

VALIDAÇÃO DA TOMOGRAFIA POR RAIOS-X PARA APLICAÇÃO EM METROLOGIA E DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE MEDIÇÃO 3D

JOÃO PEDRO MOREIRA DE PASSOS BORGES DA SILVA

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

ORIENTADOR
VITOR MANUEL BRANCO MARTINS AUGUSTO

ORIENTADOR EMPRESARIAL
FLÁVIO ANDRÉ CARVALHO DOMINGUES

<i>Candidato</i>	<i>Código</i>
<i>Título</i>	
<i>Data</i>	__ de _____ de _____
<i>Local</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala _____ - __:__ h+
<i>Júri</i>	<i>Presidente</i> DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>
<i>Orientador</i>	Vitor Martins Augusto DEMM/FEUP

RESUMO

Este trabalho surge no âmbito da dissertação para conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais e diz respeito a um estágio curricular realizado na empresa Micronsense - Metrologia Industrial. Ao longo do período de permanência na empresa, foi possível adquirir e consolidar conhecimentos na área da metrologia, equipamentos e métodos mais utilizados atualmente. Estes conhecimentos encontram-se descritos em forma de monografia na parte inicial do documento. Complementarmente, são relatados todos os procedimentos realizados e os resultados obtidos ao longo do trabalho desenvolvido no estágio.

Durante o período de dissertação, foi tido como objetivo a aprendizagem em vários equipamentos e *softwares* de metrologia a par de uma integração na equipa de trabalho da Micronsense. Isto implicou o acompanhamento das metodologias desenvolvidas na empresa e uma participação ativa nas suas atividades. Com os conceitos adquiridos, foi proposta a criação de procedimentos de medição que permitissem a análise dimensional de duas peças e de um padrão. As peças foram fornecidas pela Nova Fundínio e pela Moldoeste. Ambas são peças de automóveis, sendo que a da Fundínio é produzida por injeção de alumínio e a da Moldoeste por injeção de plástico. O padrão calibrado foi utilizado para estabelecer uma comparação entre uma CMM certificada de elevada exatidão e a máquina de tomografia por raios-x usada ao longo do trabalho. Realizou-se, também, uma análise de porosidades na peça de alumínio.

Os resultados obtidos com as medições e com os testes realizados permitiram concluir que a tomografia é o método mais eficiente de medição, embora possa ser significativamente mais caro que uma CMM. Caso seja possível a digitalização de várias peças simultaneamente, a tomografia pode compensar financeiramente. Também se verificou que uma máquina de tomografia tem uma exatidão próxima da de uma CMM de uso industrial. A aprendizagem realizada e os dados recolhidos foram utilizados para estabelecer um processo de seleção geral de técnica de medição que tem em conta as características das peças, o processo de produção e o contexto empresarial.

Palavras-chave - Tomografia computadorizada por raios-x; metrologia; máquina de medição por coordenadas; controlo dimensional.

Commented [JPS1]: não abrevies

ABSTRACT

This work was developed within the scope of the dissertation for the conclusion of the Integrated Masters in Metallurgical and Materials Engineering and concerns a curricular internship at Micronsense - Metrologia Industrial. During the long-term permanence in the company, for the acquisition and consolidation of knowledge in the field of metrology. This information can be found in monograph form in the initial part of the document. In addition, all the procedures created and results obtained during the work developed in the internship are described.

During the dissertation period, the objective was to learn about various equipment and metrology software which implied an integration in Micronsense's work team. This made necessary the monitoring of the methodologies developed in the company and an active participation in its activities. With the acquired notions, measurement procedures that allowed the dimensional analysis of two parts and a standard were created. One of the parts was supplied by Nova Fundínio and is produced by aluminium injection, the other one was supplied by Moldoeste and is made by plastic injection, both are auto parts. The calibrated standard was used to establish a comparison between a highly accurate certified CMM and the x-ray machine used throughout the project. A porosity analysis was also carried out on the aluminium part.

The results obtained with the measurements and the tests performed on the parts lead to the conclusion that tomography is the most efficient method of measurement, although it can be significantly more expensive than a CMM. If it is possible to scan several parts simultaneously, the CT scan can be financially viable. It has also been found that a tomography machine has an accuracy close to that of an industrial CMM. The knowledge acquired and the collected data were used to establish a general selection process of measurement techniques that takes into account the characteristics of the parts, the production process and the business context.

Keywords - Computerized x-ray tomography; metrology; coordinate measuring machine; dimensional control.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Vitor Martins Augusto por orientar a minha dissertação, por ter promovido o contacto com a Micronsense que culminou com o estágio curricular que permitiu o desenvolvimento deste trabalho e pelo apoio contínuo ao longo da realização deste projeto.

À Micronsense, em particular ao engenheiro Helder Morais, por ter aceite o meu estágio e por ter disponibilizado todas as condições para que este pudesse decorrer, e ao engenheiro Flávio Domingues, pela orientação e conselhos indispensáveis durante o período de estágio. Também aos restantes colaboradores da Micronsense, por todo o apoio prestado e companheirismo durante a minha estadia em Leiria e pelos conhecimentos transmitidos.

À minha família e amigos por me terem apoiado ao longo de todo o percurso académico, em particular durante os meses que passei em Leiria. Um agradecimento especial ao meu pai e à minha irmã por me terem aconselhado e ajudado sempre que necessitei na duração da dissertação.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos	iii
Lista de Figuras.....	1
Lista de Tabelas	4
Objetivos	5
Abreviaturas e Sinónimos	5
1. Metrologia.....	6
1.1. Certificação e Rastreabilidade	7
1.2. Incerteza e Erro	8
1.3. Calibração, Precisão e Repetibilidade.....	9
1.4. Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico	11
2. Equipamentos de Metrologia	12
2.1. Máquinas de Medição por Coordenadas	12
2.2. Metrologia Portátil	17
2.3. Metrologia por Vídeo.....	20
2.4. Tomografia Computorizada por Raio-X.....	22
4. Peças Seleccionadas	32
5. Equipamento Utilizado	33
5.1. CT Phoenix v tome x m	33
5.2. CMM de Ponte Móvel Coord3 Ares Adaptada	34
6. Software Utilizado	34
6.1. Phoenix Datos x.....	35
6.2. VGStudio Max	35
6.3. GOM Inspect	35
6.4. Geomagic Control	36
6.5. Modus	36

7. Procedimentos para as Peças de Produção Industrial.....	36
7.1. Digitalização com o CT e Criação da Malha da Peça	37
7.2. Análise de Porosidades	40
7.3. Medição com o Geomagic.....	41
7.4. Medição com a CMM	45
8. Procedimentos e Resultados da Análise do Padrão.....	48
8.1. Ensaio de Exatidão do CT	49
8.2. Ensaio de Repetibilidade do CT	51
9. Análise de Custo de Medição	52
9.1. Peça da Nova Fundínio	53
9.2. Peça da Moldoeste	55
9.3. Considerações Adicionais	56
10. Seleção da Técnica de Medição.....	57
11. Conclusões	60
11.1. Desenvolvimentos Futuros.....	61
Referências bibliográficas.....	62
Anexos	65
Anexo 1 - Resultados da Análise de Porosidades	65
Anexo 2 - Desenhos Técnicos	66
Anexo 3 - Comparações Feitas no Geomagic	68
Anexo 4 - Alinhamento Por Best-Fit na CMM.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da cadeia de rastreabilidade de uma medição certificada. [3]	8
Figura 2 - Componentes constituintes de um sistema de medição por coordenadas. [11]	13
Figura 3 - CMM de ponte móvel (A); CMM tipo gantry (B); CMM de ponte fixa (C); CMM tipo cantiléver (D); CMM de braço horizontal (E)	15
Figura 4 - Sonda PH 20 da Renishaw.	17
Figura 5 - Faro ScanArm [32]	19
Figura 6 - Exemplo de um sistema de medição por vídeo do fabricante OGP [33]. ...	20
Figura 7 - Sistema de medição por vídeo da OGP [34].	22
Figura 8 - Representação esquemática de uma fonte de raios-x [23]	23
Figura 9 - Digitalização de um autorrádio obtido por tomografia. (Cortesia da Micronsense)	24
Figura 10 - Avaliação de mercado da tomografia e das suas tendências para 2016 e 2017 (valores apresentados estão na ordem dos milhões de euros) [25]	25
Figura 11 - Fotografia da máquina de CT Phoenix v tome x m. (Cortesia da Micronsense)	26
Figura 12 - Peças utilizadas no estudo CIA-CT [25].	28
Figura 13 - Exemplo de uma imagem com artefactos provocados por beam hardening [27].	29
Figura 14 - Placa de circuitos digitalizada por tomografia e colorida com recurso ao software VGStudio Max. (Cortesia da Micronsense)	30
Figura 15 - Exemplo de resultado obtido por simulação de um ensaio de resistência mecânica realizado de um provete. (Cortesia da Micronsense)	31
Figura 16 - Peça polimérica (em cima); Peça em alumínio (em baixo).	32

Figura 17 - Máquina de tomografia Phoenix v tome x m.	33
Figura 18 - Posicionamento da peça de alumínio dentro da máquina de tomografia.	37
Figura 19 - À esquerda, captura de imagem da peça de alumínio no software Datos; à direita, (a) filtro de cobre e (b) filtro de chumbo.	38
Figura 20 - Digitalização da peça de plástico antes da reconstrução no Datos e, realçado a vermelho, o espaço ocupado pelo ficheiro.	38
Figura 21 - Alteração do tamanho da <i>mesh</i> no GOM.	39
Figura 22 - Resultado da análise de porosidades realizada com o VGStudio no volume da peça de alumínio.	40
Figura 23 - Identificação dos três pontos utilizados no alinhamento e desvio associado a cada um deles após o alinhamento.	41
Figura 24 - Comparação entre a peça polimérica e o seu CAD.	42
Figura 25 - Comparação entre a peça metálica e o seu CAD.	43
Figura 26 - Exemplo de medições feitas nos cortes de secção criados no Geomagic.	43
Figura 27 - Peça de alumínio fixa no gabari construído com o kit Alufix.	45
Figura 28 - Calibração de um dos ângulos utilizados durante a medição das peças.	45
Figura 29 - Pontos recolhidos com a CMM para medição da cota 7 da peça de alumínio.	47
Figura 30 - Padrão montado com o seu suporte no compartimento da máquina de tomografia.	48
Figura 31 - Padrão como foi capturado pelo detetor do CT (à esquerda) e esferas de rubi do padrão depois do reconhecimento de superfície no VGStudio (à direita).	49
Figura 32 - Gráfico que apresenta o desvio entre as medições feitas no Geomagic e no VGStudio para as digitalizações feitas a 400 mm (a cinzento) e a 600 mm (a vermelho) do emissor.	50
Figura 33 - Gráfico com a diferença entre o CT e a CMM.	50
Figura 34 - Gráfico com a diferença média entre as três medições de cada dimensão.	51

Figura 35 - Gráfico que apresenta a diferença entre medições da mesma digitalização feitas no VGStudio.	52
Figura 37 - Gráfico da variação do custo de medição por peça ao longo dos 15 anos de produção.	54
Figura 36 - Gráfico da evolução do tempo consumido na medição de 10000 peças no CT e na CMM.	53
Figura 38 - Gráfico da evolução do tempo consumido na medição de 10000 peças no CT e na CMM.	55
Figura 39 - Gráfico da variação do custo de medição por peça ao longo dos 15 anos de produção.	56
Figura 40 - Fluxograma do processo de decisão de compra de uma CMM ou de um CT.	58
Figura 41 - Distribuição de volume dos defeitos identificados.	65
Figura 42 - Relação entre a esfericidade e o diâmetro das porosidades.	65
Figura 43 - Desenho técnico de alumínio.	66
Figura 44 - Desenho técnico da peça de plástico.	67
Figura 45 - Pontos considerados no alinhamento por best-fit realizada no Modus durante a medição da peça de plástico com a CMM.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Símbolos utilizados para identificar os vários tipos de toleranciamento em desenhos técnicos. [8]	12
Tabela 2 - Resultados da análise de porosidades.	41
Tabela 3 - Tempo despendido no processo de medição da peça de alumínio com recurso à tomografia.	44
Tabela 4 - Tempo despendido no processo de medição da peça de plástico com recurso à tomografia.	44
Tabela 5 - Tempo despendido no processo de medição da peça metálica utilizando uma CMM.	47
Tabela 6 - Tempo despendido no processo de medição da peça de plástico utilizando uma CMM.	47
Tabela 7 - Estimativas dos preços médios dos equipamentos considerados neste trabalho e da sua manutenção.	52

OBJETIVOS

Esta dissertação teve como objetivos primários a integração na equipa de trabalho da Micronsense, desenvolvimento de metodologias de medição e estabelecimento de parâmetros de decisão na escolha entre uma máquina de tomografia computadorizada e uma **CMM**.

Commented [JPS2]: aqui também nao

Para cumprimento destes objetivos, foram necessários o acompanhamento diário das atividades da Micronsense e a aprendizagem na utilização de equipamentos de metrologia e de softwares de metrologia. Os projetos realizados ao longo do trabalho estiveram relacionados com a aplicação de conhecimentos da área da metrologia, em particular a análise de dados recolhidos com recurso à tomografia.

ABREVIATURAS E SINÓNIMOS

CMM - *Coordinate Measuring Machine* - Máquina de Medição de Coordenadas.

CT - *Computerized Tomography* - Tomografia Computorizada. Apesar de ser a denominação da técnica, a abreviatura “CT” é utilizada como referência ao equipamento utilizado por ser este o termo utilizado pela equipa técnica da Micronsense.

GD&T - *Geometric Dimensioning and Tolerancing* - Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico.

1. METROLOGIA

Segundo o *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), a metrologia pode ser definida como a ciência da medição que inclui determinações experimentais e teóricas a qualquer nível de incerteza e em qualquer área científica e tecnológica. A metrologia como hoje existe teve a sua origem na criação do Sistema Métrico Decimal, com o depósito de dois padrões de platina, um para o metro e outro para o quilo, nos Arquivos da República em Paris no ano de 1799. Este também foi o primeiro passo na criação do Sistema Internacional de Unidades (SI). Em 1875, a Convenção do Metro foi assinada em Paris pelos representantes de dezassete nações. Este acordo originou o BIPM que se trata de uma instituição intergovernamental sob a alçada da *Conférence Générale des Points et Mesures* (CGPM) e da *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM). As suas responsabilidades centram-se no mundo da metrologia e na necessidade de demonstração de equivalência entre os estandartes de medição nacionais. Neste momento, a Convenção do Metro tem 48 estados signatários [1], [2].

A *European Association of National Metrology Institutes* (Euramet) divide o fundamento da metrologia em dez domínios consoante a grandeza em questão: massa, eletricidade, comprimento, tempo e frequência, temperatura, radiações, fotometria, caudal, acústica e quantidade de matéria. Outro modo de categorização da metrologia tem em conta o nível de complexidade e de exatidão exigidos e, seguindo esta ideologia, na União Europeia são distinguidos três tipos de metrologia:

- Metrologia legal - controlo de instrumentos de medição em domínios como transações comerciais, saúde e proteção do ambiente.
- Metrologia industrial - atividades de controlo de processo e calibração de sistemas internos. É neste tipo de metrologia que o presente documento se foca.
- Metrologia científica - desenvolvimento, organização e manutenção de padrões de medição.

Ainda é possível falar em metrologia fundamental. Esta não possui uma definição internacional, no entanto, é genericamente tida como sendo o nível mais alto de exatidão em determinado campo [2], [3].

1.1. CERTIFICAÇÃO E RASTREABILIDADE

A EURAMET define um Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) como o laboratório considerado para desenvolver e manter padrões. Este pode estar organizado de uma forma centralizada existindo apenas um LNM ou pode ser descentralizado com vários laboratórios a possuírem esse estatuto. Este laboratório também age como representante nacional nas relações com os laboratórios de outros países e com o BIPM. Para além do LNM existem:

- Laboratórios primários que são reconhecidos internacionalmente e nomeados pelo LNM de acordo com o plano de ação metrológico e a política metrológica do país.
- Laboratórios de referência que têm de ser capazes de executar calibrações ao mais elevado nível de exatidão nacional. As medições têm de ser rastreáveis a um laboratório primário.
- Laboratórios acreditados que são reconhecidos pela sua competência e pela sua imparcialidade como organismo independente. Têm de ser acreditados pelo organismo nacional de acreditação com base na norma NP EN ISO/IEC 17025.

Em Portugal, é o Instituto Português da Qualidade que assegura a representação nacional a nível da qualidade. É responsável pela acreditação e normalização das entidades nacionais através da promoção da aplicação de normas. O Instituto Português de Acreditação (IPAC) é subordinado ao IPQ e visa a acreditação de entidades nacionais. Por acreditação o IPAC entende avaliação e reconhecimento da competência técnica para efetuar atividades específicas de avaliação da conformidade. A avaliação da conformidade consiste na realização de ensaios, calibrações, inspeções e certificações e têm, geralmente, como objetivo demonstrar que determinado produto, processo ou serviço cumpre os requisitos que lhe são exigidos.

As relações entre estas instituições compõem uma cadeia de comparações cujas incertezas são conhecidas. Esta cadeia permite a rastreabilidade de qualquer medição ou padrão devidamente certificados às referências de mais alto nível incluindo os padrões primários (ex. o padrão que define a unidade quilograma). O responsável pelo departamento de metrologia deve garantir que todas as medições são concordantes com as exigências das normas ISO. Uma representação esquemática da cadeia de rastreabilidade pode ser vista na figura 1 [2]-[4].

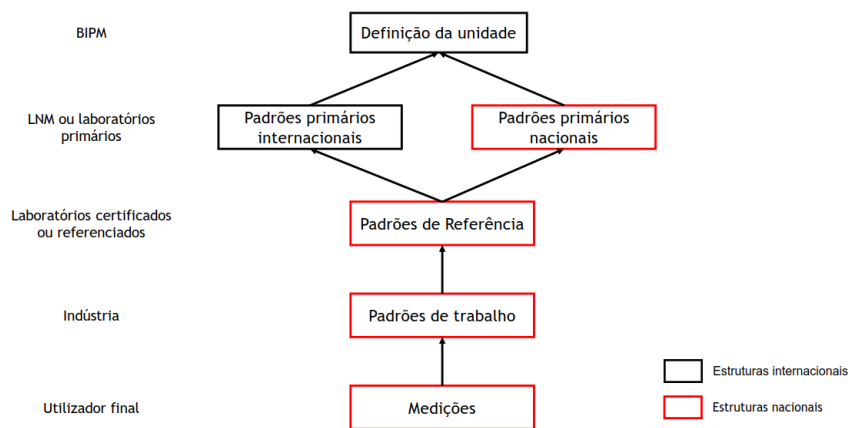


Figura 1 - Representação esquemática da cadeia de rastreabilidade de uma medição certificada [3].

1.2. INCERTEZA E ERRO

Toda a medição implica um desvio em relação ao valor real, o que torna necessário estabelecer uma relação entre o valor obtido e o real. Nesta relação torna-se necessário compreender que o valor verdadeiro é indeterminável e que este é substituído pelo valor tido como convencionalmente verdadeiro, também chamado melhor estimativa. O desvio do valor convencionalmente verdadeiro associado à medição é denominado erro de medição. Por outro lado, a exatidão corresponde à proximidade entre o resultado obtido com o valor convencionalmente verdadeiro da grandeza. Trata-se de uma conceção qualitativa utilizada para estabelecer comparações entre medições ou entre equipamentos. Geralmente, não há informação relativa ao valor verdadeiro nem uma melhor estimativa o que obriga à utilização das características de incerteza especificadas pelo fabricante para o equipamento em questão. Isto torna a comparação entre equipamentos um pouco complicada por apenas se poder comparar as características técnicas dos instrumentos tal como elas foram determinadas pelo fabricante e essa determinação pode ser feita de maneiras e em condições muito variáveis [2], [3], [5].

A incerteza é uma medida quantitativa da qualidade de uma medição, sendo representada como o limite máximo e mínimo para os erros possivelmente cometidos. O valor de incerteza é sempre acompanhado de “±” pois os erros podem corresponder a um valor maior ou menor do que o seria esperado. As principais fontes de erro e de incerteza são [2], [3], [5]:

- O padrão utilizado na calibração do equipamento;
- O equipamento de medição utilizado;
- O método de medição;
- Condições ambientais, nomeadamente, a temperatura e a humidade que podem provocar alterações apreciáveis nas peças que compõem os equipamentos de medição e as peças a medir;
- O operador.

Todas estas fontes de incerteza podem levar a um erro na medição e estes são divididos em três categorias: erros grosseiros, erros sistemáticos e erros aleatórios. Os primeiros estão, normalmente, associados a falha humana e advêm do facto do processo de medição incluir uma componente de percepção humana, como por exemplo, uma leitura incorreta do instrumento. Os erros sistemáticos são provocados por falhas no equipamento ou no procedimento estabelecido e provocam desvios apenas num sentido. São de difícil deteção e obrigam a uma verificação regular dos parâmetros do procedimento e calibração do equipamento. No entanto, apesar da sua identificação exigir um grande conhecimento e controlo do processo e equipamentos utilizados, são de fácil eliminação ou compensação. No caso da metrologia, para além dos instrumentos e da metodologia utilizados também é necessário ter em mente as variações impostas por alterações nas condições ambientais tais como a temperatura e a humidade. Sendo conhecidas as condições de trabalho é possível fazer compensações com o *software* de modo a ultrapassar a influência ambiental, mas a melhor solução passa por uma manutenção das condições no intervalo indicado para o equipamento. Ao contrário dos erros sistemáticos, é difícil de explicar a origem dos erros aleatórios e, como tal, a sua eliminação é problemática. São identificados pela obtenção de valores diferentes durante medições sucessivas de uma grandeza conhecida que não varia. Devido à sua natureza, são considerados erros residuais cujo impacto só pode ser minimizado com o aumento do número de medições para, numa análise estatística, ser obtida uma melhor aproximação [2], [3], [5].

1.3. CALIBRAÇÃO, PRECISÃO E REPETIBILIDADE

Inevitavelmente, os equipamentos de metrologia perdem as suas características de qualidade devido a uso continuado ou casos de má utilização. De modo a validar as características indicadas pelos fabricantes devem ser feitas calibrações e verificações em intervalos regulares. A periodicidade das calibrações deve ser definida tendo em conta o tipo de equipamento, a frequência de utilização e o seu desgaste, enquanto que para as

verificações o intervalo entre ocorrências é imposto por regulamentações de controle metrológico. Estas operações são comparações entre os resultados obtidos por um equipamento de medição e outros obtidos por um equipamento padrão. A comparação irá determinar se a exatidão se encontra dentro do intervalo declarado pelo fabricante. Para a calibração ter validade, a sua incerteza deve encontrar-se entre um décimo e um quarto da incerteza especificada para o equipamento a calibrar. Um ajuste do equipamento pode ser integrado na operação de calibração. No final deste procedimento, um certificado de calibração é emitido como confirmação oficial da exatidão do instrumento [2], [3], [5].

O resultado da calibração pode, posteriormente, ser utilizado para realizar uma verificação, ou seja, uma comparação com prescrições regulamentares de limites de erro definidas por normas, tais como a ASTM E177, que irá permitir uma tomada de decisão sobre a conformidade do instrumento. Torna-se claro que uma calibração tem um resultado numérico, enquanto que numa verificação o resultado será um julgamento sobre a capacidade de trabalho de um equipamento que se poderá traduzir numa decisão. Se for verificado que o instrumento de medição não se encontra conforme, este poderá ser reformado, desclassificado, reparado ou ajustado. Qualquer uma destas classificações implica uma retirada do serviço durante períodos de tempo mais ou menos longos, podendo ser permanente no caso da reforma. Para voltar ao serviço, a causa da não conformidade tem de ser identificada e eliminada e o equipamento tem de passar por uma nova verificação. Todas as verificações são realizadas por laboratórios independentes da instituição que requer a verificação e do fabricante do produto em questão [2], [3], [5].

A repetição de ensaios utilizando os mesmos procedimentos, equipamentos e materiais não consegue, de forma consistente, obter resultados numericamente iguais. Isto acontece devido a pequenas variações em fatores que são inerentes ao ensaio que se está a realizar ou ao método que se está a implementar. Exemplo destes fatores são os operadores que podem fazer a preparação do material de forma ligeiramente diferente ou equipamentos equivalentes com pequenas diferenças de performance. Fatores ambientais, tais como a temperatura e a humidade, também podem ter um impacto muito significativo nos resultados e são difíceis de controlar caso os testes sejam realizados em laboratórios diferentes. Estas variações podem ser entendidas como imperfeições inerentes ao teste e são denominadas como “precisão”. Assim, é possível constatar que a precisão de determinado teste, ou medição, está diretamente relacionada com fatores específicos. Isto permite definir os conceitos de repetibilidade e reprodutibilidade que estão relacionados com a precisão de um determinado método de teste em determinadas condições e são standardizados e normalizados por instituições como a ASTM e a ISO. Os valores associados a estes conceitos são a máxima diferença entre dois resultados obtidos por determinado

método que pode ser atribuída à precisão deste. Como tal, os limites de repetibilidade e reprodutibilidade (r e R respetivamente) definidos podem ser utilizados como limites de decisão na validação de resultados de testes que utilizam a mesma metodologia em condições de trabalho especificadas. No entanto, é necessário ter em consideração que estes valores são obtidos através de estudos estatísticos criados tendo em conta métodos e parâmetros específicos. Infere-se que os limites têm a sua aplicação limitada à metodologia e parâmetros avaliados no estudado que originou o seu valor numérico [6].

1.4. DIMENSIONAMENTO E TOLERANCIAMENTO GEOMÉTRICO

As tolerâncias dimensionais delimitam as dimensões que os elementos podem ter. No entanto, estas não garantem a geometria necessária ao funcionamento. Para resolver este problema, foi criado um sistema de toleranciamento que define a geometria das peças, o GD&T. Este acrónimo vem de *Geometric Dimensioning and Tolerancing* que se traduz para português como Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico. Este sistema utiliza símbolos standardizados internacionalmente capazes de descrever peças de uma forma compreensível para quem conheça a linguagem. A *American Society of Mechanical Engineering* (ASTM) e a *International Organization for Standardization* (ISO) trabalham em conjunto para criarem normas escritas que definem a metodologia do sistema GD&T, a ASTM Y14.5M e a ISO 1100, respetivamente [7], [8].

A tolerância geométrica define uma zona de tolerância dentro da qual o elemento deve ficar compreendido, se este não for o caso o elemento está não uniforme. Estas zonas são compostas por linhas ou planos tidos como geometricamente ideais. Para verificação de peças, as zonas de tolerância têm de ser definidas por formas presentes na peça que tenham boa exatidão e possam ser consideradas teoricamente exatas denominadas datums. Dependendo da característica geométrica a verificar, a zona de tolerância pode ser limitada por [7], [8]:

- Duas linhas paralelas, uma coroa circular ou um círculo numa superfície plana;
- Dois planos paralelos, duas superfícies equidistantes ou dois cilindros coaxiais;
- Um paralelepípedo, cilíndrico ou esférico.

As tolerâncias geométricas aplicadas podem ser inseridas em cinco categorias principais [7], [8]:

- Tolerância de forma que inclui planeza, circularidade, cilíndricidade e retitude e define elementos relativamente simples de forma individual;
- Tolerância de perfil pode ser utilizado para definir vários aspetos de um elemento e inclui o perfil de uma linha ou de uma superfície;
- Tolerância de orientação podem definir paralelismos, perpendicularidades e angularidade;
- Tolerância de localização é utilizada para definir concentricidade, simetria e posição;
- Tolerância de batimento são utilizadas em componentes cilíndricos e dividem-se em batimento circular e batimento total.

Tabela 1 - Símbolos utilizados para identificar os vários tipos de toleranciamento em desenhos técnicos [8].

TYPE OF TOLERANCE	CHARACTERISTIC	SYMBOL	DATUM REFERENCE
FORM	STRAIGHTNESS	—	INDIVIDUAL
	FLATNESS	▭	
	CIRCULARITY (ROUNDNESS)	○	
	CYLINDRICITY	∅	
PROFILE	PROFILE OF A LINE	⤿	INDIVIDUAL OR RELATED
	PROFILE OF A SURFACE	⤿	
ORIENTATION	ANGULARITY	∠	RELATED
	PERPENDICULARITY	⊥	
	PARALLELISM	∥	
LOCATION	POSITION	⊕	
	CONCENTRICITY	⊙	
	SYMMETRY	≡	
RUNOUT	CIRCULAR RUNOUT	↗	
	TOTAL RUNOUT	↗↗	

Os símbolos utilizados pelos vários tipos de tolerância descritos acima e a sua relação com os datums podem ser vistos na tabela 1 [7], [8].

2. EQUIPAMENTOS DE METROLOGIA

2.1. MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Graças à sua flexibilidade de aplicação, as máquinas de medição por coordenadas (CMMs) são um dos equipamentos mais utilizados pela indústria em geral para controlo dimensional de peças. O primeiro instrumento deste tipo foi introduzido no mercado em 1956 pela empresa britânica Ferranti Ltda. com o intuito de satisfazer a necessidade de inspeção de peças cada vez mais complexas e com cadência de produção crescente criada pela introdução de máquinas ferramenta de controlo numérico. Trata-se de um equipamento que, sendo controlado por um computador, utiliza sondas de apalpação para obter pontos de coordenadas na superfície de uma peça. Os movimentos da sonda são definidos por programação com *softwares* de metrologia ou determinados manualmente através da utilização de um *joystick* [9]-[11].

A função primária de uma máquina de medição por coordenadas é a medição da forma de uma peça, comparar o resultado com o que é desejado obter e avaliar dados metrológicos tais como desvios de forma, localização e orientação de componentes. A recolha de pontos pode ser feita com vários tipos de sensor, tanto com contacto como sem contacto. A forma real de uma peça é obtida através da aquisição de pontos de coordenadas de forma discreta. Para realizar as medições, é necessária a criação de um modelo analítico que, geralmente, é constituído por formas geométricas ideais que substituem as geometrias reais. A avaliação será uma comparação entre as características reais, representadas por pelo modelo substituto, e os valores das dimensões e tolerâncias definidas no desenho técnico e no CAD. De uma forma simplificada, qualquer sistema de medição por coordenadas é constituído por [9]-[11]:

- Uma estrutura mecânica que inclui os três eixos coordenados e um modo de deslocação relativa da peça;
- Uma cabeça de acoplamento para a sonda;
- Uma unidade de controlo;
- Um computador equipado com o *software* necessário para fazer o tratamento de dados.

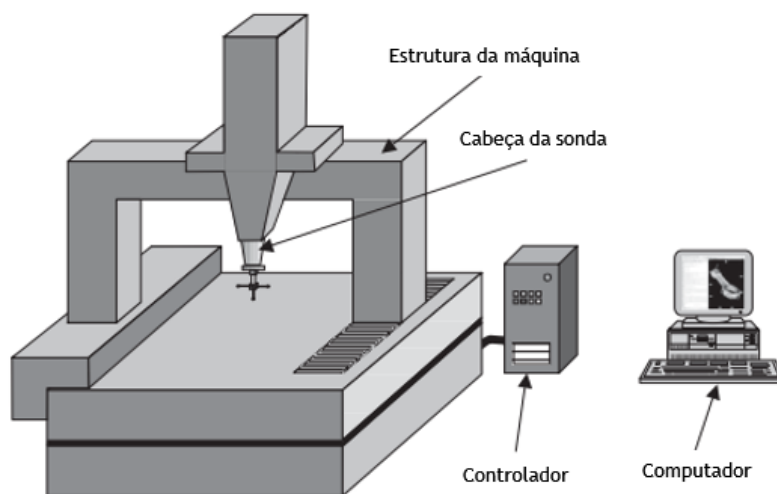


Figura 2 - Componentes constituintes de um sistema de medição por coordenadas [11].

Na figura 2 pode ser vista uma representação simplificada dos componentes que compõem um sistema de medição por coordenadas [9]-[11].

Todos os materiais utilizados na construção de uma CMM têm de ser escolhidos de modo a minimizar a incerteza relacionada com o equipamento. Tendo isto em vista, as

propriedades mais importantes que os materiais escolhidos para os elementos estruturais devem ter são [9]-[11]:

- Estabilidade dimensional;
- Elevada rigidez;
- Boa capacidade de amortecimento;
- Baixo coeficiente de expansão térmica;
- Alta condutividade térmica.

No entanto, neste momento, não existem materiais que consigam cumprir todos os requisitos e, por isso, o design de CMMs exige compromisso entre propriedades durante escolha de materiais. Para a mesa de trabalho e, em determinados modelos de máquina, para a ponte, o material escolhido é o granito pois apresenta um coeficiente de expansão térmica muito baixo, especialmente quando comparado com metais. A microestrutura homogênea e a dureza do granito facilitam a criação de uma superfície plana sem desvio de forma. As estruturas metálicas costumam ser feitas de alumínio porque, apesar de apresentar uma maior expansão térmica que o aço, exibe uma condutividade térmica elevada o que permite atingir estabilidade dimensional mais rapidamente. Para além disto, a sua densidade baixa também minimiza o peso do equipamento, especialmente das partes móveis, o que se acaba por traduzir em menor vibração, o que baixa a incerteza, levando a valores de erro de medição menores. [11], [12]

Como em qualquer outro equipamento de metrologia, é necessário conhecer as fontes de incerteza relacionadas com a máquina. No caso das CMMs, fatores como a folga entre as peças do mecanismo de movimentação e a dimensão da máquina podem ter um grande impacto nos resultados obtidos. Hoje, CMMs comuns têm folgas nos componentes móveis na ordem dos 6 a 7 micrómetros, esta folga permite oscilações e vibrações da máquina durante o deslocamento que são fontes de incerteza. Já máquinas de alta precisão têm apenas 2 a 3 micrómetros de folga o que minimiza a incerteza, mas limita o intervalo de temperatura dentro do qual a máquina pode ser utilizada. Geralmente, todos os equipamentos de metrologia são desenhados para funcionamento a uma temperatura ambiente de 20 °C, portanto, para temperaturas muito superiores a este nível, os componentes móveis das CMMs de alta precisão gripam devido à dilatação térmica dos materiais. Dependendo do modelo e o do volume de trabalho, uma máquina de medição de coordenadas pode ter erros de medição entre os 2 e os 8 μm [10], [11].

As três carruagens que permitem o movimento da cabeça da sonda definem os três eixos de um sistema de referência cartesiano e as réguas físicas presentes na máquina calculam o deslocamento da sonda. Isto permite encontrar a coordenada de qualquer ponto

dentro do volume de trabalho da máquina relativamente a ponto de referência. Deste modo, a sonda ao tocar na superfície da peça recolhe a coordenada onde foi feita a apalpação e transmite essa informação para o controlador onde é processada. É feita uma compensação para que as coordenadas recolhidas, que correspondem ao centro geométrico da esfera da sonda, sejam transformadas nas coordenadas do ponto de superfície da peça em análise. Para esta compensação ser feita, é necessário conhecer o raio da esfera do apalpador. Isto é feito através da calibração da sonda com uma esfera padrão cujas dimensões são conhecidas. Geralmente, a CMM realiza nove apalpações na esfera padrão, mas é possível o utilizador definir o número de toques, e é a partir desses resultados que o controlador encontra o diâmetro real da esfera do apalpador. Com essa informação, é feito um cálculo com o raio da esfera e as coordenadas recolhidas que têm em conta a direção de apalpação e define a compensação que deve ser aplicada para chegar às coordenadas do ponto de superfície [9]-[11].

Existem vários tipos de máquina de medição por coordenadas que foram criadas para responder a necessidades específicas das várias áreas da indústria. Apesar das variações de estrutura poderem ser consideráveis, todas as configurações têm em comum a movimentação de uma sonda dentro de um volume definido pelos limites de deslocamento de cada eixo. No entanto, estas diferenças estruturais têm um impacto na sua performance, nomeadamente, a nível da exatidão, da flexibilidade de utilização e do custo do investimento inicial. Na figura 3, podem ser vistas as cinco configurações base mais comuns que são [11], [13]:

- Ponte móvel;
- *Gantry*;
- Ponte fixa;
- Cantiléver;
- Braço horizontal.

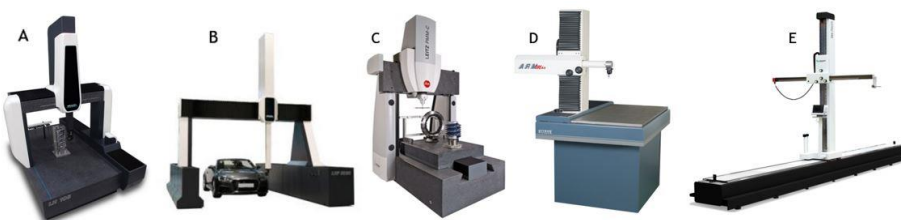


Figura 3 - CMM de ponte móvel (A); CMM tipo gantry (B); CMM de ponte fixa (C); CMM tipo cantiléver (D); CMM de braço horizontal (E).

As máquinas de medição de coordenadas de ponte móvel são as mais comuns no mercado e compõe a maior parte da força de trabalho na área da metrologia. Tem uma mesa

de trabalho estabilizada onde a peça a medir é colocada e é a ponte que impõe o deslocamento relativo do apalpador. A estrutura em ponte oferece mais rigidez à máquina, no entanto, as duas colunas de suporte limitam um pouco a capacidade de carga da máquina quando comparada com outros *designs* e permitem fenómenos de torção entre as colunas, o que provoca desvios nas medições [11], [13].

Existe outro tipo de CMM com estrutura em ponte em que esta é fixa e é a mesa que fornece um dos eixos de movimento. Esta configuração elimina os fenómenos de torção e oferece uma rigidez melhorada, o que se traduz numa exatidão superior e menores níveis de incerteza. Devido a estas características, as CMMs mais precisas do mercado são construídas com esta estrutura. As principais desvantagens são que a velocidade de funcionamento e a carga máxima que pode ser colocada na mesa são significativamente inferiores do que as de CMMs de ponte móvel [11], [13].

Para medição de peças de grande dimensão com tolerâncias menos apertadas, como carroçarias de automóveis, as CMMs de braço horizontal apresentam várias vantagens. O volume de trabalho é pouco limitado devido à fácil acessibilidade de todos os lados e a velocidade de deslocação do braço é alta, o que permite tempos de medição mais curtos favorecendo a sua utilização no meio da produção. No entanto, a rigidez da estrutura é baixa o que aumenta a incerteza da máquina e potencia erros de Abbe [11], [13].

Se for necessário um volume de trabalho ainda maior do que aquele que é oferecido por máquinas com braço horizontal, CMMs tipo *gantry* apresentam volumes na ordem dos 10 m³ ou mais. Apesar do seu tamanho, máquinas *gantry* são capazes de tolerâncias relativamente apertadas devido à fundação que tem de ser construída para limitar distorções da estrutura provocadas por peças com pesos elevados. Para além do elevado volume de trabalho, outra vantagem deste tipo de CMM é a facilidade de acesso que os utilizadores têm a qualquer peça que esteja a ser medida. Devido às grandes dimensões da máquina, esta geralmente encontra-se em locais onde o controlo de temperatura e da humidade é difícil e, como tal, é necessário fazer uma compensação através do *software* [11], [13].

As CMMs do tipo cantiléver têm uma coluna móvel que suporta um braço, também móvel, onde se movimenta a sonda. As peças são pousadas numa mesa fixa, o que permite a medição de peças relativamente pesadas sem afetar a exatidão da máquina. Como o volume das partes móveis é relativamente baixo, as máquinas cantiléver têm velocidades de deslocamento e de medição consideravelmente elevadas. A acessibilidade também é fácil pois três dos lados do equipamento são abertos. Estas características e o seu tamanho compacto fazem com que este seja o tipo de CMM mais comum a ser utilizado para fazer medições no meio do processo de produção no chão de fábrica. No entanto, como a sonda

Commented [JPS3]: referenciar a figura3



Figura 4 - Sonda PH 20 da Renishaw.

se encontra apoiada apenas por um lado, a flexão do braço provoca desvios nas medições. Para além disto, a estrutura cantiléver impõe frequências naturais bastante altas limitando as dimensões máximas da máquina [11], [13].

As sondas utilizadas nas CMMs, como a apresentada na figura 4, são o componente responsável pela exatidão da medição por coordenadas. Os sistemas de sonda são, geralmente, produzidos por grandes fabricantes de instrumentos de metrologia que os fabricam para equipar os seus produtos. Para além destes, existem alguns fabricantes que se especializaram na produção de sondas para CMM. Há uma grande variedade de sondas disponíveis no mercado e são compatíveis com a maioria dos equipamentos existentes. A classificação destes sistemas segundo o modo de interação

com a peça é muito comum, o que leva ao estabelecimento de duas categorias: sondas de contacto e sondas sem contacto. Os sistemas mais comuns na indústria são os de contacto que utilizam a força de interação com a peça para capturar pontos. O toque é detetado quando a força aplicada excede um valor controlado de forma eletrónica ou mecânica. Para além do ponto de coordenadas, as sondas também detetam a direção de toque segundo um vetor de apalpação. Os sistemas sem contacto são praticamente todos óticos, ou seja, a superfície da peça é detetada através de ondas eletromagnéticas. Este tipo de sonda tem vantagens sobre as de contacto, nomeadamente, a ausência de força de interação que permite inspeção de peças delicadas e elevada velocidade de recolha de pontos. Por outro lado, a incerteza de medição superior e erros associados às propriedades óticas das peças fazem com que a sua escolha dependa da aplicação [11], [13], [14].

Commented [JPS4]: Referenciar figura 4

2.2. METROLOGIA PORTÁTIL

A produção de peças de grandes dimensões exige a utilização de CMMs com grande volume de trabalho cuja precisão é diminuída pela incerteza inerente a estruturas desse tamanho. A evolução e implementação difundida de sistemas de controlo de qualidade obrigam a passos de controlo dimensional durante o processo de produção, o que torna interessante a utilização de sistemas metrológicos no chão de fábrica. As máquinas de medição de coordenadas são impossíveis de implementar sem condições de temperatura e

humidade controladas, tornando difícil a sua aplicação fora de laboratórios com ambiente controlado. É com estas aplicações em mente que os equipamentos de controlo dimensional portáteis surgiram por volta dos anos 90 [15].

O mais comum destes equipamentos é a máquina de medição de coordenadas portátil também chamada braço de medição articulado. Estes são máquinas que determinam e registam a localização de uma sonda rígida e apresentam resultados através de um *software*. Atualmente, o nível de precisão associado a estes instrumentos ronda as três centésimas de milímetro o que, apesar de ser uma ordem de grandeza inferior às CMMs convencionais, é o suficiente para fazer medições de peças com toleranciamento menos exigente. Os braços têm volumes de trabalho que podem variar entre 1.2 e 3.5 metros em diâmetro, no entanto, como o equipamento é móvel, o volume de trabalho é o que for necessário para se conseguir definir a geometria. Entre deslocamentos do braço é necessário criar um novo sistema de coordenadas para que os novos pontos não tentem alinhar-se com os anteriores, que foram obtidos com o braço noutra posição. Também é normal estes equipamentos terem incluído no seu *software* de controlo compensações para as variações de temperatura que são previsíveis no chão de fábrica. Apesar desta compensação, a precisão apresentada pelas marcas não é garantida ao longo de todo o intervalo de temperatura de trabalho [15]-[18].

Os braços são constituídos por várias articulações que estão associadas aos vários eixos de liberdade e, geralmente, possuem 6 graus de liberdade. As articulações têm *encoders* que determinam o ângulo de rotação de cada articulação e, desta forma, determinam a posição e orientação da sonda. Isto torna possível a medição total de peças com apenas um *setup*. Para facilitar o manuseamento dos braços, estes vêm equipados com sistemas de contrabalanço que impedem a livre rotação das articulações e mantêm o braço numa posição estável. Uma CMM comum tem de ter a sonda calibrada em todos os ângulos que serão utilizados durante a medição numa esfera padrão. Já um braço articulado, graças aos *encoders*, pode fazer a aproximação sem ter de abrandar e a qualquer ângulo sem necessidade de calibração prévia. Se o CAD da peça a inspecionar estiver disponível, pode ser utilizado para fazer uma comparação no momento de medição entre o valor obtido e a cota desejada. O processo é muito simplificado sendo apenas necessário fazer um alinhamento, tirar os pontos e criar um relatório com os dados obtidos. Isto permite a utilização de CMMs portáteis como substitutos para calibres, micrómetros e outros instrumentos cuja utilização em peças complexas é limitada e não trabalham em conjunto com o CAD das peças a inspecionar [15]-[18].

Este tipo de equipamento tem uma grande versatilidade de aplicação e de locais onde pode ser utilizado devido à eficaz compensação das variações de temperatura e ao grande

volume de trabalho. A sua mobilidade e facilidade de recolha de pontos a qualquer ângulo também permitem que muitas peças sejam analisadas com apenas um *setup*, o que não acontece com uma CMM comum. O seu custo de aquisição é muito inferior ao de uma CMM. Para além disto, também pode ter um laser acoplado que permite recolher milhares de pontos de forma extremamente rápida, o que, aliado ao seu fácil manuseamento, faz com que seja uma ótima ferramenta para engenharia inversa. É, assim, uma tecnologia utilizada com frequência para análise dimensional, inspeção de peças nos equipamentos de maquinação e alinhamento de peças. Na figura 5, pode ser visto um braço articulado com um *scan* a laser acoplado da Faro [15]-[18].



Figura 5 - Faro ScanArm [32].

São utilizados equipamentos a laser para: objetos ou estruturas com dimensões que dificultam a recolha de pontos por apalpação; materiais macios que deformam com o toque; quando se deseja reunir informação suficiente para definir totalmente uma geometria complexa. Estes aparecem na forma de lasers que são acoplados aos braços articulados ou, para captura de pontos a grandes distâncias, *trackers* a laser. O emparelhamento entre um laser e um braço articulado, permite a captura rápida de uma grande quantidade de pontos com menos tempo despendido em *setup* e calibração. Estes equipamentos funcionam projetando uma linha de laser para a superfície da peça cuja reflexão é detetada por uma câmara e utilizada para localizar pontos na superfície. As sondas a laser permitem a recolha de centenas de milhar de pontos por segundo, cuja informação é enviada para um computador ao qual o braço tem de estar ligado e que cria uma nuvem de pontos por cada *scan* realizado. As nuvens de pontos são alinhadas por *best-fit* e cada alinhamento efetuado incrementa o erro da nuvem final que será utilizada para construir um modelo CAD. Por isto, as peças devem ser definidas com o menor número de *scans* para que o erro final seja o mais pequeno possível [15]-[17].

2.3. METROLOGIA POR VÍDEO

Um sistema de medição por vídeo, como o que pode ser visto na figura 6, é uma máquina que amplia a imagem de uma peça tal como é capturada por uma câmara de alta resolução e convertida para sinal digital de vídeo. Após esta conversão, um *software* de análise de vídeo é capaz de determinar as arestas e outras características da peça. As relações entre as características da peça são monitorizadas e comparadas com outras imagens de modo a serem obtidas dimensões. Os equipamentos mais simples têm uma ampliação fixa e a movimentação e focagem da lente são manuais. Atualmente existem novos sistemas de medição digital designados de grande campo de visão cuja capacidade de medição melhora com a evolução de câmaras digitais e da tecnologia de processamento de imagem. É comum terem um campo ótico capaz de recolha de dados de até 100 mm, ideal para a medição simultânea de várias peças de pequena dimensão. Estes equipamentos têm a capacidade de, após serem devidamente programados, reconhecerem as características a medir em várias peças ao mesmo tempo, o que aumenta a rentabilidade do processo de medição ou de verificação. Complementarmente, o seu movimento é controlado por CNC podendo ser totalmente automatizado, incluindo o zoom e a focagem das lentes. Isto permite a medição de séries de peças em que o operador apenas coloca a peça no equipamento e carrega num botão para iniciar o processo. Os resultados podem ser comparados com o CAD e convertidos em relatórios dimensionais. As dimensões das máquinas podem variar consideravelmente, havendo instrumentos de bancada e outros de dimensões muito superiores que são instaladas diretamente no chão. A maior limitação dimensional destes equipamentos é a altura disponível entre a mesa de trabalho e as lentes que é, geralmente, a menor dimensão do volume de trabalho. A exatidão dos instrumentos encontra-se na ordem do micrómetro, rondando os $(5 + L/1000) \mu\text{m}$ [19]-[22].



Figura 6 - Exemplo de um sistema de medição por vídeo do fabricante OGP [33].

Os sistemas de medição por imagem não medem as peças diretamente, medem as características das peças capturadas em imagens digitais. Essas imagens, capturadas em ângulos diferentes, são utilizadas para triangular as coordenadas dentro do volume de trabalho da característica que se deseja medir. Assim sendo, um dos aspetos mais

Commented [JP55]: Referenciar no texto

importantes do equipamento é a ferramenta ótica que captura a imagem. Se estes componentes forem de baixa qualidade, potenciais aberrações e outras distorções podem ser interpretadas como sendo parte da peça e conduzirem a erros de medição. Alguns destes instrumentos têm apetrechos com tecnologia que garante uma alta telecentricidade (característica ótica que avalia a variação de tamanho e distorção de forma de um corpo relativamente à distância à lente). Isto elimina quaisquer curvaturas e outras distorções que possam estar dependentes da posição das peças no campo de visão da câmara. Também é possível encontrar sistemas que incluem várias lentes de magnificação e lentes de zoom automáticas cuja utilização diminui a incerteza inerente à obtenção da imagem assim como a possibilidade de aberrações óticas. Estes equipamentos, também podem ter as calibrações automatizadas, o que lhes permite realizar uma sempre que há alterações na resolução ou no nível de magnificação. Este nível de automação promove uma alta repetibilidade. A integração destes sistemas com um *software* de metrologia adequado permite a criação de programas que controlam as automações especificando onde devem as medições ser feitas e que especificações utilizar. Estes programas criam rotinas diretamente a partir dos ficheiros CAD e, como controlam a maior parte das ações da máquina, minimizam a interação entre o operador e o equipamento [19]-[22].

Como a qualidade das imagens é uma prioridade, torna-se importante melhorá-la com recurso a técnicas de iluminação. Devido à variedade de formas e pormenores que podem ser exibidos pelas peças a medir, um único tipo de iluminação é pouco para garantir que todas as características são definidas. Assim, seria ideal um iluminador constituído por vários anéis concêntricos e emissores de luz, capaz de iluminar de forma seletiva vários ângulos da peça, acompanhado de um iluminador de topo. A segmentação dos anéis permitiria uma iluminação direcional da peça ligando e desligando determinados segmentos. Para além da direção da luz, também é importante um bom controlo da intensidade da iluminação para que o rácio entre o sinal interpretado como imagem e o ruído seja otimizado. Outra parte de grande importância destes equipamentos é o movimento relativo entre as lentes e a peça. É comum acontecer que o objeto em análise seja demasiado grande para ser totalmente abrangido pelo campo ótico, o que obriga ao seu deslocamento manual ou automatizado com controlo numérico. Como se trata de uma máquina de medição, qualquer movimento tem de ser quantificado e para garantir a exatidão destes movimentos é necessário o controlo rigoroso de parâmetros como a retidão do movimento e a velocidade. Sistemas automáticos, como o que pode ser visto na figura 7, têm slides motorizados com réguas para monitorizar a posição, enquanto uma micro régua permite que a focagem automática maximize a nitidez da imagem. O *software* do controlador regista a posição final de um movimento em todos os eixos possibilitando a medição de dimensões relativas a datums que podem não estar

presentes na área de focagem. A incerteza associada à medição também é afetada pela integridade estrutural do sistema. O sistema de eixos deve ser ortogonal, apresentando ângulos de 90° verdadeiros entre os eixos, o que exige uma grande precisão de design e construção. Para minimizar *offsets*, o sistema tem de ter uma estrutura estável e amortecida, como tal, os materiais estruturais mais comuns neste tipo de equipamento são o aço e o granito, como se pode constatar na figura 7 [19], [21], [22].

Como em todos os sistemas de metrologia, uma parte essencial é o *software* que é utilizado para controlar o equipamento. No entanto, os *softwares* mais recentes para máquinas de medição por imagem são muito diferentes dos que são utilizados com outros equipamentos, como as CMMs. Como estes instrumentos são produzidos com o intuito de serem integrados no processo de produção, muitas opções que seriam normais de se encontrar nos *softwares* doutros equipamentos são completamente automatizadas para minimizar a interação

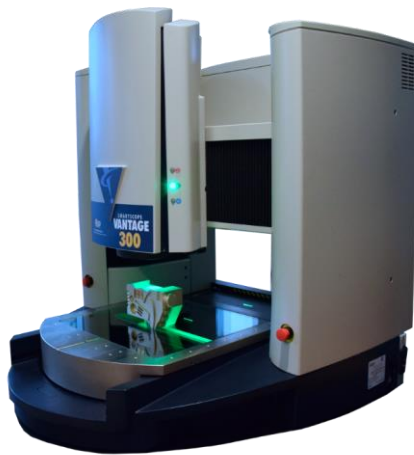


Figura 7 - Sistema de medição por vídeo da OGP [34].

do operador. Isto é importante porque minimiza o erro humano e aumenta a repetibilidade do processo de medição ou inspeção. Para além disto, permite que operadores com pouca formação sejam capazes de utilizar sistemas complexos e muito exatos, apenas colocando as peças na área de trabalho e iniciando as automações. Os *softwares* mais recentes facilitam a programação pois são capazes de gerar automaticamente rotinas de medição com base no ficheiro CAD das peças, sendo apenas necessário indicar por onde a peça deve ser alinhada [19], [21], [22].

2.4. TOMOGRAFIA COMPUTORIZADA POR RAIOS-X

A primeira máquina de tomografia computadorizada (CT) foi construída com finalidade médica em 1969. Desde de então, tornou-se numa tecnologia amplamente utilizada em diagnóstico e os seus sucessos suscitaram interesse por parte da indústria. A partir de 1980, a tomografia começou a ganhar popularidade como método não destrutivo para análise de peças e deteção de defeitos nos materiais. No entanto, apenas em 2005 é que apareceu a

primeira máquina de tomografia desenvolvida para fins metrológicos e foi apresentada ao mercado na feira internacional de metrologia 'Control'. Daí por diante, entrou no mercado do controlo de qualidade industrial beneficiando de várias vantagens relativamente a sistemas de medição tradicionais. Nomeadamente, a possibilidade de realizar controlo dimensional e controlo de qualidade do material em simultâneo e a capacidade de medir o interior de peças sem ser necessária a sua destruição [23]-[25].

A produção de raios-x em CTs industriais é feita com um canhão de eletrões que contém um cátodo emissor e um ânodo para acelerar os eletrões. Estes são dirigidos, por lentes e defletores magnéticos, contra um alvo que, ao ser atingido, desacelera os eletrões,

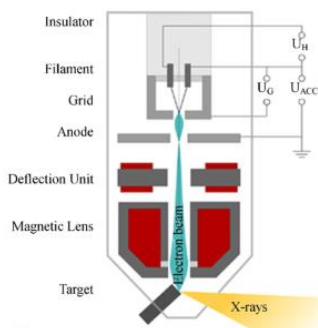


Figura 8 - Representação esquemática de uma fonte de raios-x [23].

transformando a sua energia cinética em calor e raios-x. Como tal, este tipo de equipamento não possui nenhum tipo de material radioativo e não apresenta nenhum risco de saúde enquanto o feixe de eletrões estiver desligado, nem implica a utilização de qualquer consumível radioativo. Um esquema deste sistema pode ser visto na figura 8. O processo é pouco eficiente, visto que, apenas 1% da energia dos eletrões é aproveitada para a produção de raios-x e o restante é perdido na forma de calor. Os raios produzidos propagam-se pela peça em estudo e um detetor captura os que atravessam o

material e mede a sua atenuação. O grau de atenuação é determinado pela densidade do material, pela espessura atravessada do mesmo e pela energia dos raios-x. A deteção resulta na produção de imagens em escala de cinzento 2D ou 1D dependendo do tipo de equipamento. Milhares destas imagens são recolhidas de modo a definir totalmente a peça e um modelo matemático faz a sua reconstrução criando uma forma tridimensional constituída por voxéis. Um voxel é o análogo tridimensional do pixel e o seu tom cinzento depende da atenuação produzida pelo material. A maior parte das máquinas de tomografia industrial inclui uma parte móvel, como uma mesa rotativa, que permite a recolha de imagens à volta de toda a peça [23], [24].

O resultado da digitalização com uma máquina de tomografia são milhares de imagens em escala de cinzento onde as zonas mais claras correspondem a regiões mais densas ou mais espessas, ou seja, com maior fator de atenuação. Estas imagens são processadas por um *software* que irá realizar uma reconstrução do volume da peça, traduzindo os pixéis das imagens para voxéis. Estes são o correspondente tridimensional do pixel. Tal como nas imagens 2D, o volume também é representado em escala de cinza e os voxéis serão mais ou menos escuros como consequência do grau de atenuação a que os fotões estiveram expostos.

O volume produzido inclui informação detalhada relativa a todas as zonas da peça, superficiais ou interiores, o que significa que geometrias enclausuradas no material estão disponíveis para serem medidas sem ser necessária a destruição da peça. Para além disto,

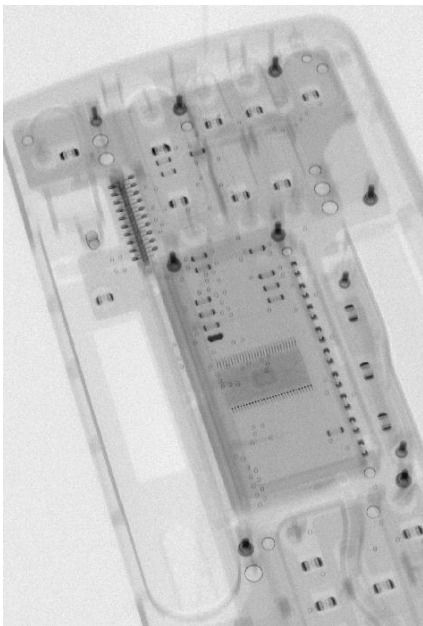


Figura 9 - Digitalização de um autorrádio obtido por tomografia. (Cortesia da Micronsense)

quaisquer defeitos relacionados com falta de material como porosidades e rachaduras são detetados e definidos dentro do volume, permitindo uma análise da qualidade do material. Isto faz com que seja uma tecnologia imprescindível para indústrias que produzam peças com vazios fechados e de importância crescente para fundições de todo o tipo. Também é de elevado interesse para a produção de peças em plástico pois, como se trata de uma tecnologia que recolhe pontos sem apalpação, não necessita de um gabari de fixação para as peças. Isto significa que peças de materiais macios não são deformadas pelo toque de uma sonda nem o seu nível de empeno é modificado pela fixação com um gabari. *Scanners* a laser também têm estas vantagens, no entanto, o seu nível de exatidão está na ordem das três centésimas de milímetro, o que se encontra muito abaixo das estimativas mais pessimistas para a tomografia [23]-[25].

A utilização da tomografia como método para realização de ensaios não destrutivos com intuito de analisar a qualidade de materiais, apesar de útil, teve pouco impacto no mercado devido à pequena quantidade de potenciais clientes. A sua importância cresceu com a aplicação na identificação de defeitos em placas de circuitos, como a que pode ser observada na figura 9. Isto levou a um aumento significativo na procura de soluções de tomografia. O aumento foi proporcional à expansão do mercado informático. Apesar deste aumento na aplicabilidade da tomografia, apenas em 2005, com a sua entrada na metrologia, é que consolidou a sua permanência na linha da frente de soluções tecnológicas para a indústria produtiva. A sua implementação em vários setores de produção industrial iniciou uma nova revolução no mercado do controlo dimensional. A demonstração das capacidades desta tecnologia incentivou os produtores de equipamento de metrologia a investir e a desenvolver as suas próprias soluções. Isto potencia a criação de novas capacidades, como

métodos de simular a resistência mecânica de peças tendo em conta os defeitos detetados com a tomografia [23]-[25].

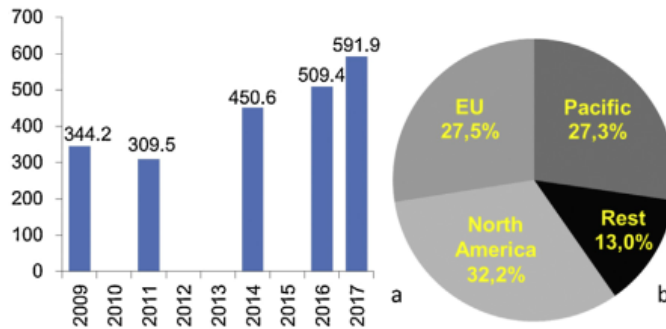


Figura 10 - Avaliação de mercado da tomografia e das suas tendências para 2016 e 2017 (valores apresentados estão na ordem dos milhões de euros) [25].

O leque de aplicações da tomografia industrial continua a expandir devido a inovações noutros ramos tecnológicos que permitem a produção de peças mais complexas a um ritmo mais acelerado. Isto faz com que os processos tenham de se adaptar e se tornar mais eficientes. A exigência de maior produtividade, complexidade das geometrias e eficiência faz com que a substituição de CMMs por CTs, em geral, se traduza numa maior economia no processo de produção. Em especial, na área da eletrónica em que a tomografia por raios-x permite a inspeção de produtos finais já montados como pontos de solda em placas de circuitos, tarefa que antes era impossível de realizar e exigia várias certificações ao longo do processo produtivo. A tendência de crescimento do investimento na tomografia industrial observada nos gráficos da figura 10 pode ser explicada pela rápida adesão da indústria a esta tecnologia e pela abertura de novos nichos no mercado. Exemplos disto, são a inspeção de produtos alimentares depois de embalados e a digitalização de carcaças de porcos para que possam ser retalhadas por braços robóticos [23], [25].

Os CTs com finalidade clínica distinguem-se dos de aplicação industrial através de dois parâmetros de importância. O primeiro critério é que em aplicações industriais, a peça é rodada entre um emissor de raios-x e um detetor, enquanto que no clínico, por uma questão de conforto dos pacientes, o detetor e o emissor rodam à volta da pessoa. O segundo parâmetro é o valor energético dos raios; é necessária muita mais energia para atravessar materiais densos como aço ou ferro fundido do que para passar por tecido orgânico [23], [25].

Na tomografia industrial existem duas áreas de aplicação definidas que são a análise qualitativa do material (ensaio não destrutivo) e a metrologia dimensional. Na primeira, o fator de maior importância é a rapidez de verificação dos defeitos. De uma perspectiva metrológica, o mais importante é a exatidão e a rastreabilidade da medição. Estes objetivos são antagônicos já que *scans* mais rápidos produzem resultados com menor definição por ser recolhida menos informação. No entanto, este facto deixa de ser relevante por ser possível realizar a recolha dos dados para os dois tipos de análise simultaneamente. A avaliação qualitativa do material pode ser feita por uma pessoa, enquanto que a análise dimensional pode ser realizada por outro operador noutro computador, já que as medições são feitas no modelo virtual. Com a vertente metrológica em crescimento, os equipamentos passaram a ser construídos com os mesmos princípios que são aplicados à construção de CMMs. Assim, para melhorar a exatidão e a repetibilidade das medições, as máquinas são constituídas por estruturas termicamente estáveis, como granito e alumínio, e dão uso a guias mecânicas de alta precisão nas partes móveis, um exemplo pode ser visto na figura 11. Para além da construção específica para a aplicação em metrologia, as máquinas também têm de ser testadas de acordo com normas de especificação metrológica. Atualmente a única diretriz utilizada de forma internacional é a VDI/VDE 2617-13 criada pela Associação de Engenheiros Alemães (VDI) e é considerada a base para uma futura norma ISO [23]-[26].



Figura 11 - Fotografia da máquina de CT Phoenix v|tome|x m. (Cortesia da Micronsense)

Existem outras soluções de tomografia com menos aplicabilidade como apetrechamentos que podem ser acoplados a microscópios de feixe de eletrões. Neste sistema, o canhão de eletrões do microscópio é aproveitado para produzir raios-x de baixo nível energético que permite a resolução de pormenores na ordem dos 500 nanómetros. A radiação que atravessa as peças a inspecionar é captada por uma câmara montada na janela lateral do microscópio. Isto é feito sem interferir com as capacidades normais do SEM. Outra variação na tomografia computadorizada é o método de produção dos raios-x. O método de

aceleração de elétrons é o canhão de elétrons, mas estes também podem ser acelerados com recurso a aceleradores lineares ou instalações *synchrotrons*. Nos lineares, as partículas carregadas são aceleradas até velocidades muito superiores às atingidas num canhão de elétrons ao serem sujeitas a diferenças de potencial oscilantes. Como a energia cinética dos elétrons é mais elevada, a energia associada aos raios-x produzidos também é superior, o que permite a CTs que utilizam esta fonte de radiação analisar materiais mais densos e peças mais espessas. No caso dos *synchrotrons*, a energia associada aos raios-x possui características que os diferenciam e tornam interessantes, ao serem monocromáticos, terem alta coerência e intensidade. O seu caráter monocromático elimina a incidência de artefactos devidos a *beam hardening* [23]-[25], [27], [28].

Nos dispositivos utilizados com maior frequência, existe uma diferença na forma com que os raios-x são transmitidos na direção da peça. É dada forma ao raio fazendo-o passar por um diafragma circular no caso dos raios cónicos ou por um colimador no caso de raios planos. Estes últimos são utilizados em CTs que produzem raios de maior grau energético e são capazes de penetrar peças de materiais muito densos como ferro fundido e com espessuras superiores às que CTs que utilizem raios cónicos conseguem atravessar. Para aplicações de metrologia industrial o mais comum é a utilização de raios cónicos por ser a técnica que permite tempos de digitalização mais curtos. Ao contrário de CMMs tradicionais, o tempo de recolha de pontos não depende do número de características a definir, mas sim de outros parâmetros como tempo de exposição, número de projeções e tempo de processamento de dados. Numa procura incessante para diminuir o tempo de *scan*, é promovido um constante desenvolvimento de tecnologias de *fast scan*. Isto é limitado pela evolução do hardware informático e pelos avanços alcançados nos *softwares* que realizam o processamento dos dados recolhidos. Os progressos mais recentes permitem a digitalização completa de peças de dimensões reduzidas em cerca de dez segundos. Peças de maiores dimensões, como cabeças de cilindros de motores automóveis, são digitalizadas em 80 a 90 segundos pondo em prática técnicas de *fast scan*. Utilizando um raio em cone, o tempo de digitalização normal varia entre alguns minutos e poucas horas. Outra técnica de digitalização de grande interesse que se encontra em desenvolvimento é a captura do movimento de peças. Este tipo de digitalização dá origem a um conjunto de dados volumétricos que, para além de ser traduzido para uma forma tridimensional, também pode ser reproduzido como um vídeo. O método é conhecido como tomografia computadorizada 4D (4D CT) [23], [25].

A resolução dos equipamentos depende do tamanho do ponto de foco. Os sistemas mais utilizados para fins industriais têm focos com alguns micrómetros de área e, por isso, são designados CTs de microfoco. Estes têm resoluções na ordem do micrómetro, enquanto que

CTs com fontes de raios-x *synchrotron* conseguem atingir resoluções de centésimas de micrómetro. Outra característica de grande importância para a tomografia industrial, é a espessura máxima que é possível penetrar. Esta depende diretamente do fator de atenuação do material e da energia do raio de radiação transmitido. Como a utilização de raios-x de alta energia é prejudicial para a exatidão do equipamento, as peças devem ser orientadas de modo a apresentar as zonas de menor espessura ao emissor de radiação. Deste modo, a energia dos raios pode ser minimizada melhorando a exatidão posicional dos pontos recolhidos [23], [25].

Aludindo a exatidão da tomografia por raios-x, tal como em outros equipamentos de medição de coordenadas 3D, esta depende muito de características específicas das peças e dos parâmetros escolhidos para realizar o *scan*. O primeiro estudo comparativo das capacidades metrológicas da tomografia foi terminado em 2011 e envolveu 15 instituições espalhadas pelo mundo e desenrolou-se ao longo de 2 anos. O estudo foi chamado “*CT Audit*”, envolveu a medição de 4 peças padronizadas por laboratórios reconhecidos e concluiu que, para a medição de distâncias em peças constituídas por um material é possível atingir exatidões competitivas face às tradicionais CMMs, na ordem dos 5 μm . No entanto, a análise de forma e peças com vários tipos de material revelaram-se desafios para as metodologias utilizadas. Outro estudo realizado durante 2013 chamado “*CIA-CT comparison - Inter laboratory on industrial computed tomography*” envolveu 27 instituições participantes de 8 países. Este projeto, em vez de utilizar padrões abstratos, utilizou duas peças produzidas atualmente: um lego e uma peça metálica desenvolvida para a indústria médica (ver figura 12). O relatório revelado em Setembro de 2013 indica que a incerteza média para as peças testadas encontrava-se entre os 6 e os 15 μm , o que é muito superior ao obtido com CMMs nas mesmas peças: 1,5 a 5,5 μm [23]-[25].



Figura 12 - Peças utilizadas no estudo CIA-CT [25].

Um grande problema no estudo da incerteza em equipamentos de tomografia é que ainda não existe uma norma que oriente a metodologia de digitalização, definição de superfície e medição dos modelos tridimensionais obtidos. Neste momento, a diretriz mais utilizada é a VDI/VDE 2617-13 como já foi referido, no entanto, os métodos para quantificar a incerteza dos sistemas de tomografia são baseados na norma ISO 10360 que descreve como

Commented [JPS6]: Muda a imagem de sitio

certificar os equipamentos metrológicos já estabelecidos e referidos anteriormente. No entanto, como o funcionamento das tecnologias é fundamentalmente diferente, é possível que o cálculo da incerteza realizado atualmente não represente as verdadeiras capacidades da tomografia industrial, já que a tomografia implica cálculos volumétricos para a reconstrução virtual das peças que mais nenhum equipamento faz. Um estudo mais recente, realizado em 2015 pela *Dienste Industrielle Messtechnik* (DIM), fez uma comparação direta entre uma CMM comum, uma CMM de alta precisão e um CT utilizando a normalização sugerida pela ISO 10360 e pela VDI/VDE 2617-13 para certificação dos equipamentos. Foram utilizadas várias peças para testar vários tipos de medição. Para medição de distâncias, a CMM convencional teve uma exatidão de $3\mu\text{m} + L/350$, enquanto que o CT obteve $10\mu\text{m} + L/100$. Já na medição de posições, o erro associado ao CT foi de $0.7\ \mu\text{m}$, exatamente o mesmo valor da CMM de alta precisão. É necessário ter em conta que estes resultados foram obtidos em peças de teste padronizadas cujas superfícies e densidade são o mais próximo possível do ideal. Como tal, a performance dos equipamentos poderá não corresponder quando utilizados em peças de produção [24]-[26].

Um dos desafios na quantificação da incerteza dos equipamentos de tomografia é a existência de artefactos nas imagens que são obtidas. Em CTs que utilizam raios em cone, a maior parte dos artefactos são provocados por *beam hardening* e *scattering*. Estes defeitos provocam o aparecimento de riscas escuras entre zonas de alto grau de atenuação, como é visível na figura 13. O primeiro ocorre apenas em raios-x policromáticos, ou seja, raios

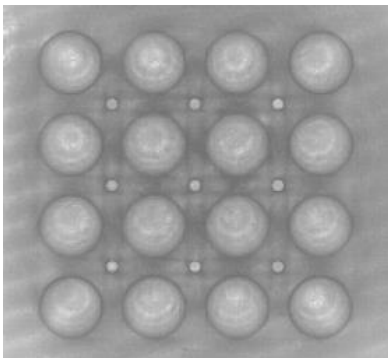


Figura 13 - Exemplo de uma imagem com artefactos provocados por *beam hardening* [27].

constituídos por vários níveis de energia. Os fótons de menor energia são atenuados mais facilmente do que os mais energéticos. Assim, após uma determinada distância viajada através do material, os fótons menos energéticos deixam de penetrar. Isto significa que o espectro de raios-x detetado apenas inclui fótons altamente energéticos, sugerindo que a periferia da peça atenua mais raios (fótons de alta e baixa energia) do que o interior (apenas fótons de elevada energia). O *scatter* está associado a raios com níveis elevados de energia cujos fótons mudam de direção e, conseqüentemente, mudam de energia subitamente e são detetados por um detetor diferente daquele que seria suposto. Esta ocorrência leva a erros muito significativos se os fótons desviados forem parar a um detetor que deveria apanhar pouca radiação por estar atrás de uma zona de alta densidade, por exemplo [23], [25], [29], [30].

Uma solução comum para o *beam hardening* passa por colocar uma placa metálica, cobre, alumínio ou chumbo, entre a fonte de raios-x e a peça de trabalho para filtrar os fótons de menor energia. A maioria dos *softwares* utilizados inclui algum tipo de correção dos defeitos provocados por *beam hardening* que tem em consideração um valor de atenuação pressuposto para o material que está a ser analisado. Também existem *softwares* para a eliminação de *scatter* que utilizam valores tabelados para determinados materiais. Um exemplo destas soluções informáticas é o método *Iterative Artifact Reduction* (IAR), um processo iterativo que aplica vários passos de pós-processamento ao volume construído de modo a corrigir os artefactos. Este método é eficaz, no entanto, pressupõe que a peça é constituída apenas por um material. Para preencher esta falha, existe um *software* de correção multimaterial que não tem em consideração valores referência e realiza as correções considerando apenas as imagens obtidas pela tomografia. Outra solução é a utilização de equipamentos que permitam a emissão de dois raios com níveis de energia diferentes. Isto permite a criação de duas imagens virtualmente monocromáticas que não têm artefactos criados por *beam hardening* [23], [25], [29], [30].

Máquinas de medição de coordenadas por tomografia de raios-x possuem várias vantagens relativamente aos equipamentos tradicionais. Algumas destas são a capacidade de medir peças com características interiores, peças compostas por vários materiais, como a placa de circuitos vista na figura 14, e montagens de forma não destrutiva em todos os casos. No entanto, o investimento inicial é muito superior a qualquer outro equipamento com volume de trabalho comparável. Uma forma adicional de justificar o elevado investimento é uma possível poupança nos tempos de medição. O tempo de scan não varia com o número de características que se pretende inspecionar, como tal, a verificação de peças complexas com um elevado número de dimensões pode beneficiar com a aplicação desta tecnologia. O tempo de medição pode estar apenas dependente da capacidade de processamento do computador em uso se for realizada uma comparação direta entre o



Figura 14 - Placa de circuitos digitalizada por tomografia e colorida com recurso ao software VGStudio Max. (Cortesia da Micronsense)

volume obtido com o *scan* e o modelo CAD da peça. Mesmo que seja necessário medir diretamente determinadas características da peça, é possível criar automações que garantem a repetibilidade dos resultados e cujo tempo de processamento depende apenas do *hardware* do computador disponível e não da cinemática do equipamento de metrologia. Outra vantagem do CT, é que os dados podem ser armazenados e utilizados para realizar novas medições sem degradação dos resultados. Já a utilização de uma CMM ou de qualquer outro equipamento que exija a presença da peça para realizar a medição, implica que esta tenha de ser armazenada fisicamente potencialmente levando à sua degradação. Para além disto, a frequente necessidade de utilizar um gabari de fixação pode provocar um nível de deformação diferente do associado à medição original, no caso de peças de materiais muito macios como polímeros, levando à obtenção de resultados dissemelhantes [23]-[25], [29].

Desenvolvimentos recentes no *software* VGStudio Max da Volume Graphics, permitem realizar simulações de ensaios mecânicos das peças digitalizadas. Esta técnica, para além de ter em consideração a geometria real da peça, também tem em conta quaisquer defeitos internos como porosidades. Isto permite a obtenção de resultados com maior significado porque são consideradas as condições reais das peças em vez de aproximações tabeladas. Na figura 15, pode ser visto um resultado deste tipo de simulação. Esta tecnologia tem grande potencial e seria interessante a realização de um estudo comparativo entre os resultados obtidos com a simulação e resultados obtidos com ensaios de tração reais. Os provetes seriam digitalizados para criação do volume necessário para a simulação e, depois, seguir-se-iam os ensaios de tração [31].

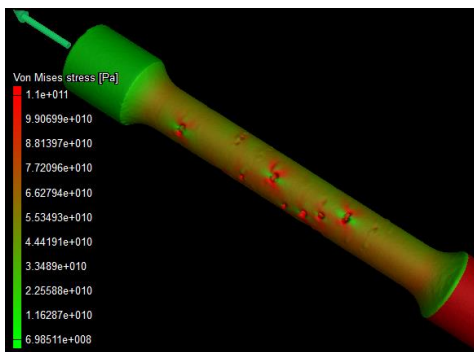


Figura 15 - Exemplo de resultado obtido por simulação de um ensaio de resistência mecânica realizado de um provete. (Cortesia da Micronsense)

Tratando-se de uma tecnologia emergente, a tomografia aplicada na metrologia tem vários desafios a ultrapassar para consolidar a sua posição como método de análise dimensional. A exatidão dos equipamentos tem de ser melhorada para que a sua performance seja totalmente equiparável à de máquinas de medição por contacto (CMM). Apesar disto já se verificar para a medição de distâncias e posições, as análises de forma requerem uma melhoria. O volume de trabalho tem de ser aumentado e a potência do raio emitido tem de acompanhar este crescimento de modo a permitir a análise de peças metálicas de grande dimensão como blocos de motor. Detetores de maior eficiência têm de ser desenvolvidos de modo a permitir a obtenção de imagens com menos artefactos causados

por ruído. Consequentemente, os tempos de digitalização deverão ser mais curtos. Uma das vantagens referidas destes sistemas é a capacidade de criar imagens com uma clara distinção entre materiais com densidades díspares. No entanto, para uma análise dimensional, as zonas de densidade inferior mais próximas do material de maior densidade ficam mal definidas devido à grande quantidade de ruído criada pela difração dos fotões no material mais denso. Adicionalmente, o ponto de maior importância para a solidificação da tomografia industrial como método metrológico é a determinação mais fidedigna da incerteza na medição [23]-[25], [29].

4. PEÇAS SELECIONADAS

No contexto do trabalho realizado foram requisitadas duas peças produzidas por injeção, uma metálica e outra polimérica que se encontram identificadas na figura 16.



Figura 16 - Peça polimérica (em cima); Peça em alumínio (em baixo).

A peça em alumínio foi cedida pela Nova Fundínio acompanhada pelo seu desenho tridimensional. Foi retirada do final de linha de produção estando, por isso, o mais próximo possível do CAD idealizado. A liga utilizada não foi especificada podendo apenas ter sido inferido que se tratava de uma liga de alumínio para fundição. Peças de fundição são interessantes para este trabalho porque é normal apresentarem um volume significativo de porosidades que tem de ser controlado para garantir que a peça se encontra conforme e a tomografia é o método ideal para realizar esta análise.

A peça polimérica foi fornecida pela Moldoeste que também cedeu o seu CAD. O polímero utilizado na sua produção foi o polibutileno terefalato com adição de acrilonitrila estireno acrilato. As peças em plástico podem ter o inconveniente de serem macias e por

isso não poderem ser analisadas por contacto, mas isto não se verificou na peça da Moldoeste que apresentou uma rigidez adequada.

As peças cedidas foram escolhidas pelas empresas referidas segundo um conjunto de parâmetros sugeridos. Foram requisitadas peças com complexidade geométrica, vários materiais e com alguma variabilidade na sua espessura. A complexidade geométrica foi testar e avaliar dificuldades na medição com a CMM e, por sua vez, as espessuras e a multiplicidade de materiais para testar as dificuldades na digitalização. Também foi especificado que as dimensões das peças não poderiam exceder o volume de trabalho da máquina de tomografia de modo a permitir a sua digitalização.

5. EQUIPAMENTO UTILIZADO

O foco deste trabalho foi a comparação entre a tomografia industrial e máquinas de medição de coordenadas tradicionais. Assim sendo, os equipamentos utilizados foram uma máquina de tomografia por raios-x da General Electric (GE) e uma CMM de ponte móvel da Coord3.

5.1. CT PHOENIX V|TOME|X M

A máquina de tomografia utilizada é produzida pela General Electric, que pode ser vista na figura 17, e trata-se de um sistema com microfocos direcionado para aplicação em metrologia 3D. Utiliza um raio em cone com um máximo de 240 kV de voltagem que tem a capacidade de resolver pormenores com dimensões na ordem dos 2 micrómetros. A potência declarada permite que o raio produzido penetre facilmente peças de plástico e alumínio,

mas tem grandes limitações na capacidade de digitalização de materiais mais densos, como o ferro fundido. Para estes, é necessário ter em atenção a espessura máxima da peça e a sua colocação dentro do CT deve minimizar a distância a penetrar. A sua mesa de trabalho rotativa suporta peças até 20 kg com diâmetro e altura máximos de 290 mm e 400 mm, respetivamente. Como foi desenvolvida

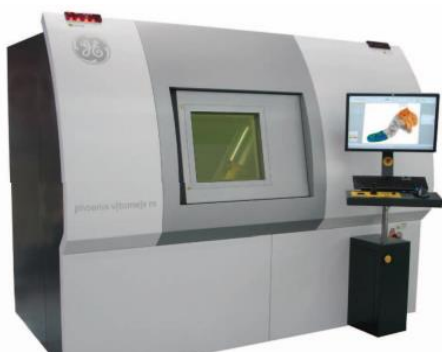


Figura 17 - Máquina de tomografia Phoenix v|tome|x m.

para fins metrológicos, as partes manipuláveis estão assentes numa estrutura de granito e deslocam-se ao longo de réguas de elevada precisão. A temperatura também é controlada dentro do compartimento onde é colocada a peça de trabalho e no tubo de produção de raios-x. Assim, num ambiente sem grandes variações de temperatura, a exatidão da máquina é de $4,4 \pm L/100 \mu\text{m}$ seguindo as diretivas da VDI 2630-1.3. A câmara onde se encontra a peça a ser irradiada é isolada com camadas de chumbo para impedir a saída da radiação. O tempo de digitalização depende apenas do número de imagens capturadas e do tempo de exposição associado a cada captura.

5.2. CMM DE PONTE MÓVEL COORD3 ARES ADAPTADA

A CMM disponível para utilização era uma Ares Coord3 que tinha sido adquirida usada e, posteriormente, recuperada e adaptada com um controlador atual e uma sonda PH10, ambos da Renishaw. Devido ao seu volume de trabalho significativo, é capaz de medir uma grande variedade de peças independentemente do seu material. Por outro lado, tem de ser mantida numa sala com ambiente controlado onde a temperatura tem de se encontrar entre os 16°C e os 26°. A humidade também deve ser mantida entre os 40% e os 80%. Se estas restrições forem respeitadas, a máquina apresenta uma exatidão de $2,7 \pm L/300 \mu\text{m}$. No entanto, como qualquer sistema que funcione por contacto, obriga à utilização de um gabari de fixação para impedir o deslocamento da peça com o toque da sonda o que aumenta o tempo de preparação das peças. Esta máquina encontra-se equipada com uma sonda PH10 da Renishaw.

6. SOFTWARE UTILIZADO

Ao longo da realização deste projeto foi necessário recorrer a vários *softwares* para processamento dos dados recolhidos pelos equipamentos. A máquina de tomografia obriga o uso de pelo menos dois programas diferentes: um para recolha dos dados e reconstrução do volume e outro para fazer as medições. No entanto, durante este trabalho foram utilizados quatro programas durante as análises realizadas com o CT. A CMM apenas requer um *software* que controla a recolha de pontos e também realiza as medições em confronto com o CAD.

6.1. PHOENIX DATOS | X

Este programa foi desenvolvido pela empresa Phoenix, posteriormente, comprada pela General Electric que continuou o seu desenvolvimento. O *software* acompanha as máquinas de tomografia produzidas pela GE e funciona como *software* de controlo do equipamento. Faz a recolha dos dados e a posterior reconstrução do volume. Com uma ligação a um *software* de análise de volumes e de metrologia, como o VGStudio, é possível automatizar o processo de digitalização, reconstrução e medição. Reveste-se de relevante interesse de aplicação durante o processo produtivo, diminuindo tempos de inspeção e a influência do operário e aumentando a repetibilidade e reprodutibilidade do método.

6.2. VGSTUDIO MAX

É desenvolvido pela Volume Graphics com o propósito de receber volumes construídos a partir de dados de tomografia e realizar variados tipos de análise. É capaz de fazer medições de coordenadas e comparações entre o modelo obtido pelo CT e um CAD. Consegue também avaliar a qualidade do material realizando análises de porosidades, inclusões, fibras em materiais compósitos, fenómenos de transporte de líquidos e simulação de resistência mecânica que tem em conta a geometria real e os defeitos internos da peça. Para além disto, possui a capacidade de fazer reconstrução de volumes, tal como o Datos. Neste projeto, foi utilizado para realizar análises de porosidades, simulações de resistência mecânica e medições de uma peça padrão.

6.3. GOM INSPECT

Software criado pela GOM, que se trata de uma empresa dedicada à criação e distribuição de programas de análise metrológica. É utilizado para avaliar os dados obtidos com *scans* a laser, CTs, CMMs e outros equipamentos. Permite a importação de ficheiros CAD para realizar comparações diretas entre estes e a peça medida. Tem uma base de cálculo paramétrica que assegura a rastreabilidade dos resultados obtidos. O programa também realiza uma análise de tendências das várias avaliações feitas numa determinada peça. Também tem particular interesse por conseguir gerar e modificar malhas de modelos 3D.

6.4. GEOMAGIC CONTROL

Trata-se de um software de metrologia desenvolvido pela empresa Geomagic que se destaca pela facilidade de uso na inspeção de peças digitalizadas por *scan* a laser ou por tomografia. Tal como o GOM, faz comparações diretas entre a peça e o CAD para além das medições discretas das características das peças. Uma das suas grandes vantagens é a capacidade de construir um programa de automação à medida que se realizam as medições registando todos os passos. O programa criado é modificável e, portanto, adaptável às necessidades do operador.

6.5. MODUS

O Modus é um software produzido pela Renishaw para desenvolver e correr rotinas de inspeção para uma CMM. Como é desenvolvido pela Renishaw, tem compatibilidade garantida com todos os controladores e sondas por eles concebidos. Isto é uma vantagem pois os produtos Renishaw são os mais utilizados no mercado e também apresentam uma considerável supremacia tecnológica quando comparados com a concorrência. Para além disto, a aquisição deste software garante compatibilidade total com qualquer tecnologia que possa vir a ser desenvolvida e posta no mercado pela Renishaw. O seu funcionamento está baseado em DMIS.

7. PROCEDIMENTOS PARA AS PEÇAS DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL

Ao longo deste trabalho foram desenvolvidos procedimentos para a medição das duas peças já apresentadas. Isto foi feito para medição com CMM e para a digitalização com o CT e medição. Com os dados recolhidos com a tomografia foram realizadas duas análises adicionais à peça metálica: análise de porosidades/inclusões e uma simulação da resistência mecânica. Estas foram efetuadas com o intuito de demonstrar capacidades únicas à tomografia e que devem ser tidas em conta numa comparação entre a tomografia, enquanto método de metrologia, com outros equipamentos já estabelecidos.

7.1. DIGITALIZAÇÃO COM O CT E CRIAÇÃO DA MALHA DA PEÇA

Como em qualquer metodologia de medição, foi necessária uma preparação da peça antes da sua digitalização. Esta tem de ser posicionada dentro do compartimento da máquina de tomografia de modo a possibilitar que toda a sua superfície seja projetada pelos raios-x no detetor. Assim, foi necessário utilizar um suporte para orientar a peça, este era feito de poliestireno expandido colado a uma placa aço como pode ser visto na figura 18. É fulcral que o suporte tenha uma densidade muito mais baixa que a peça que vai ser digitalizada para que esta fique bem definida e o ruído seja minimizado, daí a escolha do poliestireno. A base em aço é necessária porque a mesa rotativa do CT é de fixação magnética. Como o aço é muito denso, vai provocar muito ruído e deflexão dos fotões o que leva ao aparecimento de artefactos nas imagens. Para minimizar este problema foi utilizada uma placa de balsa para afastar a peça do aço. Estratégia utilizada para as duas peças.



Figura 18 - Posicionamento da peça de alumínio dentro da máquina de tomografia.

Depois de a peça estar convenientemente posicionada, têm de ser definidas as condições de digitalização. Para ambas as peças, a voltagem escolhida foi de 200 kV e a corrente foi de 250 μ A. Foi utilizado um filtro de 0.5 milímetros de chumbo na digitalização da peça de alumínio e na de plástico, um de 1 milímetro de cobre. São usados filtros diferentes devido à disparidade entre a densidade das duas peças. A qualidade do contraste pode ser verificada com a opção *Live* do Datos que mostra a imagem que está a ser captada pelo detetor em tempo real, um exemplo disto pode ser visto na figura 19. Inicialmente foi feito um *fast scan* que corresponde à recolha de 2400 imagens e teve uma duração de 8 minutos. Como a definição das peças ficou satisfatória apenas com esta digitalização mais rápida, não foi realizada uma mais longa.

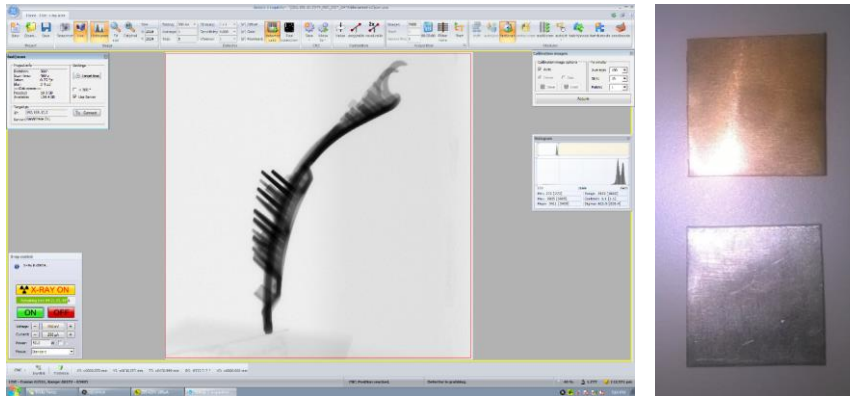


Figura 20 - À esquerda, captura de imagem da peça de alumínio no software Datos; à direita, (a) filtro de cobre e (b) filtro de chumbo.

Depois da captura das imagens, foi utilizado o Datos para as empregar no sentido de reconstruir o volume correspondente à peça em análise. Antecipadamente, deve ser limitada a área das imagens que será considerada na reconstrução. Isto é feito para minimizar o tamanho do volume que será processado e para a reconstrução resultar num ficheiro mais pequeno. Verifica-se na zona destacada da figura 20, a digitalização da peça polimérica ocupa cerca de 30 GBs. Após a limitação de área considerada na reconstrução, a ocupação de memória é reduzida para cerca de 5,5 GBs. Esta redução na utilização de memória é dependente da área que é possível retirar das imagens.

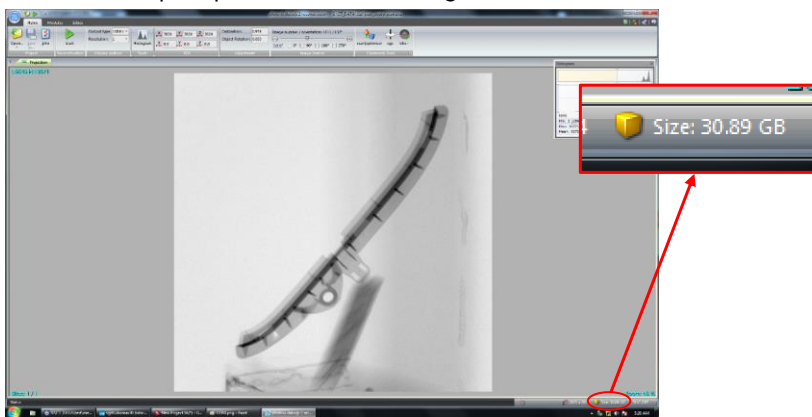


Figura 19 - Digitalização da peça de plástico antes da reconstrução no Datos e, realçado a vermelho, o espaço ocupado pelo ficheiro.

Com a reconstrução do volume concluída, o ficheiro novo é importado para o VGStudio Max onde será criado um sólido construído em malha de triângulos (*mesh*). Inicialmente, é feita uma determinação da superfície para identificar onde terminam os volumes. É normal este processo criar corpos de entidades que não são a peça. Por exemplo, a cola usada para

fixar os pedaços de poliestireno ou artefactos não eliminados das imagens capturadas. O volume da peça pode ser isolado para facilitar o seu tratamento. Depois da determinação de superfícies, o volume está pronto para ser exportado na forma de *mesh* para um ficheiro STL. O VGStudio pode ser utilizado para executar vários tipos de análise que serão abordados de seguida. Também poderia ser utilizado para realizar a análise metrológica, no entanto, foi usado o Geomagic Control por ter maior facilidade de utilização e por ser o *software*, normalmente, utilizado na Micronsense para esse efeito.

Antes de se passar à análise dimensional, foi empregue a capacidade do GOM Inspect de alterar malhas para minimizar o tamanho do ficheiro STL criado com o VGStudio. A minimização do tamanho dos ficheiros é importante porque facilita e torna mais célere o seu processamento nos programas de medição. O GOM, como se pode ver na figura 21, permite controlar o tamanho da malha. Quanto maior o tamanho desta, menos polígonos serão necessários para definir a superfície dos volumes, o que se traduz em menos memória ocupada. Neste trabalho, o tamanho da *mesh* foi aumentado para 0.003 milímetros nas duas peças. Esta dimensão permitiu uma boa definição de todas as características. Esta modificação é necessária porque o VGStudio cria a malha a partir do tamanho dos voxéis que compõe o volume e o objetivo durante a digitalização é maximizar o número de voxéis para que a peça fique com uma boa definição.

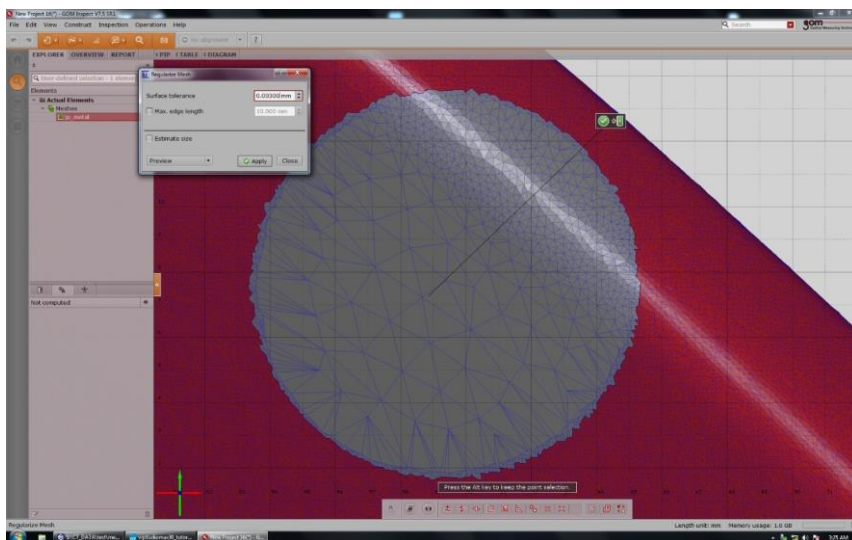


Figura 21 - Alteração do tamanho da mesh no GOM.

7.2. ANÁLISE DE POROSIDADES

Como já referido, o VGStudio Max tem a capacidade de realizar vários tipos de análise que são interessantes de um ponto de vista de controlo de qualidade ou de estudo de materiais. No âmbito deste trabalho, estas aptidões, que são apenas possíveis graças à digitalização por tomografia, foram consideradas relevantes por serem vantagens que contribuem para justificar o elevado custo desta tecnologia. Por serem exclusivas da tomografia, também ajudam a validar a sua utilização no controlo de qualidade, para além do dimensional, o que é especialmente interessante em indústrias que produzam peças com tendência para a formação de porosidades, inclusões ou de outros defeitos internos.

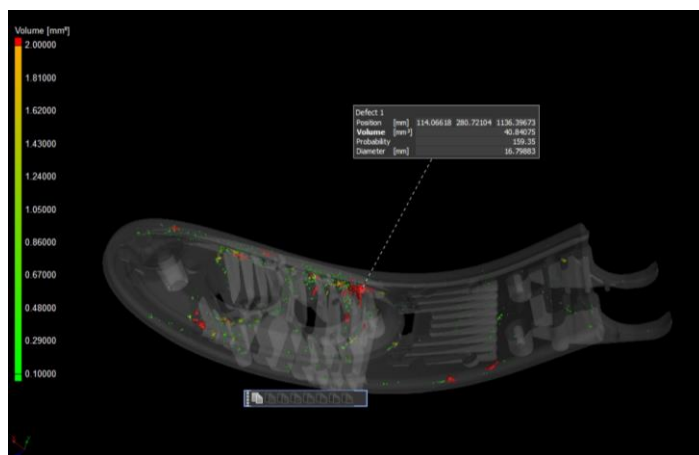


Figura 22 - Resultado da análise de porosidades realizada com o VGStudio no volume da peça de alumínio.

Para a realização da análise de porosidades foi escolhida a peça de alumínio por se ter tornado evidente que era a que tinha mais porosidades. Para além disto, a problemática que as porosidades representam é de maior importância para as fundições do que para a indústria de injeção de plástico. Este estudo é realizado diretamente nos dados da reconstrução do volume, depois da identificação das superfícies no VGStudio. O módulo “*Enhanced Porosity/Inclusion Analysis*” é utilizado para identificar as porosidades ou inclusões através de diferenças no contraste dos voxéis. São definidos parâmetros que permitem controlar o que é identificado como porosidade. Neste caso, o tipo de cálculo realizado foi “*Only Threshold*”, o que significa que a identificação das porosidades foi feita pela imposição de limites no valor de contraste. Naturalmente, o tipo de defeito selecionado para identificação foi “*Voids*” e estabeleceu-se que o intervalo de volume a considerar seria entre 0.01 mm^3 e 50 mm^3 . Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 2 e na figura 22.

A coloração foi feita de forma a identificar os poros que ultrapassam um limite máximo de volume a partir do qual foram considerados não conformes. Neste caso, foi arbitrariamente

Tabela 2 - Resultados da análise de porosidades.

Número de entidades	778
Volume (mm ³)	237,54
Rácio de volume	0,26%
Área superficial (mm ²)	2235,1

definido que este limite seria de 2 mm³. O rechupe destacado pela bandeira trata-se do maior volume identificado que tinha cerca de 40 mm³ e um diâmetro de cerca de 17 milímetros. Este diâmetro corresponde ao diâmetro da maior esfera que pode ser inscrita dentro da porosidade.

No anexo 1, encontra-se informação adicional relativa à análise de porosidades na forma de dois gráficos. Um descreve a relação entre a esfericidade do poro e o seu diâmetro e o outro é a distribuição de volume dos defeitos.

7.3. MEDIÇÃO COM O GEOMAGIC

As duas empresas que disponibilizaram as peças analisadas neste trabalho não puderam fornecer os desenhos técnicos das mesmas por motivos relativos à confidencialidade para com os seus clientes. Por esta razão, as cotas medidas e os desenhos apresentados foram criados no SolidWorks a partir do CAD cedido com as peças. Assim, as medições apresentadas neste ponto e no seguinte capítulo têm como base os desenhos presentes no anexo 2.

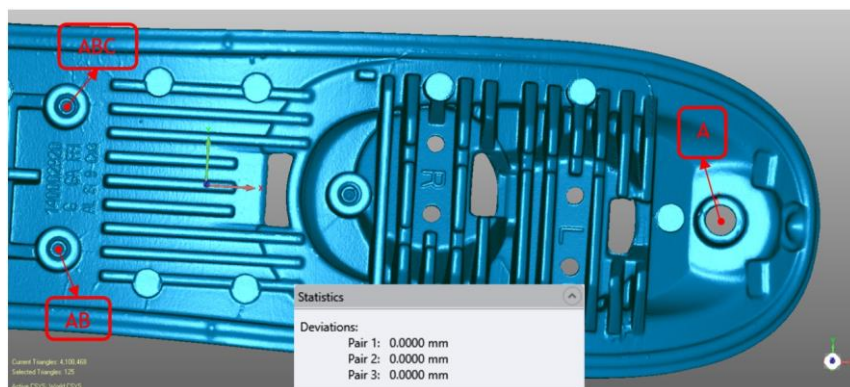


Figura 23 - Identificação dos três pontos utilizados no alinhamento e desvio associado a cada um deles após o alinhamento.

Antes de se realizar as medições, as peças tiveram de ser alinhadas com o CAD. No caso da peça de alumínio, foi feito um alinhamento RPS. Neste tipo de alinhamento, são necessários três eixos dos quais um bloqueia três direções, outro bloqueia duas e o último

bloqueia uma. Na figura 23, pode verificar-se que pontos da peça foram utilizados para bloquear os graus de liberdade.

O ponto ABC bloqueou as direções de X, Y e Z, AB bloqueou Y e Z e o ponto A bloqueou apenas Z. O alinhamento RPS com seis graus de liberdade bloqueados foi feito com 0 milímetros de desvio em todos os datums como também pode ser observado na figura 22.

A peça de plástico foi alinhada por *best fit* por duas razões:

- Não havia pontos óbvios com os quais realizar um alinhamento RPS sem focalizar o desvio num dos lados da peça.
- Há diferença entre o *best fit* realizado com a digitalização e com os pontos capturados com a CMM. No Geomagic, o cálculo do alinhamento tem em conta milhares de pontos que definem completamente a peça, com a CMM o número de pontos ronda as dezenas que não a definem totalmente.

Após o alinhamento das peças começou por fazer-se uma comparação entre as digitalizações e o CAD, que permitiu ter uma ideia do nível de desvio da peça. Para a medição de perfis é fácil a identificação das zonas que apresentam maior desvio como pode ser visto nas figuras 24 e 25 (mais imagens relativas a estas comparações encontram-se no anexo 3).

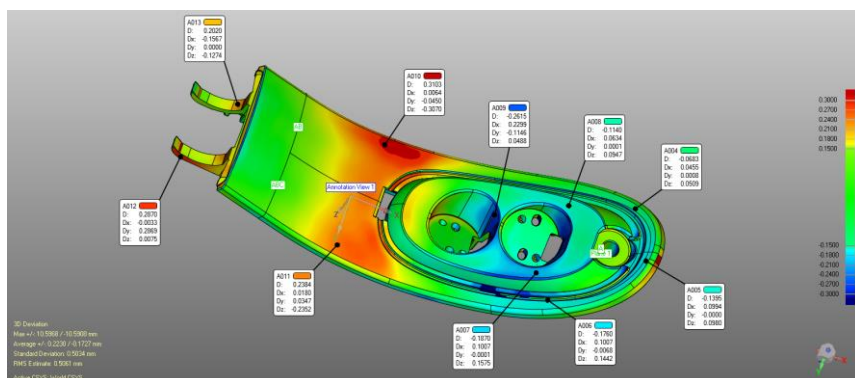


Figura 24 - Comparação entre a peça polimérica e o seu CAD.

A distribuição de cor é alcançada impondo dois intervalos de desvio das medições em relação ao nominal. Todos os pontos que se encontram entre estes intervalos são considerados dentro de cota. Para a peça de alumínio, o intervalo inferior foi de 0.15 a -0.15 milímetros e o superior foi de 0.3 a -0.3 milímetros. Já para a peça de plástico, o inferior foi de 0.1 a -0.1 e o superior de 0.5 a -0.5 milímetros. A diferença nos intervalos das duas peças é devida ao tipo de material que constitui cada uma. Os plásticos injetados, geralmente, apresentam maiores níveis de deformação do que peças metálicas devido à

contração durante o arrefecimento. Assim sendo, para ser mais fácil de identificar as regiões das peças com maior empeno foram impostos limites adequados para este fim.

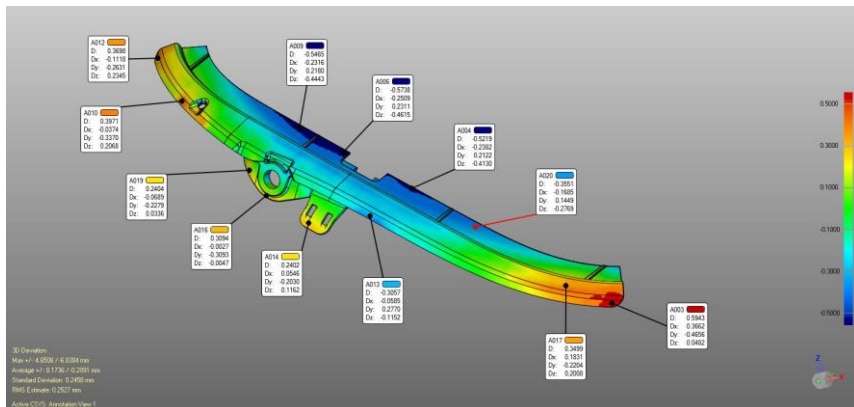


Figura 25 - Comparação entre a peça metálica e o seu CAD.

O limite inferior, para as duas peças, foi determinado de modo a dar uma ideia de quais dimensões estariam fora de cota. Como já referido, estas comparações foram utilizadas para identificar as zonas com maior desvio em relação às dimensões nominais. Depois dos valores serem determinados, foi realizado o cálculo dos perfis de linha e de superfície especificados nos desenhos técnicos. O cálculo de um perfil de linha ou de superfície, sem nenhuma especificação adicional, limita-se à identificação dos pontos de maior desvio à nominal na linha ou superfície em questão, multiplicando-se o valor desse desvio por dois.

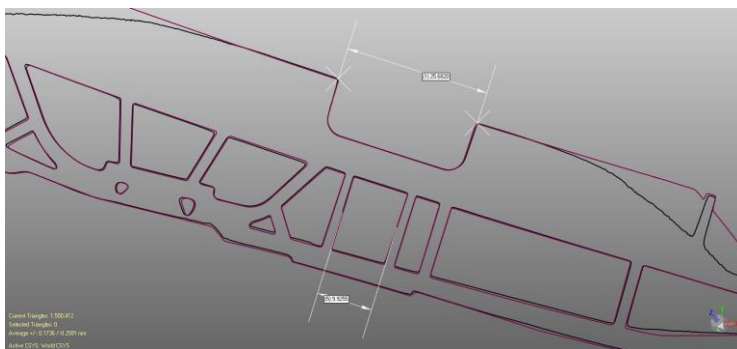


Figura 26 - Exemplo de medições feitas nos cortes de secção criados no Geomagix.

As restantes dimensões foram identificadas realizando cortes de secção nas peças de modo a defini-las numa forma bidimensional e foram medidas utilizando a funcionalidade “2D Dimensions”. Os cortes de secção têm de ser efetuados de modo a garantir que a geometria a medir fica corretamente definida. Outro cuidado a ter é com a possibilidade de

as características das peças apresentarem saída. Como foram produzidas por injeção, as duas peças utilizadas neste trabalho apresentam saída em várias das dimensões analisadas. Na figura 26, pode ser visto um exemplo deste processo. Todo o processo, desde o início da digitalização até à obtenção do valor das dimensões e produção de um relatório da comparação demorou cerca de 1 hora e 10 minutos para a peça de alumínio e de cerca de 1 hora para a peça de plástico. A diferença de 10 minutos deve-se ao alinhamento por RPS que é mais demorado do que o por *best fit*. O primeiro exige construção de pontos no CAD de referência e no modelo da peça. Nas tabelas 3 e 4, são apresentados os tempos associados a cada fase do processo.

Tabela 4 - Tempo despendido no processo de medição da peça de alumínio com recurso à tomografia.

Preparação do suporte e calibração	10 min
Digitalização	8 min
Processamento do volume	10 min
Medição com o Geomagic	30 min
Criação do relatório	10 min
Total	68 min

Tabela 3 - Tempo despendido no processo de medição da peça de plástico com recurso à tomografia.

Preparação do suporte e calibração	10 min
Digitalização	8 min
Processamento do volume	10 min
Medição com o Geomagic	20 min
Criação do relatório	10 min
Total	58 min

O propósito da análise destas peças foi o registo do tempo que o seu processo de medição exige. Como tal, os valores apresentados correspondem ao que um dos colaboradores da Micronsense demorou a concluir o procedimento para serem mais representativos daquilo que um técnico de um departamento de metrologia demoraria. É necessário ter em consideração que após a primeira medição, todo o processo que decorre no Geomagic pode ser totalmente automatizado, reduzindo o tempo de medição e criação de relatório para aproximadamente de 4 minutos. Para além disto, a preparação do suporte e a calibração da máquina só são realizados na primeira medição. Isto significa que o tempo total em medições repetidas das peças analisadas foi reduzido para cerca de 14 minutos. Este tempo pode ser ainda mais reduzido com um computador com maior capacidade do que aquele que foi utilizado.

7.4. MEDIÇÃO COM A CMM

Nas medições com a máquina de medição de coordenadas foi utilizado o *software* Modus da Renishaw. Como neste caso, as medições são efetuadas com apalpação, é necessário algum tipo de fixação para impedir o movimento das peças com os toques das ponteiras. Um gabari foi construído utilizando um kit modular de fixação Alufix da Witte.



Figura 27 - Peça de alumínio fixa no gabari construído com o kit Alufix.

Este conjunto é constituído por vários tipos de peças de alumínio com superfícies retificadas de modo a garantir o seu paralelismo com a mesa de trabalho da CMM. O gabari construído encontra-se apresentado na figura 27. Para além de fixar a peça, o gabari também tem a função de posicionar a peça de forma conveniente à sua medição. Na escolha da posição da peça, também é necessário ter em conta os ângulos que serão utilizados durante a medição. Nesta fase de análise da peça e do seu desenho, também é necessário escolher as

ponteiras que serão utilizadas. No caso da peça de alumínio foi utilizado um apalpador com 1,5 mm de diâmetro e 30 mm de haste e outro de 1mm de diâmetro e 20 mm de haste. Já na peça de plástico, foi utilizada apenas a ponteira de 1,5 mm já referida.

As peças também foram posicionadas de modo a garantir acesso com a ponteira ao maior número de características a medir, de modo a evitar o seu reposicionamento.

Nenhuma das peças analisadas exigiu mais do que uma posição de medição. Após a correta fixação da peça, o passo seguinte no procedimento foi a calibração da sonda em todos os ângulos que foram utilizados durante a medição, a figura 28 exemplifica este procedimento. Este processo foi realizado com o Modus, onde se definiram os ângulos a calibrar, e com uma esfera de calibração colocada na mesa de trabalho. Este processo consistiu na apalpação de oito pontos na esfera para cada ângulo a calibrar. Para além dos ângulos, é



Figura 28 - Calibração de um dos ângulos utilizados durante a medição das peças.

necessário calibrar as ponteiras utilizadas. Neste caso, foram duas para a peça metálica e uma para a de plástico.

Com a peça posicionada e os ângulos necessários calibrados, foi necessário alinhar a peça ao CAD. Foi, assim, feito um alinhamento por RPS no caso da peça de alumínio e por *best fit* no caso da peça de plástico. Para o RPS, foram criados os mesmos pontos que foram utilizados no alinhamento realizado com o Geomagic. Estes foram originados a partir de geometrias criadas com base em características da peça, nomeadamente dois furos roscados e um furo passante. Para o alinhamento da peça de plástico, por *best fit*, foi necessário identificar trinta pontos distribuídos pela superfície da peça no CAD. Depois de marcados os pontos, foi feita a apalpação nas zonas correspondentes na peça real. A associação entre os pontos marcados e os apalpados criam o alinhamento entre o CAD e a peça. No anexo 4, podem ser vistos os pontos selecionados no CAD para posterior apalpação. Depois do alinhamento, as medições foram feitas diretamente nas peças por contacto com as ponteiras.

Foram definidas as geometrias a construir e os pontos a capturar no CAD com o Modus, permitindo que o movimento da máquina seja feito por controlo numérico o que acelerou todo o processo de medição. Durante este, a geometria complexa das peças e o facto de a maior parte das suas características possuírem saída, dificultou a medição com a CMM. Para a medição dos perfis de superfície, como já explicado para a peça de alumínio, é necessário identificar o ponto com maior desvio na superfície ou na linha em análise. Na CMM, a única maneira de fazer isto é apalpar um grande número de pontos, de modo a garantir uma alta probabilidade de encontrar o ponto de maior desvio. No entanto, foi necessário encontrar um equilíbrio entre o número de pontos recolhidos e o tempo de medição, porque o tempo de medição está diretamente relacionado com o número de apalpações que a máquina tem de realizar. Na figura 29, encontram-se identificados os pontos recolhidos para um dos perfis medidos na peça metálica.

Tal como as medições realizadas nas digitalizações feitas com a máquina de tomografia, o objetivo deste estudo foi a avaliação do tempo despendido para a realização da medição das peças. Assim, o procedimento de medição definido foi executado por um dos colaboradores da Micronsense para que os resultados fossem mais representativos.

Commented [JPS7]: Figura antes da referencia

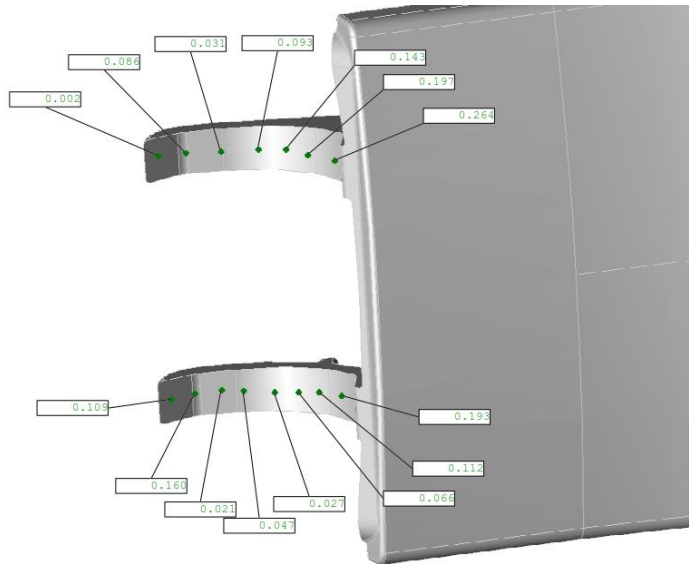


Figura 29 - Pontos recolhidos com a CMM para medição da cota 7 da peça de alumínio.

Nas tabelas 5 e 6, pode ser visto o tempo que cada fase do procedimento ocupou para cada uma das peças. No entanto, deve ter-se em consideração que os tempos apresentados só são válidos para a primeira medição realizada com uma CMM. Depois desta, o processo pode ser automatizado permitindo que todas as medições sejam controladas por controlo numérico e que sejam produzidos relatórios personalizados pelo operador. Considerando

Tabela 5 - Tempo despendido no processo de medição da peça de plástico utilizando uma CMM.

Análise do desenho e preparação do Gabari	30 min
Calibração dos ângulos necessários	15 min
Medição	65 min
Preparação do relatório	30 min
Total	150 min

Tabela 6 - Tempo despendido no processo de medição da peça metálica utilizando uma CMM.

Análise do desenho e preparação do Gabari	20 min
Calibração dos ângulos necessários	10 min
Medição	55 min
Preparação do relatório	30 min
Total	115 min

estas automações, os tempos de medição e criação de relatório da peça injetada em alumínio foram reduzidos para cerca de 25 minutos. Como os outros passos do procedimento já foram realizados, para além do tempo de medição, tem de ser tido em conta a montagem da peça no gabari que se considerou como ocupando cerca de 5 minutos. Isto traduziu-se numa redução do tempo de medição para cerca de 30

minutos. Para a peça de plástico, a automação da medição, do alinhamento e da criação do relatório permitiu diminuir o tempo ocupado por estas etapas para apenas 20 minutos. Novamente, para além do tempo de medição, após a automação também será considerado o tempo utilizado no posicionamento da peça no gabari, que para a peça de plástico foi

cerca de 5 minutos. É totalizado um tempo de medição de 25 minutos para a peça de plástico.

8. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS DA ANÁLISE DO PADRÃO

Em qualquer equipamento de aplicação em metrologia, dois dos principais fatores de escolha é o nível de exatidão e a repetibilidade das medições realizadas. Nesse âmbito, foram realizados dois ensaios nos quais foi utilizado um padrão calibrado. O padrão é um tubo de carbono com 120 mm de comprimento que serve de suporte para oito esferas de rubi sintético, quatro delas têm 4 mm de diâmetro e as restantes têm 10 mm de diâmetro. O padrão foi certificado em agosto de 2015 pela Agência de Acreditação Alemã (*Deutsche Akkreditierungsstelle*) e foi calibrado no laboratório *Deutschen Kalibrierdienst*.

A máquina de medição de coordenadas utilizada na calibração do padrão foi uma Leitz PMM 866 que se trata de uma CMM de elevada precisão com $0,6 + L/800 \mu\text{m}$ de exatidão. As medições da calibração foram realizadas a $20,33 \text{ }^\circ\text{C}$, as dos ensaios foram feitas a $20,2 \text{ }^\circ\text{C}$, como tal, a temperatura não deverá ter influência significativa nos resultados. Em ambos os ensaios, como se pode ver na figura 30, o padrão foi montado num apoio com estrutura em alumínio, na zona que é acoplada à base rotativa da máquina de tomografia, e em plástico na parte que segura o padrão. Para ambos os ensaios, depois da digitalização foi realizada uma determinação de superfície em que o valor mínimo ISO de foi 33500 para definir que materiais considerar na determinação. O valor foi escolhido para que apenas as esferas de rubi fossem consideradas e minimizar a camada que lhes é retirada pela operação. O valor ISO é referente ao nível de contraste em cada voxel do volume e é utilizado para lhe atribuir um valor parametrizável.



Figura 30 - Padrão montado com o seu suporte no compartimento da máquina de tomografia.

8.1. ENSAIO DE EXATIDÃO DO CT

Neste ensaio foram realizadas três digitalizações do padrão, com exposição a 200, 400 e 600 mm do emissor de raios-x. Em cada digitalização foram capturadas 2400 imagens com um tempo total de exposição de 27 minutos com 200 kV, 230 μ A e 46 W. Para minimizar os artefactos de *beam hardening* e por ser aconselhado para a utilização do padrão, foi utilizado um filtro de 0,5 mm de espessura de cobre. Após a digitalização, o volume foi reconstruído utilizando o Datos e foi importado para o VGStudio. Aqui foi feito o reconhecimento de superfície de forma manual para que o algoritmo ignorasse tudo com densidade inferior às das esferas de rubi. Na figura 31, pode ser visto tudo o que foi capturado pelo detetor do CT com o padrão a 400 mm do emissor e o que ficou depois da definição da superfície.

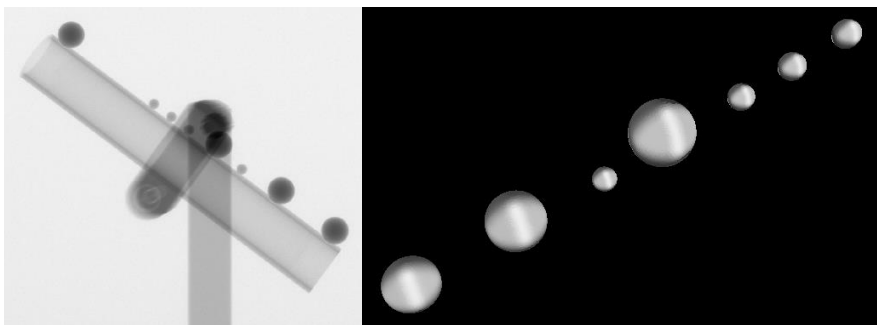


Figura 31 - Padrão como foi capturado pelo detetor do CT (à esquerda) e esferas de rubi do padrão depois do reconhecimento de superfície no VGStudio (à direita).

Depois de ter o volume definido, este foi exportado na forma de STL para serem realizadas medições com o Geomagic para além de ser medido diretamente no VGStudio. Foram utilizados os dois por não se saber qual a influência que a transformação do volume numa malha de triângulos teria nas medições. Como se pode ver na figura 32, a exportação na forma de malha teve um impacto nas medições. O desvio atingiu picos que **ultrapassaram os 5 μ m de diferença** entre os dois *softwares* e teve uma média de 1,3 μ m de diferença, o que em conjugação com a incerteza do equipamento, pode levar a medições erradas em casos que as especificações sejam abaixo de uma centésima de milímetro. Desta forma, para fazer o estudo comparativo foram considerados os resultados obtidos com as medições feitas diretamente no volume.

No VG, os volumes foram alinhados segundo Z utilizando a função “3-2-1 *Registration*” e foram criadas esferas a partir das digitalizações do padrão. As dimensões medidas foram as distâncias entre os centros das esferas em Z. Os valores obtidos com as medições realizadas no VG foram comparados com as correspondentes medições feitas pela CMM. Verificou-se que o desvio médio entre os dois equipamentos foi de 2,4 μ m, o que permite

Commented [JPS8]: Alterar escala do gráfico para um

inferir uma exatidão aproximada de $2,4 \pm 0,6 \mu\text{m}$ ($0,6 + L/800$ é a exatidão especificada pelo fabricante para a CMM usada para calibrar o padrão) para todo o processo de digitalização, reconstrução do volume e medição.

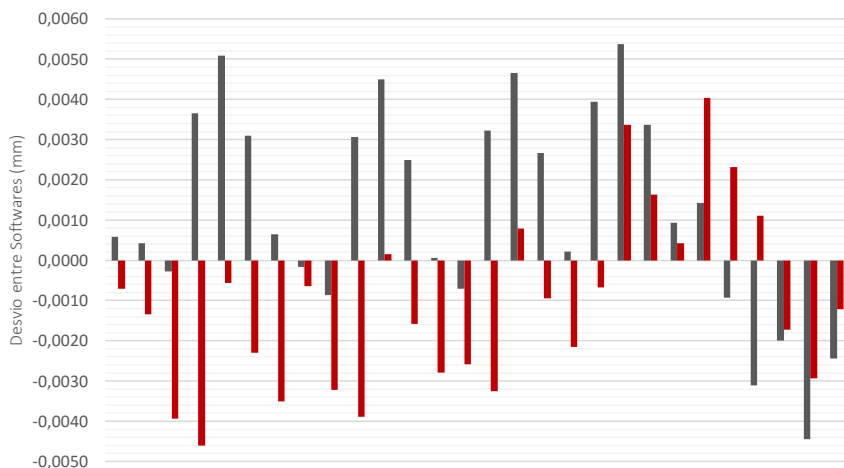


Figura 32 - Gráfico que apresenta o desvio entre as medições feitas no Geomagic e no VGStudio para as digitalizações feitas a 400 mm (a cinzento) e a 600 mm (a vermelho) do emissor.

Na figura 33, é apresentado um gráfico onde se verifica a dispersão dos valores de desvio entre os resultados obtidos com a máquina de tomografia e com a CMM de alta exatidão. Estes resultados colocam a exatidão da máquina de tomografia abaixo da especificação dada pelo fabricante e em valores que competem diretamente com a maioria das máquinas de medição de coordenadas usadas na indústria para controlo dimensional de peças.



Figura 33 - Gráfico com a diferença entre o CT e a CMM.

Commented [JPS9]: Por legendano eixo. Corrigir as cores dos graficos

8.2. ENSAIO DE REPETIBILIDADE DO CT

Neste ensaio, realizaram-se três digitalizações a 350 mm do emissor de raios-x. Esta distância foi escolhida por permitir a digitalização das oito esferas do padrão utilizado. Para além disto, todos os parâmetros de digitalização foram iguais aos utilizados na digitalização do padrão no ensaio anterior. As dimensões medidas foram, novamente, as distâncias entre os centros das esferas segundo o eixo coordenado Z. Em seguida, foi realizada uma comparação entre os valores obtidos nas três exposições para verificar a repetibilidade da máquina de tomografia e do processo de reconstrução. Como se pode verificar na figura 34, mais de 70% das medições têm uma variação abaixo de 1 μm , o que se traduz num desvio médio de apenas 0,8 μm entre digitalizações, o que pode ser considerado um erro desprezável na análise dimensional industrial. Para além desta análise, decidiu-se verificar qual o impacto dos cálculos efetuados pelo *software* para definição das esferas e medição das distâncias entre os seus centros.

Commented [JPS10]: Figura antes



Figura 34 - Gráfico com a diferença média entre as três medições de cada dimensão.

Para este efeito foi considerada a terceira digitalização realizada no ensaio de repetibilidade e foram, novamente, definidas as esferas e medidas as mesmas distâncias. Os resultados obtidos podem ser verificados na figura 35. Verificou-se que a diferença média entre medições do mesmo *scan* é de 0,11 μm e que o desvio máximo não ultrapassou os 0,35 μm .



Figura 35 - Gráfico que apresenta a diferença entre medições da mesma digitalização feitas no VGStudio.

Assim sendo, constatou-se que, enquanto apreciável, o impacte das computações do VG é pouco significativo. Esta análise permitiu concluir que, em média, o erro associado ao processo de digitalização e posterior medição é de cerca de 0,8 µm e que cerca de 14% deste (0,11 µm) pode ser atribuído a erros no processamento feito no VGStudio.

9. ANÁLISE DE CUSTO DE MEDIÇÃO

A partir dos tempos registados para as medições das peças fornecidas pela Nova Fundínio e pela Moldoeste, realizou-se uma comparação entre tempos de medição. Com os resultados obtidos partiu-se para uma análise de custo das tecnologias. Nesta análise, foram usados valores monetários aproximados para o preço de aquisição e manutenção de cada equipamento. No preço de aquisição foram incluídos os softwares e o material informático necessários para utilizar as máquinas. As estimativas foram fornecidas pela Micronsense e encontram-se na tabela 7.

Tabela 7 - Estimativas dos preços médios dos equipamentos considerados neste trabalho e da sua manutenção.

CUSTOS	CT	CMM
Aquisição	450 000,00 €	70 000,00 €
Manutenção do equipamento (anual)	8 000,00 €	2 000,00 €
Manutenção do software (anual)	3 000,00 €	1 000,00 €
Consumíveis (anual)	1 800,00 €	600,00 €
Custo 1º ano	462 800,00 €	73 600,00 €
Custo anos seguintes	12 800,00 €	3 600,00 €

Para a análise de custo de utilização, foi considerada uma hipótese em que as peças analisadas estariam em produção ao longo de 15 anos. Foi assumido que as máquinas estariam a trabalhar 24 horas por dia com apenas duas semanas de pausa para manutenção por ano. Este cenário é uma aproximação à produção em série na indústria automóvel de peças utilizados em várias gerações dos modelos em que é aplicada. Também foi considerado que não houve necessidade de realizar atualizações aos equipamentos. Não foram considerados custos com os operadores nos cálculos efetuados.

9.1. PEÇA DA NOVA FUNDÍNIO

Para esta comparação foram considerados os tempos de medição das duas peças analisadas ao longo deste trabalho, especificamente o tempo total do processo de medição com e sem automação. Como já apresentado, verificou-se que na primeira medição, o tempo na CMM foi de 115 minutos e na máquina de tomografia foi de 68 minutos. Para medições subsequentes, o tempo é reduzido para 30 minutos no caso da CMM e para 14 minutos no caso do CT. Isto é possível devido à programação de automações nos *softwares* utilizados. Na figura 36, pode ser analisada a evolução do tempo que seria despendido na medição de dez mil peças iguais à fornecida pela Nova Fundínio nos dois equipamentos.

Commented [JPS11]: Por escala de tempo,

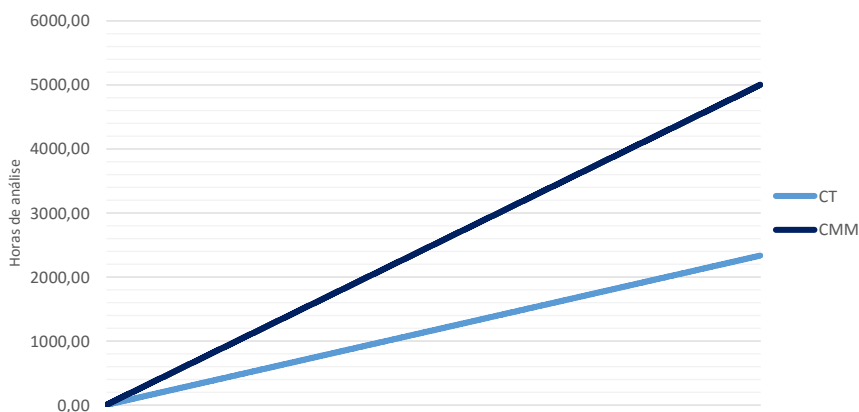


Figura 36 - Gráfico da evolução do tempo consumido na medição de 10 000 peças no CT e na CMM.

Como se torna claro, a tendência é para a tomografia ser mais eficiente, em termos de tempo de medição, do que uma máquina de medição por coordenadas. Um CT tem um *throughput* 2,2 vezes superior ao de uma CMM comum, o que corresponde, aproximadamente, a uma poupança de 53% do tempo despendido pela CMM na medição das 10 000 peças consideradas. Assim, foi possível constatar que, com uma máquina de

tomografia, seria possível medir 99 peças por dia, enquanto que, com uma CMM ficaríamos pelas 45. Isto significa que o *throughput* anual das máquinas seria de 34 650 peças e de 15 750 peças, respetivamente. Isto implica a utilização de 3 máquinas de medição de coordenadas das quais, uma estaria a funcionar a apenas 20% de capacidade, ou seja, o cenário considerado foi um CT *versus* 3 CMMs. Na figura 37, é possível verificar a variação no custo das medições por peça em cada equipamento.

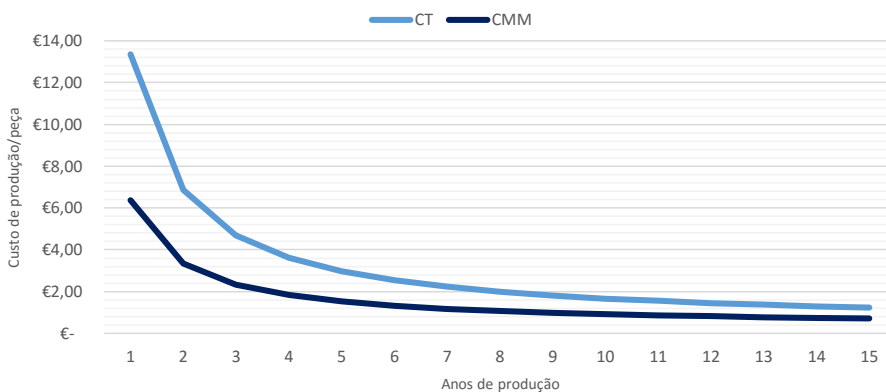


Figura 37 - Gráfico da variação do custo de medição por peça ao longo dos 15 anos de produção.

Verificou-se que o preço de medição desta peça com recurso a tomografia por raios-x é entre 1,7 a 2,1 vezes superior ao custo associado à utilização de CMMs ao longo dos 15 anos de produção, dependendo do ano em questão. Também se comprovou que, nestas condições, a amortização da máquina de medição de coordenadas acontece mais cedo do que a do CT. No entanto, é necessário ter em conta que é normal que peças produzidas por fundição, ou pelo menos uma parte de cada lote, tenham de passar por uma análise de porosidades. Esta análise pode ser realizada nos dados recolhidos para análise dimensional pelo CT e em paralelo com a análise dimensional, enquanto que, numa CMM, a verificação de porosidades e a medição têm de ser realizadas em momentos diferentes.

9.2. PEÇA DA MOLDOESTE

Para esta peça, foi tida em conta a capacidade que uma máquina de tomografia tem de realizar digitalizações de várias peças em simultâneo. Para este efeito, foi considerado que, dando uso a um suporte adequado, seriam colocadas três peças no compartimento do CT, o que, na prática, triplica o *throughput*.

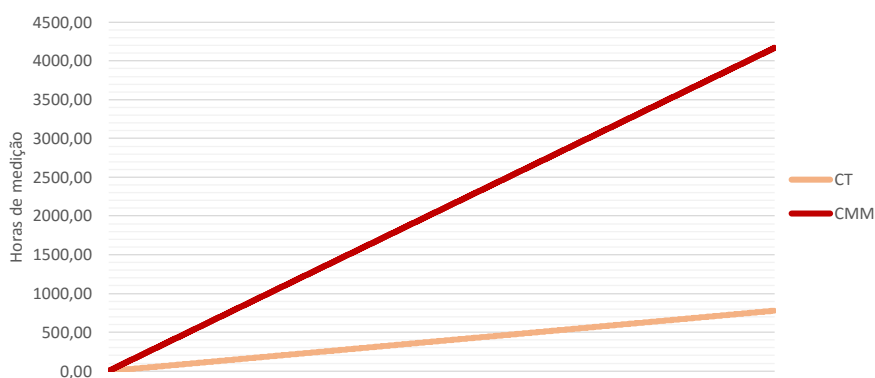


Figura 38 - Gráfico da evolução do tempo consumido na medição de 10 000 peças no CT e na CMM.

Novamente, recorreu-se aos valores de tempo obtidos durante as medições das peças com e sem automação. Os valores do CT foram adaptados para corresponderem ao aumento de eficiência de medição implicada pela digitalização de várias peças ao mesmo tempo. Na figura 38, está apresentada uma confrontação do tempo que demoraria a medição de 10 000 peças iguais à fornecida pela Moldoeste usando um CT e uma CMM.

Foi verificada, novamente, a tendência para a tomografia apresentar uma maior eficiência na medição do que a CMM, mas muito exacerbada quando comparada com o caso anterior. Agora apresentando um *throughput*, aproximadamente, 5,9 vezes superior ao da CMM, a tomografia demonstra o seu potencial para análise de peças de tamanho que permita a digitalização simultânea de várias peças. Isto também implica que seriam necessárias, praticamente, 6 máquinas de medição por coordenadas para estas acompanharem a velocidade de processamento de peças de 1 CT. Isto levou a que a análise fosse realizada tendo em conta a utilização de 1 CT *versus* 6 CMMs. Com estes dados, calculou-se que, com uma máquina de tomografia, seriam medidas 106 750 peças por ano e, com uma CMM, seriam apenas 18 200 peças. Considerando estes resultados, fez-se uma comparação entre a variação do custo por peça ao longo de 15 anos de produção que pode ser verificada na figura 39.

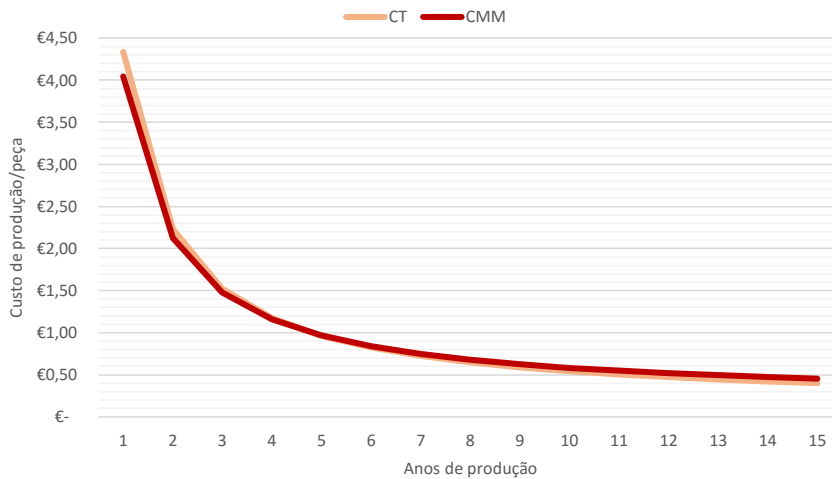


Figura 39 - Gráfico da variação do custo de medição por peça ao longo dos 15 anos de produção.

Ao contrário do que aconteceu com a peça de alumínio, verificou-se que o CT fica mais rentável do que uma CMM a partir do quinto ano de produção com um custo de medição que varia entre 1,1 e 0,9 vezes o de uma CMM. Do mesmo modo, a amortização do equipamento também é mais rápida com a máquina de tomografia. Isto leva a concluir que, sendo possível digitalizar mais do que uma peça em um só *scan*, uma máquina de tomografia por raios-x pode ser mais eficiente e rentável que uma máquina de medição por coordenadas.

9.3. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Deve ser tido em conta que as análises realizadas não consideraram o custo dos operadores das máquinas nem de potenciais atualizações que pudessem ser necessárias para o seu uso continuado. O custo associado aos operadores é difícil de estimar porque o seu ordenado pode variar com a empresa em questão e com o nível de experiência da pessoa. Para além disto, pode haver situações, especialmente quando se trata de produção em série, em que um operador está responsável por várias máquinas ao mesmo tempo. Relativamente às atualizações dos equipamentos e dos *softwares*, foi decidido não considerar o seu impacto por não ser conhecido o modo como seriam efetuadas nas máquinas de tomografia. Enquanto que, numa máquina de medição por coordenadas, é comum serem feitas alterações ou substituições de componentes como o seu controlador e, por isso, é fácil estimar o seu custo, o mesmo não se verifica para a tomografia por se tratar de uma tecnologia recente.

Cada um dos estudos apresentados foram baseados numa amostra com amplitude relativamente pequena. Isto poderá diminuir o significado estatístico dos resultados obtidos. Seria interessante a realização de trabalhos futuros que consigam aprofundar as análises e levar à obtenção de resultados mais representativos. Por exemplo, o estudo da repetibilidade das medições realizadas com digitalizações feitas por tomografia ajudaria a determinar as fontes de incerteza da tecnologia.

É, também, importante ter em mente que as análises foram realizadas com dados obtidos a partir de apenas duas peças de dois materiais diferentes. Peças com complexidades geométricas e dimensões diferentes levarão a resultados divergentes dos apresentados podendo beneficiar tanto um, como outro equipamento. Os materiais podem ter um forte impacto no tempo de digitalização necessário para a obtenção de dados de boa qualidade e até impossibilitar a utilização do CT. A espessura das peças também pode ter o mesmo efeito que a densidade dos materiais. Isto obriga a uma seleção criteriosa do método de análise com base nas características das peças que se pretendem estudar.

Finalmente, a análise de custo não teve em consideração a capacidade de analisar peças com geometrias inacessíveis. Isto poderia ter um grande impacto na diminuição de custos causados por análises deficientes das geometrias de peças que teriam de ser cortadas para permitir a medição. Também há o custo associado à entrega de produtos com porosidades não detetadas aos clientes.

10. SELEÇÃO DA TÉCNICA DE MEDIÇÃO

A escolha de equipamento de metrologia é de grande importância para qualquer indústria, independentemente do método de produção. Esta decisão deverá ter como base as características das peças que têm de passar análises de qualidade, sejam dimensionais ou relativas à integridade do material. O contexto empresarial também deve ser tido em conta, nomeadamente, se o orçamento disponível permite a aquisição da solução ideal. Para além disto, outros fatores relacionados com a análise a realizar também podem ter importância. Assim, foi elaborado um fluxograma que esquematiza um processo de deliberação que tem em conta uma variedade de parâmetros:

- Dimensão - as máquinas de tomografia por raios-x têm um volume de trabalho muito inferior ao que é possível ter numa CMM;
- Peso - o limite máximo de peso para um CT é muito inferior ao de uma CMM;

- Densidade do material - materiais de alta densidade, como o ferro fundido e o cobre, dificultam e até podem impedir a digitalização;
- Espessuras da peça - a espessura pode impossibilitar a digitalização com recurso à tomografia;
- Existência de geometrias fisicamente inacessíveis - este tipo de características é impossível de analisar com uma CMM sem destruição da peça;
- Necessidade de análise de porosidades - a tomografia permite uma análise completa de todo o tipo de porosidades e inclusões que possam ser apresentadas;
- Número de cotas a medir - o tempo de medição com recurso à tomografia por raios-x é pouco afetado pelo número de cotas a medir;
- Preço - a tomografia por raios-x é uma tecnologia muito cara o que pode impossibilitar a sua aquisição por parte de várias empresas;
- Prazo - em média, o tempo de medição de peças é mais baixo no CT, logo esta solução deve ser privilegiada quando o prazo para a medição é curto.

Não foram especificados valores para os vários parâmetros porque estes podem variar de forma significativa entre os equipamentos disponíveis no mercado. O fluxograma construído pode ser analisado na figura 40.

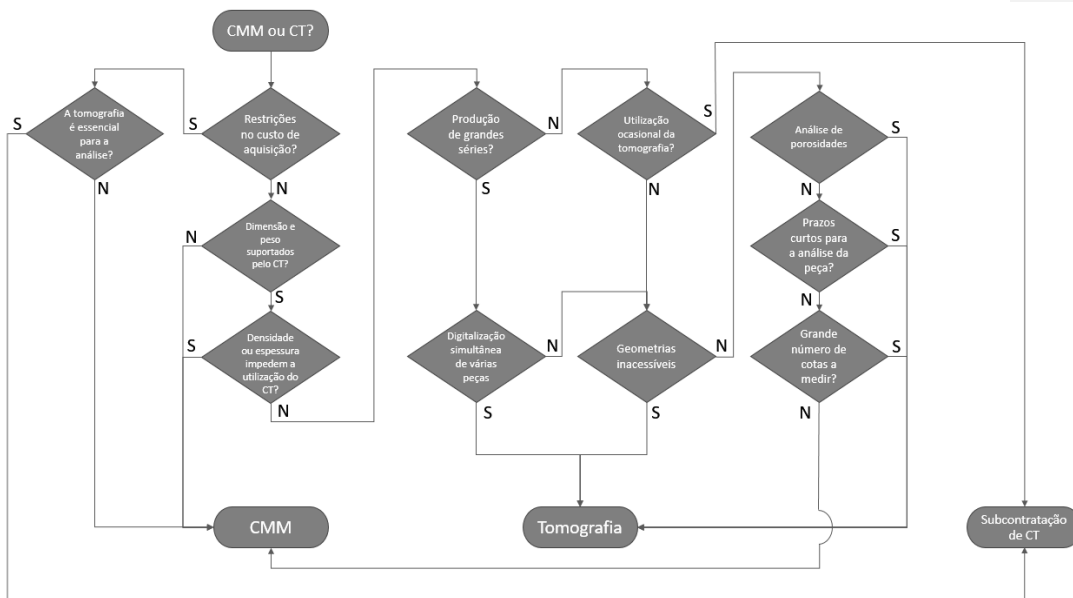


Figura 40 - Fluxograma do processo de decisão de compra de uma CMM ou de um CT.

O fluxograma apresentado pode ser utilizado como um guia que salienta os parâmetros tidos como de maior importância na decisão entre a compra de uma máquina de tomografia ou de uma CMM. No entanto, algumas das variáveis exigem uma análise mais aprofundada por estarem interligadas com outras, por exemplo, o número de cotas a medir vai influenciar diretamente os tempos de análise dimensional o que tem implicações para os prazos que poderiam ser exigidos.

11. CONCLUSÕES

No âmbito do estágio realizado na Micronsense, foram abordados os conceitos basilares de variados equipamentos e metodologias de metrologia. Foram acompanhados procedimentos de medição de peças com recurso aos vários equipamentos apresentados ao longo da dissertação. Devido ao tema desta dissertação, o trabalho desenvolvido foi focado nas máquinas de medição de coordenadas e na tomografia por raios-x. Por se tratar da tecnologia mais recente e por ser mais interessante na perspetiva do trabalho realizado, houve um enfoque na máquina de tomografia, softwares necessários à sua utilização e aos procedimentos associados. Ao longo deste processo, integrei a equipa técnica da Micronsense e acompanhei as suas atividades, auxiliando nas medições realizadas com as digitalizações obtidas por tomografia e digitalizando peças com o CT para posterior análise. O desenvolvimento deste trabalho permitiu um aprofundamento do conhecimento adquirido bibliograficamente através de um contacto direto com os equipamentos e métodos de análise.

A análise de porosidades foi realizada na peça de alumínio para demonstrar a informação que é possível obter a partir dos dados recolhidos com uma digitalização feita por tomografia de raios-x. Também realça a capacidade desta tecnologia para analisar geometrias inacessíveis sem destruição da peça. Já o estudo do padrão de calibração permitiu concluir que, de uma forma aproximada, a exatidão real de uma máquina de tomografia é semelhante à de uma CMM de uso industrial. Segunda a análise realizada, o CT teria, aproximadamente, $2,4 \pm (0,6 + L/800)$ μm de exatidão. Já a CMM utilizada para medir as peças tinha $2,7 \pm L/300$ μm de exatidão segundo especificação do fabricante. No entanto, é necessário ter em conta que isto apenas foi verificado para a medição de distâncias, o que significa que para análises de forma a diferença entre os dois equipamentos pode ser mais significativa.

Os valores obtidos para o tempo que o processo de medição com uma CMM e com um CT ocupa levaram a concluir que, para as peças analisadas, o CT é cerca de duas vezes mais rápido na primeira medição. Se for tida em conta a utilização de automações, o CT continua a ser aproximadamente duas vezes mais eficiente que a CMM. Com a análise de custos, verificou-se que a tomografia é a técnica que implica mais custos por peça medida a não ser que seja possível a digitalização de três ou mais peças simultaneamente. Neste caso, o CT, para além de permitir uma maior variedade de análises do que as que é possível com uma CMM, fica mais rentável e possibilita custos de medição mais baixos. Isto significa que,

dependendo da utilização dada, uma máquina de tomografia por raios-x pode ser amortizada mais rapidamente que uma CMM.

Todos os conhecimentos recolhidos ao logo do desenvolvimento deste trabalho e durante o estágio curricular levaram a um maior esclarecimento no processo de decisão entre uma CMM ou um CT. Os parâmetros de maior importância são abordados ao longo deste documento e são resumidos de forma sintética para facilitar a escolha entre os dois equipamentos. O procedimento sugerido como auxílio na decisão foi esquematizado na forma de um fluxograma que estabelece uma ordem pela qual se poderia abordar os critérios influentes.

11.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Durante este trabalho contactei com vários aspetos da tomografia por raio-x sobre os quais poderia ser interessante fazer um estudo mais aprofundado, mas que não seriam do âmbito desta dissertação. As sugestões formuladas em seguida são interessantes por se referirem a particularidades da tecnologia que, atualmente, se encontram mal documentadas.

O recente desenvolvimento da possibilidade de realizar simulações de ensaios mecânicos que têm em conta a geometria real da peça, incluindo quaisquer cavidades ou porosidades existentes tem enorme interesse. Como esta técnica utiliza o volume obtido por uma digitalização feita com um CT e poderia permitir a análise da resistência mecânica de peças sem a sua destruição. Seria proveitoso um estudo mais aprofundado sobre esta tecnologia que poderia ser baseado na comparação entre os resultados obtidos com a simulação e com ensaios de tração de provetes.

Outro aspeto da tomografia que poderia ser mais explorado seria as fontes de incerteza do equipamento e do processo de medição. Durante este trabalho foram realizados teste de repetibilidade que demonstram uma variabilidade no procedimento de captação das imagens e construção do volume. Também se verificou que o processo de criação de um ficheiro STL a partir do volume reconstruído também provoca variação nas medições. Seria necessário aprofundar estes testes aumentando o tamanho das amostras consideradas. O estudo poderia ser expandido para incluir os graus de liberdade da máquina, valores de voltagem e de corrente e o tamanho de voxel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “BIPM - worldwide metrology.” [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/>. [Accessed: 19-Oct-2016].
- [2] V. Pinto, *Metrologia Industrial , Calibração e Gestão dos Dispositivos de Monitorização e Medição*, 1ª Edição. 2007.
- [3] F. Redgrave and P. Howarth, *Metrology - In Short 3rd Edition*. 2008.
- [4] “IPAC.” [Online]. Available: <http://www.ipac.pt/ipac/funcao.asp>. [Accessed: 19-Oct-2016].
- [5] M. A. Ferreira, “ABC da Metrologia Industrial.” ISEP, 2003.
- [6] A. Lau, “What Are Repeatability and Reproducibility?,” 2009. [Online]. Available: http://www.astm.org/SNEWS/MA_2009/datapoints_ma09.html. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [7] J. M. de S. Morais, *Desenho Técnico Básico*, 23ª Edição. Porto: Porto Editora, 2006.
- [8] “Fundamentals of GD&T.” [Online]. Available: http://www.aidt.edu/course_documents/Manufacturing_Skills/GD&T/Fundamentals_of_GDandT.pdf. [Accessed: 19-Oct-2016].
- [9] A. Voltan, “Metrological Performance Verification of Optical Coordinate Measuring Systems,” Università Degli Studi Di Padova, 2010.
- [10] H. do O. L. Silva, “Proposta de um Método para estimar a Incerteza de Medição na Avaliação de Superfícies de Forma Livre por meio de uma MMC,” Universidade Metodista de Piracicaba, 2015.
- [11] J. a. Bosch and J. H. Robert, *Coordinate Measuring Machines and Systems*, 2ª Edição. 2012.
- [12] T. S. Bereza, Eduardo Marcelo; Maneira, Franklin; Piovesana, “Máquina de medição tridimensional didática - MMTD - tipo pórtico,” Centro Universitário Positivo, 2007.
- [13] F. Concas, “Design of Optimal Measurement Strategies for Geometric Tolerances on Coordinate Measuring Machines,” Università Degli Studi Di Cagliari, 2006.
- [14] S. H. R. Ali, “Probing System Characteristics in Coordinate Metrology,” *Meas. Sci. Rev.*, vol. 10, no. 4, pp. 120-129, 2010.

- [15] R. Branch, "What Your Shop Needs to Know About Portable CMMs."
- [16] T. W. Paper, "Technology White Paper 3D Measurement Arm Technology," pp. 3-4.
- [17] FARO, "Technology White Paper Coordinate measurement technology: An introduction to dealing with microns."
- [18] M. Pellitero, "Real-Time Contact Force Measurement System for Portable Coordinate Measuring Arms," vol. 23, no. 1, pp. 267-272, 2012.
- [19] T. Sladden, "Big Visions for Micro Parts," *Production Machining*, pp. 36-42, 2013.
- [20] J. Otepka, "Precision Target Mensuration in Vision Metrology," Technische Universität Wien, 2004.
- [21] M. Thomas, "The Versatility of Vision Metrology," *Quality Magazine*, vol. 55, no. September, pp. 28-31, 2016.
- [22] W. R. Gilman, "Video Metrology Explained," *Quality Digest*, 2006. [Online]. Available: <http://www.qualitydigest.com/inside/metrology-article/video-metrology-explained#>. [Accessed: 12-Dec-2016].
- [23] J. P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. De Chiffre, and A. Weckenmann, "Computed tomography for dimensional metrology," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 2, pp. 821-842, 2011.
- [24] S. Carmignato, "Computed tomography as a promising solution for industrial quality control and inspection of castings," *Metall. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 1, pp. 5-14, 2012.
- [25] L. De Chiffre, S. Carmignato, J. P. Kruth, R. Schmitt, and A. Weckenmann, "Industrial applications of computed tomography," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 63, no. 2, pp. 655-677, 2014.
- [26] DIM, "On an equal level : CT measurements reach the accuracy of conventional tactile metrology," 2015.
- [27] S. Kasperl, J. Hiller, and M. Krumm, "Computed tomography metrology in industrial research and development," *Mater. Test.*, vol. 51, no. 6, pp. 405-411, 2009.
- [28] M. Hoheisel, P. Bernhardt, R. Lawaczeck, H. Pietsch, S. Ag, and M. Solutions, "Comparison of Polychromatic and Monochromatic X-rays for Imaging," vol. 6142, pp. 1-8, 2006.
- [29] R. Cristoph and H. J. Neumann, *X-Ray Tomography in Industrial Metrology*, 2^a.

Munique: Verlag Moderne Industrie, 2012.

- [30] F. E. Boas and D. Fleischmann, "CT artifacts: causes and reduction techniques," *Imaging Med.*, vol. 4, no. 2, pp. 229-240, 2012.
- [31] "Structural Mechanics Simulation," 2016. [Online]. Available: <http://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio-max/structural-mechanics-simulation/>. [Accessed: 04-Jan-2017].
- [32] "Measuring Arm FARO ScanArm - Portable Measurement Solutions from FARO." [Online]. Available: <http://www.faro.com/products/metrology/faro-scanarm/overview>. [Accessed: 11-Dec-2016].
- [33] "SmartScope Flash 302." [Online]. Available: <https://www.ogpnet.com/north-america/systems/video-multisensor/smartscope-flash/smartscope-flash-302/index>. [Accessed: 12-Dec-2016].
- [34] "Vantage 300." [Online]. Available: <https://www.ogpnet.com/international/systems/video-multisensor-measurement/smartscope-vantage/vantage-300/index>. [Accessed: 26-Jan-2017].

ANEXOS

ANEXO 1 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE POROSIDADES



Figura 41 - Distribuição de volume dos defeitos identificados.

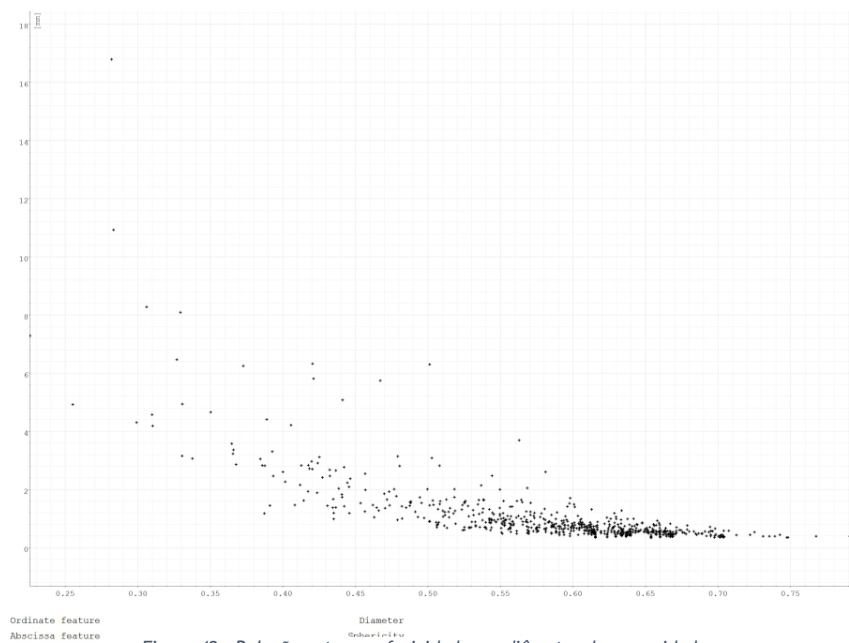


Figura 42 - Relação entre a esfericidade e o diâmetro das porosidades.

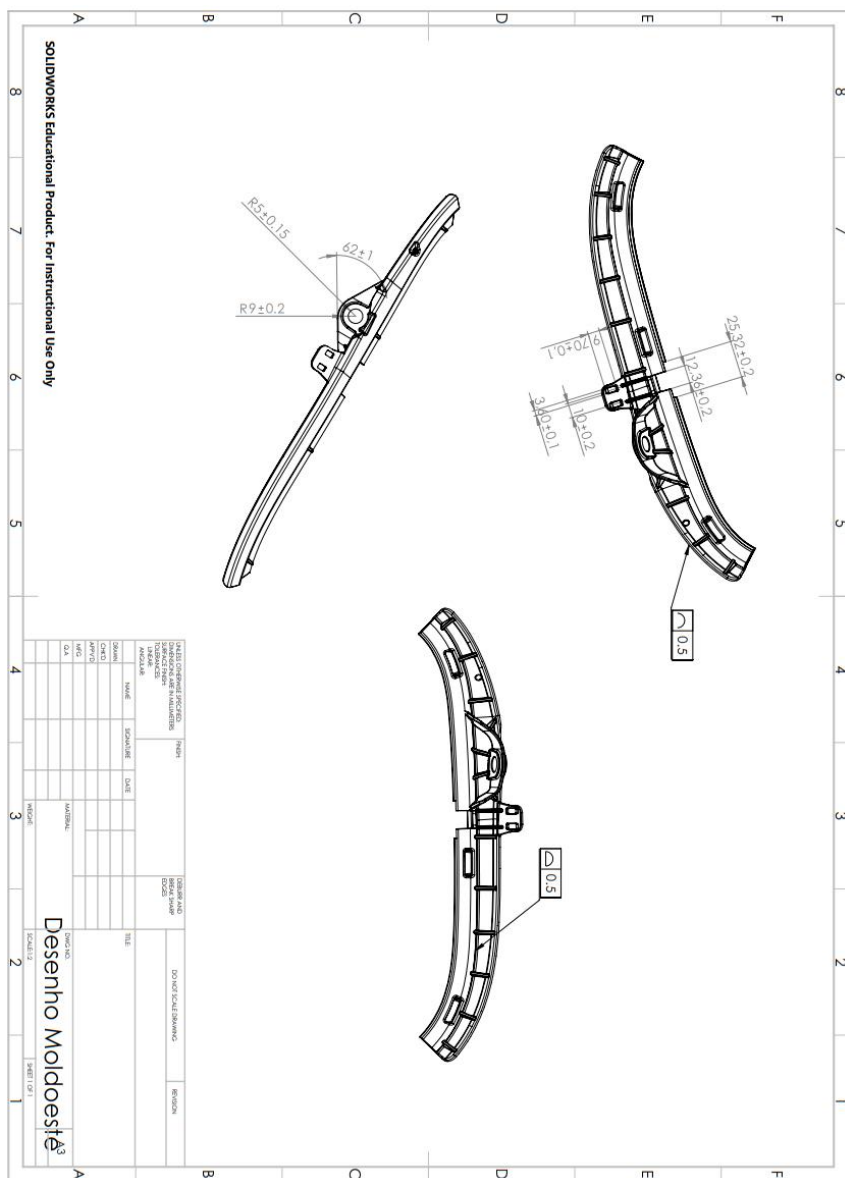
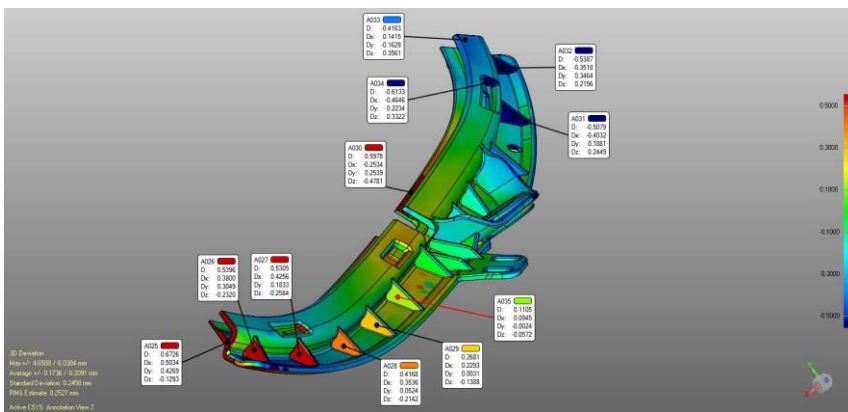
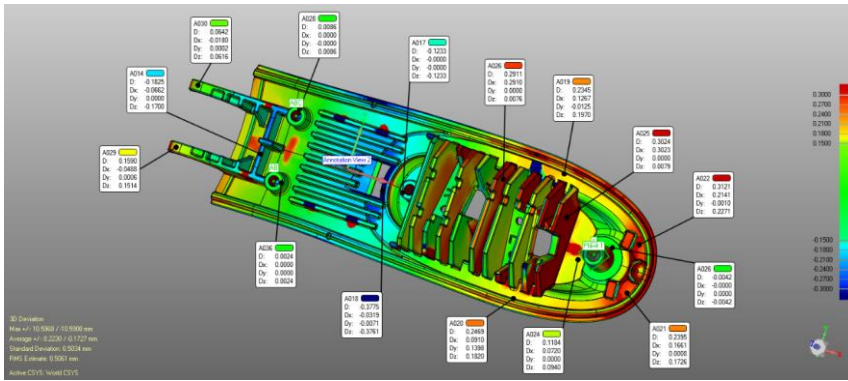


Figura 44 - Desenho técnico da peça de plástico.

ANEXO 3 - COMPARAÇÕES FEITAS NO GEOMAGIC



ANEXO 4 - ALINHAMENTO POR BEST-FIT NA CMM

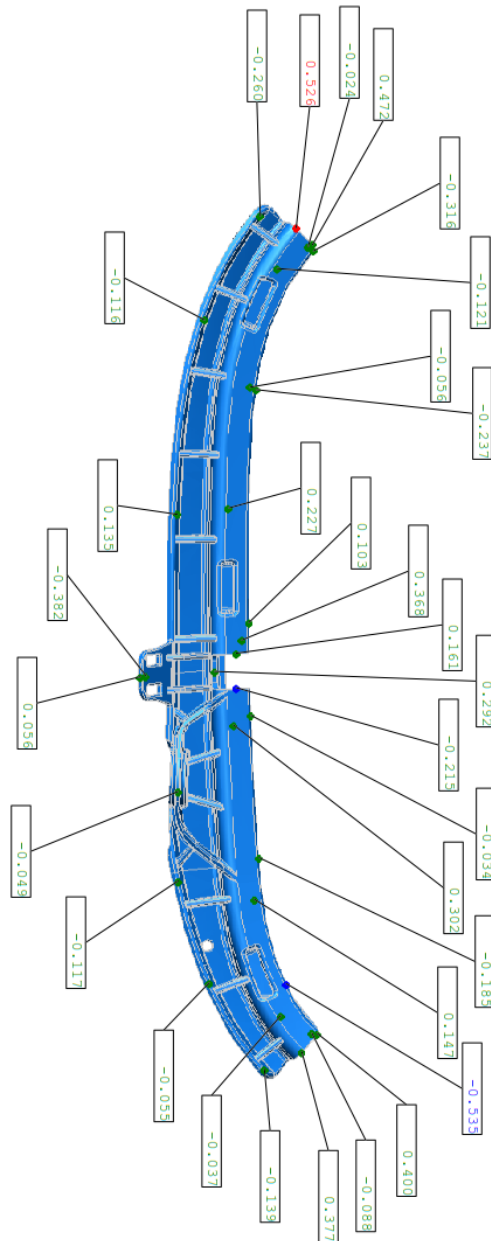


Figura 45 - Pontos considerados no alinhamento por best-fit realizada no Modus durante a medição da peça de plástico com a CMM.

