro da tolerância, todos os restantes artefactos estão abaixo da tolerância mínima. Também, existe alguma dispersão nestes resultados apresentados em µm, que pode ser resultante de pó sinterizado na superfície dos furos e/ou devido aos picos de rugosidade resultantes da fabricação em PBF. Possíveis tratamentos de superfície posteriores poderão regularizar ou atenuar esta situação.

Para a fabricação da ferramenta é necessário colocar os furos no máximo da tolerância no CAD, para após controlo dimensional, caso as medições estejam abaixo da tolerância mínima, seja viável acabamento com mandril de forma a que as cotas fiquem conformes as tolerâncias. No próprio software de *slicing* é possível alterar parâmetros (*beam radius compensation*) de forma a compensar estes desvios.

4.1.6. Raios de moldagem

Para o controlo dimensional dos raios de moldagem dos artefactos foi utilizado um escantilhão de raios, que é um calibre de raios com medidas exatas dos raios a medir. Na tabela 4.6 estão os resultados do controlo.

Tabela 4.66 – Resultados do controlo dos raios de moldagem.

Item	L1, L2, L3, L4 Placa	L1, L2, L3, L4 S. Placa	L1, L2, L3, L4 Pós-Tra.
28	4	4	
29	4	4	
30	2,5	2,5	
31	2,5	2,5	
32	2	2	
33	2	2	
34	3	3	
35	3	3	
36	2	2	
37	2	2	
38	3	3	
39	3	3	
40	2,5	2,5	
41	2,5	2,5	
42	2	2	
43	2	2	
44	4	4	
45	4	4	

Na figura 4.8 estão indicados os resultados do controlo dimensional dos raios de moldagem e respetivas tolerâncias.

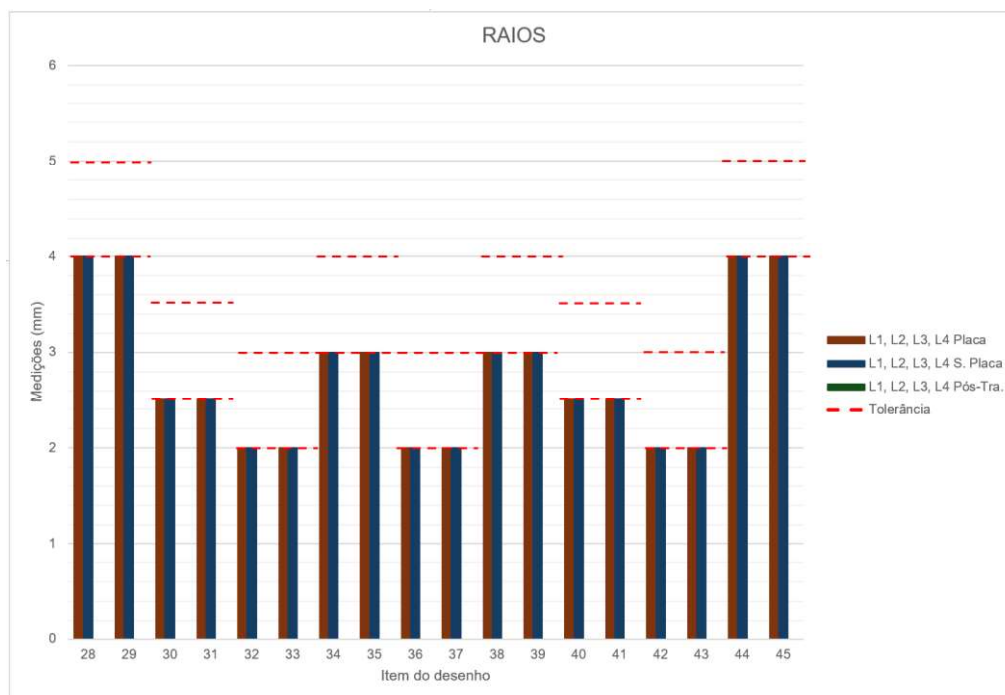


Figura 4.88 – Resultados do controlo dos raios de moldagem.

Como é possível verificar tanto pela tabela 4.6 e a figura 4.8, os raios de moldagem estão conformes e na cota mínima da tolerância, os raios no CAD estão na mínima tolerância. Isto indica que os artefactos estão de acordo com o CAD, pois, os valores de controlo são iguais.

4.1.7. Ângulos de compensação

O controlo dimensional dos ângulos de compensação dos artefactos foi utilizado uma suta, os ângulos de 90° foram introduzidos como referência e confirmação das extremidades dos artefactos, na tabela 4.7 estão os resultados do controlo.

Tabela 4.77 – Resultados do controlo dos ângulos.

Item	L1 Placa	L2 Placa	L3 Placa	L4 Placa	L1 S. Placa	L2 S. Placa	L3 S. Placa	L4 S. Placa	L1 Pós-Tra.	L2 Pós-Tra.	L3 Pós-Tra.	L4 Pós-Tra.
46	7,5	7,2	8	8	7,5	8	7,5	8				
47	2,5	2,5	2,6	2,5	2,5	2,5	2,75	2				
48	7,6	7,5	7	7,2	7,6	7,5	7,25	7				
49	5	5	5	5	5,5	5	5	5				
50	90	90,1	90	90	90	90	89,5	90				
51	90	90	90,1	90	90	90	89,5	89,5				

Na figura 4.9 estão indicados os resultados do controlo dimensional dos ângulos de compensação e respetivas tolerâncias.

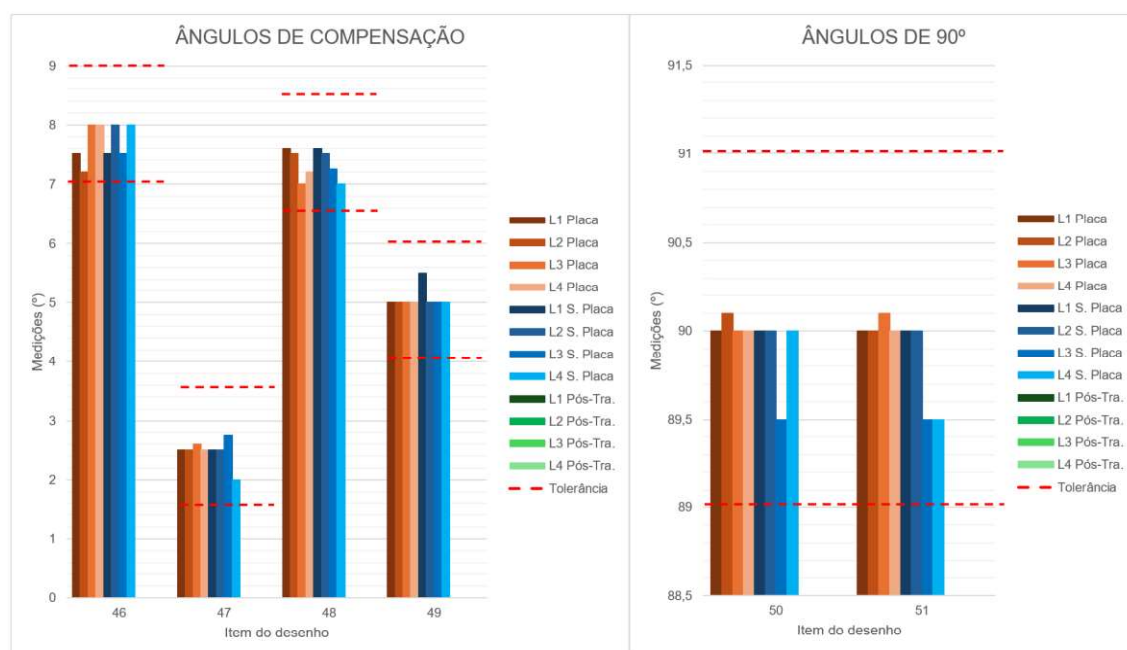


Figura 4.99 – Resultados do controlo dos ângulos.

Os resultados do controlo indicados pela tabela 4.7 e a figura 4.9 permitem comprovar que os ângulos de compensação estão todos conformes para o fabrico de ferramentas de moldagem. Verifica-se também que não existe grande dispersão entre as várias medições.

4.1.8. Distâncias entre furos

O controlo dimensional da distância entre furos foi realizado com CMM. E este controlo foi realizado pelas cotas 52 a 54 que são cotas entre furos e entre cada braço do artefacto. As restantes cotas são furos na mesma face. Na tabela 4.8 estão os resultados do controlo.

Tabela 4.88 – Resultados do controlo das distâncias entre furos.

Item	L1 Placa	L2 Placa	L3 Placa	L4 Placa	L1 S. Placa	L2 S. Placa	L3 S. Placa	L4 S. Placa	L1 Pós-Tra.	L2 Pós-Tra.	L3 Pós-Tra.	L4 Pós-Tra.
52	142,79	142,84	142,79	142,81	142,78	142,76	142,76	142,82	142,8	142,76	142,78	142,84
53	99,88	99,89	99,90	99,95	99,90	99,89	99,92	99,95	99,92	99,90	99,88	99,96
54	76,27	76,28	76,21	76,21	76,18	76,24	76,21	76,24	76,22	76,26	76,22	76,27
55	13,99	14,02	13,94	13,99	13,96	14,02	14,02	13,98	13,98	14,03	14,02	13,98
56	14,02	13,97	14,01	14,05	14,03	13,98	13,99	14,04	13,99	13,99	14,01	14,05
57	13,98	14,01	13,91	14,03	13,95	13,98	13,98	14,02	13,95	13,97	13,96	14,02
58	14,03	13,93	13,95	13,96	13,98	13,96	13,95	13,96	14,01	13,95	13,98	13,97

Na figura 4.10 estão indicados os resultados do controlo dimensional da distância entre furos e respetivas tolerâncias.

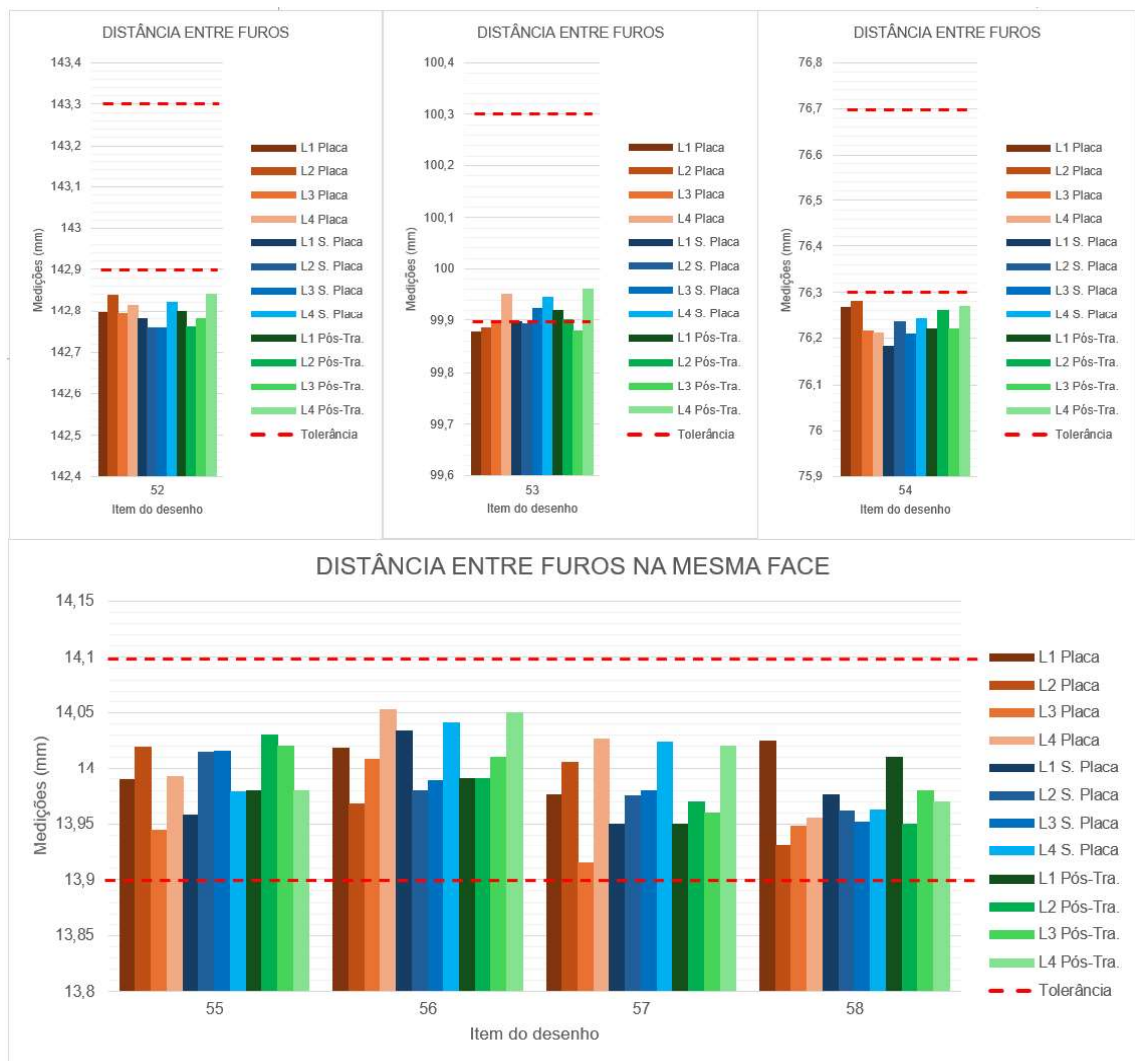


Figura 4.1010 – Resultados do controlo das distâncias entre furos.

De acordo com os resultados indicados pela tabela 4.8 e a figura 4.10, verifica-se que os furos na mesma face estão próximos da cota nominal, mas os furos entre cada lado do artefacto estão abaixo da tolerância, o que indica que os furos aproximaram-se existindo distorção no artefacto.

4.1.9. Distâncias lineares nos eixos de coordenadas X e Y

Para perceber o comportamento dos artefactos nos eixos de coordenadas X e Y, cada braço do artefacto é considerado um eixo de coordenada. As faces laterais foram controladas por CMM quanto à distância entre elas. Na tabela 4.9 estão os resultados do controlo.

Tabela 4.99 – Resultados do controlo das dimensões nos eixos X e Y.

Item	L1 Placa	L2 Placa	L3 Placa	L4 Placa	L1 S. Placa	L2 S. Placa	L3 S. Placa	L4 S. Placa	L1 Pós-Tra.	L2 Pós-Tra.	L3 Pós-Tra.	L4 Pós-Tra.
59	23,99	24,11	24,01	24,03	24,06	24,05	24,11	24,01	23,91	24,00	24,01	23,92
60	47,73	47,82	47,73	47,74	47,83	47,86	47,81	47,78	47,78	47,85	47,94	47,84
61	71,77	71,90	71,80	71,78	71,85	71,91	71,87	71,82	71,71	71,83	71,89	71,75
62	95,71	95,79	95,76	95,71	95,72	95,75	95,76	95,70	95,67	95,73	95,77	95,73
63	24,03	24,04	24,12	24,11	24,02	23,99	24,05	23,99	23,91	24,00	24,01	23,90
64	47,86	47,82	47,91	47,85	47,88	47,82	47,90	47,85	47,91	47,89	47,82	47,83
65	71,96	71,84	72,00	71,90	71,94	71,85	71,94	71,90	71,82	71,78	71,78	71,70
66	95,76	95,76	95,79	95,74	95,71	95,72	95,72	95,76	95,76	95,75	95,73	95,75

Na figura 4.11 estão indicados os resultados do controlo dimensional linear nos eixos de coordenadas em X e Y e respetivas tolerâncias.

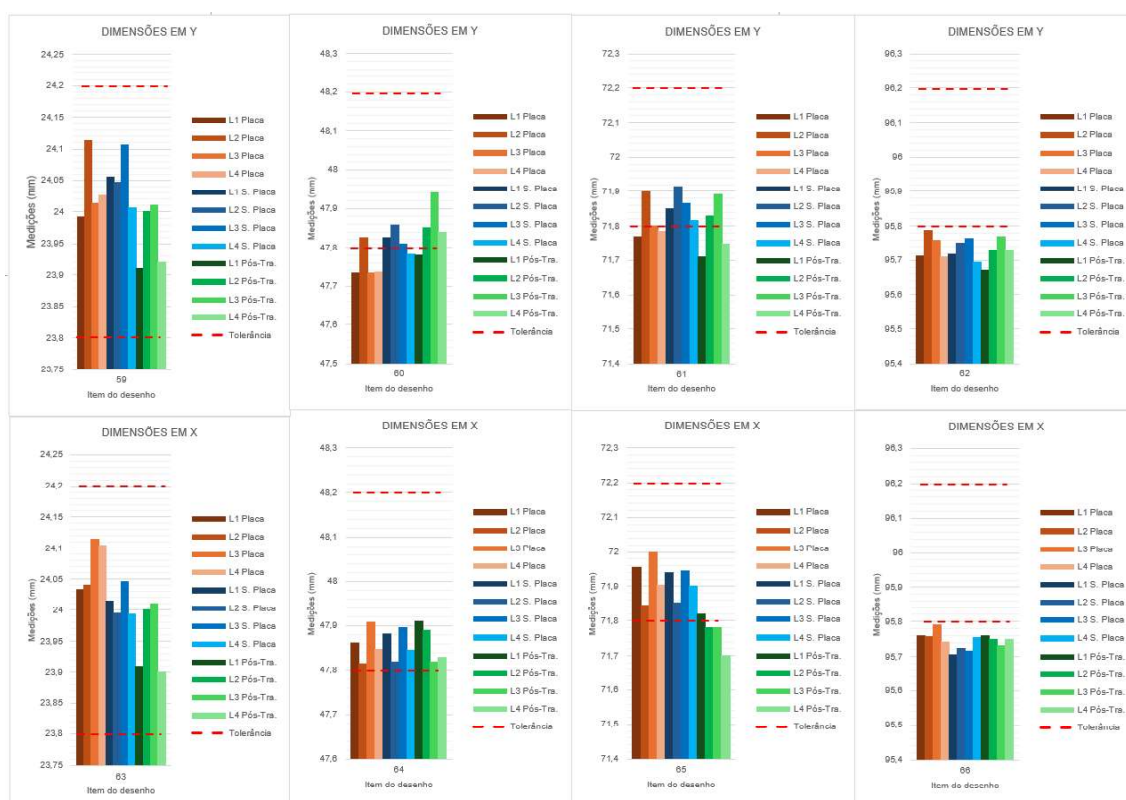


Figura 4.1111 – Resultados do controlo das dimensões nos eixos X e Y.

Pelos resultados da Tabela 4.9 e figura 4.11, é possível verificar os valores medidos tendem a ser cada vez mais próximos da tolerância mínima ou mesmo abaixo, isto, comprova que os artefactos contraíram nos eixos de coordenadas. Quanto maior a distância maior será a contração do artefacto. Esta situação também pode vir a ser compensada no *software* de *slicing* e pode resultar da temperatura da base da impressora

(que neste caso foi de 170°C). Considerando o coeficiente de expansão térmica do material, temperatura e dimensões em causa, esta contração pode ascender a 0.1 mm.

4.1.10. Distâncias lineares no eixo de coordenadas Z:

Para perceber o comportamento dos artefactos no eixo de coordenadas Z, cada braço do artefacto tem superfícies paralelas à base com diferentes cotas de altura, estas cotas foram controladas por CMM. O controlo não foi efetuado com os artefactos na placa de impressão, pois não era possível aceder à parte inferior do artefacto. Na tabela 4.10 estão os resultados do controlo.

Tabela 4.10.10 – Resultados do controlo das dimensões no eixo Z.

Item	L1 S. Placa	L2 S. Placa	L3 S. Placa	L4 S. Placa	L1 Pós-Tra.	L2 Pós-Tra.	L3 Pós-Tra.	L4 Pós-Tra.
67	15,25	15,26	15,19	15,19	15,19	15,23	15,12	15,11
68	10,17	10,23	10,21	10,19	10,08	10,20	10,14	10,11
69	25,00	25,22	25,11	25,17	25,01	25,15	25,10	25,17
70	10,09	10,24	10,19	10,20	10,03	10,22	10,17	10,11
71	15,13	15,29	15,19	15,26	15,06	15,25	15,17	15,15
72	15,08	15,10	15,29	15,30	15,07	15,10	15,19	15,11
73	10,00	10,07	10,19	10,19	10,05	10,06	10,17	10,09
74	25,18	25,24	25,08	25,18	25,05	25,20	25,03	25,15
75	10,14	10,20	10,24	10,16	9,98	10,18	10,17	10,14
76	15,14	15,23	15,23	15,21	15,08	15,19	15,27	15,24

Na figura 4.12 estão indicados os resultados do controlo dimensional linear no eixo de coordenadas em Z e respetivas tolerâncias.

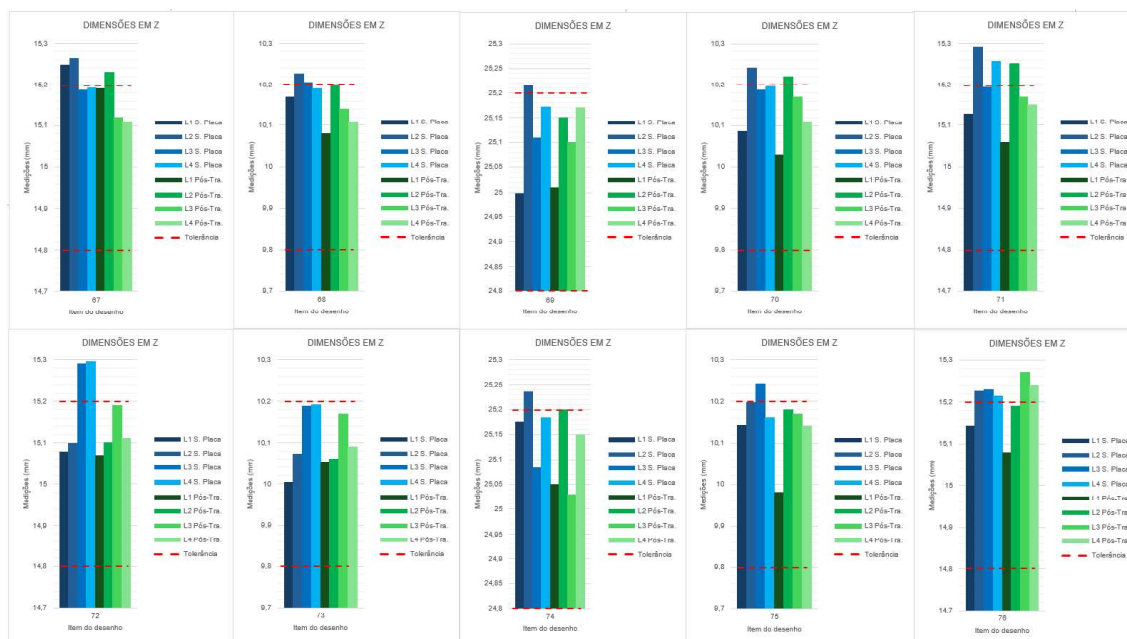


Figura 4.1212 – Resultados do controlo das dimensões no eixo Z.

De acordo com os resultados indicados na tabela 4.10 e na figura 4.12, é possível verificar que as cotas com os itens 67, 71, 72 e 76, que são as superfícies na extremidade dos braços dos artefactos, têm valores acima da tolerância ou maiores em relação às superfícies no meio. Isto indica que cada braço do artefacto está numa forma em U em vez de ser plana. Também é possível verificar que não é detetável a dispersão nas medidas entre as diferentes alturas do artefacto.

4.1.11. Análise de Resultados Relativamente Controlo Dimensional e Geométrica dos Artefactos produzidos

A análise dimensional dos artefactos revelou que, antes de qualquer pós-tratamento superficial, as superfícies apresentam rugosidade Ra significativa, o que condiciona a precisão dimensional. Esta rugosidade é um efeito natural do processo PBF, uma vez, que o controlo foi realizado por CMM, a sonda pode tocar em pó sinterizado nas superfícies dos artefactos. Teria sido mais detalhado o controlo dos artefactos se tivessem sido controlados por *scan* 3D de maneira a ser possível verificar com precisão as distorções dos artefactos, tecnologia esta que estará disponível brevemente, ou então após as operações de pós-processamento para melhoria do acabamento superficial.

As medições geométricas demonstram também a existência de distorções de origem térmica do processo, visíveis sobretudo nas faces laterais e nos referências utilizados para o controlo de posição. A posição dos furos nos referências B, C e D revelaram-se fora de tolerância, evidenciando deslocamentos provocados pelo sobreaquecimento, que resulta nos suportes partidos.

A análise das cotas nos eixos em X e Y mostram um padrão de contração dimensional. Os artefactos estão contraídos no seu volume, quanto maior a distância da medida maior a contração. A compensação da contração de origem térmica, devido à temperatura com que foi colocada a base da máquina, ainda que uniforme, poderia ter um contributo positivo neste aspeto.

No eixo em Z verificou-se a deformação dos braços dos artefactos, que adquiriram uma forma ligeiramente em curvatura, efeito em U, com as extremidades mais elevadas.

O conjunto de resultados anteriores demonstra que o processo PBF no momento não cumpre totalmente com as tolerâncias dimensionais e geométricas das ferramentas convencionais, ainda assim, seria necessário testar numa ferramenta.

A principal razão aparenta ser resultado de suportes partidos durante a fabricação, mostrando que não houve dissipação térmica e que os mesmos não suportaram a carga devido às tensões residuais. Outra possível razão é devido aos artefactos serem completamente sólidos, aumentando consideravelmente a carga térmica e os problemas com escoamento de calor e tensões residuais.

Na figura 4.13 é possível verificar o sentido das distorções pelas setas em vermelho resultantes dos controlos efetuados.

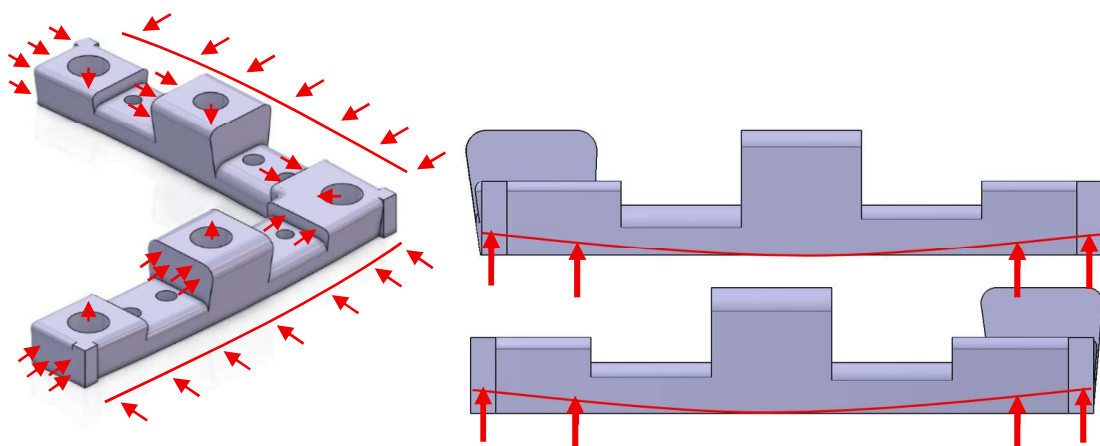


Figura 4.1313 – Distorção dos artefactos após análise dimensional.

Para um melhor entendimento das distorções, em vez de controlo por CMM ou instrumentos convencionais de controlo, deveria ter sido utilizado um *scan* 3D que será disponibilizado futuramente. Apesar dos resultados não serem 100% conformes e conclusivos, decidiu-se fabricar a ferramenta para melhor entender o seu comportamento dimensional.

4.2. Resultados do Pós-Tratamento Superficial

Os artefactos após fabricação e controlo dimensional, foram sujeitos a acabamento superficial, conforme descrito no capítulo 3.4.

Na tabela 4.11 são apresentados os resultados da aplicação dos vários tratamentos superficiais.

Tabela 4.11 – Média aritmética da rugosidade (Ra) inicial e com pós-tratamento superficial.

Designação do Artefacto	Ra Inicial Topo (μm)	Ra Inicial Lateral (μm)	Pós-Tratamento	Ra Pós-Tratamento Topo (μm) e redução em %	Ra Pós-Tratamento Lateral (μm) e redução em %
L1 Sólido	11,5	15,9	JA	3,8 (67%)	7,1 (55%)
L2 Sólido	16,6	16,6	PV	9,0 (46%)	13,1 (21%)
L3 Sólido	13,3	16,5	PV + DA	11,4 (14%)	12,9 (22%)
L4 Sólido	13,6	16,7	JA + PV	5,1 (63%)	6,1 (63%)
L1 Sólido2	11,5	15,9	JA + DA	7,9 (31%)	8,1 (49%)

Os artefactos foram controlados no topo e na lateral. No topo é importante conhecer a rugosidade numa camada uniforme, na lateral é importante conhecer a rugosidade provocada pela sobreposição de cada camada.

Na figura 4.14 e 4.15 são apresentados os resultados de rugosidade dos artefactos antes da aplicação dos tratamentos de superfícies e após a aplicação do tratamento superficial. O tratamento com menos valor de rugosidade Ra é o jato de areia com 3,8 μm no topo e 7,1 μm nas laterais.

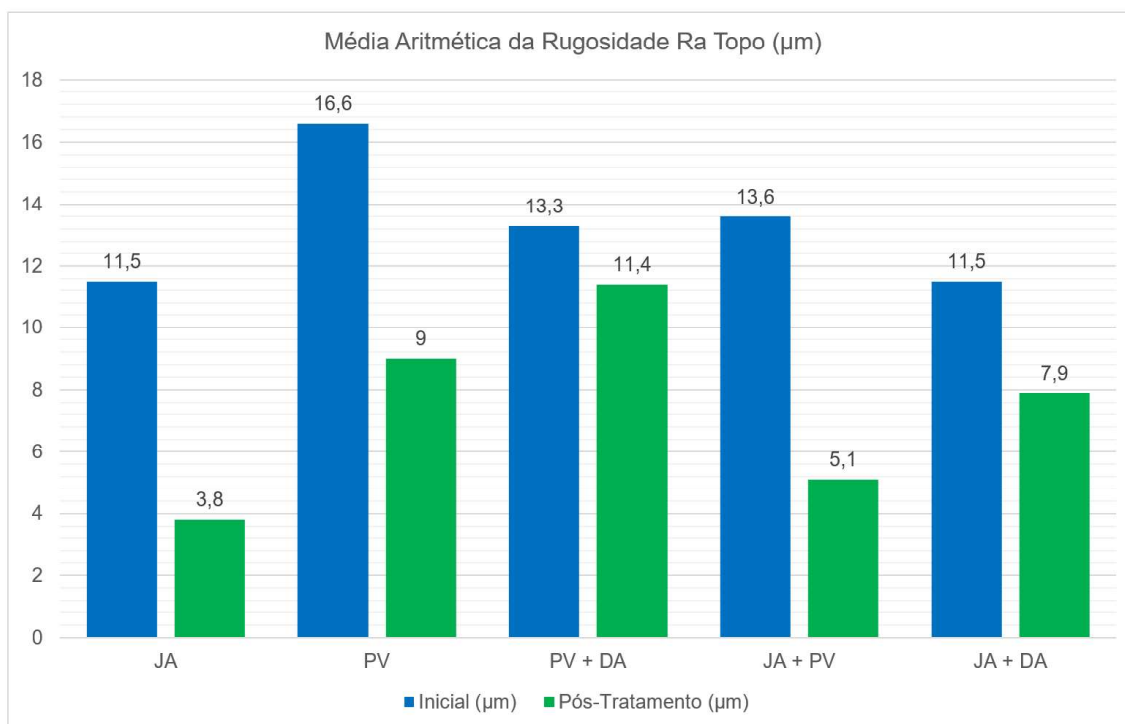


Figura 4.1414 – Rugosidade dos artefactos antes e após tratamento superficial no topo.

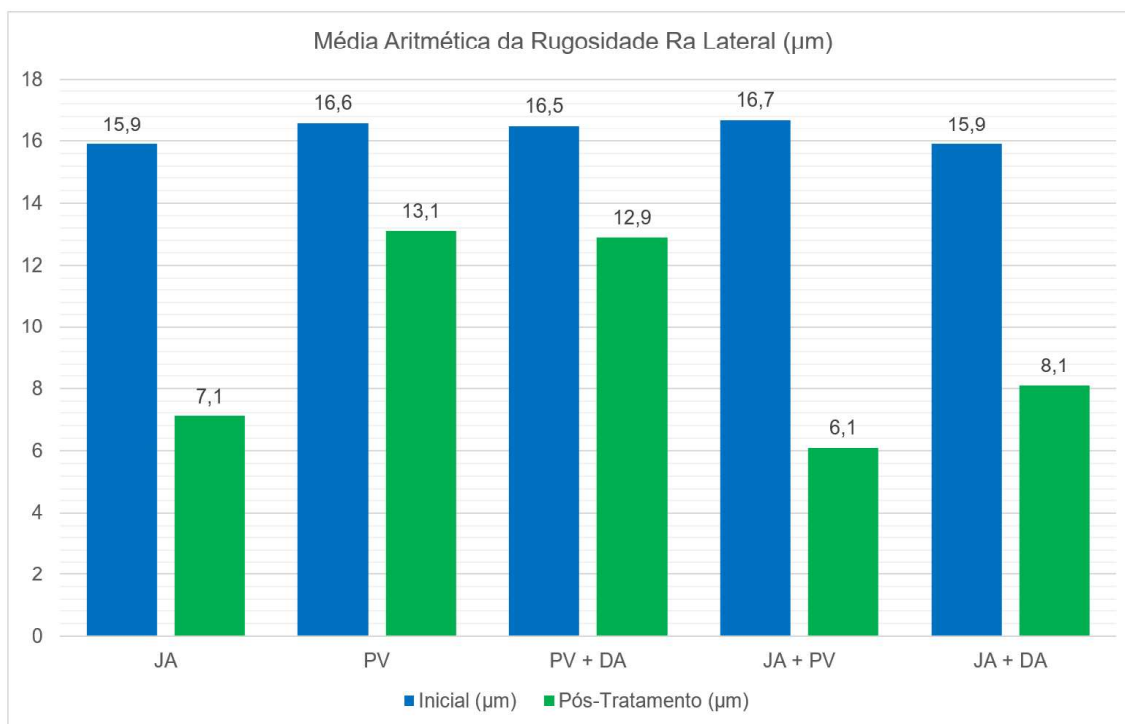


Figura 4.1515 – Rugosidade dos artefactos antes e após tratamento superficial na lateral.

Na figura 4.16 e 4.17 são apresentados os resultados em percentagem de redução da rugosidade após a aplicação do tratamento superficial, no topo e lateral dos artefactos.

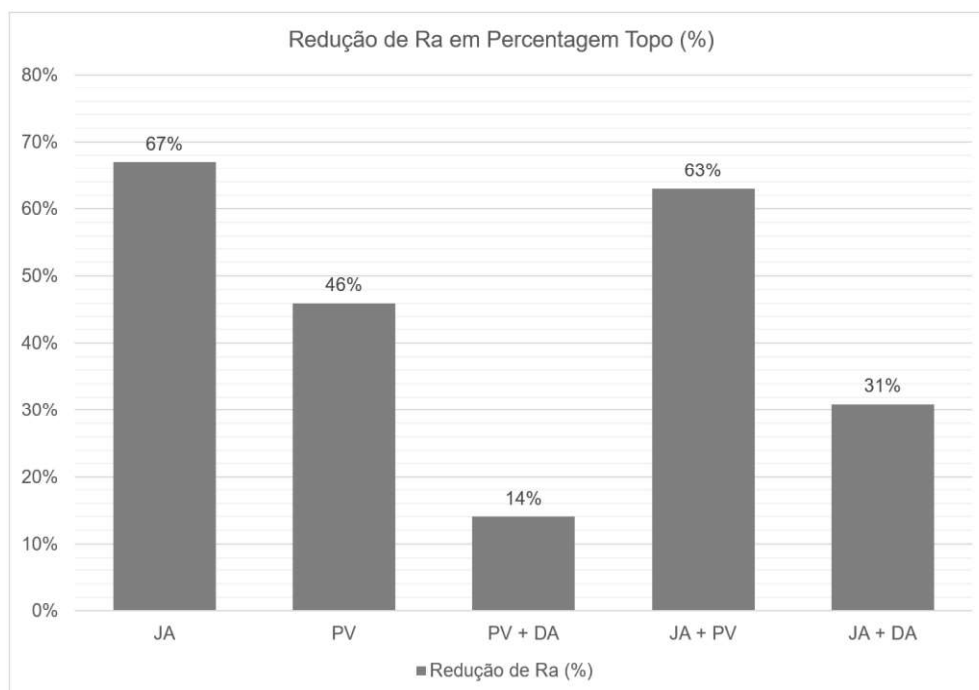


Figura 4.1616 – Resultados em percentagem de redução da rugosidade no topo.

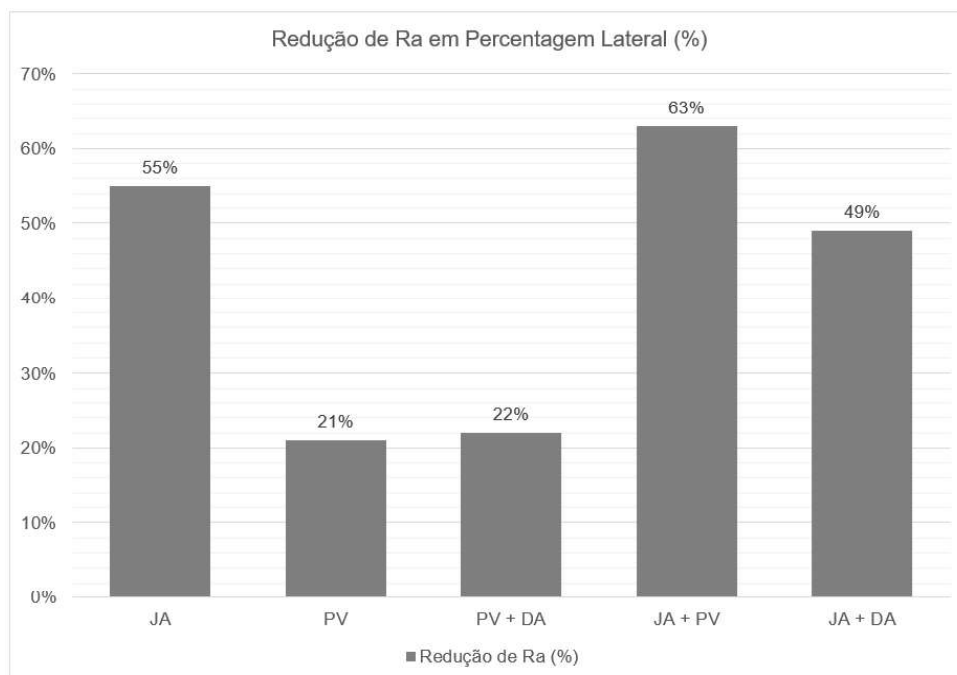


Figura 4.1717 – Resultados em percentagem de redução da rugosidade na lateral.

Pelos resultados o jato de areia é o mais eficaz. Complementando com pedras vibratórias reduz-se ainda mais a rugosidade, ainda que ligeiramente. Provavelmente o

jato de areia não foi realizado uniforme entre os artefactos L1 e L4 e obtendo-se valores diferentes. Também foi possível verificar que a decapagem faz aumentar a rugosidade, isto porque os químicos não atacam a superfícies uniformemente, não devendo ser considerada em aplicações futuras.

Apesar do jato de areia ter obtido melhores resultados, como ainda não está disponível na Lauak em Portugal, optou-se pelas pedras vibratórias para não aumentar o ciclo de fabricação da ferramenta.

4.3. Resultados dos Ensaios de Compressão às Estruturas

Na tabela 4.12 estão apresentadas algumas características dos provetes produzidos por fabrico aditivo, através do processo de PBF, registados antes da realização dos ensaios de compressão. São a massa, a mínima cota encontrada na faces laterais e altura dos cubos (máxima condição), a densidade relativa obtida pelo CAD e a densidade medida, através dos dados recolhidos.

Tabela 4.1212 – Características físicas dos provetes após fabricação.

Designação do Proвете	Massa Observada (g)	Dimensões (mm)			Densidade Relativa (CAD)	Densidade Relativa (Medida)
		Lateral 1	Lateral 2	Altura 3		
100% Sólido 1	21,1352	20,15	20,10	20,49	100%	100,0%
100% Sólido 2	21,1789	20,14	20,09	20,50	100%	100,0%
100% Sólido 3	21,1738	20,16	20,16	20,48	100%	100,0%
50% TPMS <i>Diamond 1</i>	10,7366	19,73	19,74	20,22	50%	53,5%
50% TPMS <i>Diamond 2</i>	10,7385	19,71	19,74	20,31	50%	53,3%
50% TPMS <i>Diamond 3</i>	10,7042	19,68	19,71	20,2	50%	53,6%
67% TPMS <i>Diamond 4</i>	14,6839	19,90	19,88	20,31	67%	71,7%
34% TPMS <i>Gyroid 1</i>	7,2019	19,60	19,65	20,06	34%	36,6%
34% TPMS <i>Gyroid 2</i>	7,1731	19,56	19,54	19,99	34%	36,8%
34% TPMS <i>Gyroid 3</i>	7,1976	19,58	19,55	19,98	34%	36,9%
56% TPMS <i>Gyroid 4</i>	12,1219	19,88	19,88	20,30	56%	59,3%
50% <i>Lattice Diamond 1</i>	9,6686	18,84	18,85	18,88	50%	56,6%

50% <i>Lattice Diamond</i> 2	9,6848	18,84	18,88	18,71	50%	57,1%
50% <i>Lattice Diamond</i> 3	9,7194	18,82	18,84	18,93	50%	56,8%
50% <i>Lattice Crown</i> 1	9,5186	19,05	19,07	18,96	50%	54,2%
50% <i>Lattice Crown</i> 2	9,5384	19,05	19,03	18,98	50%	54,4%
50% <i>Lattice Crown</i> 3	9,5212	19,09	19,02	18,97	50%	54,3%
22% <i>Lattice BCC</i> 1	5,5670	20,81	20,82	21,32	22%	23,7%
22% <i>Lattice BCC</i> 2	5,5869	20,85	20,84	21,36	22%	23,6%
22% <i>Lattice BCC</i> 3	5,5818	20,88	20,88	21,31	22%	23,6%
50% <i>Lattice BCC</i> 4	9,4956	18,92	18,92	19,41	50%	53,6%
50% <i>Lattice BCC</i> 5	9,5054	18,97	18,95	19,32	50%	53,7%
50% <i>Lattice BCC</i> 6	9,5212	18,91	18,90	19,36	50%	54,0%
50% <i>ISOGRID</i> 1	10,4395	20,30	20,46	20,33	50%	48,5%
50% <i>ISOGRID</i> 2	10,4680	20,30	20,49	20,35	50%	48,5%
50% <i>ISOGRID</i> 3	10,4323	20,30	20,47	20,32	50%	48,5%

A tensão de cedência à compressão (*compressive offset yield strength*) foi determinada pelo limite de proporcionalidade a 0,2%. A partir deste valor, a estrutura começa a deformar-se plasticamente, não retornando à forma original. Este ensaio é muito importante para determinar a estrutura mais eficiente e confirmar que suporta a pressão exercida pelas prensas.

Na figura 4.18 são apresentados os valores obtidos do ensaio de compressão. É possível comprovar que todas as estruturas com densidade relativa de 50% têm valores superiores a 45 MPa, aproximadamente 2 vezes superiores. Isto indicar que tanto a estrutura como a densidade escolhida, suportam perfeitamente a carga. A TPMS *Gyroid* com densidade relativa de 34% têm valores ligeiramente superiores a 45 MPa, o que faz ser um risco a sua utilização. A Estrutura *Lattice BCC* com densidade relativa de 22% não pode ser utilizada no projeto de ferramentas porque tem valores inferiores a 45 MPa. A estrutura Sólida serve naturalmente como comparação com as restantes estruturas, tendo valores muito superiores.

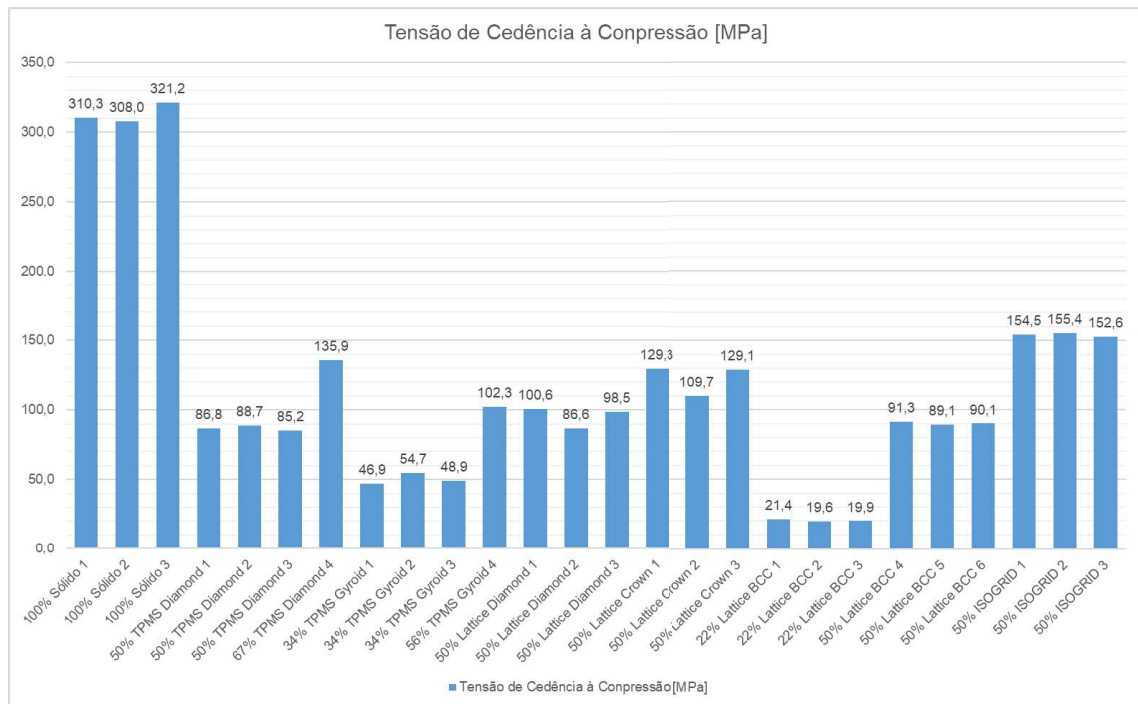


Figura 4.1818 – Tensão de cedência à compressão.

O módulo elástico à compressão (*compressive elastic modulus*) é um parâmetro importante na rigidez da estrutura quando sujeita à compressão. Isto é, quanto um valor é mais elevado significa que a estrutura resiste mais à deformação elástica, portanto, é mais rígida para a mesma carga aplicada.

Na figura 4.19 indica os valores do módulo elástico à compressão. As estruturas com maior densidade relativa apresentam maiores valores, mostrando que a densidade relativa está relacionada com o módulo elástico à compressão. Nas estruturas com densidade relativa de 50% verificou-se que a estrutura *ISOGRID* apresenta valores do módulo elástico à compressão superiores em comparação com as restantes, algo que também já se constatou na tensão de cedência.

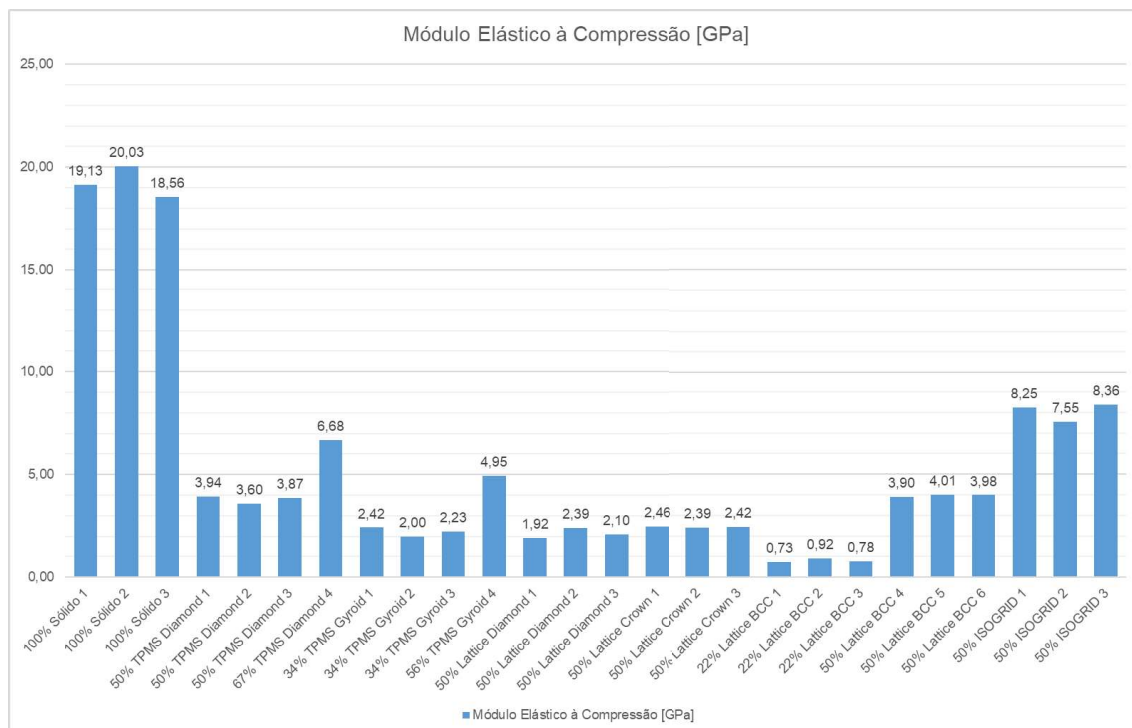


Figura 4.1919 – Módulo elástico à compressão.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente é possível identificar a estrutura com melhor desempenho para ser utilizada no projeto de ferramentas é a estrutura *ISOGRID*. Tem valores de tensão de cedência à compressão, entre 152,6 MPa e 155,4 MPa, estes valores sendo significativamente superiores a 45 MPa e aos das outras estruturas. Os resultados do módulo elástico à compressão também são maiores para a estrutura *ISOGRID*. Ao ter maior rigidez, terá também menor deformação elástica, o que é benéfico para este tipo de aplicação. Também é possível verificar que todas as estruturas com densidade relativa de 50%, ou mais, suportam a carga da prensa, mesmo à pressão máxima.

A estrutura *ISOGRID*, destaca-se ainda no que diz respeito ao software a ser usado, não sendo necessário *software* complementar com módulos dedicados para o desenho de estruturas do tipo TPMS ou reticuladas. Podem facilmente ser desenhadas em CATIA V5, não requer computadores com boas capacidades para transformar a estruturas numa geometria 3D, enquanto as restantes estruturas ensaiadas têm superfícies complexas levando à necessidade de computação elevada e tempos superiores na fase de projeto.

Pelos ensaios realizados, ainda é possível reduzir a densidade relativa da estrutura *ISOGRID* valores inferiores a 50% e mesmo assim exceder a pressão máxima das

prensas. De notar, que a pressão mais alta a aplicar na ferramenta ronda os 45 MPa, resultando num coeficiente de segurança de 3,4. Sem dúvida que ainda há espaço para baixar ainda mais a densidade de preenchimento, permitindo reduzir ainda mais a massa da ferramenta e assim ajudar a tornar o processo mais competitivo do ponto de vista económico.

Capítulo 5

Apresentação do Caso de Estudo

O presente caso de estudo tem como objetivo fabricar uma ferramenta de moldagem para prensa hidrofórmica/borracha, tendo em conta os resultados obtidos no capítulo anterior. Pretende-se evidenciar as vantagens e desvantagens ao se utilizar esta tecnologia de fabrico, em termos de viabilidade, custos e redução do tempo de fabrico, comparativamente com processos de fabrico convencionais.

5.1. Introdução

Para este estudo foi importante considerar e analisar numa primeira fase todas as características e tolerâncias, dimensionais e geométricas, a respeitar no projeto de ferramentas durante a fabricação de ferramentas através do processo PBF. Com isto, foram produzidos por PBF e testados artefactos, desenhados acordo com a norma ASTM 53902, conforme apresentado nos capítulos anteriores. Com estes artefactos foi também possível testar o efeito de vários tratamentos de superfície, tendo-se constatado que o mais eficaz foi o de jato de areia, que combinado com o de pedras vibratórias pode melhorar, ainda que ligeiramente, o acabamento.

Após a análise dos artefactos, foi selecionada estrutura mais eficaz para o preenchimento interior da ferramenta, uma vez que por processos aditivos não faz sentido produzir-se uma ferramenta 100% maciça. Dos resultados à compressão, entre estruturas do tipo TPMS, reticulares e ISOGRID com 50% de redução de volume, concluiu-se que a mais eficaz seria a ISOGRID, tanto em termos de resistência mecânica como em termos de rigidez. Demonstrou-se ainda que todas as geometrias testadas suportavam a carga máxima da prensa existente na Lauak Portugal.

Como padrão de comparação em contexto real, uma ferramenta existente e fabricada pelo processo convencional de maquinaria foi utilizada e os resultados confrontados com a utilização da ferramenta fabricada em PBF.

Para finalizar a validação da ferramenta em utilização real, será utilizada primeiramente na prensa de borracha com a pressão próximo de 300 bar. Se não ocorrer dano na ferramenta, então poderá ser utilizada na prensa hidrofórmica, que irá até um máximo de 450 bar. Uma das etapas finais de validação de ferramentas é o controlo dimensional das peças moldadas através de ferramentas, por isso, será importante controlar as peças como etapa final da fabricação e validação experimental.

Para melhor entender o caso de estudo, é apresentado nos seguintes subcapítulos, que tipo de ferramentas são projetadas, o ciclo de desenvolvimento de ferramentas, os tipos de custos associados à situação atual e a ferramenta produzida por PBF na Lauak Portugal.

5.2. Ferramentas de Moldagem.

A indústria aeronáutica necessita de uma variedade enorme de peças metálicas em chapa com geometrias complexas, para as fabricar é requerido processos de moldagem em prensas borracha/hidrofórmica, sendo estas muito solicitadas. O processo consiste em dobrar abas não retilíneas ou moldar concavidades na peça, as prensas ao exercerem pressão sobre a peça, esta irá moldar à base da ferramenta, estas ferramentas são específicas a cada peça.

As ferramentas (base e aperta-chapa) e as peças a enformar (chapa), são posicionados sobre a mesa porta-ferramenta que será introduzida na prensa.

A prensa de borracha tem um colchão de borracha fixo no interior da prensa na sua parte superior. O Pistão hidráulico da prensa desloca a mesa para cima e exerce pressão sobre a borracha. Sob elevada pressão a borracha deforma-se acomodando a ferramenta, o que permite a moldagem da peça.

A prensa hidrofórmica tem uma membrana de borracha no seu interior, que separa o fluido das ferramentas. Este fluido sobre uma elevada pressão permite à membrana aplicar uma pressão uniforme sobre a ferramenta, moldando a chapa que está sobre esta.

Comparando as duas prensas, a prensa hidrofórmica permite uma pressão mais uniforme sobre a ferramenta o que permite também uma moldagem uniforme. Na prensa de borracha, a pressão é exercida pelo pistão através de uma borracha, podendo não apresentar uma pressão constante sobre a ferramenta, portanto, em determinadas zonas da ferramenta existem valores de pressão diferentes.

As ferramentas não são fixadas na mesa da prensa, são simplesmente posicionadas. Caso as dimensões permitam, podem ser colocadas várias ferramentas na mesa porta-ferramenta da prensa.

A ferramenta selecionada para o caso de estudo é uma ferramenta possível de ser utilizada na prensa de borracha e na prensa hidrofórmica. Em baixo estão identificadas as características da ferramenta. Na figura 5.1 é mostrada ferramenta existente e fabricada pelo processo de maquinação convencional.

Características da ferramenta:

- Dimensões: X: 199,01 mm; Y: 132,65 mm; Z: 65,2 mm;
- Tecnologia de fabricação: Maquinação CNC;

- Material: Liga de alumínio 2017A T4;
- Massa: total: 3,82 Kg; base: 3,186 Kg.

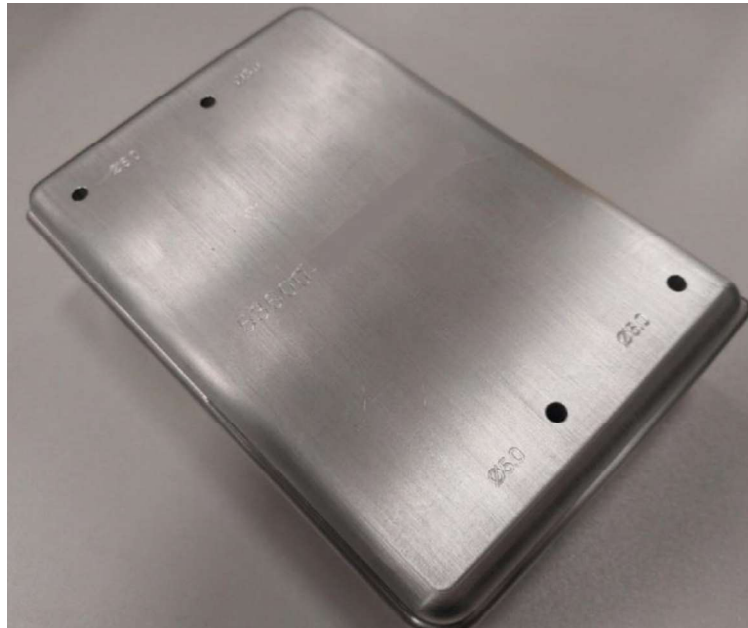


Figura 5.11 – Ferramenta selecionada para o caso de estudo.

Do conjunto de componentes da ferramenta, o componente que garante a geometria das peças moldadas e suporta a pressão da prensa é a base, assim o foco da fabricação da ferramenta através de PBF é a base. Na figura 5.2 é mostrada a base a ser fabricada em PBF.



Figura 5.22 – Base da ferramenta.

5.2.1. Ciclo de Desenvolvimento de Ferramentas.

O início das atividades de industrialização de desenvolvimento de ferramentas na Lauak Portugal é dividido em 4 etapas específicas para aceitação das ferramentas com o cliente. Estas 4 etapas estão indicadas na figura 5.3, sendo: ***Tooling Concept***, ***Tooling Design***, ***Tooling Manufacture*** e ***Tooling Qualification***.

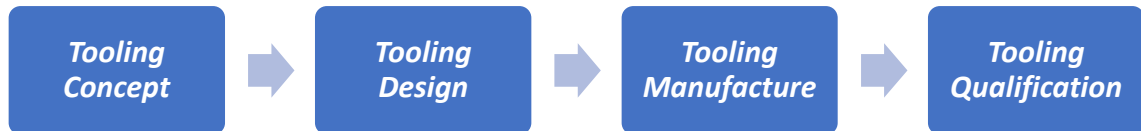


Figura 5.33 – Ciclo de desenvolvimento de ferramentas.

- ***Tooling Concept*** – A fase de conceito cobre as atividades antes do projeto de ferramentas. Estas incluem a recolha de requisitos técnicos e a descrição técnica da solução para a etapa de *Tooling Design*. Nesta etapa não é desenhada a ferramenta.
- ***Tooling Design*** – Através do conceito e da documentação cliente da peça a fabricar é desenvolvida a ferramenta específica em *Computer Aided Design* CAD, tendo em conta os requisitos necessários para a fabricação da ferramenta, nomeadamente: cliente, legais e moldagem da peça. Os requisitos para a moldagem de peças estão especificados no capítulo 3.3.
- ***Tooling Manufacture*** – A etapa de fabrico compreende a fabricação física da ferramenta desenvolvida na etapa de projeto e as atividades de verificação e validação dos certificados de conformidade. Esta etapa também inclui a verificação do relatório dimensional da ferramenta e o comprovar que a ferramenta tem todas as suas cotas dentro de tolerância. Após esta validação, a ferramenta é entregue à produção para o fabrico do primeiro lote de peças. Este primeiro lote irá passar pelo processo de validação do cliente designado na indústria aeronáutica por *First Article Inspection* FAI.
- ***Tooling Qualification*** – A qualificação é a gestão da primeira autorização da ferramenta para produzir peças durante a fase industrial, até à produção do primeiro lote em conformidade com o processo FAI.

O presente caso de estudo foca-se na etapa *Tooling Manufacture*. A Lauak subcontrata habitualmente a fabricação de ferramentas. Numa primeira fase, existe um período de orçamentação recorrendo à consulta dos fornecedores e que leva em média 1 a 2 semanas. Posteriormente, quando selecionado o subcontratado, desde a adjudicação até à entrega da ferramenta decorre no mínimo 5 semanas e pode ir até 9 semanas. Portanto o ciclo de fabricação da ferramenta pode levar entre 6 a 11 semanas!

Um dos grandes objetivos com a fabricação de ferramentas, através de PBF, é reduzir consideravelmente o tempo de fabrico.

5.2.2. Custo de Fabrico das Ferramentas.

No desenvolvimento de ferramentas específicas, os clientes pagam o seu desenvolvimento. Estes custos são designados de custos não recorrentes *Non-Recuring Cost* NRC uma vez que são pagos uma única vez pelo desenvolvimento das ferramentas. Este valor inclui as 4 etapas do desenvolvimento *Tooling Concept*, *Tooling Design*, *Tooling Manufacture* e *Tooling Qualification*. Para analisar os custos de fabrico das ferramentas, devemos isolar a fabricação das ferramentas, *Tooling Manufacture*, das restantes etapas de desenvolvimentos, pois, os valores das restantes etapas não têm alteração no presente caso de estudo, portanto, o foco será na análise comparativa entre o valor de subcontratação da ferramenta e a fabricação das ferramentas através de PBF.

O objetivo com a fabricação de ferramentas através de PBF é que o seu custo de fabrico não ultrapasse o custo de fabrico recorrendo à subcontratação. Para esta análise será utilizado como base o orçamento existente da ferramenta selecionada.

5.2.3. Projeto da Ferramenta.

Para o projeto da ferramenta a ser fabricada por PBF, devem-se ter em conta alguns dos princípios de DfAM e os resultados dos estudos realizados anteriormente, cujos resultados foram apresentados no capítulo 4. Neste sentido tomaram-se as seguintes decisões:

- Estrutura selecionada: *ISOGRID*;
- Tratamento superficial selecionado: Acabamento por pedras vibratórias.

Desta forma, consegue-se uma redução significativa do tempo de produção, material

consumido e eventualmente de tolerâncias dimensionais. Relativamente ao acabamento superficial, o melhor acabamento na redução de rugosidade é o jato de areia, não sendo o ideal, por ter de ser executado em França, o que pode levar entre 2 a 3 semanas a realizar. Para este estudo de caso foram usadas pedras vibratórias, uma vez que o tempo disponível não permita a outra solução.

5.2.4. Aplicação da Estrutura em DfAM.

Para a aplicação da estrutura no interior da ferramenta, foi considerado como desenho inicial o do projeto de ferramenta convencional. Numa primeira fase foi necessário preparar a geometria e criar a cavidade onde será colocada a estrutura, esta preparação é realizada com o comando *shell* ou outro semelhante utilizado em *softwares* CAD. Em seguida, utilizar a mesma célula unitária do ensaio de compressão e preencher a cavidade da ferramenta, por fim, unir os dois sólidos, de forma a obter-se um único sólido. Utilizou-se como referência uma espessura da *shell* de 5 mm, que se julga ser adequada, contudo uma solução ideal obrigaria a um estudo mais aprofundado.

Na figura 5.4 está representado o resultado do DfAM aplicado ao projeto de ferramenta existente. É possível identificar a zona da estrutura *ISOGRID*, esta superfície da ferramenta é colocada na mesa porta-ferramentas das prensas, logo, não está sujeita à pressão da membrana de borracha das prensas e não necessita de ter uma superfície fechada, facilitando a extração do pó após a fabricação em PBF.

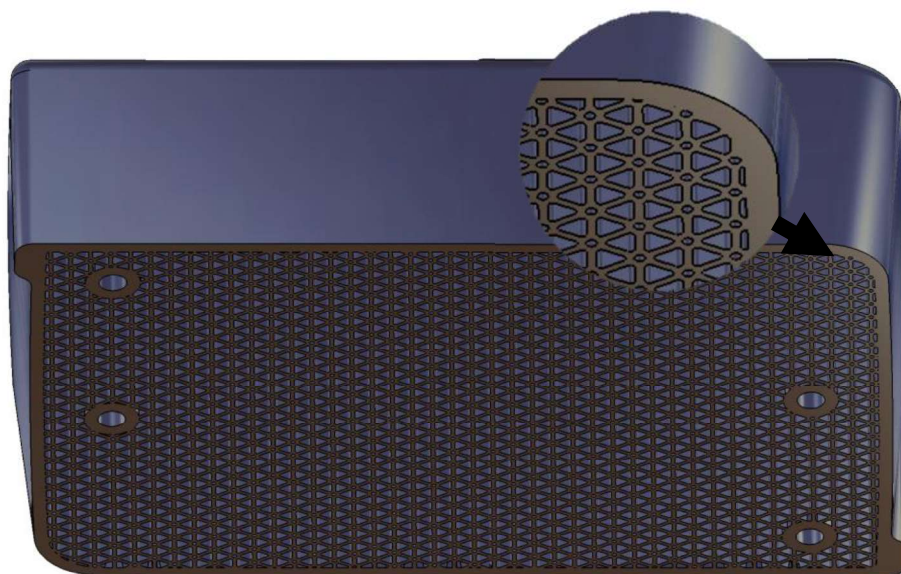


Figura 5.4 – Aplicação da estrutura *ISOGRID* à ferramenta (vista pela base da ferramenta).

Na tabela 5.1 estão indicadas as massas da base da ferramenta retiradas do CAD em sólido, com a estrutura *ISOGRID* e qual é a percentagem de redução prevista. Esta redução é menor que 50%, uma vez que inclui a *shell*.

Tabela 5.11 – Redução de massa com a aplicação da estrutura prevista.

Massa Ferramenta Sólida (Kg)	Massa Ferramenta <i>ISOGRID</i> em CAD (Kg)	Redução em Percentagem
3,186 Kg	1,865 Kg	41,5%

5.2.5. Fabricação da Ferramenta.

Para a fabricação da ferramenta de moldagem foi necessário considerar os resultados do fabrico dos artefactos, sendo que em todos os artefactos existiu distorção térmica e foram fabricados na posição plana, optou-se por colocar a ferramenta numa inclinação de 45°, para tentar reduzir a entrega térmica e assim reduzir a distorção da ferramenta.

Na figura 5.5 está representado os suportes utilizados na fabricação da ferramenta.

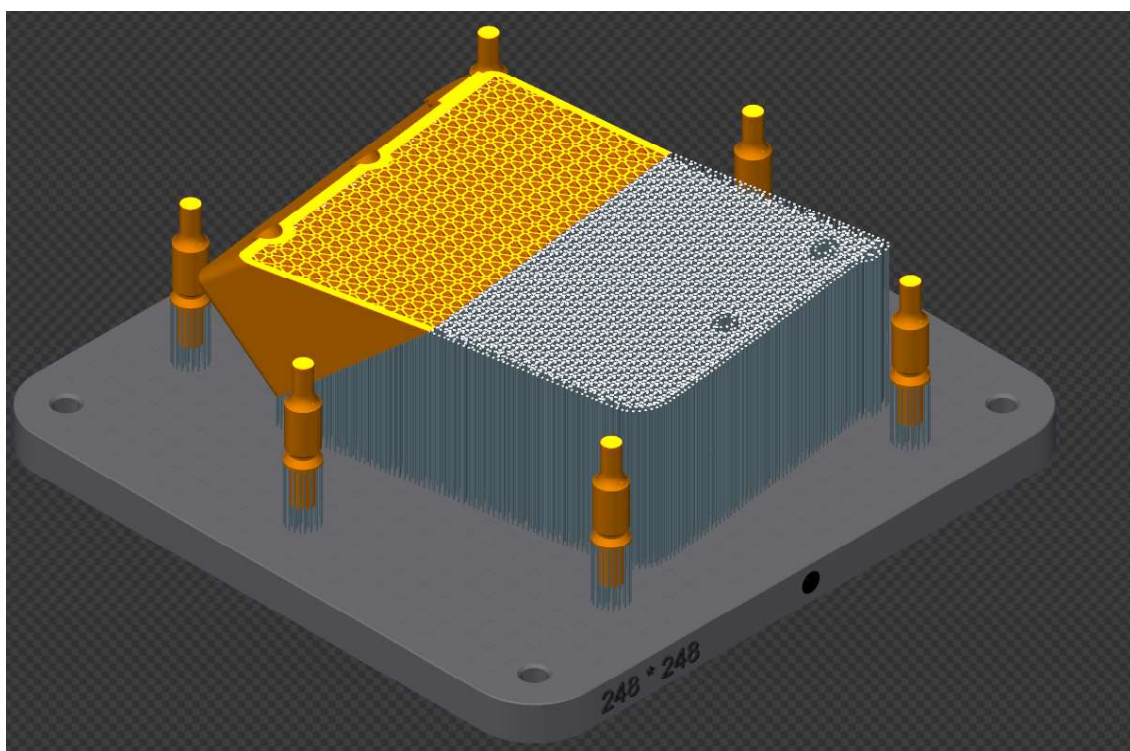


Figura 5.55 – Suportes utilizados no fabrico da ferramenta.

Na figura 5.6 estão as fases de fabricação em PBF da ferramenta, como mostra a figura, foram utilizados os 4 *lasers* e também é possível ver o final do processo.

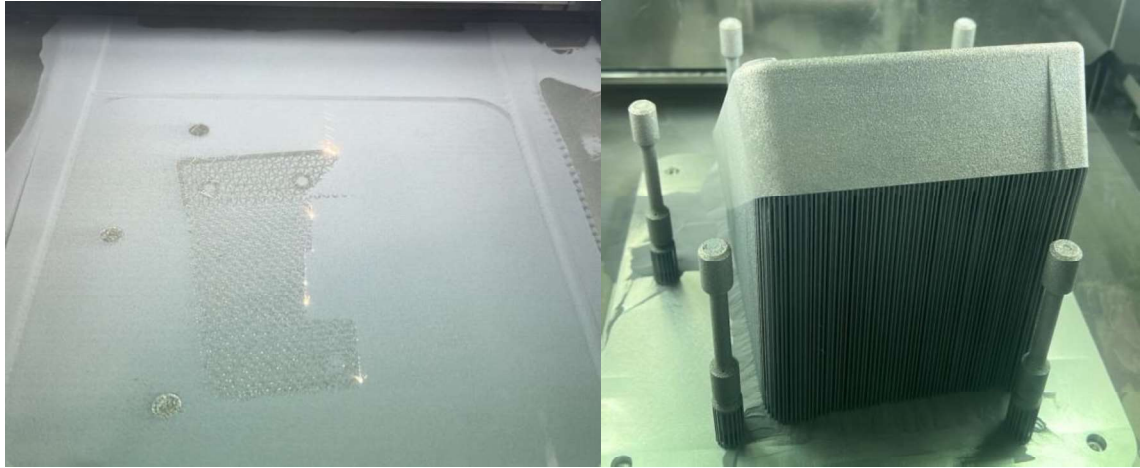


Figura 5.66 – Fabricação da ferramenta.

Na figura 5.7 está a ferramenta após remoção da máquina de impressão, é possível verificar que aparentemente não existem suportes partidos o que poderá indicar melhores resultados dimensionais.



Figura 5.77 – Ferramenta após fabricação.

Por fim, foram removidos os suportes e a ferramenta da placa para proceder o acabamento de superfície, controlo dimensional e estados de superfícies para certificar que a ferramenta está conforme para produção de peças.

Desde a entrega do CAD para fabricação até finalização da ferramenta, o ciclo total

de fabricação da ferramenta na Lauak Portugal foi de 3 semanas.

5.2.6. Controlo Dimensional e Estado de Superfície.

Ao estado de superfície foi aplicado o acabamento por pedras vibratórias e foram registados os valores de rugosidade R_a após a fabricação por PBF e após o pós-tratamento de superfície. Na figura 5.8 apresenta-se o processo de acabamento da ferramenta por pedras vibratórias, o processo foi realizado durante 1 hora, os primeiros 30 minutos sem adição de água para retirar a rugosidade excessiva e depois mais 30 minutos com a adição de água para tornar as superfícies mais regular. As pedras utilizadas são do tipo piramidais.



Figura 5.88 – Pós-tratamento de superfície por pedras vibratórias.

Na figura 5.9 estão indicadas as zonas da ferramenta onde foram retirados os valores de rugosidade, foram identificadas as duas posições da ferramenta pelas letras A e B, as medições em A2, B1 e B2 foram realizadas na vertical como representado em A1.

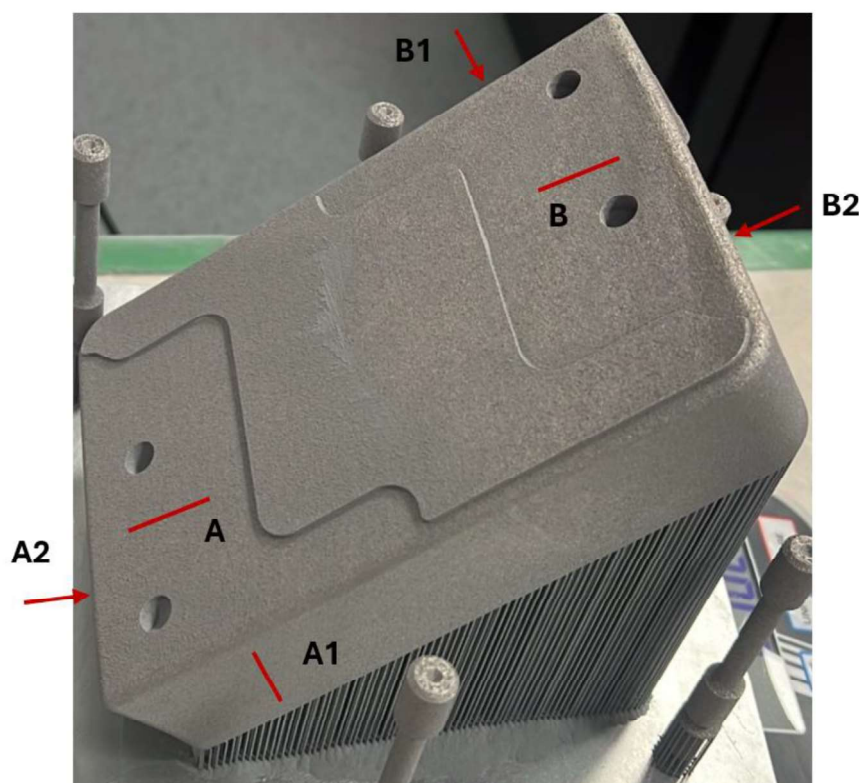


Figura 5.99 – Zonas de medição de rugosidade na ferramenta.

Na tabela 5.2 estão os valores registados para a rugosidade.

Tabela 5.22 – Rugosidade da ferramenta.

	Ra Após Fabricação (μm)	Ra com Pós-Tratamento (μm)	Redução em Porcentagem
Topo da ferramenta	A – 15,3 B – 23,1	A – 11,6 B – 13,3	24,2% e 42,4%
Laterais da ferramenta	A1 – 10,4 B1 – 10,3	A1 – 3,3 B1 – 2,4	68,3% e 76,7%
	A2 – * B2 – 12,3	A2 – 10,8 B2 – 6,6	** e 46,3%

*Rugosidade excessiva, não foi possível medir.

**Não existe valor inicial para comparação.

É possível verificar que os valores de rugosidade não foram atingidos de acordo com os requisitos de Ra inferior a $1,6 \mu\text{m}$, ainda assim, procedeu-se ao fabrico das peças para confirmar que a rugosidade final não deixa marcas na superfície das peças moldadas.

Para certificação da ferramenta e comprovação da sua conformidade para a fabricação de peças nas 2 prensas, foi necessário efetuar controlo dimensional. Na figura 5.10 é mostrado como é posicionada a ferramenta para controlo CMM. No anexo A.5, é apresentado o relatório de controlo dimensional completo.

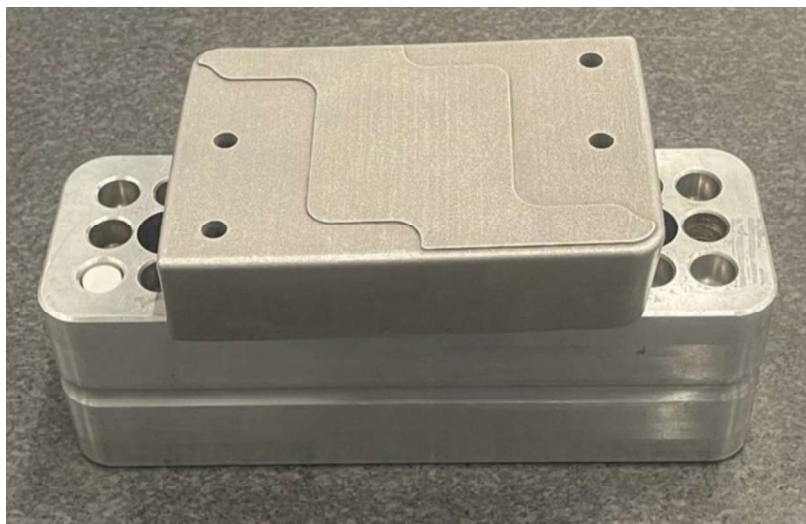


Figura 5.1010 – Ferramenta posicionada para controlo em CMM.

O controlo dimensional evidenciou novamente distorções semelhantes às observadas nos artefactos, portanto a ferramenta apresenta a mesma forma em U e contração, figuras 5.11 e 5.12. É possível identificar o empeno da ferramenta e a forma em U, estas figuras são um comparativo entre a ferramenta fabricada em PBF e a ferramenta fabricada por maquinação.

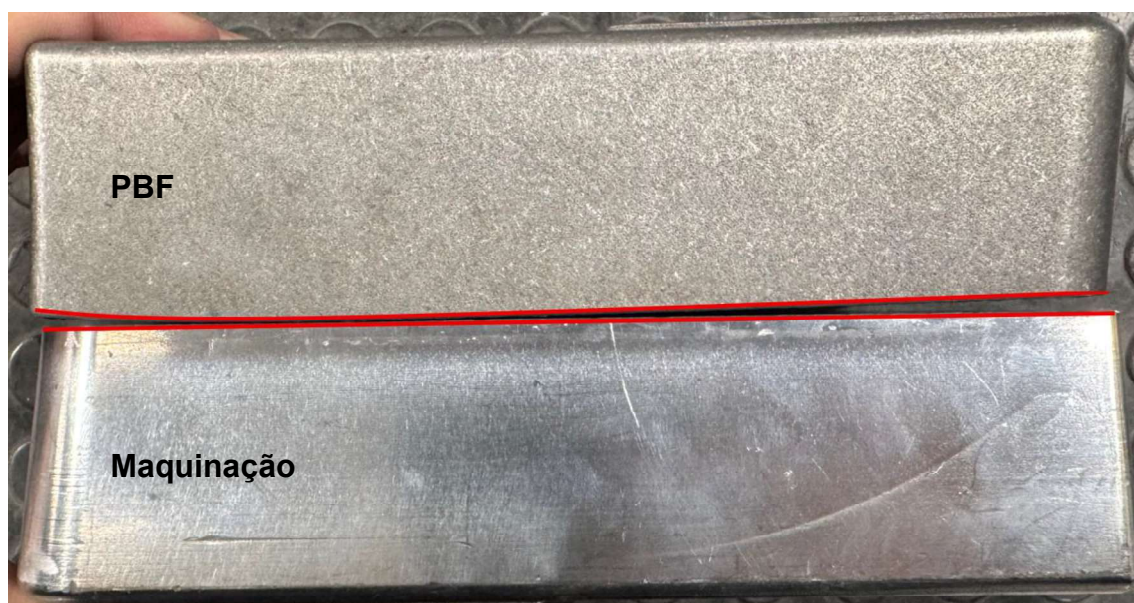


Figura 5.1111 – Deformação em forma de U na base da ferramenta.

Na figura 5.12 é possível verificar que a distorção com forma em U removeu o espaço entre o aperta-chapa e a base como é possível verificar ser uniforme na ferramenta fabricada por maquinação.



Figura 5.1212 – Deformação em forma de U da parte superior da ferramenta.

Nas figuras 5.13 e 5.14 é uma parte do controlo dimensional por CMM, completo no anexo A.5, é possível verificar a contração da ferramenta nos pontos medidos, são todos os valores negativos.

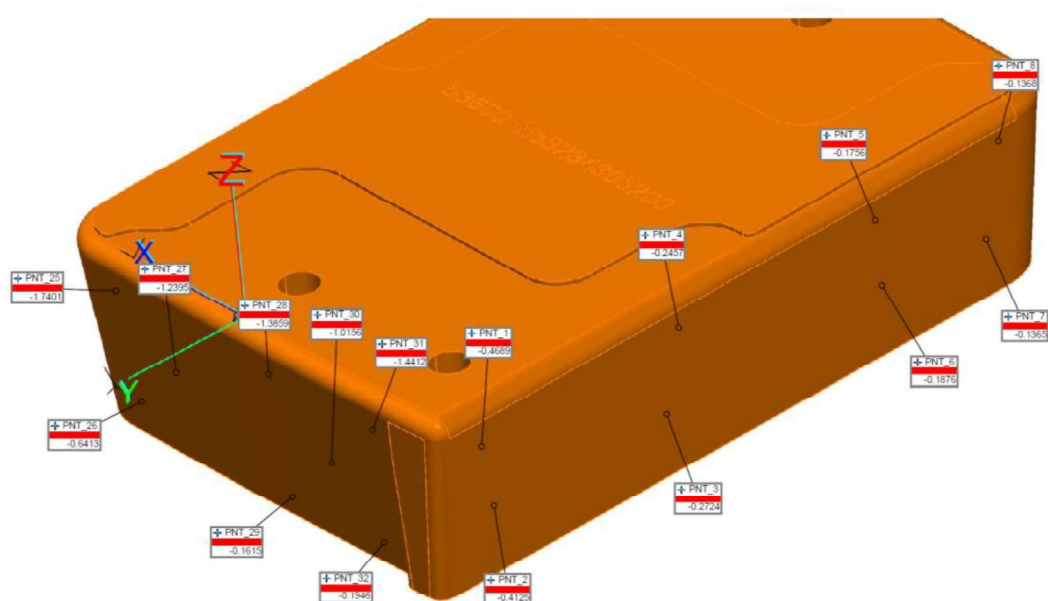


Figura 5.1313 – Contração da ferramenta na posição A.

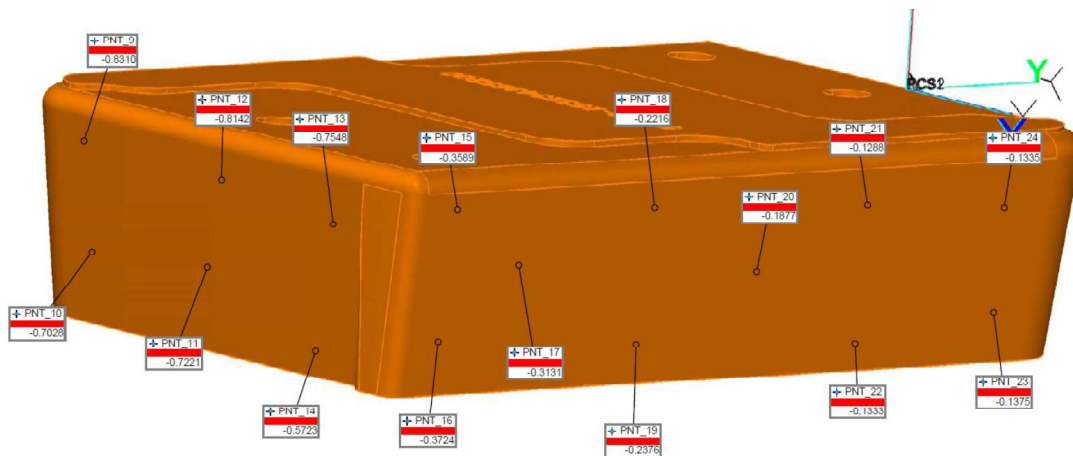


Figura 5.1414 – Contração da ferramenta na posição B.

A distorção pode ter sido provocada pelo sobreaquecimento como mostra a coloração na figura 5.15, existem 2 zonas distintas o que pode ter existido temperaturas diferentes.

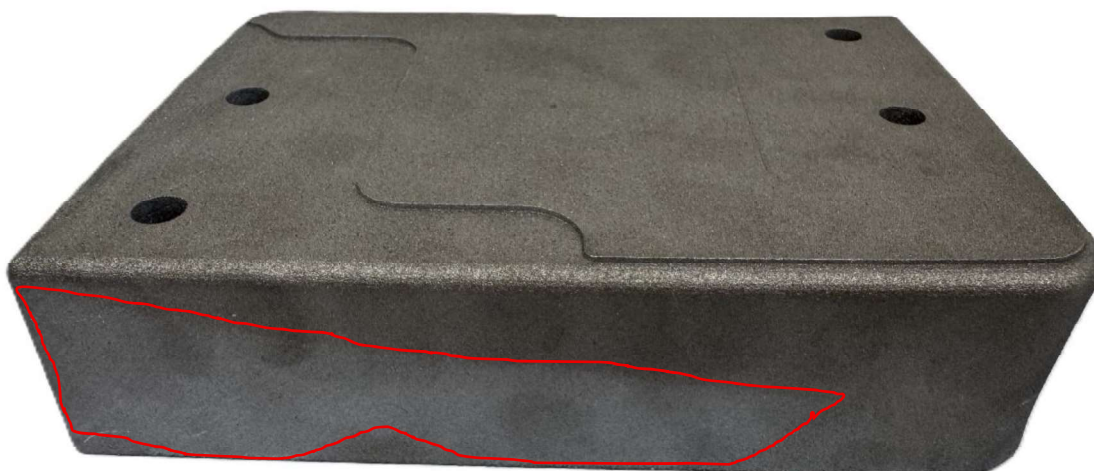


Figura 5.1515 – Diferença de coloração da ferramenta.

A distorção e contração da ferramenta também pode ter sido provocada por suportes partidos que não foram possíveis identificar, estes podem ter sido no interior onde não é visível, no exterior não foram identificados suportes partidos.

5.3. Massa da Ferramenta Produzida

Na figura 5.16 e tabela 5.3 estão os resultados da massa da ferramenta fabricada em PBF, a comparação com o valor teórico CAD e a comparação com a ferramenta existente.



Figura 5.1616 – Verificação da massa da ferramenta.

Tabela 5.33 – A massa da ferramenta fabricada em PBF e sua comparação.

Massa Ferramenta Sólida existente (Kg)	Massa Ferramenta <i>ISOGRID</i> em CAD (Kg)	Massa Ferramenta <i>ISOGRID</i> Fab. Em PBF (Kg)	Redução de massa real em Percentagem
3,186 Kg	1,865 Kg	1,854 Kg	41,8%

A ferramenta ao ser certificada a fabricar peças passou-se à utilização da mesma nas prensas de borracha e hidrofórmica para a fabricação de peças.

5.4. Ensaio de Moldagem e Aprovação Dimensional de Peças Produzidas

A ferramenta finalizada e disponível para fabrico de peças, foi utilizada na prensa de borracha. Devido ao seu empeno ser elevado e existindo risco para a membrana da prensa hidrofórmica (por segurança as ferramentas devem ser planas), optou-se somente por

realizar o ensaio na prensa de borracha, ficando no futuro a necessidade de testar na prensa hidrofórmica quando os problemas de distorção sejam resolvidos e fabricada novamente a ferramenta. Na figura 5.17 é apresentada a ferramenta na prensa de borracha, primeiro sem peças para testar a pressão da prensa na ferramenta e em seguida a fabricação das peças.



Figura 5.1717 – Ferramenta na prensa de borracha pronta para estampagem.

A utilização da ferramenta com a estrutura não apresenta danos visíveis, o que possibilita a sua utilização em contexto real de fabricação de peças.

Para a moldagem de peças foi decidido fabricar 4 peças, 2 peças de cada lado da ferramenta, posição A e B. A ferramenta foi projetada para a moldagem de 2 peças em simultâneo, devido ao empeno não é possível colocar os 4 pinos no aperta-chapas com a base, então foi moldada cada peça individualmente em cada posição. Na figura 5.18 estão 2 peças, antes de moldar e depois de moldar.



Figura 5.1818 – Peça posicionada para moldagem e peça moldada na ferramenta.

Na figura 5.19 estão identificadas as 4 peças fabricadas, as peças foram numeradas de 1 a 4. As peças 1 e 2 foram moldadas na posição B da ferramenta, as peças 3 e 4 na posição A da ferramenta, estas posições estão identificadas nas figuras 5.9 e 5.19.

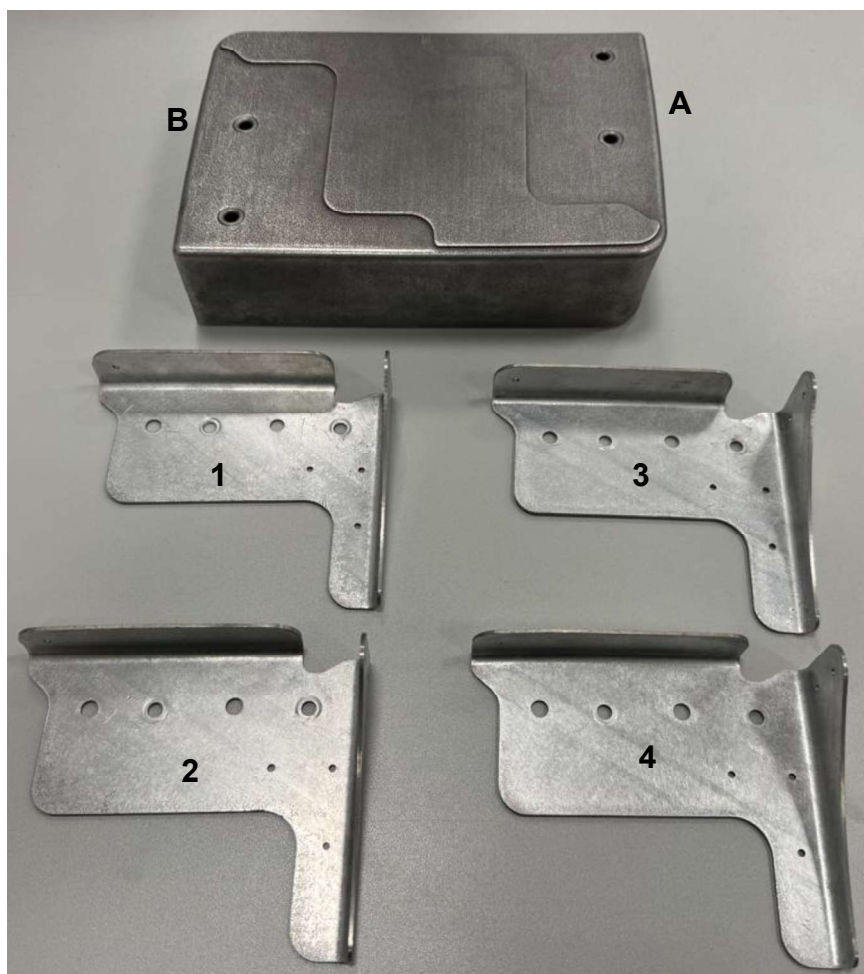


Figura 5.1919 – Peças fabricadas de acordo com as posições da ferramenta.

Após a moldagem das peças com a ferramenta, procedeu-se ao controlo das mesmas. Este controlo foi realizado com a ferramenta de controlo do tipo passa/não-passa e também foi controlado o aspeto visual das superfícies das peças, quanto a existência de marcas ou defeitos causados pela rugosidade.

No controlo visual das peças é possível verificar que existem marcas provocadas pela rugosidade da ferramenta, estas marcas estão localizadas onde o aperta-chapas exerce maior pressão sobre a peça e estas marcas têm um padrão uniforme nas 4 peças. As abas moldadas não apresentam marcas de rugosidade. Na figura 5.20 são identificadas as marcas de rugosidade.

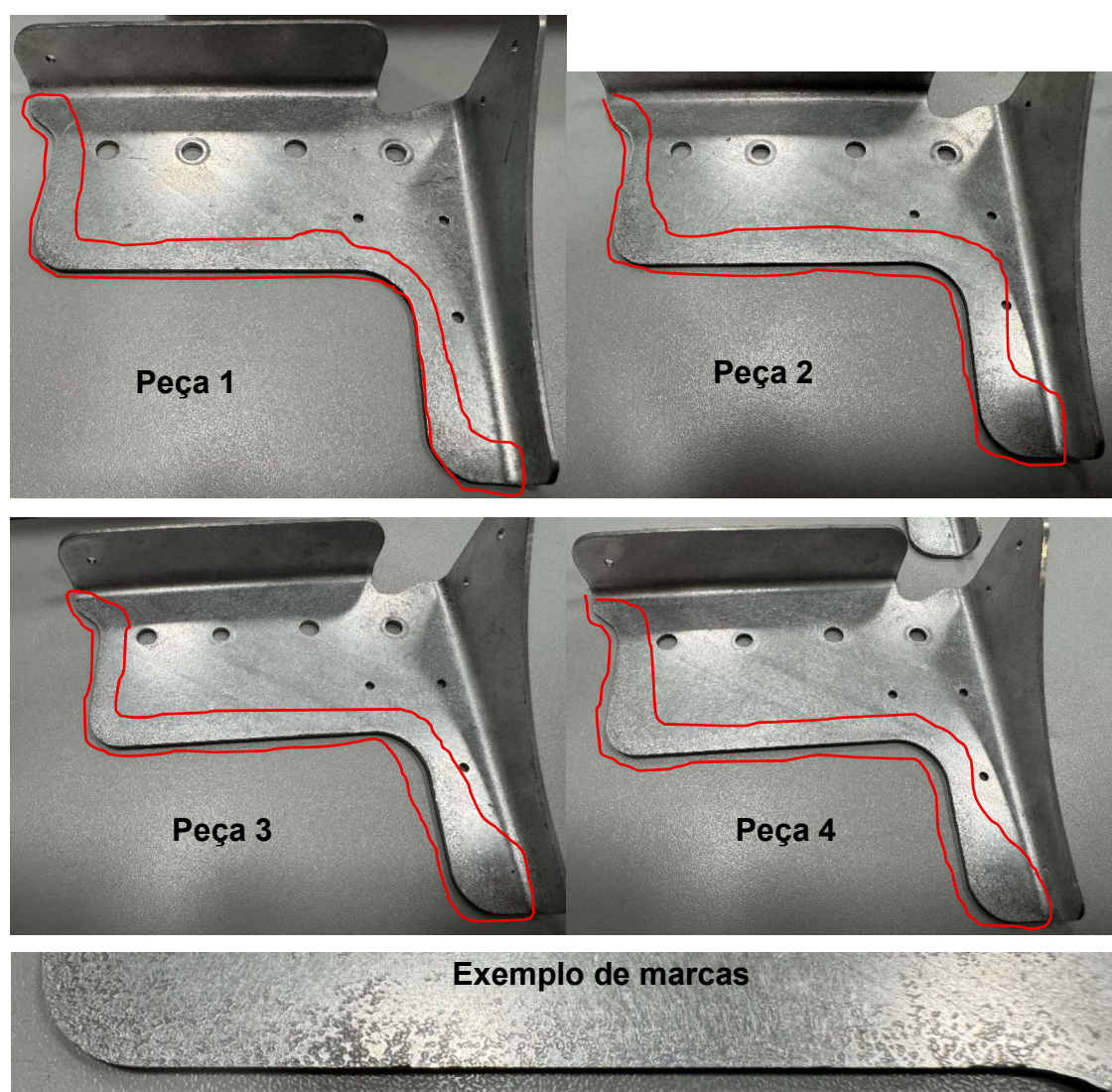


Figura 5.2020 – Zonas com marcas físicas provocadas pela rugosidade.

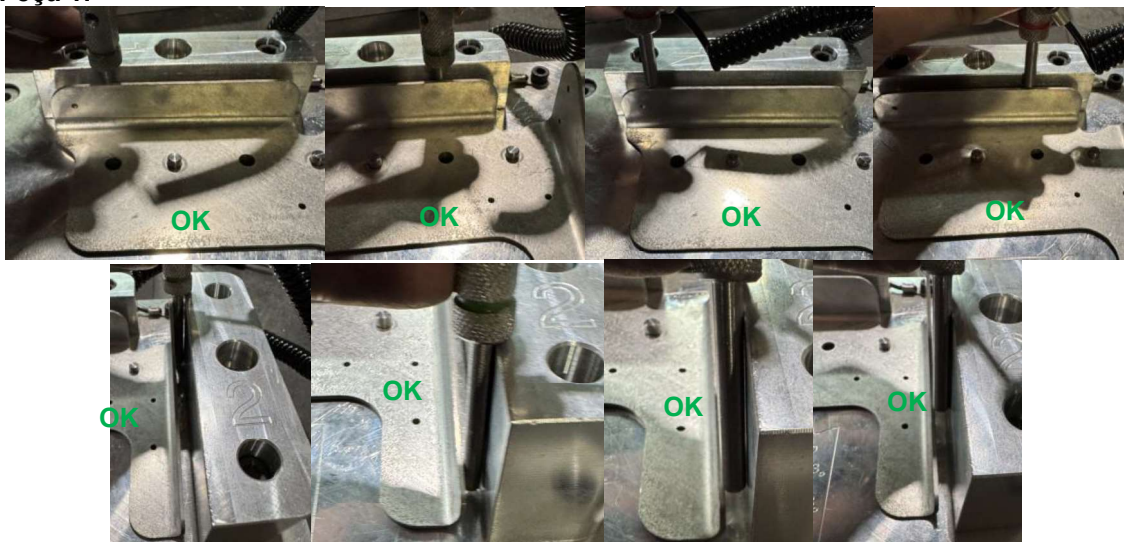
Na figura 5.21 é possível identificar a ferramenta utilizada no controlo.



Figura 5.2121 – Ferramenta de controlo.

As peças foram colocadas na ferramenta de controlo, onde é possível verificar que existe diferenças entre as posições da ferramenta. As peças 1 e 2 na posição B da ferramenta, estão conformes, isto é, os calibres passa estão a passar e os calibres não-passa não estão a passar, o que indica a conformidade das peças 1 e 2. Na figura 5.22 é possível visualizar os resultados.

Peça 1:



Peça 2:

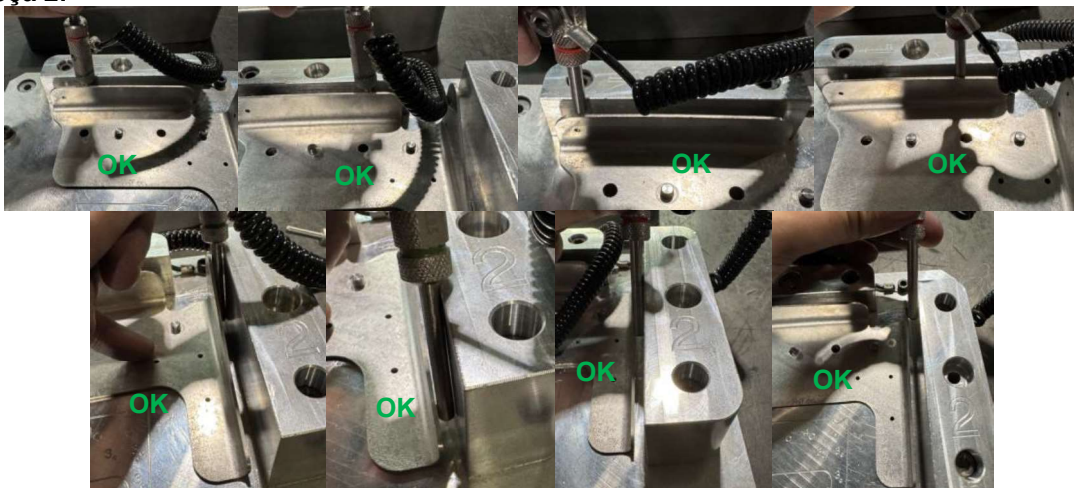


Figura 5.2222 – Controlo das peças 1 e 2.

As peças 3 e 4 na posição A da ferramenta, estão não-conformes, isto é, nas peças 3 e 4, na aba frontal os calibres não-passa estão a passar e na aba lateral os calibres passa não estão a passar. Na figura 5.23 é possível visualizar os resultados.

Peça 3:



Peça 4:

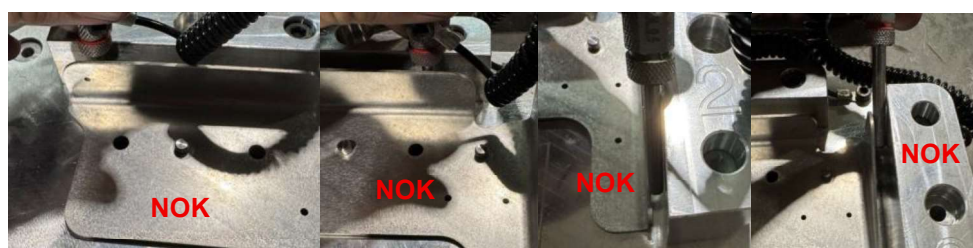


Figura 5.2323 – Controlo das peças 3 e 4.

Na tabela 5.4 estão indicados os resultados do controlo.

Tabela 5.4 – Resultados do controlo das peças fabricadas.

Identificação da Peça	Ferramenta de Controlo (OK/NOK)	Aspeto Visual (OK/NOK)
Peça 1	OK	NOK
Peça 2	OK	NOK
Peça 3	NOK	NOK
Peça 4	NOK	NOK

5.5. Análise Comparativa de Custos

O custo da ferramenta produzida por processos convencionais foi orçamentado em 460€ em 2024. Para que a ferramenta produzida por PBF seja competitiva, também em termos de custos, não deveria superar este valor.

Para considerar o fabrico da ferramenta, é necessário somar o custo do pó, o custo de fabrico, custo dos acabamentos, custo do controlo dimensional e os custos dos

casquilhos mais montagem. Alguns dos dados não serão apresentados por serem confidenciais para a Lauak, como taxas horárias, tempos de fabrico ou a quantidade de pó utilizada para 1 Kg de peça. Os valores são os seguintes:

- Custo do material utilizado: 91,22€;
- Preparação da fabricação: 100€;
- Fabricação da ferramenta em PBF: 1570,35€;
- Pós-tratamento superficial mais controlo dimensional: 51,11€;
- Valor dos casquilhos mais montagem: 10,17€;
- Custo total: 1822,85€.

O valor da ferramenta fabricada em PBF é muito superior ao valor da ferramenta fabricada em maquinação, isto deve-se principalmente à posição da ferramenta na placa de impressão. Como a ferramenta foi posicionada numa posição a 45°, a altura total de fabrico é de 169,38 mm, aumentando consideravelmente o tempo de fabrico e gasto de pó, devido ao comprimento dos suportes e do que fica retido entre os suportes.

Considerando que se a ferramenta fosse impressa diretamente ou muito próxima à placa não teria uma altura superior a 55 mm. Tendo em consideração esta posição, o tempo de fabricação seria bastante inferior, reduzindo substancialmente o custo de fabricação da ferramenta em PBF, que é o mais relevante, em primeira aproximação para cerca de 35% do valor apresentado. Neste caso, o valor da ferramenta ficaria na ordem dos 760€.

Apesar de na presente situação, comparando diretamente custos, o valor de PBF ainda é ligeiramente superior ao processo convencional, por CNC, há outras vantagens muito significativas em usar-se o processo de PBF, especialmente na redução muito considerável do tempo de produção e na simplificação de toda a cadeia de produção. Ainda assim, ainda há margem para melhorias no desenho da ferramenta, podendo-se baixar mais a espessura da parede e a densidade do preenchimento interior, que certamente irá baixar ainda mais os custos de produção, para níveis próximos ou inferiores dos obtidos pelos processos convencionais. Relativamente às dificuldades sentidas com o controlo dimensional e estado de superfície, são possíveis de ser ultrapassadas com outras estratégias de suportes e certamente com o aumento do tempo de exposição a tratamentos como pedras vibratórias.

Capítulo 6

Conclusões e Proposta de Trabalhos Futuros

O sexto capítulo apresenta as conclusões e as propostas de trabalhos futuros. Estes dois subcapítulos foram elaborados a partir do trabalho realizado nos capítulos anteriores tendo por base a pesquisa bibliográfica, o trabalho desenvolvido e a análise de resultados.

6.1. Conclusões

O presente projeto teve como objetivo validar a implementação do processo aditivo metálico, através do processo de fusão em camada de pó, no desenvolvimento de ferramentas de moldagem em prensas de borracha/hidrofórmica, amplamente utilizadas na indústria aeronáutica. A revisão bibliográfica, permitiu conhecer melhor aspetos relacionados com este processo de fabrico, tipo de estruturas possíveis de ser usadas para preenchimento interior da ferramenta e processos de melhoria superficial. Contudo, verificou-se ser difícil identificar as melhores práticas a seguir e ter resultados concretos para a aplicação em causa. Deste modo, este estudo revelou-se pertinente ao estabelecer objetivos específicos que permitiram: determinar as tolerâncias possíveis para geometrias semelhantes às utilizadas em ferramentas de estampagem; identificar estruturas de preenchimento mais eficazes; e avaliar tipos de tratamentos de superfície capazes de cumprir requisitos aeronáuticos. Estes resultados contribuem para tornar o processo mais competitivo, considerando os meios e processos atualmente disponíveis na Lauak.

Para dar cumprimento aos objetivos, numa fase inicial foram fabricados artefactos para validação dimensional do processo. Em seguida aplicaram-se e analisaram-se pós-tratamentos superficiais aos artefactos, bem como ensaios de compressão para conhecer o comportamento de várias estruturas, nomeadamente reticulares, TPMS e *ISOGRID*. Por fim, foi apresentado um caso de estudo de uma ferramenta, que foi projetada, produzida e sujeita a pós-processamento, considerando os resultados obtidos na fase inicial. Esta ferramenta foi verificada, seguindo-se os procedimentos aeronáuticos e testada em ambiente industrial na produção de peças moldadas.

A análise dimensional dos artefactos mostrou que com o processo de fabrico aditivo por PBF é possível fabricar geometrias mais complexas, mas evidenciou ainda existirem limitações relacionadas com as distorções geométricas inerentes ao próprio processo. Identificaram-se vários empenos nos artefactos, tal como também é referido nalguns estudos abordados na pesquisa bibliográfica[13] [21]. Também foi evidenciada contração dos artefactos nos eixos X e Y. Embora alguns resultados dimensionais encontrem-se fora da tolerância, mostrou-se que uma correção das dilatações térmicas seria suficiente para atingir a tolerância pretendida.

A aplicação do pós-tratamento superficial aos artefactos permitiu conhecer os acabamentos e procedimentos existentes na Lauak mais capazes de reduzir a rugosidade

significativamente. Dos ensaios realizados, o acabamento com melhor resultado foi o jato de areia. Na combinação do jato de areia com as pedras vibratórias notou-se uma melhoria marginal numa direção, provavelmente devido ao jato de areia não ter sido realizado uniformemente nas superfícies. Ainda assim, estes são os acabamentos disponíveis na Lauak Portugal, poderão existir acabamentos aplicados ao fabrico aditivo com melhores resultados, tal como foi apresentado na revisão bibliográfica. Alguns dos tratamentos existentes que podem vir a ser opções a serem testadas para compreender se podem ser aplicados e possivelmente adquiridos para o fabrico de componentes. Estes acabamentos podem ser: maquinação por fluxo abrasivo, que consiste num fluxo entre dois cilindros para remover o excesso de rugosidade [16], outro possível seria o polimento eletro-químico, que é uma emersão do componente em uma solução ácida e aplicação de corrente elétrica para remover a rugosidade [9] e um outro acabamento é polimento por *laser* que aplica feixes por ondas de choque de maneira a remover a rugosidade [9].

Para a redução de massa da ferramenta, foram introduzidas estruturas que permitissem a redução da densidade de preenchimento no interior da ferramenta, sendo necessário conhecer que tipo de estruturas a utilizar. Pela revisão bibliográfica, não foi possível retirar conclusões sobre este aspeto, tendo-se decidido realizar ensaios mecânicos de compressão a várias estruturas com maior potencial. Identificou-se que das estruturas estudadas, todas com mais de 50% de densidade relativa, poderiam ser utilizadas em contexto real. A estrutura com melhor resultado foi a *ISOGRID*, que se destaca por maior tensão de cedência e maior módulo elástico à compressão, fazendo a solução para utilização em ferramentas de moldagem. Além do mais, é a estrutura mais simples de modelar em CAD, não necessitando de módulos adicionais de *software* e com um custo computacional mais baixo que as outras soluções.

Do caso de estudo apresentado, conclui-se que a produção de ferramentas pelo processo PBF apresenta ainda limitações, sobretudo ao nível dimensional e geométrico, tal como já verificado nos artefactos. Estas restrições podem, no entanto, serem gradualmente ultrapassadas através da utilização de suportes mais eficientes ou explorando a possibilidade de fabricar as ferramentas sem suportes, diretamente na placa, necessitando posteriormente operações de corte simples, como por exemplo o serrote mecânico ou outro equipamento de corte viável. Os suportes é um aspeto fundamental, que tem de ser devidamente otimizado e estudado de forma a tornar o processo simples de remover a ferramenta da placa de construção e ao mesmo tempo ser eficaz para

suportar as tensões residuais. A qualidade superficial permanece igualmente um desafio, influenciando o desempenho final da ferramenta. Para mitigar este problema, e com os meios existentes na Lauak, podem surgir soluções como o aumento do tempo de tratamento de acabamentos por pedras vibratórias, ou mesmo, selecionar outro tipo de pedras vibratórias. A inclusão de técnicas de polimento, algo que não foi explorado neste trabalho, também pode vir a permitir a atingir a qualidade adequada com um baixo esforço.

A grande vantagem na adoção deste processo reside na simplificação de toda a cadeia de produção, não sendo necessária matéria-prima específica, ferramentas de maquinaria específicas nem um elevado número de processos e documentação associada. Um resultado evidente é a redução do tempo de ciclo de produção na Lauak de 9 a 11 semanas, por processos convencionais, para 3 semanas, por fabrico aditivo.

Embora os custos atuais possam ser elevados, existe um claro potencial de competitividade económica. O aspeto mais crítico a atuar é no tempo de produção da máquina, com a adoção de estruturas com menor densidade de preenchimento, e colocação da ferramenta em posições adequadas para reduzir o número de camadas necessárias. Apesar de neste trabalho já ter uma contribuição muito relevante neste aspeto, com reduções de densidades que podem ir até 50%, ainda é possível otimizar mais o processo uma vez que o fator de segurança atual é muito alto.

Outro aspeto, tem a ver com a utilização de pós metálicos de menor qualidade, que já não têm potencial para aplicações mais exigentes e que seriam considerados resíduo. Este é um aspeto particularmente relevante também do ponto de vista de sustentabilidade ambiental.

Conclui-se que o processo de fabrico aditivo por PBF apresenta potencial para se tornar tecnicamente viável na produção de ferramentas de moldagem, desde que sejam implementadas algumas das estratégias identificadas neste trabalho, as quais são relativamente simples de introduzir, permitindo adotar esta tecnologia em ambiente industrial com repetibilidade. A integração do fabrico aditivo representa um avanço significativo na produção de ferramentas de estampagem, oferecendo vantagens claras. Embora atualmente não seja aplicável à produção de todas as ferramentas, devido às limitações dimensionais dos equipamentos existentes, entre outros fatores, esta abordagem constitui uma solução eficaz para superar dificuldades recorrentes, como atrasos e necessidades urgentes de produção, com um impacto direto na capacidade de resposta e na entrega das primeiras peças aos clientes.

6.2. Proposta de Trabalhos Futuros

Após as conclusões do projeto é evidente que existe a necessidade de continuação de trabalhos futuros no desenvolvimento do processo PBF aplicado ao fabrico de ferramentas de moldagem. Deste modo é possível apresentar as seguintes propostas de trabalhos futuros, são as seguintes:

- **Estudo exaustivamente sobre parâmetros do processo e geometrias de preenchimento interior, com o objetivo de reduzir a distorção dos componentes fabricados por PBF.** Investigar o processo PBF e tentar compreender os parâmetros de fabrico e avaliar o impacto da geometria a adotar no interior, de forma a prevenir a distorção geométrica dos componentes fabricados.
- **Estudo sobre o desempenho ao longo do ciclo de vida entre ferramentas fabricadas por PBF e ferramentas fabricadas por maquinação.** Realizar um estudo completo do ciclo de vida das ferramentas fabricadas por PBF, comparando-as com ferramentas fabricadas por maquinação. Este estudo permitiria quantificar os ganhos reais ao nível de durabilidade, produtividade e desempenho da ferramenta sujeita à pressão durante a sua utilização. Permitiria ainda caracterizar o desgaste resultante da sua utilização nas superfícies da ferramenta, avaliar o impacto dimensional ao longo do ciclo de vida e compreender de que forma as condições de carga influenciam a degradação das ferramentas.
- **Estudo sobre diferentes tipos de suportes e o seu impacto na redução da distorção geométrica.** Realizar um estudo sobre a influência dos diferentes tipos de suportes utilizados no processo de PBF e a sua eficácia na redução da distorção geométrica das ferramentas durante a impressão. A investigação deverá analisar várias configurações de suportes e avaliar o comportamento na dissipação térmica, capacidade de suportar as tensões residuais a e o mesmo tempo serem fáceis de remover sem necessidade de operações suplementares.
- **Estudar a influência do tratamento térmico em ferramentas fabricadas por PBF.** Investigar se a aplicação do tratamento térmico nas ferramentas fabricadas por PBF traria uma melhoria considerável na redução de tensões residuais após fabricação e assim diminuir a distorção dimensional das ferramentas. Também estudar se o tratamento térmico influenciaria a longevidade da ferramenta no seu

ciclo de vida.

- **Criar um procedimento sobre desenvolvimento de ferramentas de moldagem segundo DfAM.** Criar um procedimento sobre desenvolvimento de ferramentas que contenha as regras e boas práticas para o projeto tendo em conta o retorno de experiência no processo PBF e a utilização de ferramentas na moldagem de peças. Este procedimento permitiria dotar a equipa de projetistas de regras específicas para o desenvolvimento de ferramentas de moldagem na Lauak.
- **Criar uma matriz que permita selecionar economicamente entre os processos PBF e maquinação.** Desenvolver uma matriz que faça a comparação dos custos entre o processo de maquinação e PBF quando realizado um orçamento tendo em conta os parâmetros do fabrico de ferramentas entre os dois processos.

Bibliografia

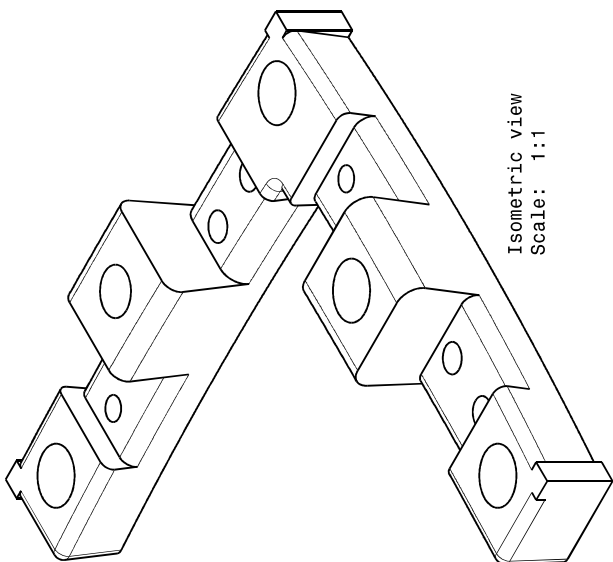
- [1] “NP EN ISO/ASTM 52900:2024 - Manufatura aditiva - Princípios gerais - Fundamentos e terminologias,” 2024.
- [2] “ISO/ASTM 52900:2021 - Additive manufacturing - Fundamentals and vocabulary,” 2021.
- [3] B. Blakey-Milner *et al.*, “Metal additive manufacturing in aerospace: A review,” *Mater Des*, vol. 209, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [4] A. Gisario, M. Kazarian, F. Martina, and M. Mehrpouya, “Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review,” Oct. 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jmsy.2019.08.005.
- [5] T. Vaneker, A. Bernard, G. Moroni, I. Gibson, and Y. Zhang, “Design for additive manufacturing: Framework and methodology,” *CIRP Annals*, vol. 69, no. 2, pp. 578–599, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.05.006.
- [6] M. Taghizadeh and Z. H. Zhu, “A comprehensive review on metal laser additive manufacturing in space: Modeling and perspectives,” Sep. 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.actaastro.2024.06.027.
- [7] S. Rott, A. Ladewig, K. Friedberger, J. Casper, M. Full, and J. H. Schleifenbaum, “Surface roughness in laser powder bed fusion – Interdependency of surface orientation and laser incidence,” *Addit Manuf*, vol. 36, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101437.
- [8] N. Khan and A. Riccio, “A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions,” Aug. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.paerosci.2024.101021.
- [9] E. Maleki and N. Shamsaei, “A comprehensive study on the effects of surface post-processing on fatigue performance of additively manufactured AlSi10Mg: An augmented machine learning perspective on experimental observations,” *Addit Manuf*, vol. 86, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.addma.2024.104179.
- [10] J. Djokikj and T. Kandikjan, “DfAM: Application of the design rules in the early design stages,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2023, pp. 659–663. doi: 10.1016/j.procir.2023.06.113.
- [11] B. A. Aljabali, S. K. Parupelli, and S. Desai, “Generalized Design for Additive Manufacturing (DfAM) Expert System Using Compliance and Design Rules,”

- Machines*, vol. 13, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/machines13010029.
- [12] S. Jalui, J. O'Connor, Y. Xuan, and G. Manogharan, "Developing novel restrictive design for additive manufacturing (DfAM) constraints for NURBS-based adjoint shape optimization for metal AM," *Graph Models*, vol. 142, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.gmod.2025.101304.
 - [13] S. F. Nabavi, H. Dalir, and A. Farshidianfar, "A comprehensive review of recent advances in laser powder bed fusion characteristics modeling: metallurgical and defects," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 132, no. 5–6, pp. 2233–2269, May 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13491-1.
 - [14] N. Novak *et al.*, "Quasi-static and dynamic compressive behaviour of sheet TPMS cellular structures," *Compos Struct*, vol. 266, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113801.
 - [15] Dassault Systèmes, "3DEXPERIENCE - Lattice Design."
 - [16] I. Aiza *et al.*, "Effects of build orientation and inclined features on physical, microstructural and mechanical properties of powder bed fusion additively manufactured metallic parts," Jan. 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.pmatsci.2024.101357.
 - [17] E. Maleki, S. Bagherifard, O. Unal, M. Revuru, M. Bandini, and M. Guagliano, "The efficiency of tumble finishing as a final post-treatment for fatigue enhancement of notched laser powder bed fusion AlSi10Mg," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-30660-6.
 - [18] "RenAM 500 series material data sheet – Aluminium AlSi10Mg, Renishaw Plc, Part no.:H-5800-6790-03-A, 2024."
 - [19] "ISO/ASTM 52902_Additive Manufacturing - Test Artifacts Geometric Capability of Additive Manufacturing Systems," 2029.
 - [20] "ASTM E9 - Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature," 2000.
 - [21] M. Greiner, S. Drews, B. Jäger, and C. Mittelstedt, "Influence of the layer thickness on the dimensional accuracy and mechanical properties of lattice structures during PBF-LB of AlSi10Mg," *Addit Manuf*, vol. 111, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.addma.2025.104972.

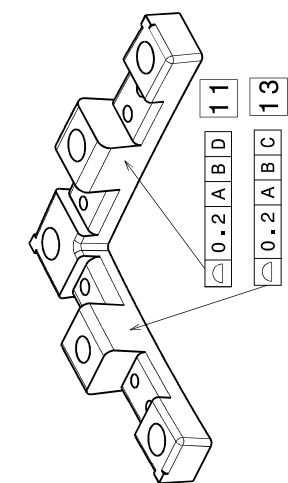
Anexo I

Desenho do Artefacto

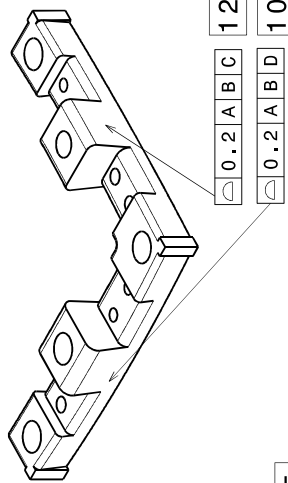
No anexo A.1 é apresentado o desenho de fabrico e controlo para os artefactos fabricados por PBF e utilizados para controlo dimensional e pós-tratamentos superficiais.



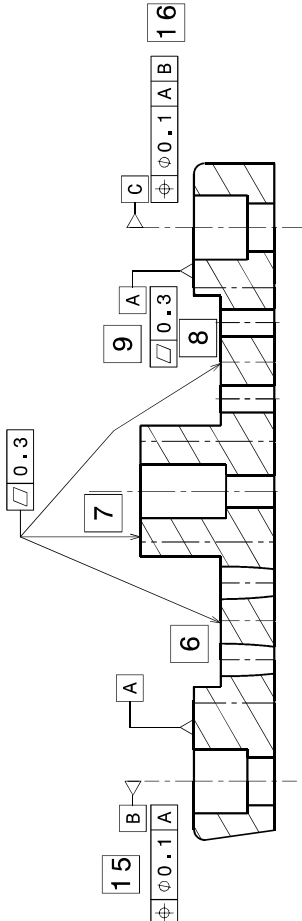
Isometric view
Scale: 1:1



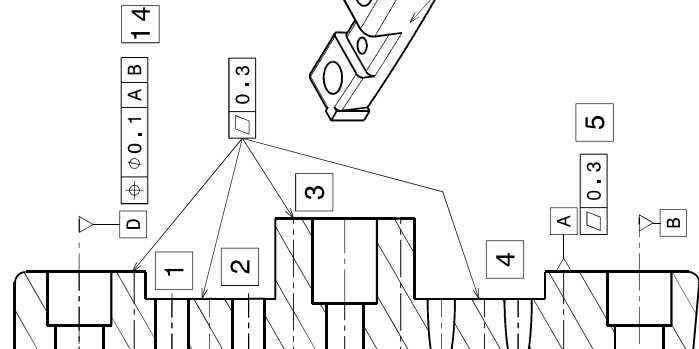
Isometric view
Scale: 1:2



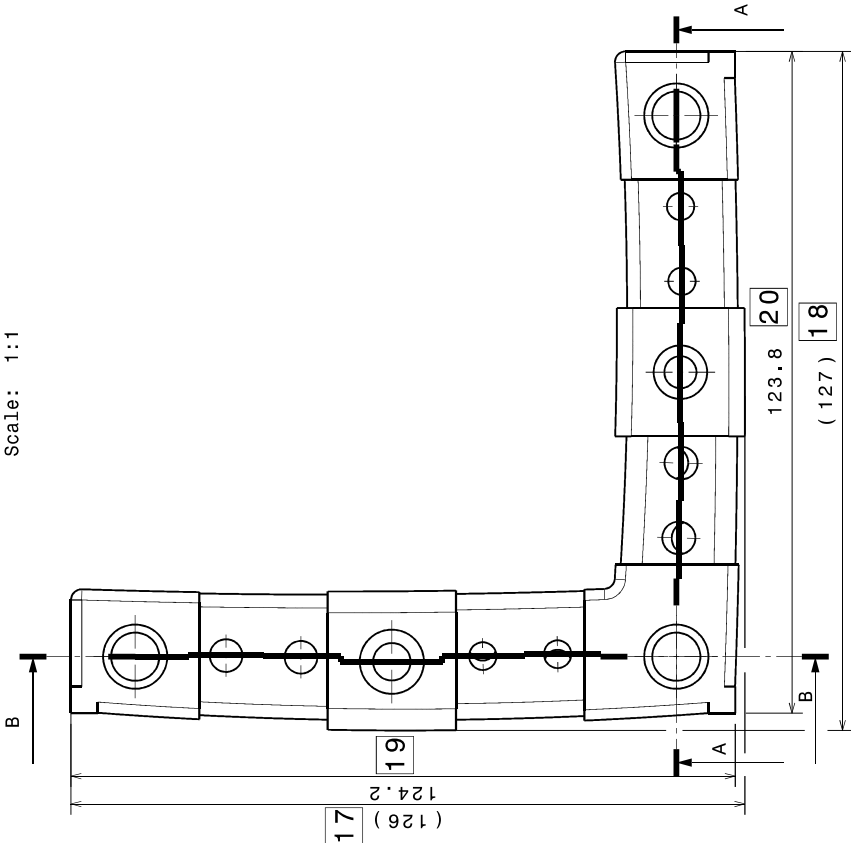
Isometric view
Scale: 1:2



Section view A-A
Scale: 1:1

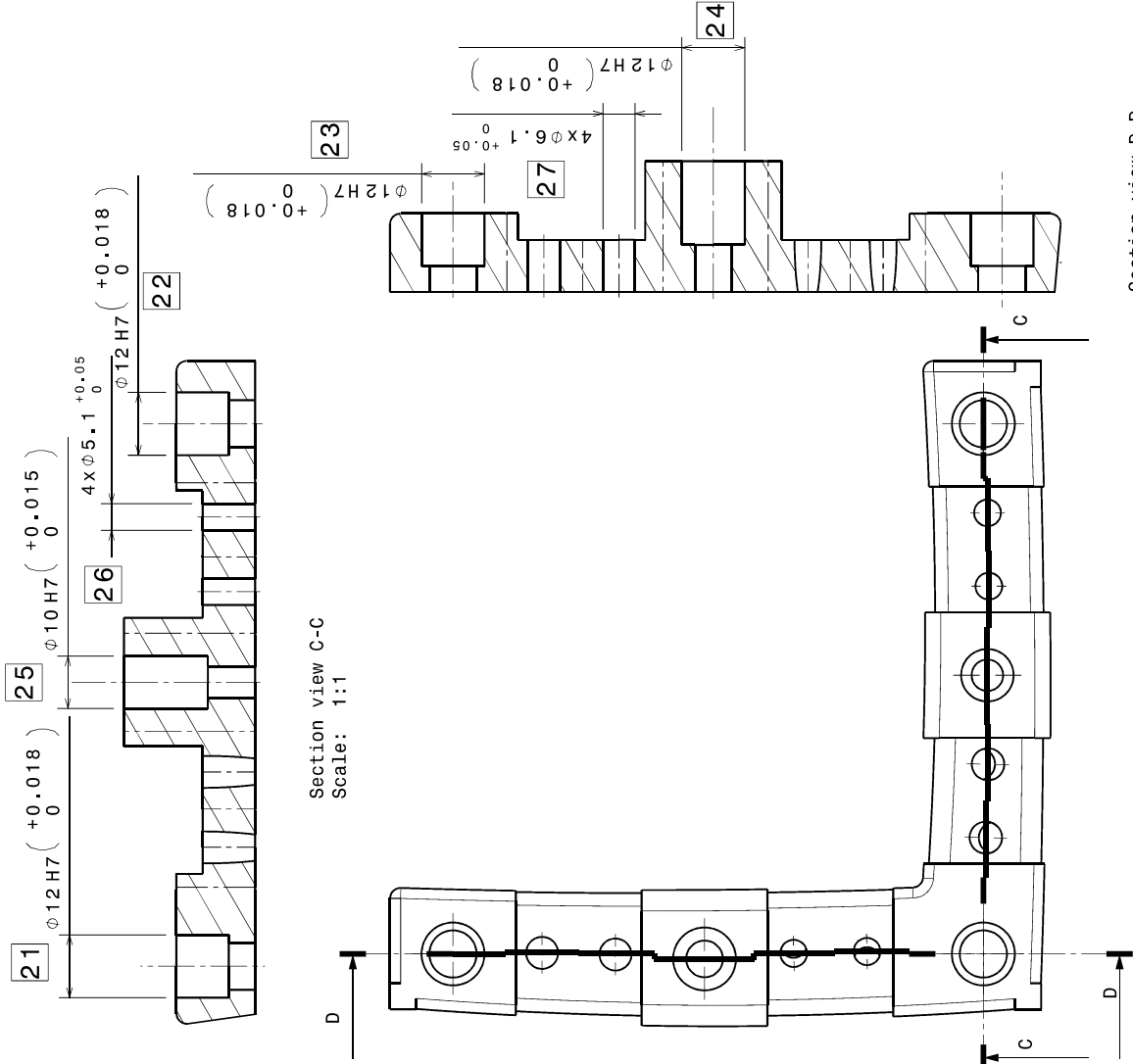


Section view B-B
Scale: 1:1



DRAFTSMAN	D. Soares	LAUAK PORTUGAL	LAUAK PORTUGAL
SUPERVISOR	-----		
ENGINEER	D. Soares		
MATERIAL	ALSI10Mg		
WEIGHT	0,175 Kg		
DATE	26/06/2025		
SIZE	A3		
ISO / R128-E			
SYS			
NOVA	-		
REV	-		

DRAWING TITLE		Adapted Artifact	
SCALE: 1:1		DRAWING NUMBER	
Adapted_Artifact		SHEET/OF	
		1/4	

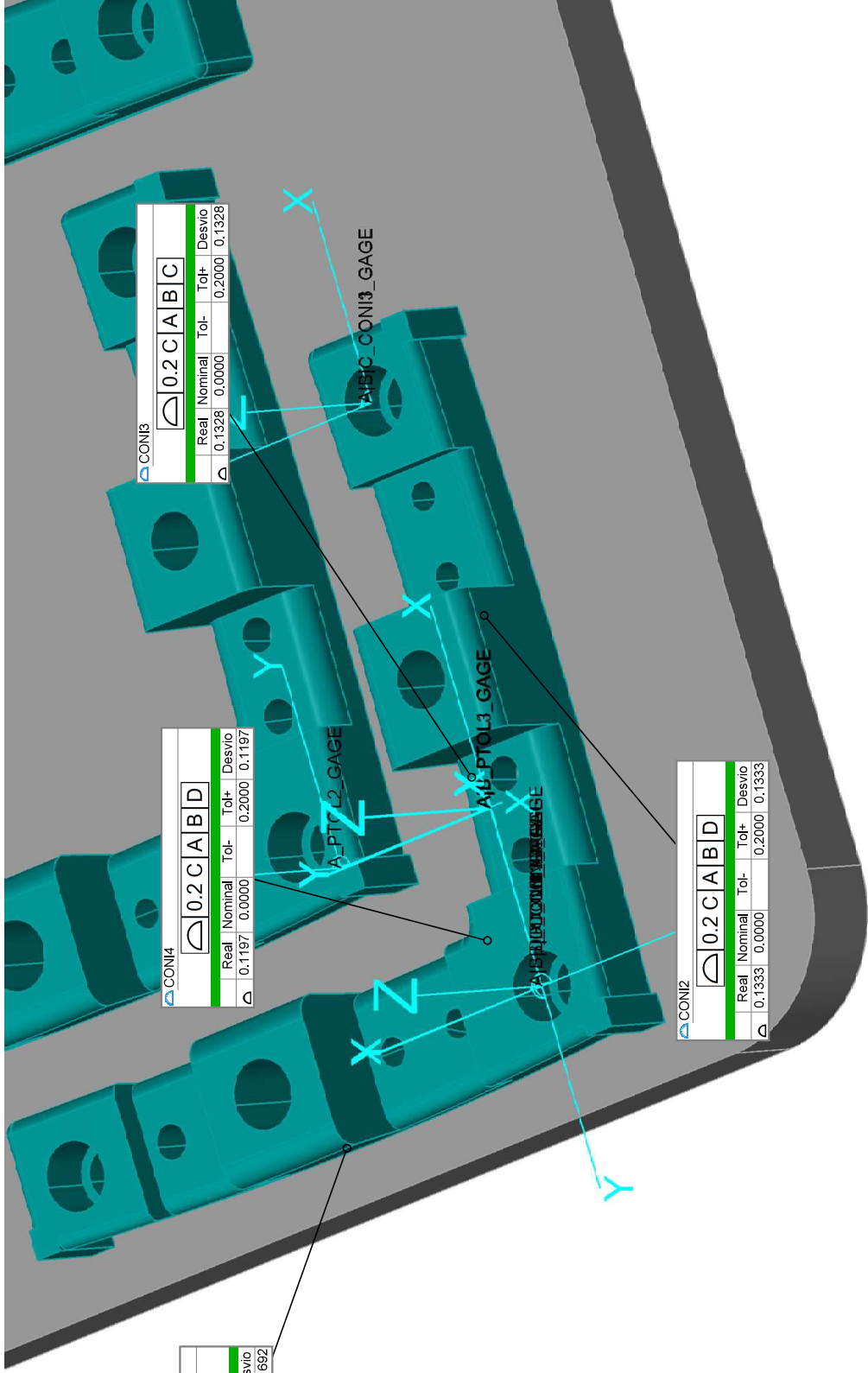


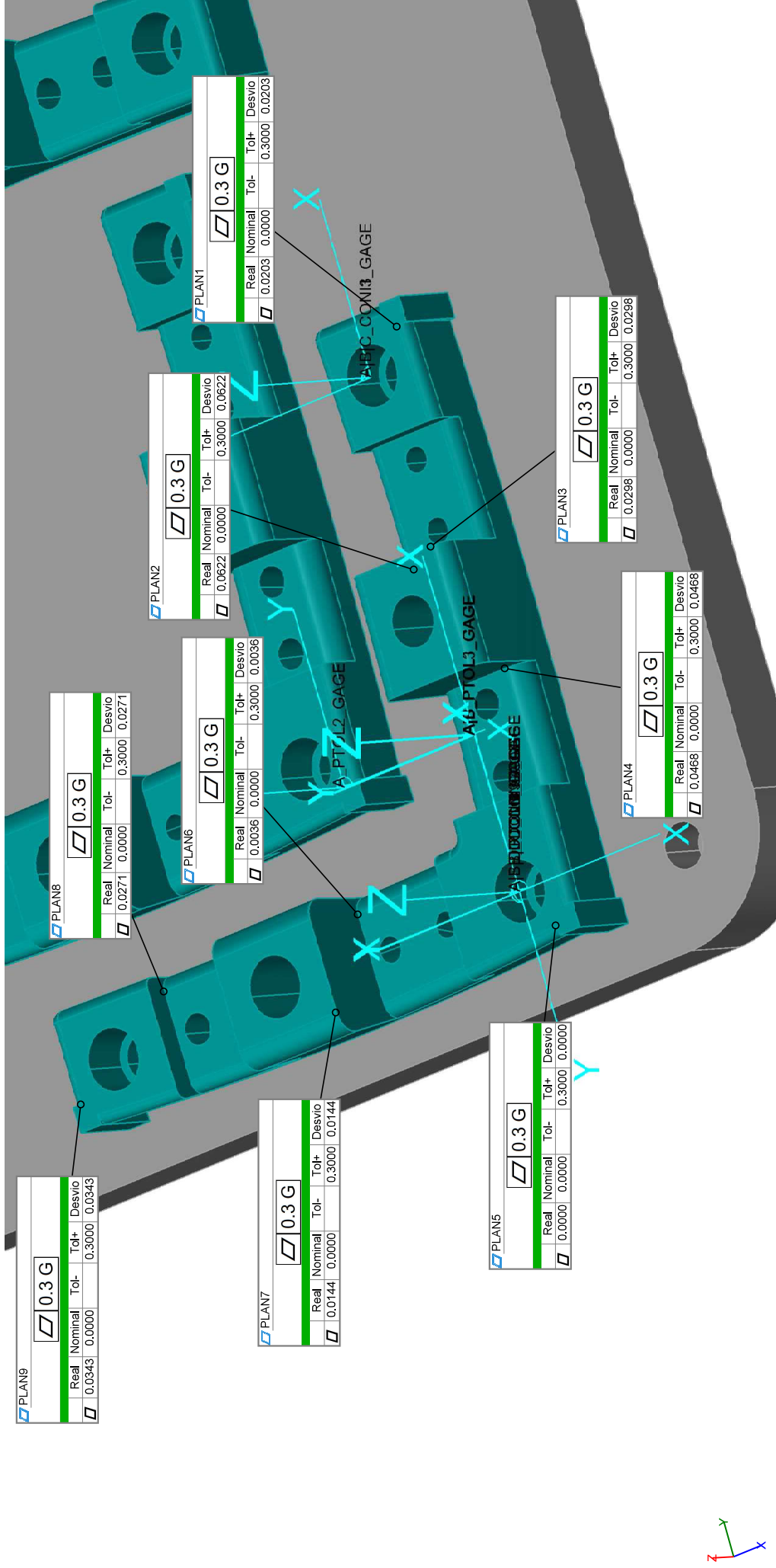
DRAFTSMAN	D. Soares	LAUAK PORTUGAL	 LAUAK PORTUGAL
SUPERVISOR	-----		
ENGINEER	D. Soares	THIS DRAWING CANNOT BE USED, PUBLISHED, NOR COMMUNICATED TO THIRD PARTIES OR REPRODUCED WITHOUT AUTHORIZATION OF LAUAK INDUSTRIES SETIM,.	
MATERIAL	AISI10Mg		
WEIGHT	0,175 Kg	DRAWING TITLE	Adapted Artifact
DATE	26/06/2025		
SIZE	A3		
ISO / R128-E SYS		SCALE: 1:1	DRAWING NUMBER Adapted_Artifact
NOVA	-	-	-
REV	-	-	-

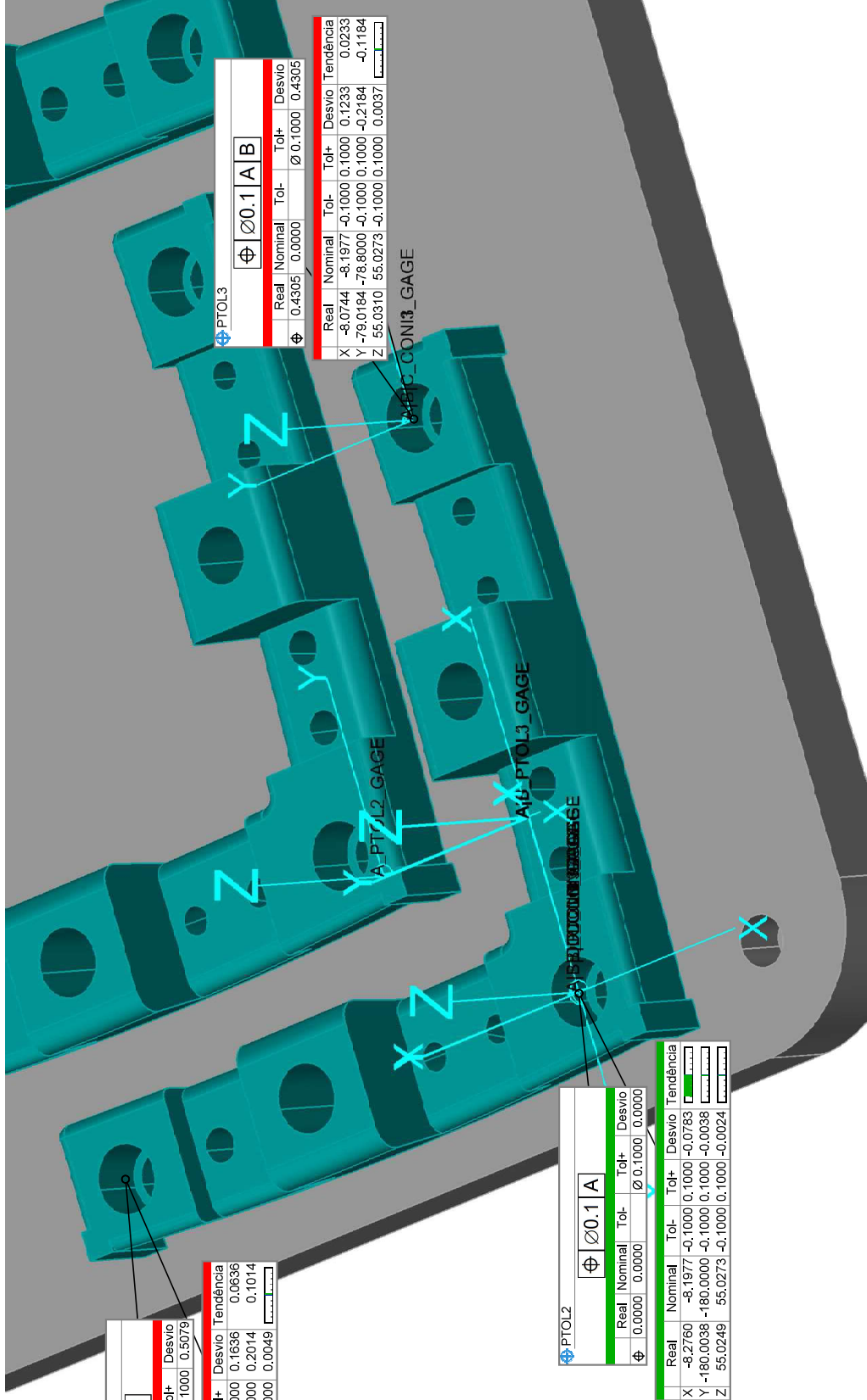
Anexo II

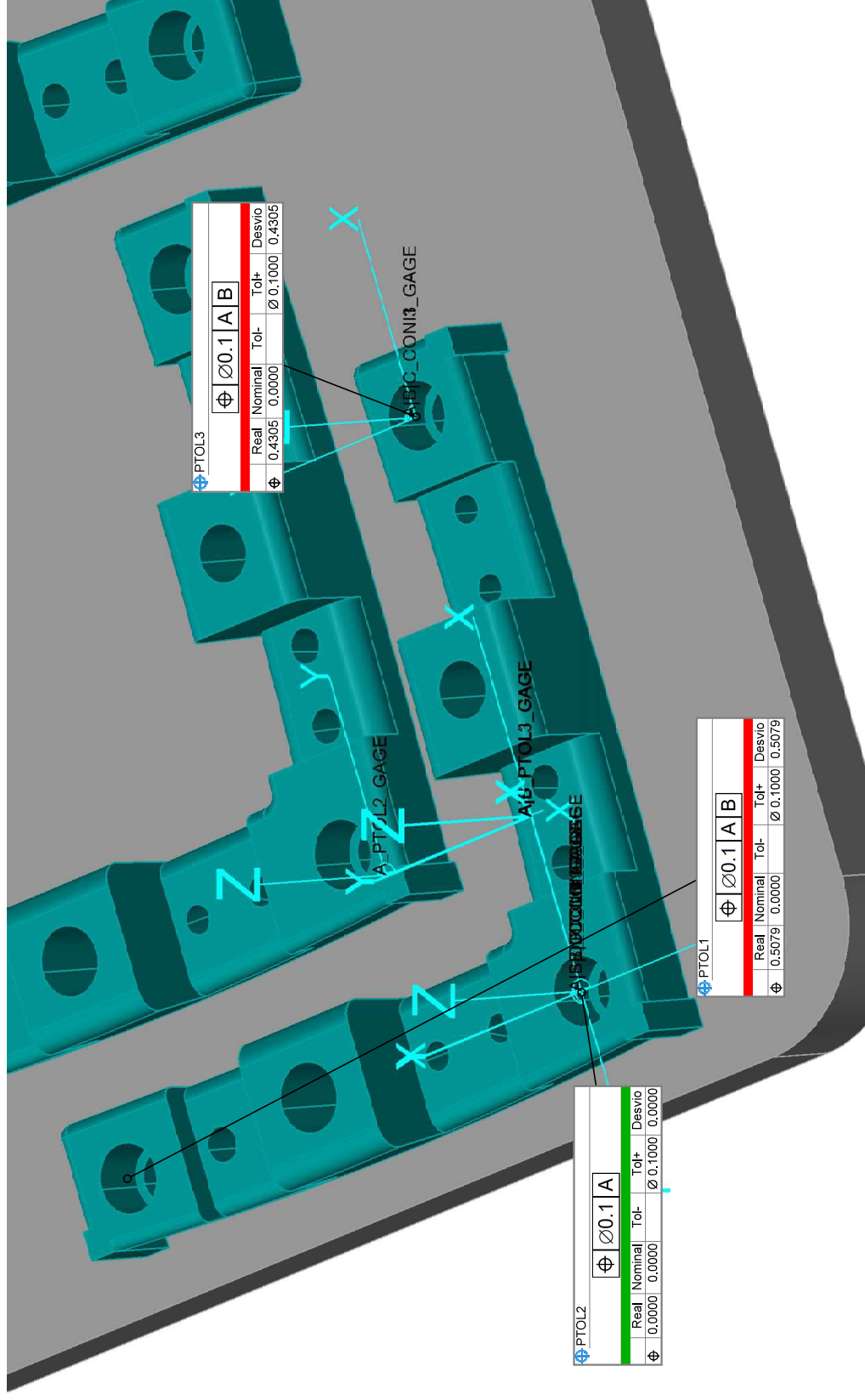
Relatórios de Controlo Dimensional Dos Artefactos na Placa de Impressão

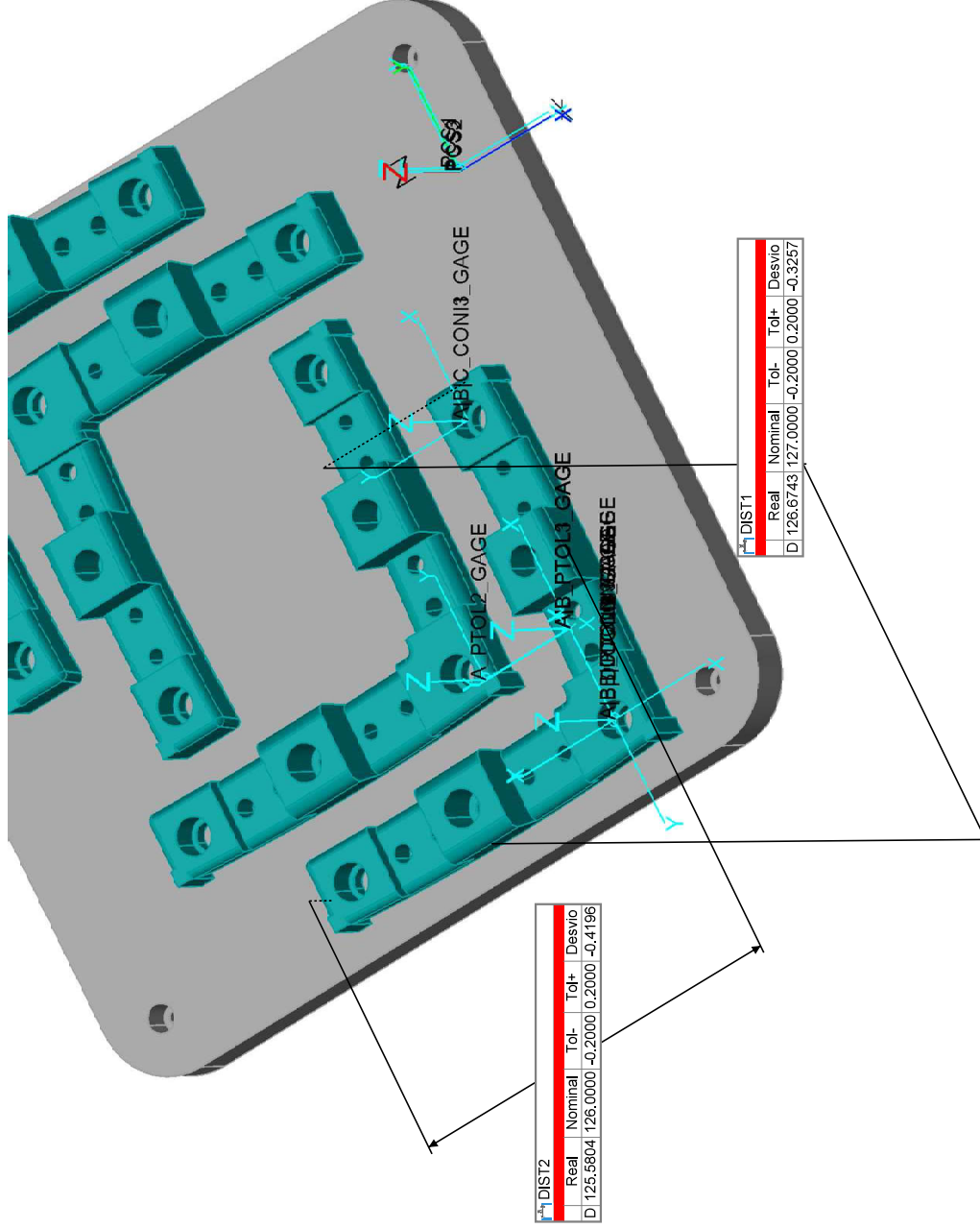
No anexo A.2 é apresentado os relatórios de controlo dimensional realizados aos artefactos ainda colocados na placa de impressão.

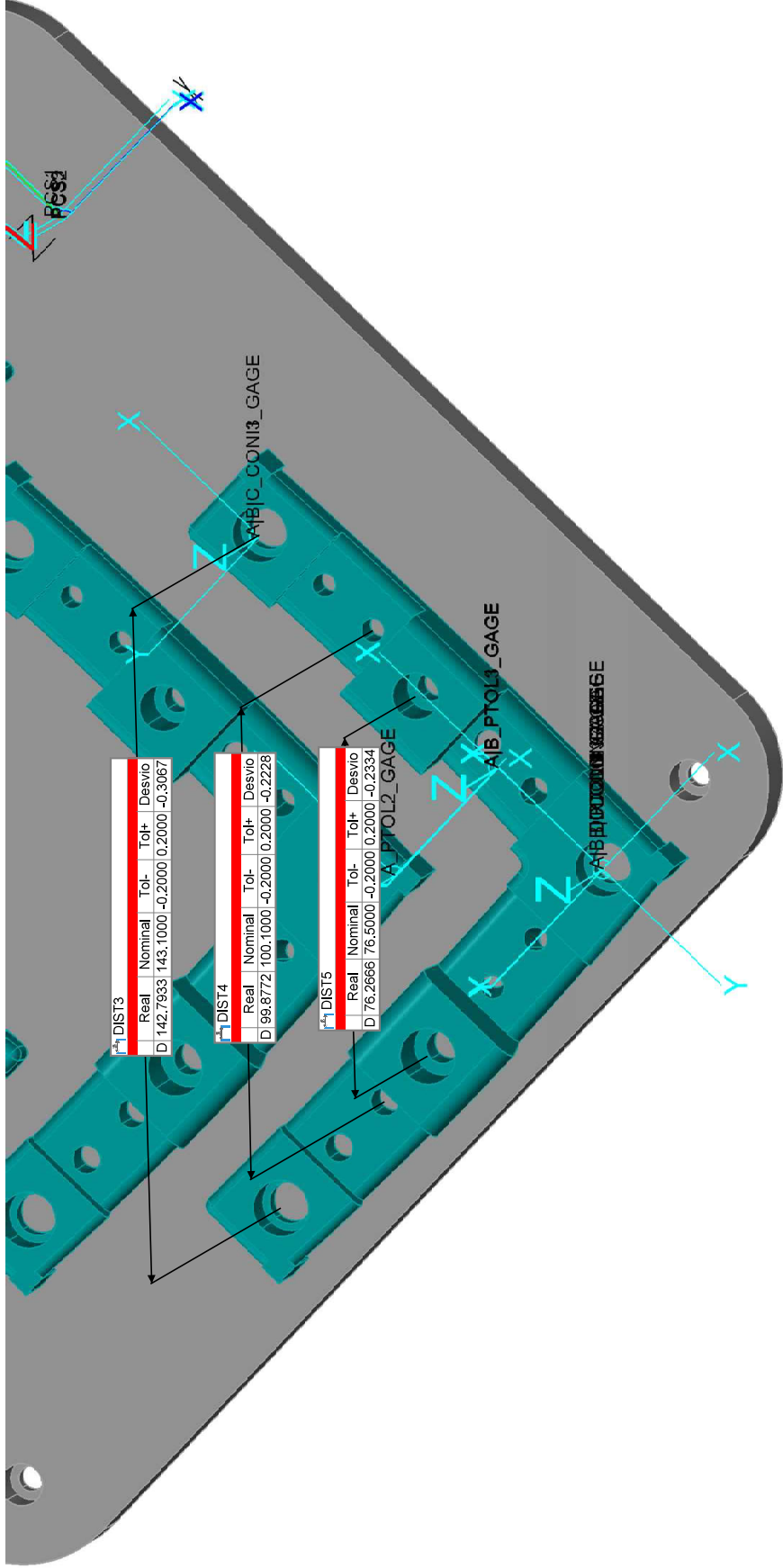


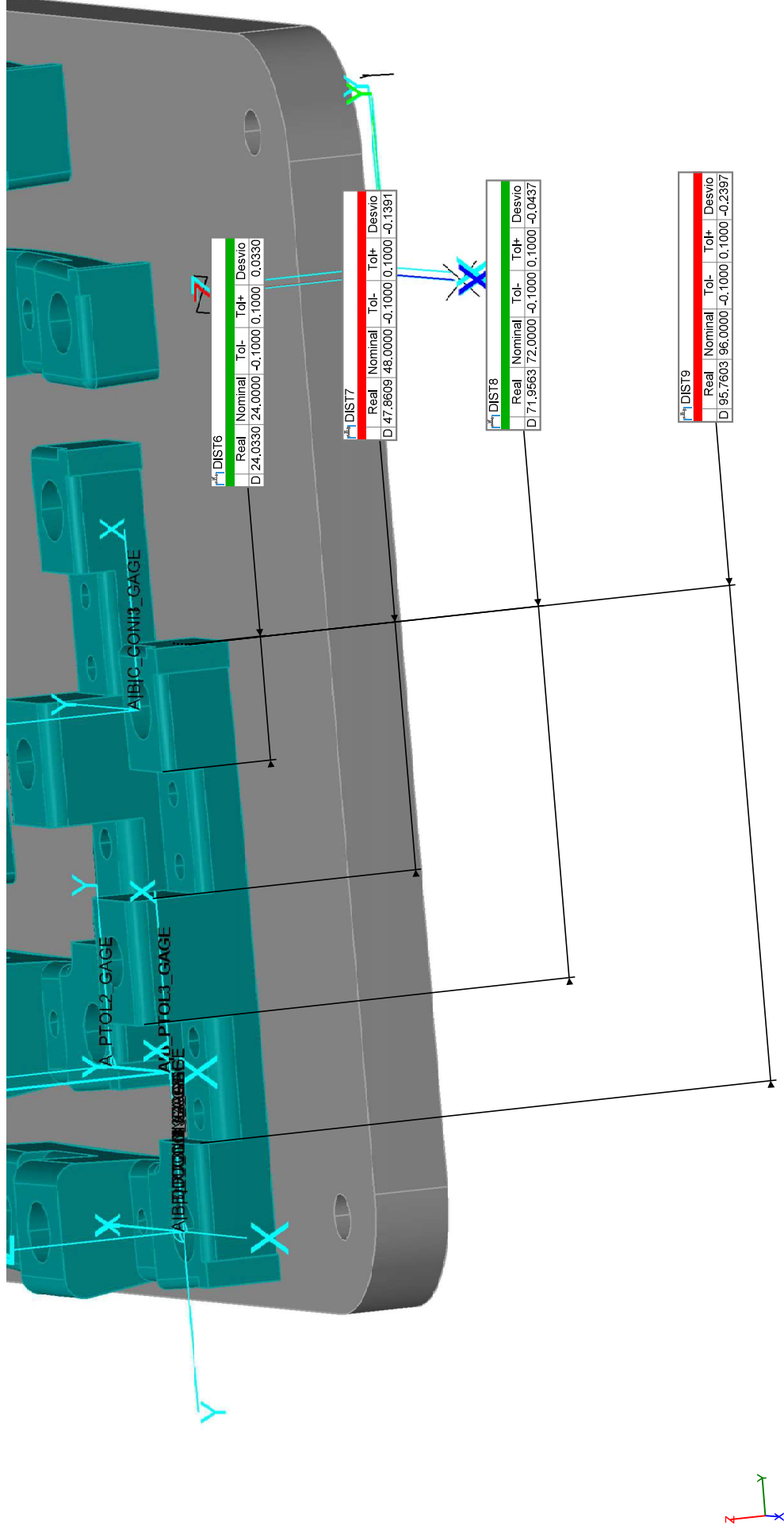


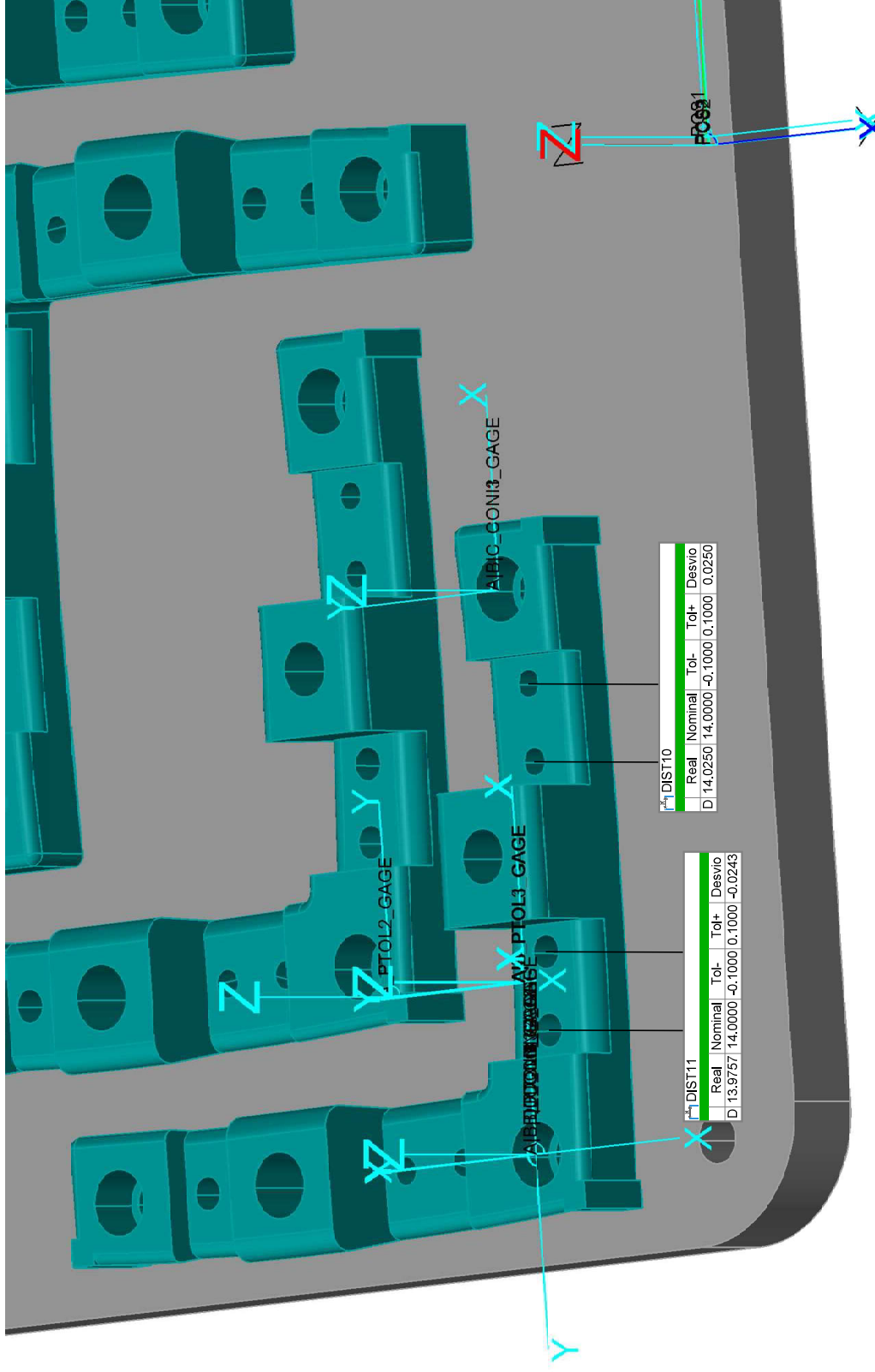


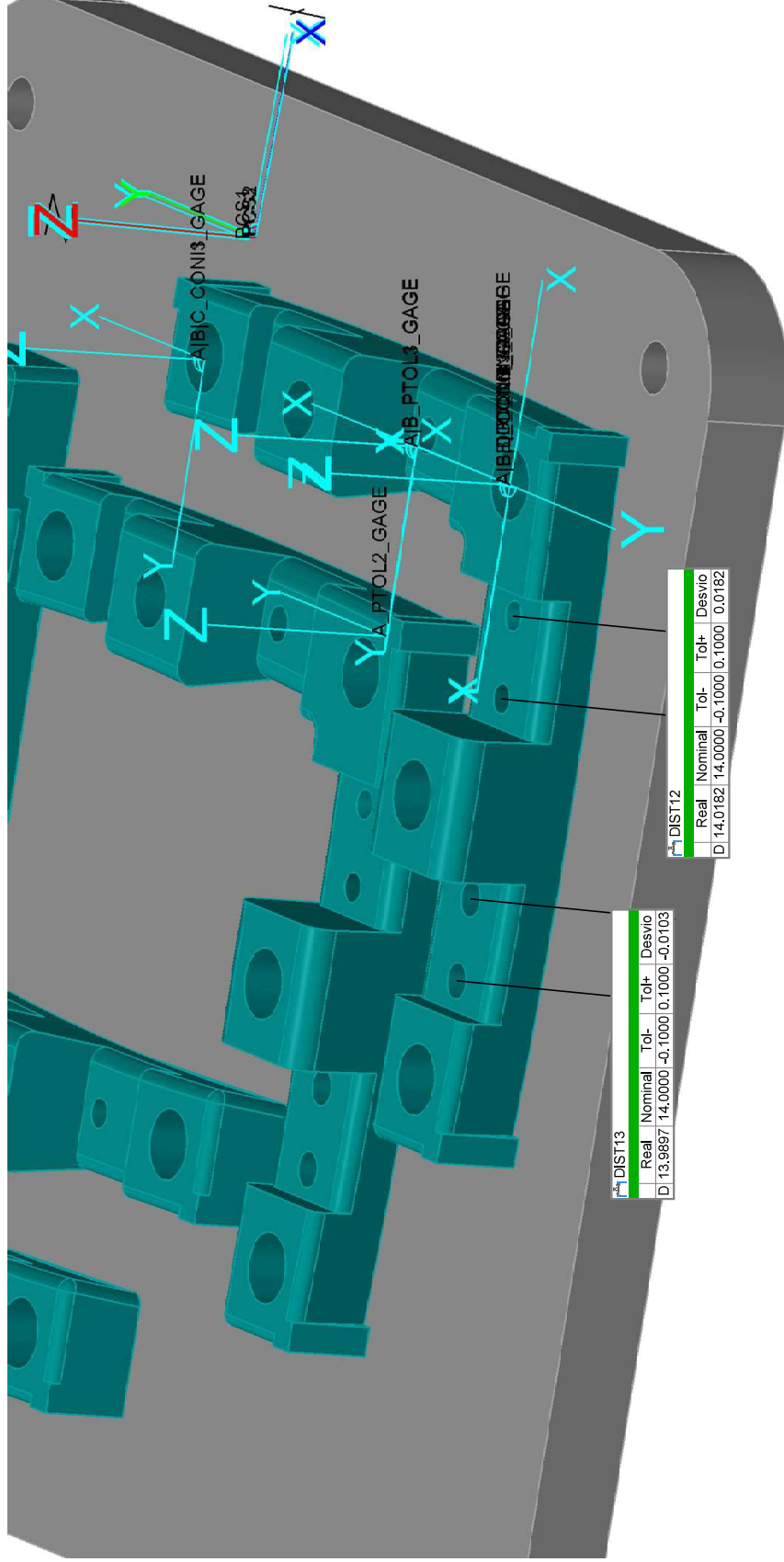


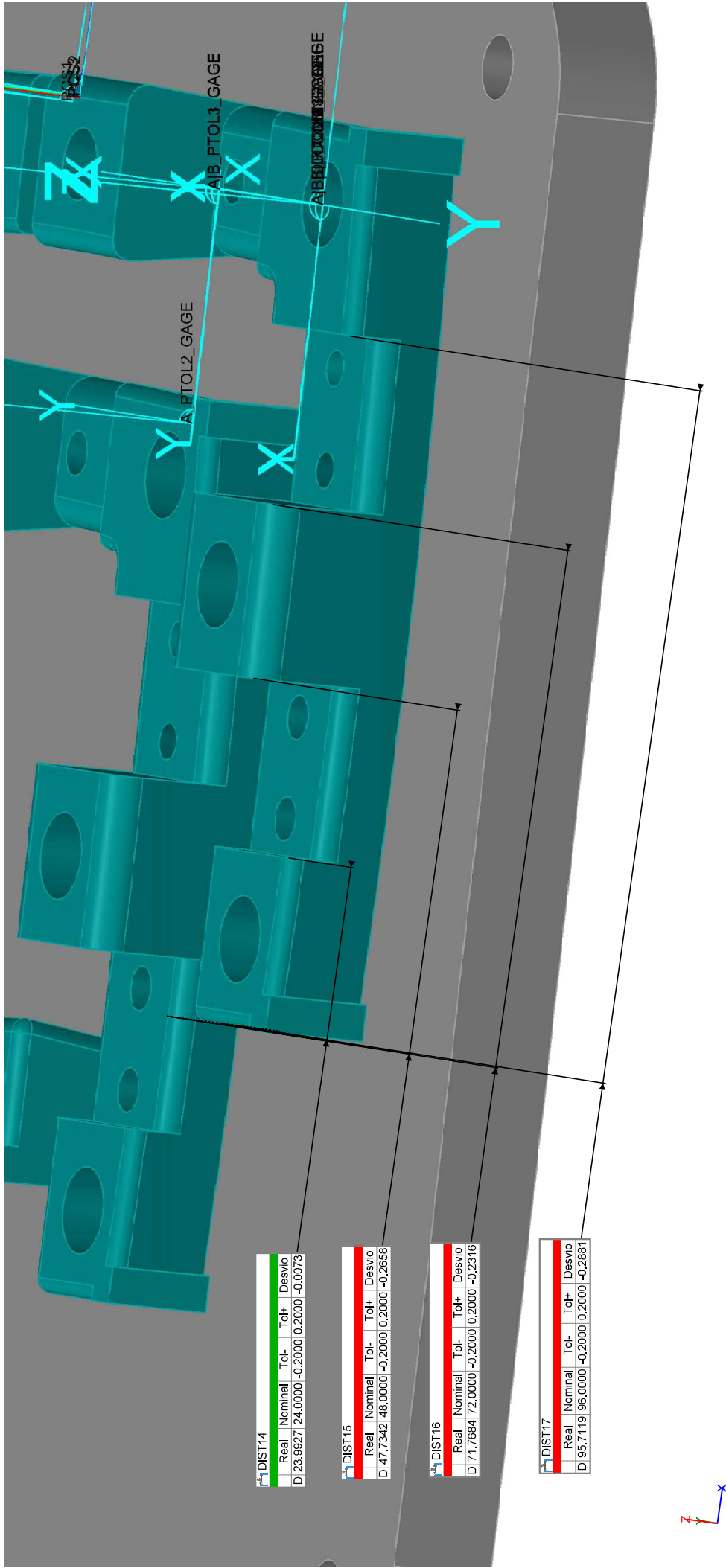














RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL

REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

Comentário: Vari...

Nº

3951_25-LAG

EN 9100

BUREAU VERITAS

Certification



Pág.

Page

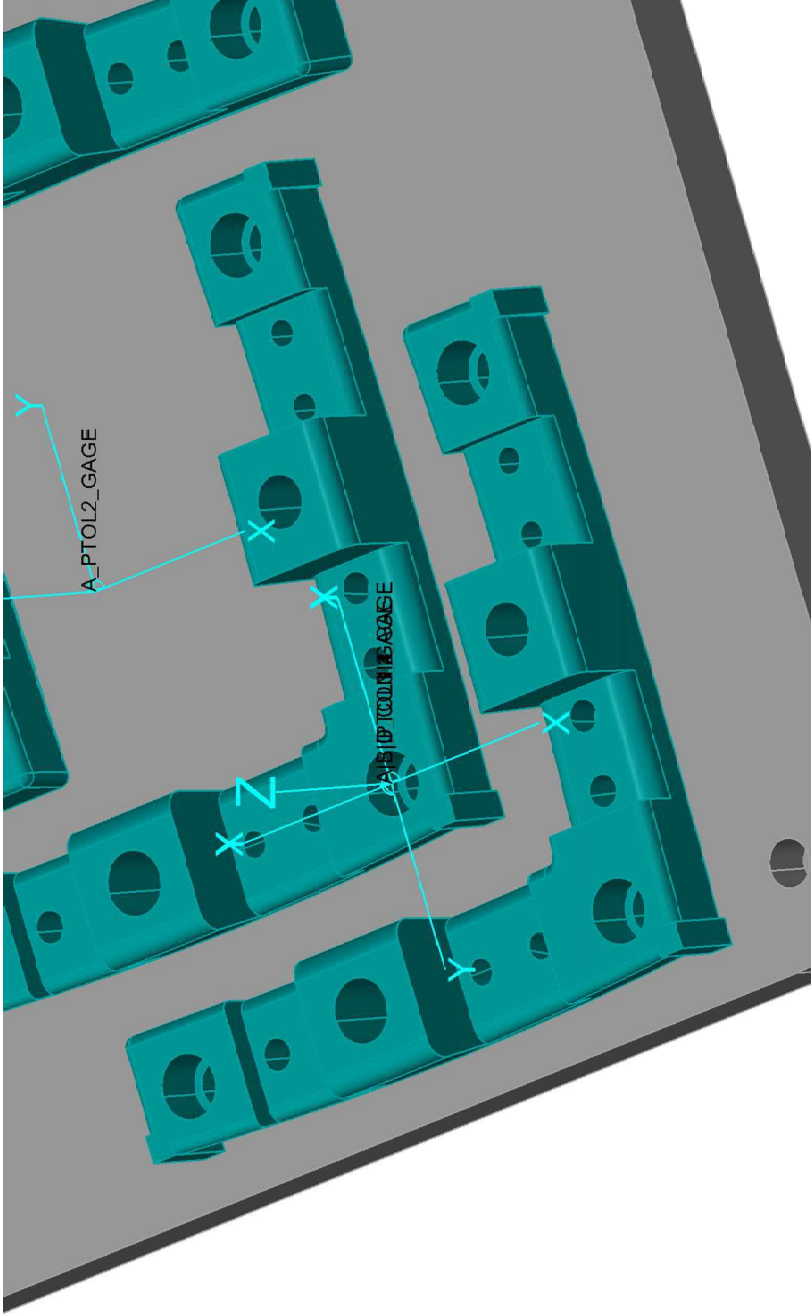
1 / 11

IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT

Equipamento / Equipment	Modelo / Model	Nº de Série/ Serial nr.	Nº EMM / MME nr.	Operador / Operator
CMM	COORD3METRO...	KROMOS NT	LAG 270	Bruno Jorge

IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION

Nº Peça / Part Nr.	Designação / Designation	Nº de OF / Work Order Nr.	Data / Date
ADAPTED ARTIFACT	ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (L3)	2 022 479	26/09/25 15:02:18





RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

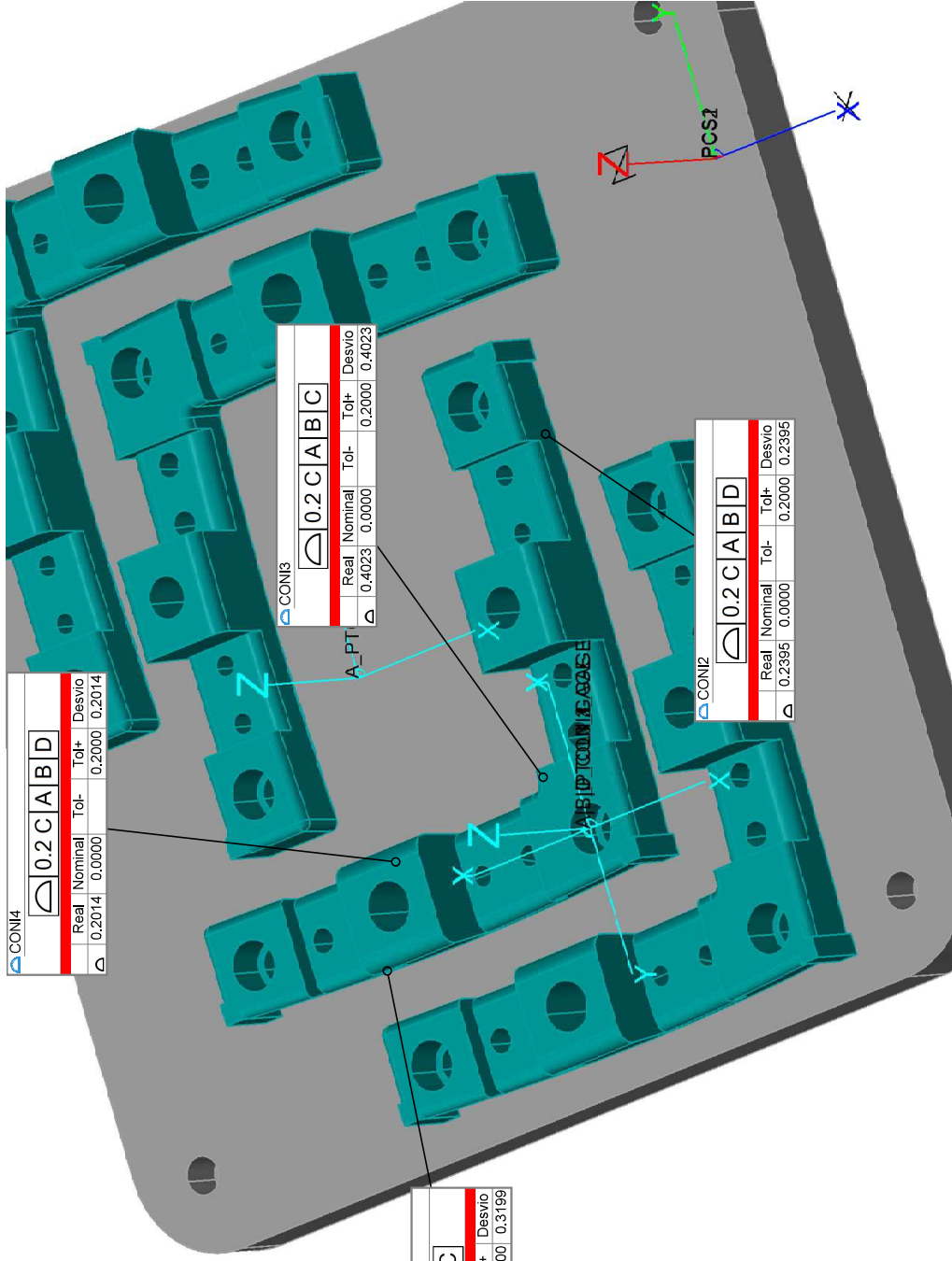
Nº

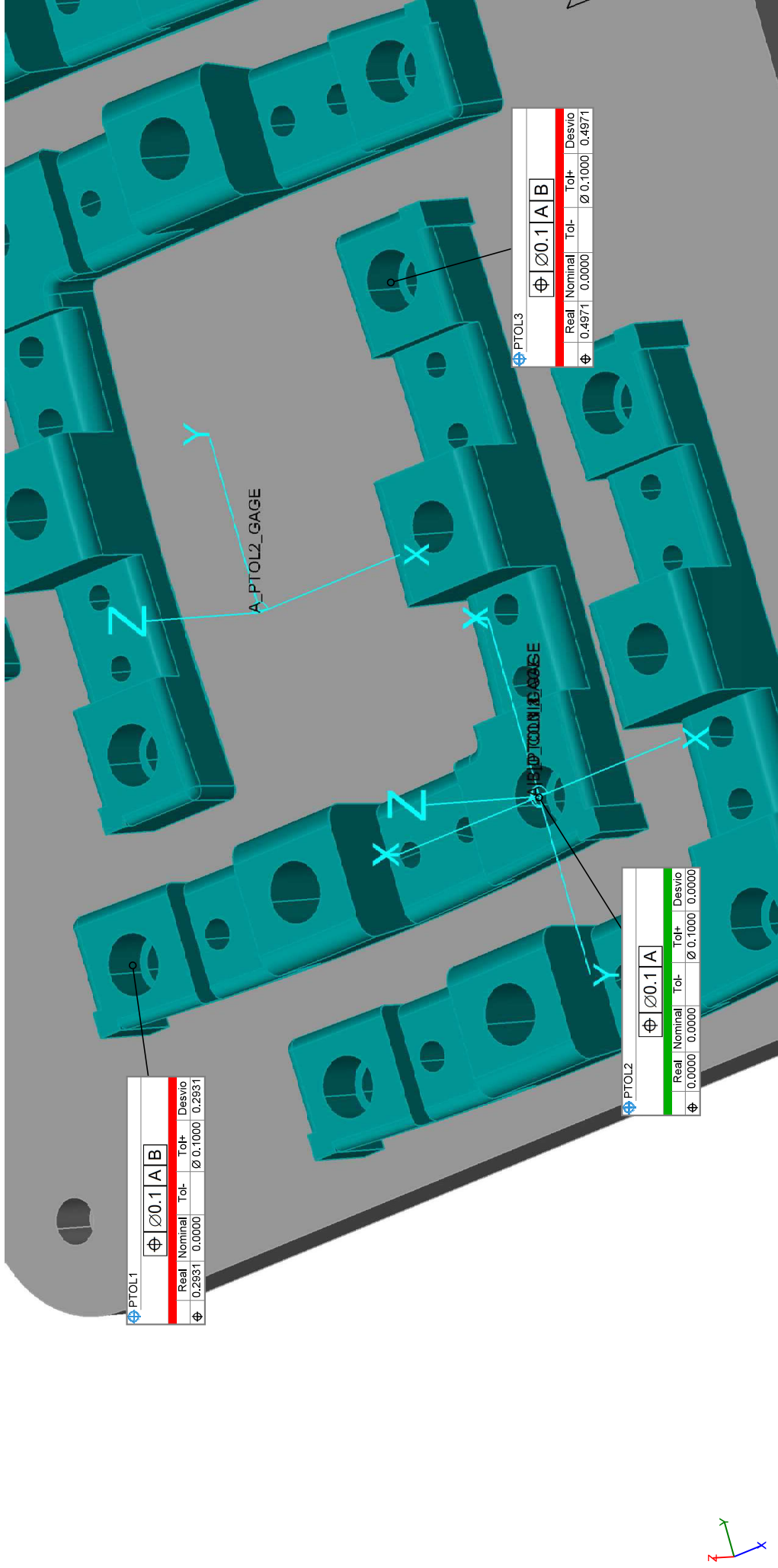
3951_25-LAG

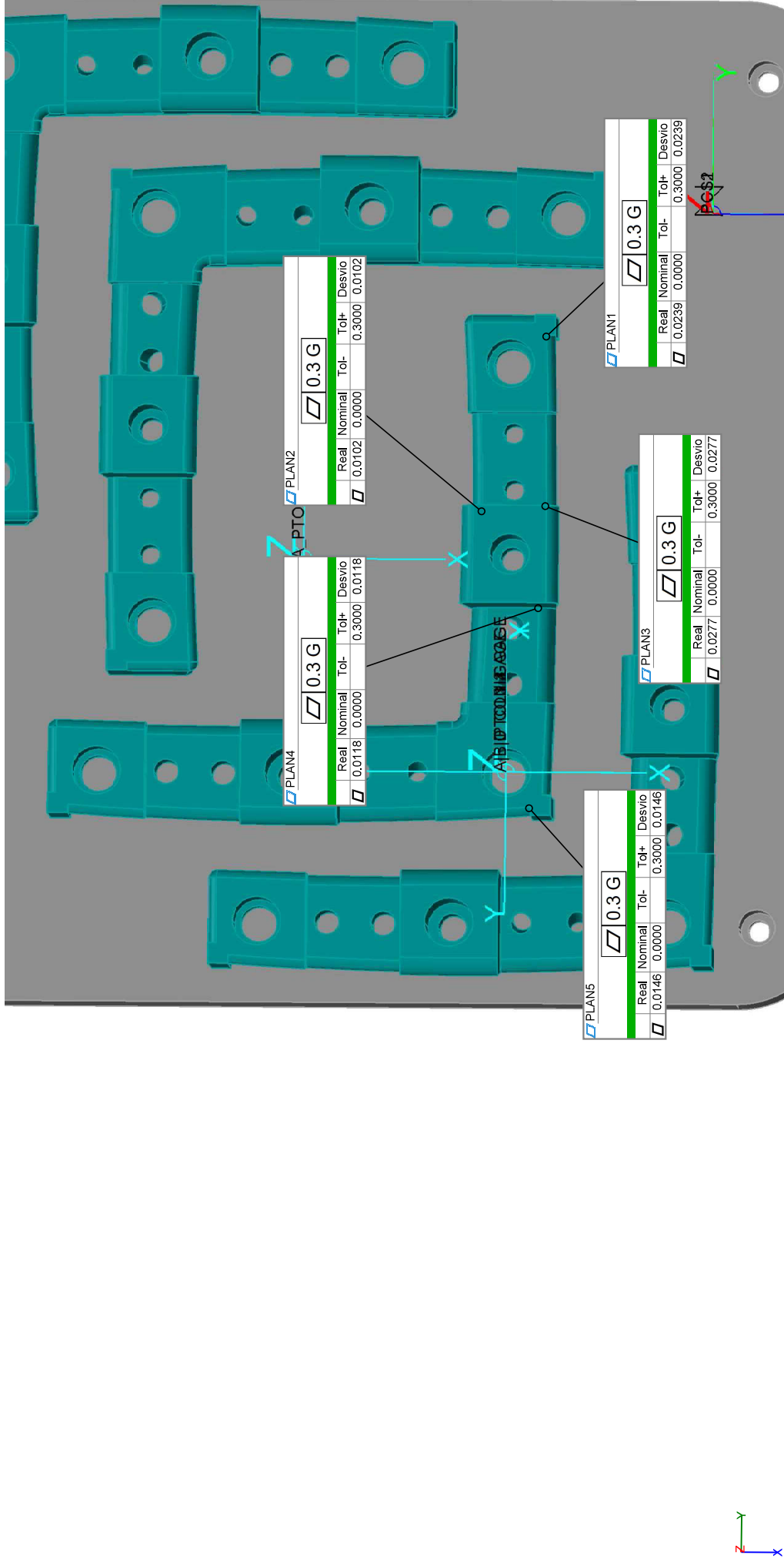
Pág.

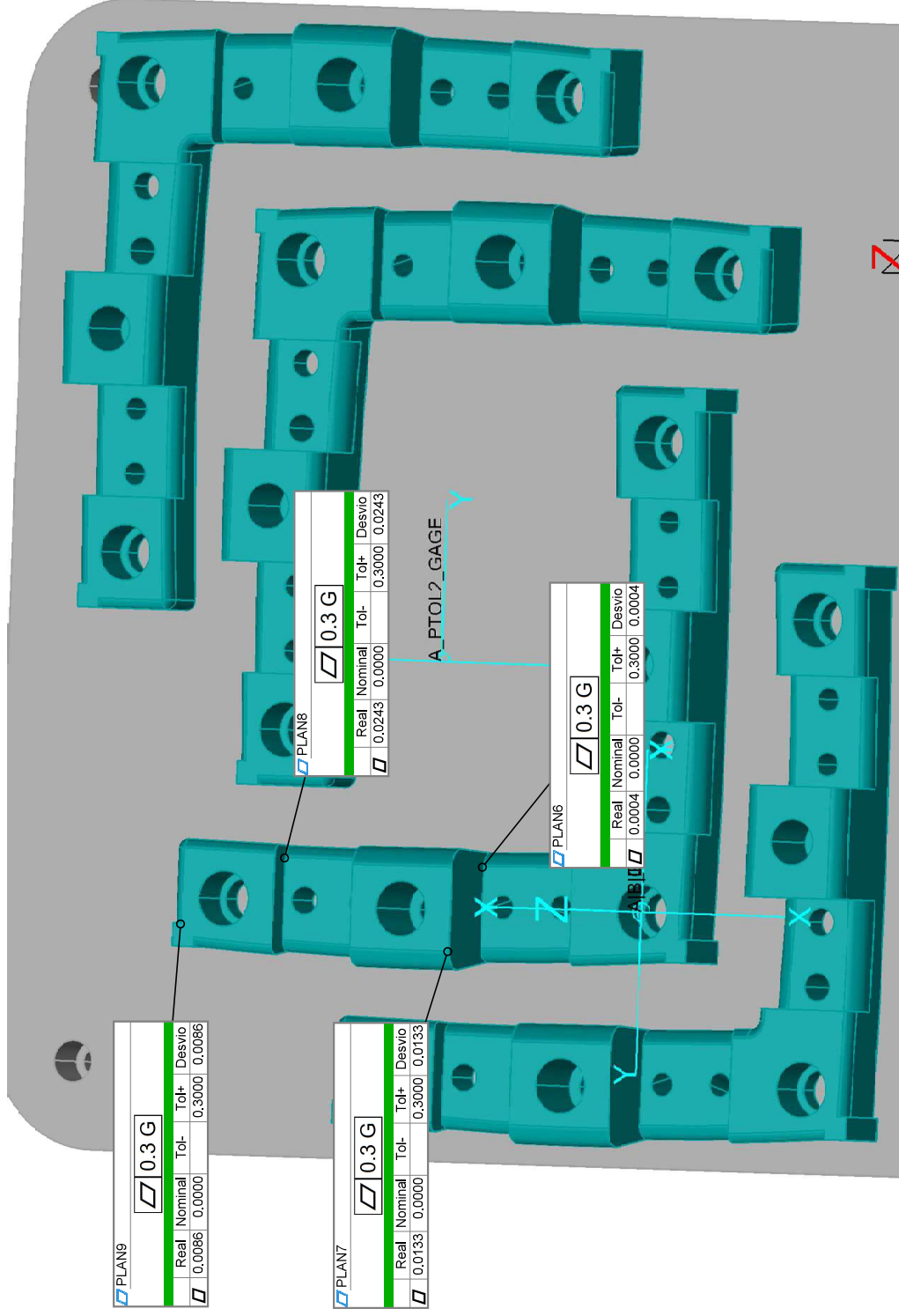
Page

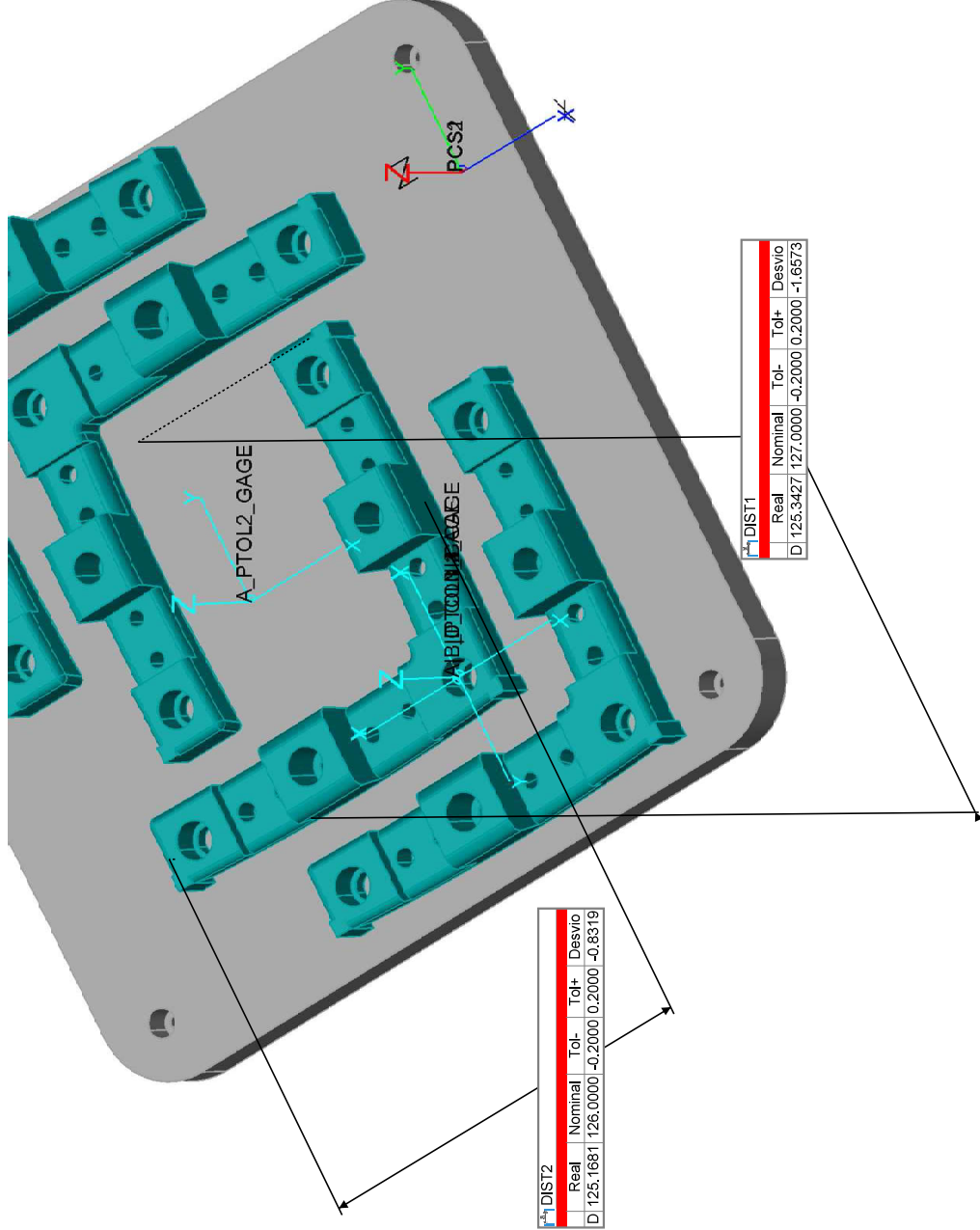
2 / 11

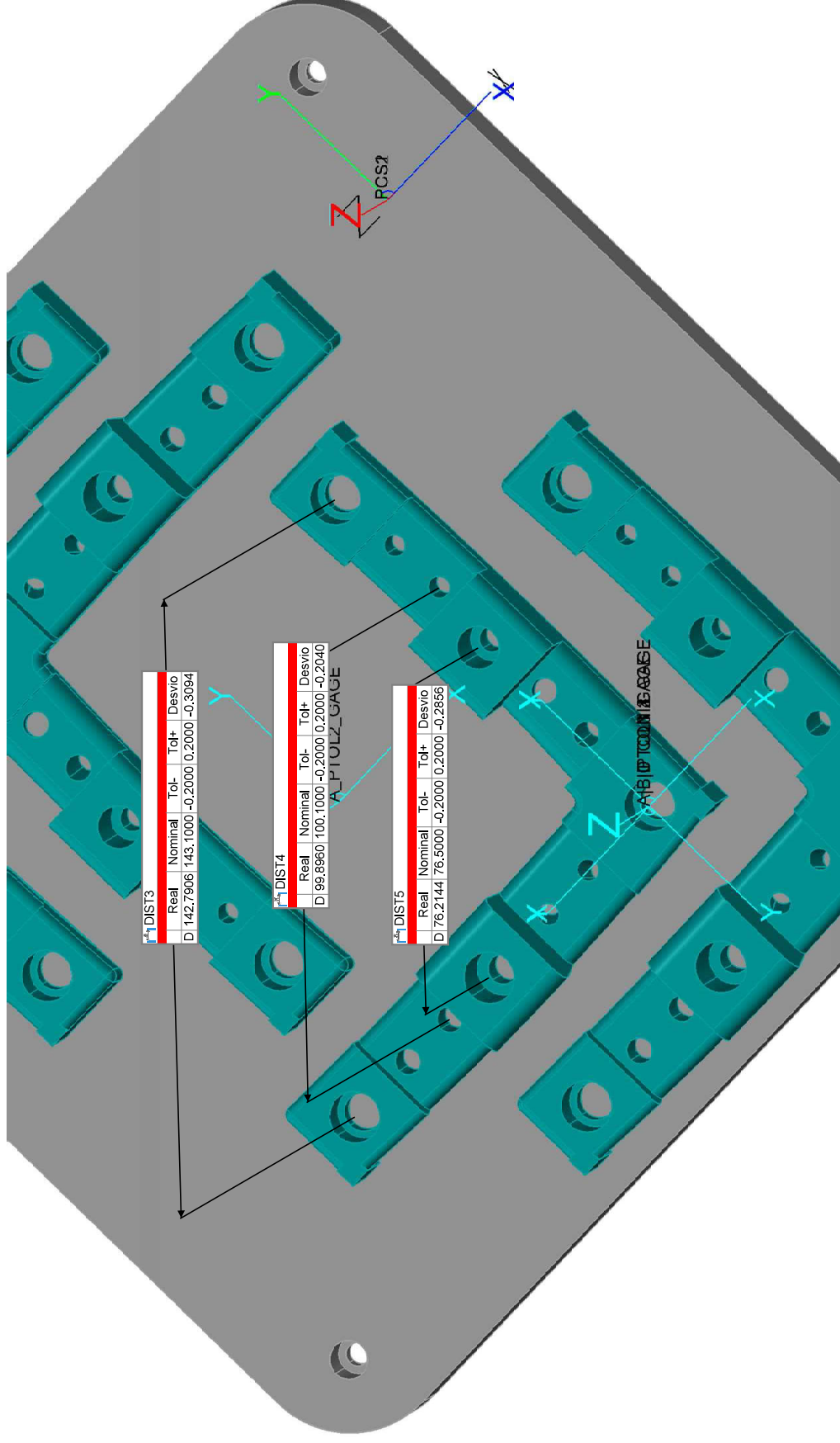


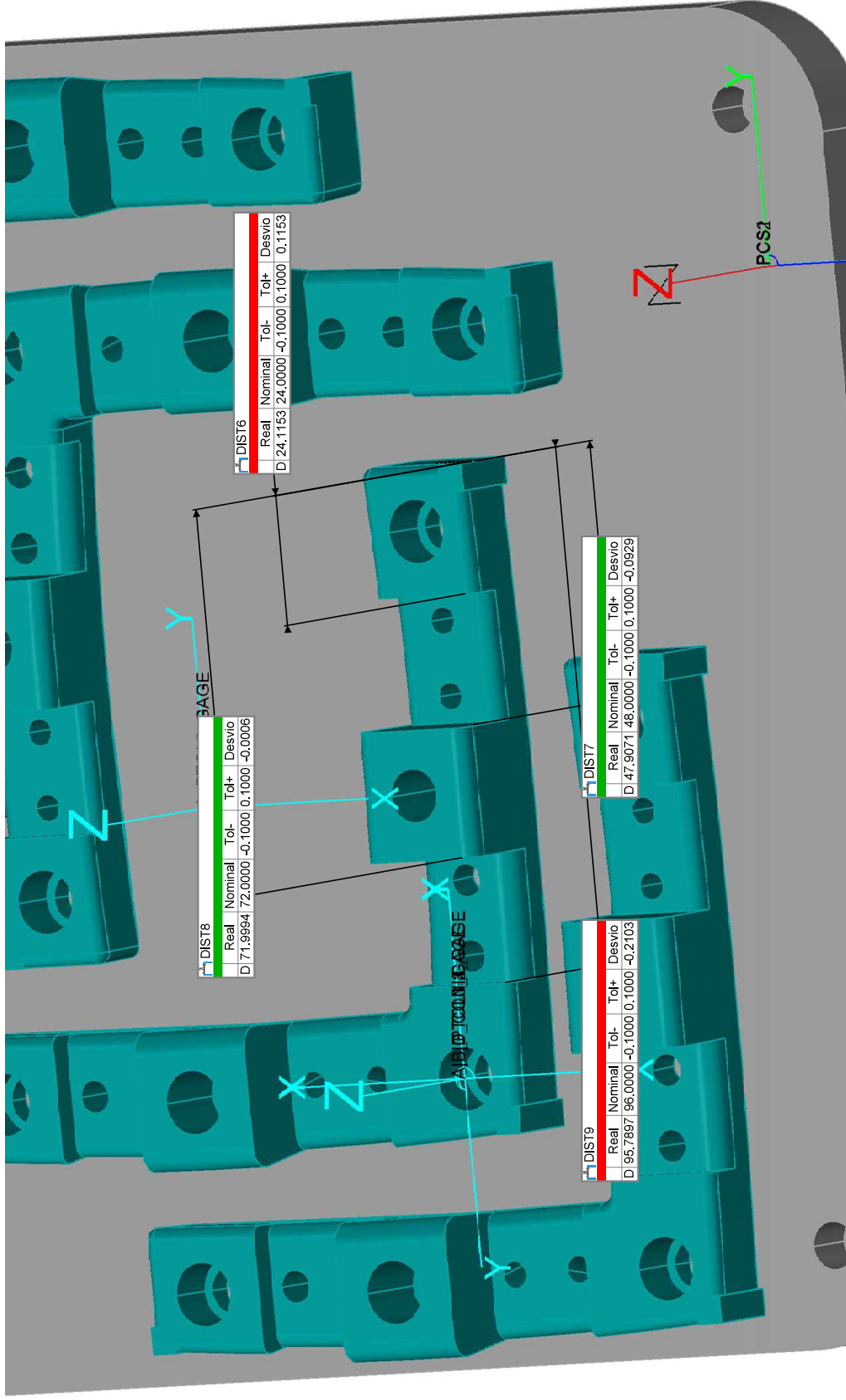


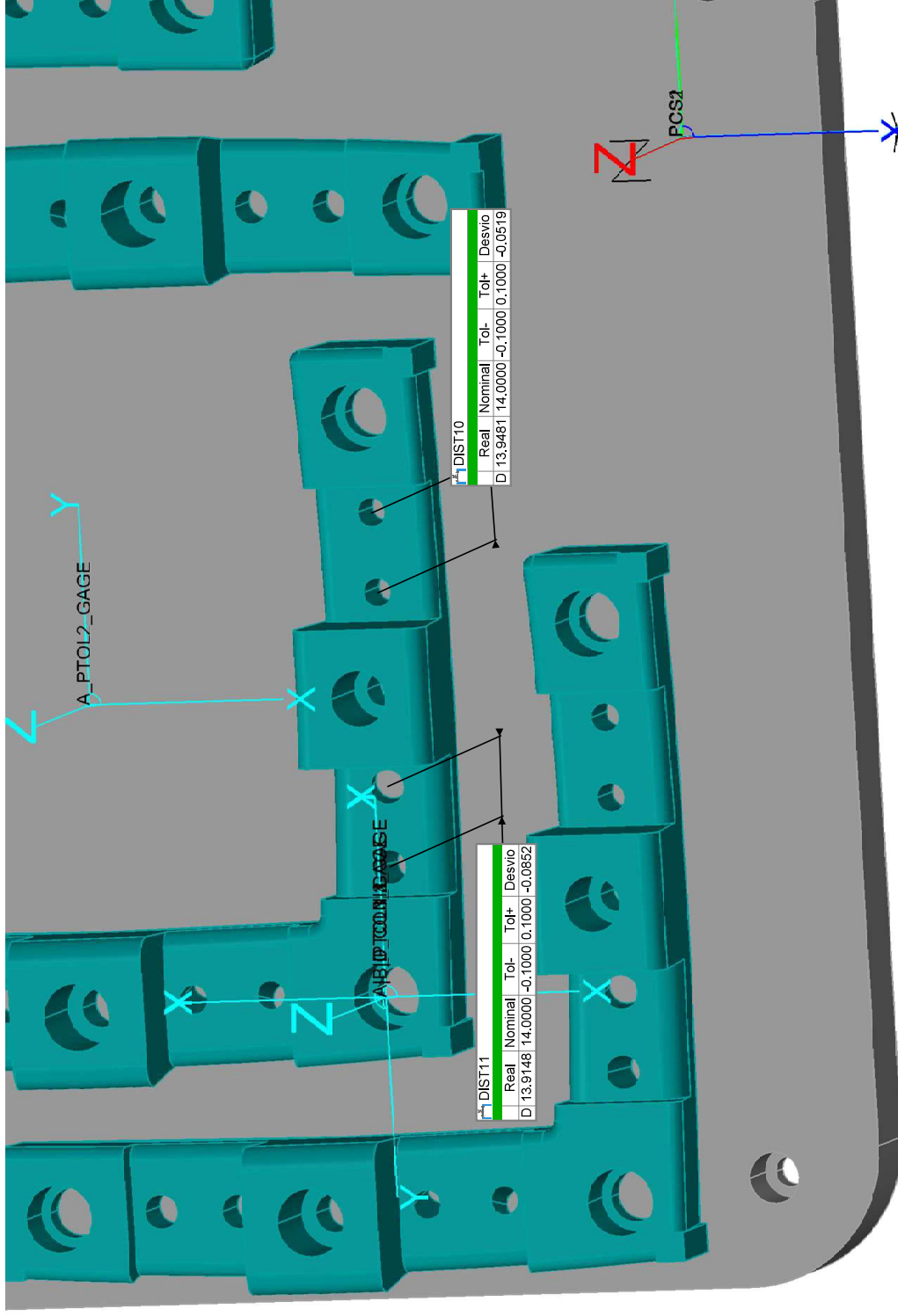


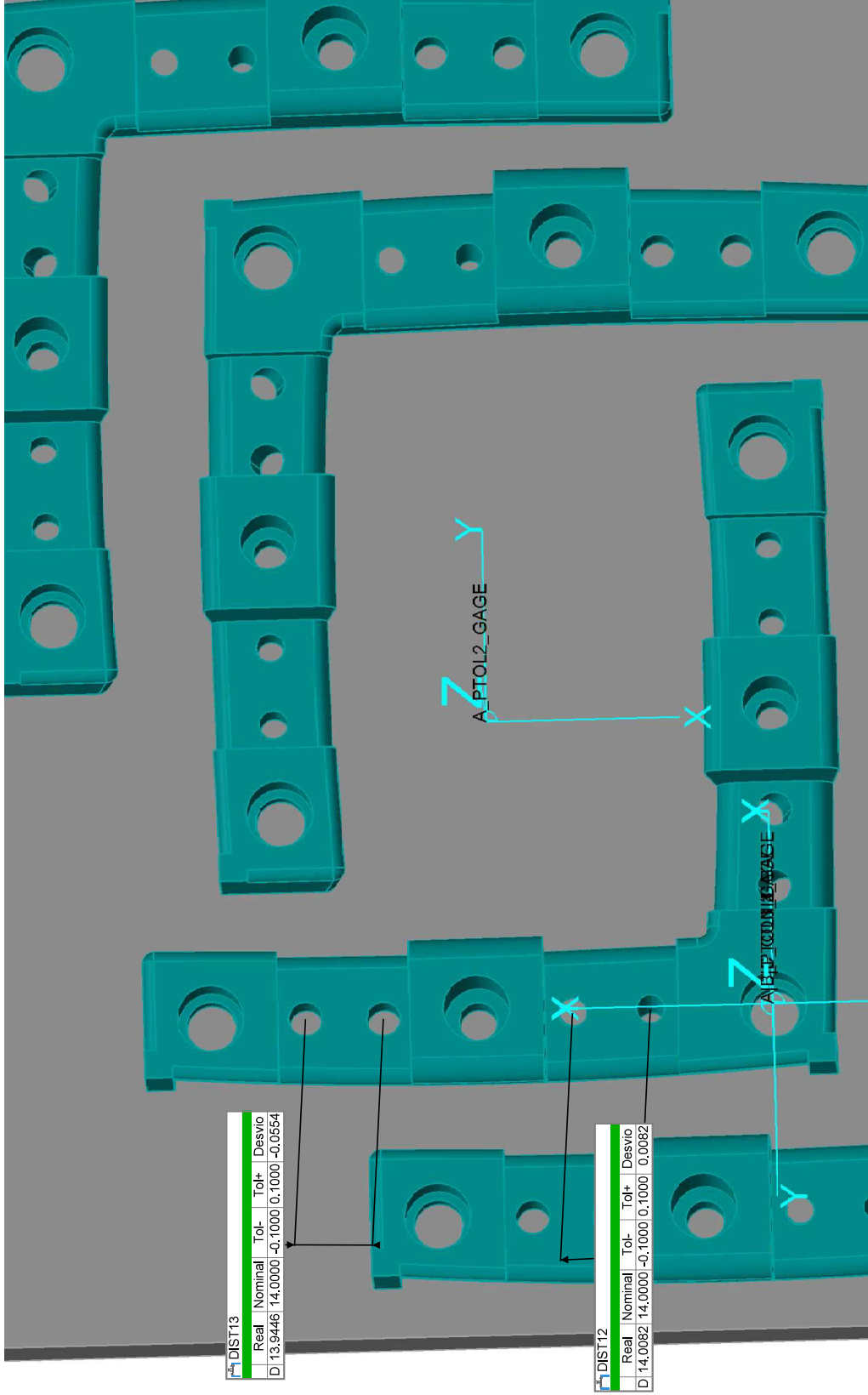


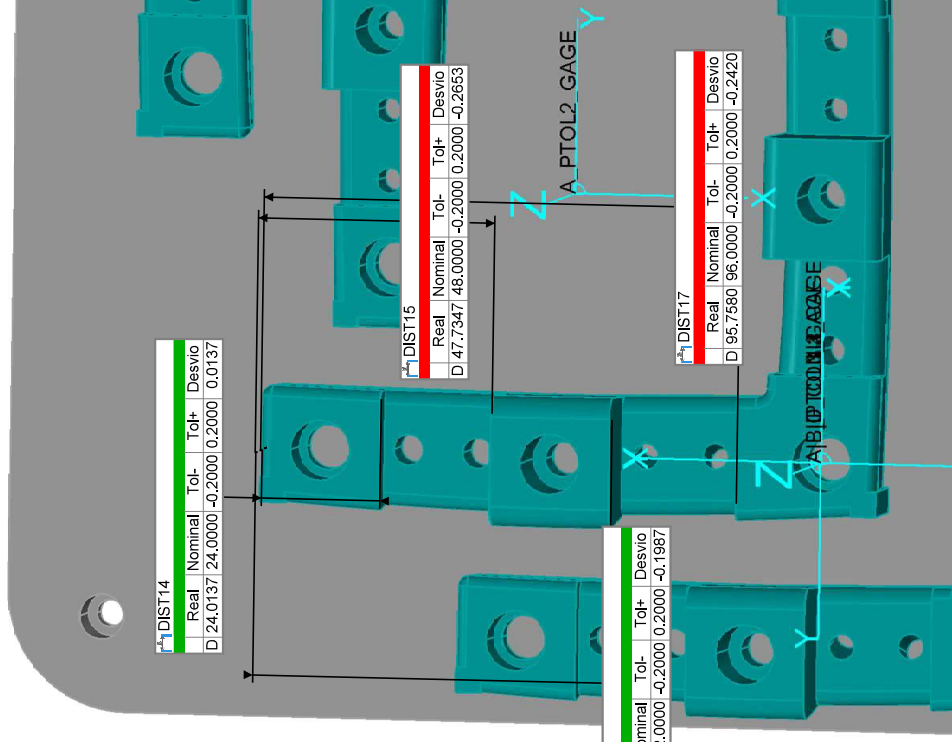














Nº

3950_25-LAG

Pág.

1 / 11



RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL

REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

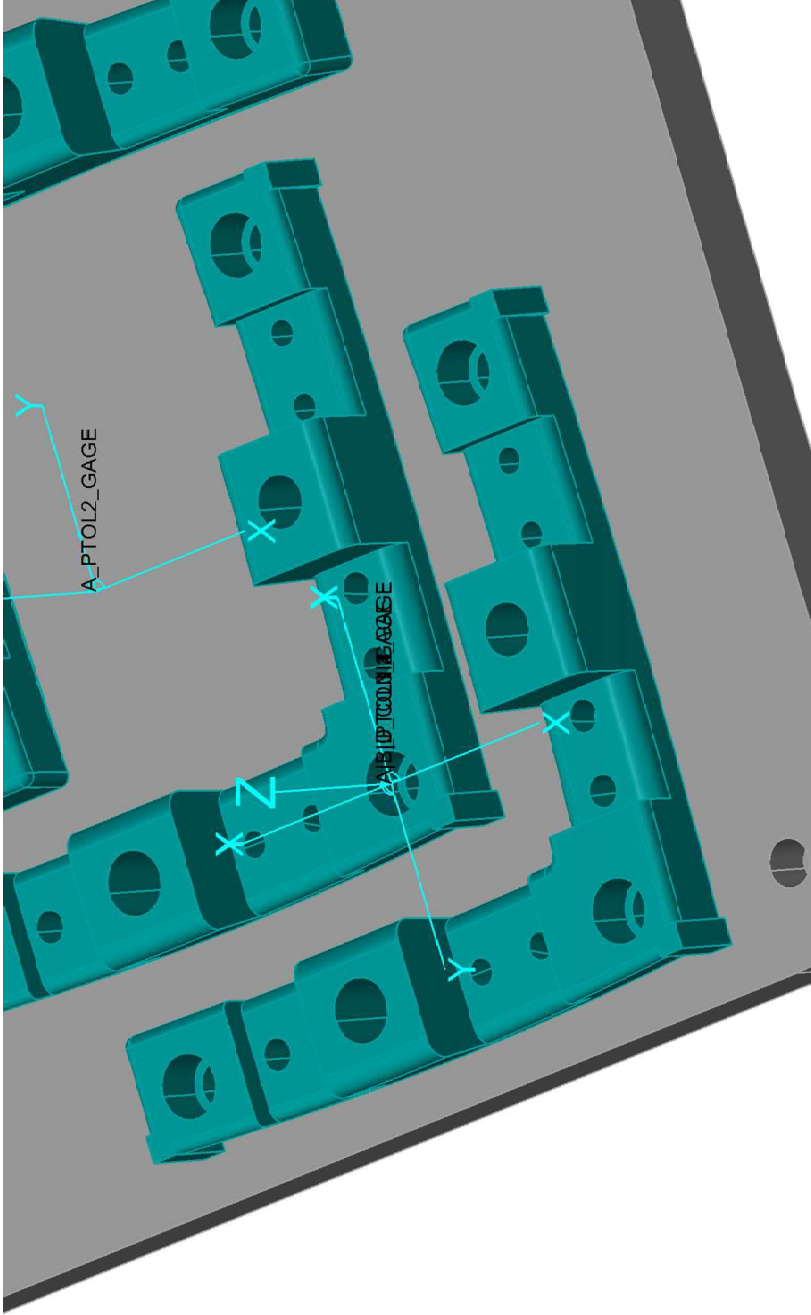
Comentário: Vari...

IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT

Equipamento / Equipment	Modelo / Model	Nº de Série/ Serial nr.	Nº EMM / MME nr.	Operador / Operator
CMM	COORD3METRO...	KROMOS NT	LAG 270	Bruno Jorge

IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION

Nº Peça / Part Nr.	Designação / Designation	Nº de OF / Work Order Nr.	Data / Date
ADAPTED ARTIFACT	ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (L2)	2 022 479	26/09/25 14:30:44



RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

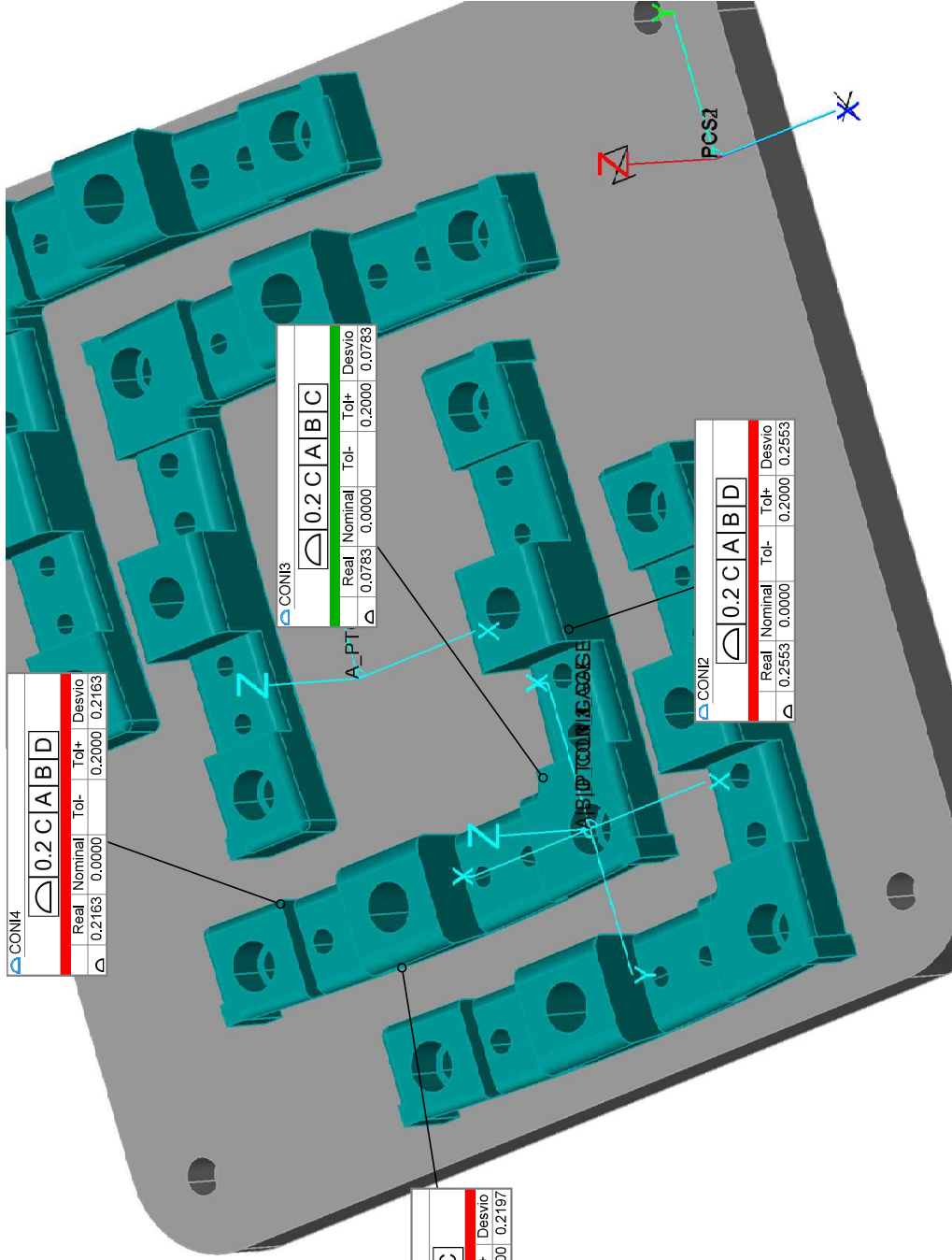
Nº

3950_25-LAG

Pág.

Page

2 / 11

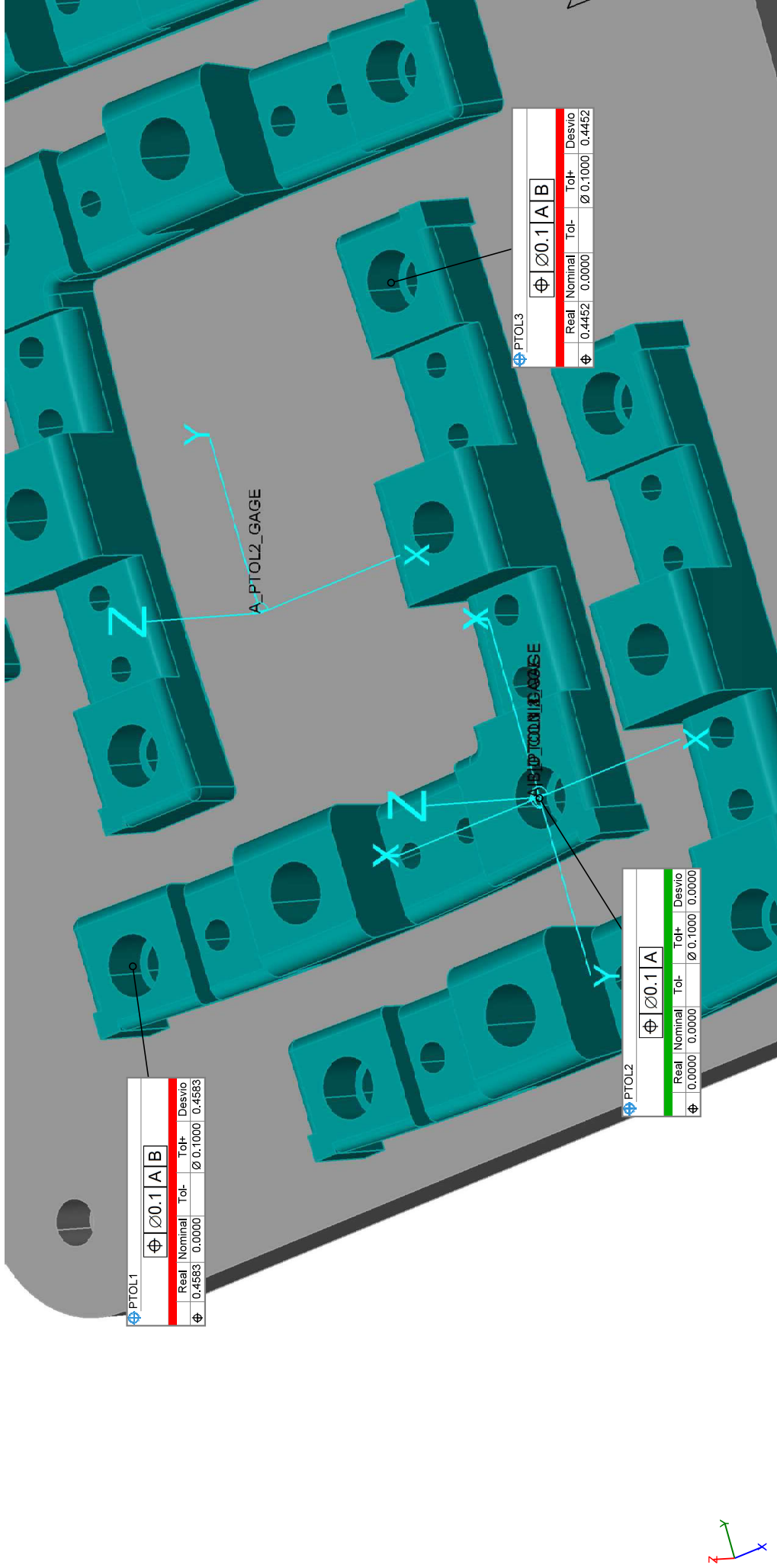


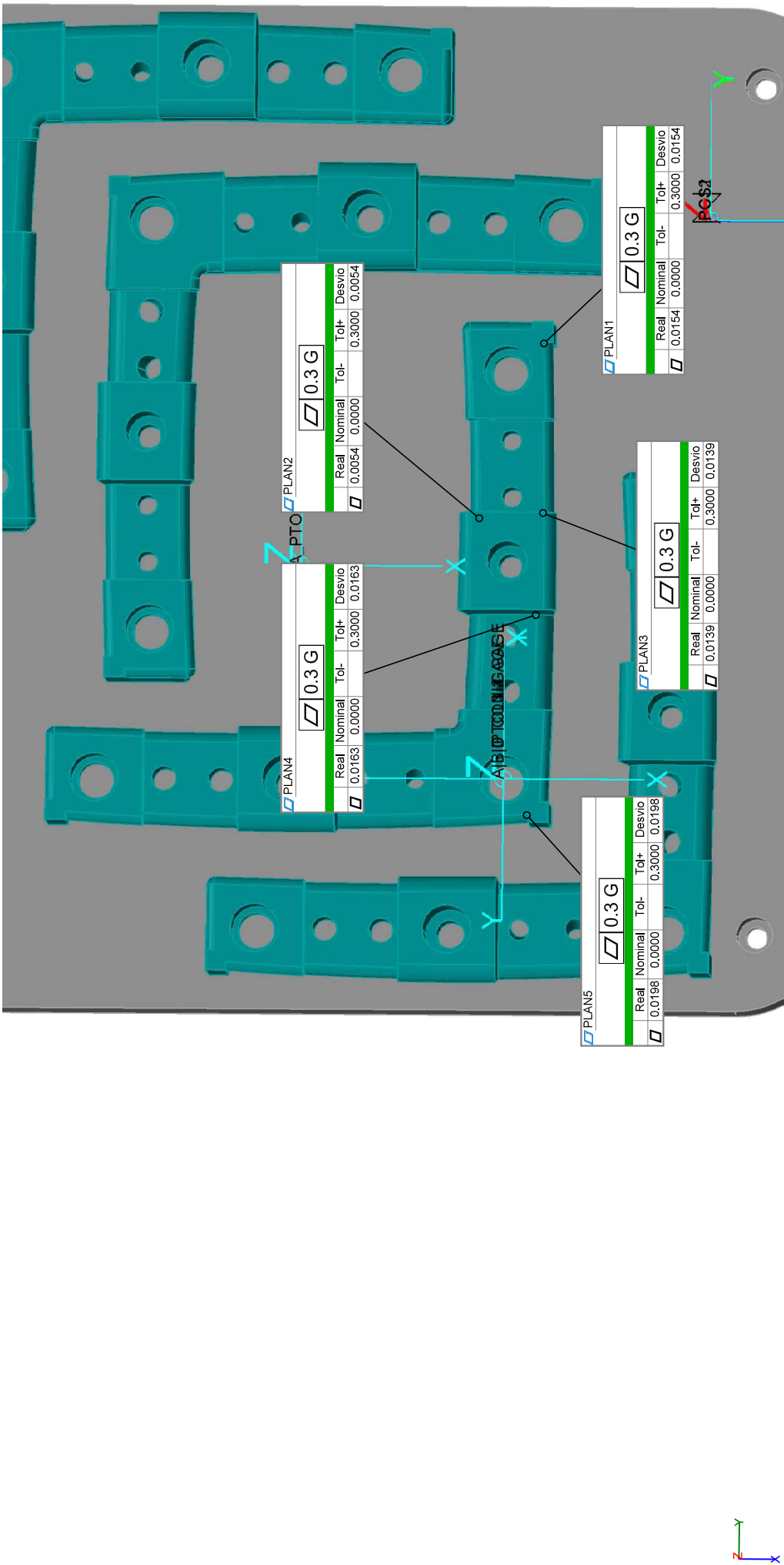
RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

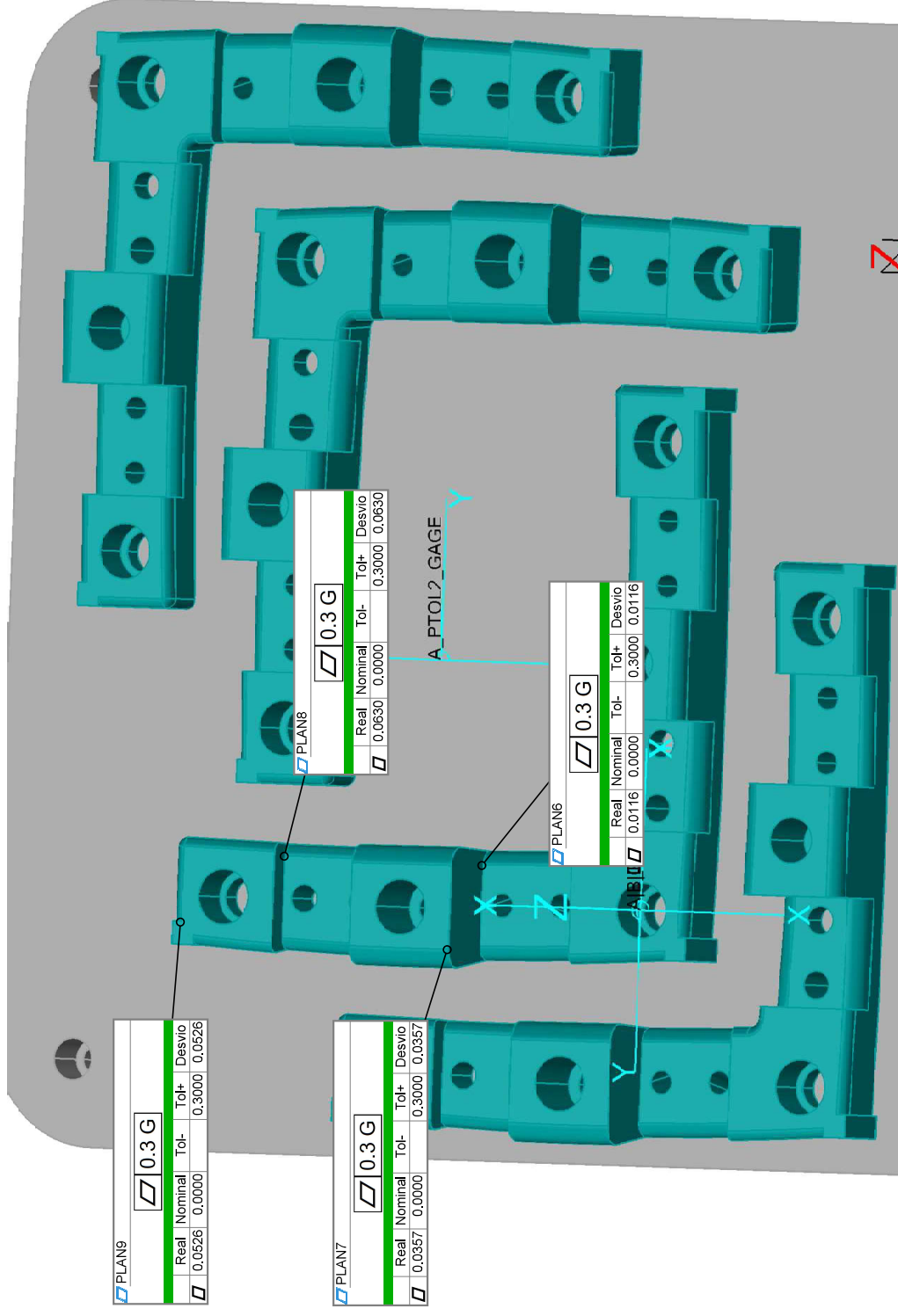
Nº

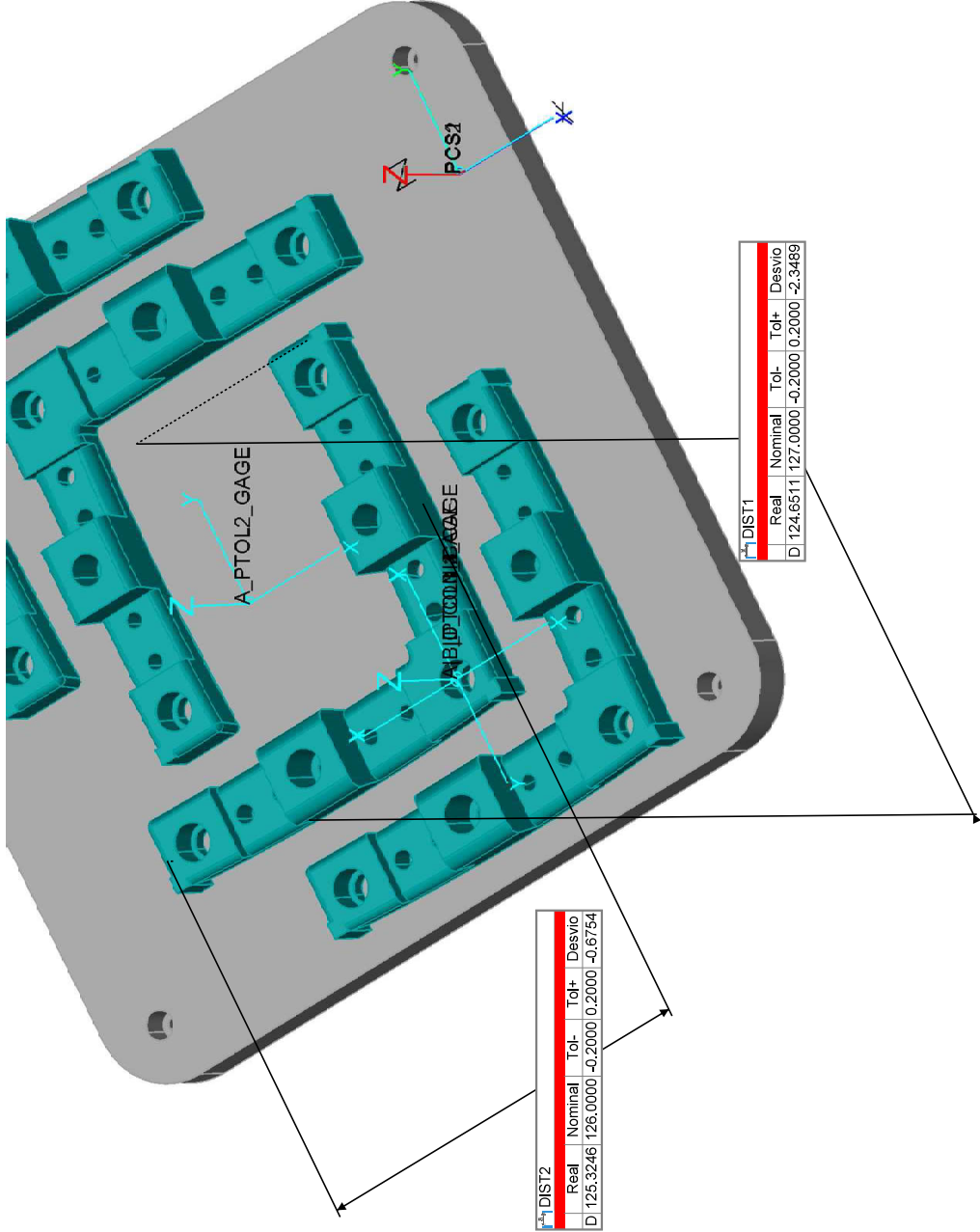
3950_25-LAG

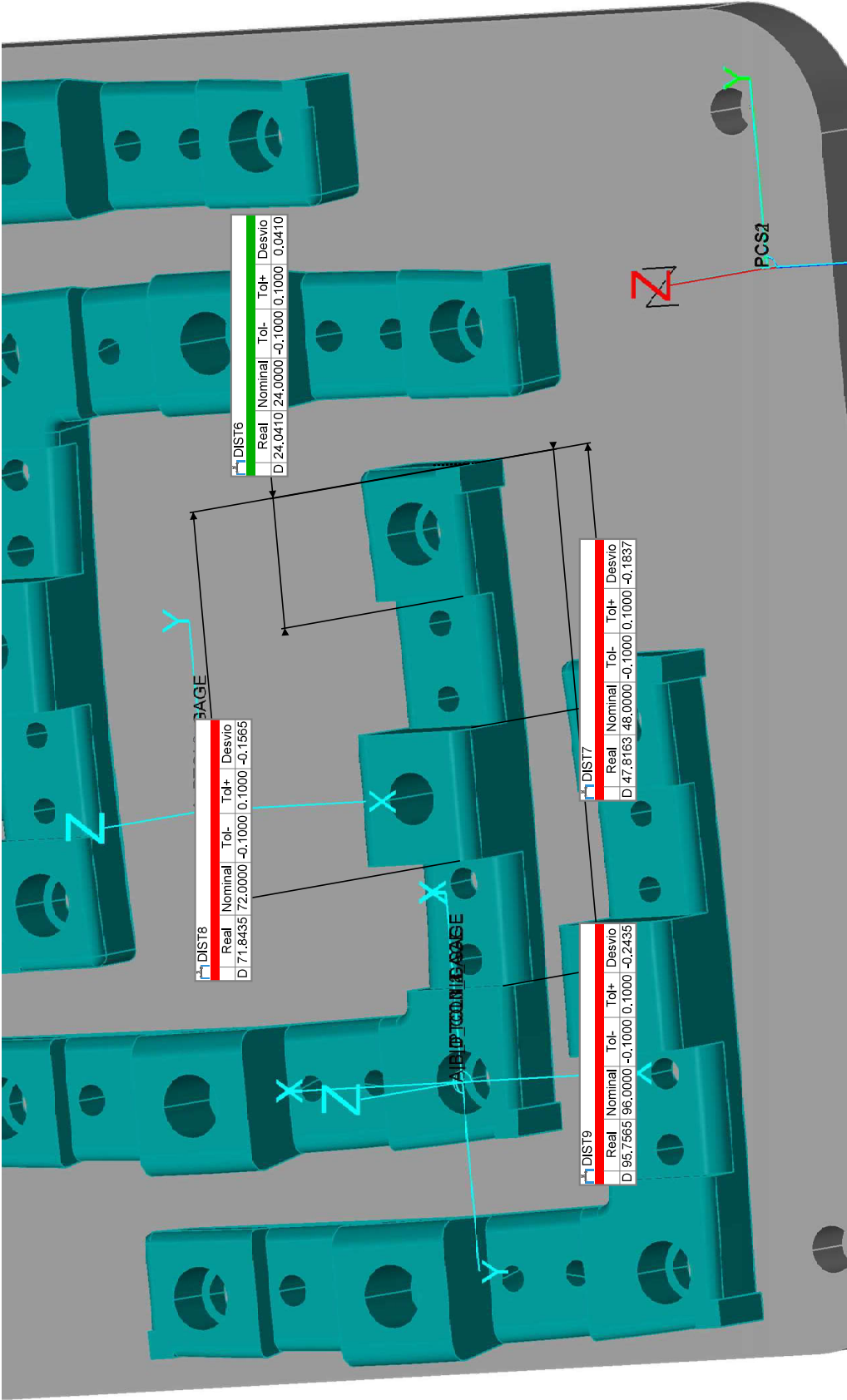
Pág.
Page
3 / 11

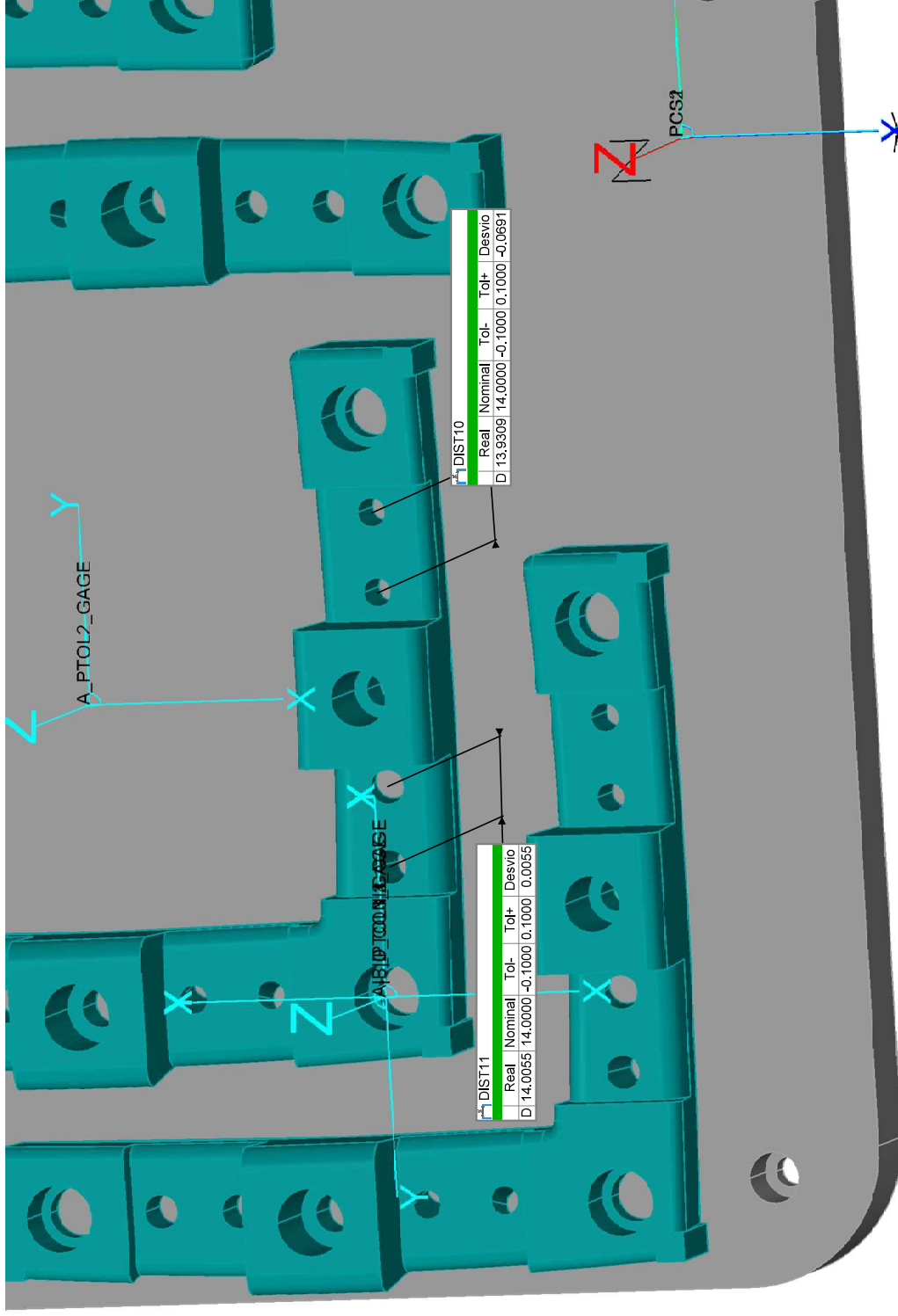


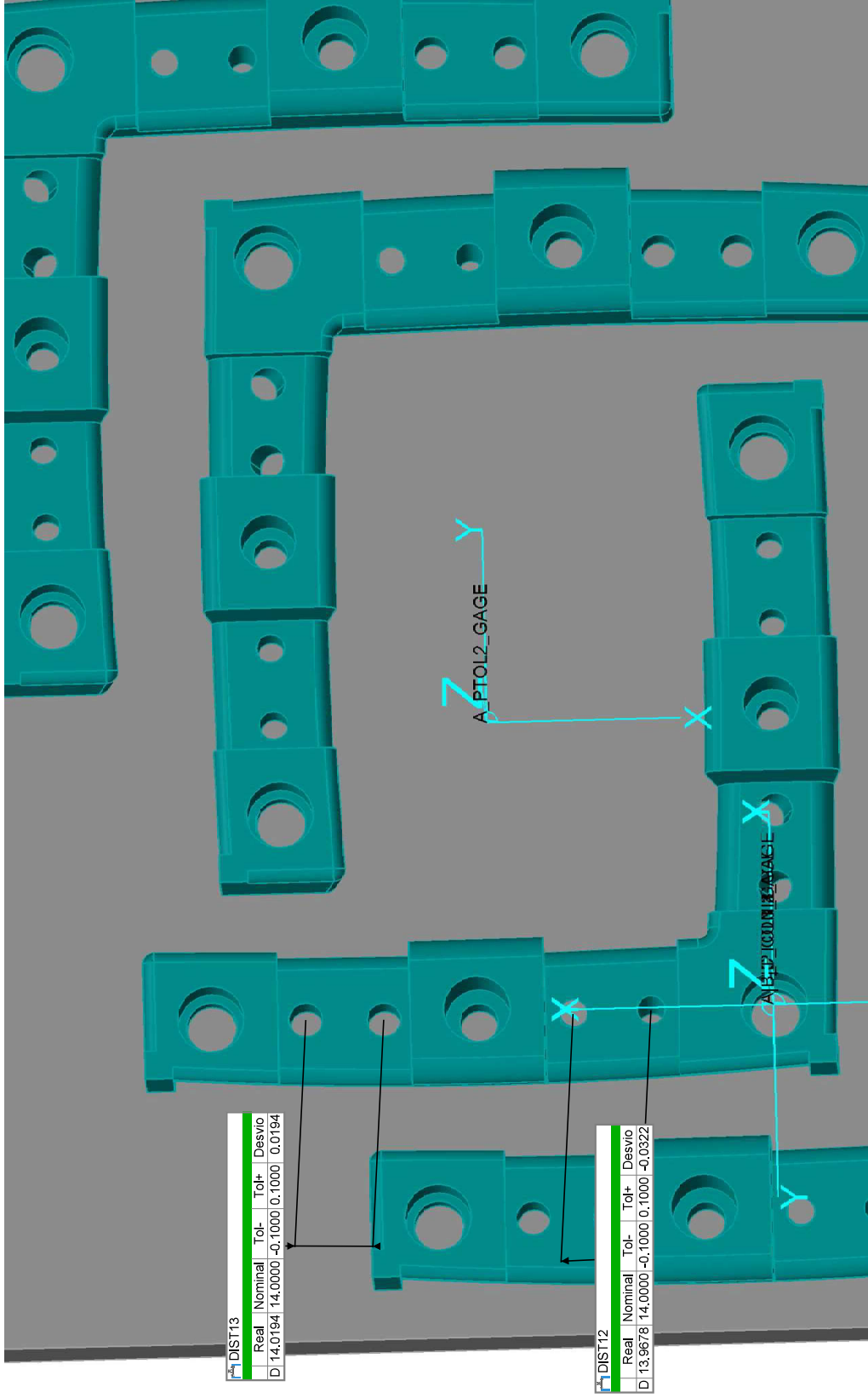


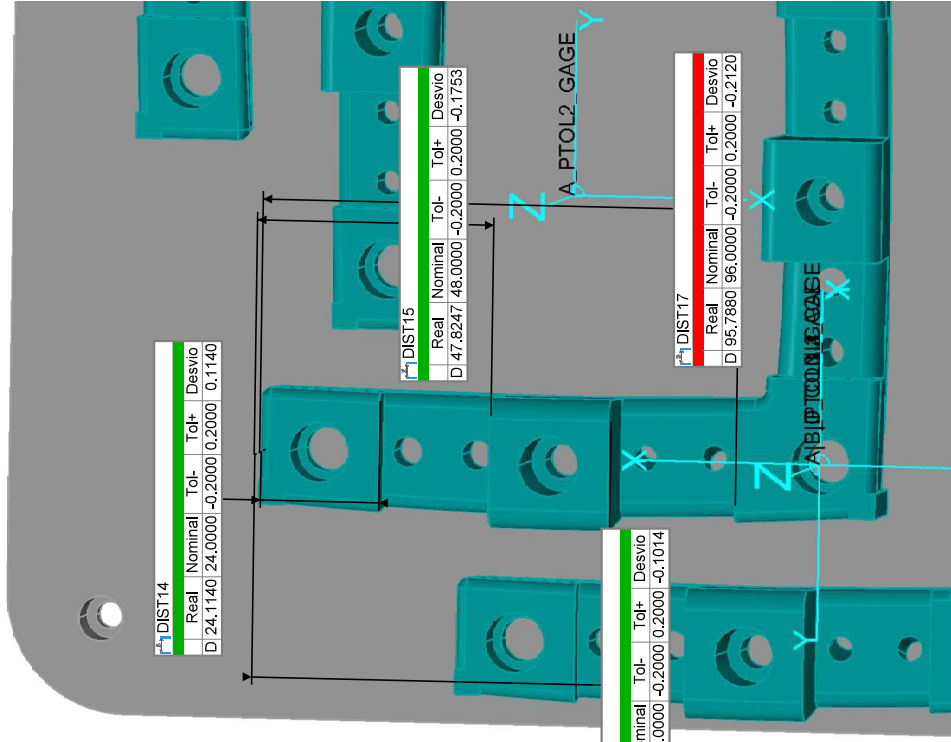


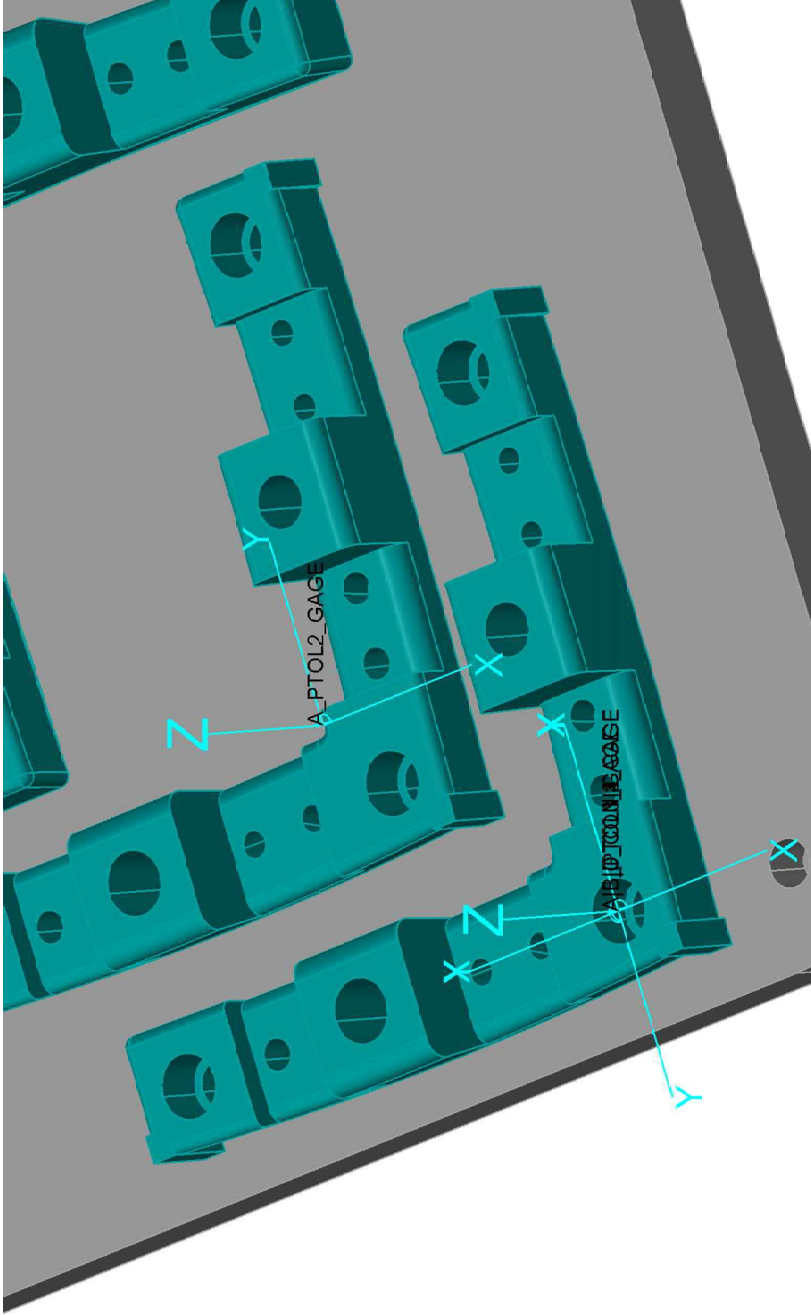


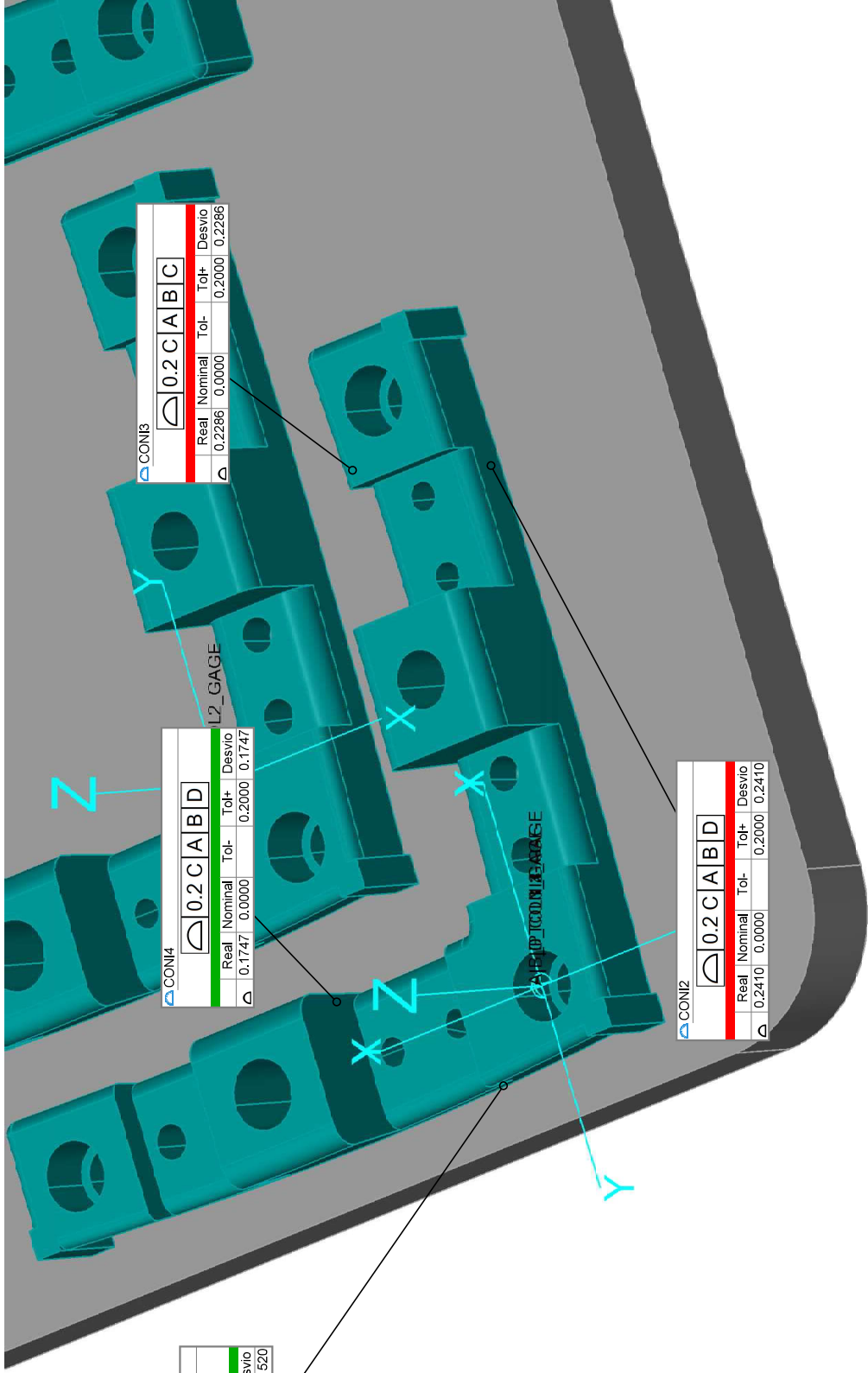


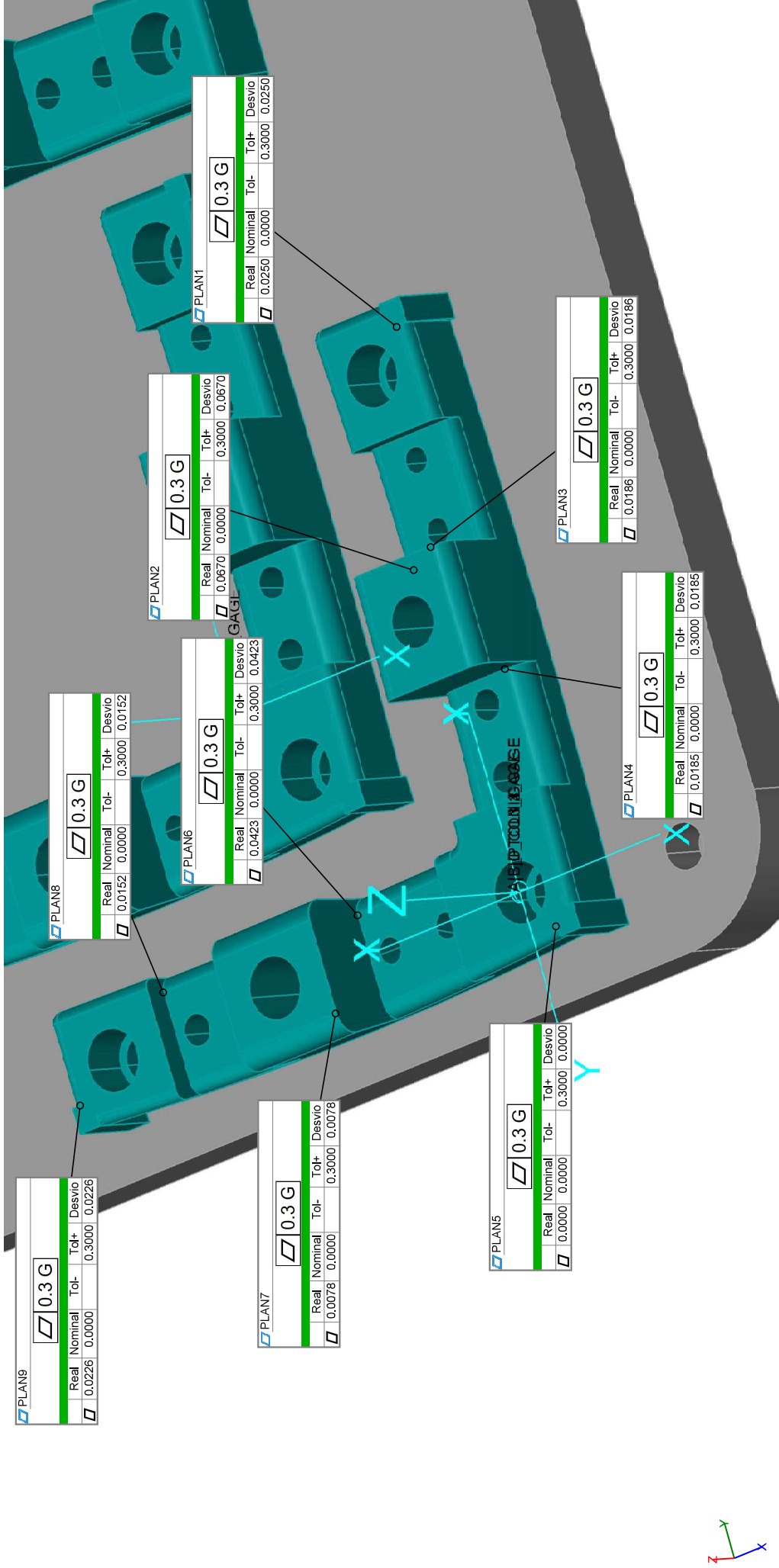


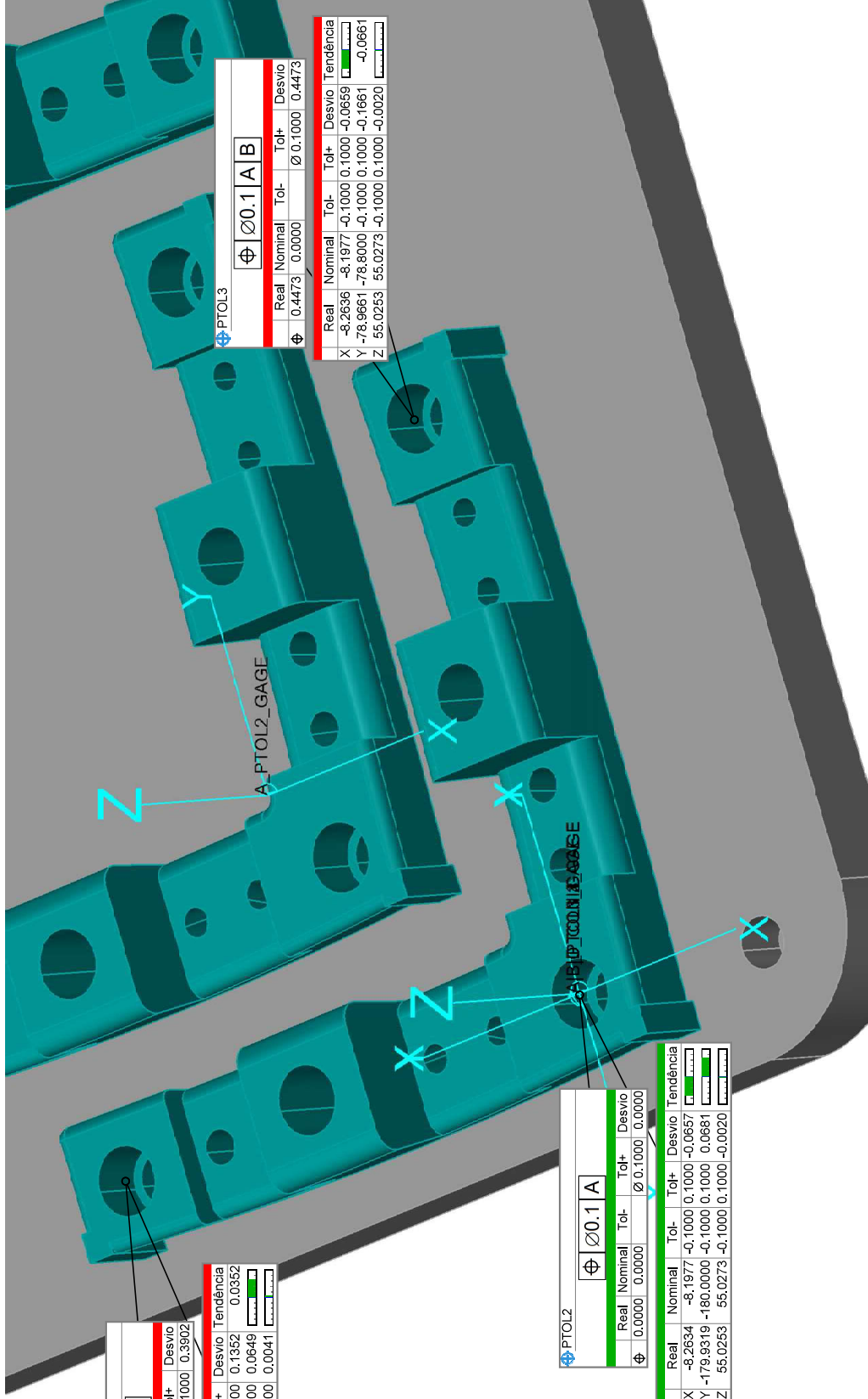


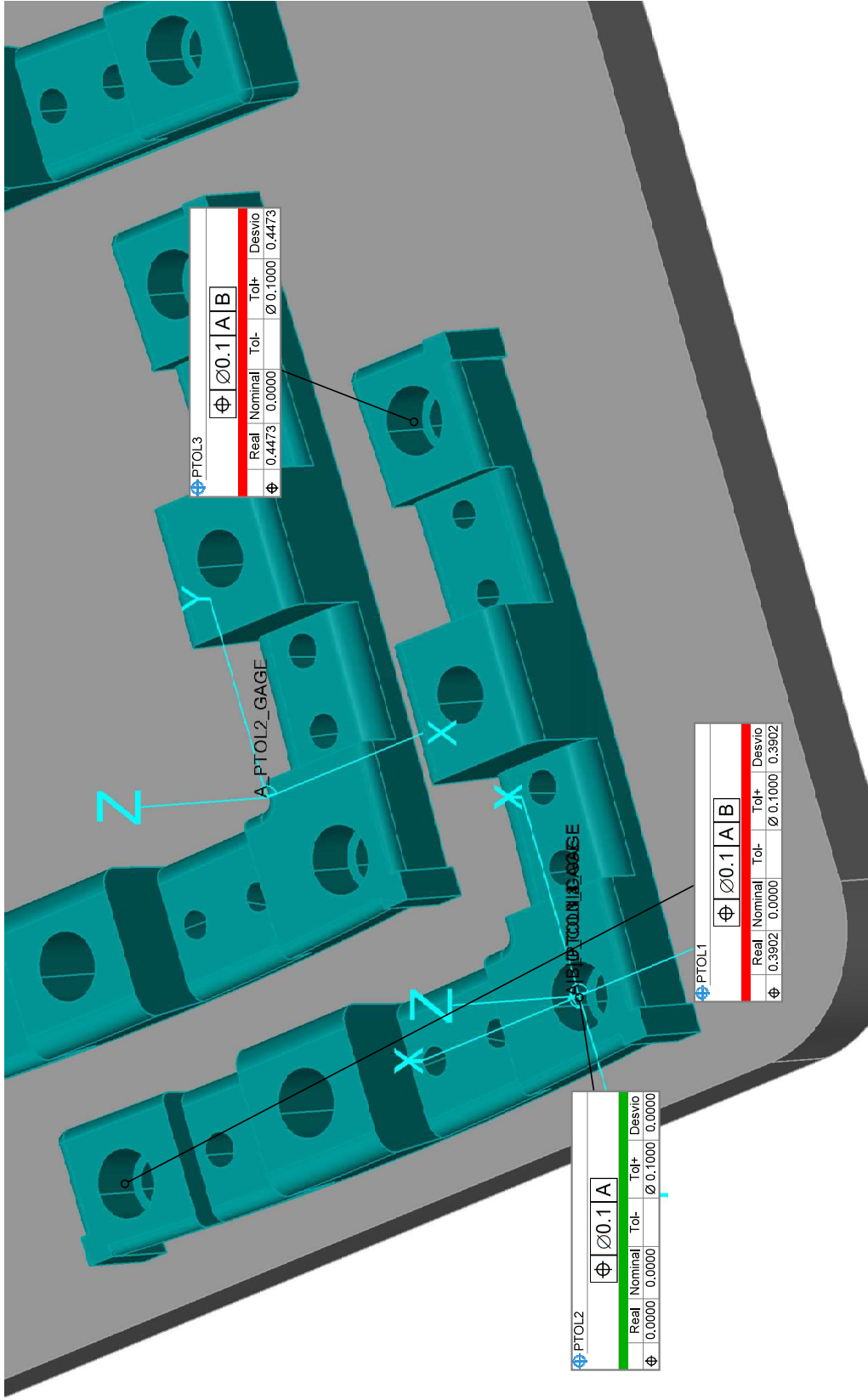


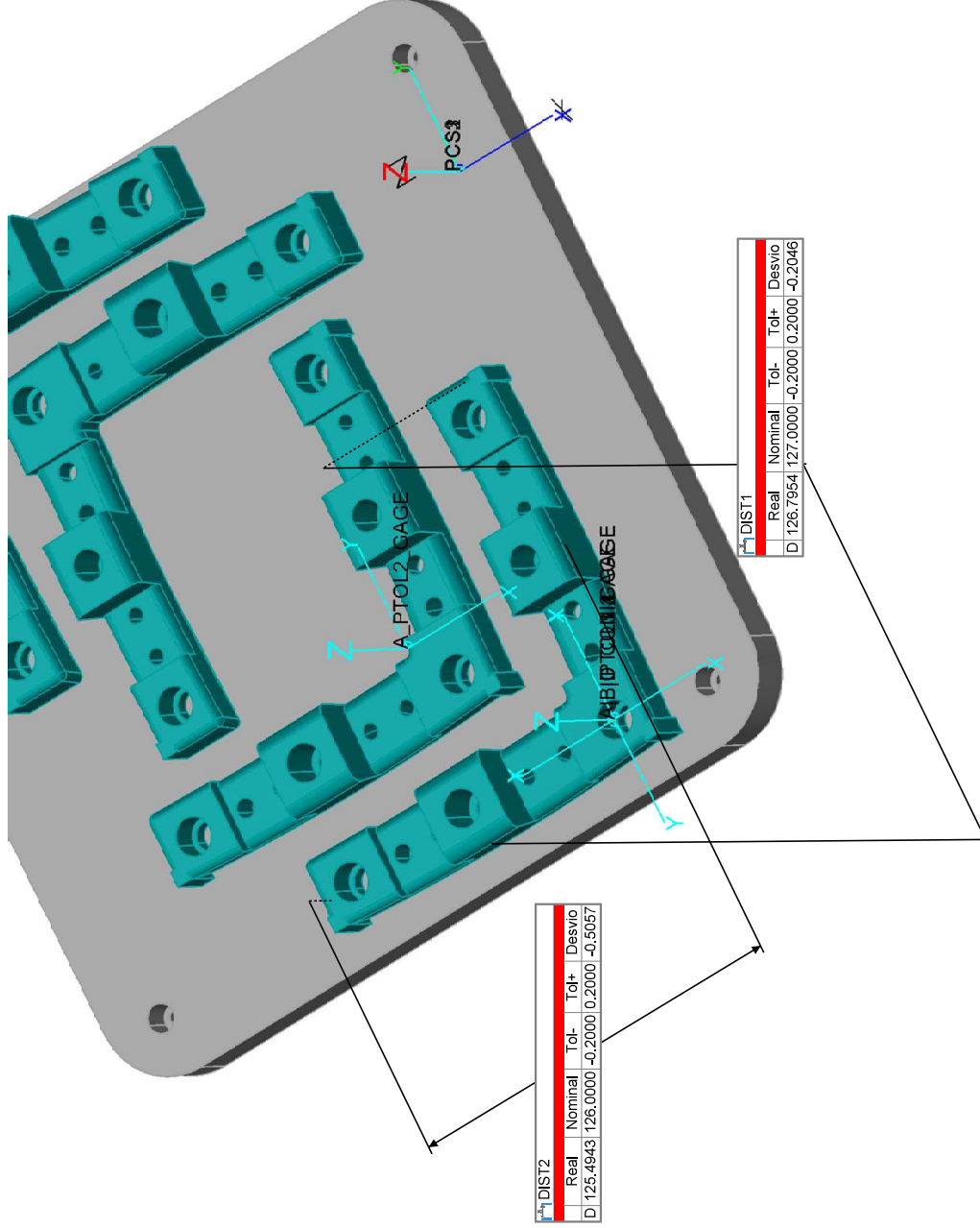
 PORTUGUESA LDA LAUAK INDÚSTRIA-AERONÁUTICA RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL Comentário: Vari...		Nº 3952_25-LAG	
Pág. Page 1 / 11			
IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT			
Equipamento / Equipment CMM	Marca / Marking COORD3METRO...	Nº de Série/ Serial nr. 04686	Nº EMM / MME nr. LAG 270 Operator / Operator Bruno Jorge
IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION			
Nº Peça / Part Nr. ADAPTED ARTIFACT	Designação / Designation ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (L4)		Nº de OF / Work Order Nr. 2 022 479 Data / Date 26/09/25 15:41:33
			

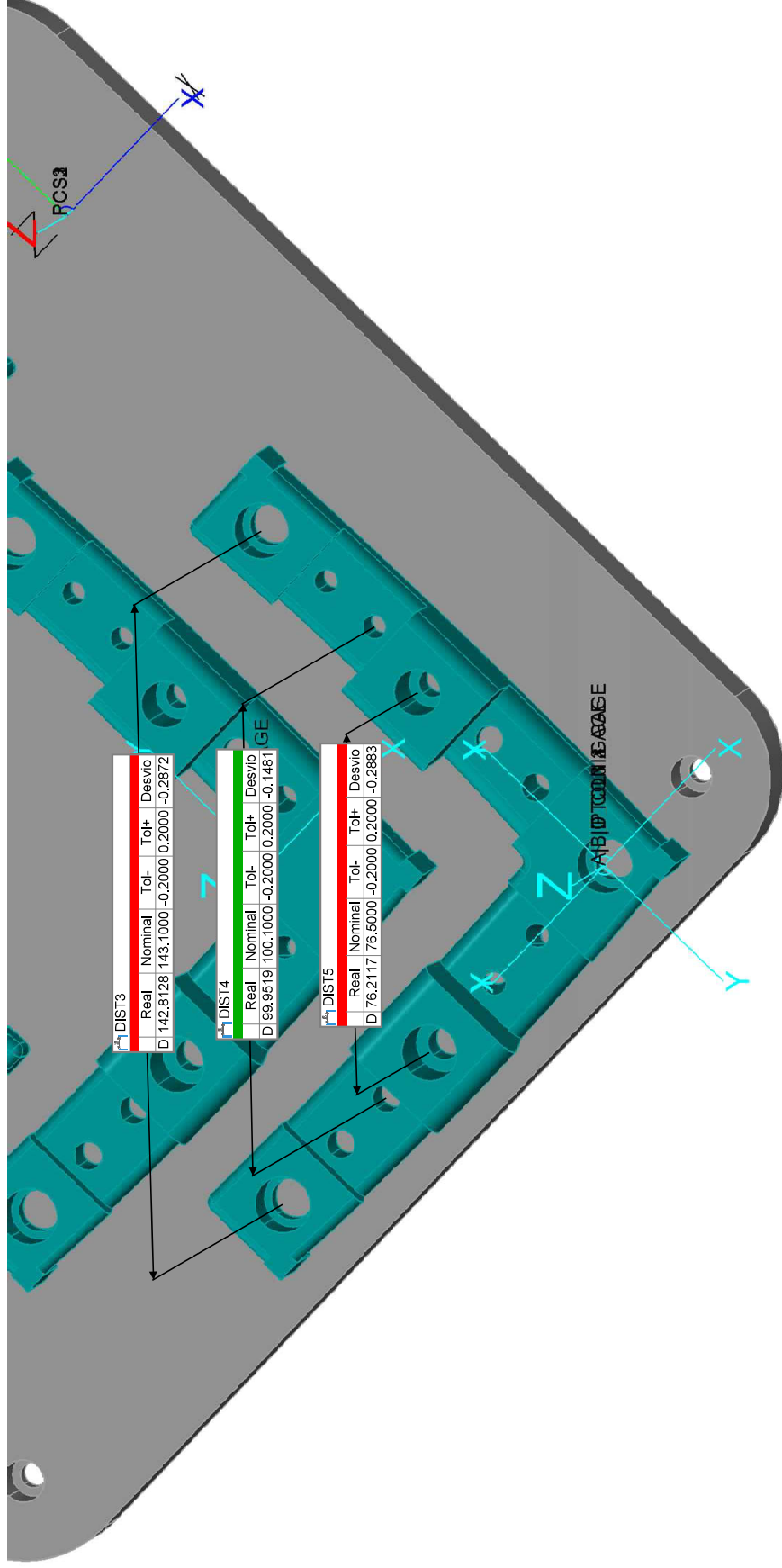


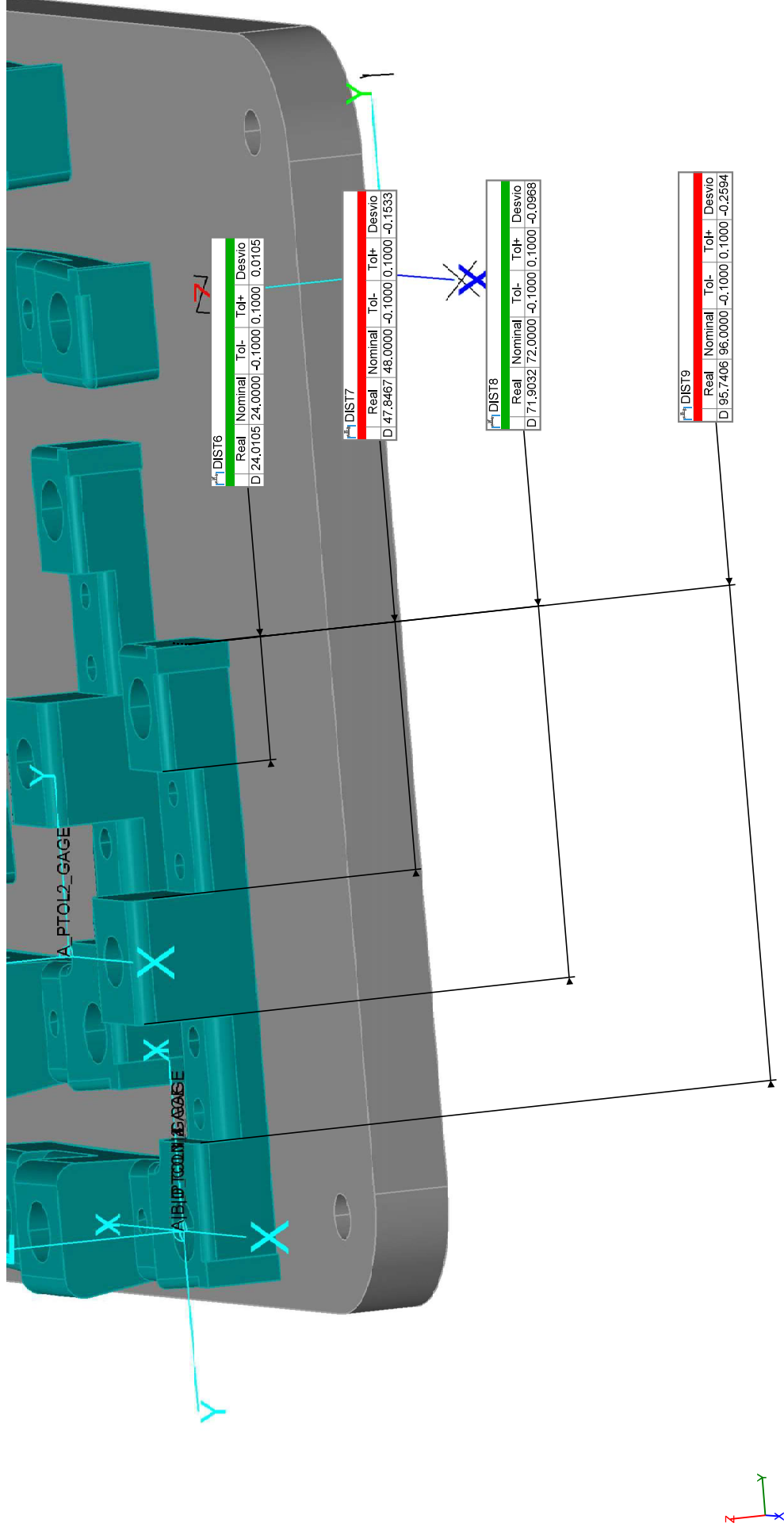




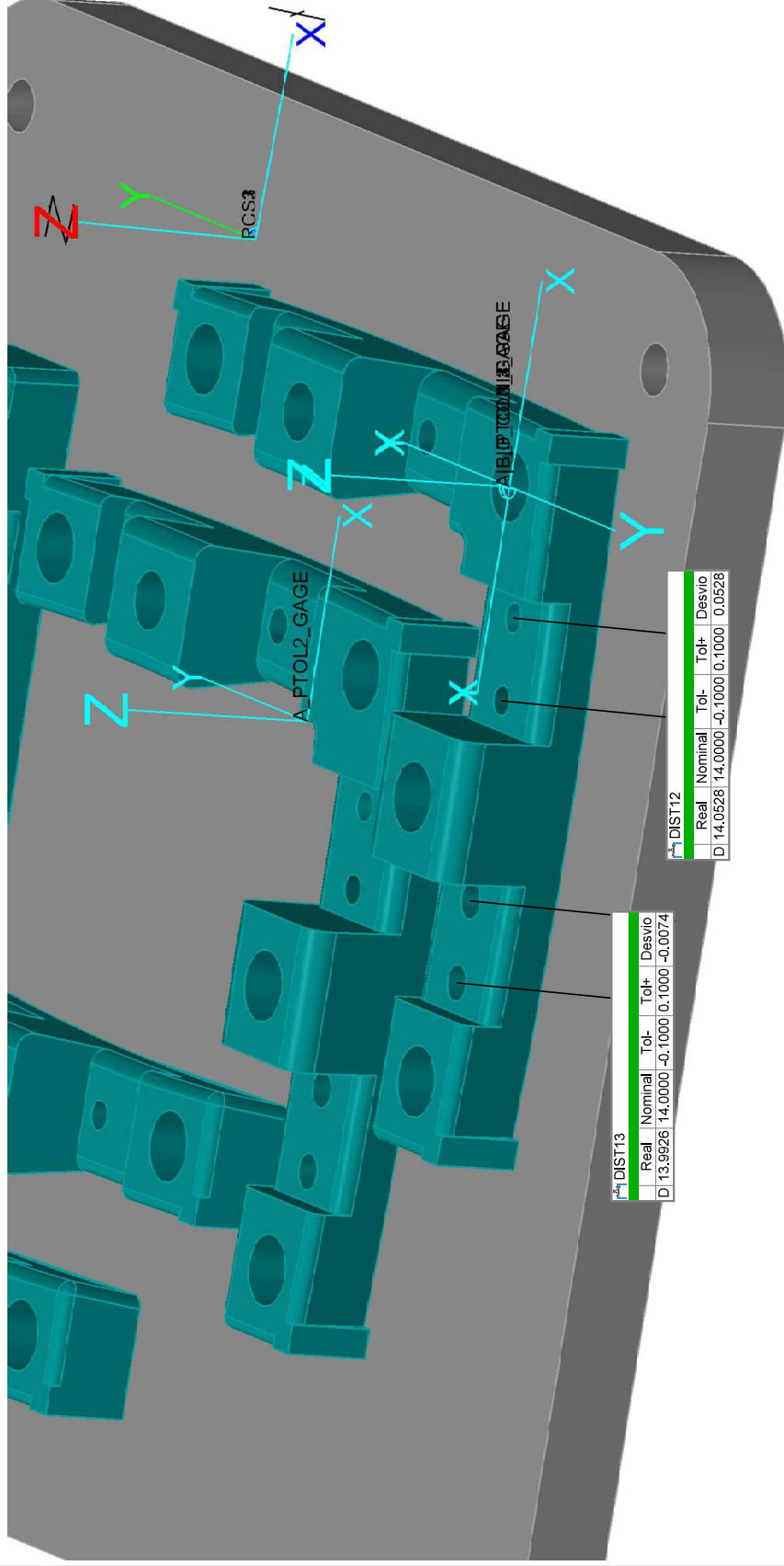












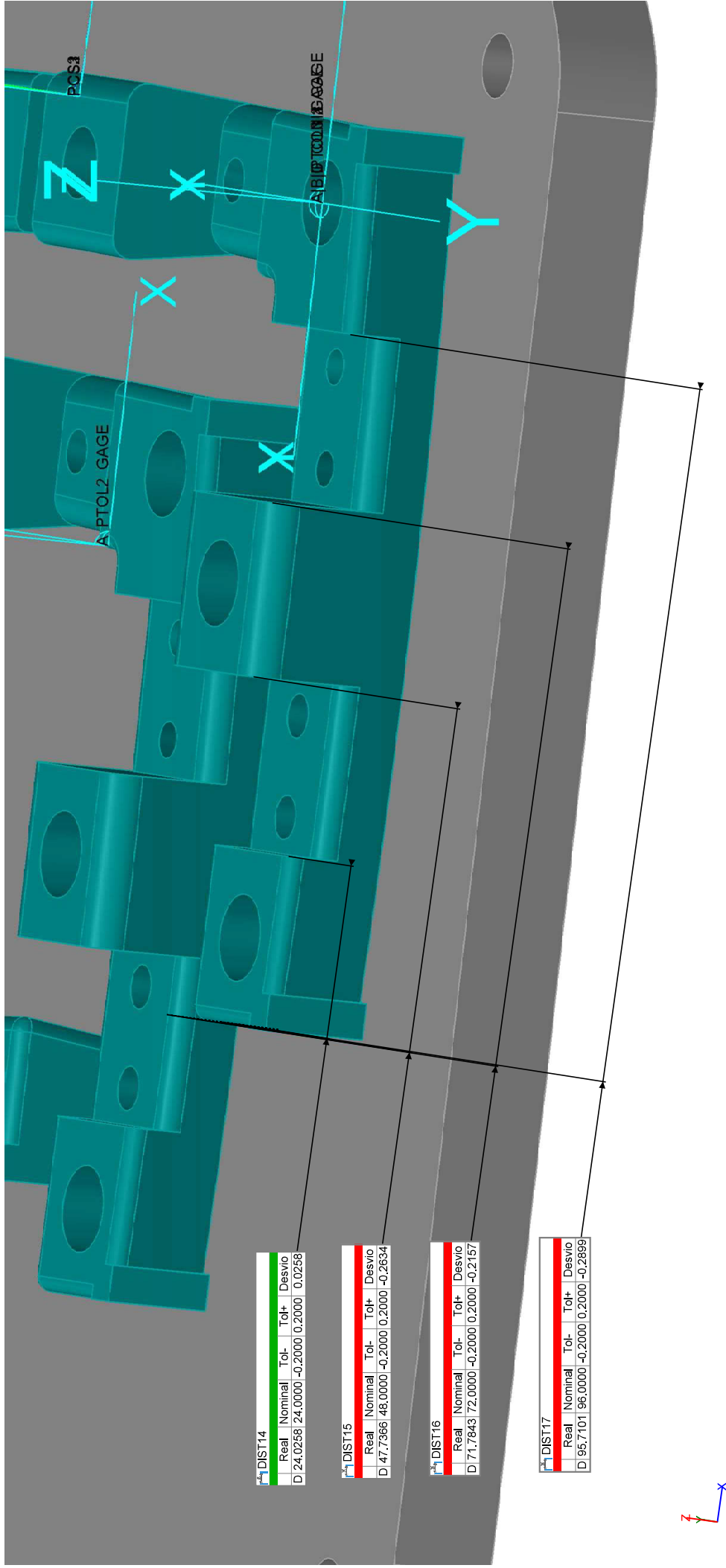
RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

Nº

3952_25-LAG

Pág.

Page
11 / 11



 LAUAK AEROSTRUCTURES SETÚBAL		FICHA DE CONTROLO DIMENSIONAL (FCD) DIMENSIONAL CONTROL SHEET (FCD)				 LAUAK AEROSTRUCTURES GRÂNDOLA		
Aplicável a: / Applicable to:						Página 1 de 4 Page of		
SETÚBAL x		N.º						
GRÂNDOLA x								
IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION								
N.º de peça Part Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Quantidade Quantity		
Designação Nomenclature		ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM				Nº Ordem Fabrico Work Order Nr. 2022479		
N.º de desenho Drawing Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Ref.º. Cliente Customer Refº		
CONTROLO DIMENSIONAL / DIMENSIONAL CONTROL								
Item	Dimensões / Dimensions					Instrumento utilizado / Device		Observações / Remarks
	Natureza / Kind	Valor nominal / Nominal value	Tolerância / Tolerance	Valor medido / Measured value		Tipo / Type	N.º LAS / LAG / LAS / LAG Nr.	
				Min	Max			
19	Linear	124,2 mm	± 0,2	124,72	N/A	Paquímetro	1553	L1
19	Linear	124,2 mm	± 0,2	124,74	N/A	Paquímetro		L2
19	Linear	124,2 mm	± 0,2	124,24	N/A	Paquímetro		L3
19	Linear	124,2 mm	± 0,2	124,76	N/A	Paquímetro		L4
20	Linear	123,8 mm	± 0,2	123,77	N/A	Paquímetro		L1
20	Linear	123,8 mm	± 0,2	123,74	N/A	Paquímetro		L2
20	Linear	123,8 mm	± 0,2	123,75	N/A	Paquímetro		L3
20	Linear	123,8 mm	± 0,2	123,80	N/A	Paquímetro	1553	L4
21	Ø	12 H7	+0,018 0	11,933	N/A	Micrómetro	3767	L1
21	Ø	12 H7	+0,018 0	11,419	N/A	Micrómetro		L2
21	Ø	12 H7	+0,018 0	11,430	N/A	Micrómetro		L3
21	Ø	12 H7	+0,018 0	11,967	N/A	Micrómetro		L4
22	Ø	12 H7	+0,018 0	11,956	N/A	Micrómetro		L1
22	Ø	12 H7	+0,018 0	11,454	N/A	Micrómetro		L2
22	Ø	12 H7	+0,018 0	11,416	N/A	Micrómetro		L3
22	Ø	12 H7	+0,018 0	11,978	N/A	Micrómetro		L4
23	Ø	12 H7	+0,018 0	11,976	N/A	Micrómetro		L1
23	Ø	12 H7	+0,018 0	11,934	N/A	Micrómetro		L2
23	Ø	12 H7	+0,018 0	11,937	N/A	Micrómetro		L3
23	Ø	12 H7	+0,018 0	11,461	N/A	Micrómetro	3767	L4
Tolerâncias gerais General tolerances						N/A		
Observações / Remarks Control com placa								
Data da inspeção Inspection date					O inspetor (rubrica e carimbo) The inspector (signature and stamp)			

 LAUAK AEROSTRUCTURES SETÚBAL		FICHA DE CONTROLO DIMENSIONAL (FCD) DIMENSIONAL CONTROL SHEET (FCD)				 LAUAK AEROSTRUCTURES GRÂNDOLA		
Aplicável a: / Applicable to: SETÚBAL × GRÂNDOLA ×		N.º				Página 2 de 4 Page of		
IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION								
N.º de peça Part Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Quantidade Quantity —		
Designação Nomenclature		ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM				Nº Ordem Fabrico Work Order Nr. — 2022479		
N.º de desenho Drawing Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Ref.º. Cliente Customer Refº —		
CONTROLO DIMENSIONAL / DIMENSIONAL CONTROL								
Item	Dimensões / Dimensions					Instrumento utilizado / Device		Observações / Remarks
	Natureza / Kind	Valor nominal / Nominal value	Tolerância / Tolerance	Valor medido / Measured value		Tipo / Type	N.º LAS / LAG / LAS / LAG Nr.	
				Min	Max			
24	Ø	12 H7	+0,018 0	11,405	N/A	Micrómetro	3767	L1
24	Ø	12 H7	+0,018 0	11,444	N/A	Micrómetro		L2
24	Ø	12 H7	+0,018 0	11,433	N/A	Micrómetro		L3
24	Ø	12 H7	+0,018 0	11,448	N/A	Micrómetro		L4
25	Ø	10 H7	+0,015 0	9,963	N/A	Micrómetro		L1
25	Ø	10 H7	+0,015 0	10,010	N/A	Micrómetro		L2
25	Ø	10 H7	+0,015 0	9,937	N/A	Micrómetro		L3
25	Ø	10 H7	+0,015 0	9,945	N/A	Micrómetro		L4
26	Ø	4x5,1mm	+0,05 0	4,99	N/A	Paquímetro		7553
26	Ø	4x5,1mm	+0,05 0	4,99	N/A	Paquímetro		L2
26	Ø	4x5,1mm	+0,05 0	5,01	N/A	Paquímetro		L3
26	Ø	4x5,1mm	+0,05 0	5,01	N/A	Paquímetro		L4
27	Ø	4x6,1mm	+0,05 0	5,97	N/A	Paquímetro		L1
27	Ø	4x6,1mm	+0,05 0	5,96	N/A	Paquímetro		L2
27	Ø	4x6,1mm	+0,05 0	5,95	N/A	Paquímetro		L3
27	Ø	4x6,1mm	+0,05 0	5,95	N/A	Paquímetro	7553	L4
28	Raio	4 mm	+1 0	4	4	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
29	Raio	4 mm	+1 0	4	4	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
30	Raio	2,5 mm	+1 0	2,5	2,5	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
31	Raio	2,5 mm	+1 0	2,5	2,5	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
Tolerâncias gerais General tolerances N/A								
Observações / Remarks Control cum spec								
Data da inspeção Inspection date					O inspetor (rubrica e carimbo) The inspector (signature and stamp)			
								

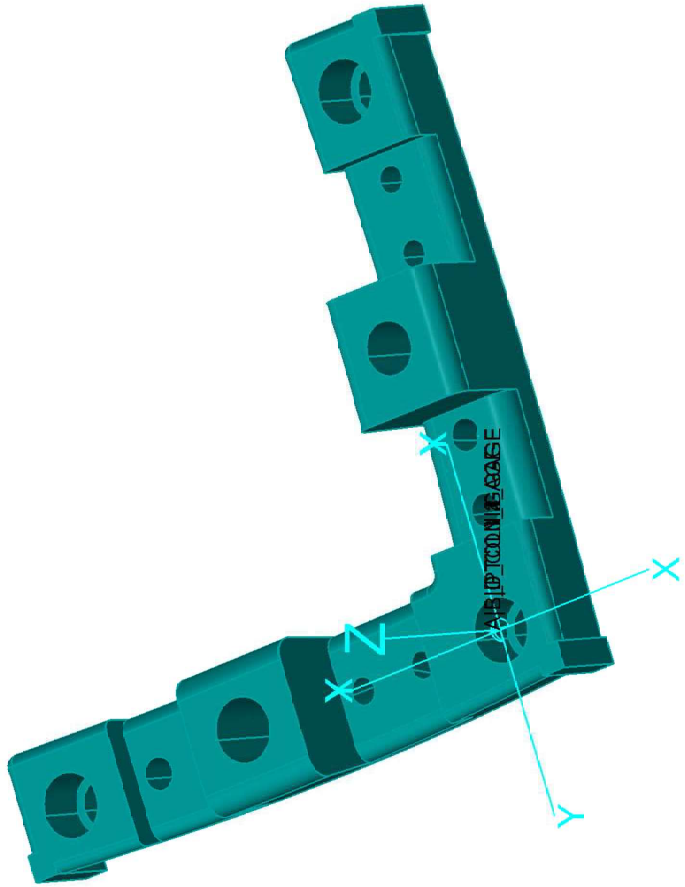
 LAUAK AEROSTRUCTURES SETÚBAL		FICHA DE CONTROLO DIMENSIONAL (FCD) DIMENSIONAL CONTROL SHEET (FCD)				 LAUAK AEROSTRUCTURES GRÂNDOLA		
Aplicável a: / Applicable to: SETÚBAL × GRÂNDOLA ×		N.º				Página 3 de 4 Page of		
IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION								
N.º de peça Part Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Quantidade Quantity		
Designação Nomenclature		ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM				Nº Ordem Fabrico Work Order Nr.		
N.º de desenho Drawing Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Ref.º. Cliente Customer Refº		
CONTROLO DIMENSIONAL / DIMENSIONAL CONTROL								
Item	Dimensões / Dimensions					Instrumento utilizado / Device		Observações / Remarks
	Natureza / Kind	Valor nominal / Nominal value	Tolerância / Tolerance	Valor medido / Measured value		Tipo / Type	N.º LAS / LAG / LAS / LAG Nr.	
				Min	Max			
32	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
33	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
34	Raio	3 mm	+1 0	3	3	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
35	Raio	3 mm	+1 0	3	3	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
36	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
37	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
38	Raio	3 mm	+1 0	3	3	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
39	Raio	3 mm	+1 0	3	3	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
40	Raio	2,5 mm	+1 0	2,5	2,5	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
41	Raio	2,5 mm	+1 0	2,5	2,5	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
42	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
43	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
44	Raio	4 mm	+1 0	4	4	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
45	Raio	4 mm	+1 0	4	4	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
46	∠	8°	± 1°	7,5°	N/A	Suta	3692	L1
46	∠	8°	± 1°	7,5°	N/A	Suta		L2
46	∠	8°	± 1°	8,0°	N/A	Suta		L3
46	∠	8°	± 1°	8,0°	N/A	Suta		L4
47	∠	2,5°	± 1°	2,5°	N/A	Suta		L1
47	∠	2,5°	± 1°	2,5°	N/A	Suta	3692	L2
Tolerâncias gerais General tolerances		N/A						
Observações / Remarks Control com placa								
Data da inspeção Inspection date					O inspetor (rubrica e carimbo) The inspector (signature and stamp)			

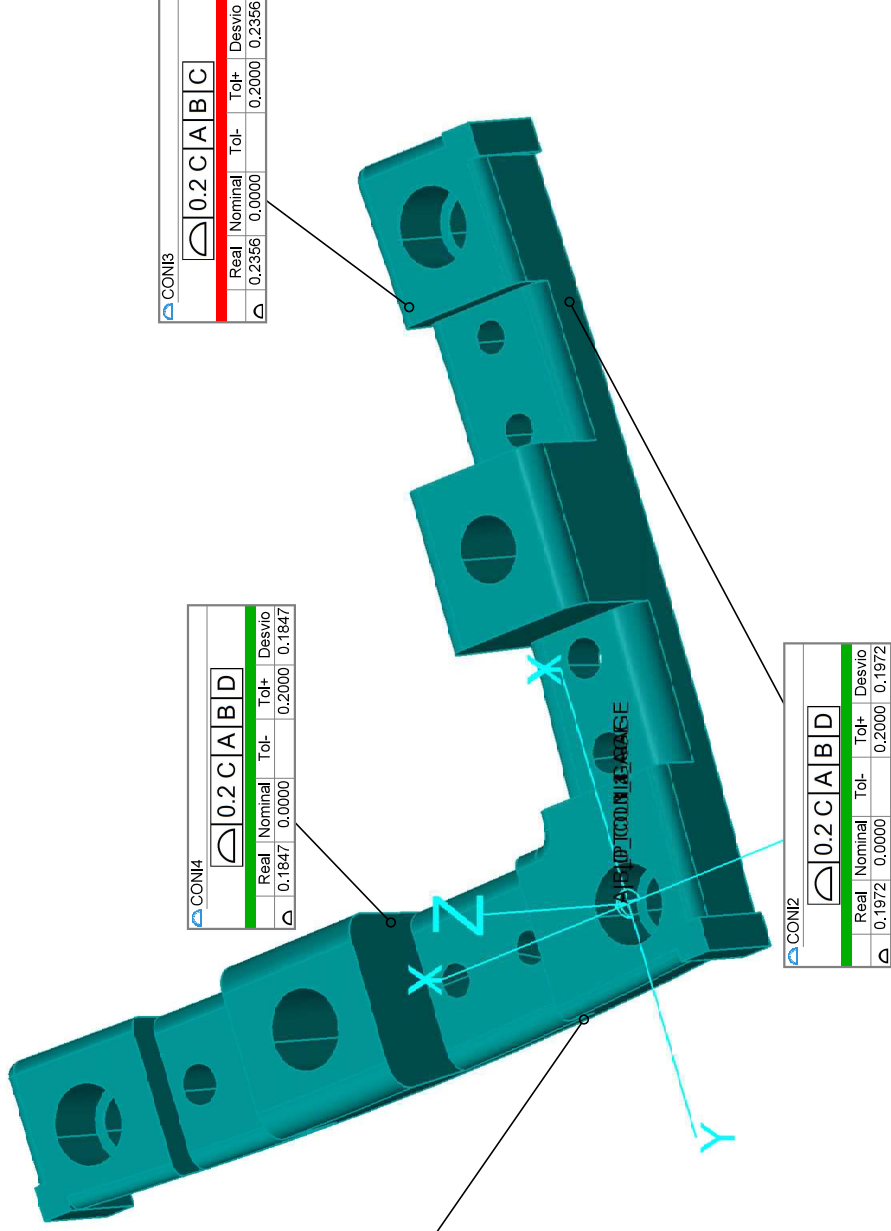
 LAUAK AEROSTRUCTURES SETÚBAL		FICHA DE CONTROLO DIMENSIONAL (FCD) DIMENSIONAL CONTROL SHEET (FCD)				 LAUAK AEROSTRUCTURES GRÂNDOLA		
Aplicável a: / Applicable to: SETÚBAL x GRÂNDOLA x		N.º				Página 4 de 4 <i>Page of</i>		
IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION								
N.º de peça <i>Part Nr.</i>		ADAPTED ARTIFACT				Quantidade <i>Quantity</i>		
Designação <i>Nomenclature</i>		ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM				Nº Ordem Fabrico <i>Work Order Nr.</i>		
N.º de desenho <i>Drawing Nr.</i>		ADAPTED ARTIFACT				Ref.º Cliente <i>Customer Refº</i>		
CONTROLO DIMENSIONAL / DIMENSIONAL CONTROL								
Item	Dimensões / Dimensions					Instrumento utilizado / Device		Observações / Remarks
	Natureza <i>Kind</i>	Valor nominal <i>Nominal value</i>	Tolerância <i>Tolerance</i>	Valor medido <i>Measured value</i>		Tipo <i>Type</i>	N.º LAS / LAG <i>LAS / LAG Nr.</i>	
				Min	Max			
47	∠	2,5°	± 1°	2,6°	N/A	Suta	3692	L3
47	∠	2,5°	± 1°	2,5°	N/A	Suta		L4
48	∠	7,5°	± 1°	7,5°	N/A	Suta		L1
48	∠	7,5°	± 1°	7,5°	N/A	Suta		L2
48	∠	7,5°	± 1°	7,0°	N/A	Suta		L3
48	∠	7,5°	± 1°	7,2°	N/A	Suta		L4
49	∠	5°	± 1°	5,0°	N/A	Suta		L1
49	∠	5°	± 1°	5,0°	N/A	Suta		L2
49	∠	5°	± 1°	5,0°	N/A	Suta		L3
49	∠	5°	± 1°	5,0°	N/A	Suta		L4
50	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L1
50	∠	90°	± 1°	90,1°	N/A	Suta		L2
50	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L3
50	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L4
51	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L1
51	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L2
51	∠	90°	± 1°	90,1°	N/A	Suta		L3
51	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta	3692	L4
Tolerâncias gerais <i>General tolerances</i>								N/A
Observações / Remarks <i>Controlado com placa</i>								
Data da inspeção <i>Inspection date</i>					O inspetor (rubrica e carimbo) <i>The inspector (signature and stamp)</i>			
								

Anexo III

Relatórios de Controlo Dimensional Dos Artefactos Sem Placa de Impressão

No anexo A.3 é apresentado os relatórios de controlo dimensional realizados aos artefactos com a placa de impressão já removida.

 PORTUGUESA LDA LAUAK INDÚSTRIA-AERONÁUTICA RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL Comentário: Vari...		Nº 4119_25-LAG	
		Pág. Page 1 / 13	
IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT			
Equipamento / Equipment CMM	Marca / Marking COORD3METRO...	Modelo / Model KROMOS NT	Nº de Série/ Serial nr. 04686 Nº EMM / MME nr. LAG 270 Operador / Operator Bruno Jorge
IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION			
Nº Peça / Part Nr. ADAPTED ARTIFACT	Designação / Designation ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (L4)		Nº de OF / Work Order Nr. 2 022 479 Data / Date 09/10/25 14:40:57
			



PLAN9	0.3 G			
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0178	0.0000		0.3000	0.0178

PLAN8	0.3 G			
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0140	0.0000		0.3000	0.0140

PLAN2	0.3 G			
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0528	0.0000		0.3000	0.0528

PLAN6	0.3 G			
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0309	0.0000		0.3000	0.0309

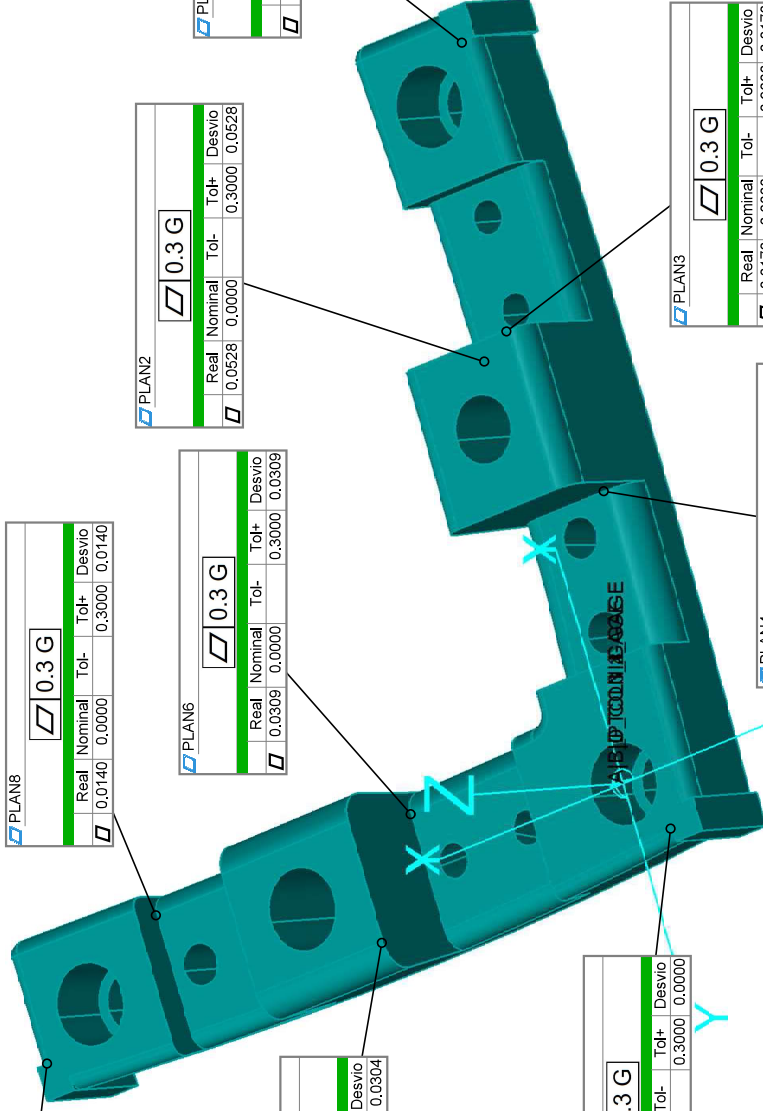
PLAN7	0.3 G			
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0304	0.0000		0.3000	0.0304

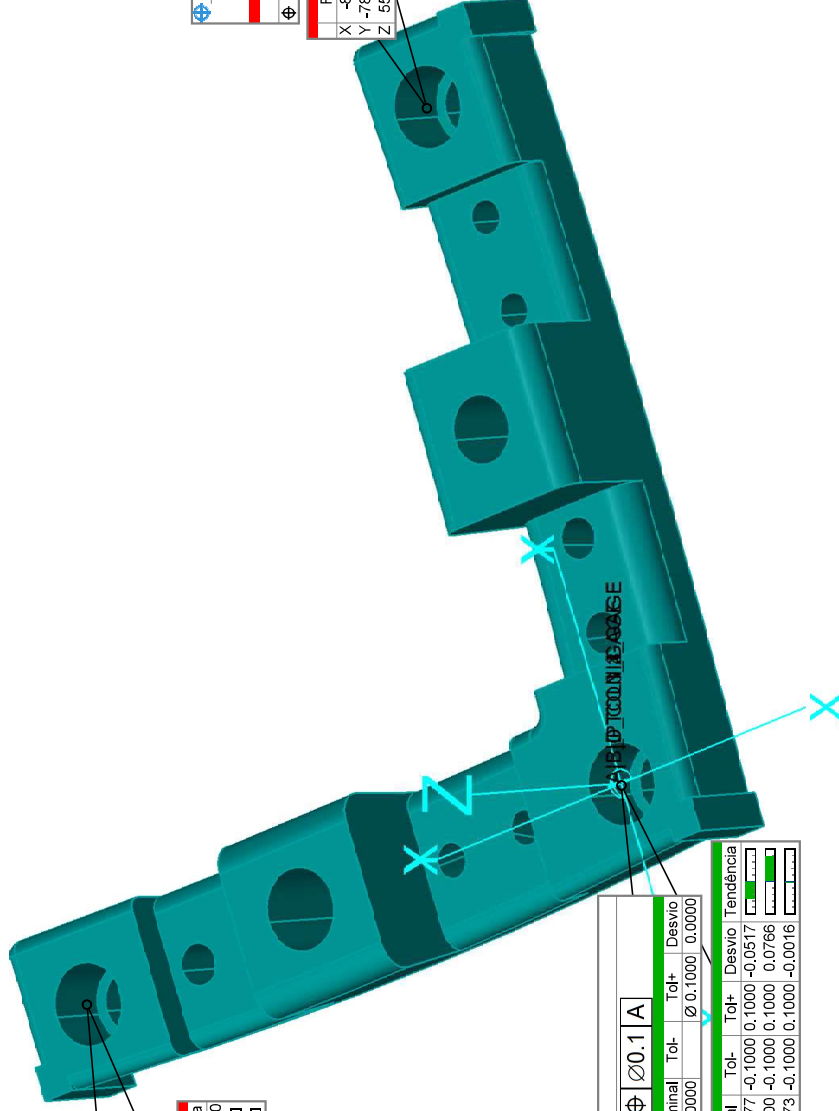
PLAN1	0.3 G			
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0204	0.0000		0.3000	0.0204

PLAN5	0.3 G			
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0000	0.0000		0.3000	0.0000

PLAN4	0.3 G			
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0156	0.0000		0.3000	0.0156

PLAN3	0.3 G			
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0170	0.0000		0.3000	0.0170





PTOL1

	$\varnothing$	0.1	A	B
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
$\varnothing$	0.3887	0.0000	$\varnothing$ 0.1000	0.3887
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
X	-108.1994	-108.3514	-0.1000	0.1000
Y	-179.9385	-180.0000	-0.1000	0.1000
Z	51.9724	51.9678	-0.1000	0.1000

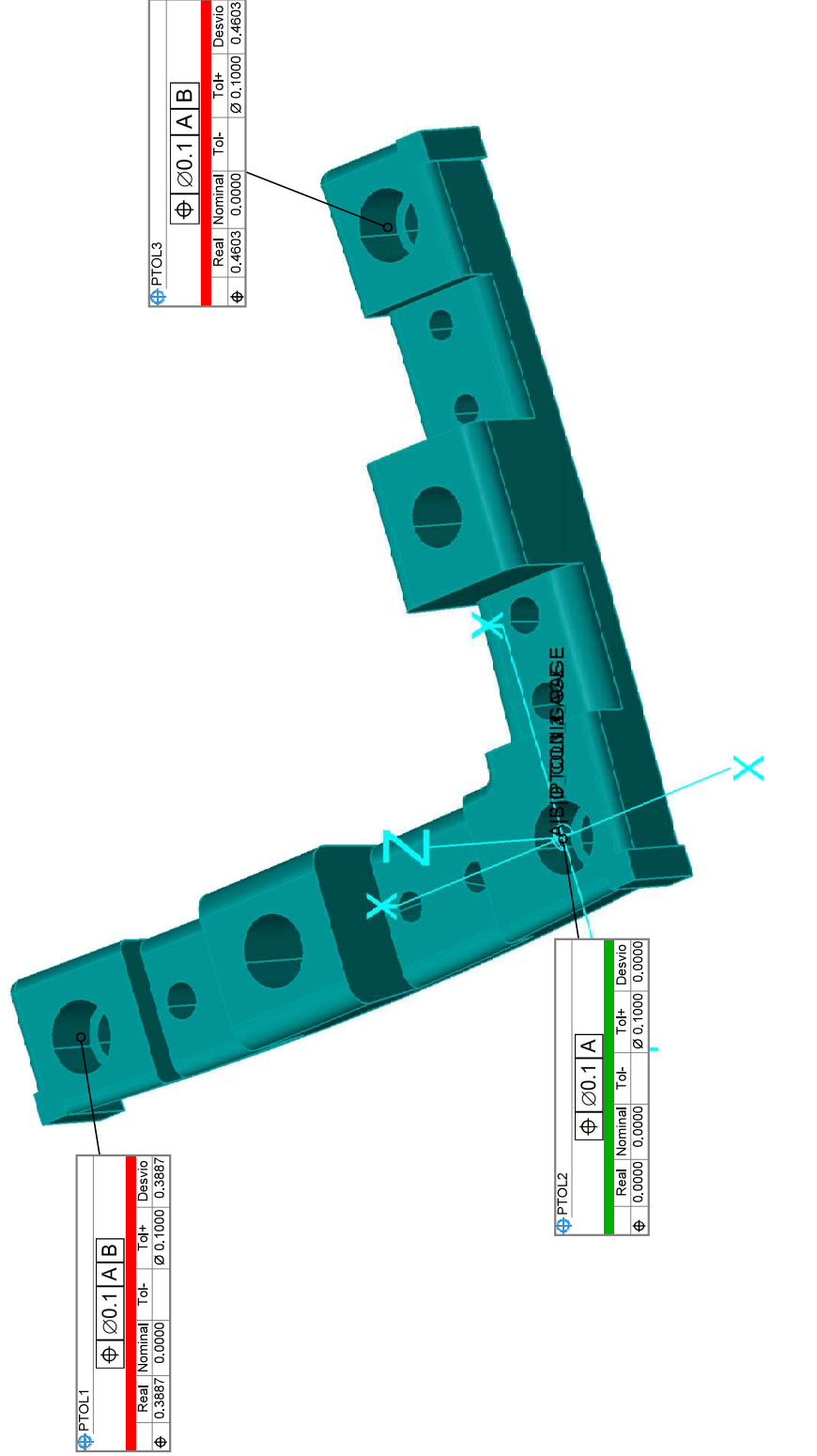
PTOL3

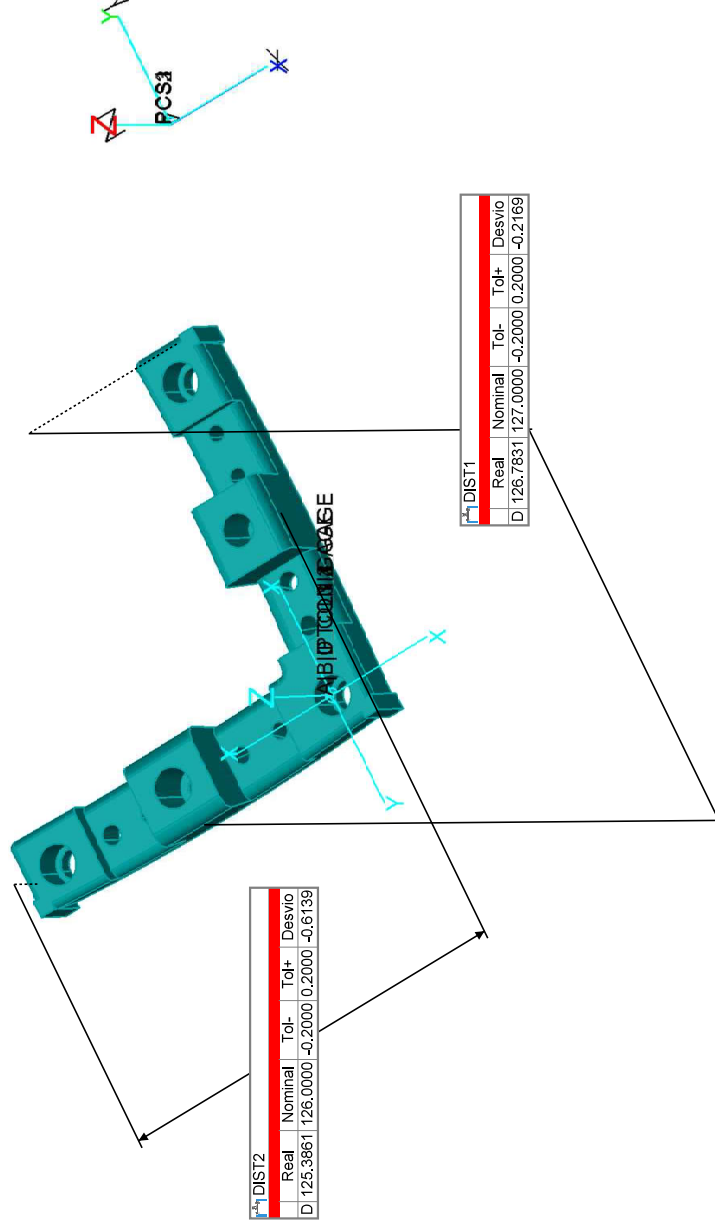
	$\varnothing$	0.1	A	B
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
$\varnothing$	0.4603	0.0000	$\varnothing$ 0.1000	0.4603
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
X	-8.2452	-8.1977	-0.1000	0.1000
Y	-78.9557	-78.8000	-0.1000	0.1000
Z	55.0258	55.0273	-0.1000	0.1000

PTOL2

	$\varnothing$	0.1	A
Real	Nominal	Tol-	Tol+
$\varnothing$	0.0000	0.0000	$\varnothing$ 0.1000
Real	Nominal	Tol-	Tol+
X	-8.2494	-8.1977	-0.1000
Y	-179.9234	-180.0000	-0.1000
Z	55.0257	55.0273	-0.1000







RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

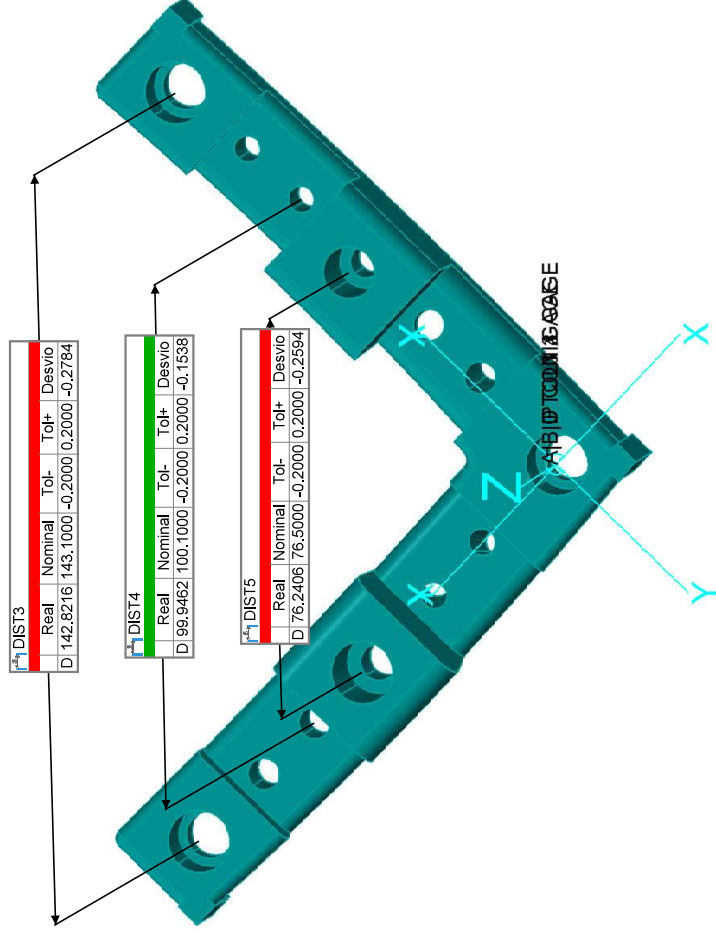
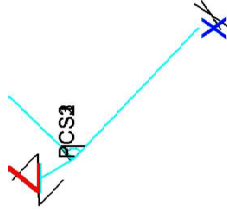
Nº

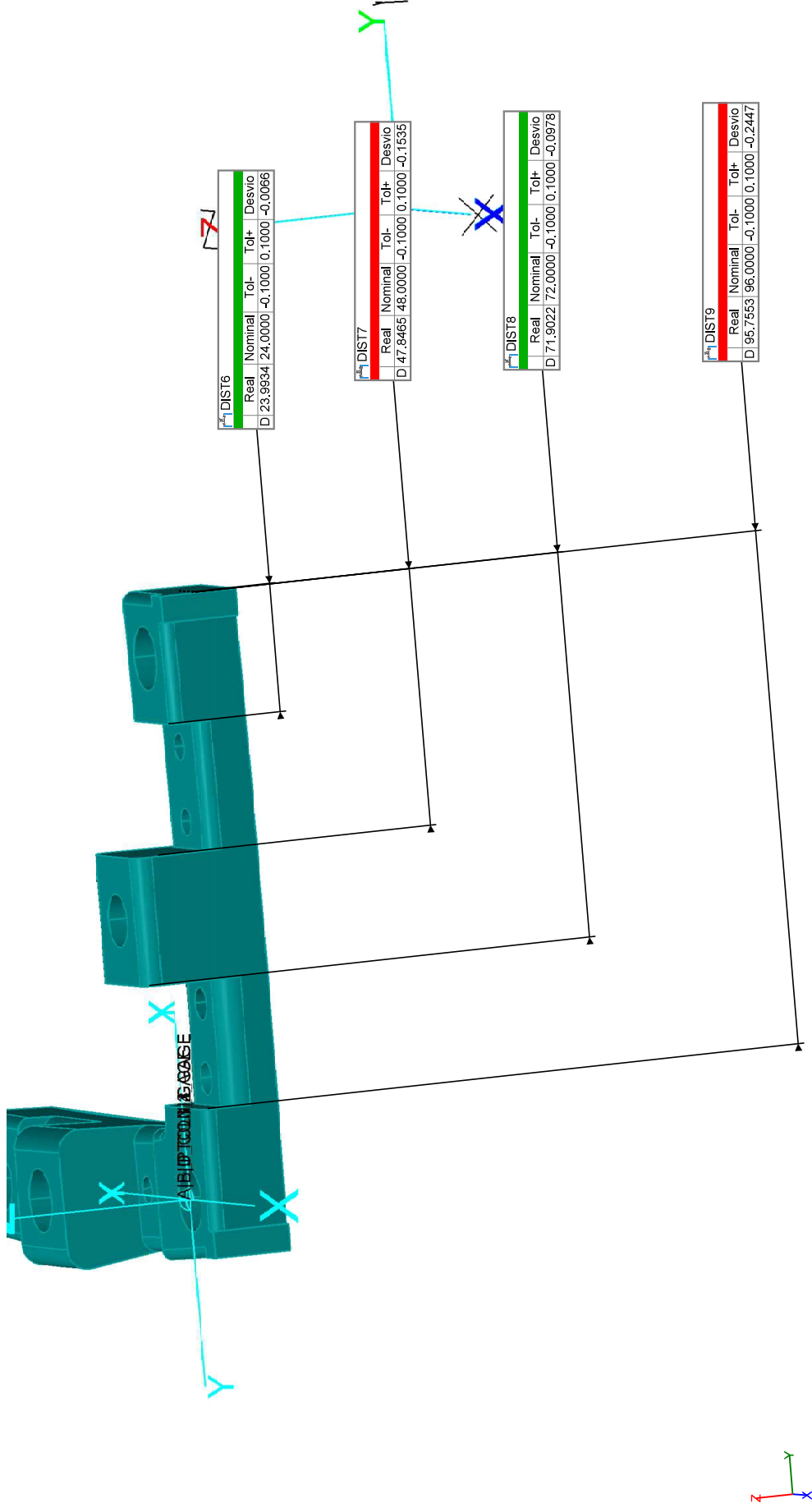
4119_25-LAG

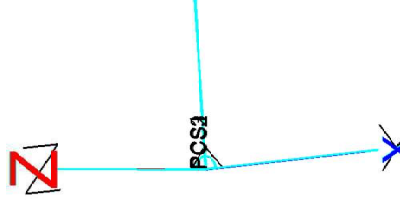
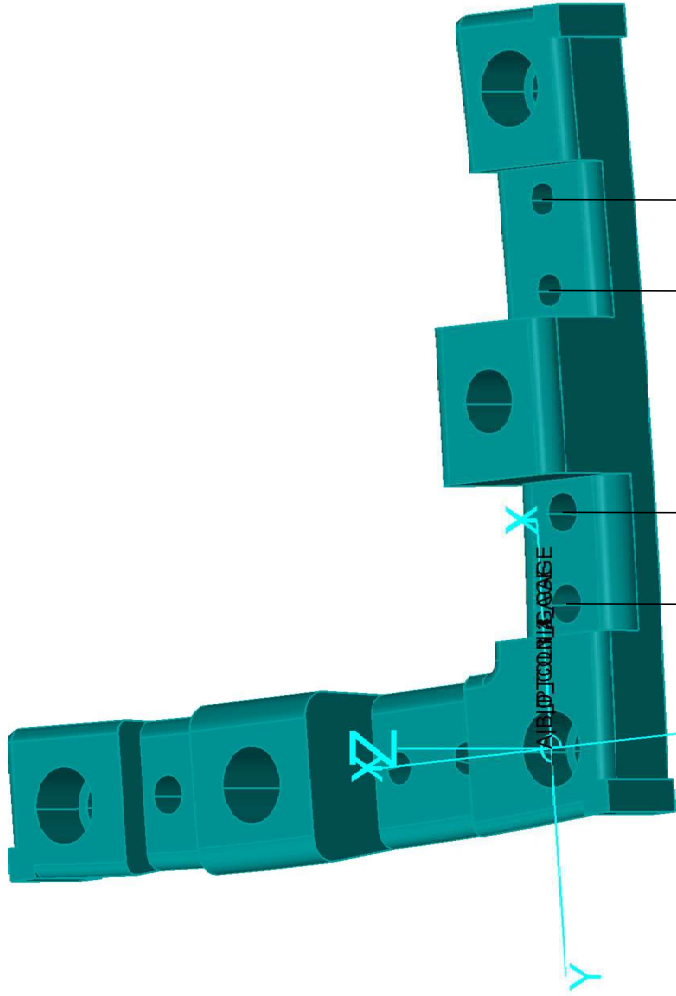
Pág.

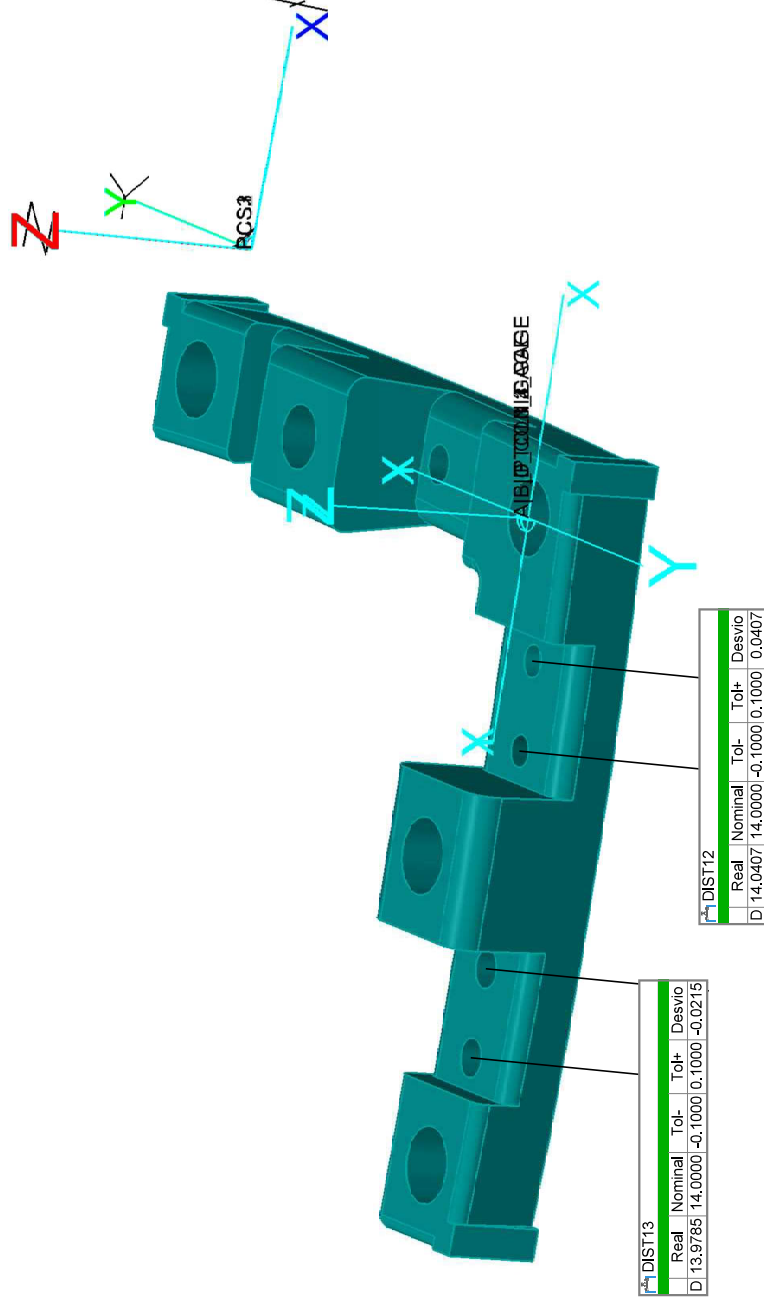
Page

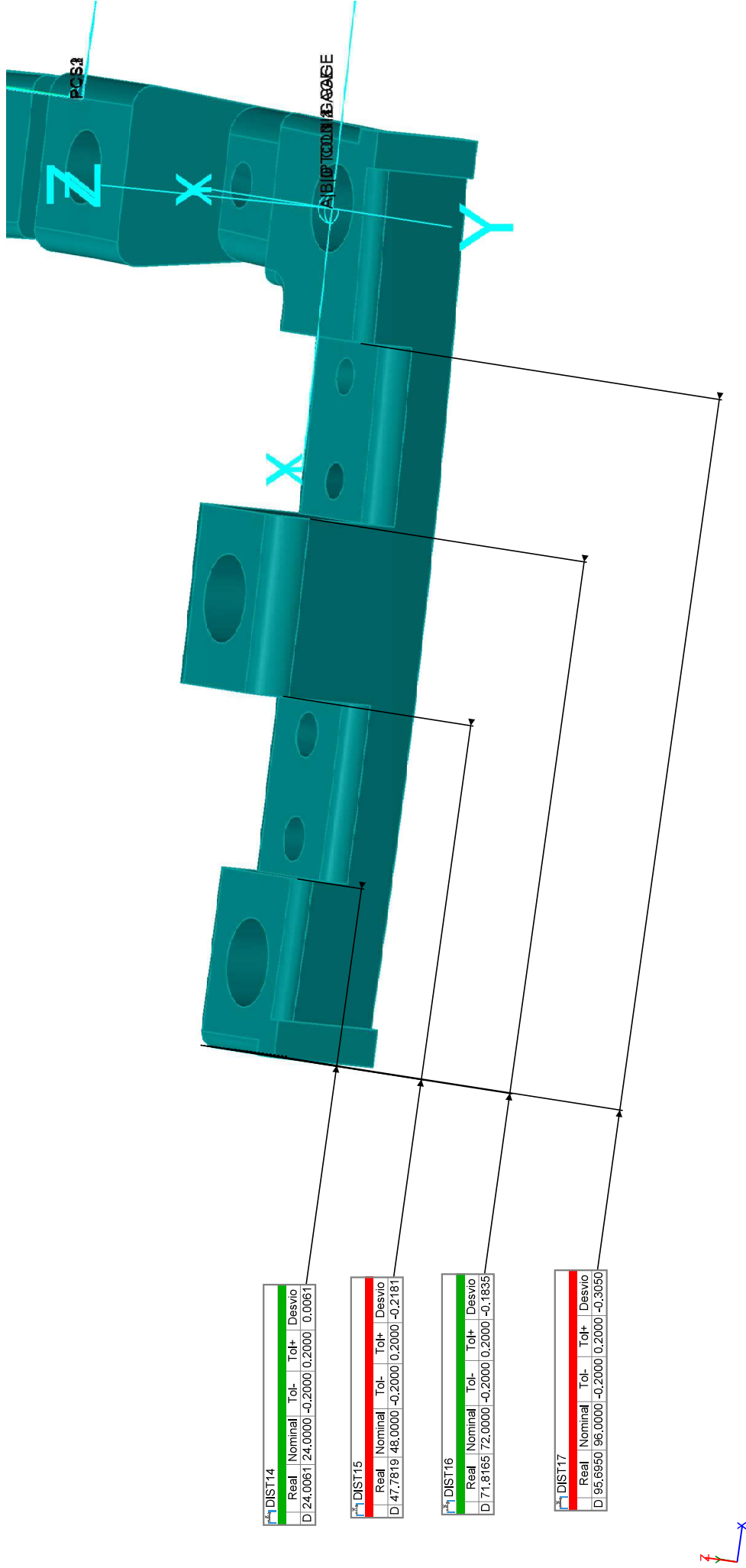
7 / 13

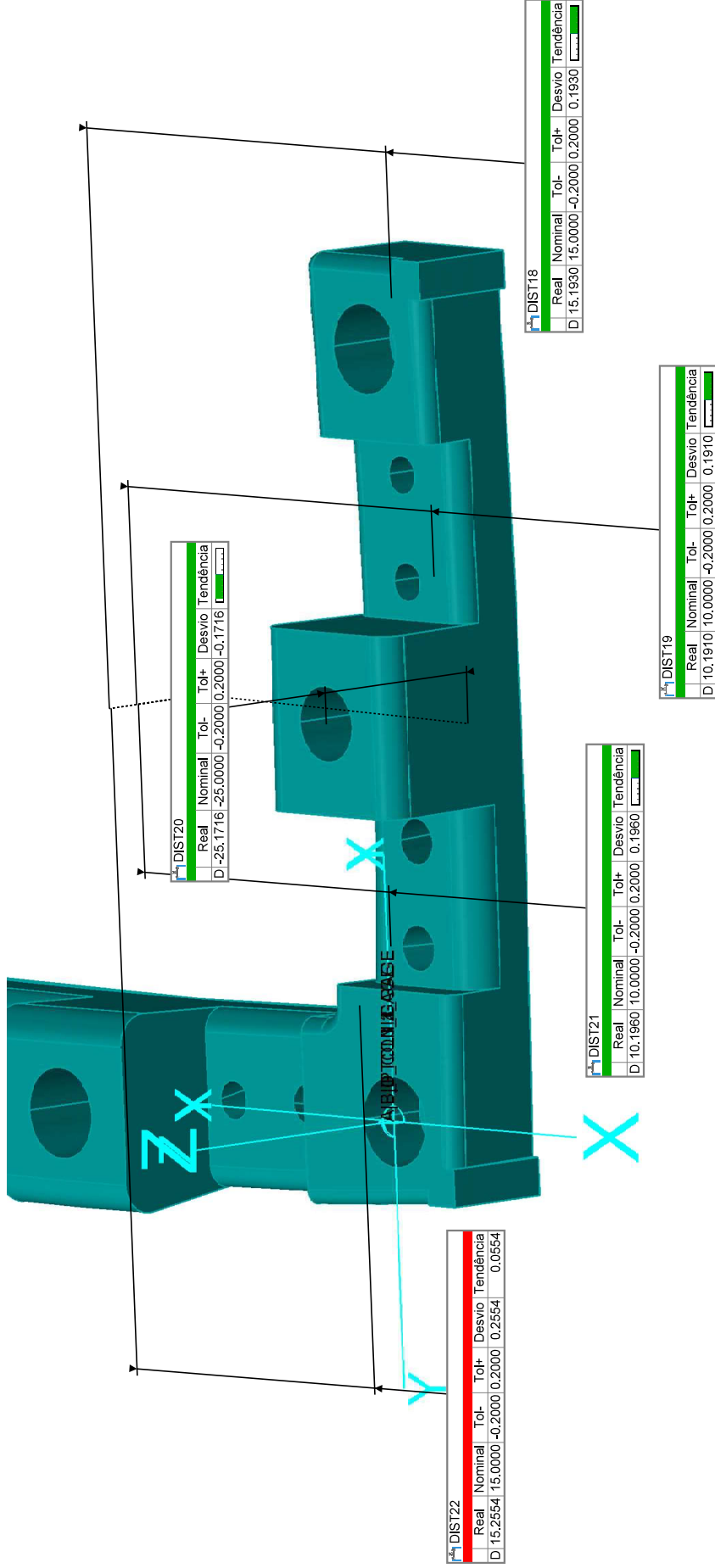


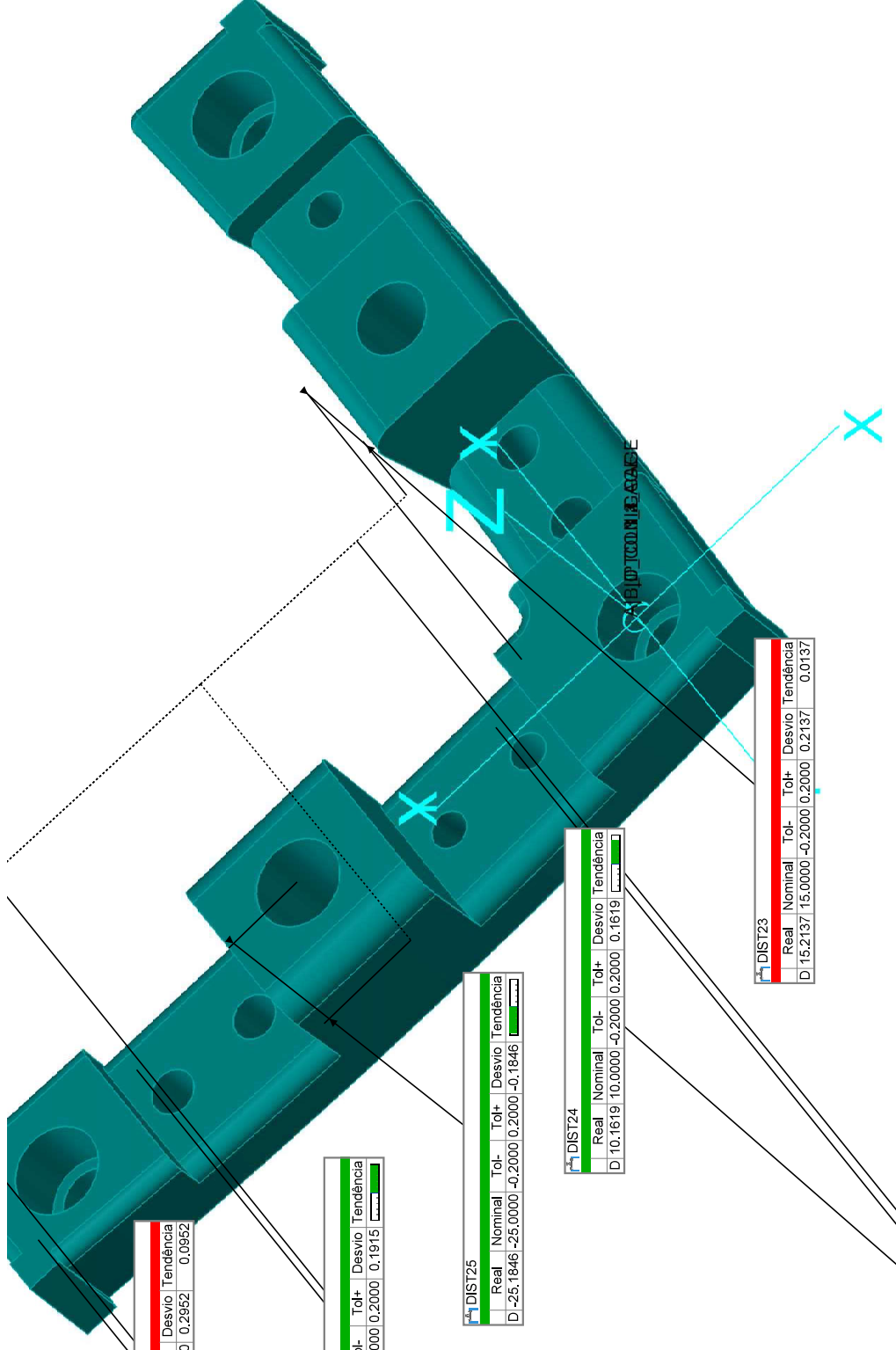














RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL

REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

Comentário: Vari...

Nº

4121_25-LAG

EN 9100

BUREAU VERITAS

Certification



Pág.

Page

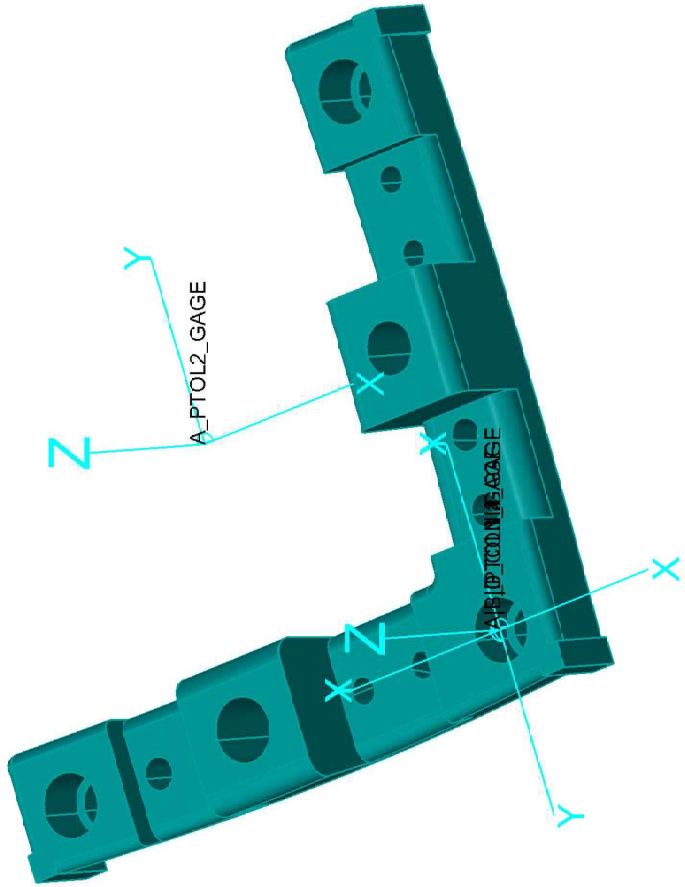
1 / 13

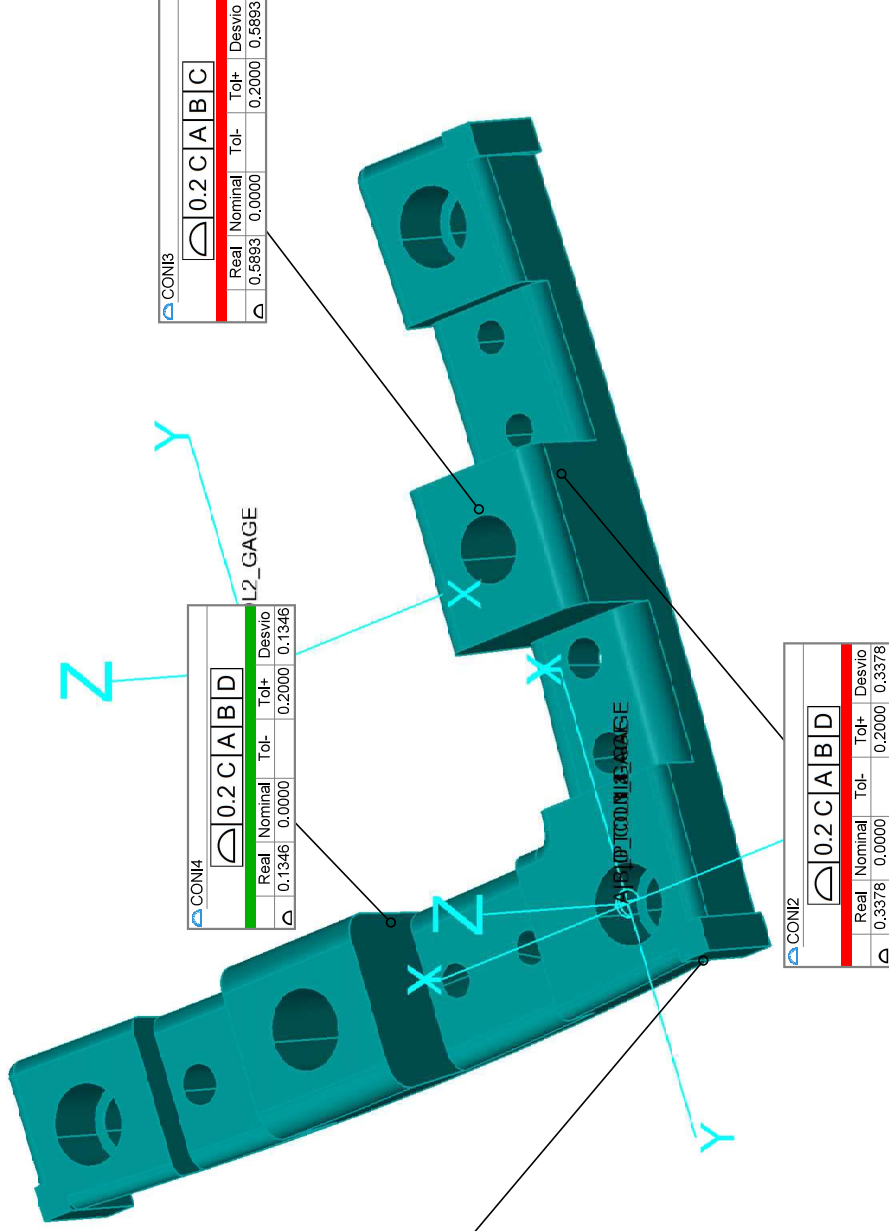
IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT

Equipamento / Equipment	Marca / Marking	Modelo / Model	Nº de Série/ Serial nr.	Nº EMM / MME nr.	Operador / Operator
CMM	COORD3METRO...	KROMOS NT	04686	LAG 270	Bruno Jorge

IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION

Nº Peça / Part Nr.	Designação / Designation	Nº de OF / Work Order Nr.	Data / Date
ADAPTED ARTIFACT	ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (L2)	2 022 479	09/10/25 14:49:01





PLAN9					
0.3 G					
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
	0.0059	0.0000		0.3000	0.0059

PLAN8				
			0.3 G	
	Real	Nominal	Tol-	Tol+
	0.0292	0.0000		0.3000
				Desvio
				0.0292

PLAN6				
		0.3 G		
	Real	Nominal	Tol-	Tol+
	0.0335	0.0000		0.3000
				Desvio
				0.0335

PLAN2				
			0.3 G	
	Real	Nominal	Tol-	Tol+
	0.0755	0.0000		0.3000
				Desvio
				0.0755

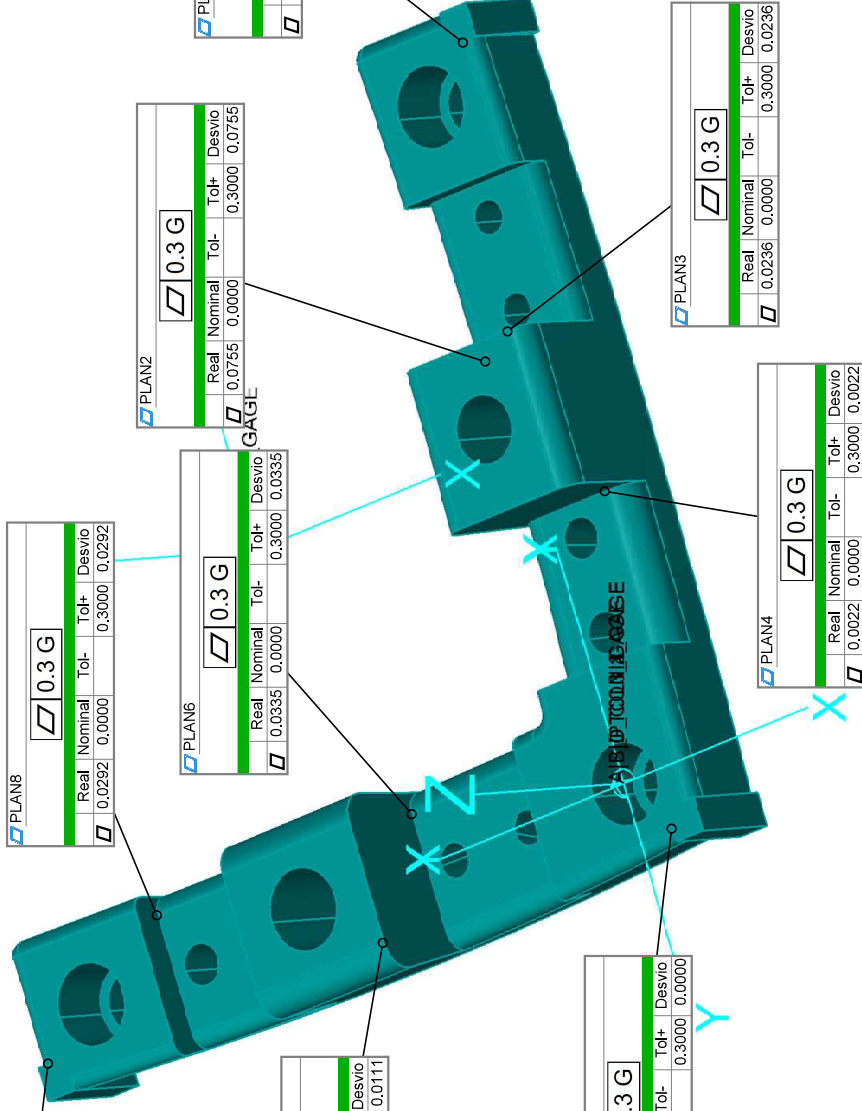
PLAN7					
0.3 G					
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
	0.0111	0.0000		0.3000	0.0111

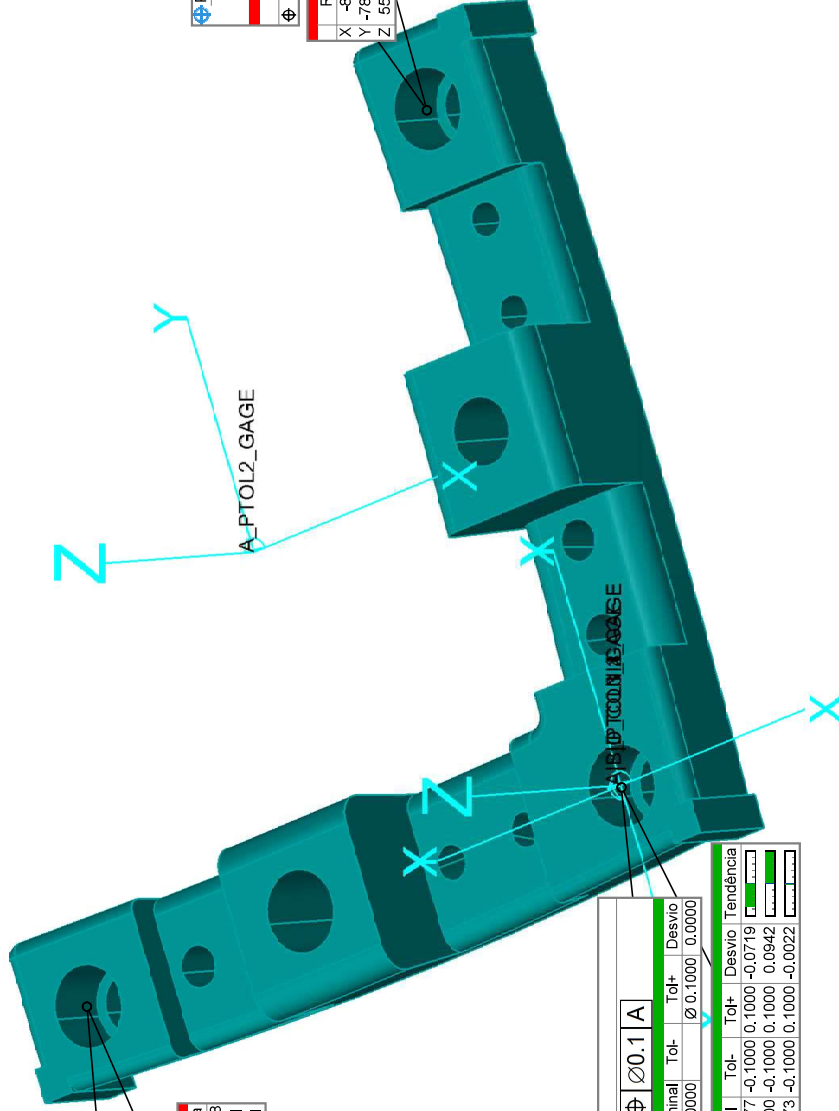
PLAN1					
		0.3 G			
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
	0.0420	0.0000		0.3000	0.0420

PLAN5				

PLAN4					
0.3 G					
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
	0.0022	0.0000		0.3000	0.0022

PLAN3					
		0.3 G			
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
	0.0236	0.0000		0.3000	0.0236



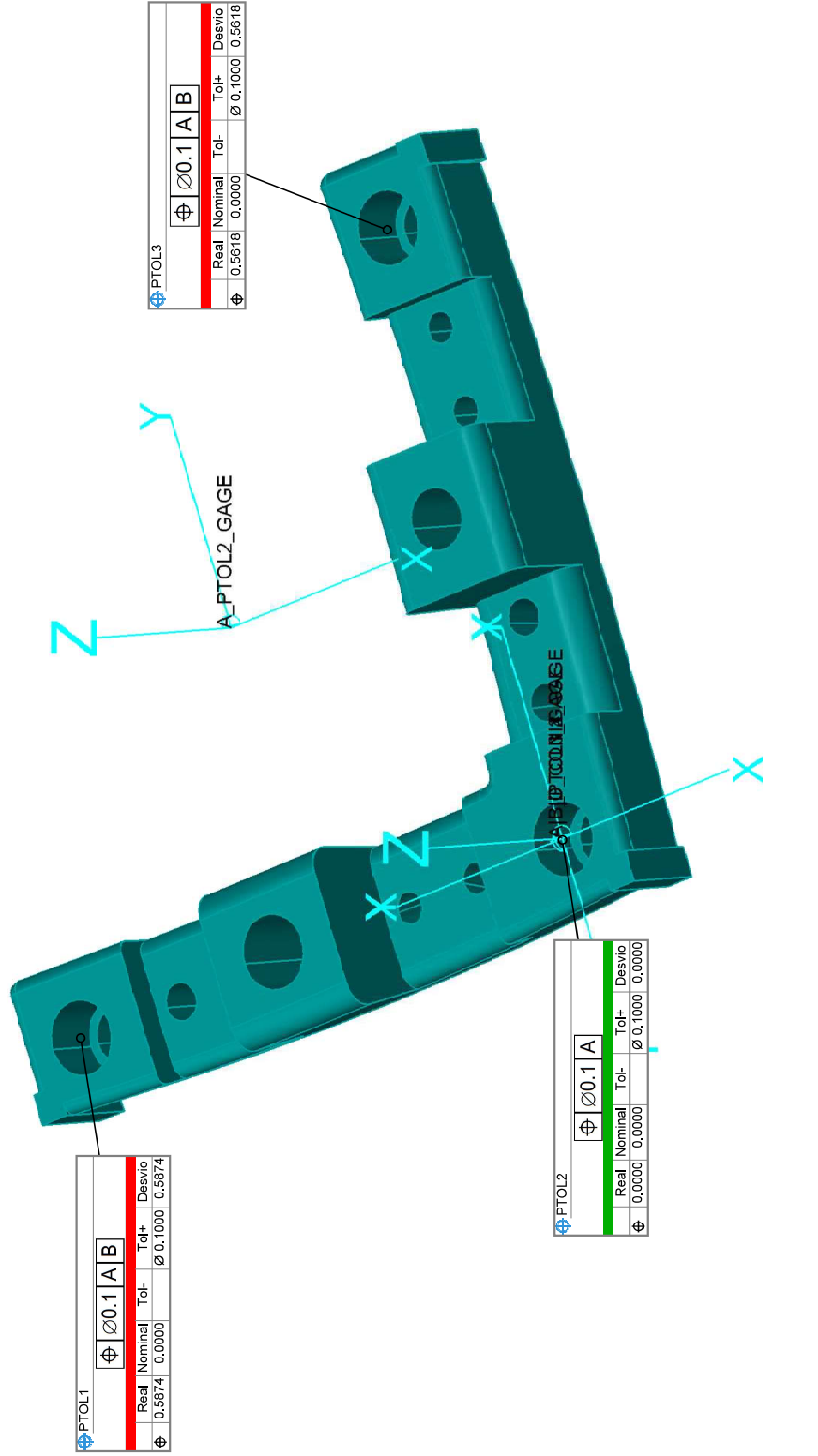


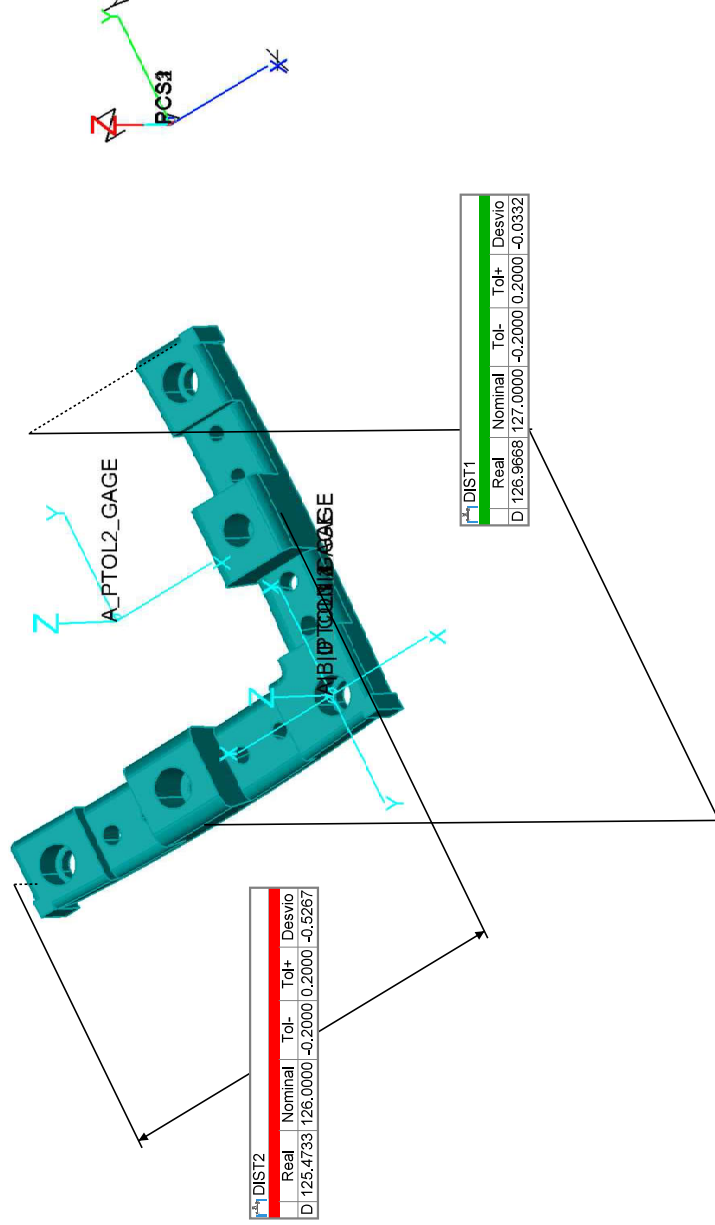
PTOL1											
Ø 0.1 A B											
Real		Nominal		Tol-		Tol+		Desvio			
Ø 0.5874		0.0000		Ø 0.1000		0.5874					
Real		Nominal		Tol-		Tol+		Desvio		Tendência	
X -109.1646		-109.3514		-0.1000		0.1000		0.1868		0.0868	
Y -179.9171		-180.0000		-0.1000		0.1000		0.0829		0.0000	
Z 51.9734		51.9678		-0.1000		0.1000		0.0056		0.0000	

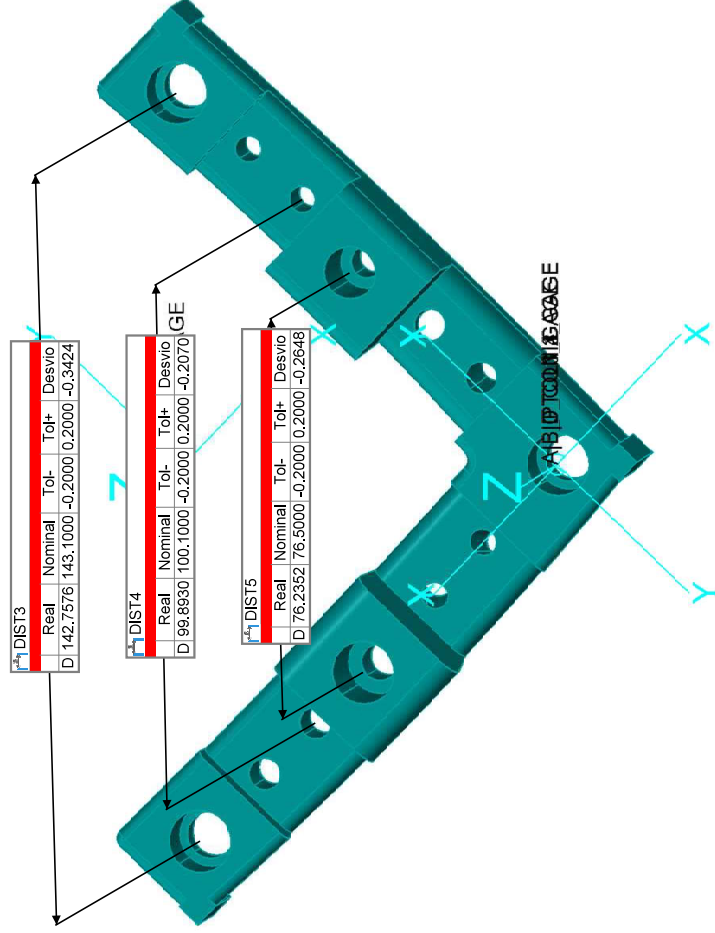
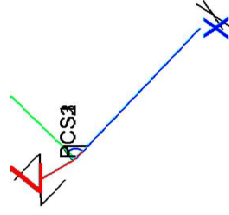
PTOL3					
Ø 0.1 A B					
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
Ø	0.5618	0.0000		Ø 0.1000	0.5618
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
X	-8.2683	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0706
Y	-78.9698	-78.8000	-0.1000	0.1000	-0.1698
Z	55.0251	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0021

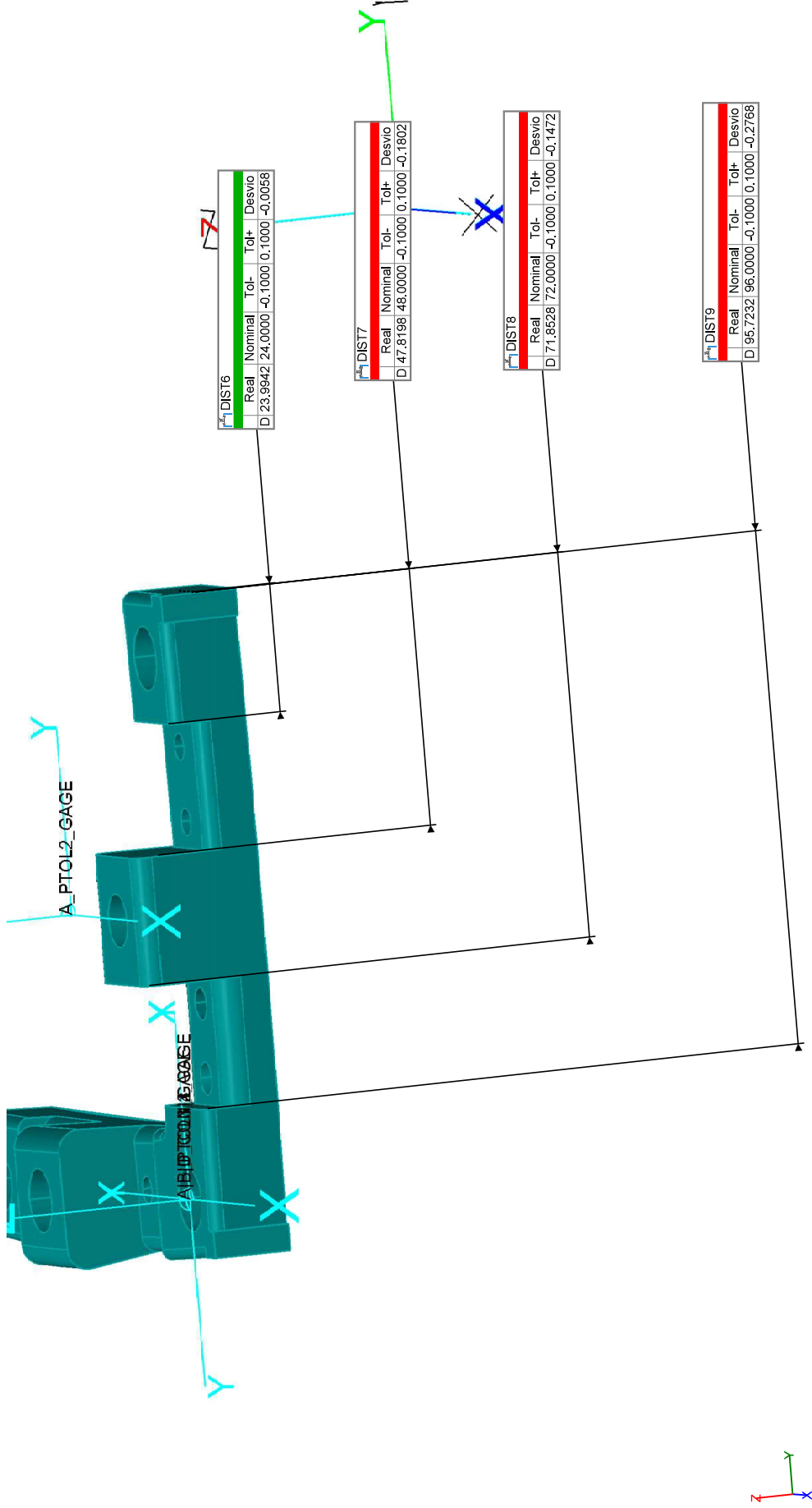
PTOL2											
Ø 0.1 A											
Real		Nominal		Tol-		Tol+		Desvio			
Ø 0.0000		0.0000		Ø 0.1000		0.0000					
Real		Nominal		Tol-		Tol+		Desvio		Tendência	
X	-8.2695	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0719						
Y	-179.9058	-180.0000	-0.1000	0.1000	0.0942						
Z	55.0251	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0022						

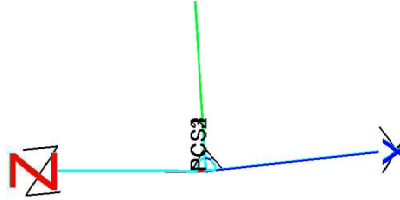
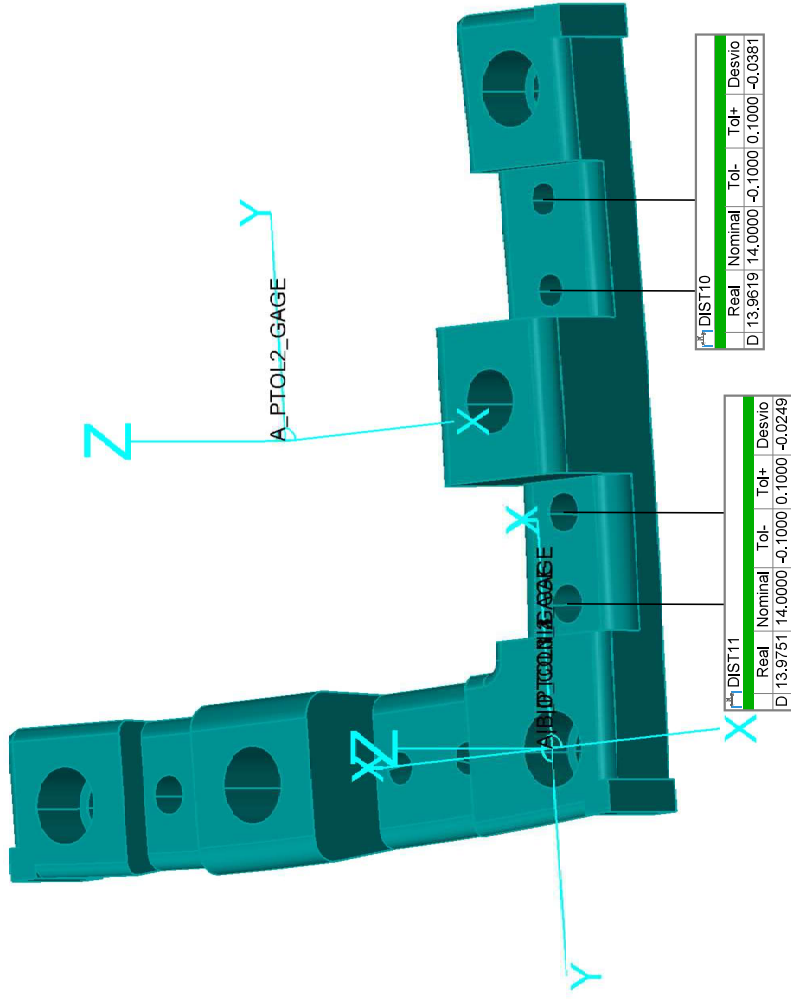


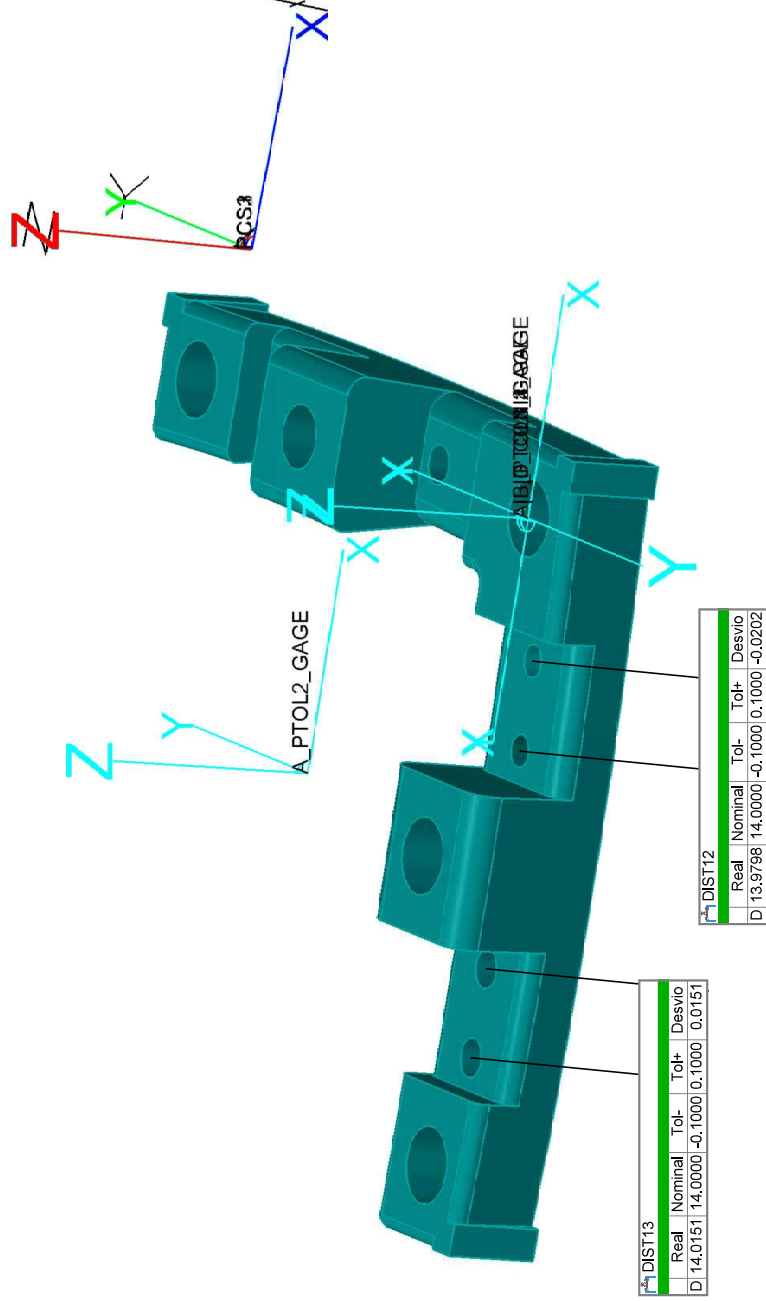


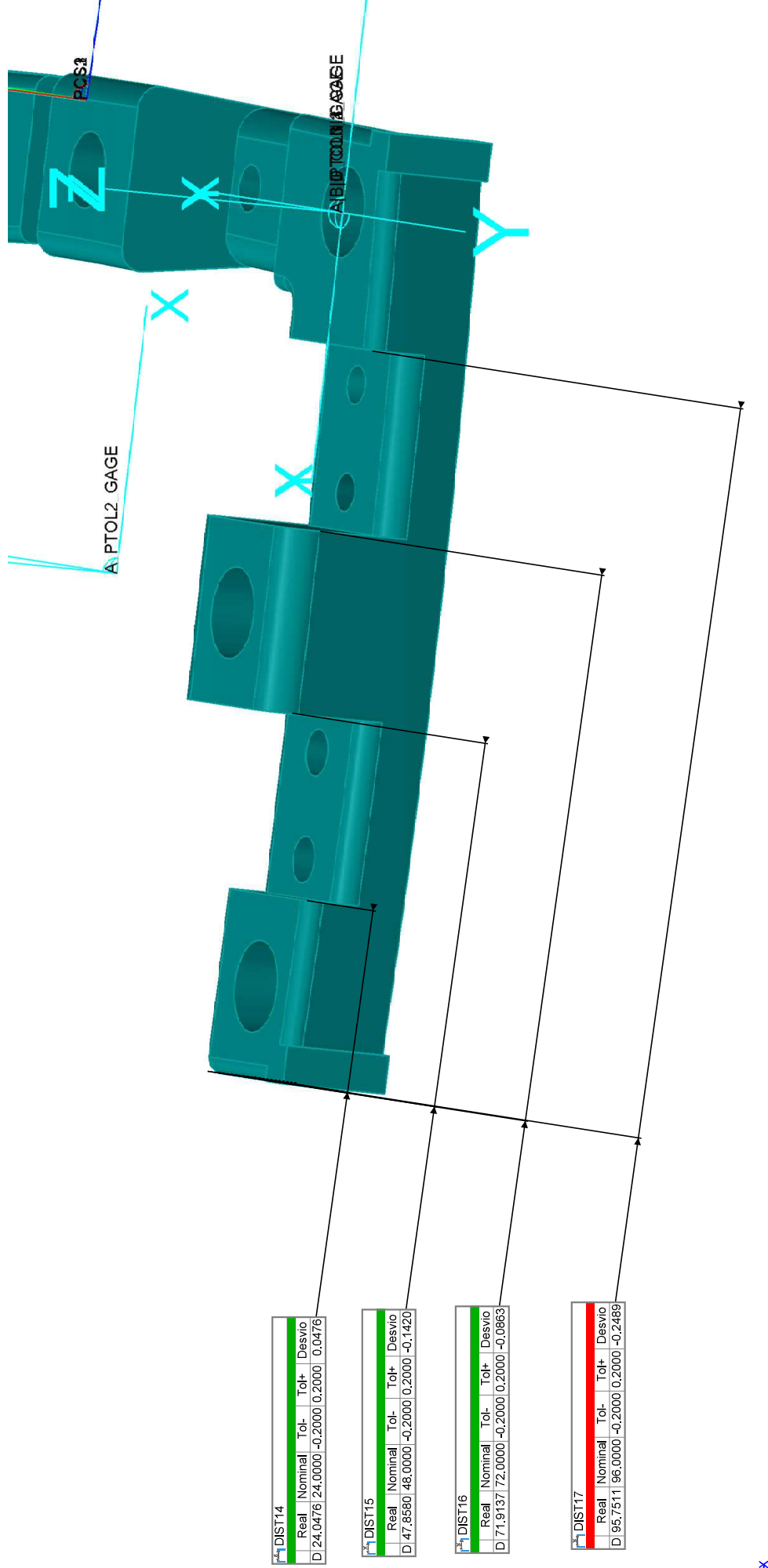


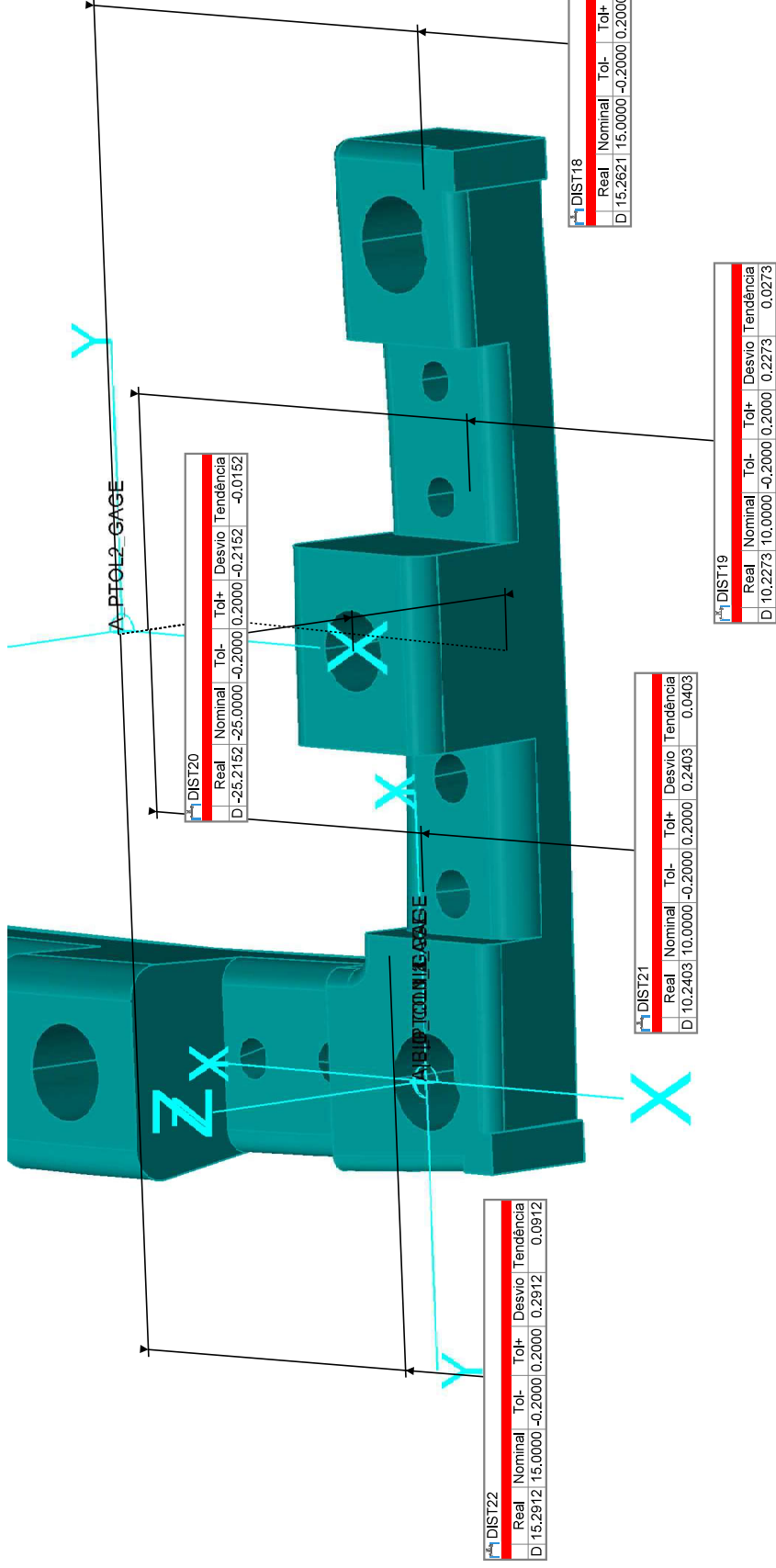


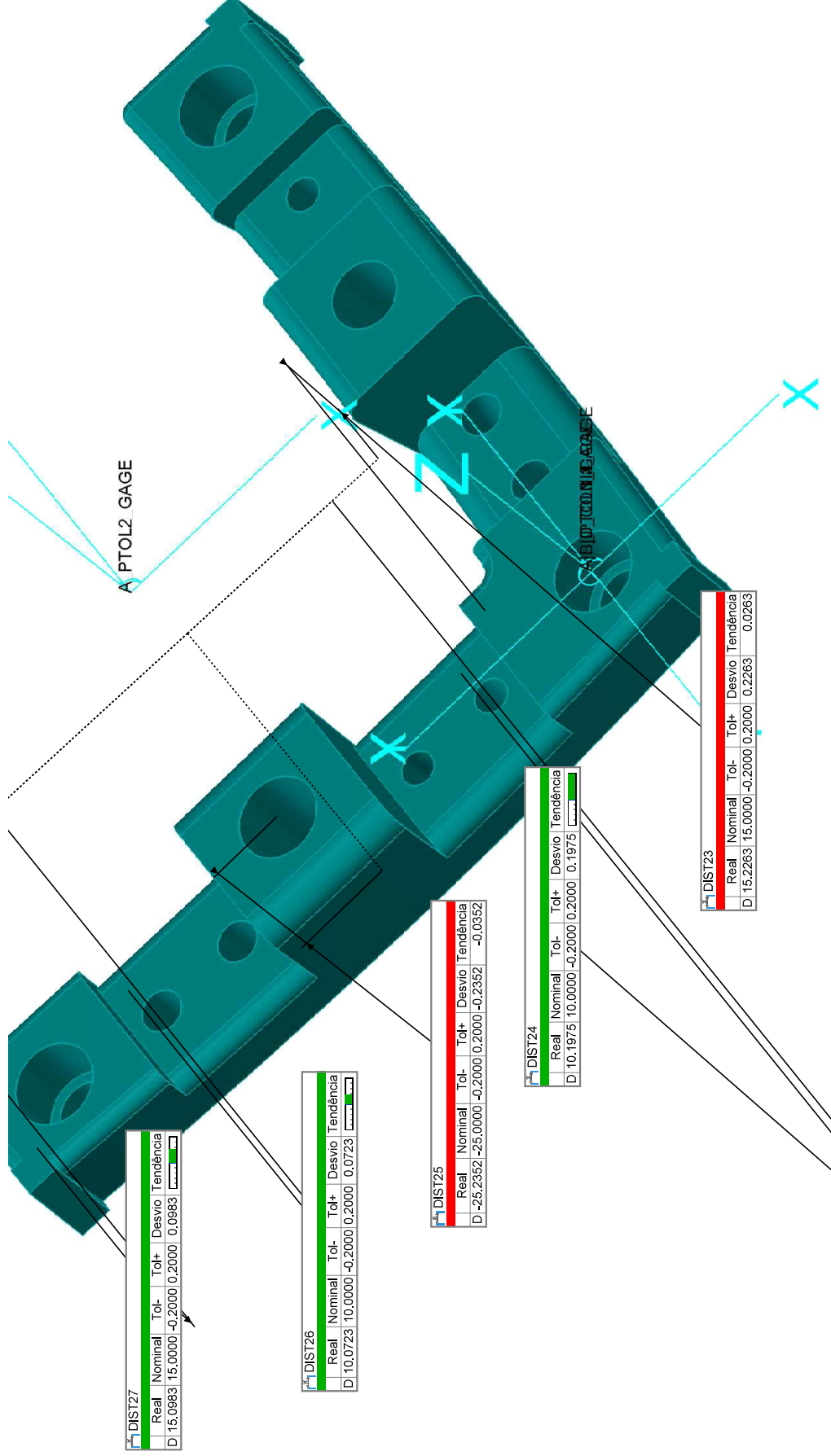














RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL

REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

Comentário: Vari...

Nº

4120_25-LAG

EN 9100

BUREAU VERITAS

Certification



Pág.

Page

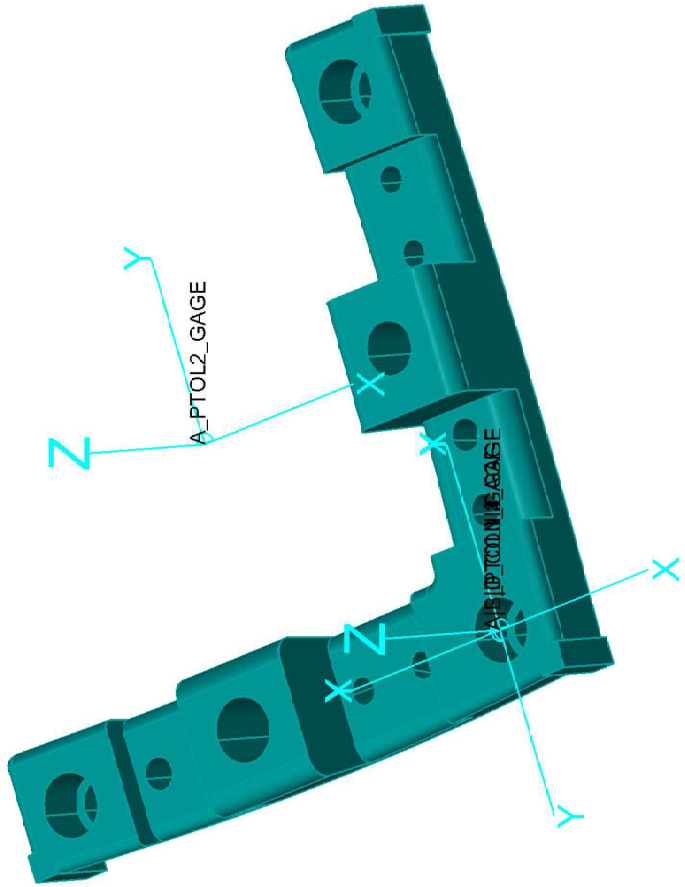
1 / 13

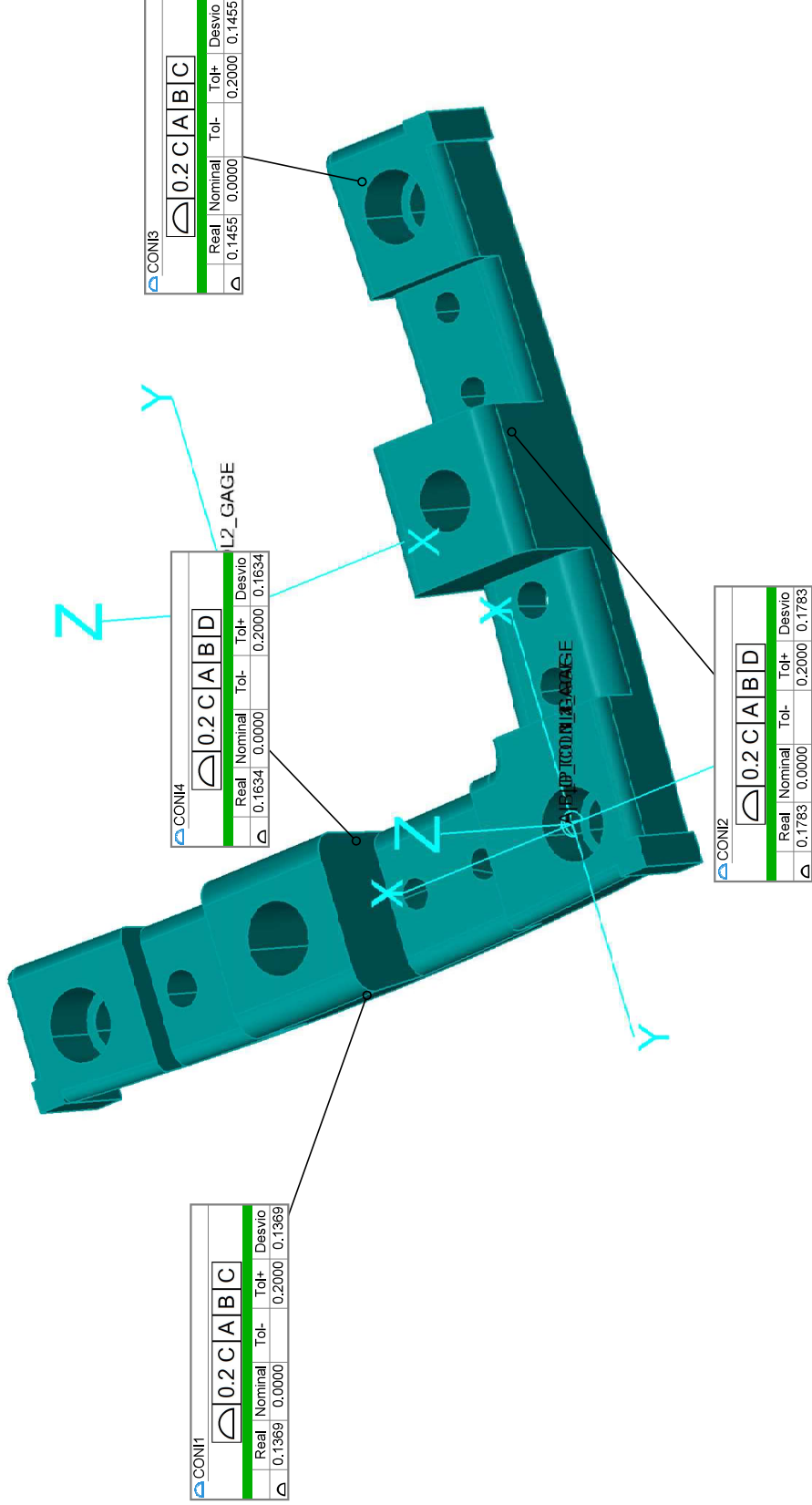
IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT

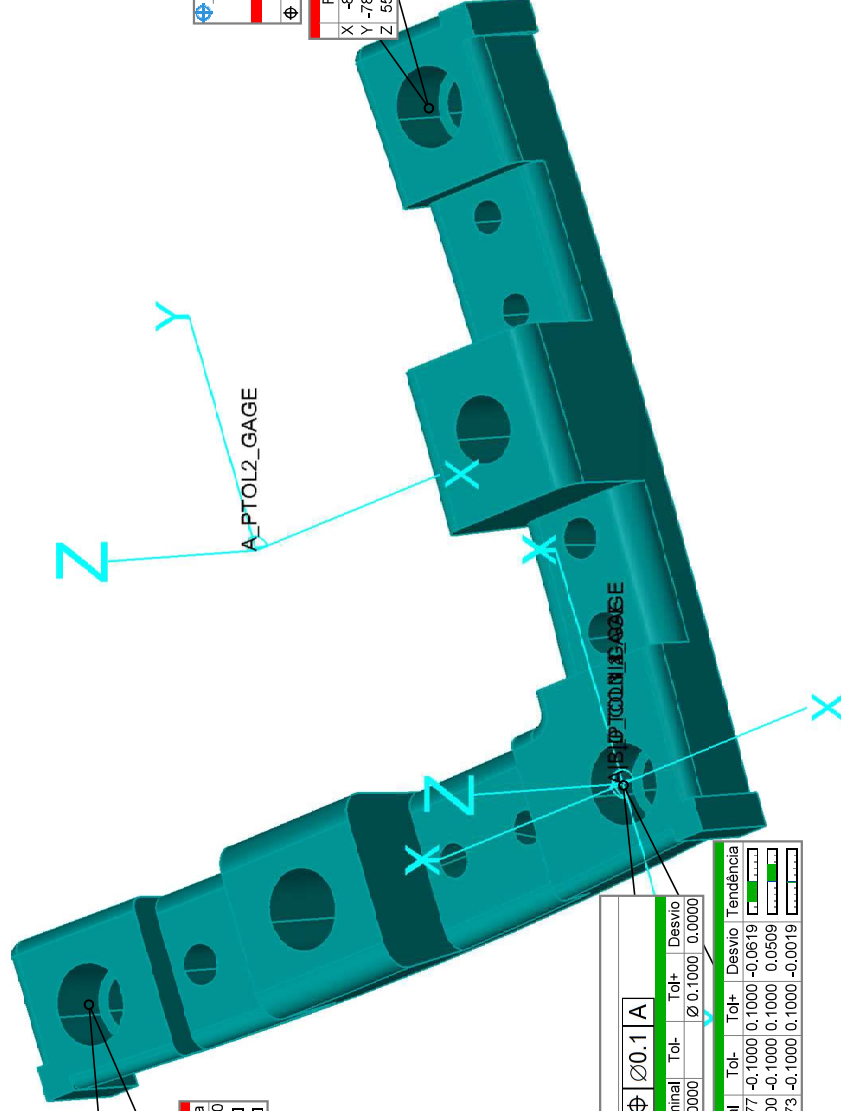
Equipamento / Equipment	Modelo / Model	Nº de Série/ Serial nr.	Nº EMM / MME nr.	Operador / Operator
CMM	COORD3METRO...	KROMOS NT	LAG 270	Bruno Jorge

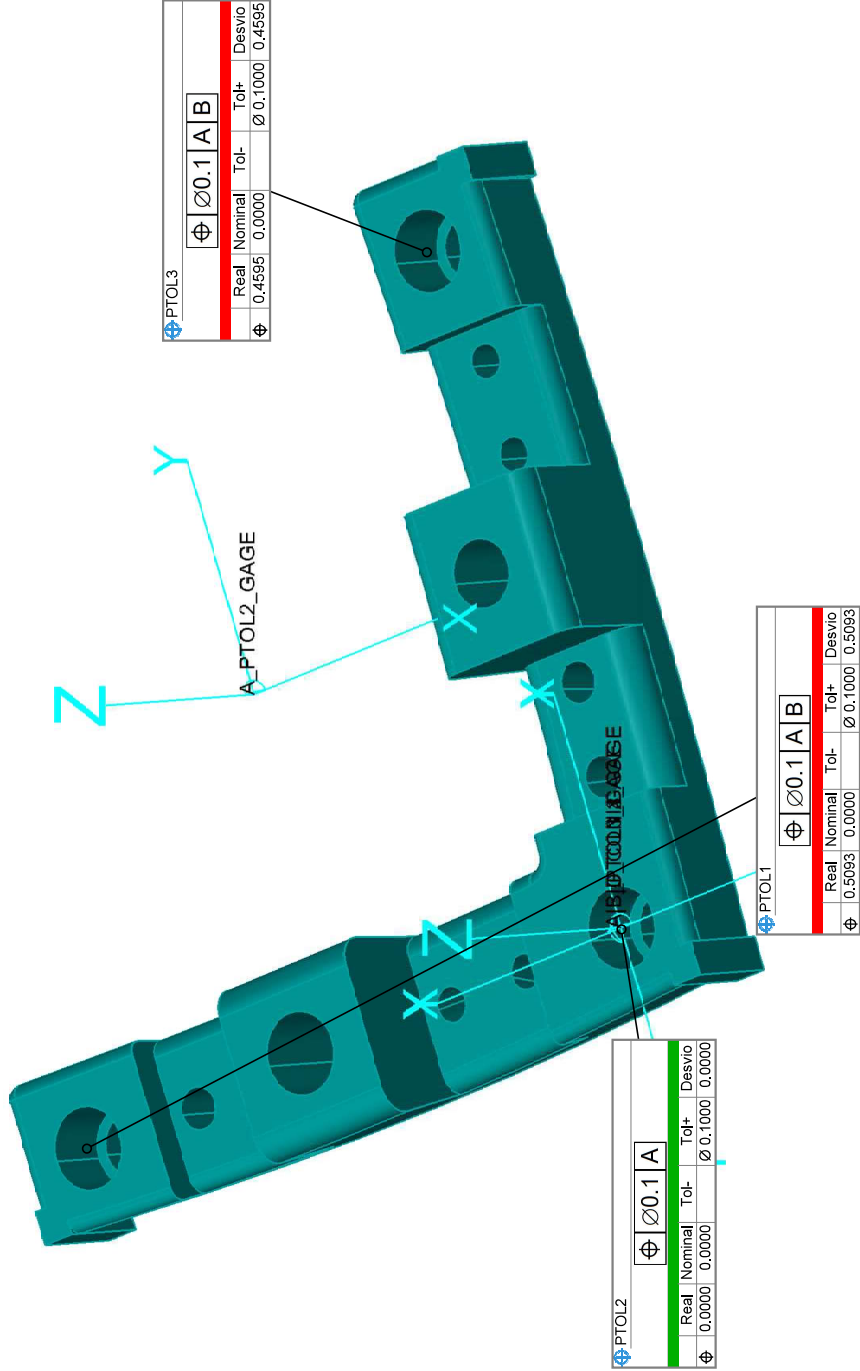
IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION

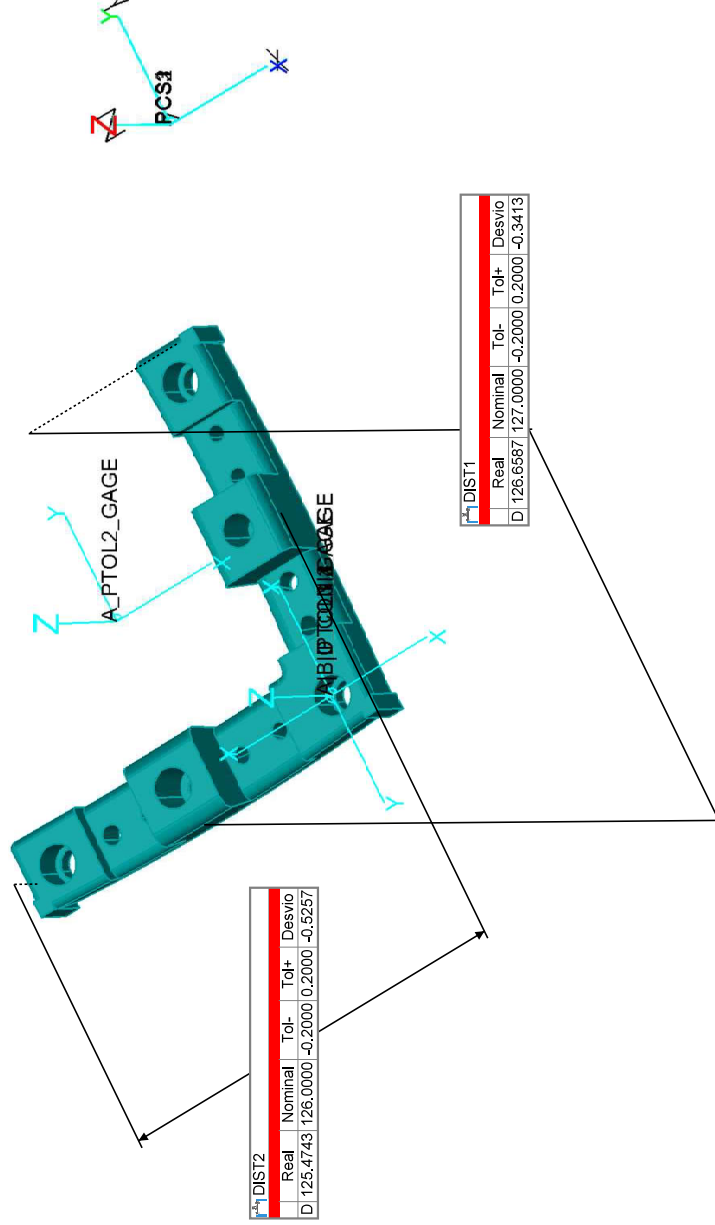
Nº Peça / Part Nr.	Designação / Designation	Nº de OF / Work Order Nr.	Data / Date
ADAPTED ARTIFACT	ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (L1)	2 022 479	09/10/25 14:43:28











RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

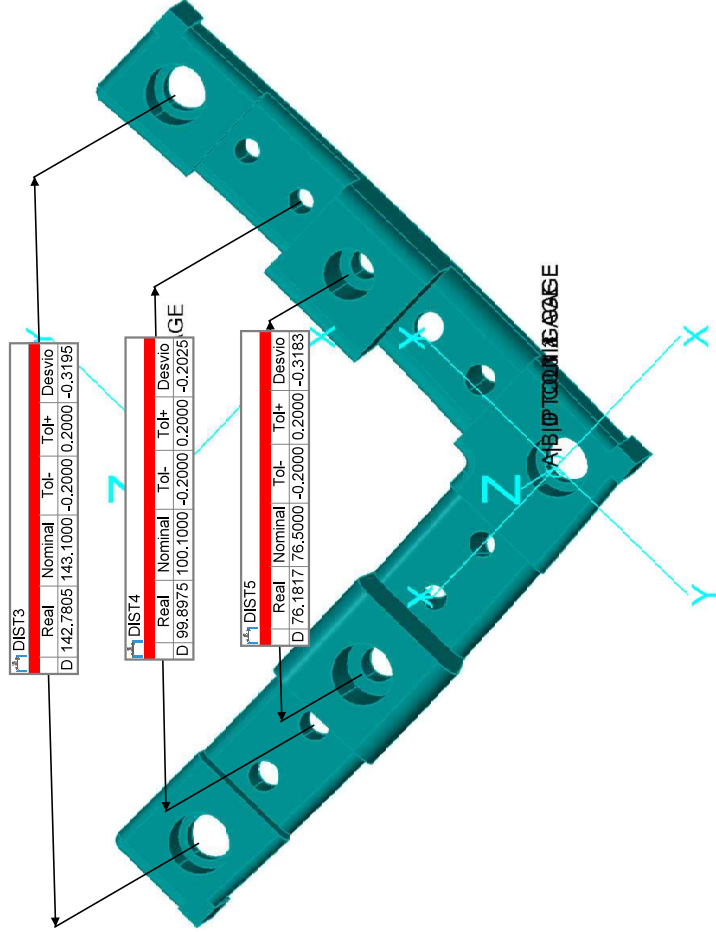
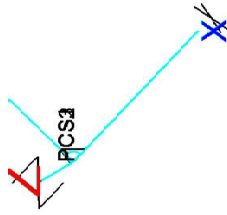
Nº

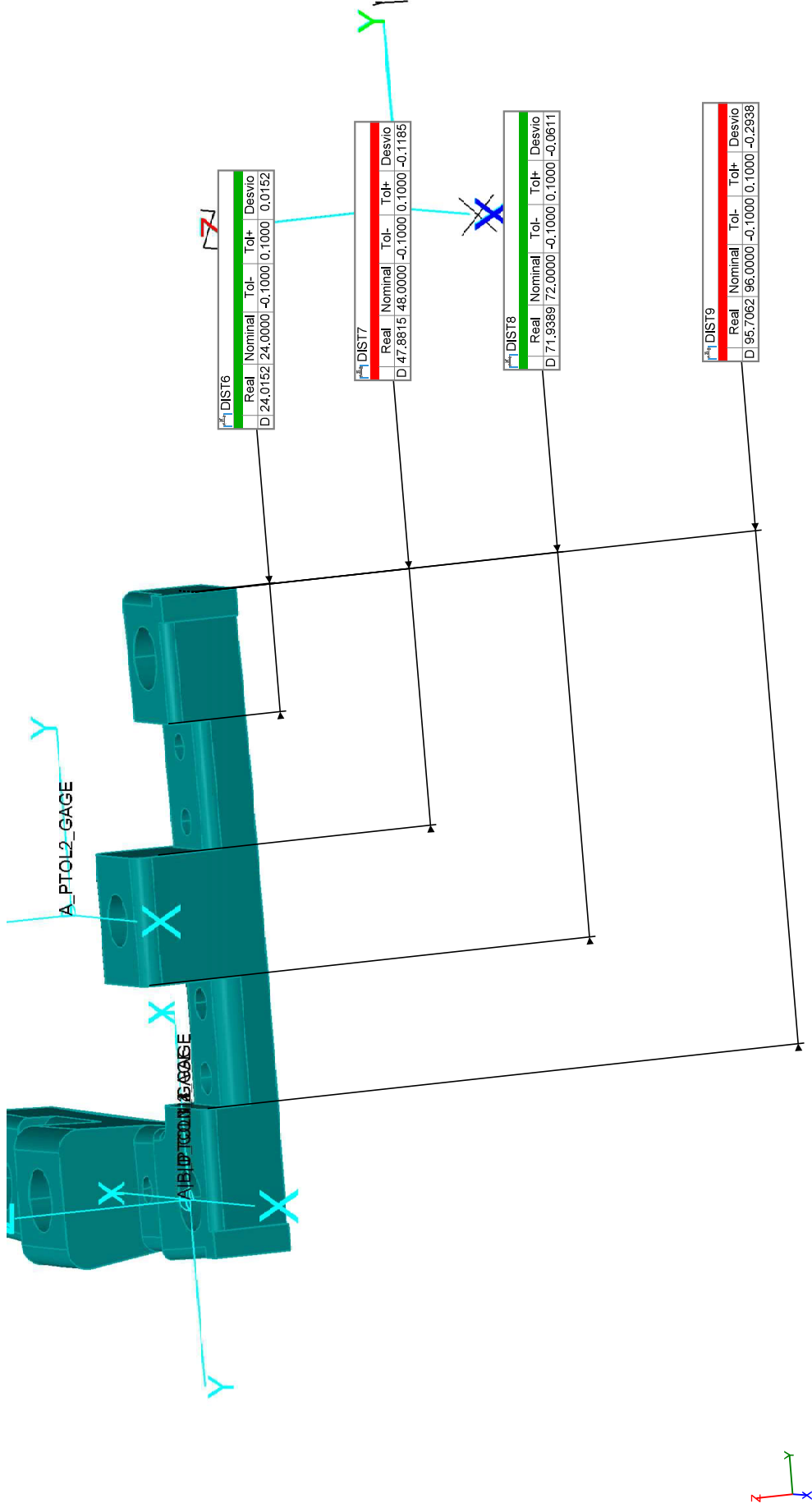
4120_25-LAG

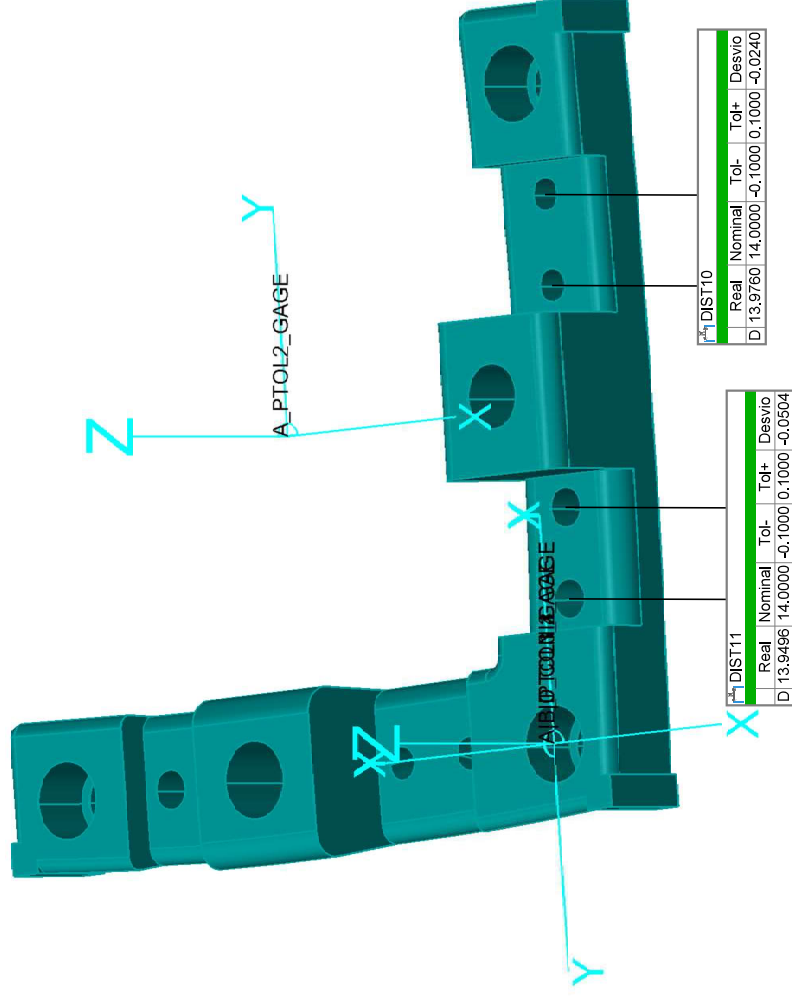
Pág.

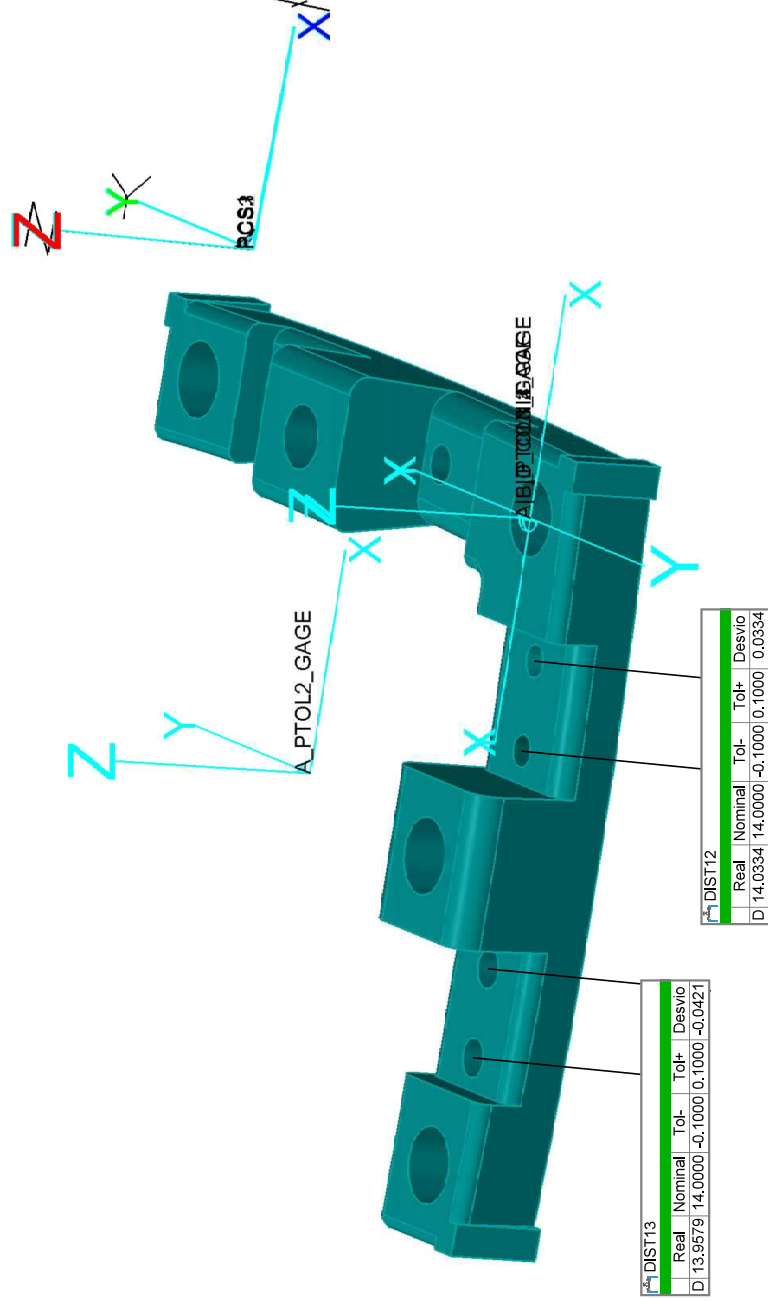
Page

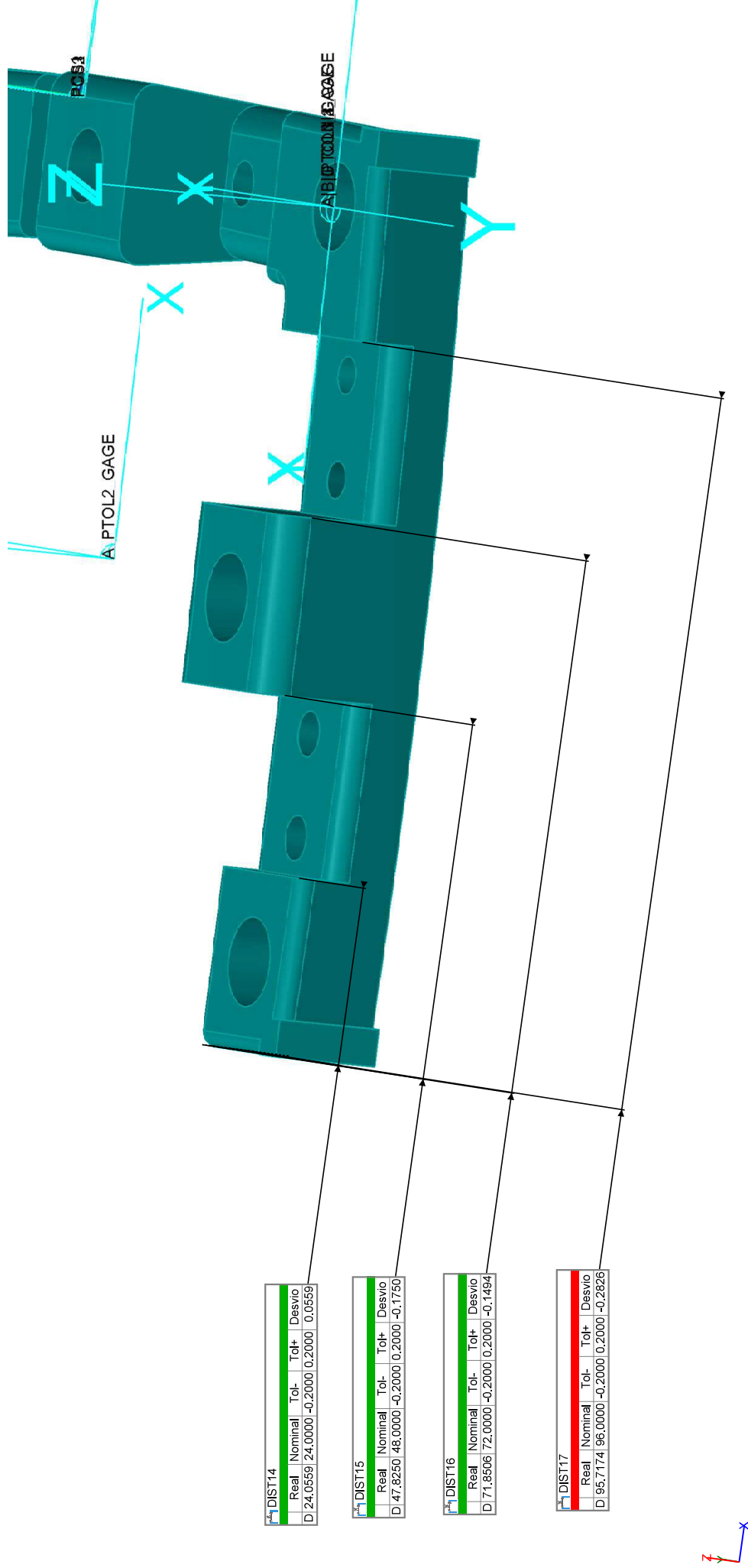
7 / 13

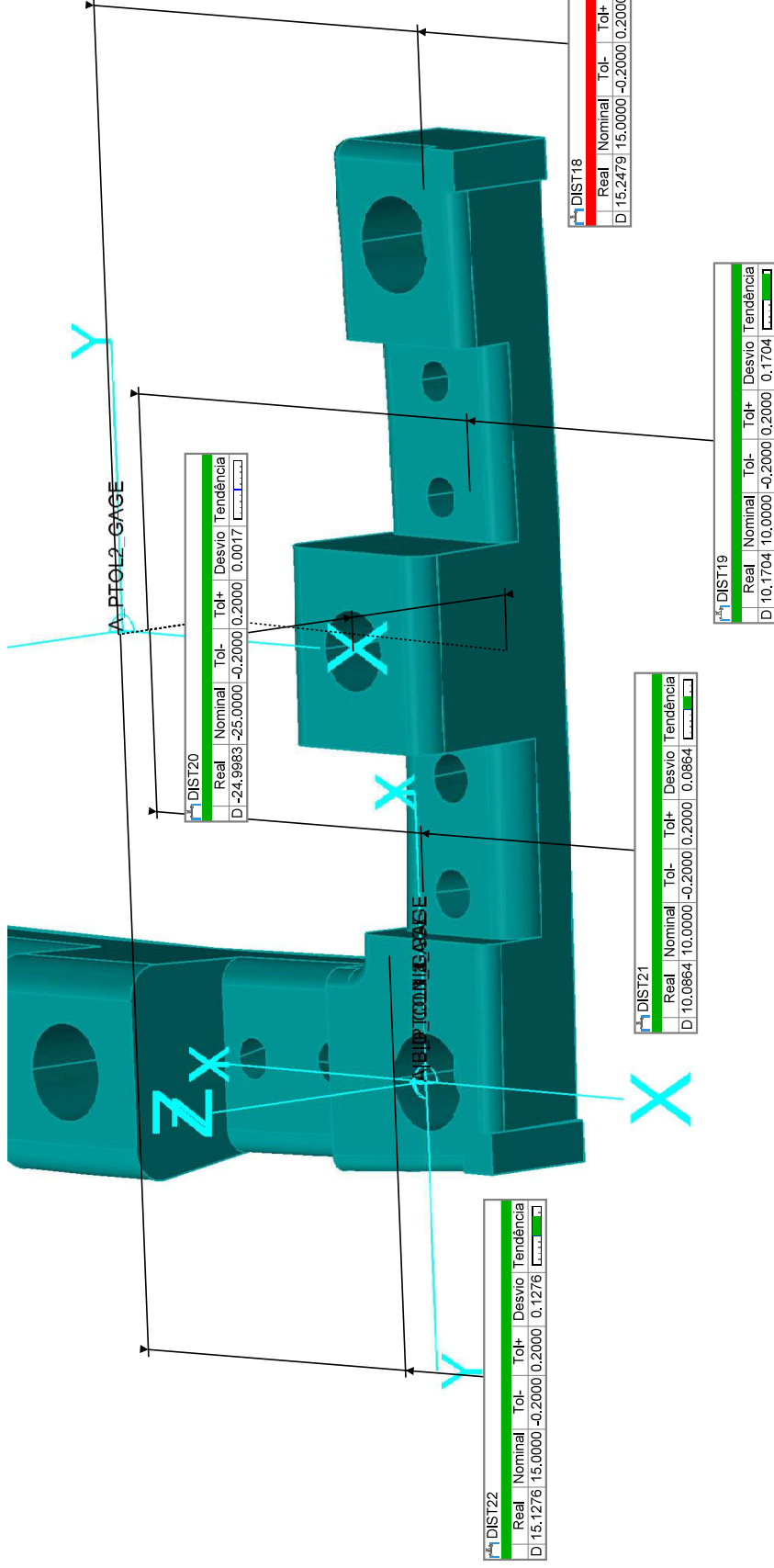


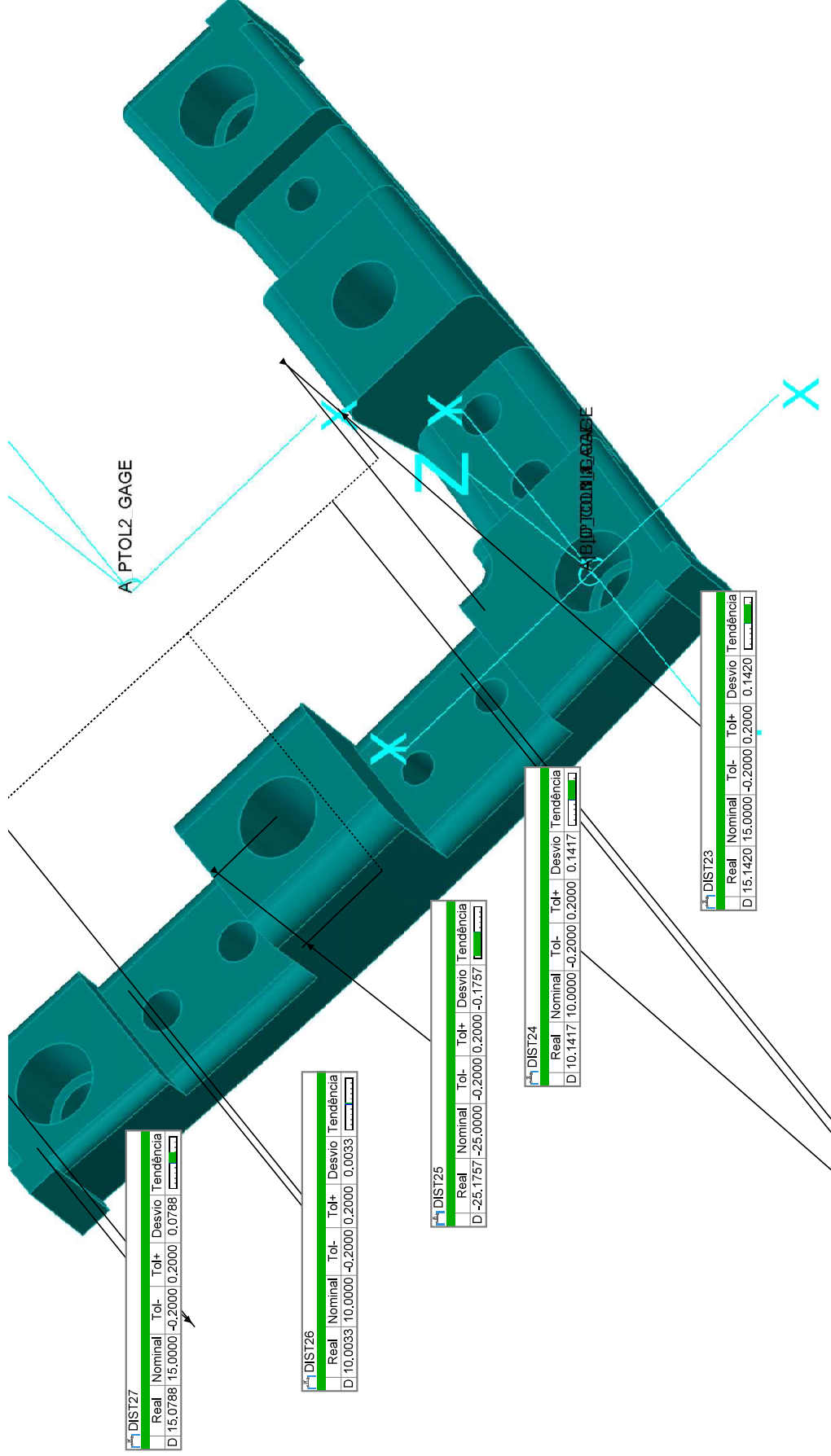














RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL

REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

Comentário: Vari...

Nº

4124_25-LAG

EN 9100

BUREAU VERITAS

Certification



Pág.

Page

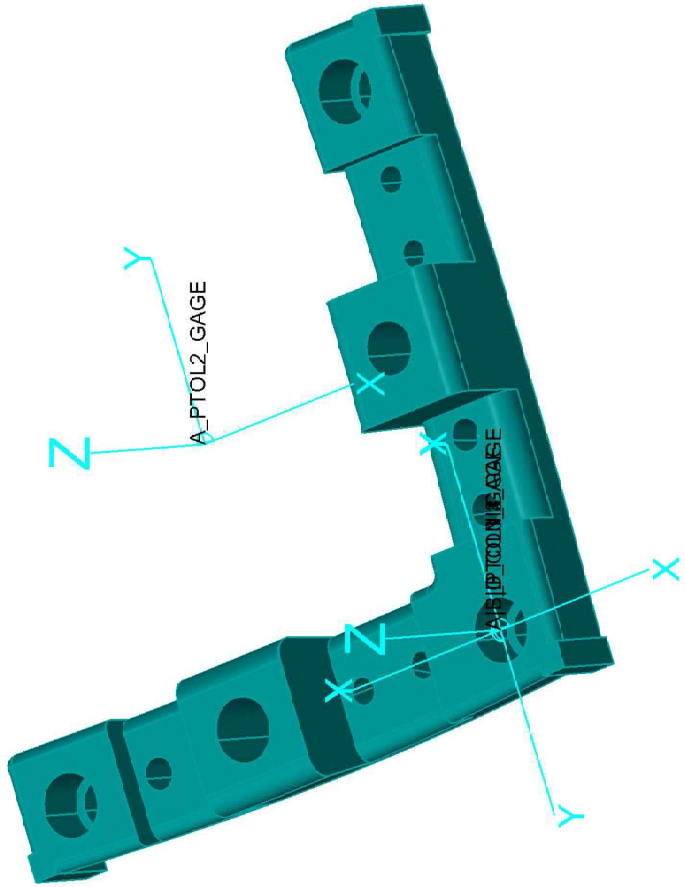
1 / 13

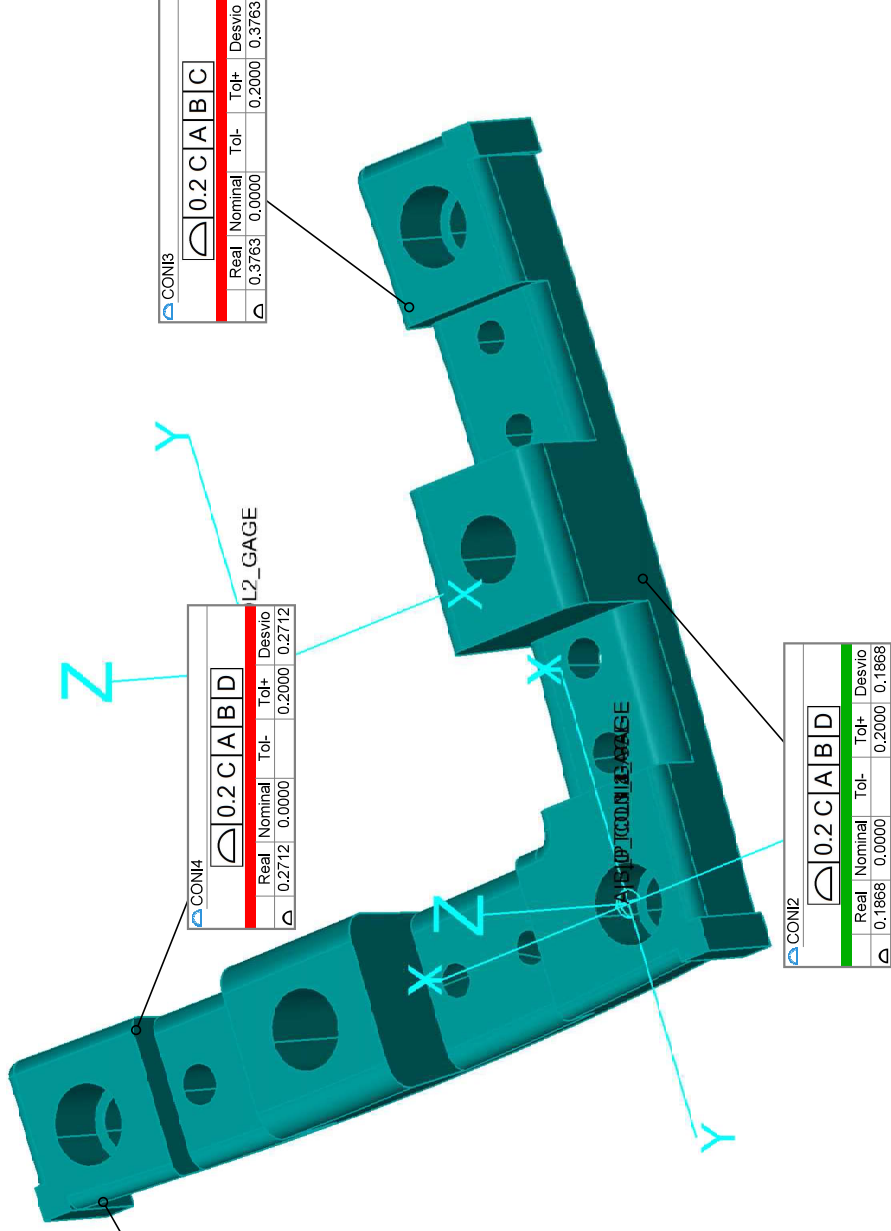
IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT

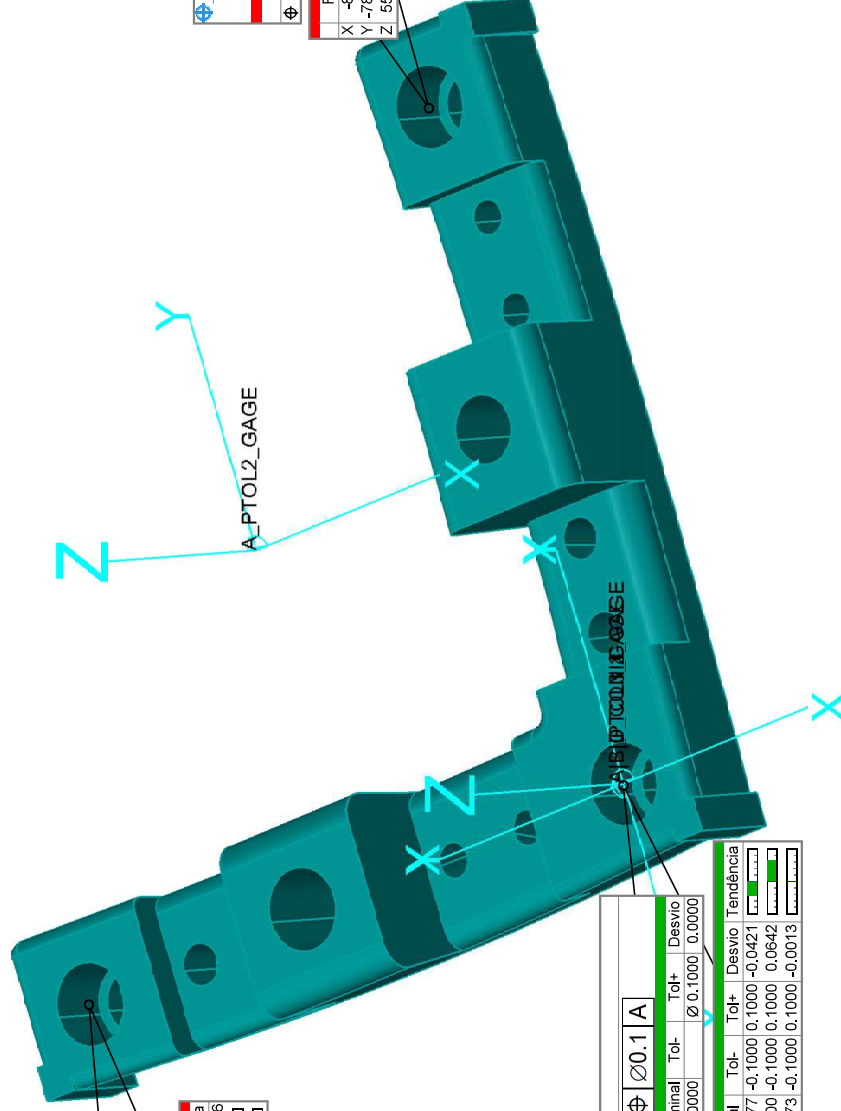
Equipamento / Equipment	Marca / Marking	Modelo / Model	Nº de Série/ Serial nr.	Nº EMM / MME nr.	Operador / Operator
CMM	COORD3METRO...	KROMOS NT	04686	LAG 270	Bruno Jorge

IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION

Nº Peça / Part Nr.	Designação / Designation	Nº de OF / Work Order Nr.	Data / Date
ADAPTED ARTIFACT	ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (L3)	2 022 479	09/10/25 14:51:03







PTOL1

	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência
Ø	0.3622	0.0000	Ø 0.1000	0.3622		
X	-109.2088	-109.3514	-0.1000	0.1000	0.1426	0.0426
Y	-179.9217	-180.0000	-0.1000	0.1000	0.0783	
Z	51.9721	51.9678	-0.1000	0.1000	0.0043	

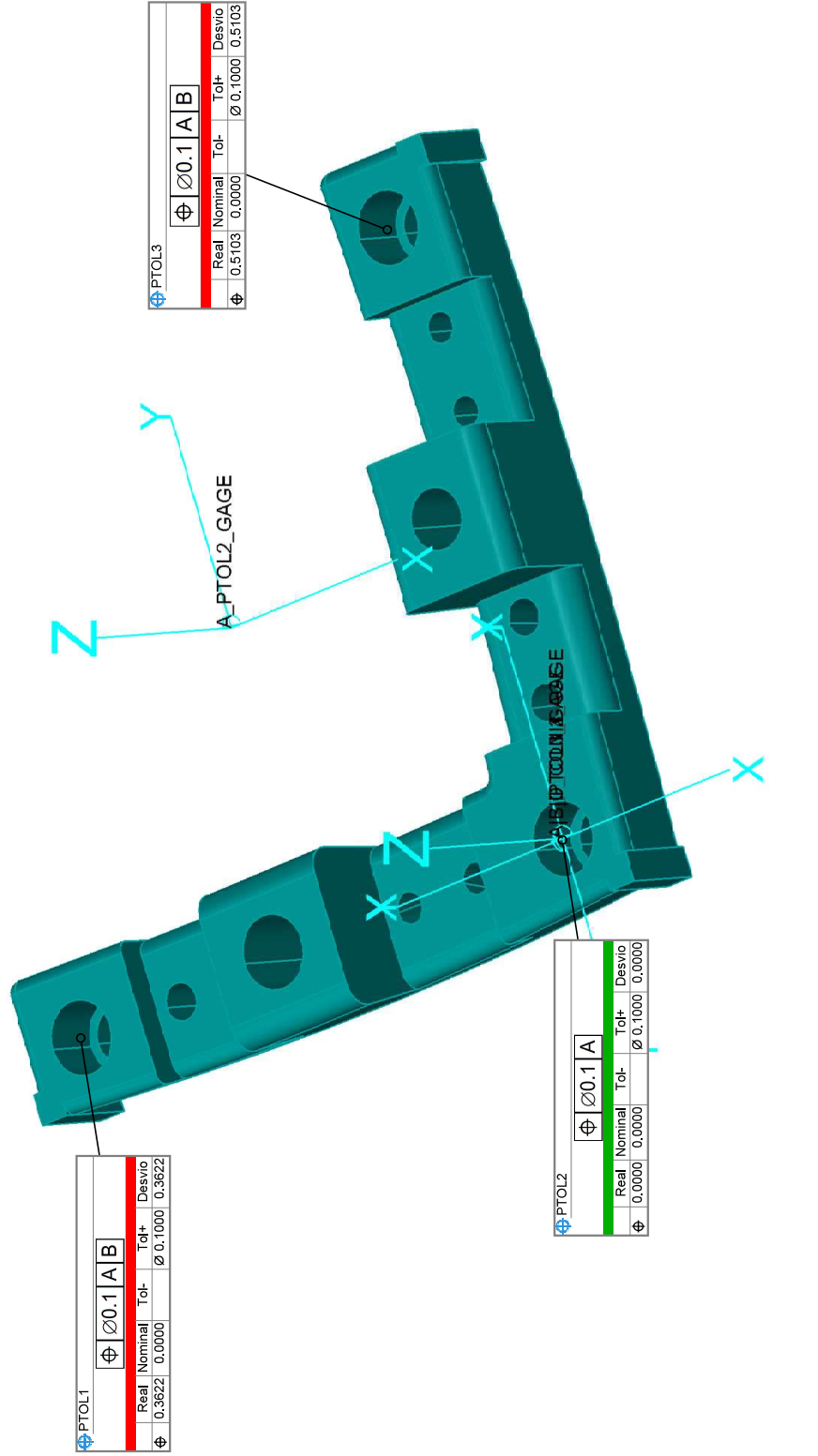
PTOL2

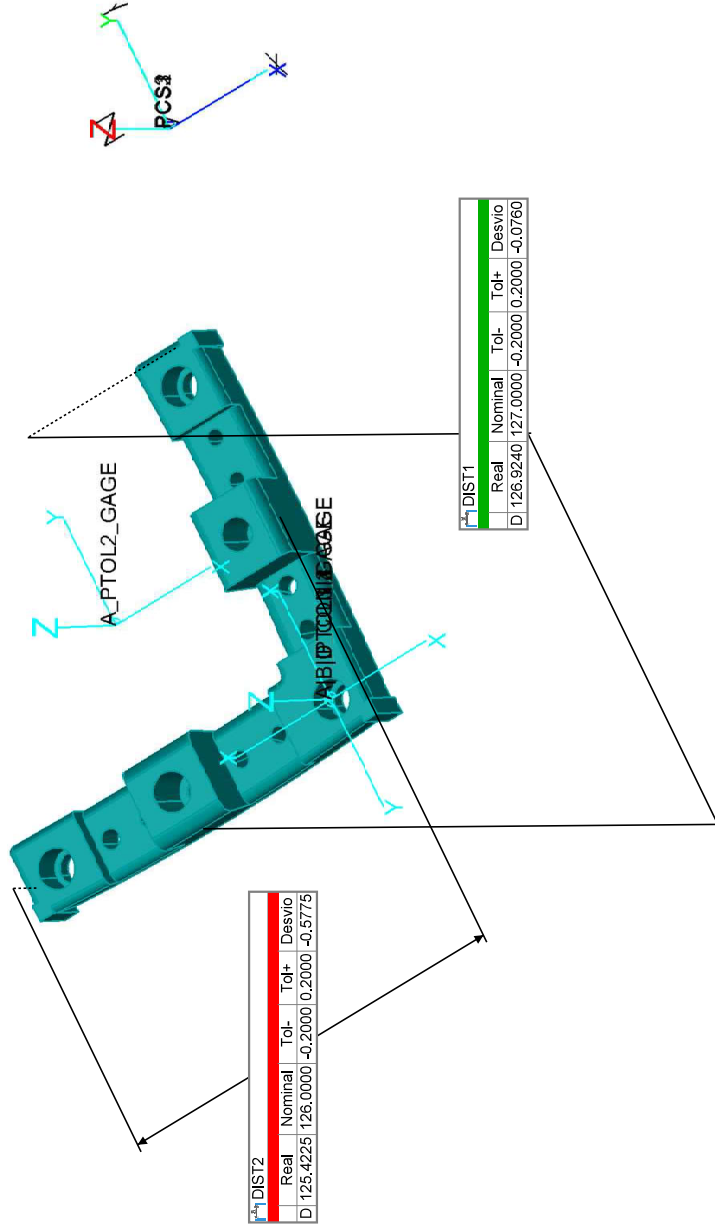
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência
Ø	0.0000	0.0000	Ø 0.1000	0.0000		
X	-8.2398	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0421	
Y	-179.9358	-180.0000	-0.1000	0.1000	0.0642	
Z	55.0260	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0013	

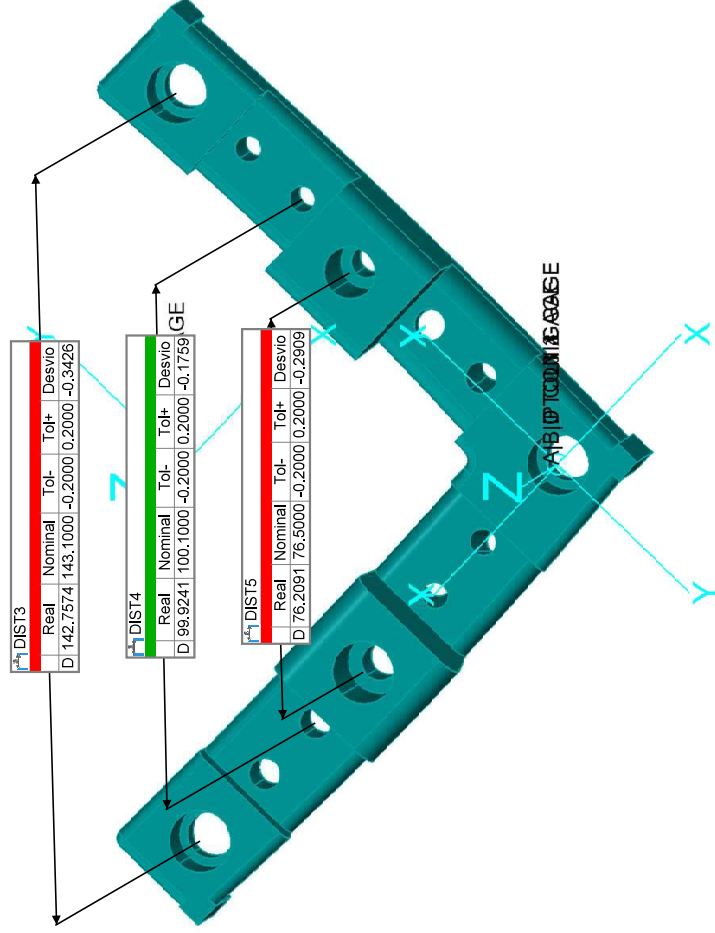
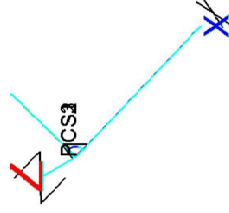
PTOL3

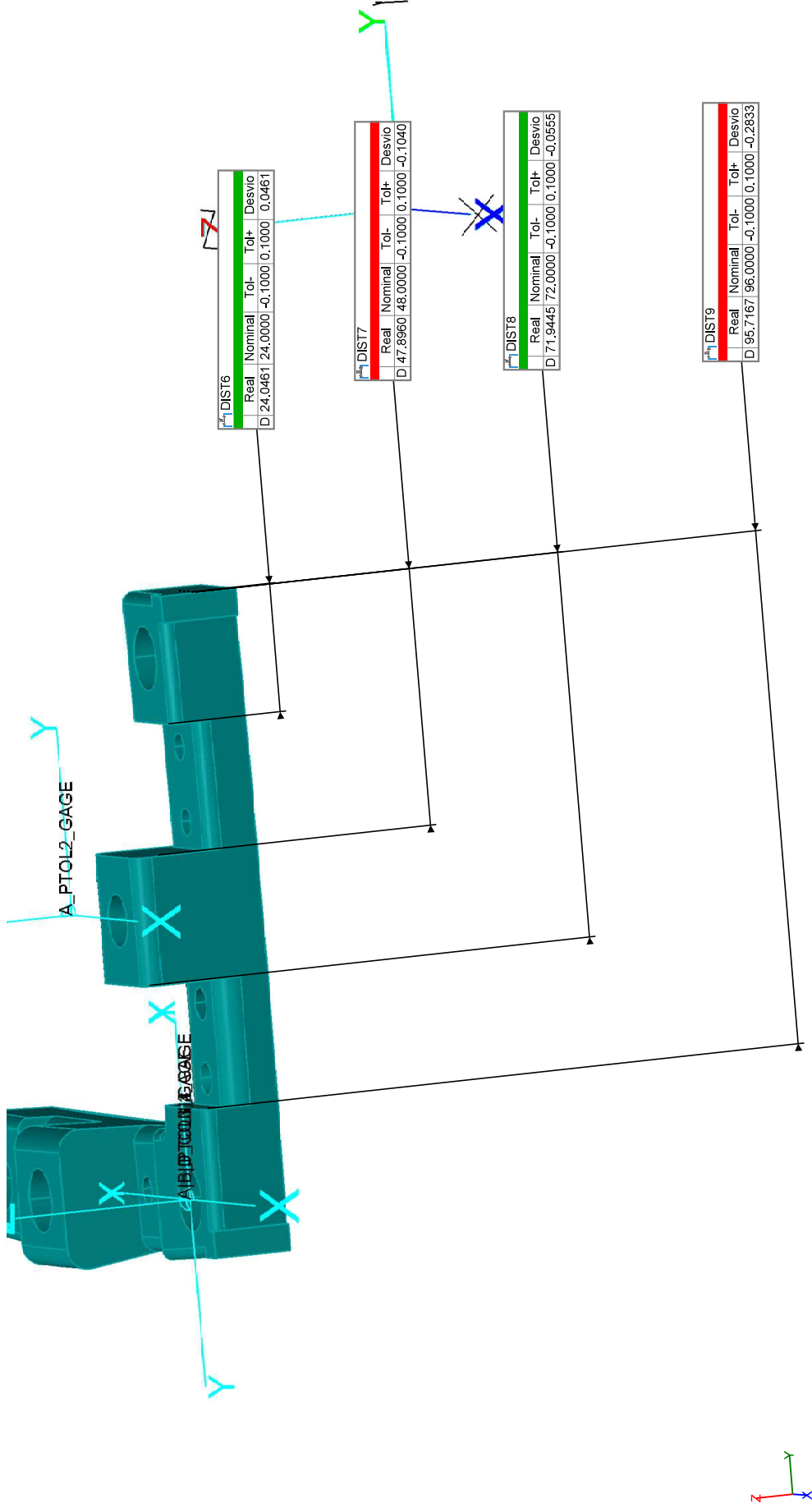
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência
Ø	0.5103	0.0000	Ø 0.1000	0.5103		
X	-8.2941	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0964	
Y	-78.9932	-78.8000	-0.1000	0.1000	-0.1932	-0.0932
Z	55.0243	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0029	

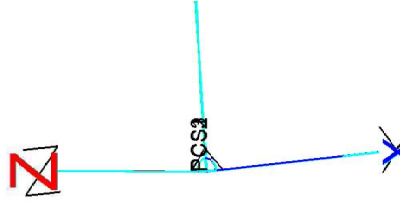
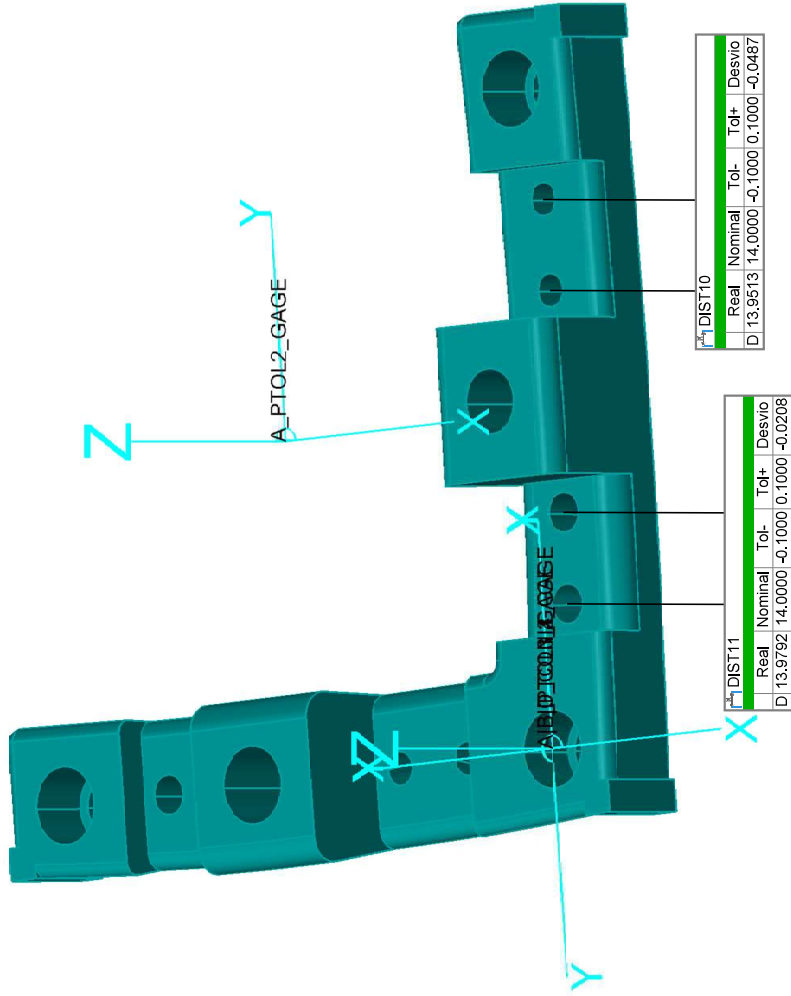


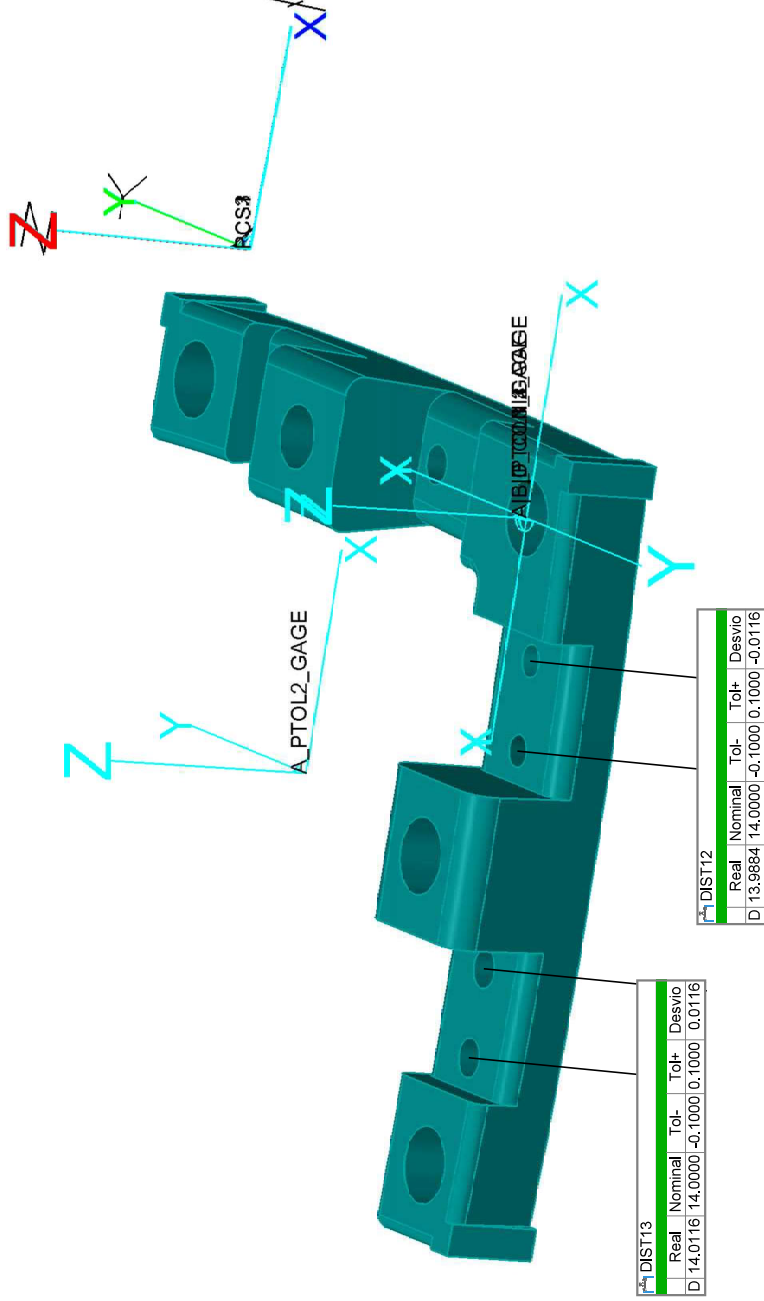


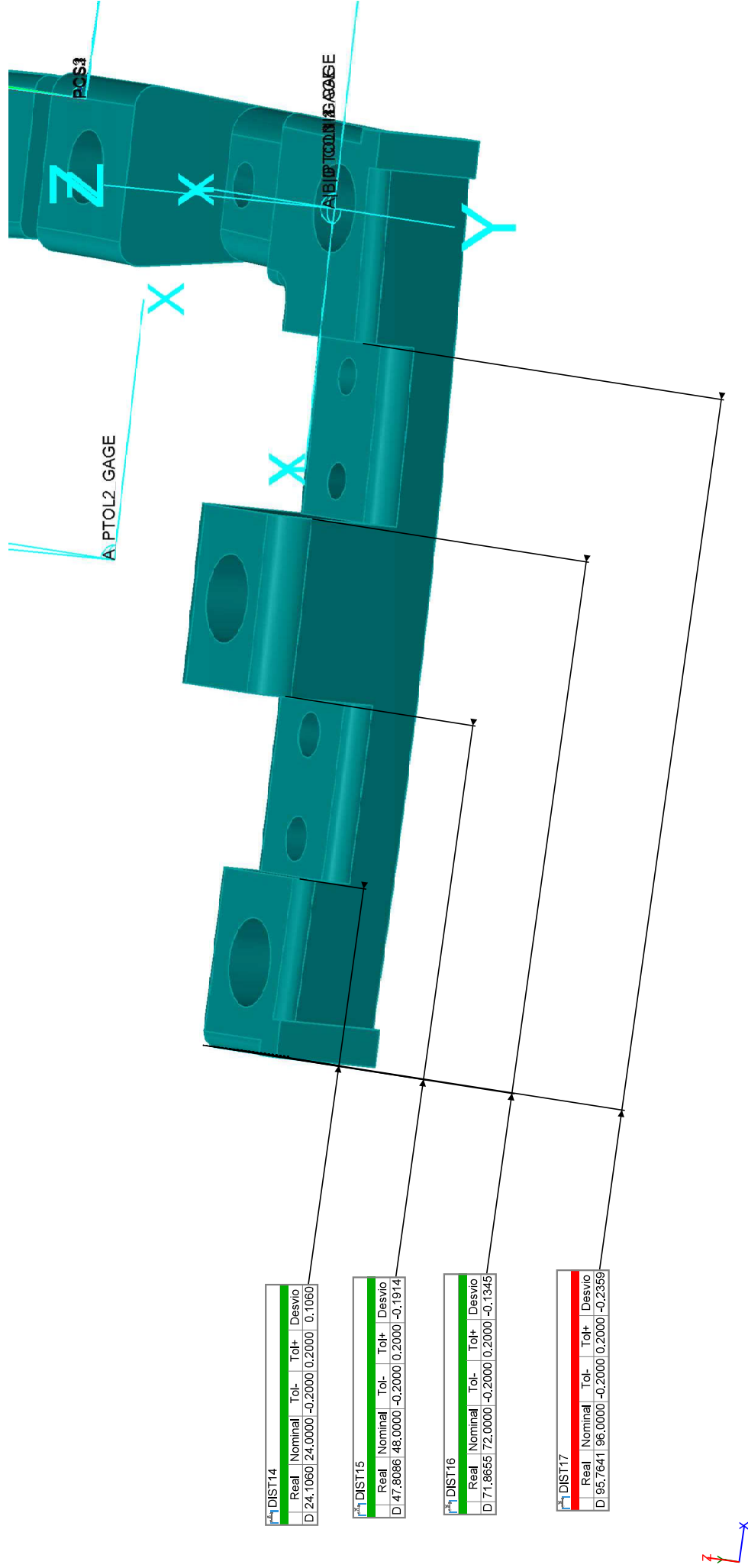


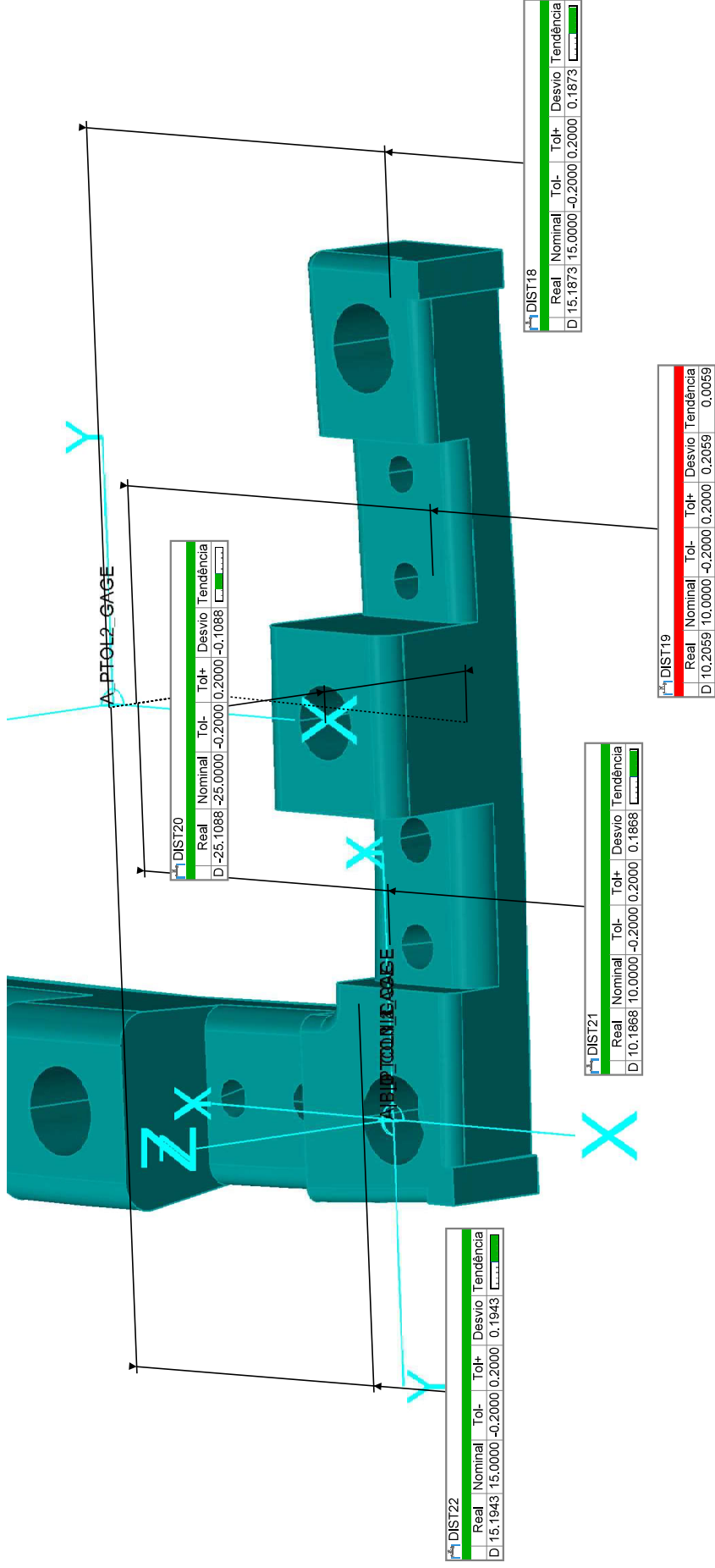


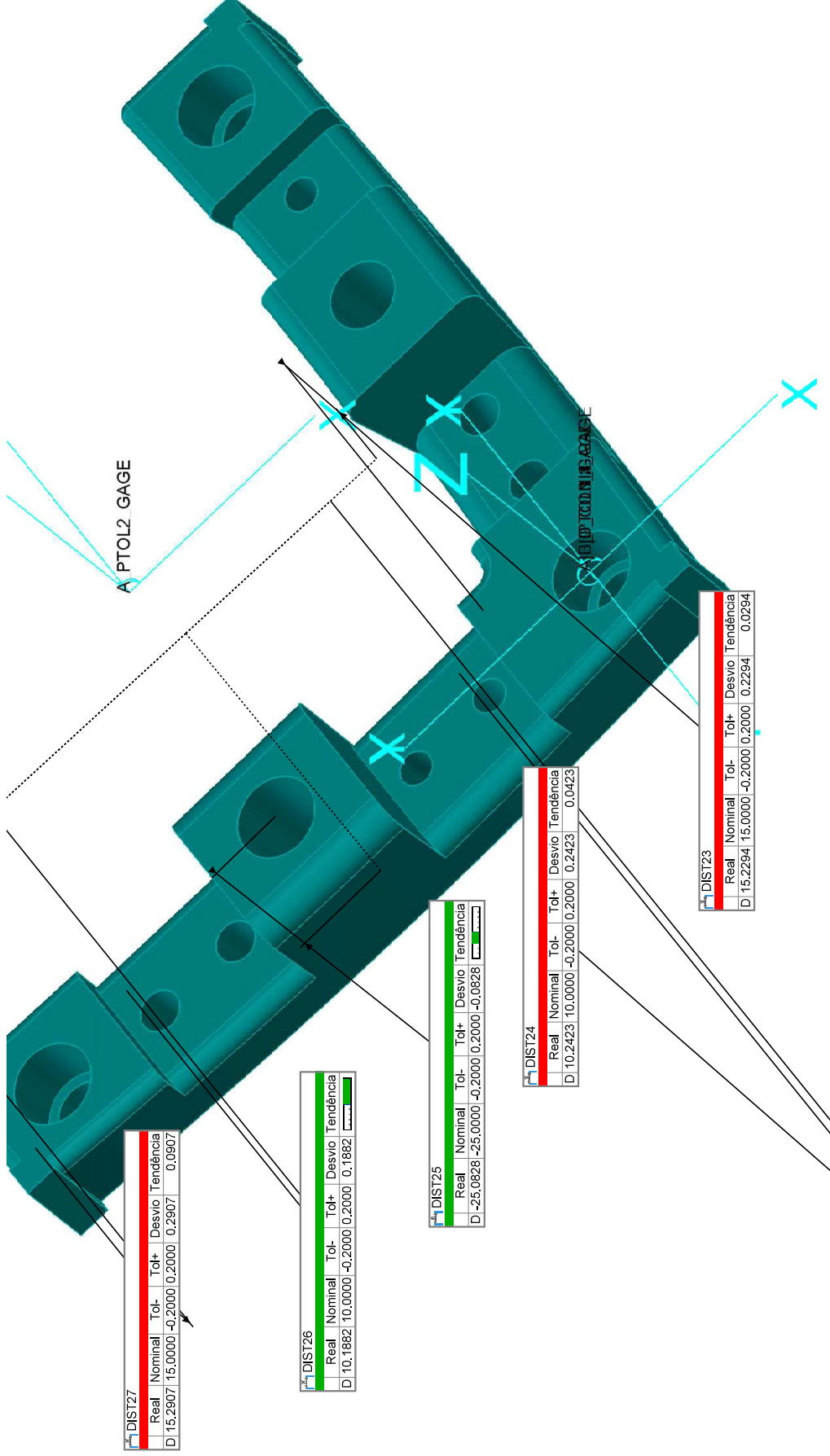


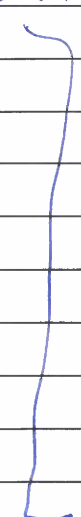










 LAUAK AEROSTRUCTURES SETÚBAL		FICHA DE CONTROLO DIMENSIONAL (FCD) DIMENSIONAL CONTROL SHEET (FCD)				 LAUAK AEROSTRUCTURES GRÂNDOLA		
Aplicável a: / Applicable to: SETÚBAL × GRÂNDOLA ×		N.º				Página 1 de 4 Page of		
IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION								
N.º de peça Part Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Quantidade Quantity -		
Designação Nomenclature		ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM				Nº Ordem Fabrico Work Order Nr. - 2022 479		
N.º de desenho Drawing Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Ref.º. Cliente Customer Refº -		
CONTROLO DIMENSIONAL / DIMENSIONAL CONTROL								
Item	Dimensões / Dimensions					Instrumento utilizado / Device		Observações / Remarks
	Natureza / Kind	Valor nominal / Nominal value	Tolerância / Tolerance	Valor medido / Measured value		Tipo / Type	N.º LAS / LAG / LAS / LAG Nr.	
				Min	Max			
19	Linear	124,2 mm	± 0,2	124,15	N/A	Paquímetro	1553	L1
19	Linear	124,2 mm	± 0,2	124,73	N/A	Paquímetro		L2
19	Linear	124,2 mm	± 0,2	124,76	N/A	Paquímetro		L3
19	Linear	124,2 mm	± 0,2	124,77	N/A	Paquímetro		L4
20	Linear	123,8 mm	± 0,2	123,73	N/A	Paquímetro		L1
20	Linear	123,8 mm	± 0,2	123,73	N/A	Paquímetro		L2
20	Linear	123,8 mm	± 0,2	123,71	N/A	Paquímetro		L3
20	Linear	123,8 mm	± 0,2	123,74	N/A	Paquímetro		L4
21	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,976	N/A	Micrómetro		3161
21	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,968	N/A	Micrómetro		L2
21	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,976	N/A	Micrómetro		L3
21	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,968	N/A	Micrómetro		L4
22	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,967	N/A	Micrómetro		L1
22	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,939	N/A	Micrómetro		L2
22	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,948	N/A	Micrómetro		L3
22	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,957	N/A	Micrómetro		L4
23	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,952	N/A	Micrómetro		L1
23	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,987	N/A	Micrómetro	L2	
23	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,971	N/A	Micrómetro		L3
23	Ø	12 H7	+0,018 / 0	11,961	N/A	Micrómetro		5161
Tolerâncias gerais General tolerances N/A								
Observações / Remarks sem placa e sem Nomenclatura								
Data da inspeção Inspection date					O inspetor (rubrica e carimbo) The inspector (signature and stamp)			
								

 LAUAK AEROSTRUCTURES SETÚBAL		FICHA DE CONTROLO DIMENSIONAL (FCD) DIMENSIONAL CONTROL SHEET (FCD)				 LAUAK AEROSTRUCTURES GRÂNDOLA		
Aplicável a: / Applicable to: SETÚBAL × GRÂNDOLA ×		N.º				Página 2 de 4 Page of		
IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION								
N.º de peça Part Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Quantidade Quantity		
Designação Nomenclature		ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM				Nº Ordem Fabrico Work Order Nr. - 2022474		
N.º de desenho Drawing Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Ref.º. Cliente Customer Refº		
CONTROLO DIMENSIONAL / DIMENSIONAL CONTROL								
Item	Dimensões / Dimensions					Instrumento utilizado / Device		Observações / Remarks
	Natureza / Kind	Valor nominal / Nominal value	Tolerância / Tolerance	Valor medido / Measured value		Tipo / Type	N.º LAS / LAG / LAS / LAG Nr.	
				Min	Max			
24	Ø	12 H7	+0,018 0	11,916	N/A	Micrómetro	3761	L1
24	Ø	12 H7	+0,018 0	11,948	N/A	Micrómetro		L2
24	Ø	12 H7	+0,018 0	11,916	N/A	Micrómetro		L3
24	Ø	12 H7	+0,018 0	11,940	N/A	Micrómetro		L4
25	Ø	10 H7	+0,015 0	9,969	N/A	Micrómetro		L1
25	Ø	10 H7	+0,015 0	10,014	N/A	Micrómetro		L2
25	Ø	10 H7	+0,015 0	9,946	N/A	Micrómetro		L3
25	Ø	10 H7	+0,015 0	9,940	N/A	Micrómetro	3161	L4
26	Ø	4x5,1mm	+0,05 0	4,99	N/A	Paquímetro	1553	L1
26	Ø	4x5,1mm	+0,05 0	4,99	N/A	Paquímetro		L2
26	Ø	4x5,1mm	+0,05 0	4,99	N/A	Paquímetro		L3
26	Ø	4x5,1mm	+0,05 0	5,00	N/A	Paquímetro		L4
27	Ø	4x6,1mm	+0,05 0	5,96	N/A	Paquímetro		L1
27	Ø	4x6,1mm	+0,05 0	5,98	N/A	Paquímetro		L2
27	Ø	4x6,1mm	+0,05 0	5,98	N/A	Paquímetro		L3
27	Ø	4x6,1mm	+0,05 0	5,96	N/A	Paquímetro	1553	L4
28	Raio	4 mm	+1 0	4	4	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
29	Raio	4 mm	+1 0	4	4	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
30	Raio	2,5 mm	+1 0	2,5	2,5	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
31	Raio	2,5 mm	+1 0	2,5	2,5	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
Tolerâncias gerais General tolerances N/A								
Observações / Remarks sem data e sem tratamento								
Data da inspeção Inspection date					O inspetor (rubrica e carimbo) The inspector (signature and stamp)			

		FICHA DE CONTROLO DIMENSIONAL (FCD) DIMENSIONAL CONTROL SHEET (FCD)						
Aplicável a: / Applicable to: SETÚBAL ☒ GRÂNDOLA ☒		N.º				Página 3 de 4 Page of		
IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION								
N.º de peça Part Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Quantidade Quantity		
Designação Nomenclature		ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM				Nº Ordem Fabrico Work Order Nr.		
N.º de desenho Drawing Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Ref. Cliente Customer Refº		
CONTROLO DIMENSIONAL / DIMENSIONAL CONTROL								
Item	Dimensões / Dimensions					Instrumento utilizado / Device		Observações / Remarks
	Natureza / Kind	Valor nominal / Nominal value	Tolerância / Tolerance	Valor medido / Measured value		Tipo / Type	N.º LAS / LAG / LAS / LAG Nr.	
				Min	Max			
32	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
33	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
34	Raio	3 mm	+1 0	3	3	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
35	Raio	3 mm	+1 0	3	3	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
36	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
37	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
38	Raio	3 mm	+1 0	3	3	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
39	Raio	3 mm	+1 0	3	3	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
40	Raio	2,5 mm	+1 0	2,5	2,5	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
41	Raio	2,5 mm	+1 0	2,5	2,5	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
42	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
43	Raio	2 mm	+1 0	2	2	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
44	Raio	4 mm	+1 0	4	4	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
45	Raio	4 mm	+1 0	4	4	Escantilhão de raios	N/A	L1, L2, L3 e L4
46	∠	8°	± 1°	7,5°	N/A	Suta	3692	L1
46	∠	8°	± 1°	8°	N/A	Suta	3692	L2
46	∠	8°	± 1°	7,5°	N/A	Suta		L3
46	∠	8°	± 1°	8°	N/A	Suta		L4
47	∠	2,5°	± 1°	2,5°	N/A	Suta		L1
47	∠	2,5°	± 1°	2,5°	N/A	Suta	3692	L2
Tolerâncias gerais General tolerances								
N/A								
Observações / Remarks Sem placa e sem tratamento								
Data da inspeção Inspection date				O inspetor (rubrica e carimbo) The inspector (signature and stamp)				
								

 LAUAK AEROSTRUCTURES SETÚBAL		FICHA DE CONTROLO DIMENSIONAL (FCD) DIMENSIONAL CONTROL SHEET (FCD)				 LAUAK AEROSTRUCTURES GRÂNDOLA		
Aplicável a: / Applicable to: SETÚBAL × GRÂNDOLA ×		N.º				Página 4 de 4 Page of		
IDENTIFICAÇÃO / IDENTIFICATION								
N.º de peça Part Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Quantidade Quantity —		
Designação Nomenclature		ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM				Nº Ordem Fabrico Work Order Nr. 2022474		
N.º de desenho Drawing Nr.		ADAPTED ARTIFACT				Ref. Cliente Customer Refº —		
CONTROLO DIMENSIONAL / DIMENSIONAL CONTROL								
Item	Dimensões / Dimensions					Instrumento utilizado / Device		Observações / Remarks
	Natureza Kind	Valor nominal Nominal value	Tolerância Tolerance	Valor medido Measured value		Tipo Type	N.º LAS / LAG LAS / LAG Nr.	
				Min	Max			
47	∠	2,5°	± 1°	2,75	N/A	Suta	3692	L3
47	∠	2,5°	± 1°	2°	N/A	Suta		L4
48	∠	7,5°	± 1°	7,6°	N/A	Suta		L1
48	∠	7,5°	± 1°	7,5°	N/A	Suta		L2
48	∠	7,5°	± 1°	7,25	N/A	Suta		L3
48	∠	7,5°	± 1°	5,7°	N/A	Suta		L4
49	∠	5°	± 1°	5,5°	N/A	Suta		L1
49	∠	5°	± 1°	5,0°	N/A	Suta		L2
49	∠	5°	± 1°	5,0°	N/A	Suta		L3
49	∠	5°	± 1°	5,0°	N/A	Suta		L4
50	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L1
50	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L2
50	∠	90°	± 1°	89,5°	N/A	Suta		L3
50	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L4
51	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L1
51	∠	90°	± 1°	90°	N/A	Suta		L2
51	∠	90°	± 1°	89,5°	N/A	Suta		L3
51	∠	90°	± 1°	89,5°	N/A	Suta	3692	L4
Tolerâncias gerais General tolerances N/A								
Observações / Remarks sem placa e sem tratamento								
Data da inspeção Inspection date					O inspetor (rubrica e carimbo) The inspector (signature and stamp)			

Anexo IV

Relatórios de Controlo Dimensional Dos Artefactos Com Pós-Tratamento Superficial

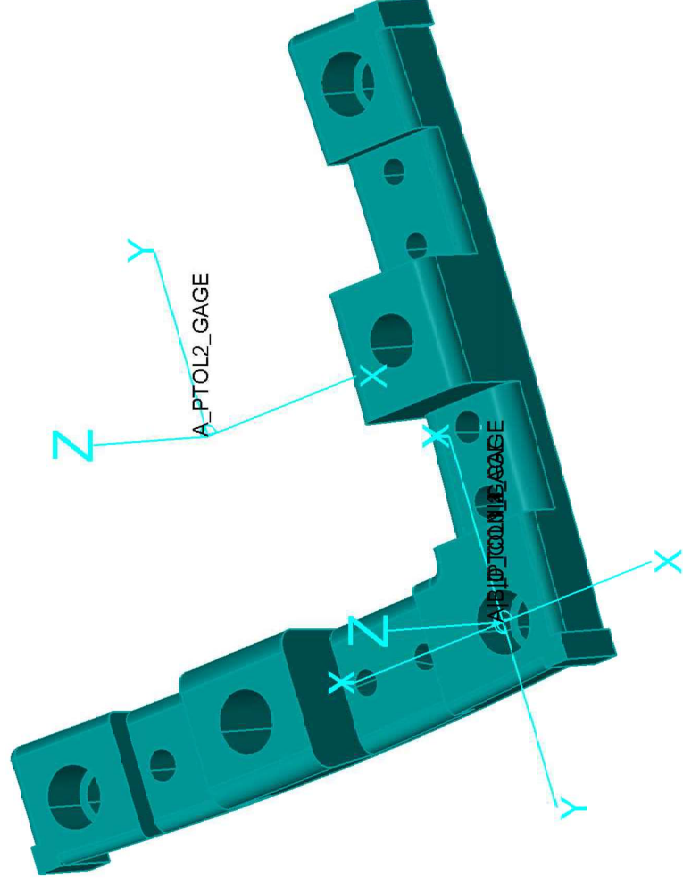
No anexo A.4 é apresentado os relatórios de controlo dimensional realizados aos artefactos com o pós-tratamento superficial realizado.

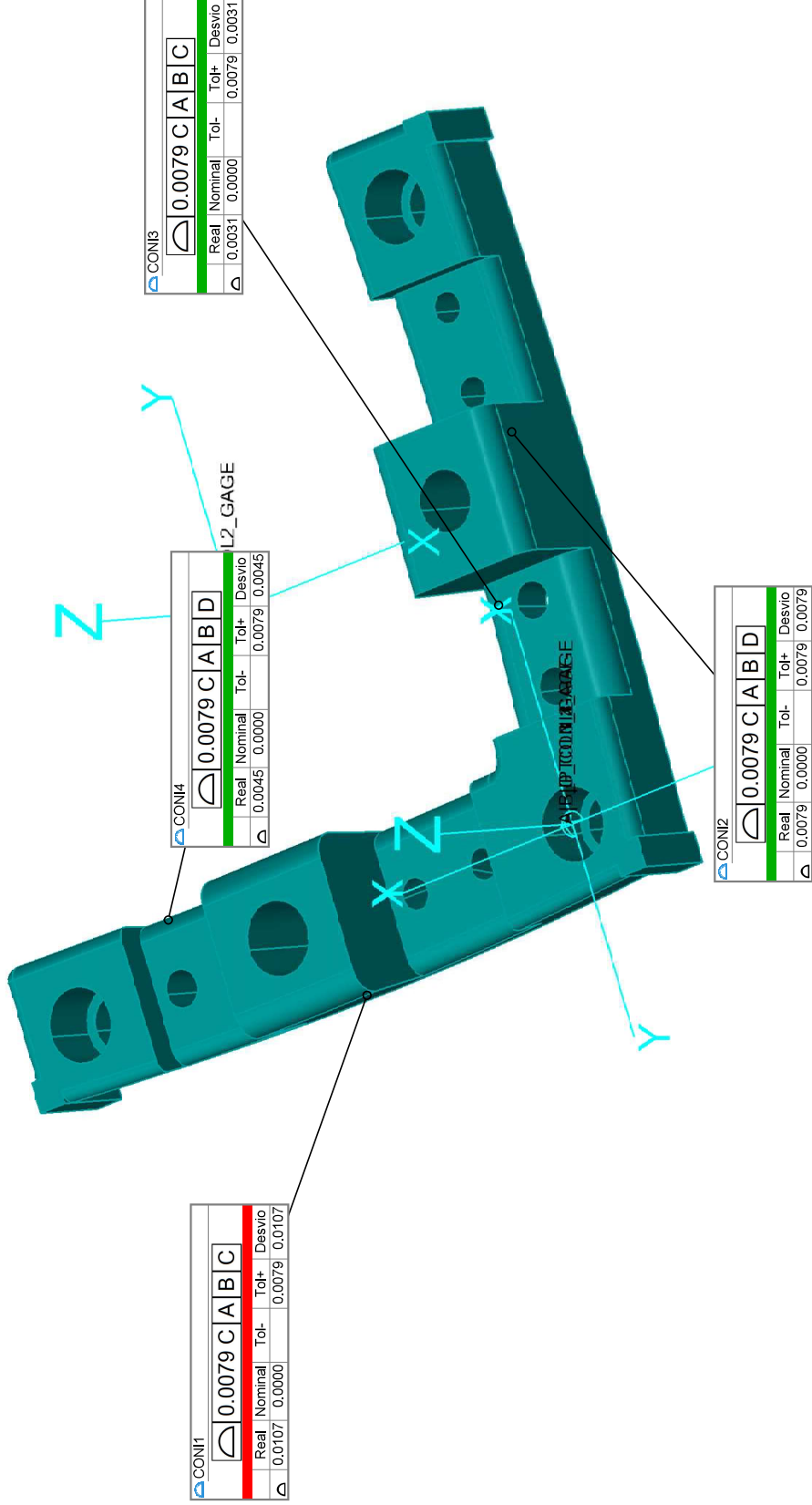
IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT

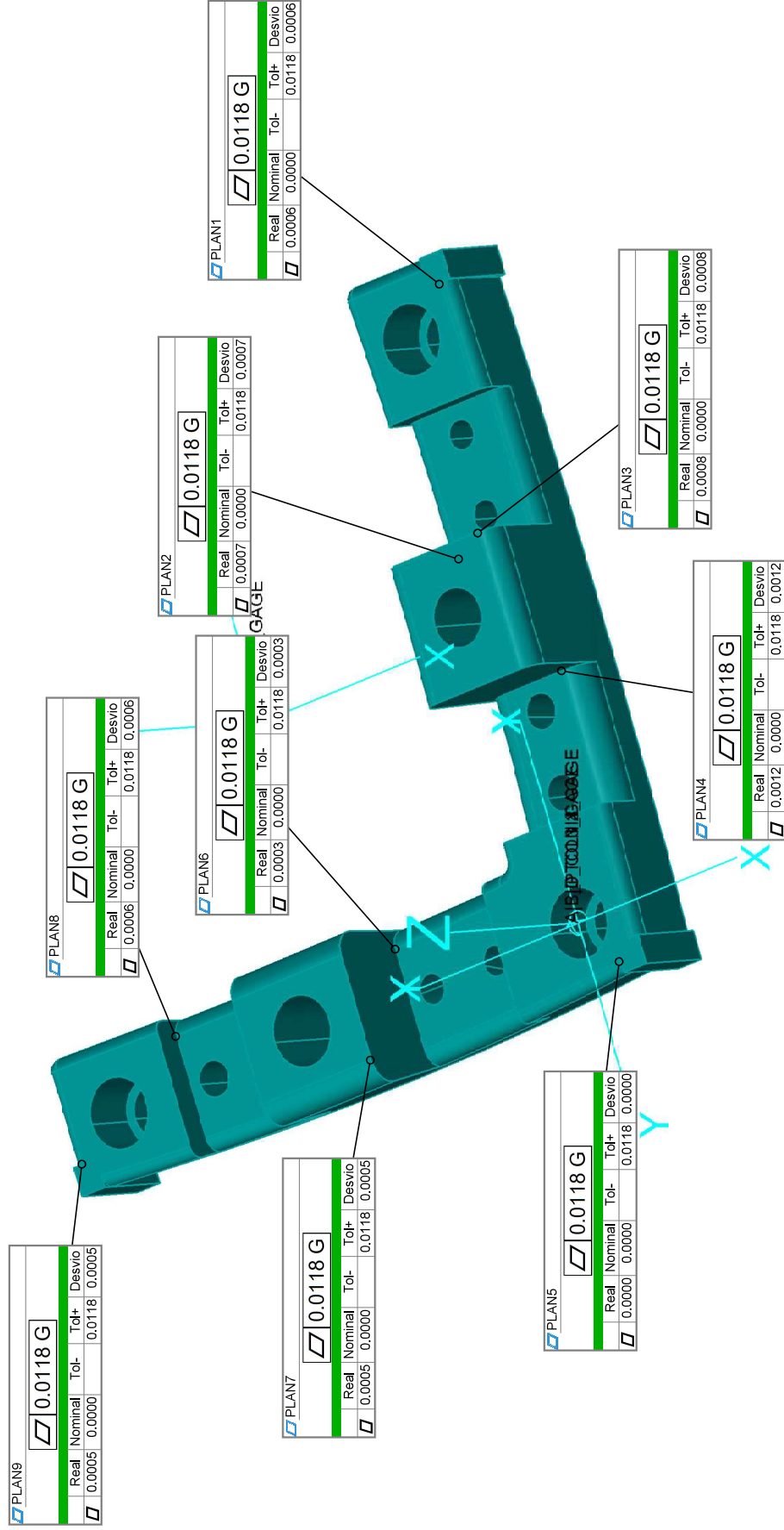
Equipamento / Equipment	Marca / Marking	Modelo / Model	Nº de Série/ Serial nr.	Nº EMM / MME nr.	Operador / Operator
CMM	COORD3METRO...	KROMOS NT	04686	LAG 270	Bruno Jorge

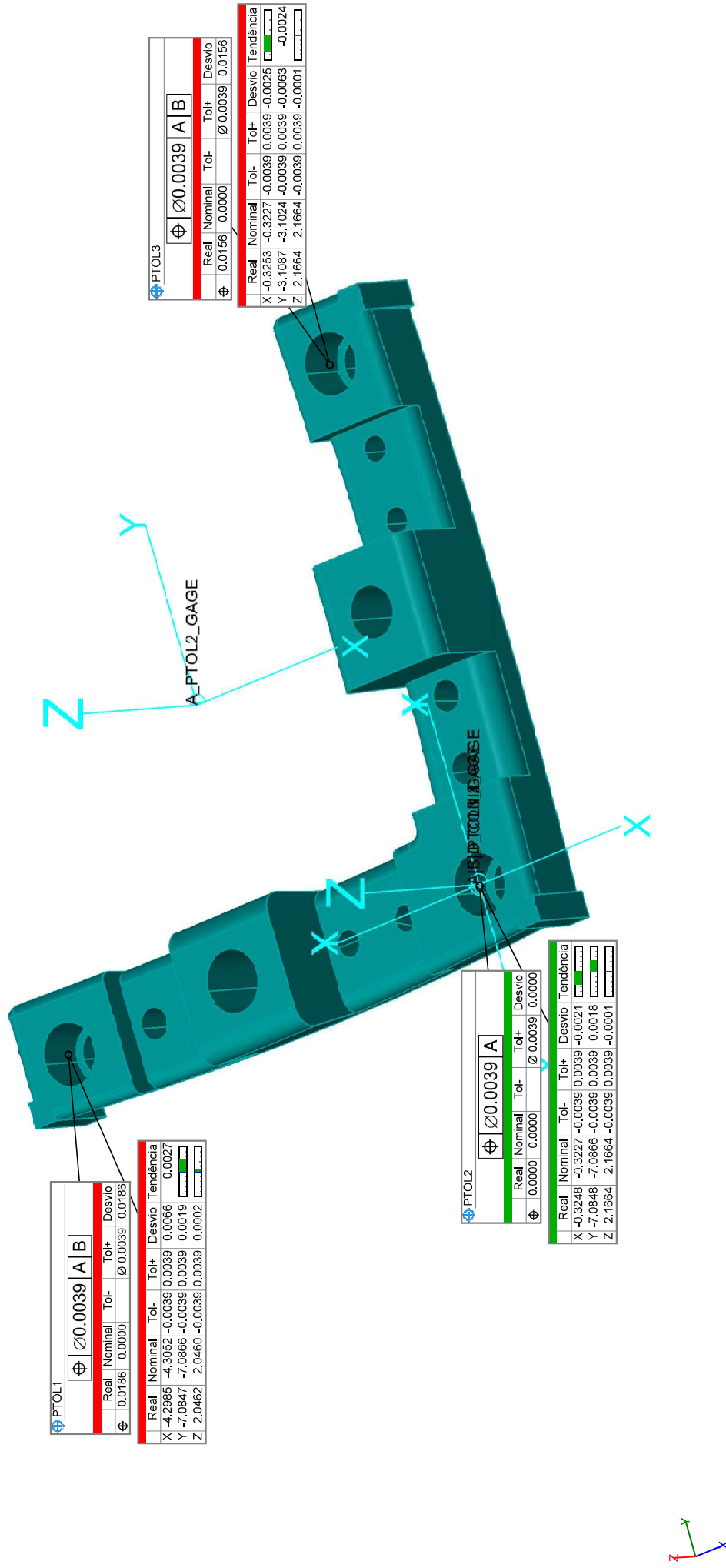
IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION

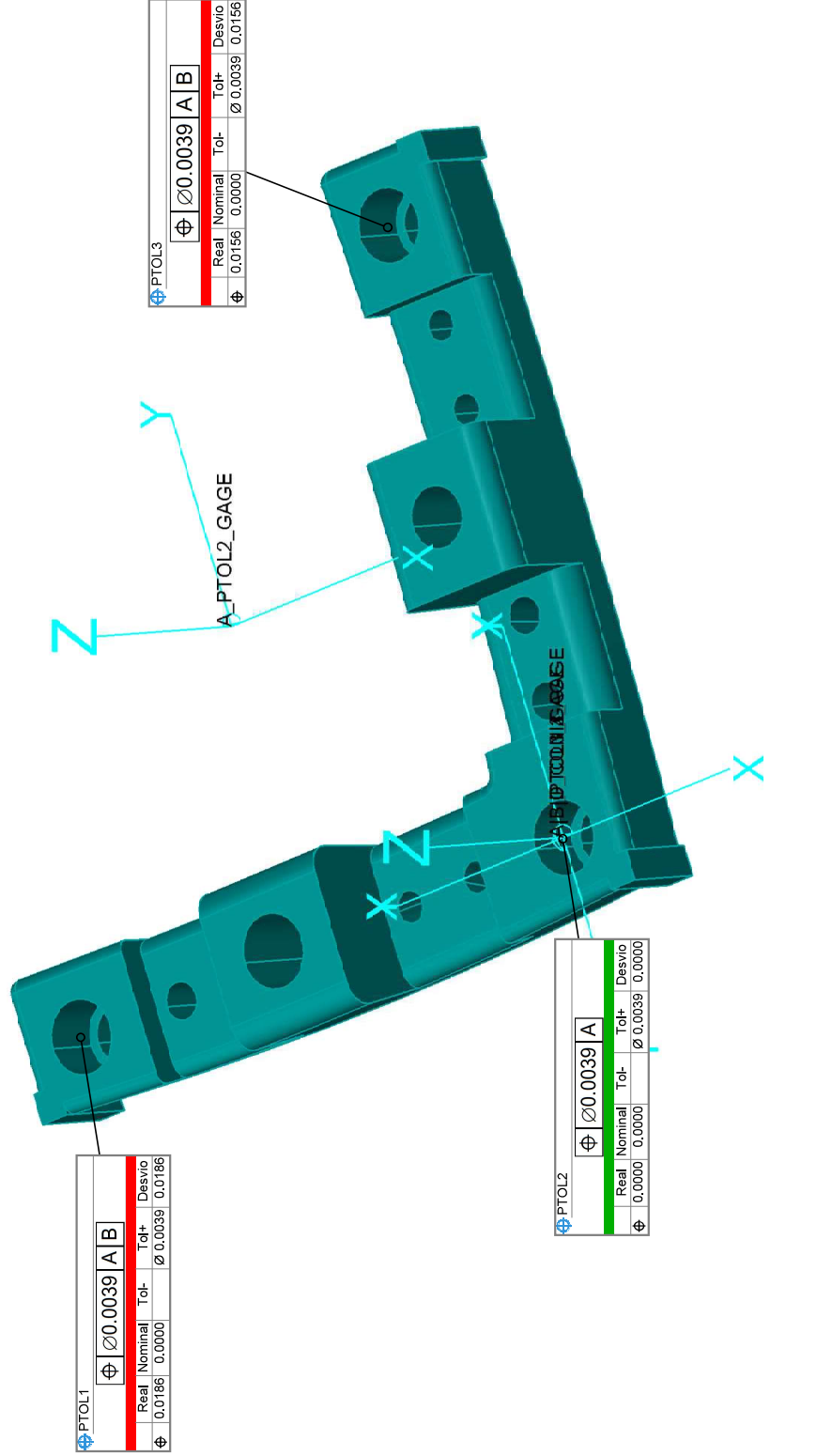
Nº Peça / Part Nr.	Designação / Designation	Nº de OF / Work Order Nr.	Data / Date
ADAPTED ARTIFACT	ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (01)	2 022 479	04/12/25 12:51:15

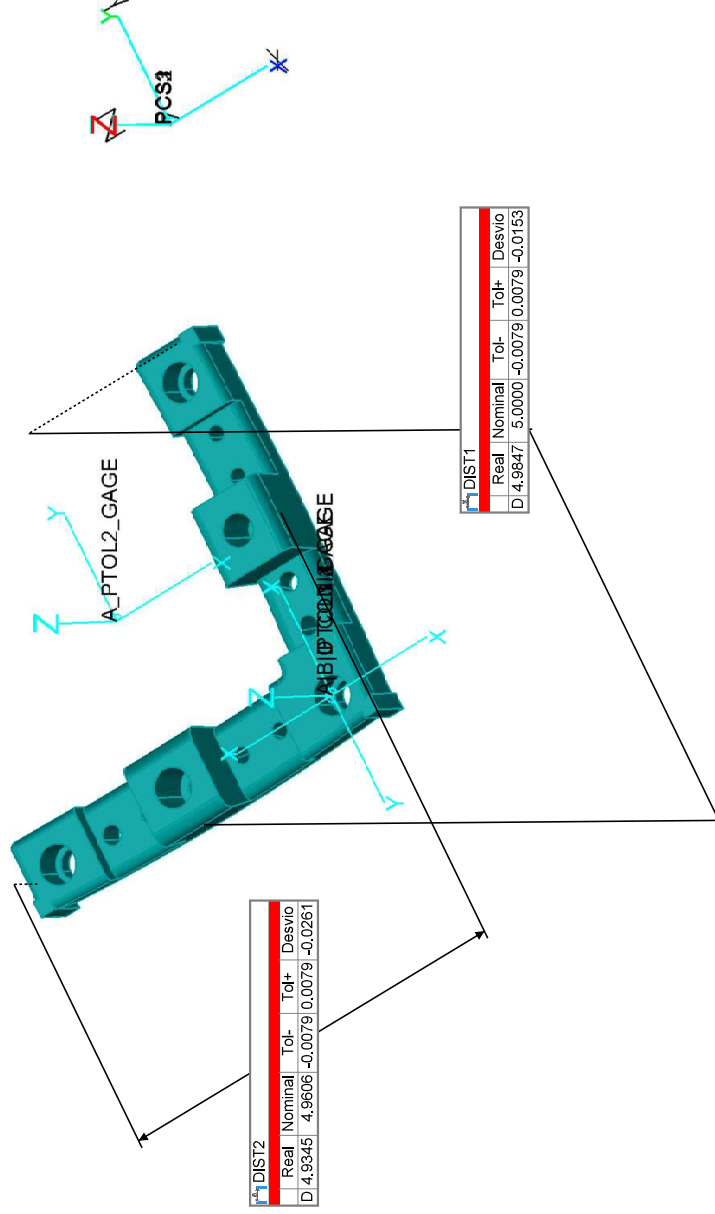












RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

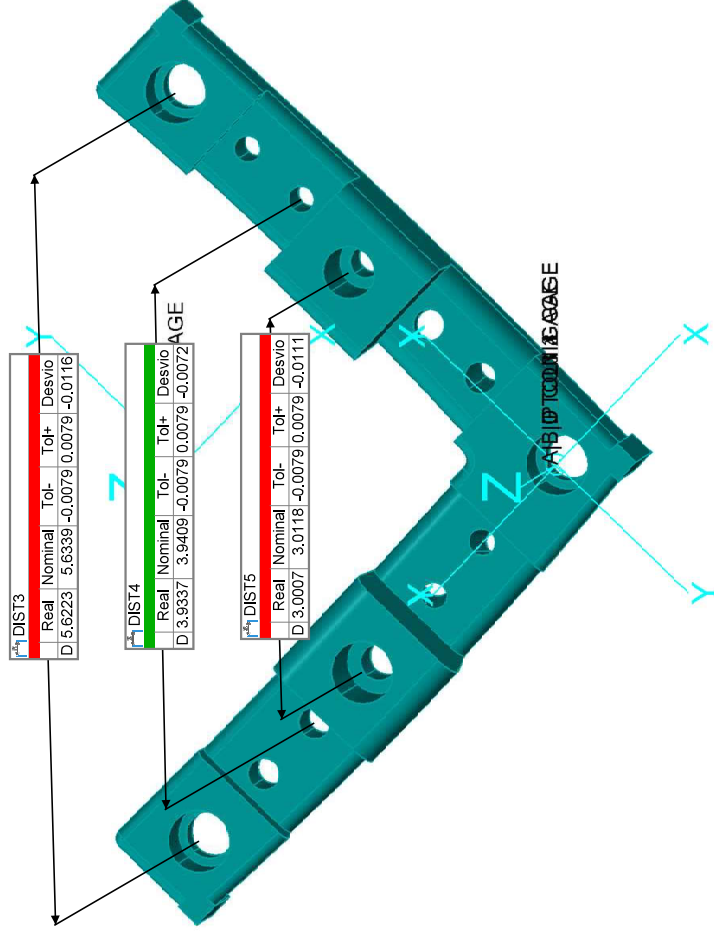
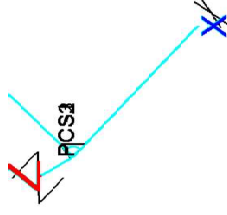
Nº

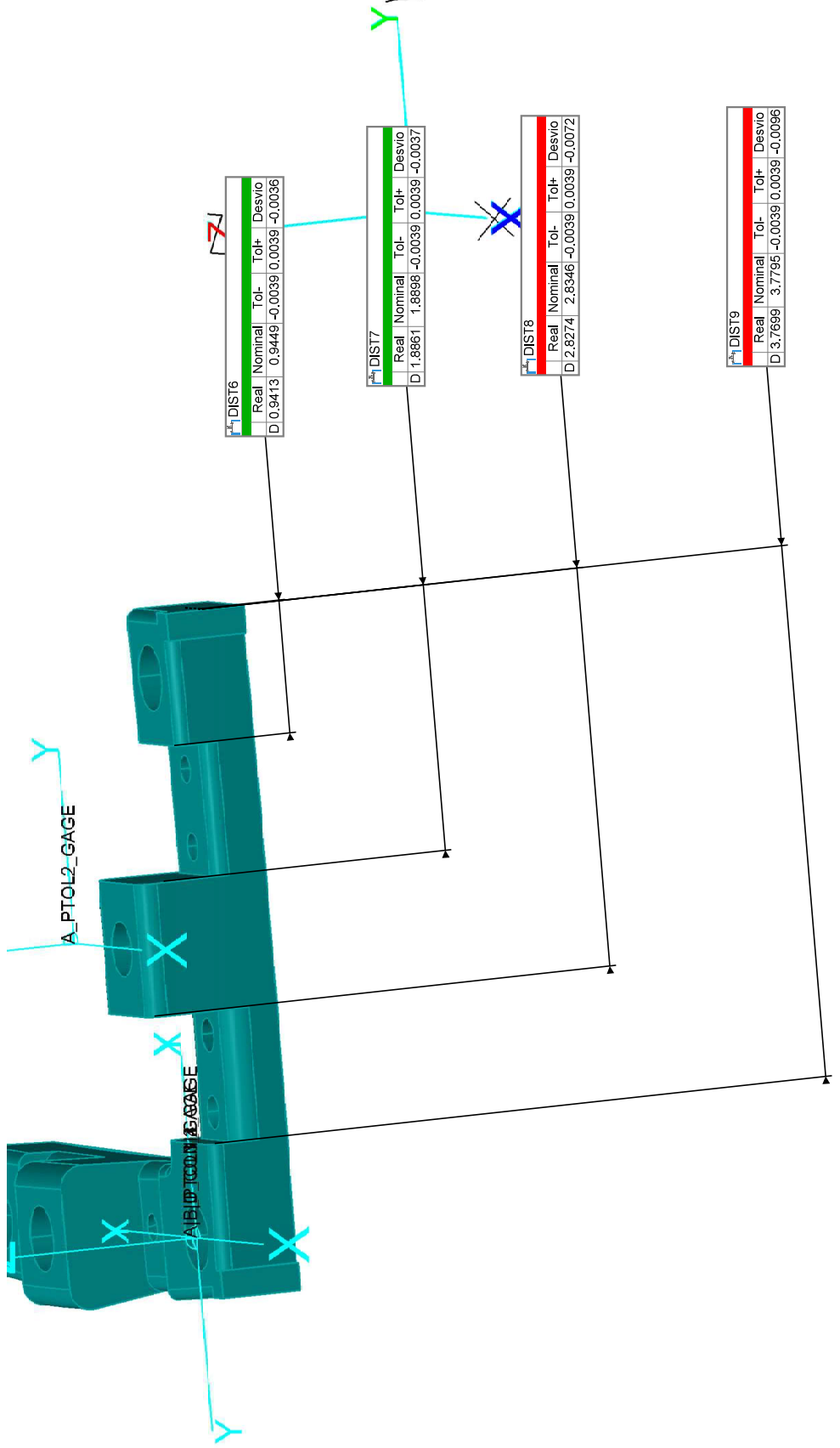
4826_25-LAG

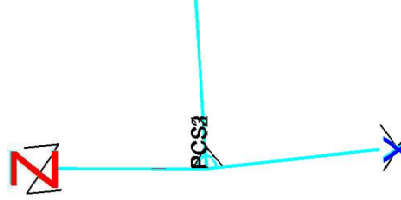
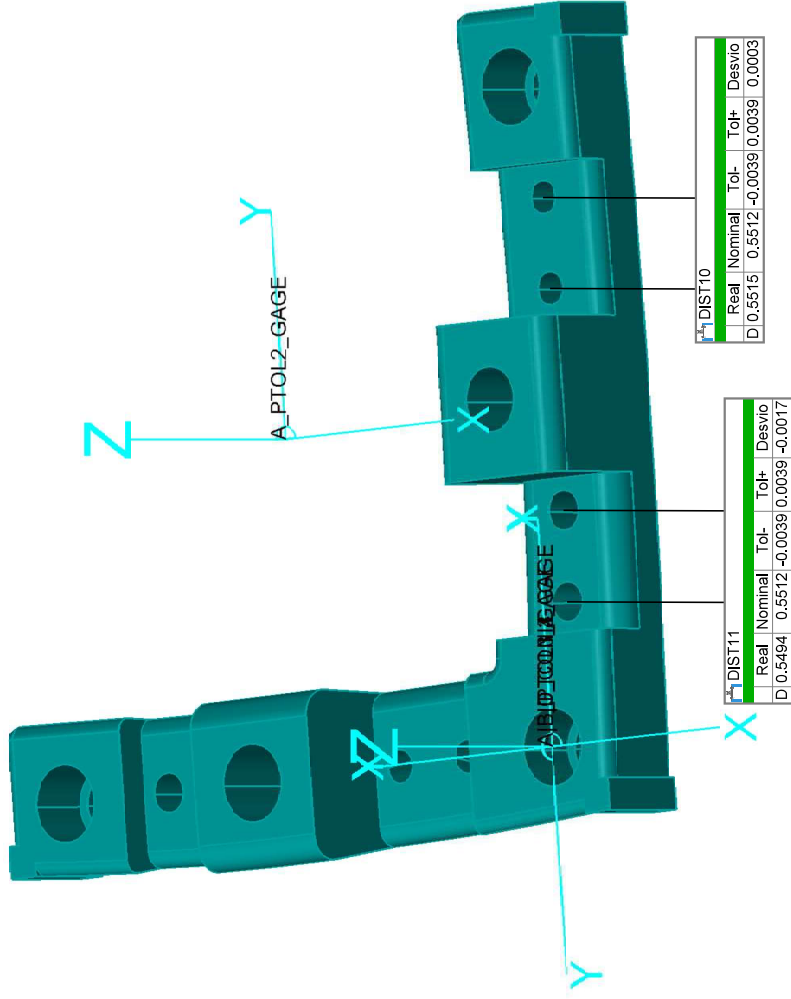
Pág.

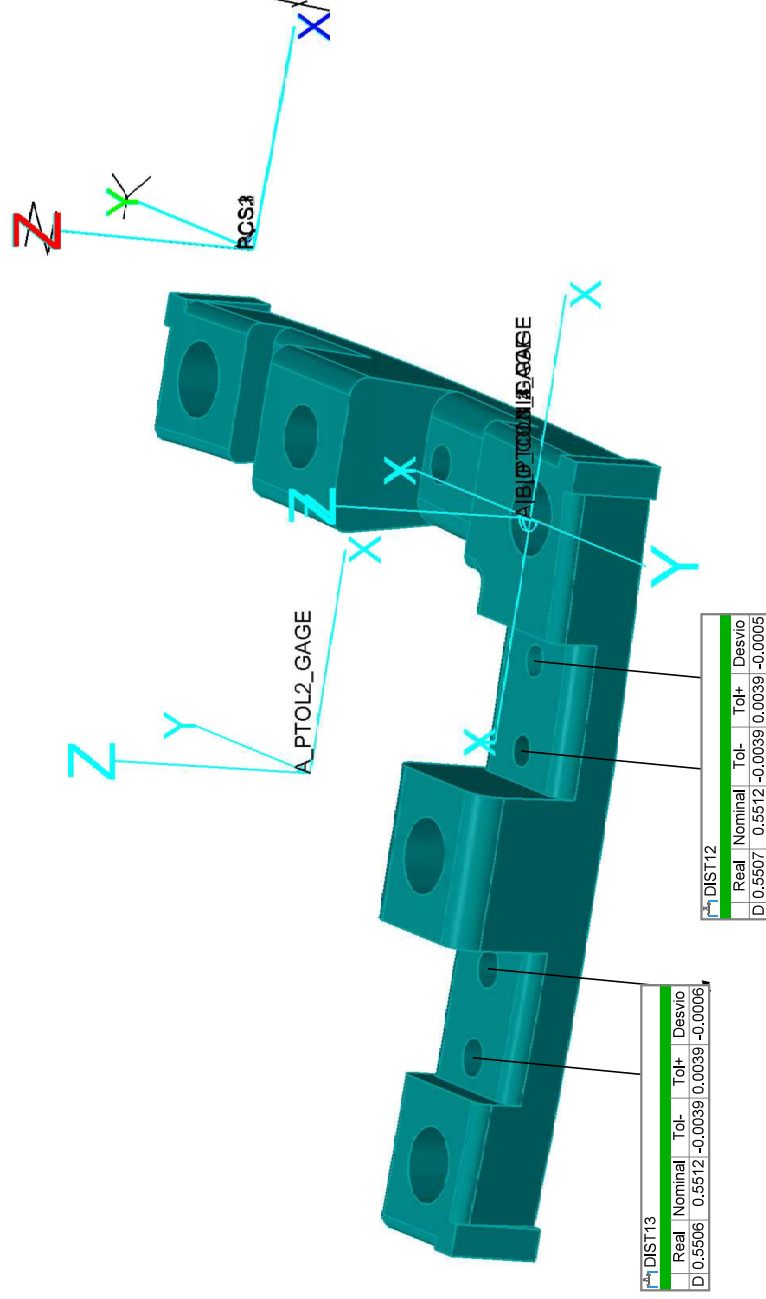
Page

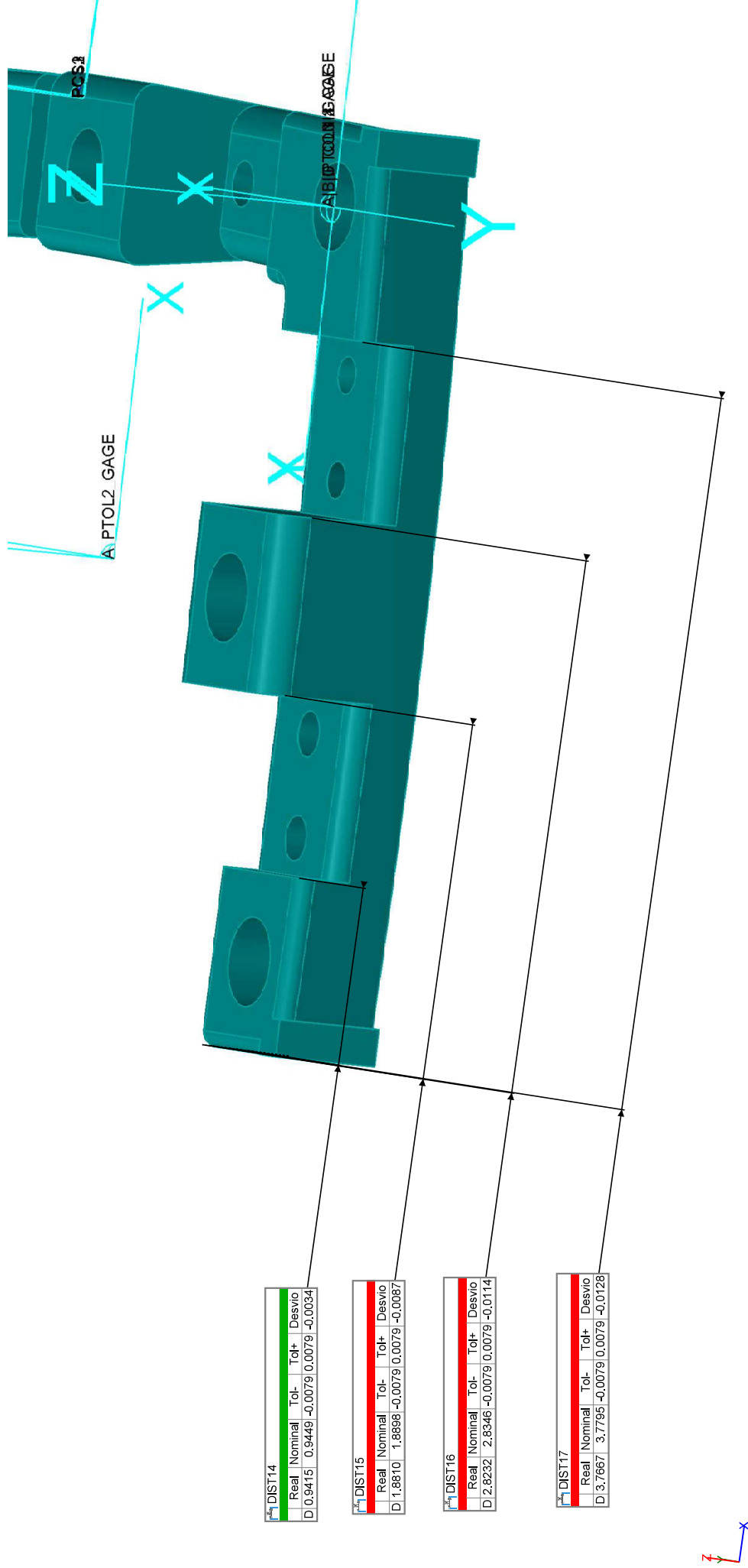
7 / 13

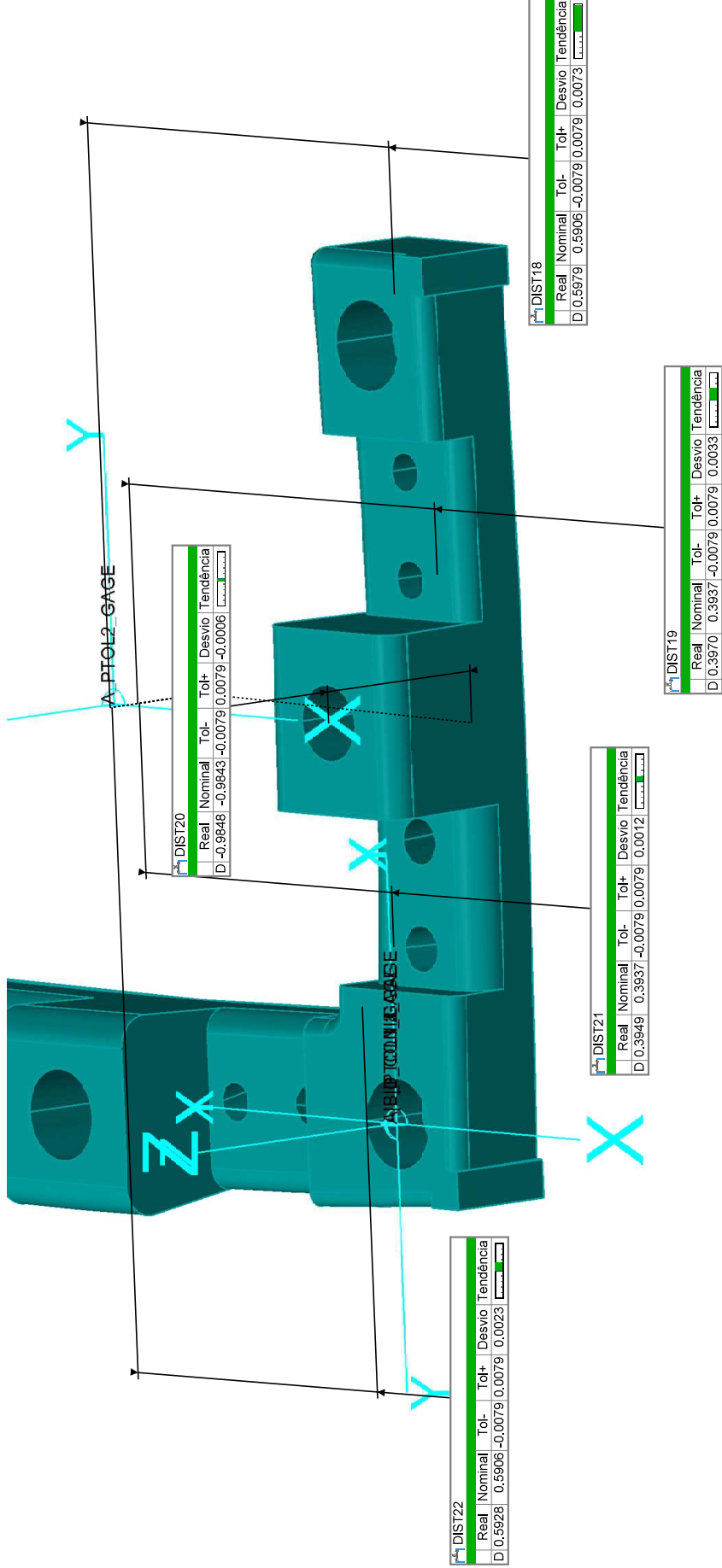


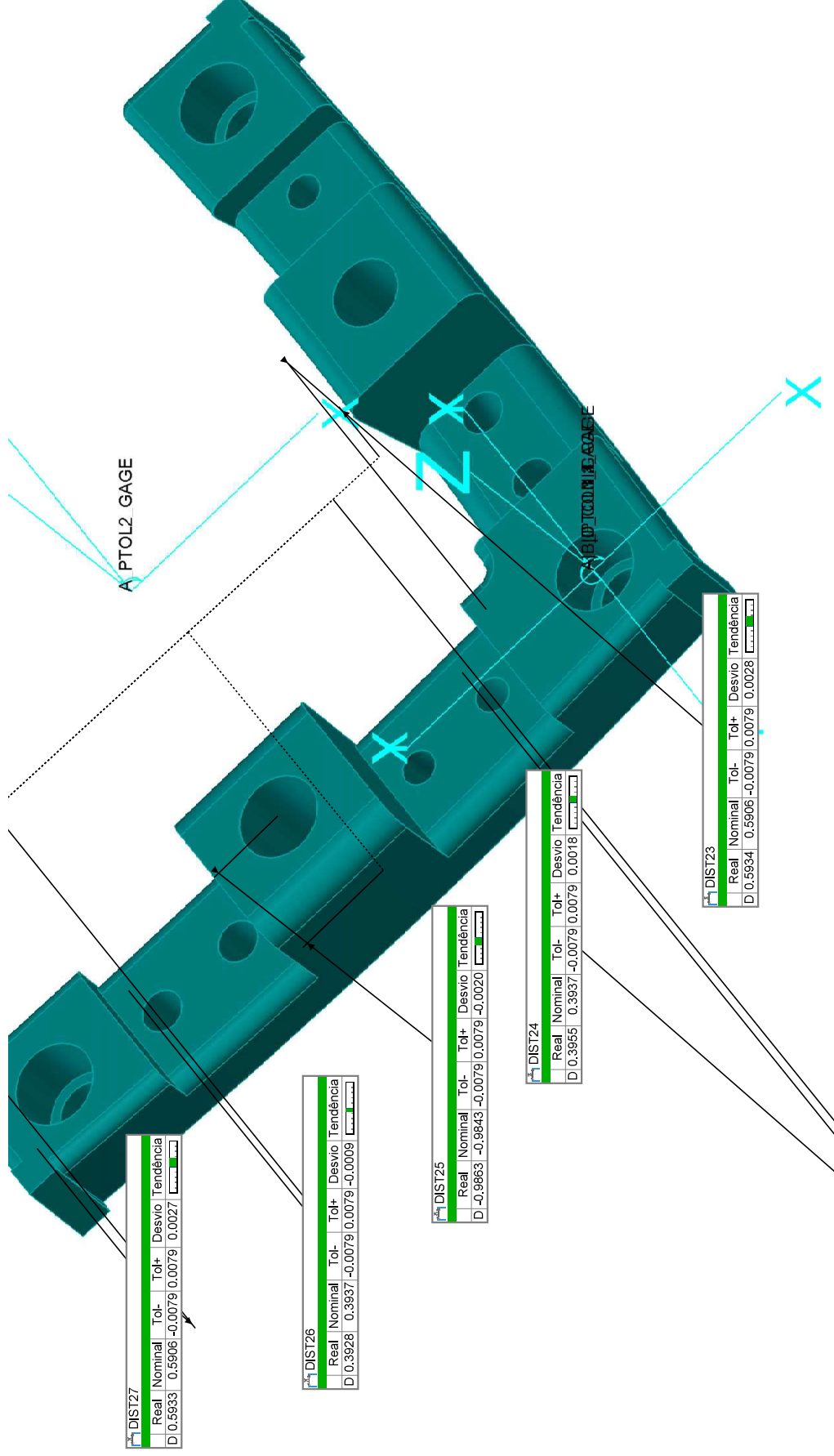














RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL

REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

Comentário: Vari...

Nº

4829_25-LAG

Pág.

1 / 13

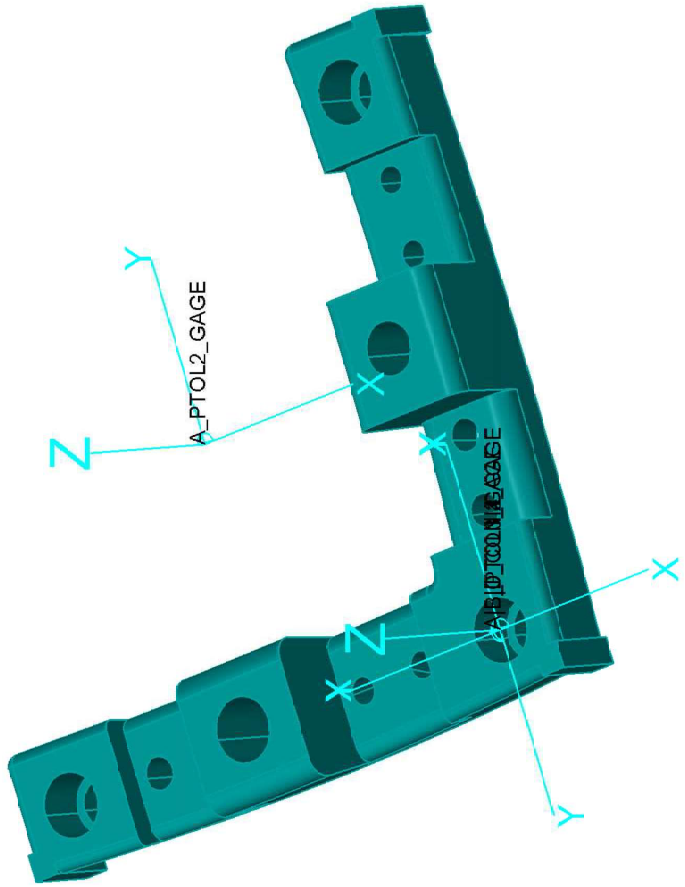


IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT

Equipamento / Equipment	Marca / Marking	Modelo / Model	Nº de Série/ Serial nr.	Nº EMM / MME nr.	Operador / Operator
CMM	COORD3METRO...	KROMOS NT	04686	LAG 270	Bruno Jorge

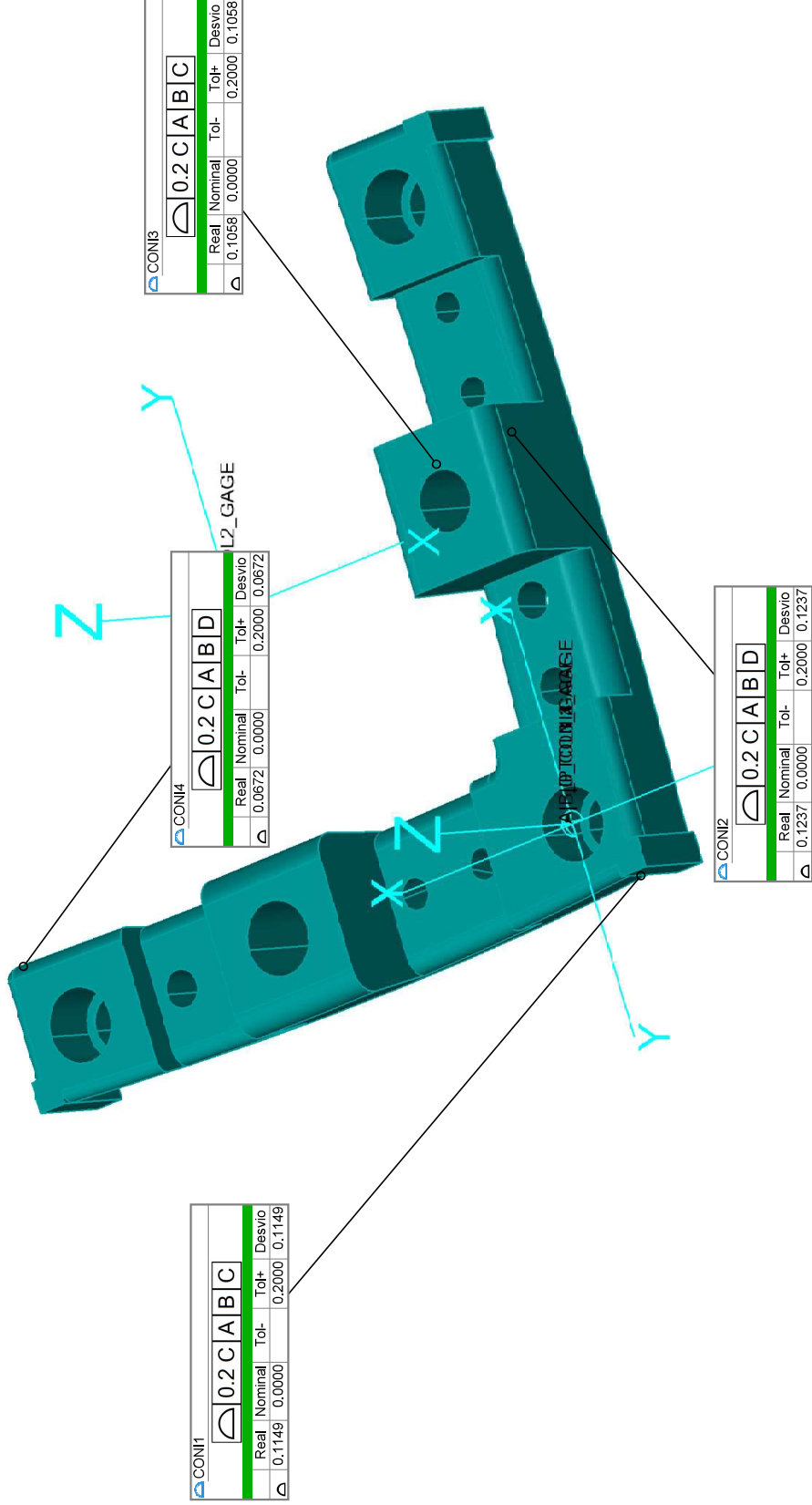
IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION

Nº Peça / Part Nr.	Designação / Designation	Nº de OF / Work Order Nr.	Data / Date
ADAPTED ARTIFACT	ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (02)	2 022 479	04/12/25 14:27:32



LAUAK-P – Mod. 152 – 2/14

Metrologic Group – Metrolog X4 V21 SP1 HF6



PLAN9

Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0128	0.0000		0.3000	0.0128

PLAN8

Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0061	0.0000		0.3000	0.0061

PLAN6

Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0136	0.0000		0.3000	0.0136

PLAN2

Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0340	0.0000		0.3000	0.0340

PLAN7

Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0092	0.0000		0.3000	0.0092

PLAN1

Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0305	0.0000		0.3000	0.0305

PLAN5

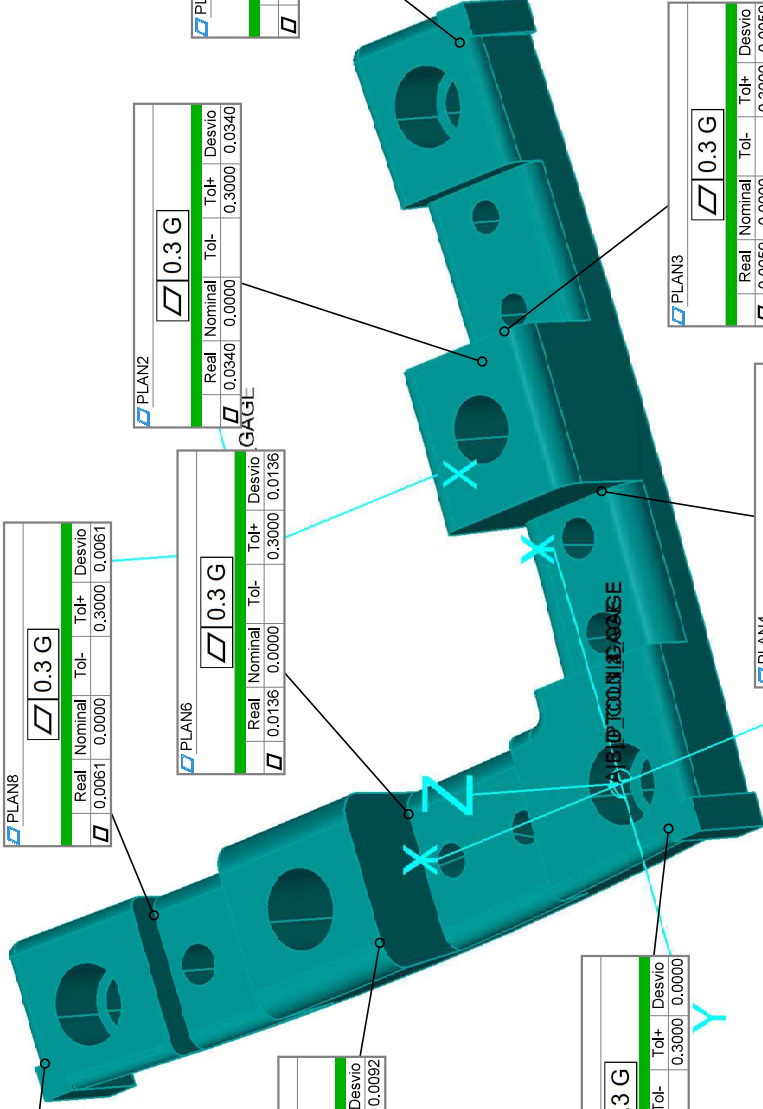
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0000	0.0000		0.3000	0.0000

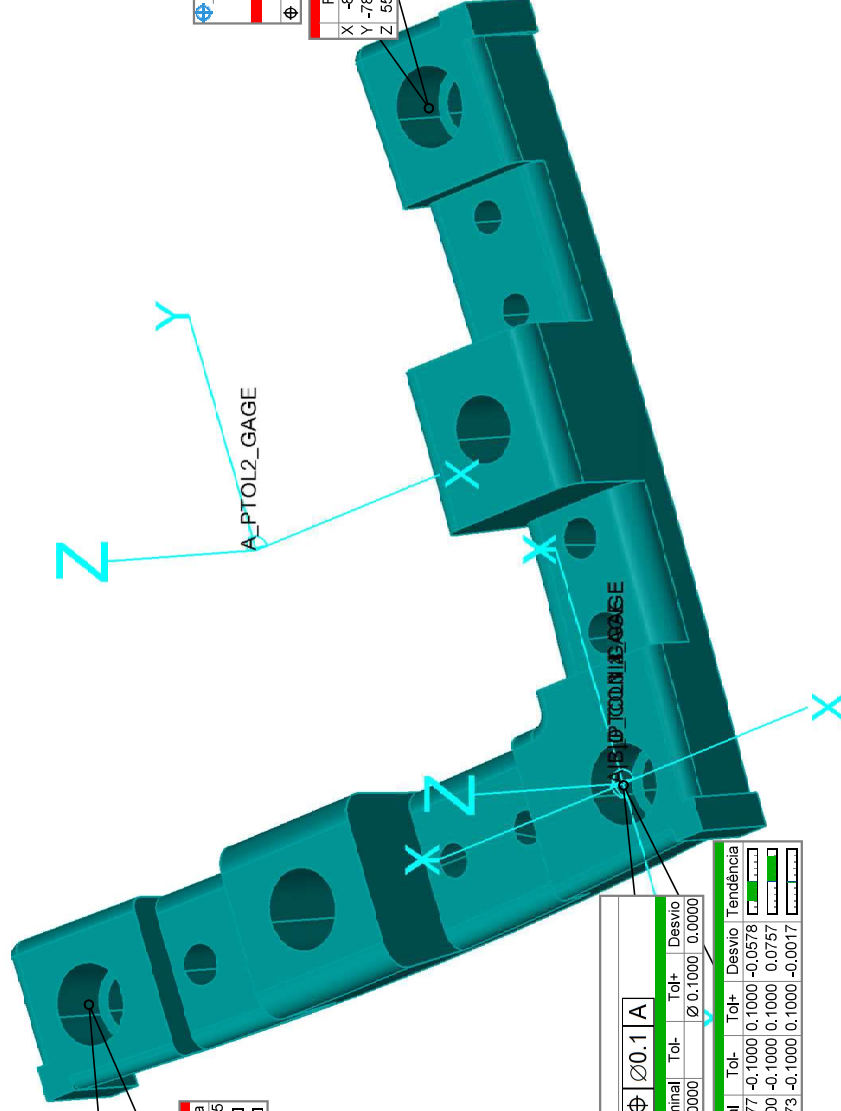
PLAN4

Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0080	0.0000		0.3000	0.0080

PLAN3

Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0059	0.0000		0.3000	0.0059





PTOL1

	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência
Ø	0.5465	0.0000	Ø 0.1000	0.5465		
X	-109.1629	-109.3514	-0.1000	0.1000	0.1885	0.0885
Y	-179.9218	-180.0000	-0.1000	0.1000	0.0782	
Z	51.9735	51.9678	-0.1000	0.1000	0.0057	

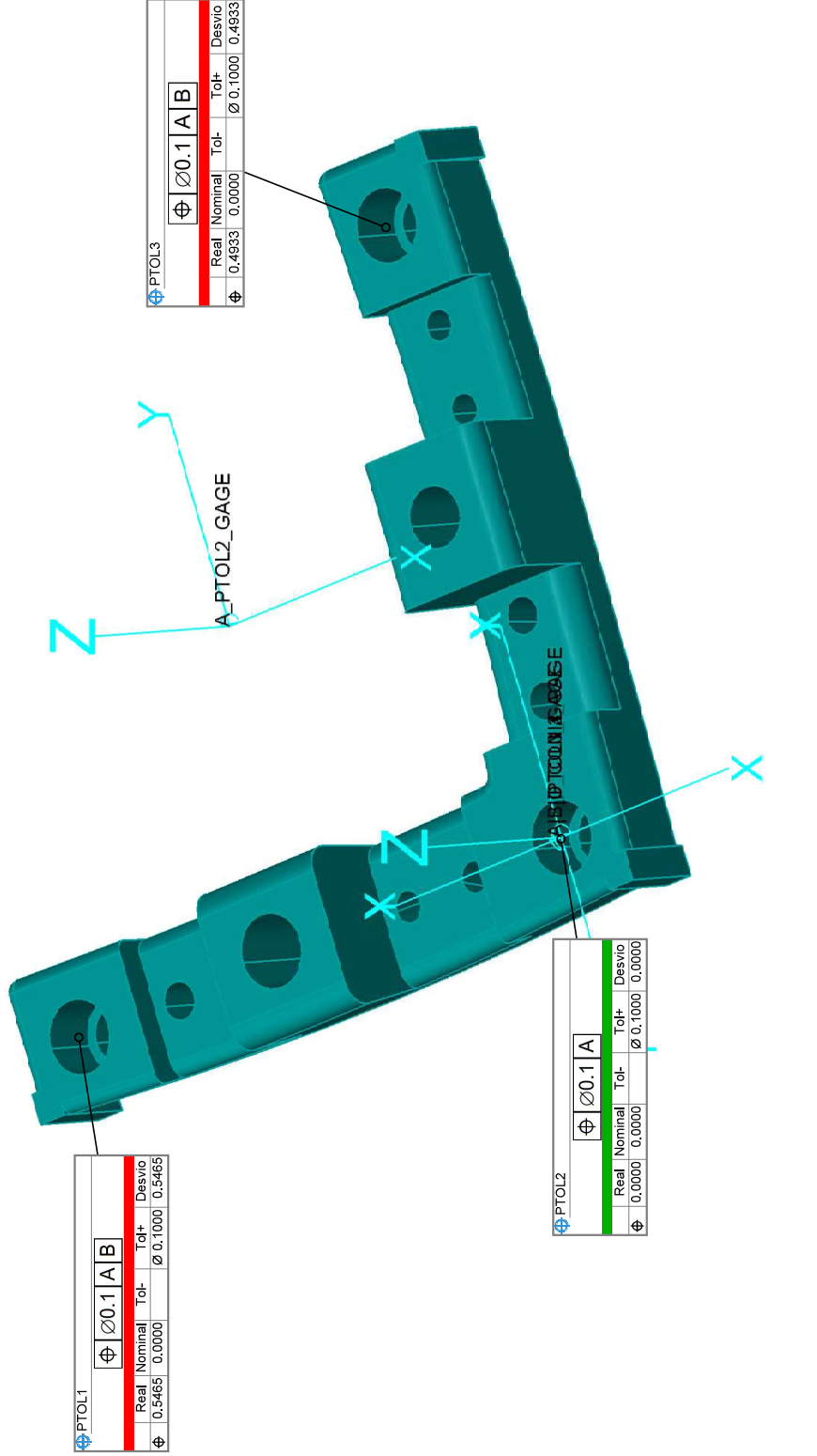
PTOL2

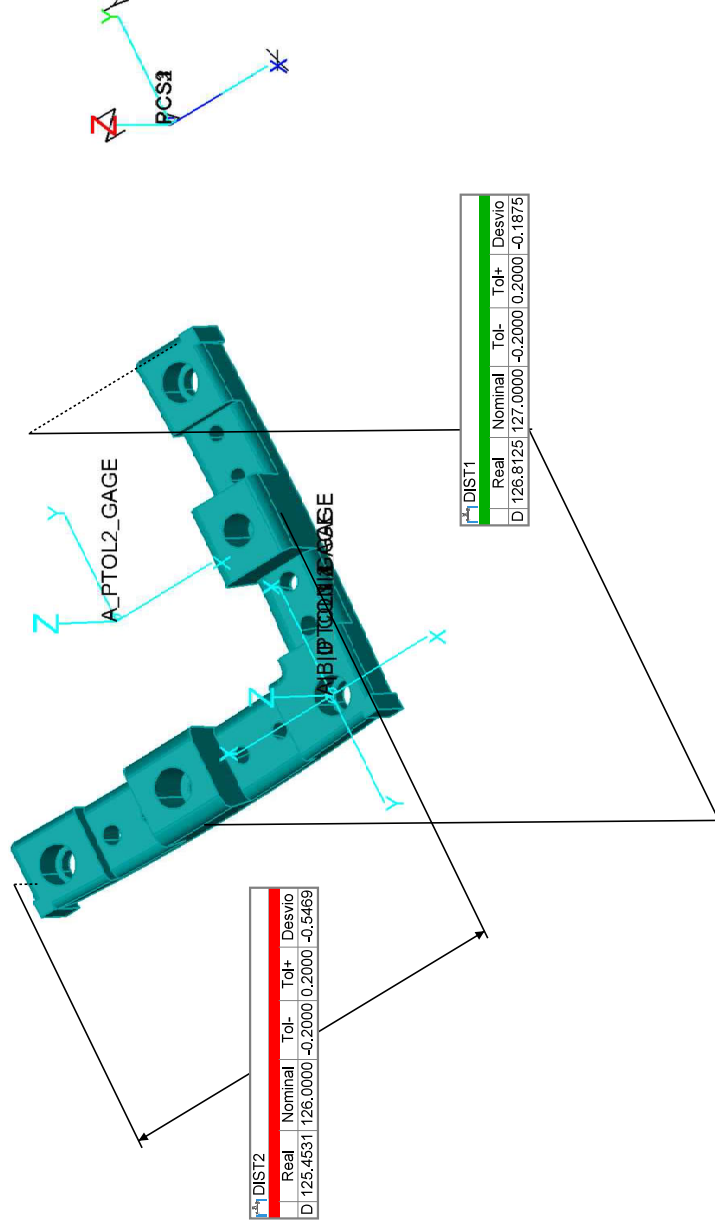
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência
Ø	0.0000	0.0000	Ø 0.1000	0.0000		
X	-8.2555	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0578	
Y	-179.9243	-180.0000	-0.1000	0.1000	0.0757	
Z	55.0255	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0017	

PTOL3

	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência
Ø	0.4933	0.0000	Ø 0.1000	0.4933		
X	-8.2667	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0690	
Y	-78.9678	-78.8000	-0.1000	0.1000	-0.1678	-0.0678
Z	55.0252	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0021	





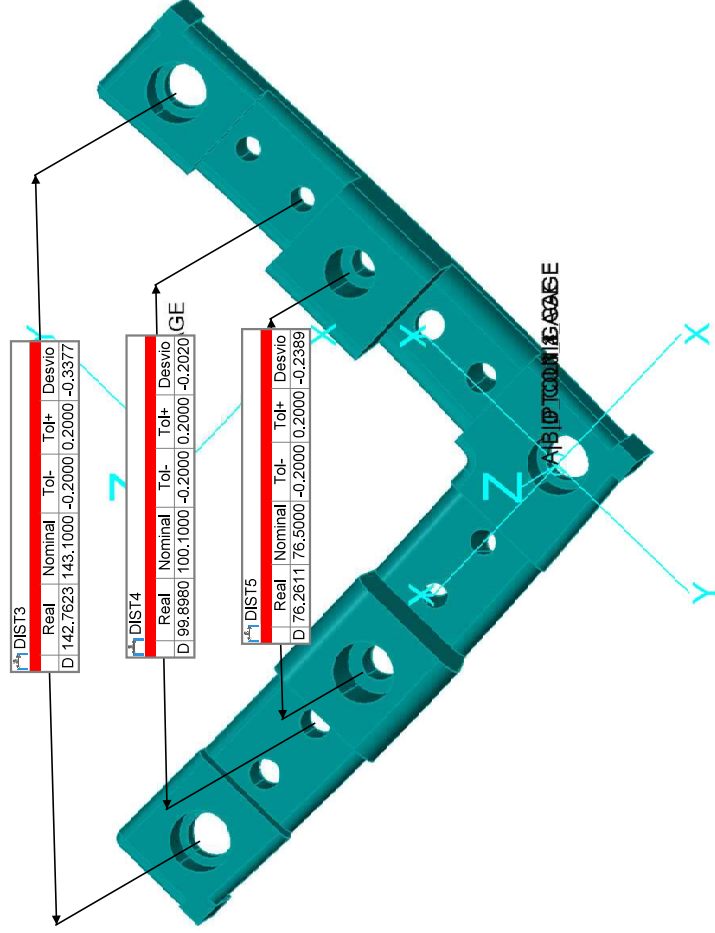
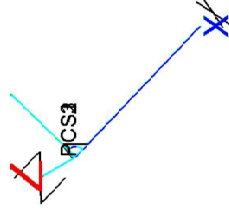


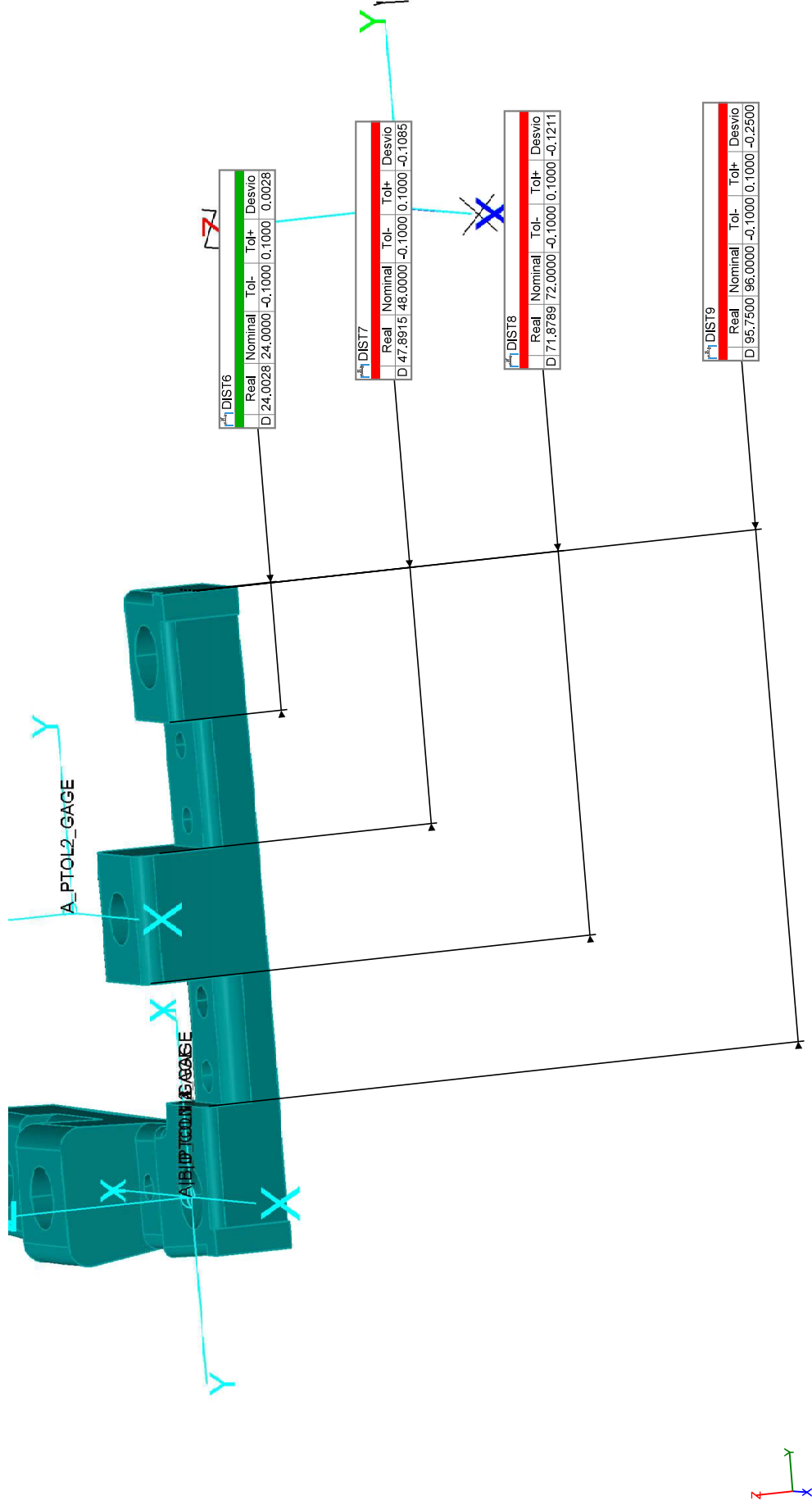
RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

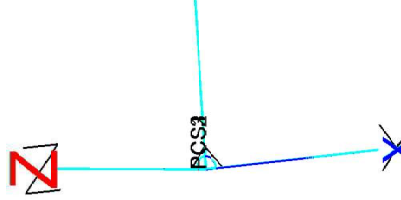
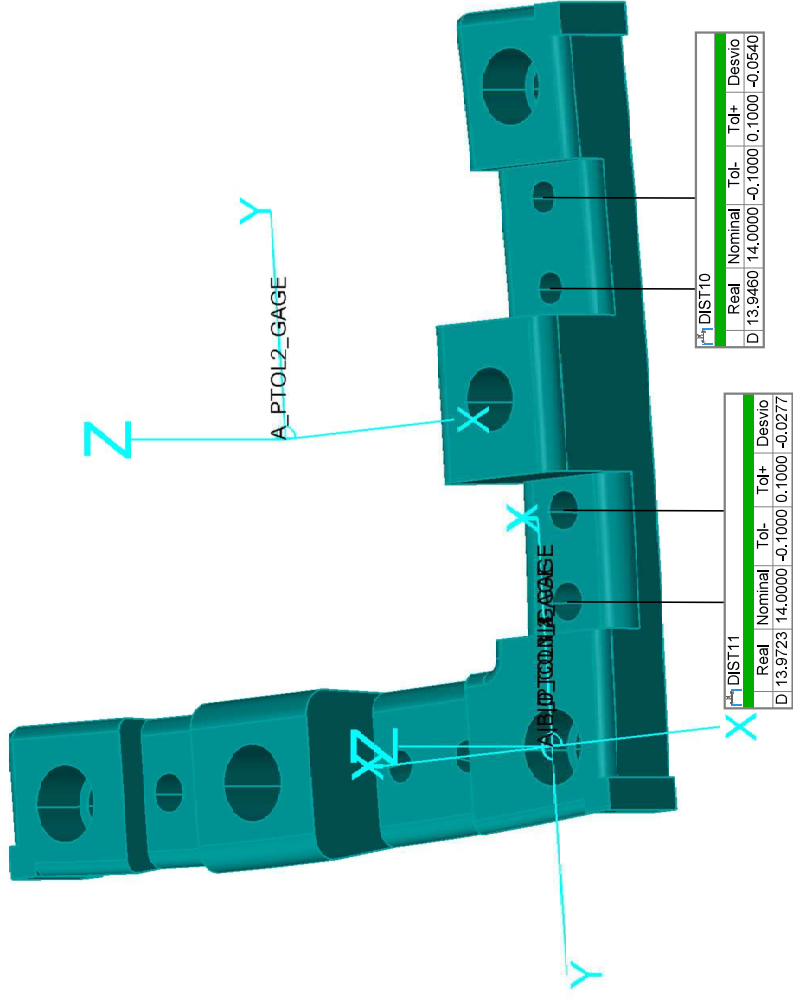
Nº

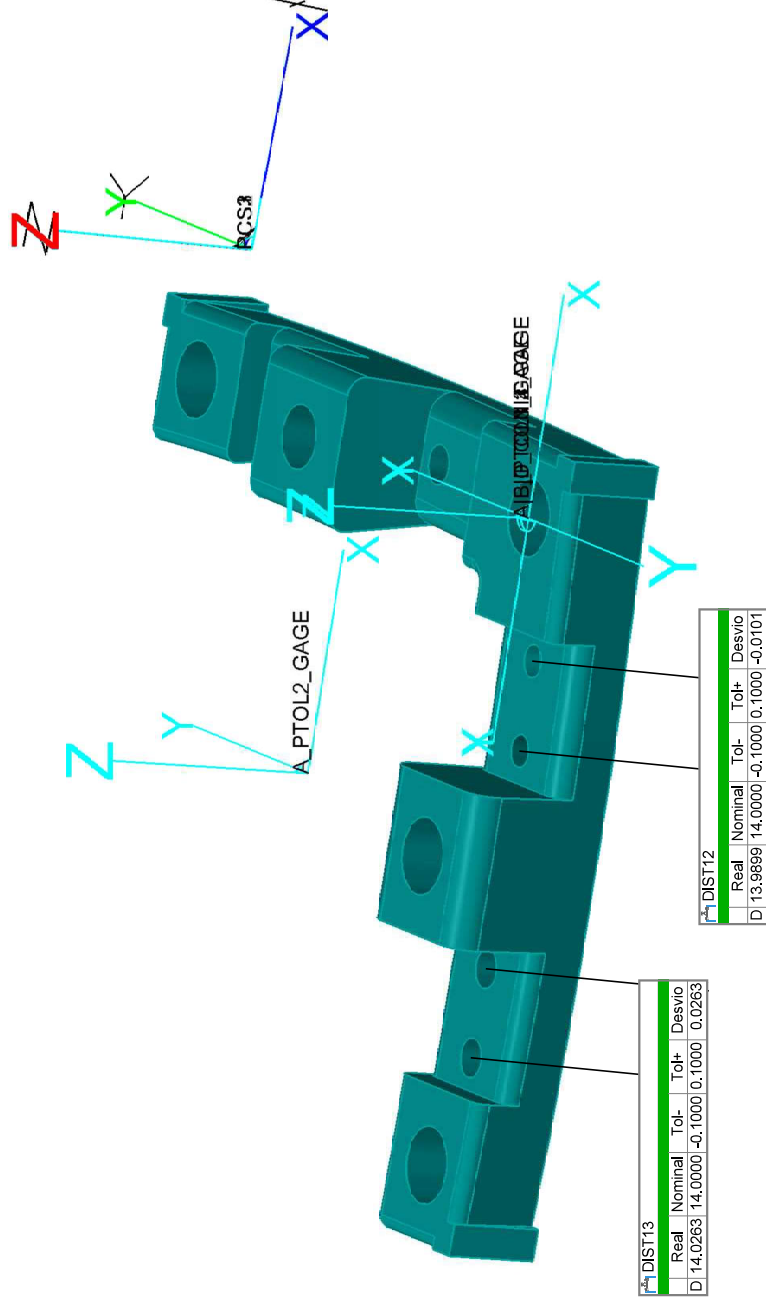
4829_25-LAG

Pág.
Page
7 / 13



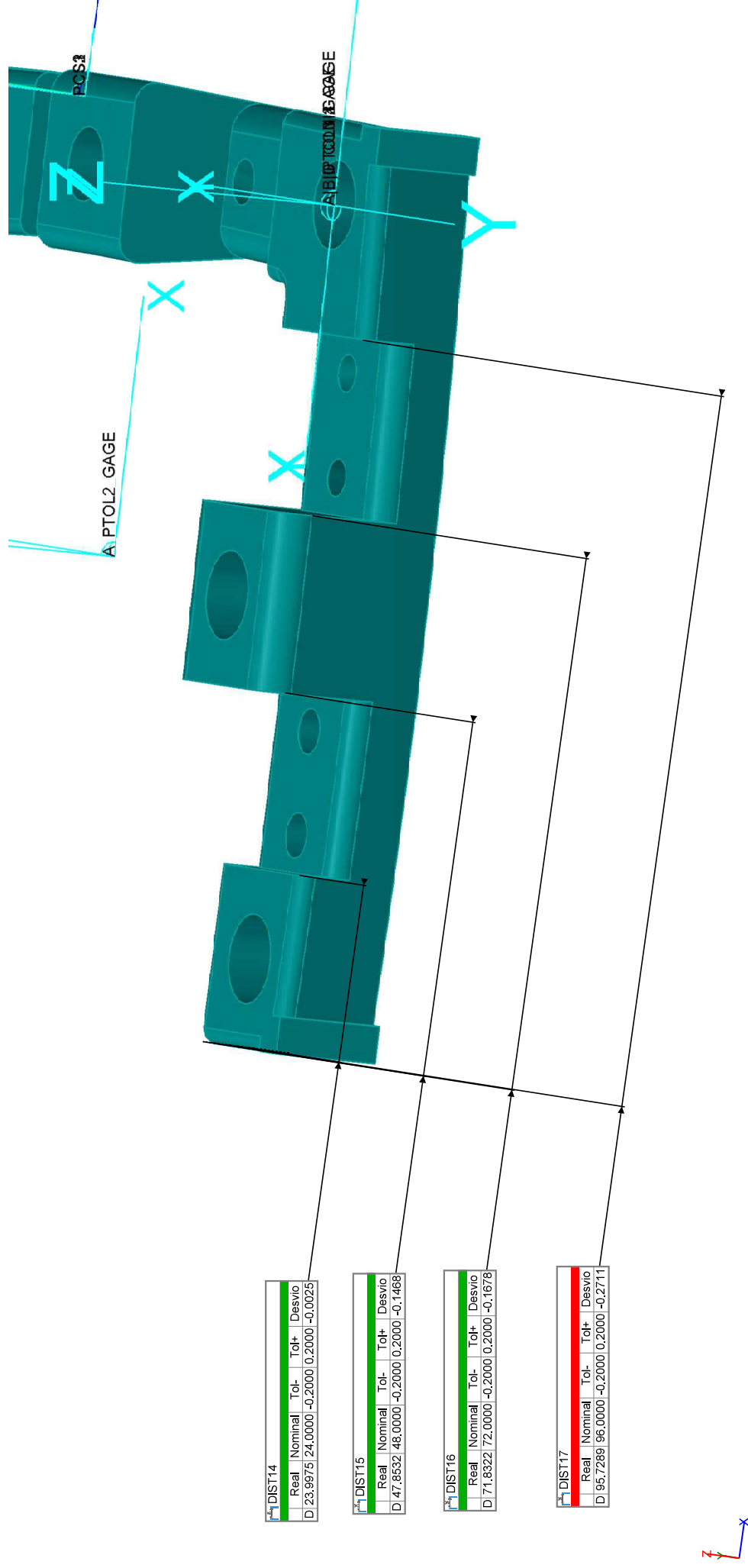


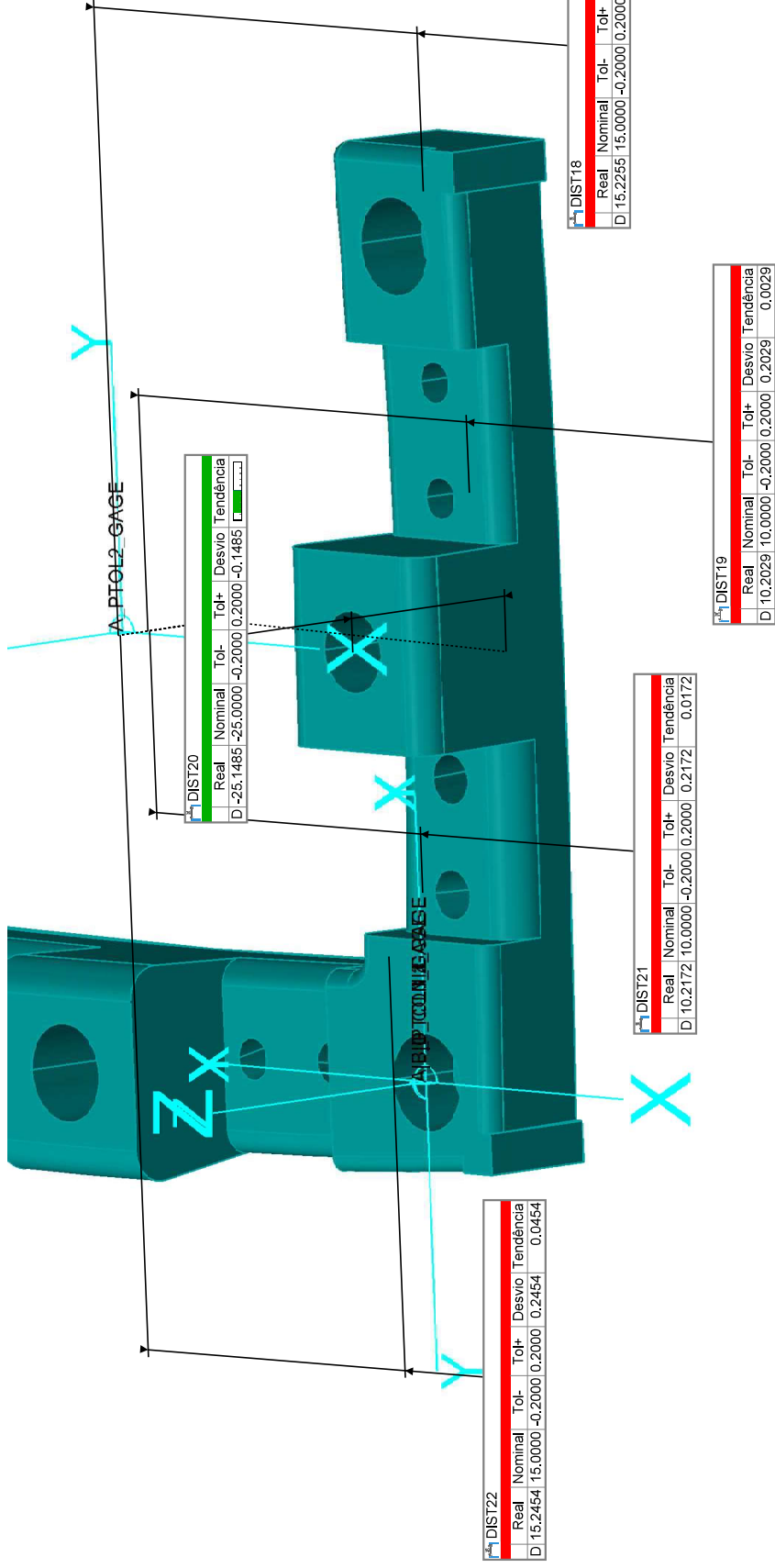


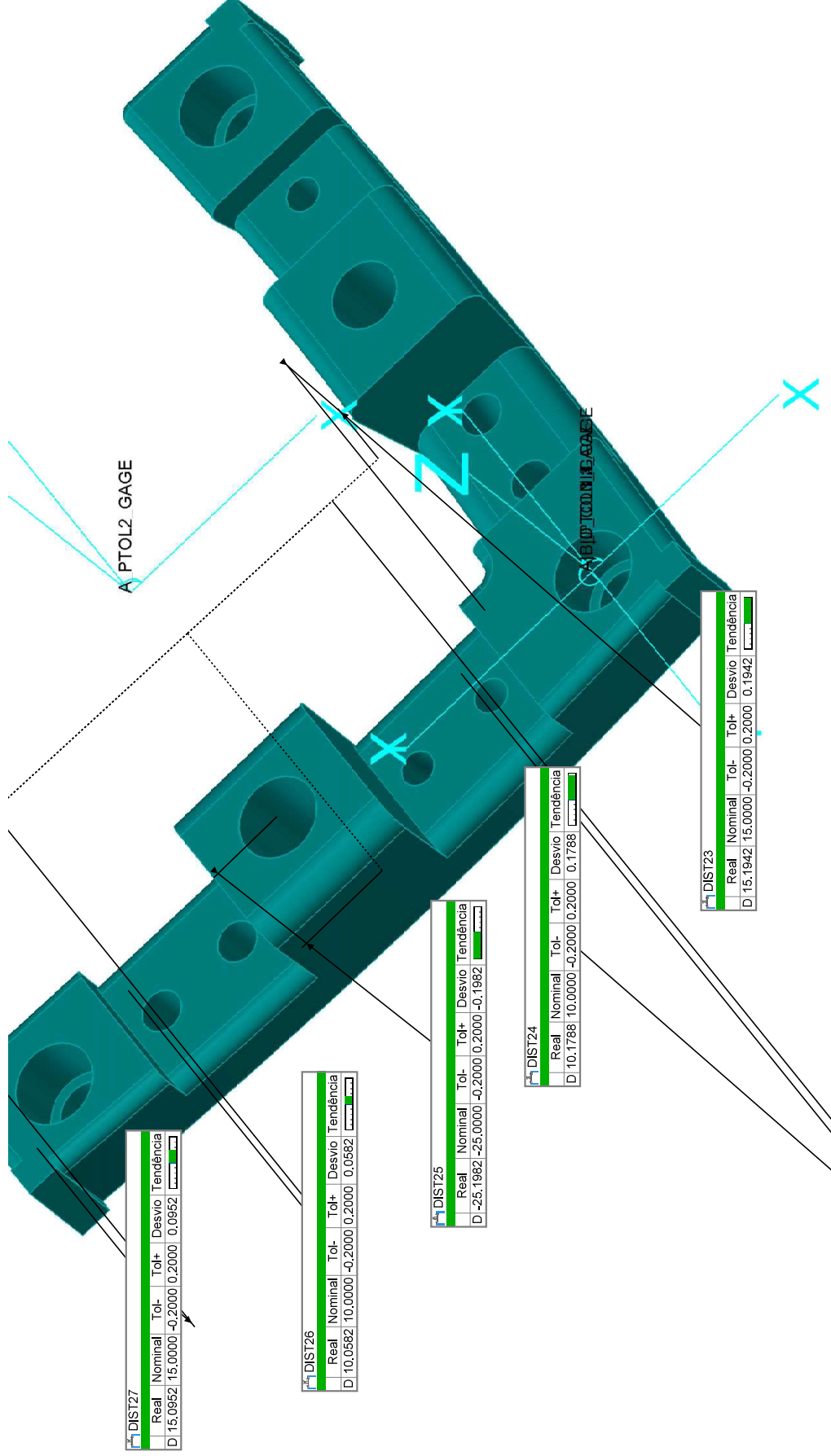


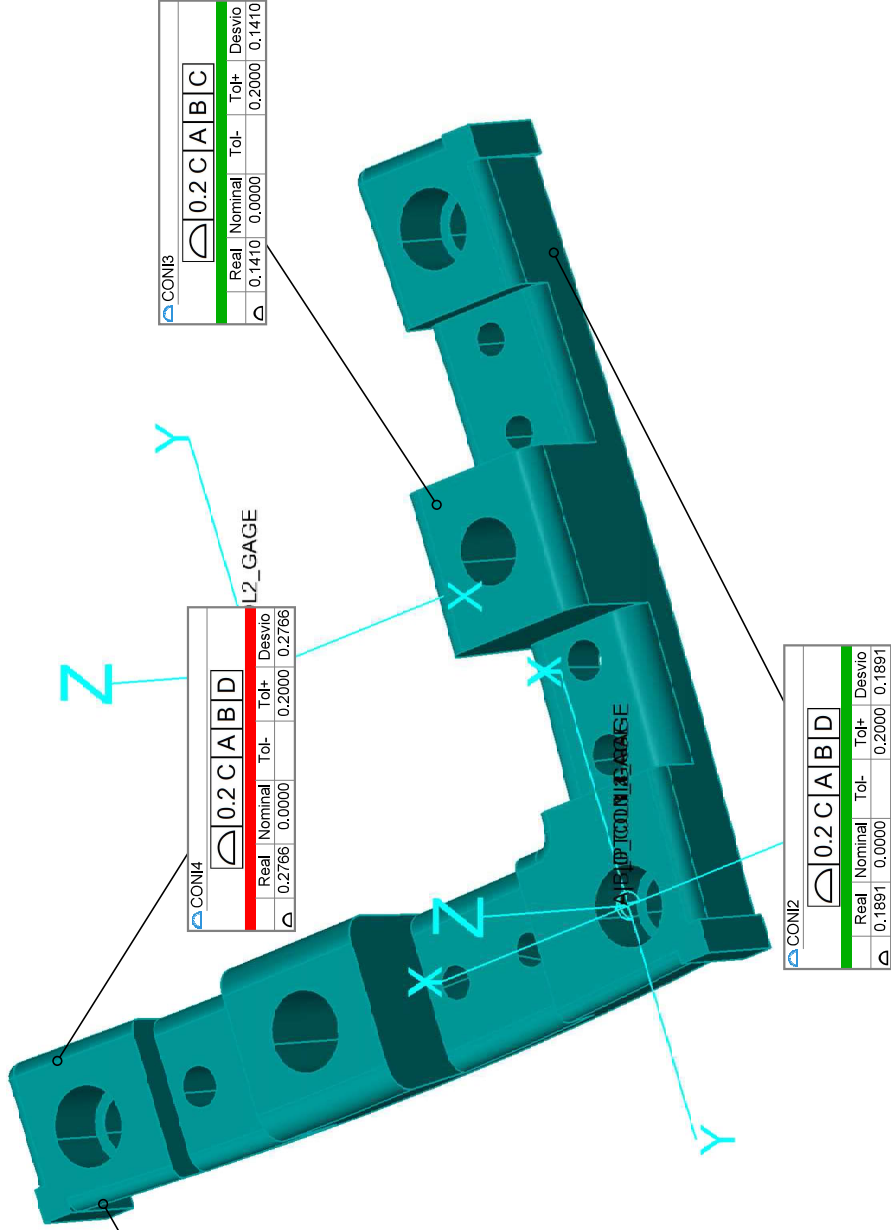
RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL

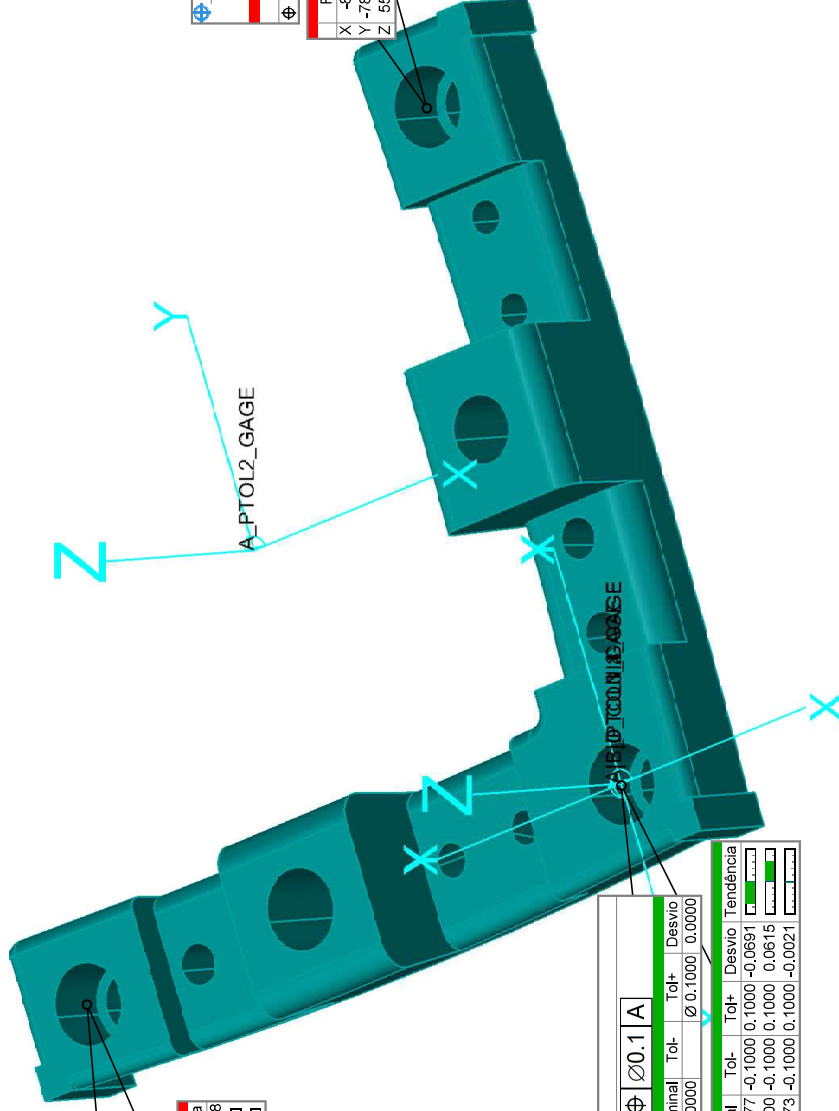
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL









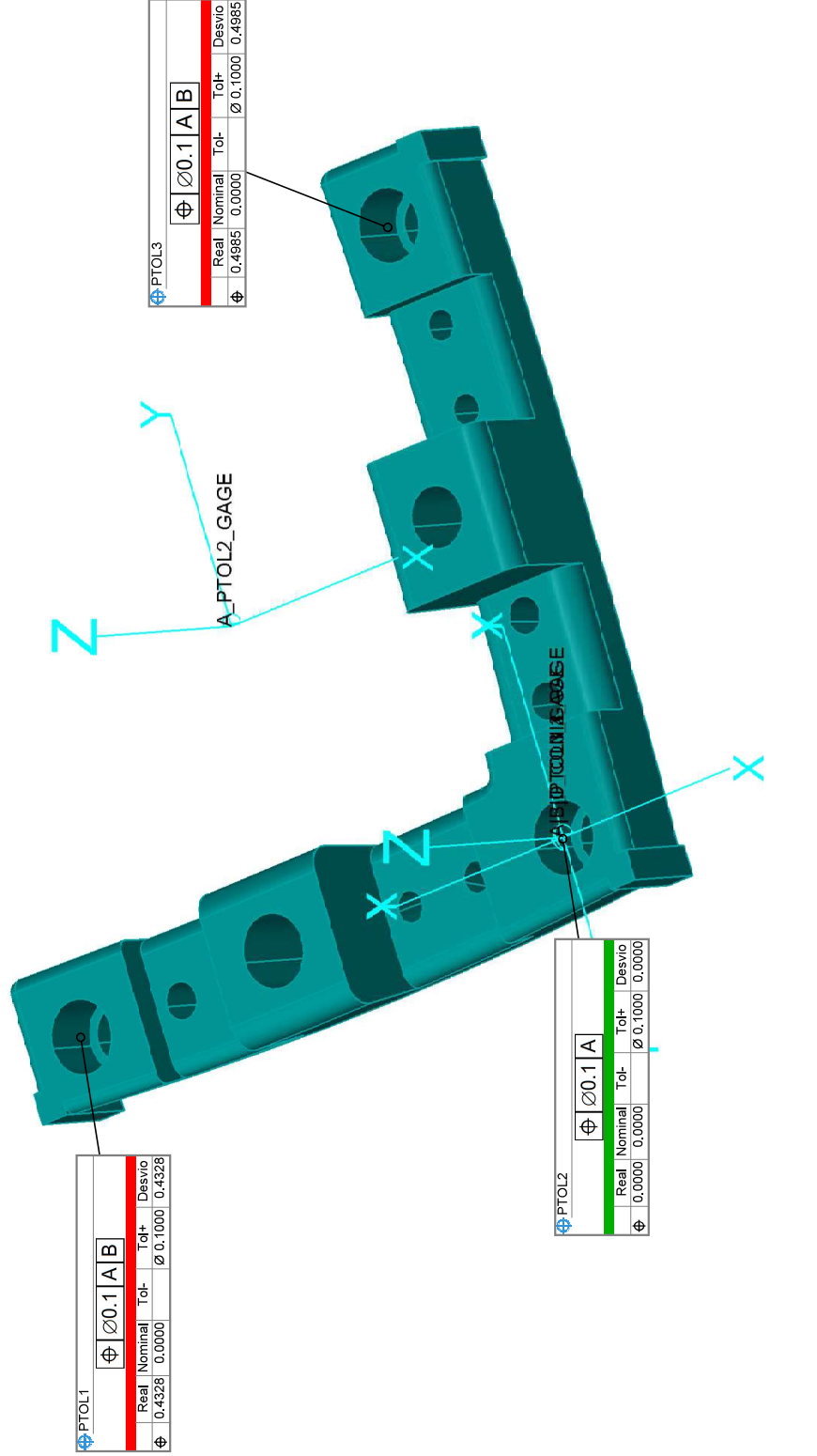


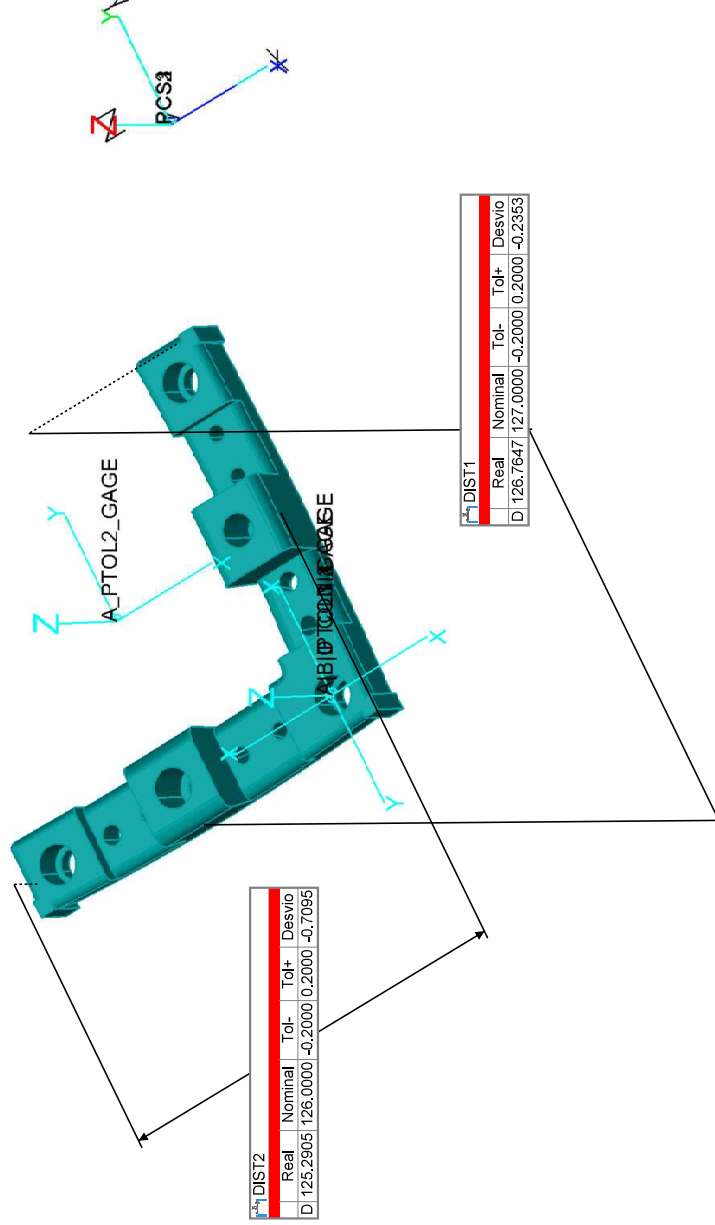
PTOL1									
Ø 0.1 A B									
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio					
Ø	0.4328	0.0000	Ø	0.1000	0.4328				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência				
X	-109.2076	-109.3514	-0.1000	0.1000	0.1438	0.0438			
Y	-179.9257	-180.0000	-0.1000	0.1000	0.0743	0.0743			
Z	51.9721	51.9678	-0.1000	0.1000	0.0044	0.0044			

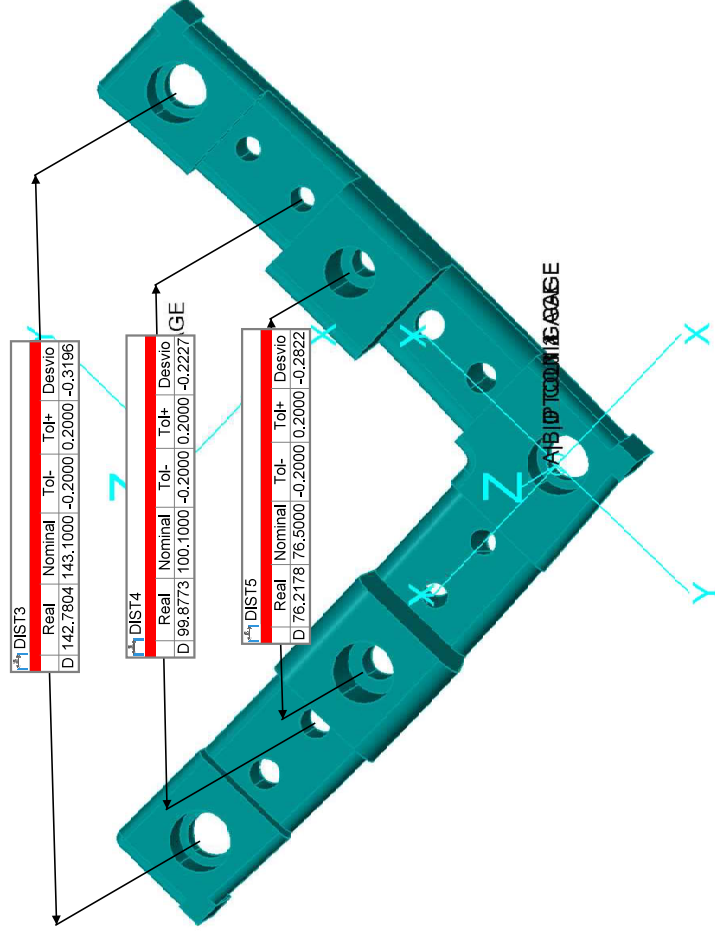
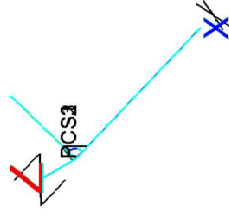
PTOL3									
Ø 0.1 A B									
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio					
Ø	0.4985	0.0000	Ø	0.1000	0.4985				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência				
X	-8.2790	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0814	-0.0814			
Y	-78.9784	-78.8000	-0.1000	0.1000	-0.1784	-0.1784			
Z	55.0248	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0025	-0.0025			

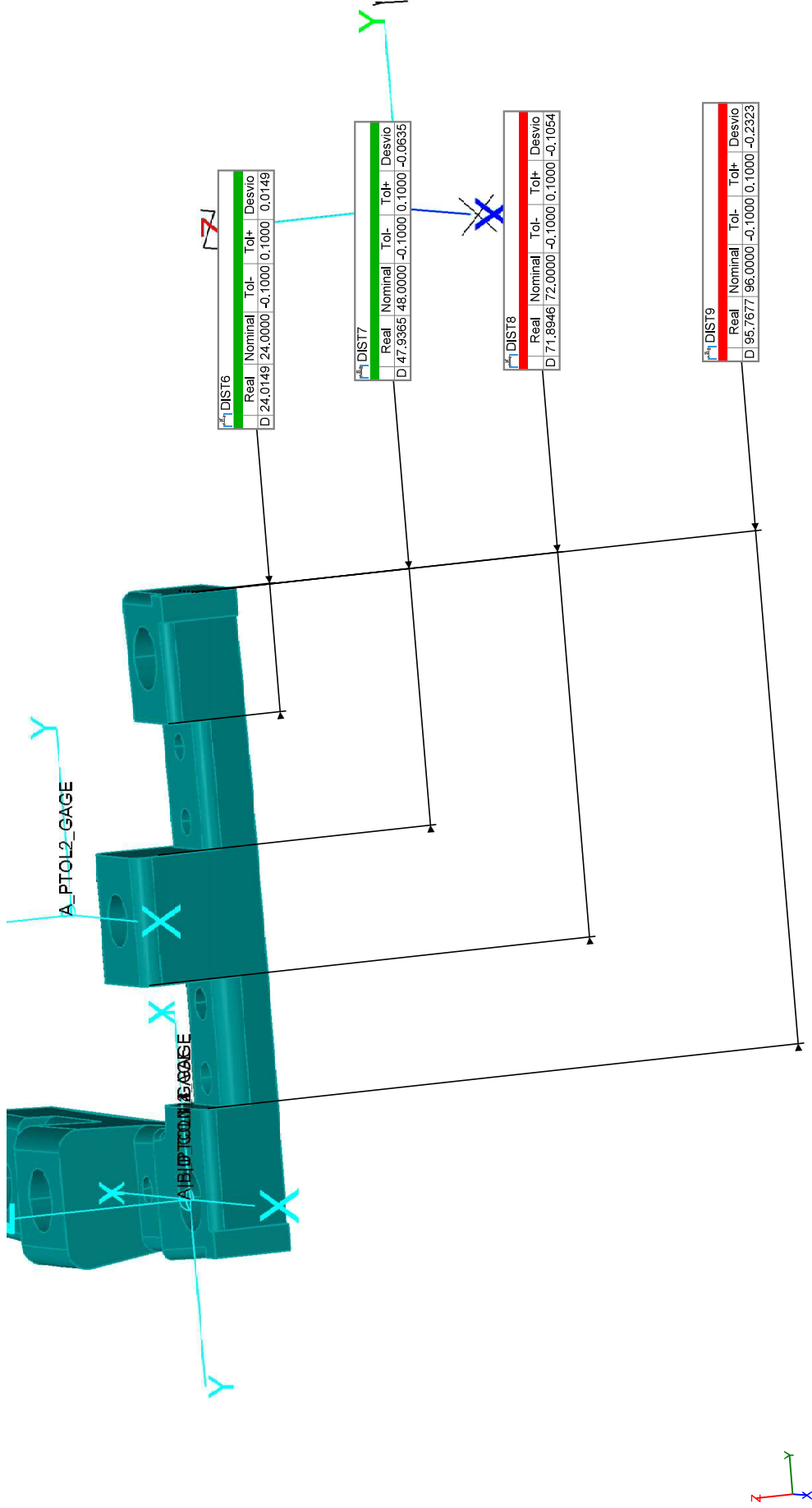
PTOL2									
Ø 0.1 A									
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio					
Ø	0.0000	0.0000	Ø	0.1000	0.0000				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência				
X	-8.2667	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0691	-0.0691			
Y	-179.9385	-180.0000	-0.1000	0.1000	0.0615	0.0615			
Z	55.0252	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0021	-0.0021			

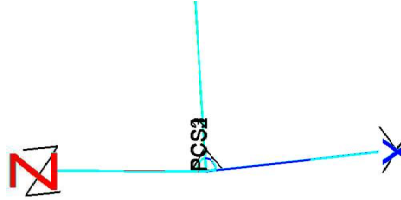
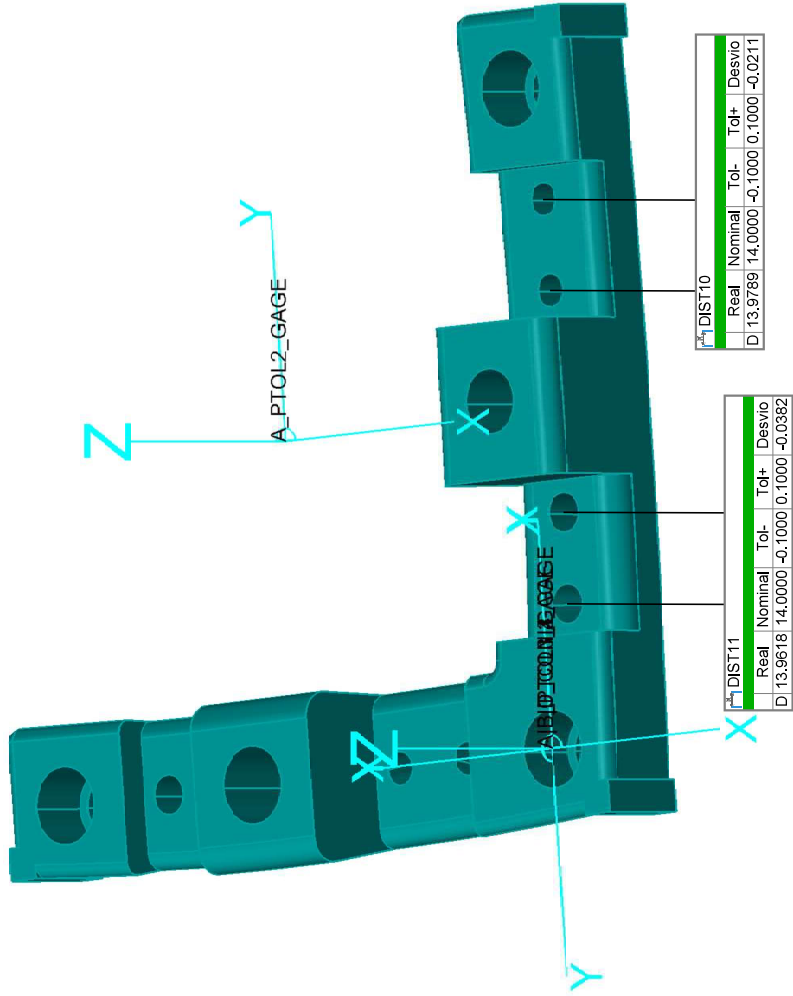






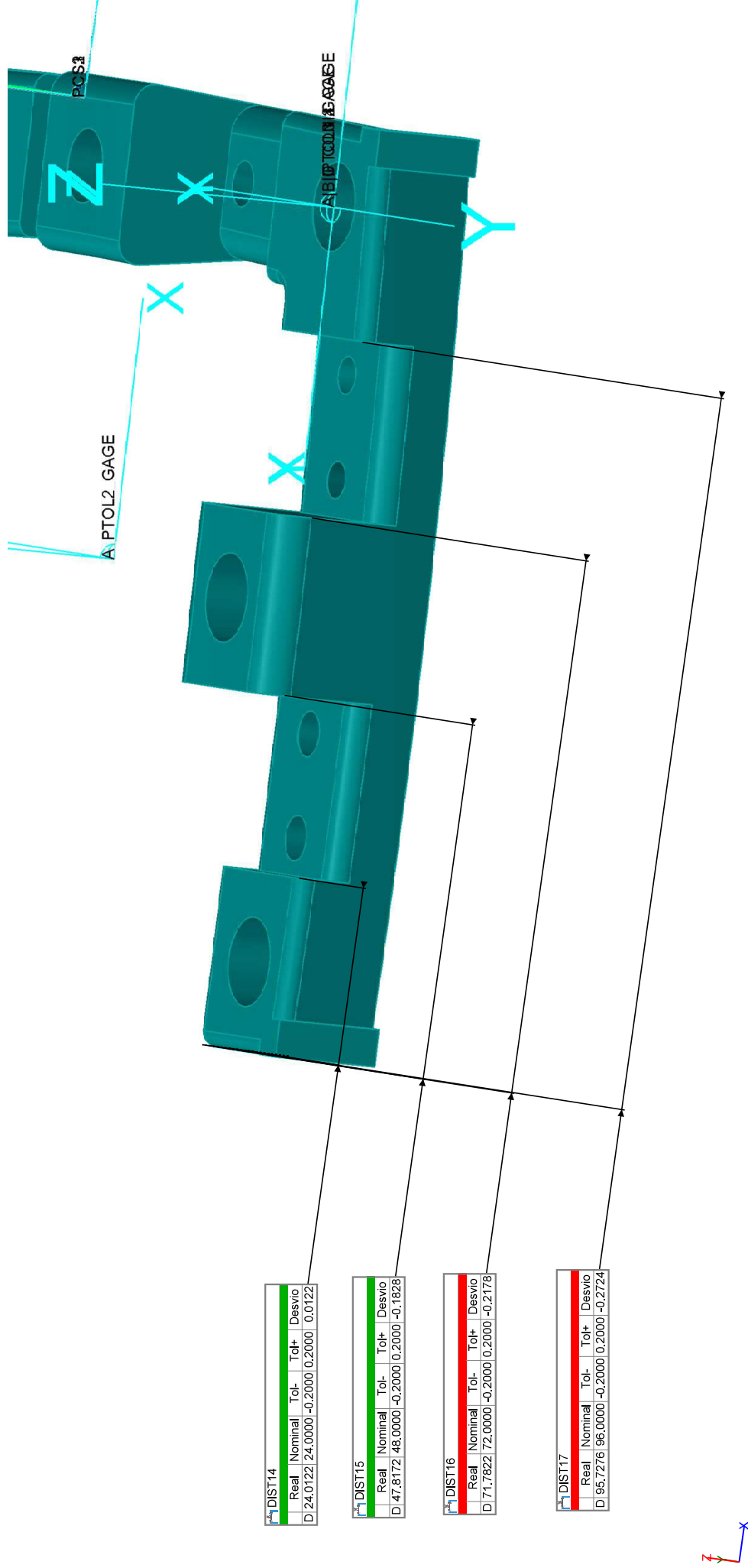


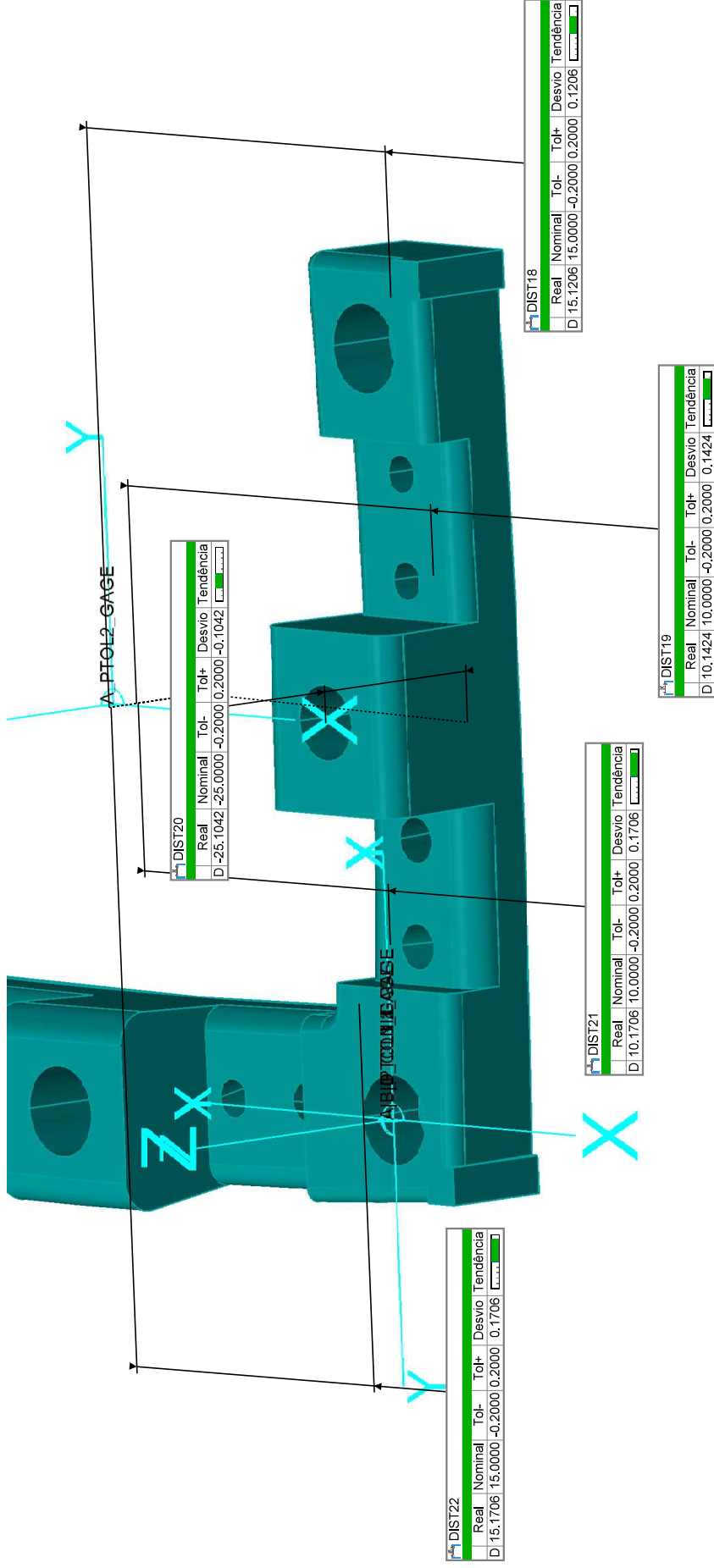


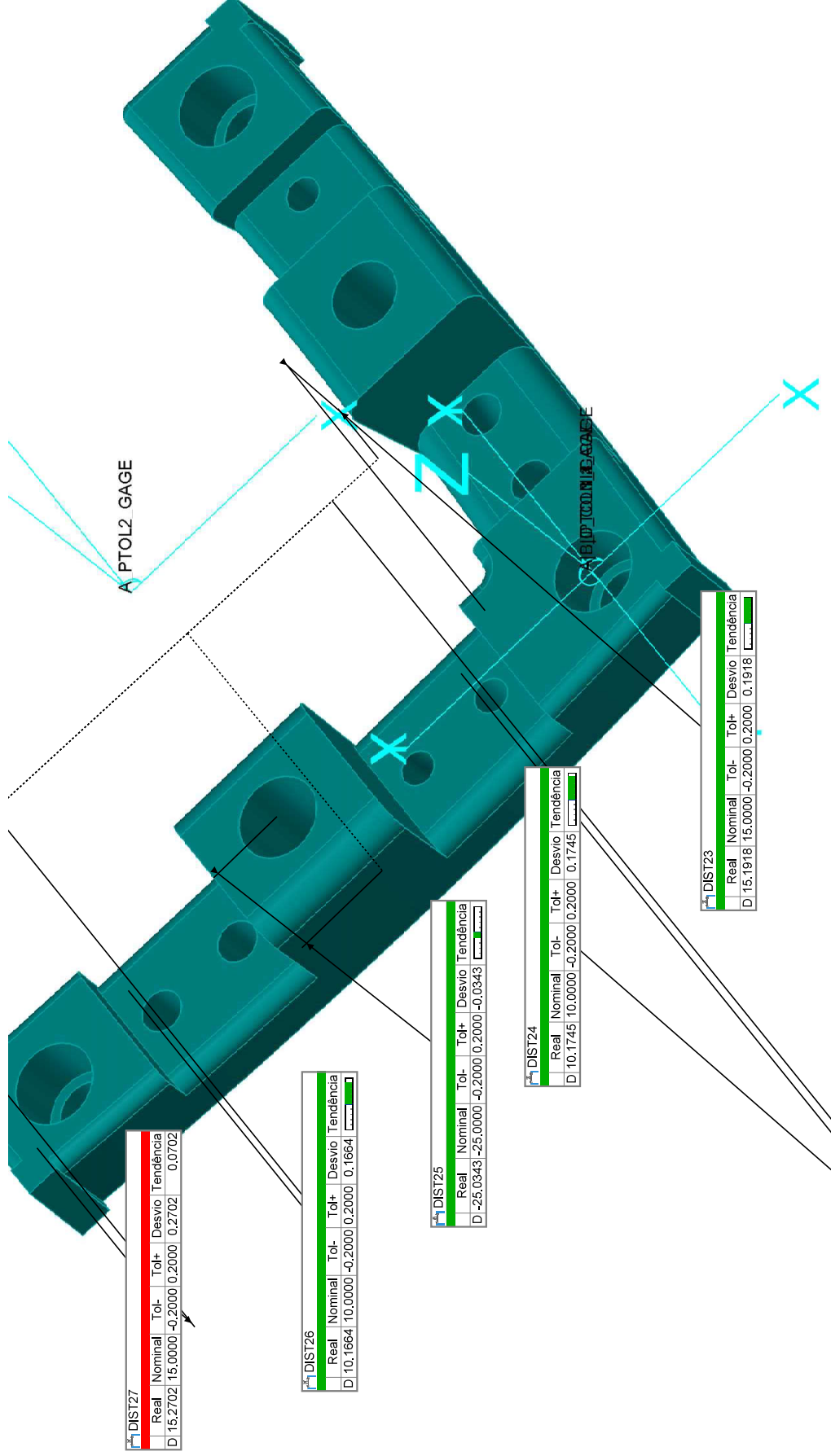


Nº	4830_25-LAG
Pág.	EN 9100 BUREAU VERITAS Certification Page 10 / 13











RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL

REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

Comentário: Vari...

Nº

4831_25-LAG

EN 9100

BUREAU VERITAS

Certification



Pág.

Page

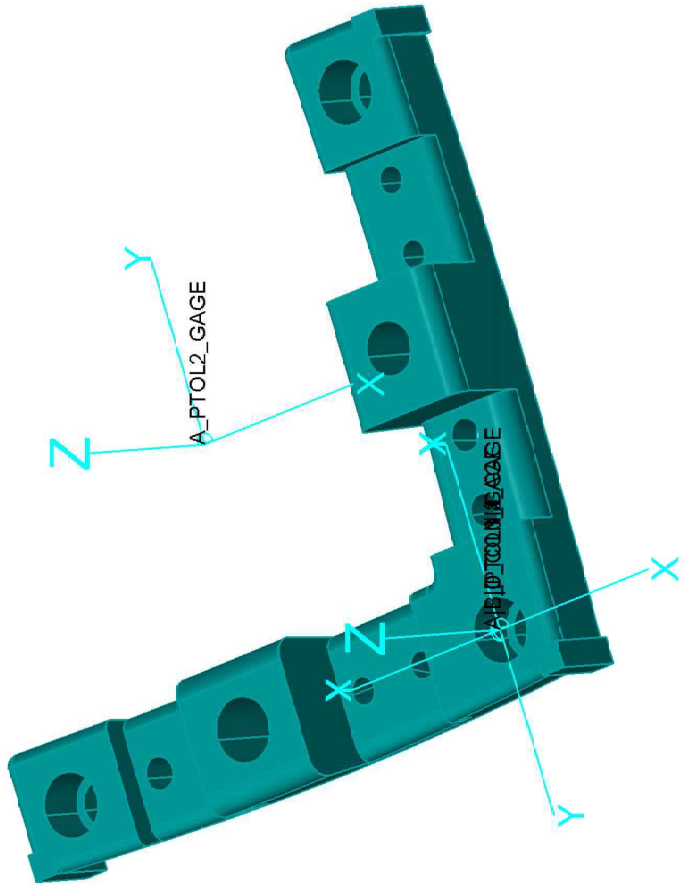
1 / 13

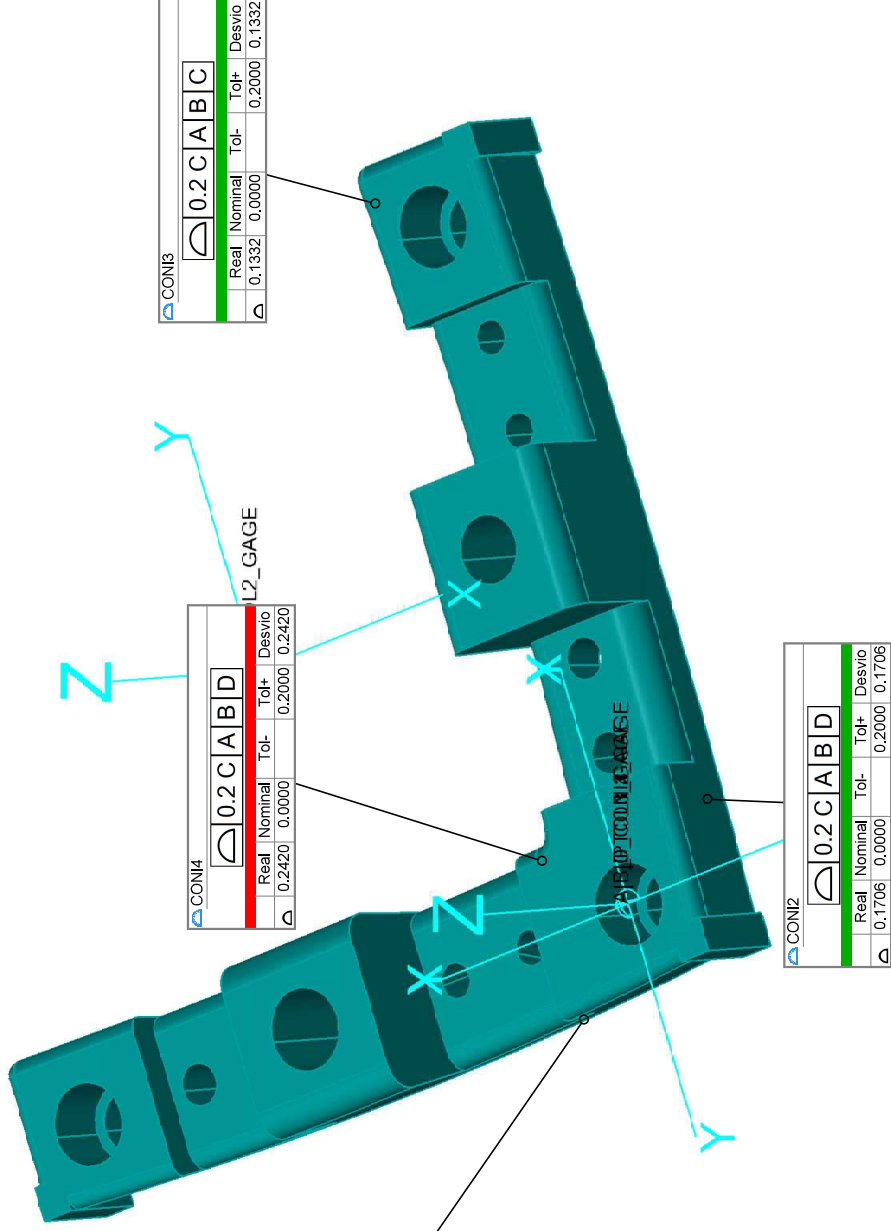
IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT

Equipamento / Equipment	Marca / Marking	Modelo / Model	Nº de Série/ Serial nr.	Nº EMM / MME nr.	Operador / Operator
CMM	COORD3METRO...	KROMOS NT	04686	LAG 270	Bruno Jorge

IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION

Nº Peça / Part Nr.	Designação / Designation	Nº de OF / Work Order Nr.	Data / Date
ADAPTED ARTIFACT	ARTEFACTO DIMENSIONAL RENAM (04)	2 022 479	04/12/25 15:33:22





PLAN9				
0.3 G				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0243	0.0000		0.3000	0.0243

PLAN8				
0.3 G				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0280	0.0000		0.3000	0.0280

PLAN2				
0.3 G				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0308	0.0000		0.3000	0.0308

PLAN6				
0.3 G				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0182	0.0000		0.3000	0.0182

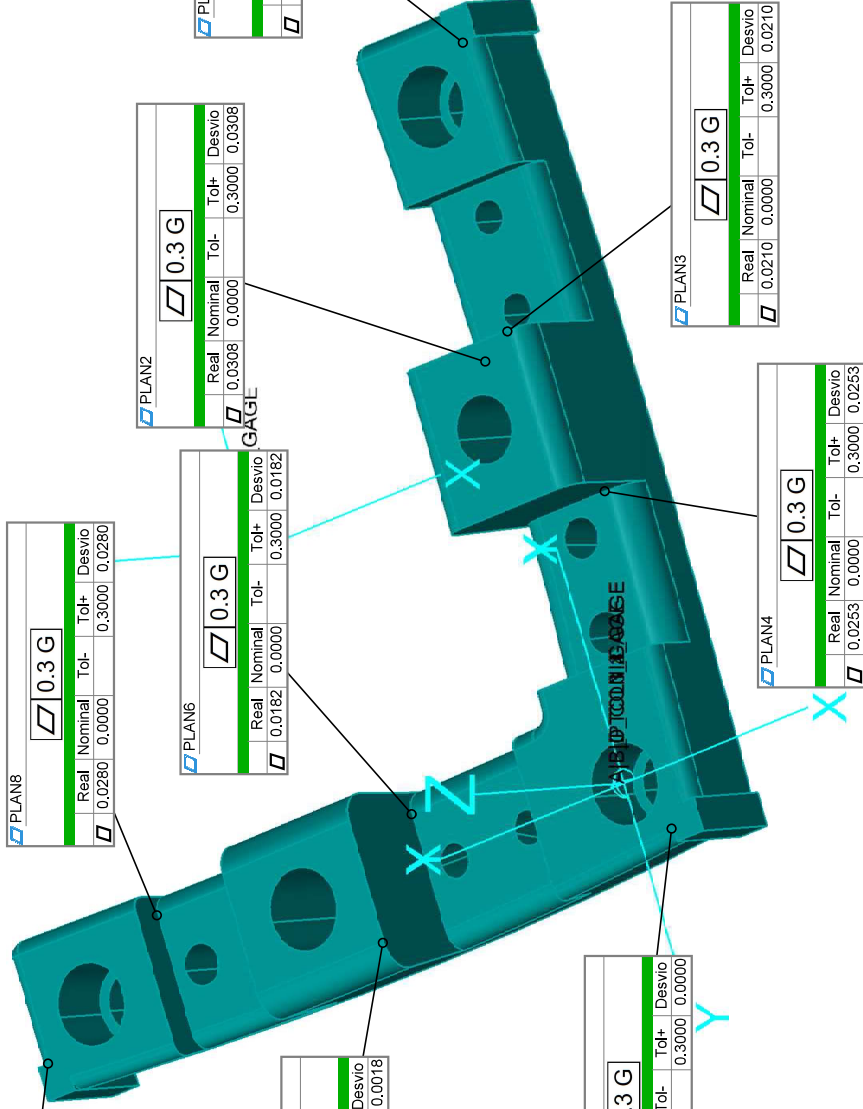
PLAN7				
0.3 G				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0018	0.0000		0.3000	0.0018

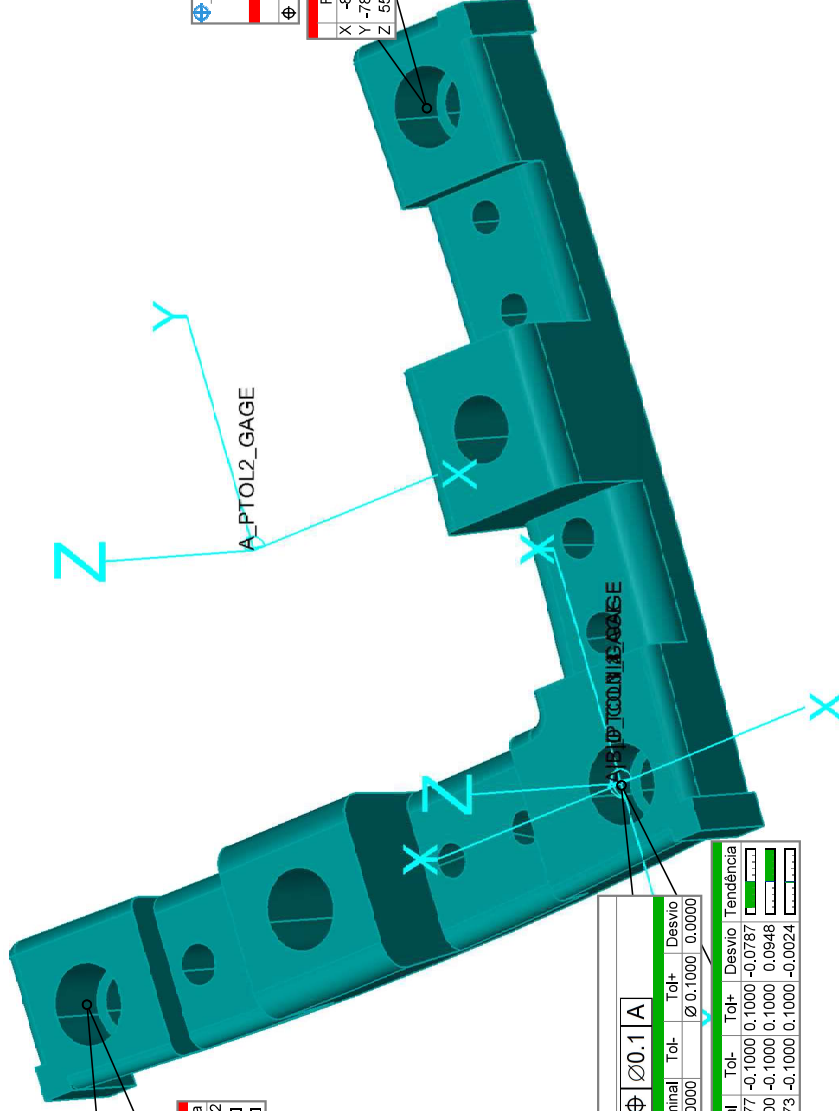
PLAN1				
0.3 G				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0200	0.0000		0.3000	0.0200

PLAN5				
0.3 G				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0000	0.0000		0.3000	0.0000

PLAN4				
0.3 G				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0253	0.0000		0.3000	0.0253

PLAN3				
0.3 G				
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.0210	0.0000		0.3000	0.0210





PTOL1

	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência
Ø	0.4455	0.0000	Ø 0.1000	0.4455		
X	-109.2022	-109.3514	-0.1000	0.1000	0.1492	0.0492
Y	-179.9545	-180.0000	-0.1000	0.1000	0.0455	0.0455
Z	51.9723	51.9678	-0.1000	0.1000	0.0045	0.0045

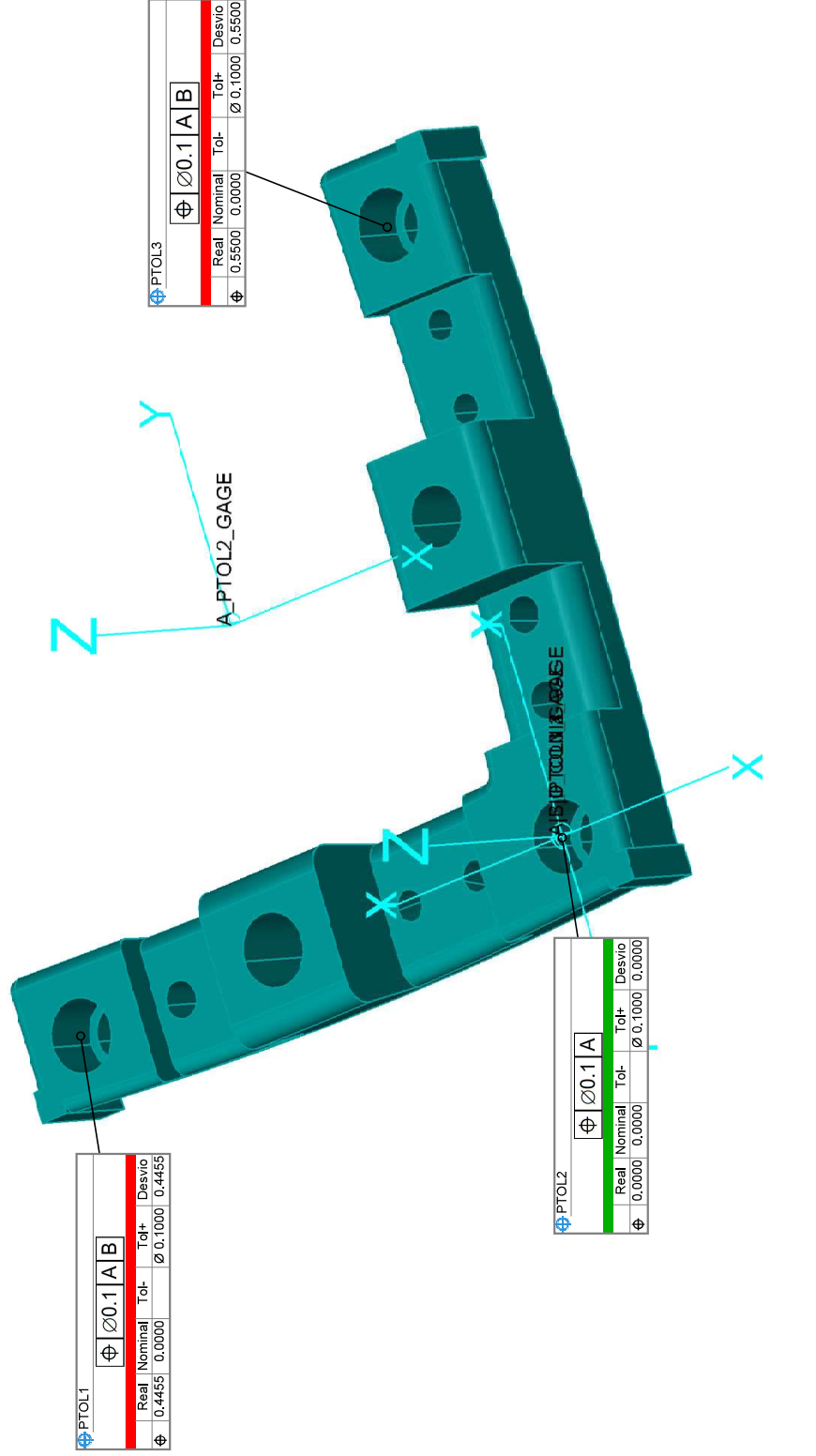
PTOL3

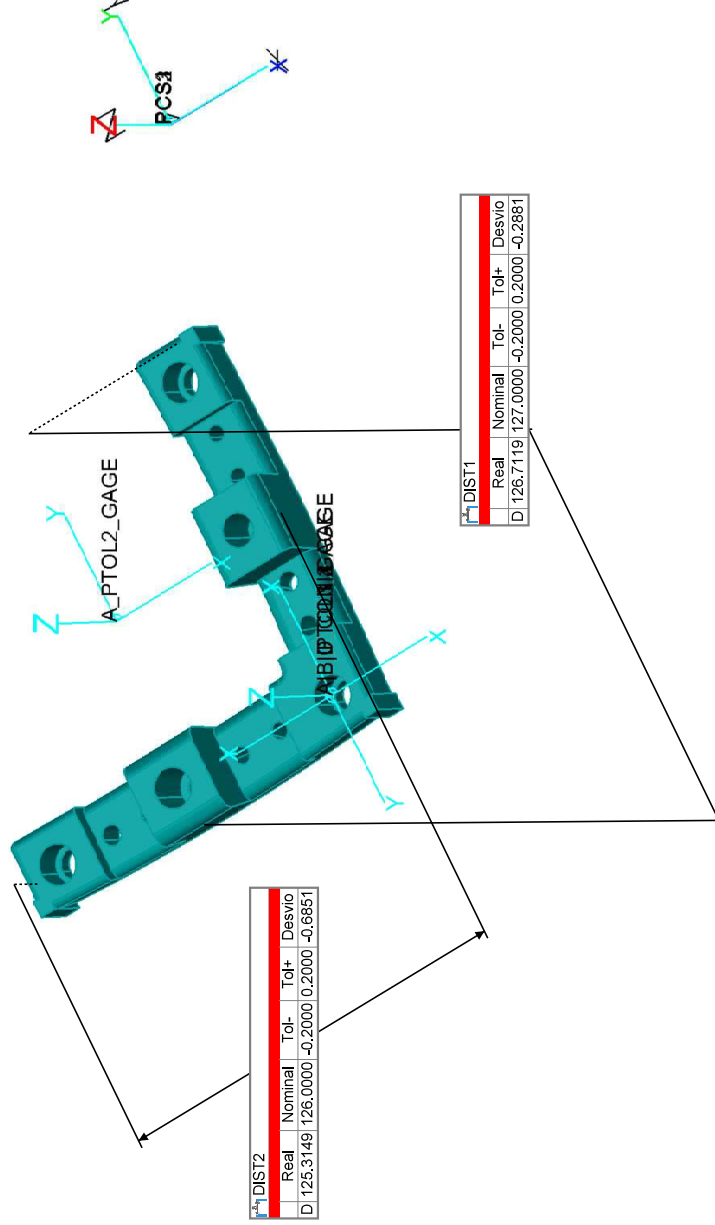
	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência
Ø	0.5500	0.0000	Ø 0.1000	0.5500		
X	-8.2322	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0346	-0.0346
Y	-78.9687	-78.8000	-0.1000	0.1000	-0.1687	-0.0687
Z	55.0262	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0010	-0.0010

PTOL2

	Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	Tendência
Ø	0.0000	0.0000	Ø 0.1000	0.0000		
X	-8.2764	-8.1977	-0.1000	0.1000	-0.0787	-0.0787
Y	-179.9052	-180.0000	-0.1000	0.1000	0.0948	0.0948
Z	55.0249	55.0273	-0.1000	0.1000	-0.0024	-0.0024







RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL
REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

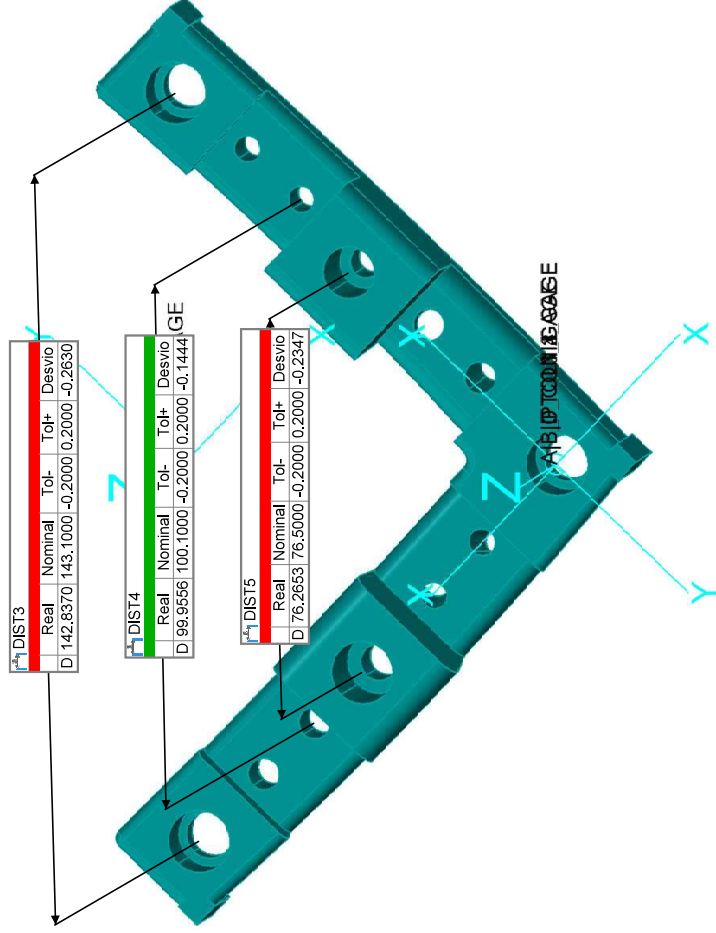
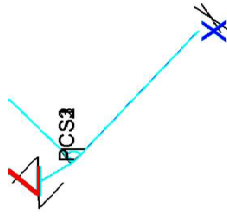
Nº

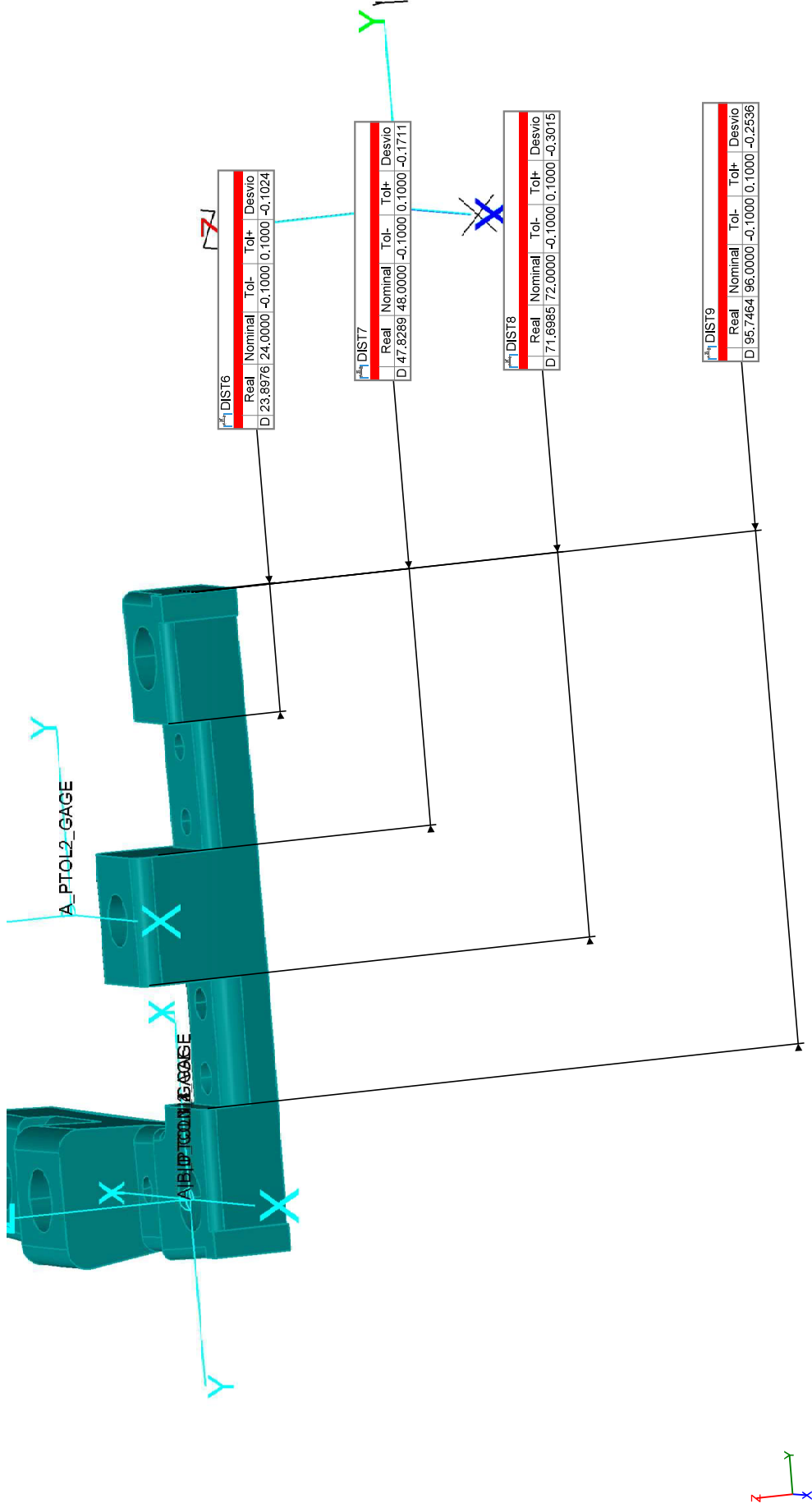
4831_25-LAG

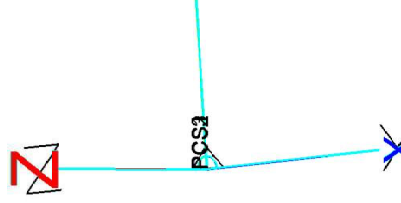
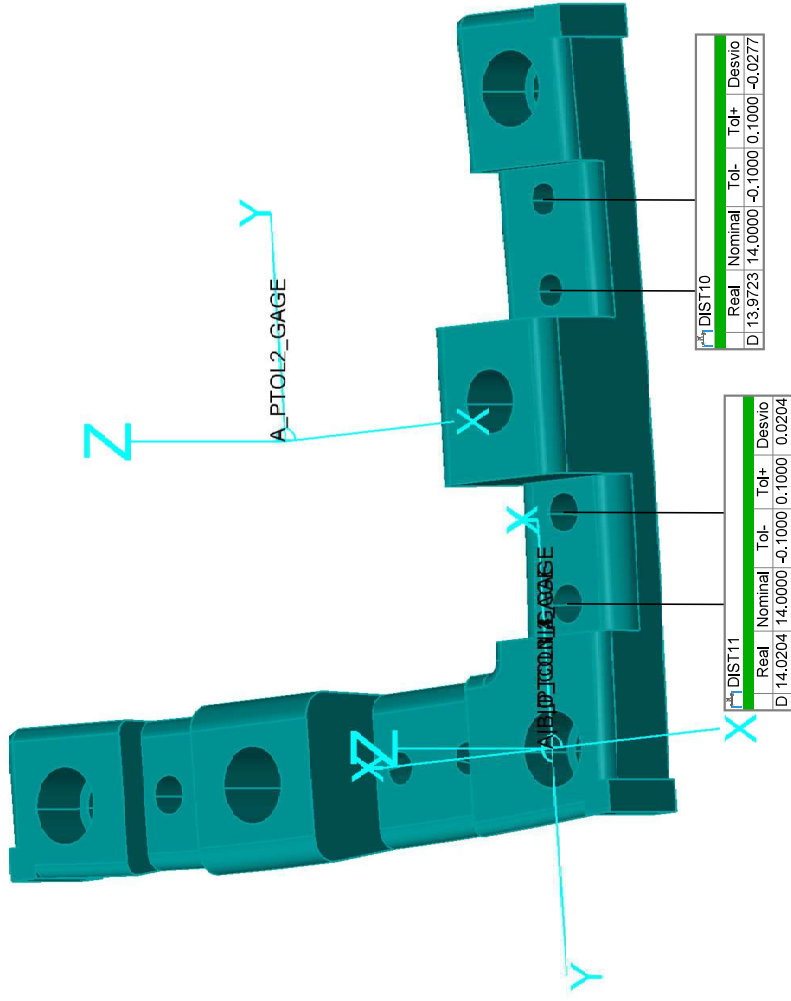
Pág.

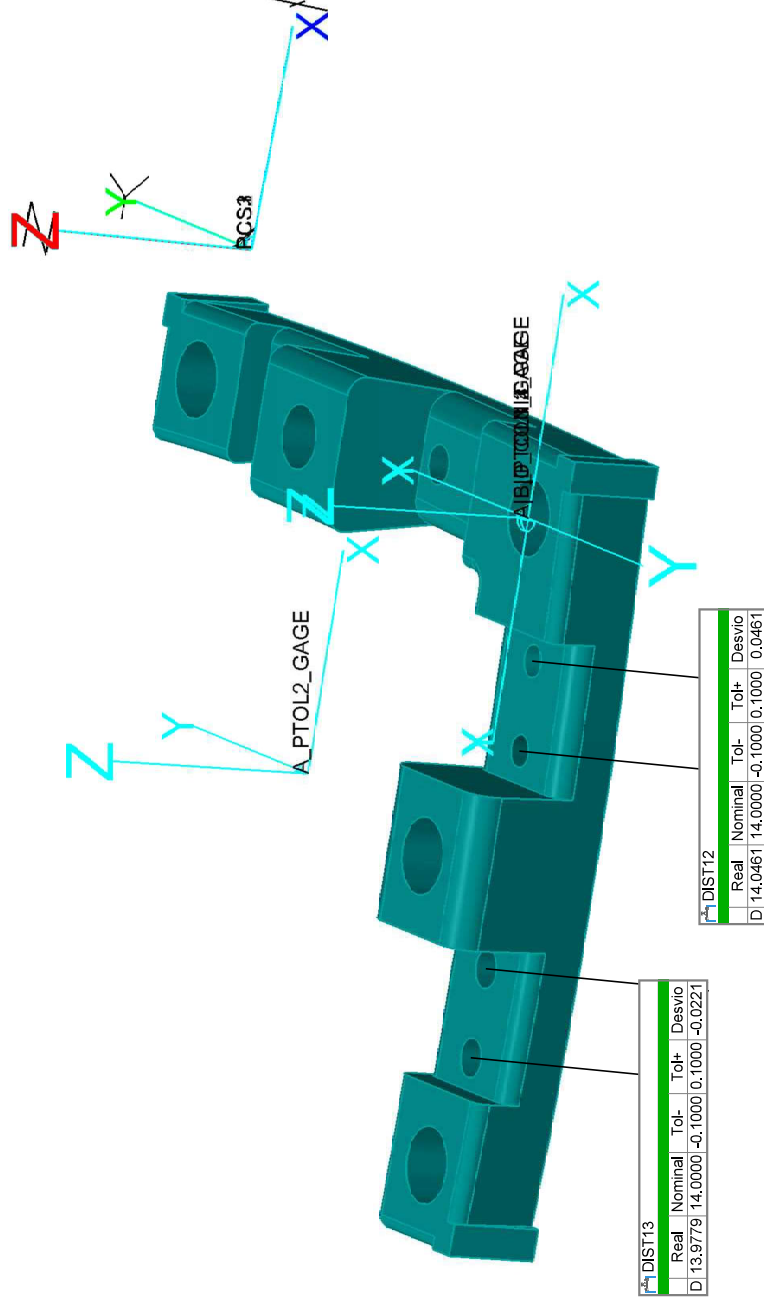
Page

7 / 13

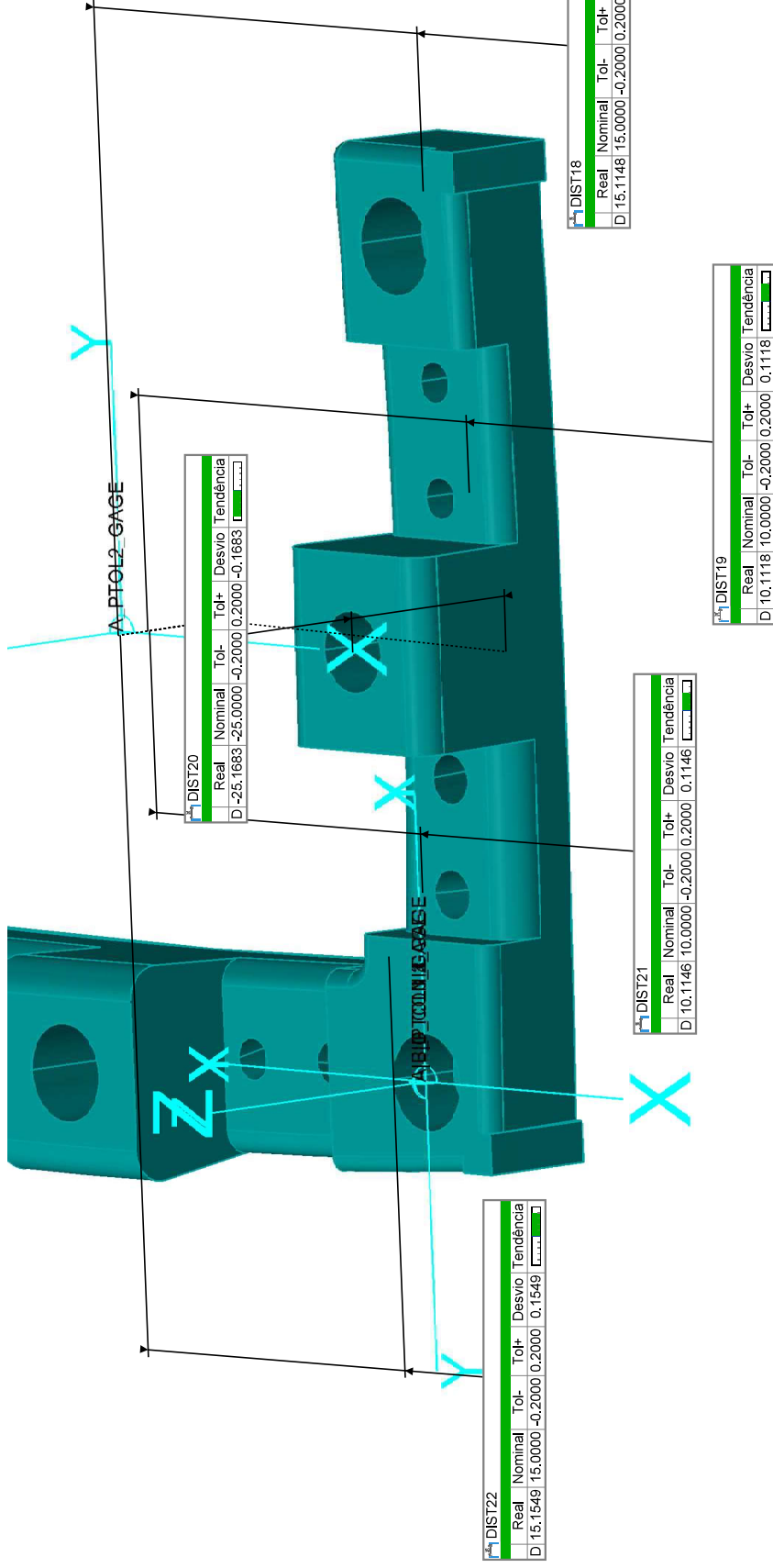


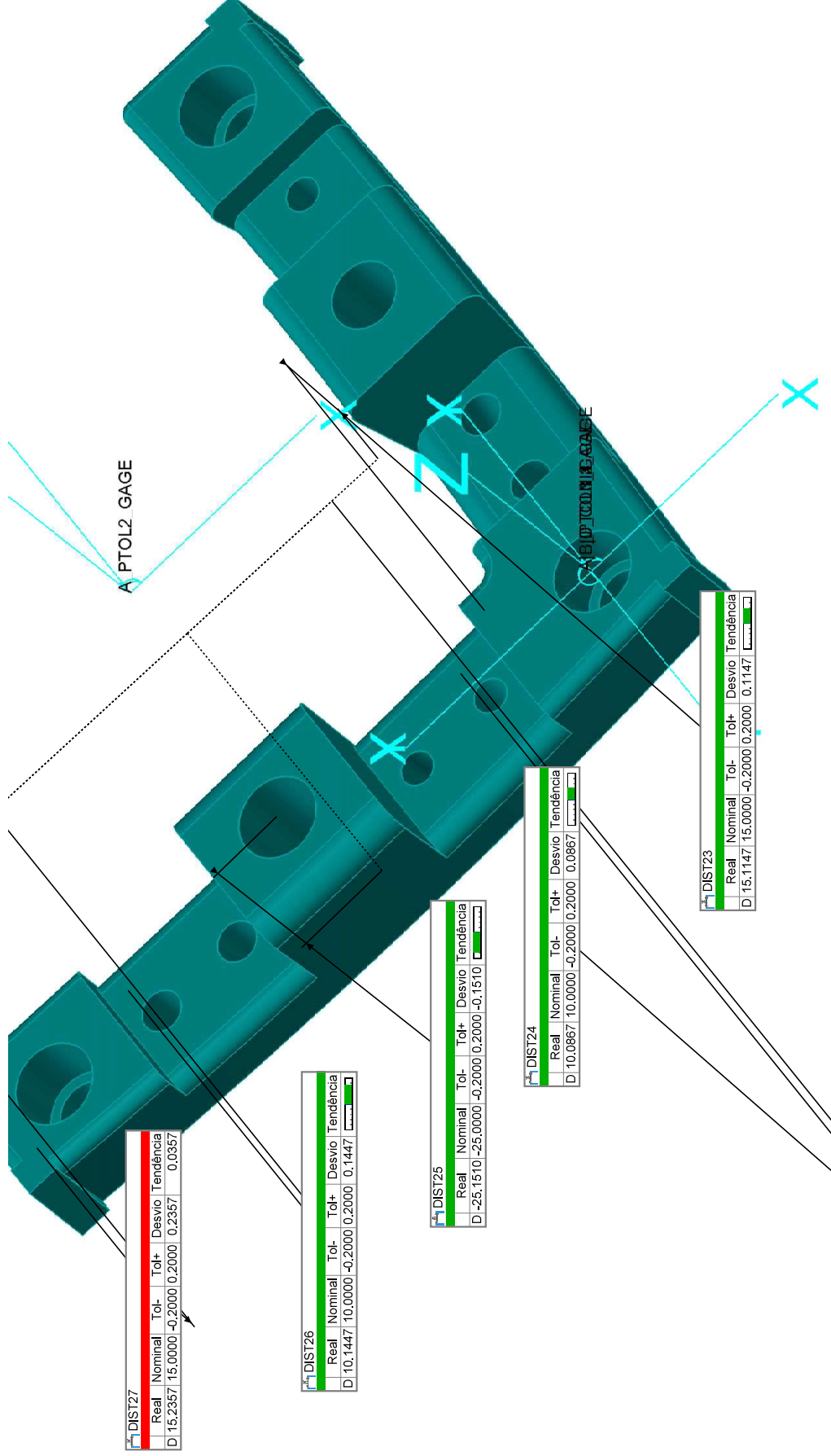










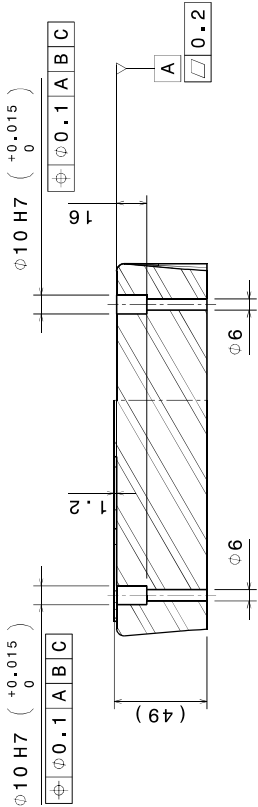


Anexo V

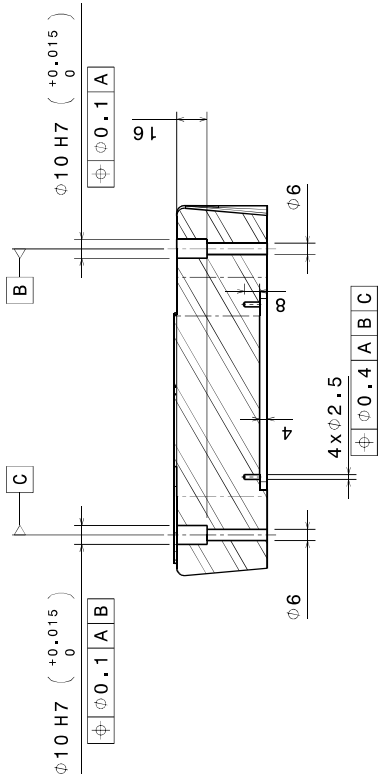
Relatório de Controlo Dimensional Da Ferramenta

No anexo A.5 é apresentado o relatório de controlo dimensional realizado à ferramenta.

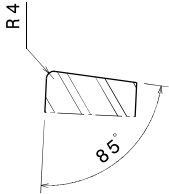
Section view H-H
Scale: 1:2



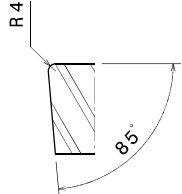
Section view I-I
Scale: 1:2



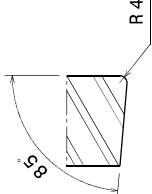
Section cut J-J
Scale: 1:2



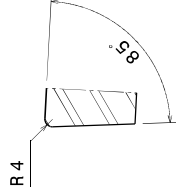
Section cut K-K
Scale: 1:2



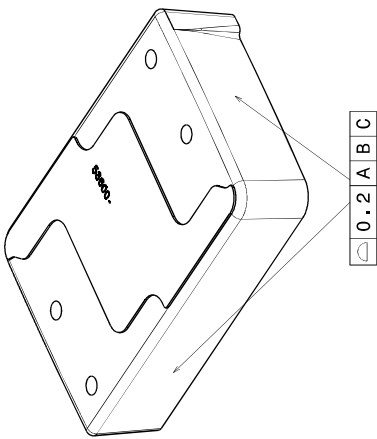
Section cut L-L
Scale: 1:2



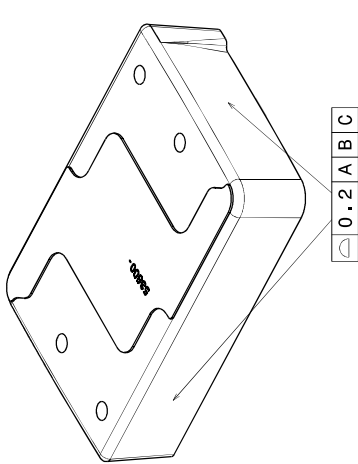
Section cut M-M
Scale: 1:2



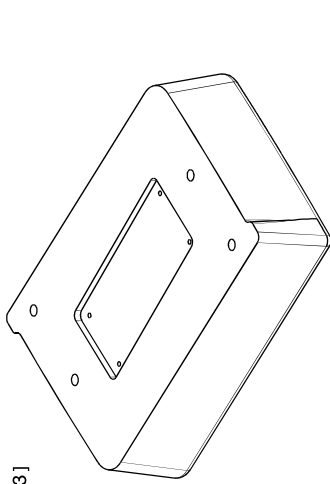
Isometric view
Scale: 1:2



Isometric view [2]
Scale: 1:2



Isometric view [3]
Scale: 1:2



NOTE:
- RESURFACING OF Ra 1.6 AREA (NO SCRATCHS AUTHORIZED)
- MACHINING FOLLOWING CAD FILE

FOR GENERAL TOLERANCES CONSIDER:
- ISO2768-1-M
- ISO2768-2-K

DRAWING	LAUAK AEROSTRUCTURES SETUBAL	DRAWING TITLE	Base
SUPERVISOR		DATE	27/09/2024
ENGINEER		2024.14	
MATERIAL		3.13 kg	
WEIGHT			
ISO / R128-E			
SYN			
REV			
DRAWING NUMBER	55600-	DRAWING SCALE	1:2
SHEET/OF	3/5		

 RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL			Nº4756_25-LAG	
			Pág.1 / 7	EN 9100 BUREAU VERITAS Certification 
IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO / IDENTIFICATION OF MEASURING EQUIPMENT				
Equipamento / EquipmentCMM	Marca / MarkingCOORD3METRO...	Modelo / ModelKRONOS NT	Nº de Série/ Serial nr.04686	Nº EMM / MME nr.LAG 270
Operador / OperatorBruno Jorge				
IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / PART IDENTIFICATION				
Nº Peça / Part Nr.FERRAMENTA DE MO...	Designação / Designation53600-FERRAMENTA_ISOGRID		Nº de OF / Work Order Nr.2 113 726	Data / Date28/11/25 15:57:19
 				

RELATÓRIO DE CONTROLO TRIDIMENSIONAL

REPORT OF THREE-DIMENSIONAL CONTROL

Nº

4756_25-LAG

Pág.

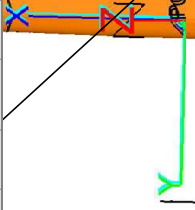
Page

2 / 7



PTOL2

Ø	Ø0.1	A	B
Real	Nominal	Tol-	Tol+
2.9607	0.0000	Ø 0.1000	2.9607



PLAN1

Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio	
0.7981	0.0000	0.2000	0.7981		



PTOL3

Ø	Ø0.1	A	B	C
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
0.3284	0.0000	Ø 0.1000	0.3284	

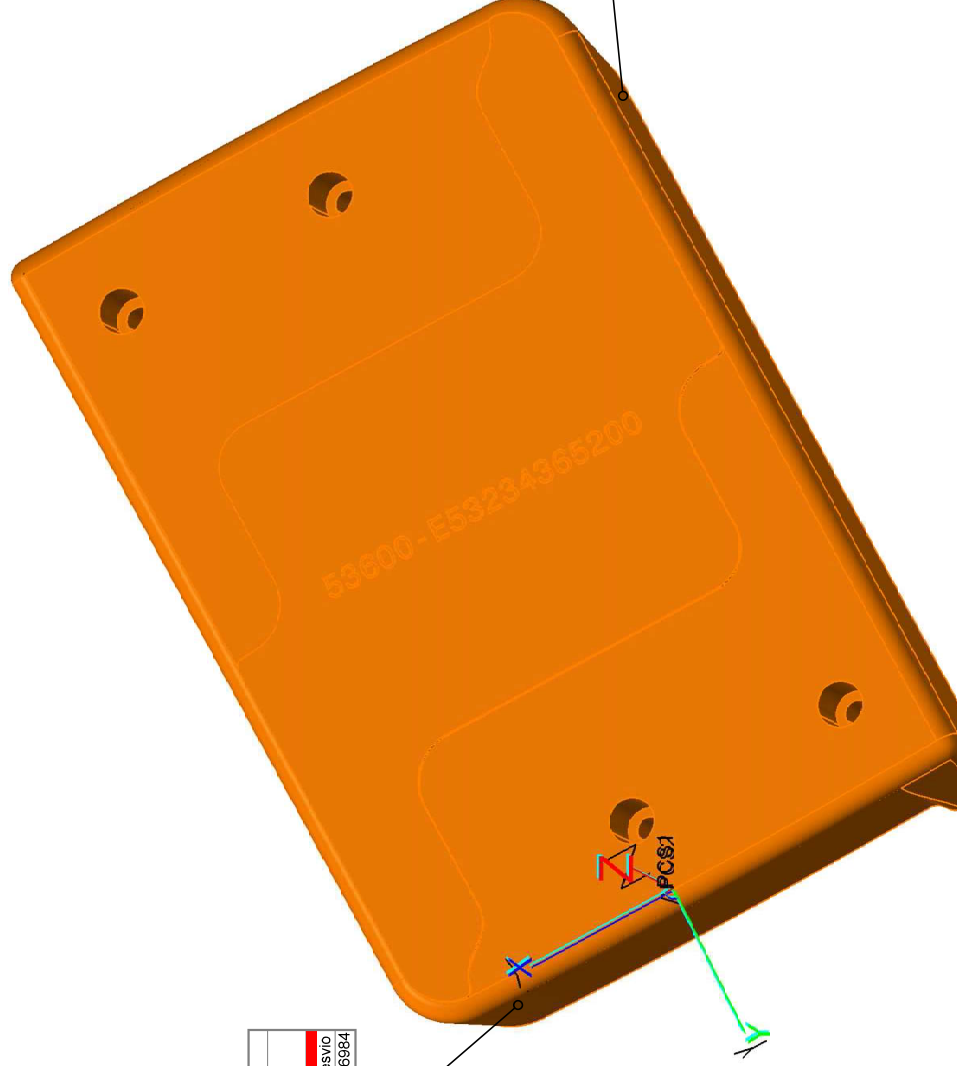
PTOL1

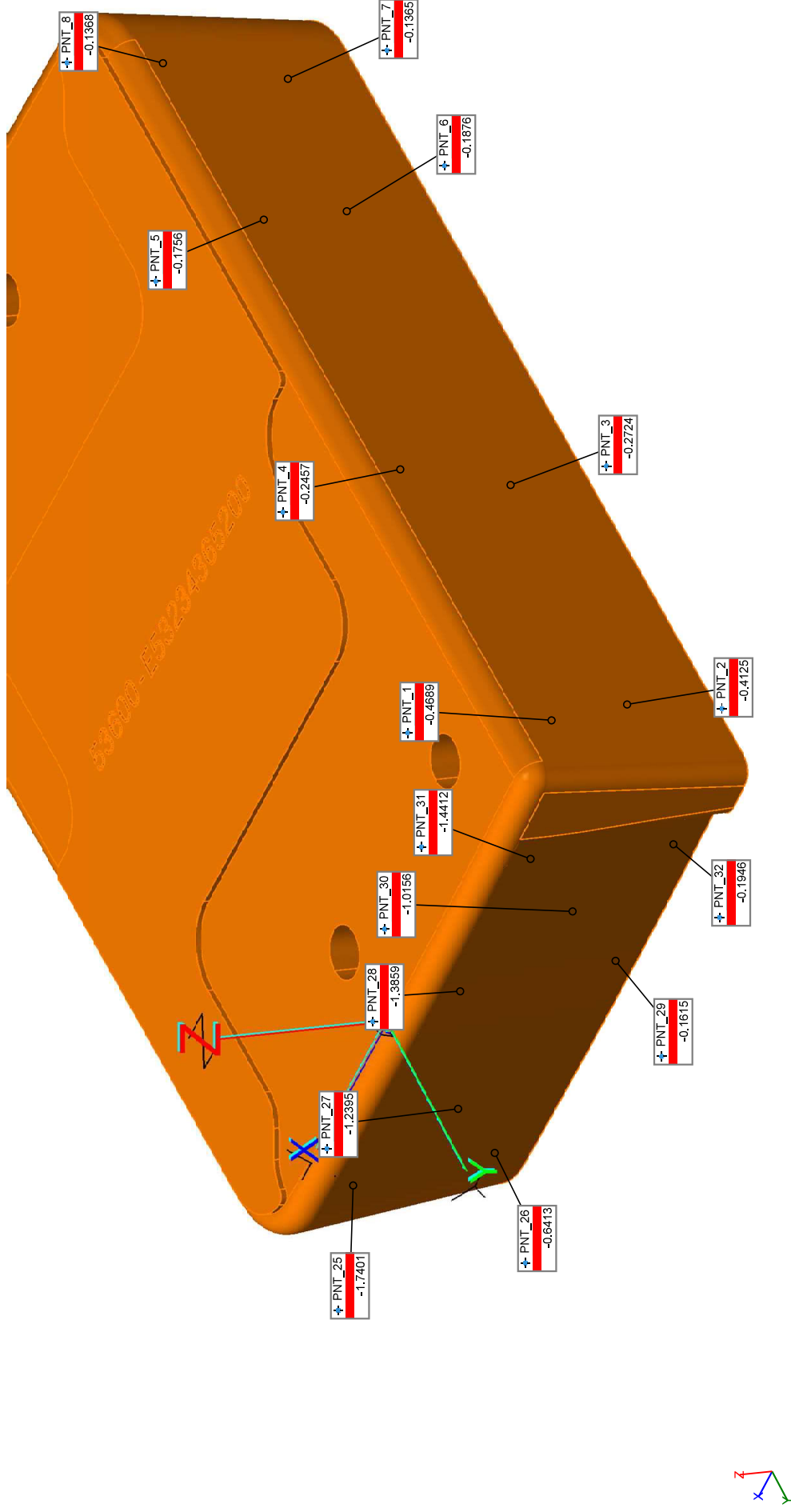
Ø	Ø0.1	A
Real	Nominal	Tol-
0.0282	0.0000	Ø 0.1000

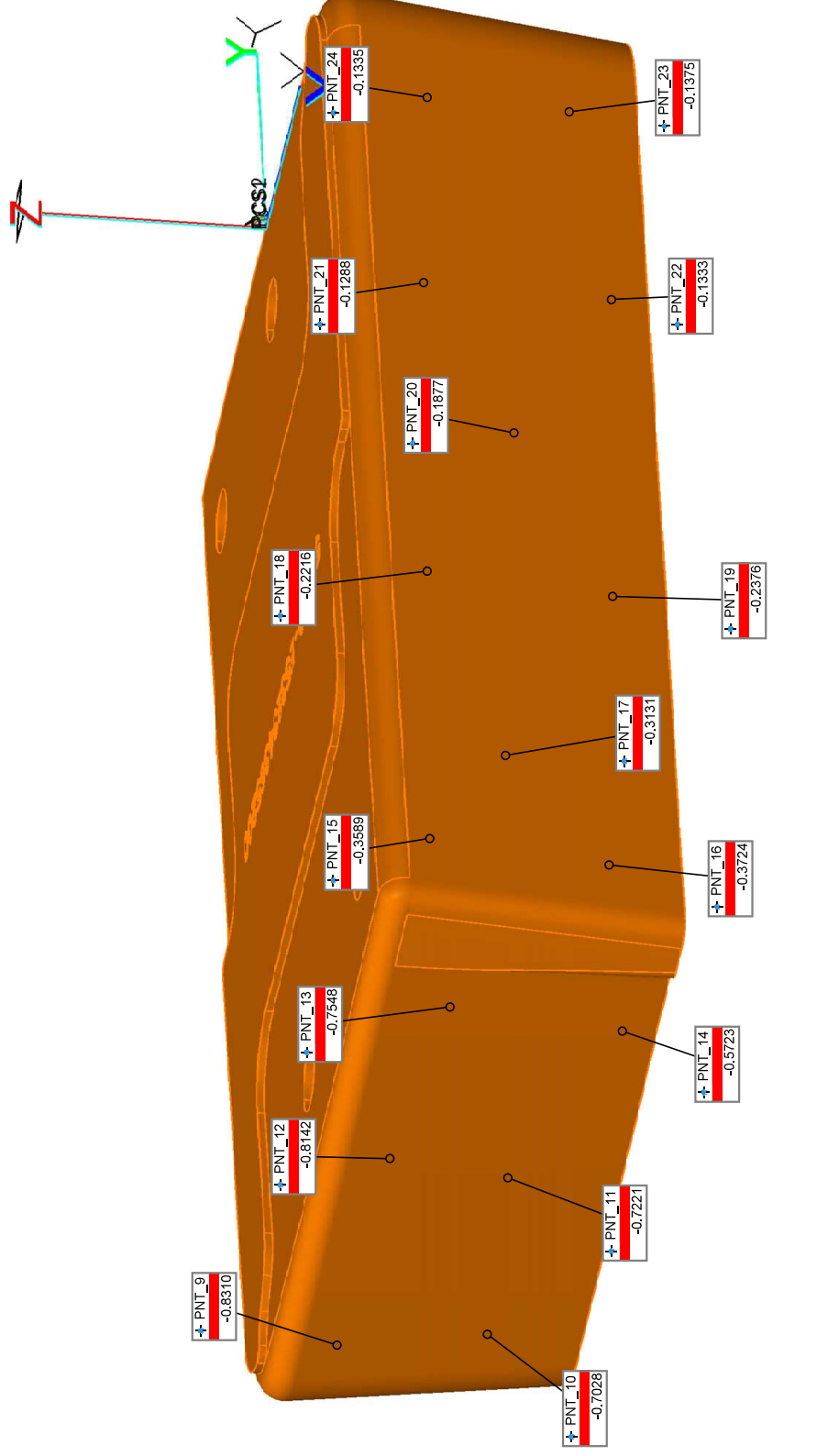
PTOL4

Ø	Ø0.1	A	B	C
Real	Nominal	Tol-	Tol+	Desvio
3.1812	0.0000	Ø 0.1000	3.1812	









 CIR_1

Diám.	9,8244	10,0000	0,0000	0,0150	-0,1756	-0,1756
X	51,1492	51,4692	-0,0500	0,0500	-0,3200	-0,2700
Y	-167,7901	-168,4303	-0,0500	0,0500	0,6401	0,5901
Z	-5,0571	-16,0000	-0,0500	0,0500	10,9429	10,8929

 C

Diám.	9,7604	10,0000	0,0000	0,0150	-0,2396	-0,2396
X	1,8128	1,6409	-0,0500	0,0500	0,1719	0,1219
Y	-18,3219	-17,5980	-0,0500	0,0500	-0,7239	-0,6739
Z	-5,0261	-16,0000	-0,0500	0,0500	10,9739	10,9239

 CIR_2

Diám.	9,7238	10,0000	0,0000	0,0150	-0,2762	-0,2762
X	-49,3823	-49,6866	-0,0500	0,0500	0,3043	0,2543
Y	-18,9489	-18,2479	-0,0500	0,0500	-0,7010	-0,6510
Z	-5,0189	-16,0000	-0,0500	0,0500	10,9811	10,9311

 B

Diám.	9,8745	10,0000	0,0000	0,0150	-0,1255	-0,1255
X	-0,0206	0,1417	-0,0500	0,0500	-0,1623	-0,1123
Y	-168,3350	-169,0802	-0,0500	0,0500	0,7452	0,6952
Z	-5,0266	-16,0000	-0,0500	0,0500	10,9734	10,9234