



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

A metrologia em diferentes equipamentos

Andreia Oliveira Gomes

Leiria, Setembro de 2017



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

A metrologia em diferentes equipamentos

Andreia Oliveira Gomes

Relatório de Projeto de Mestrado realizado sob a orientação do Doutor Mário Pereira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Joel Vasco, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Setembro de 2017

À minha família,

Que sempre me apoiou e motivou para a concretização dos meus sonhos e objetivos.

Aos amigos,

Que sempre estiveram e estarão presentes em todas as conquistas de uma vida.

Sem eles, nada disto seria possível.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

À ESTG por me ter possibilitado a elaboração deste trabalho.

Aos meus orientadores, Doutor Joel Vasco e Doutor Mário Pereira, que apesar das intempéries na minha vida, nunca desistiram de mim. Mostrando sempre disponibilidade e transmitindo-me os seus conhecimentos.

Ao Leandro Silva e Eng. Belarmino Canelas da Microplásticos, por me terem fornecido peças e desenhos que me permitiram tornar este trabalho mais fundamentado, com resultados de peças reais.

À Micronsense e aos meus ex-colegas e sempre amigos, Nuno Petronilho, Flávio Domingues, Pedro Aquino, Neli Vieira, Tânia Marques, Márcia Saraiva, Sónia Pedrosa, Ivo Tavares, João Duarte, João Fonseca e Roberto Ferreira, da Micronsense, que me apoiaram desde o início e me ajudaram com as pesquisas e informações necessárias à concretização deste trabalho.

Aos meus pais, João e Teresa Gomes, por me terem feito chegar até aqui, valorizando cada etapa e estando sempre presentes. Foram incansáveis.

Aos meus amigos, que formaram uma claque de apoio à realização deste projeto e sobretudo, constroem diariamente um caminho comigo.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

A seleção de um equipamento metrológico pode tornar-se uma difícil tarefa, dado que hoje em dia existe uma grande variedade.

Quando se pretende adquirir ou até mesmo apenas saber qual o melhor equipamento para o controlo dimensional de um ou mais objetos, a opção pode não ser clara devido às inúmeras características associadas.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia que permita a qualquer pessoa com conhecimentos mínimos, saber o que há-de escolher, com base nas características das suas peças, desde máquinas de medição por coordenadas, videometria, braços de medição e/ou digitalização, máquinas de tomografia e lasers tracker.

Foi utilizada a técnica *Quality Function Deployment* para elaboração das tabelas de comparação de especificações de equipamentos que posteriormente servirão para conjugar as suas aptidões com as características das peças.

A fim de tornar este programa fidedigno, foram estudados os equipamentos mais relevantes e implementado o método Processo Hierárquico Analítico. Com este método é possível classificar a importância de uma característica face a outra e assim obter uma hierarquia. Esta irá por sua vez relacionar-se com as aptidões de cada equipamento e assim revelar por ordem o mais indicado para o objeto em estudo.

Esta metodologia foi implementada num programa criado com o intuito de atender às necessidades geradas sobretudo na indústria. A prioridade é, neste caso, responder à questão sobre qual equipamento selecionar face às características das peças e às circunstâncias em que estas vão ser controladas.

No final, foram estudados dois casos de estudo de naturezas diferentes que permitiram validar a adequabilidade do programa face à questão imposta.

Palavras-chave: Equipamento, AHP, objeto, programa, importância, metrologia.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

The selection of metrological equipment can be a difficult task, since there is a wide variety today.

When it is desired to acquire or even just know the best equipment for dimensional control of one or more objects, the option may not be clear due to the innumerable associated features.

This work aims to develop a methodology that enables anyone with a minimum knowledge to know what to choose, based on the characteristics of the parts, from coordinate measuring machines, videometrics, measuring arms and / or scanning, tomography machines and laser tracker.

The Quality Function Deployment technique was used to elaborate the tables of comparison of specifications of equipments that serve to conjugate their aptitudes and characteristics of the parts.

In order to make this program dependable, the more relevant equipment has been studied, and the Analytic Hierarchy Process method has been implemented. With this method it is possible to classify the importance of one characteristic over another and to establish a hierarchy. Furthermore, this result will relate to equipment specifications and it will provide the best scored equipment for the studied products.

This methodology was implemented in a program created to meet the needs generated mainly in the industry. The main issue is, in this case, to provide an answer to the question about the equipment selection concerning the characteristics of the parts and the circumstances in which they will be controlled.

At the end, two case-studies of different nature were studied that allowed to validate the feasibility of the program in relation to the imposed question.

Keywords: Equipment, AHP, object, program, importance, metrology.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 - Interior de máquina de tomografia (Fleißner, Helmecke, & Hausotte, 2014)	4
Figura 2 - Laser Tracker (BRIDGES, 2017)	6
Figura 3 - Multisensor (Scanning interferometry Advances measurement, 2010).....	8
Figura 4 - Máquina de medição por coordenadas (Xtreme Bridge CMMs, 2017)	9
Figura 5 - Braço medição com ponteira	11
Figura 6 - Braço de medição com sonda.....	12
Figura 7 - Hierarquia de critérios.....	15
Figura 8 - Matriz de comparação (Granemann & Gartner, 1996)	17
Figura 9 - Fluxograma da metodologia a implementar	20
Figura 10 - Kit de fixação (Renishaw, 2017)	22
Figura 11 - Gabarito (Alibaba, 2017).....	22
Figura 12 - Porosidades e interior de um objeto obtidas por tomografia (imagens cedidas pela Micronsense, Lda.).....	23
Figura 13 - Características dos equipamentos	24
Figura 14 - Matriz AHP	30
Figura 15 - Explicação da macro da maleabilidade	32
Figura 16 - Interface da abertura do programa.....	33
Figura 17 - Parâmetros base (interface programa)	34
Figura 18 - Parâmetros secundários (interface programa)	35
Figura 19 - Fluxograma da metodologia a implementar com condicionantes	36
Figura 20 - Base de programação.....	37
Figura 21 - Peça caso 1 - vista frontal.....	39
Figura 22 - Peça caso 1 - vista lateral.....	39
Figura 23 - Desenho do caso 1	40
Figura 24 - Parâmetros base caso 1	41
Figura 25 - Parâmetros secundários caso 1	42
Figura 26 - Resultados do caso 1	42
Figura 27 - Peça caso 2 frontal	43
Figura 28 -Peça caso 2 lateral	43
Figura 29 – Desenho do caso 2	43
Figura 30 - Parâmetros base da análise 1 - caso 2.....	44
Figura 31 - Parâmetros secundários da análise 1 - caso 2	45
Figura 32 - Resultados da análise 1 - caso 2	45
Figura 33 - Resultados da análise 2 - caso 2	46

Figura 34 - Matriz AHP do caso I.....	47
Figura 35 - Matriz AHP da análise 1 - caso 2	50
Figura 36- Matriz AHP da análise 2 - caso 2	51

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação máquina GE e Zeiss (Company, 2016) (Zeiss, 2017).....	5
Tabela 2 - Comparação Tracker da Faro e API (Faro, Faro Laser Tracker Vantage, 2013) (Hopkins, 2012)	7
Tabela 3 - Comparação de equipamentos de videometria da OGP e Nikon (Quality Vision International, 2017) (NV, 2017).....	8
Tabela 4 - Comparação de CMMs da Hexagon e Aberlink (subsidiaries, 2017) (Ltd., 2017)	10
Tabela 5 - Comparação de braços da Faro e Kreon (Faro, Faro Edge Scan Arm, 2013) (Technologies, 2017)	12
Tabela 6 - Escala fundamental de Saaty.....	17
Tabela 7 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme maleabilidade.....	24
Tabela 8 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme dimensões (equipamentos sem contato).....	25
Tabela 9 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme dimensões (equipamentos com contato).....	25
Tabela 10 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme corte para análise de geometria interna.....	26
Tabela 11 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme repetibilidade.....	26
Tabela 12 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme cor do objeto	26
Tabela 13 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme transparência do objeto	27
Tabela 14 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme brilho do objeto	27
Tabela 15 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme precisão para cotas das dimensões indicadas	28
Tabela 16 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme montagem de peças...28	
Tabela 17 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme materiais constituintes do objeto.....	29
Tabela 18 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme fixação requerida para o objeto.....	29
Tabela 19 - Legenda dos valores de desempenho	37
Tabela 20 - Desempenho de cada característica face a cada equipamento	38
Tabela 21- Contagem e ponderação resultantes da matriz do caso 1.....	48
Tabela 22 - Valores resultantes da multiplicação das ponderações com o desempenho do equipamento para a característica caso 1.....	49

Tabela 23 - Condicionantes dos resultados caso 1	49
Tabela 24 - Contagens e ponderações da matriz AHP análise 1 caso 2	50
Tabela 25- Contagem e ponderação da matriz AHP da análise 2 do caso 2	51

Lista de siglas

AHP - *Analytic Hierarchy Process*

API - *Automated Precision Inc*

CAD – *Computer Aided Design*

CMM – *Coordinate Measuring Machine*

CNC - *Computer Numeric Control*

CT - *Computed Tomography*

DEA - *Data Envelopment Analysis*

KDB - *Knowledge Database*

QFD - *Quality Function Deployment*

SMR - *Spherically Mounted Retro-reflector*

TOPSIS - *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*

VBA - *Visual Basic for Applications*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS	XIII
ÍNDICE	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Estrutura do projeto	2
2. ESTADO DA TÉCNICA	3
2.1. Tomografia computadorizada	4
2.2. <i>Laser Tracker</i>	5
2.3. Videometria	7
2.4. Máquina de medição por coordenadas	8
2.5. Braço de medição	10
2.5.1. Braço articulado	10
2.5.2. Braço articulado com <i>laser scanning</i>	11

2.6.	Seleção de processo	13
2.6.1.	Comparativo de metodologias	13
2.6.2.	Aplicações	13
2.6.3.	Etapas do processo AHP	14
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	19
3.1	Comparação entre equipamentos	19
3.2	Critérios de seleção do equipamento	21
3.3	Programa de seleção de características	30
4	TESTES EXPERIMENTAIS	39
4.1	Caso I – Peça de média dimensão	39
4.2	Caso II – Peça de pequena dimensão	43
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	47
5.1	Análise de resultados - Caso I	47
5.2	Análise de resultados – Caso II	50
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	53
	BIBLIOGRAFIA	57
	ANEXOS	61

1. Introdução

O controlo da qualidade é um vínculo entre as peças e as empresas, que se tem tornado cada vez mais forte. Ao longo dos anos o conceito de qualidade tem vindo a ser mais rigoroso, exigindo assim equipamentos qualificados para uma correta análise (Sousa, 2008).

Os equipamentos utilizados para o controlo dimensional podem ser diversos, tais como equipamentos manuais, máquinas de medição por coordenadas, vídeo, tomografia, digitalização e braços articulados. Estes possuem distintas características, tornando difícil a escolha do melhor para a realização da análise pretendida. (Neto, 2013).

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste projeto consiste no desenvolvimento de uma metodologia de apoio à decisão sobre que equipamento de controlo se deve utilizar, mediante características seleccionáveis da peça. Esta metodologia permitirá determinar o equipamento mais adequado ao controlo dimensional e/ou engenharia inversa de um determinado objeto, cujas necessidades de controlo foram previamente definidas.

Esta necessidade surge do eventual desfasamento entre o conhecimento pleno das necessidades de controlo dos objetos e a panóplia de equipamentos de controlo geométrico e dimensional/ engenharia inversa disponíveis atualmente no mercado. Em termos tecnológicos, a evolução é rápida e requer uma atualização constante.

Para atingir este objetivo serão realizadas as seguintes tarefas:

- Realizar o levantamento do estado da arte dos equipamentos de controlo geométrico/dimensional e engenharia inversa;
- Analisar as metodologias de apoio à decisão aplicáveis e realizado o estudo sobre aquela que apresenta um maior potencial para implementação;
- Definir o algoritmo para a realização de uma ferramenta informática de apoio à decisão;
- Implementação da ferramenta informática de apoio à decisão;
- Realização de testes de validação e implementação de melhorias.

1.2. Estrutura do projeto

No capítulo 1 é feita a introdução ao trabalho desenvolvido, define-se o objetivo e é também realizada a estruturação do projeto.

Para a seleção dos equipamentos a utilizar para analisar uma determinada peça, é necessário ter em conta diversos parâmetros. Desta forma, na revisão bibliográfica do capítulo 2 são descritos os mais influentes e que podem ser examinados por qualquer operador, bem como as características dos equipamentos.

Neste projeto são abordados os equipamentos acima referidos em conjunto com uma forma de seleção do equipamento mais adequado ao controlo de uma determinada peça. A forma de seleção terá em conta as opções identificadas segundo os parâmetros selecionados. A definição das aptidões dos equipamentos para cada critério será realizado com a técnica *Quality Function Deployment*.

Para a seleção dos parâmetros será utilizado o processo hierárquico analítico (AHP), tendo em vista a melhor forma de identificar os critérios essenciais à escolha do equipamento mais adequado para realizar o controlo dimensional de uma determinada peça (Saaty, 1994).

No capítulo 3, onde é descrito todo o procedimento experimental desenvolvido, serão apresentadas quer a aplicação do método AHP, quer a modelação do programa em *Visual Basic for Applications* (VBA), que permitirá a obtenção do resultado pretendido. Os resultados obtidos serão apresentados no capítulo 4. Aqui serão testados alguns exemplos de peças e a aplicação do programa por forma a selecionar o equipamento idealmente a ser utilizado no controlo dimensional da mesma.

Por forma a avaliar os resultados obtidos, é efetuada no capítulo 5 uma análise aos mesmos, evidenciando a forma como a metodologia AHP interveio no processo de seleção.

No capítulo 6 serão apresentadas as conclusões deste trabalho, evidenciando as mais-valias da aplicação desenvolvida e a sua flexibilidade na resposta às diversas circunstâncias de medição. Serão igualmente elencados os trabalhos futuros que podem constituir um prosseguimento deste trabalho.

2. Estado da técnica

No desenvolvimento de um trabalho relacionado com o controlo dimensional, é fundamental ter em conta alguns conceitos, de modo a integrar neste tema de forma mais sábia.

Os conceitos seguidamente apresentados prendem-se ao modo de funcionamento e análise dos equipamentos que permitem o controlo dimensional, bem como de metodologias aplicadas para realizar uma seleção adequada.

O controlo dimensional consiste na verificação, validação, calibração e aprovação de determinadas entidades geométricas constituintes do(s) objeto(s). Este pode ser, ou não, realizado através de contacto físico, dependendo do rigor pretendido assim como da volumetria do(s) objeto(s) a controlar.

O controlo visa a inspeção ao longo de todo o processo construtivo, com vista a garantir a correta aplicação, funcionamento, substituição de componentes, identificação de defeitos geométricos e análise de superfícies.

Para uma análise correta, devem ser tidos em conta diversos parâmetros constituintes do objeto que vai ser disposto ao controlo dimensional, bem como do equipamento mais adequado.

Aquando deste tipo de análise há que ter em conta a elevada importância que todo o processo acarreta. Só assim é possível verificar todas as funcionalidades e retificar, caso seja necessário, o elemento em questão.

Neste capítulo serão abordados diversos equipamentos. Hoje em dia sabemos que a panóplia de equipamentos que permitem realizar o controlo dimensional é vasta, podendo destacar-se equipamentos com capacidades muito diversas, restringindo-se apenas às máquinas de medição por coordenadas, videometria, *laser tracker*, tomografia e braço de medição, uma vez que são os equipamentos mais utilizados e mais atuais (Neto, 2013).

2.1. Tomografia computadorizada

A tomografia computadorizada, ou mais conhecida por *Computed Tomography* (CT) consiste na emissão de raios X que atravessam o objeto cuja geometria se pretende adquirir (figura 1). Após a penetração dos raios no objeto, vai ser gerada uma imagem. A imagem é projetada na zona oposta à da emissão do feixe de luz e posteriormente captada pelo computador.

Tanto o emissor dos raios X como a zona onde a imagem é projetada, são fixas, rodando apenas o objeto que é pretendido para análise. Desta forma, são geradas inúmeras imagens, que, quando sobrepostas e segundo a intensidade da radiação das mesmas, permitem a geração de um objeto a 3 dimensões virtual.

A intensidade vai depender da distância a que estão os relevos da geometria, bem como da densidade do próprio material constituinte (Marques, 2009).

O volume de trabalho é bastante reduzido e variável, dependendo do equipamento, contudo as máquinas mais usuais permitem objetos que vão até aos 300mm de comprimento.

A incerteza associada a este tipo de equipamento é inferior a 1 μm , pelo que se torna um dos equipamentos mais precisos (Hiller, Genta, Barbato, Chiffre, & Levi, 2014).

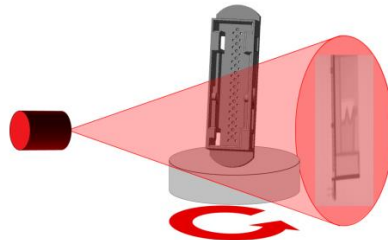


Figura 1 - Interior de máquina de tomografia (Fleßner, Helmecke, & Hausotte, 2014)

No controlo dimensional, a tomografia destaca-se sobretudo por ser o único meio onde é possível, sem deformação do objeto, a análise interna da peça, quer a nível dimensional, quer a nível de porosidades e distribuição de fibras.

Este tipo de equipamento tem ainda como vantagens:

- Distinguir os diversos materiais por base nas densidades;
- Não necessita de fixação, a medição é realizada sem contacto;
- É possível fazer o controlo de peças montadas;
- Permite o fornecimento de modelos para gerar contra empenos;
- Não tem influência de brilhos/flexões de material;
- Equipamento automatizado, permitindo o controlo de séries de peças.

Porém, como em todos os equipamentos, existem também algumas desvantagens, tais como dificuldade em adquirir a geometria de peças multimaterial com densidades muito diferentes, devido às zonas de indefinição no contato entre materiais diferentes, o volume de trabalho é limitado, os custos de aquisição e operação são elevados (os mais elevados ao nível de controlo dimensional), o processamento dos dados pela máquina é demorado, bem como o próprio controlo dimensional, uma vez que este requer uma análise detalhada das entidades na geometria obtida.

Na tabela 1, seguidamente apresentada, encontram-se dois exemplos de máquinas de tomografia da GE e Zeiss onde são relacionadas dimensões e precisão, encontrando-se no anexo I a restante informação relativa às mesmas.

Tabela 1 - Comparação máquina GE e Zeiss (Company, 2016) (Zeiss, 2017)

	GE (phoenix v tome x m)	Zeiss (Metrotom)
Volume de trabalho	Ø290mm x 400mm	300 x 300 x 300 mm
Precisão	4+L/100µm	2.9 + L/100 µm

2.2. Laser Tracker

O *laser tracker* é um equipamento de medição composto por duas partes. Sendo uma delas o *tracker* e a outra um alvo retro reflexivo, geralmente denominado por *Spherically Mounted Retro-reflector* (SMR).

O *tracker*, para realizar o controlo dimensional, emite um raio laser para o alvo (figura 2). Por sua vez, este deve ser mantido contra o objeto a ser medido. O feixe laser chega assim ao alvo e de seguida é refletido para o *tracker*, sendo obtida a distância entre os dois elementos do equipamento.

O operador é quem controla o SMR, sendo que após retirar o alvo do *tracker*, este segue-o através do raio laser. O feixe de luz emitido não pode ser obstruído por qualquer obstáculo, uma vez que a distância não será reconhecida.

Os *trackers* fazem o controlo não só de distâncias, como também de entidades geométricas, tais como pontos, planos, esferas ou cilindros. Este tipo de entidades é definida com o auxílio de um *software* acoplado ao equipamento.

A precisão de *laser trackers* é cerca de $30\mu\text{m}$ e o alcance pode ir até 80000mm , sendo este tipo de equipamento ideal para o uso de médio e longo alcance (BRIDGES, 2017) (Faro, Faro Laser Tracker, 2017).

Tal como os outros equipamentos, também os *laser trackers* têm algumas vantagens, sendo elas a possibilidade de medição de peças de grandes dimensões, análise de empenos, elevada versatilidade, possibilidade de controlo na própria CNC, medição em ambiente fabril e área de trabalho ilimitada. Por outro lado, existem algumas limitações como maior exposição a condições ambientais, baixa capacidade de controlo de detalhes muito pequenos, serem detentores da maior incerteza de entre os equipamentos abordados, sendo esta determinada através

dos erros aleatórios e sistemáticos, onde os erros aleatórios consistem numa variação das medições sem seguirem uma tendência fixa e os erros sistemáticos consistem na tendência para o equipamento registar os resultados sistematicamente acima ou abaixo do valor nominal.

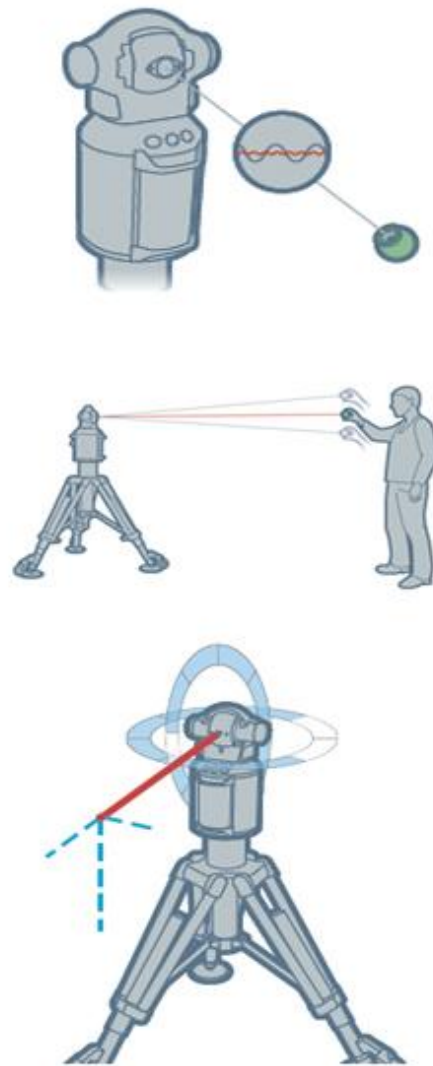


Figura 2 - Laser Tracker (BRIDGES, 2017)

Na tabela 2 estão dois exemplos de *trackers* da Faro e da API comparados relativamente ao alcance e precisão, encontrando-se no anexo I a restante informação relativo a estes.

Tabela 2 - Comparação Tracker da Faro e API (Faro, Faro Laser Tracker Vantage, 2013) (Hopkins, 2012)

	Faro (Vantage^S)	API (Radian)
Alcance	80m	100m
Precisão	20 μ m+5 μ m/m	10 μ m + 3,5 μ m/m

2.3. Videometria

Os equipamentos de videometria permitem a realização do controlo dimensional sem contacto. Assim, por meio de uma imagem focada, tal como num microscópio, é permitida a aquisição da geometria e respetivas dimensões de um determinado objeto. Há ainda quem denomine os equipamentos de videometria como microscópios óticos de grandes dimensões.

O modo de funcionamento é simples, os sistemas de videometria recolhem diversos pontos dentro de uma determinada área, denominada por campo de visão ótica, sendo posteriormente utilizados para gerar um mapa de controlo tridimensional de uma determinada entidade geométrica (figura 3).

Um sistema ótico é ideal para quem procura um equipamento de elevada precisão (cerca de 1 μ m) e necessita de inspecionar zonas que nem sempre se encontram visíveis a olho nu.

Também com a videometria é possível inspecionar determinadas características, sem que os elementos em questão sofram deformação. Acresce ainda mais a importância da utilização destes equipamentos no caso de peças complexas, com pouco contraste, com limites indefinidos e com cores relevantes.

Os equipamentos de videometria, têm assim como principais vantagens a baixa incerteza, elevada capacidade de medição de pequenos detalhes, permite a medição de séries de peças e o controlo dimensional é não invasivo.

Contudo, tal como em todos os equipamentos anteriormente abordados, este também é detentor de algumas limitações, tais como a área de trabalho reduzida, podendo fazer o controlo dimensional de objetos (em termos gerais) até cerca de 300mm de

comprimento, contudo, existem máquinas que podem ir até 800mm (não sendo estas tão usuais) e é necessário cuidado com erros de projeção (Bloch, 2011) (OGP, 2017).

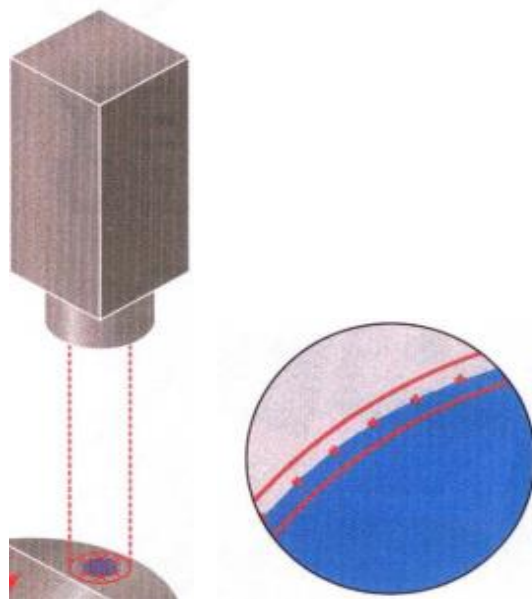


Figura 3 - Multisensor (Scanning interferometry Advances measurement, 2010)

Na tabela 3 apresentam-se dois exemplos de características de equipamentos de videometria onde são comparados o volume e precisão. No anexo I encontra-se mais alguma informação relativa a estes equipamentos.

Tabela 3 - Comparação de equipamentos de videometria da OGP e Nikon (Quality Vision International, 2017) (NV, 2017)

	OGP (SmartScope Quest 250)	Nikon (iNEXIV VMA-2520)
Dimensões	300 x 150 x 200 mm	250 x 200 x 200 mm
Precisão em XY	1.8 + 6L/1000 μ m	2+8L/1000 μ m
Precisão em Z	1.4 + 5L/1000 μ m	3+L/50 μ m

2.4. Máquina de medição por coordenadas

A máquina de medição por coordenadas, mais conhecida por CMM (*Coordinate Measuring Machine*) visa a medição de características físicas geométricas de um determinado objeto.

O operador analisa o objeto, os controlos dimensionais a serem realizados, a melhor posição, fixação e forma de medição a efetuar.

A medição é executada por uma ponteira, sendo esta um sensor mecânico que permite a deteção, após o toque, do material.

Uma máquina destas é constituída por 3 eixos de medição que são definidos no pórstico e ortogonais entre si. Cada eixo é composto por uma régua que permite a localização exata do eixo em questão. Com alguns cálculos efetuados no *software*, é assim possível determinar a posição e dimensão. Este equipamento está dotado de precisões elevadas, rondando os 3 micrómetros.

A versatilidade deste tipo de equipamento, no que toca ao controlo de objetos de diversas dimensões, é bastante vasta, dependendo apenas das dimensões da máquina. As mais usuais vão até dimensões que permitem o controlo até 1000mm de comprimento, contudo podem ultrapassar essas dimensões, sendo estas mais usuais em empresas com uma produção essencial de objetos de maiores dimensões (ex.: para-choques).

As CMM (figura 4) são máquinas muito utilizadas nas indústrias, mais propriamente em processos de fabrico ou até linhas de montagem. Apesar dos tempos elevados a elaborar os programas, tornam-se bastante rápidas ao nível de repetibilidade.



Figura 4 - Máquina de medição por coordenadas (Xtreme Bridge CMMs, 2017)

As vantagens não se prendem apenas à repetibilidade, sendo considerável que a cor, brilho e densidade dos objetos, não influenciam o controlo dimensional.

Uma máquina de medição por coordenadas é também detentora de algumas desvantagens, tais como:

- a medição por contacto poder causar a flexão do objeto a ser controlado, podendo dar origem a medições irreais;
- a portabilidade de uma CMM é nula, devido à sua estrutura, sendo por isso necessário deslocar o objeto a ser controlado até a uma destas máquinas (Kupiec, 2012).

A tabela 4 tem dois exemplos de CMMs onde são comparados o volume e precisão, encontrando-se no anexo I mais informações sobre as mesmas.

Tabela 4 - Comparação de CMMs da Hexagon e Aberlink (subsidiaries, 2017) (Ltd., 2017)

	Hexagon (GLOBAL Classic)	Aberlink (Axiom too HS)
Dimensões	700x700x500mm	640x700x500mm
Precisão	1.5 + L/333 μ m	2.4 + L/250 μ m

2.5. Braço de medição

O controlo dimensional realizado por um braço de medição é realizado mediante a tecnologia da CMM, ou seja, através de coordenadas.

Os braços podem ser utilizados em qualquer tipo de empresa, bem como em laboratórios, podendo realizar medições dentro ou no exterior (ar livre) dos edifícios.

A constituição é geralmente feita por três tubos de carbono ligados por seis articulações, por sua vez articuladas com codificadores angulares.

O volume de trabalho esférico está entre 1800mm a 3700mm, sendo por isso bastante versáteis quanto ao controlo de objetos de diversas dimensões (Faro, Faro Arm, 2017).

2.5.1. Braço articulado

O braço articulado permite que a medição seja realizada mediante o toque com a sonda no objeto. Através do sistema, as coordenadas angulares são lidas e assim adquiridas.

Estas dimensões vêm segundo um sistema de coordenadas cartesiano (x, y, z).

Os braços de medição convencionalmente fazem uso de uma ponteira rígida (figura 5), assim como a da CMM. Relativamente à precisão, este equipamento é um dos menos precisos, rondando os 30µm (Faro, Faro Arm, 2017).

Assim, os braços têm como principais vantagens a medição de peças de grandes dimensões, análise de empenos, elevada versatilidade, sendo que se podem colocar em qualquer lado e em qualquer ambiente, permitem o controlo dimensional na própria CNC, são equipamentos ilimitados no que toca à área de trabalho, dada a sua mobilidade. Contudo, existem algumas limitações, tais como uma maior incerteza, maior exposição a condições ambientais, não permitem automação e baixa capacidade de medir detalhes muito pequenos.



Figura 5 - Braço medição com ponteira (Faro, Faro Arm, 2017)

2.5.2. Braço articulado com *laser scanning*

Os braços articulados podem no entanto também utilizar a opção de *laser scanning* (figura 6). Por sua vez, o *laser scanning* não é tão preciso como o controlo por contato, rondando os 40µm (Faro, Faro Scan Arm, 2017).



Figura 6 - Braço de medição com sonda (Faro, Faro Edge Scan Arm, 2013)

As vantagens e limitações são comuns ao braço articulado com e sem módulo de digitalização. No entanto, os braços articulados com *laser scanning* possuem uma vantagem relativamente aos braços de controlo por contacto sendo esta a possibilidade de recolha de dados para a realização de engenharia inversa.

A tabela 5 apresenta dois exemplos de braços de medição com *laser scanning*, sendo comparados o volume e precisão dos mesmos. No anexo I estão ainda outras informações relativas a estes.

Tabela 5 - Comparação de braços da Faro e Kreon (Faro, Faro Edge Scan Arm, 2013) (Technologies, 2017)

	Faro Edge	Kreon 7-20
Dimensões	1800mm	2000mm
Precisão ponteira	0,034mm	0,032mm
Precisão <i>laser scanning</i>	0,035mm	0,039mm

2.6. Seleção de processo

Para a realização deste projeto há que ter em conta a necessidade de utilizar um processo que permita a escolha ponderada de um equipamento.

2.6.1. Comparativo de metodologias

Segundo Mendes (2013) e (Junior, Osiro, & Carpinetti, 2014) os métodos de seleção mais utilizados são o DEA (*Data Envelopment Analysis*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), contudo, foi necessário escolher apenas um para aplicar.

A metodologia DEA recai sobre a eficiência das entidades, tendo como variáveis diversos *inputs* que originam vários *outputs*. Esta metodologia não se torna viável visto o objetivo passar por escolher um equipamento ideal e não vários (que advêm dos vários *outputs*).

O método TOPSIS requer uma vasta panóplia de critérios e é complexo ao nível das iterações necessárias para obter resultados, não sendo desta forma adequado, uma vez que é pretendida a utilização de um método simples, rápido e que não esteja dependente de todos os critérios a serem utilizados para a seleção.

Por último resta a metodologia AHP, sendo esta simples de aplicar, viável na estruturação com o programa e cujo objetivo principal é obter um resultado final (equipamento mais adequado) (Mendes, 2013) (Junior, Osiro, & Carpinetti, 2014).

Dados os critérios, será a metodologia AHP a escolhida para ser aprofundada e aplicada, por revelar uma melhor adaptabilidade para ser implementada em programa.

Para uma correta seleção do equipamento de controlo a utilizar é fundamental ter em conta um método que permita a realização de tal. Para isso o processo hierárquico analítico será sucintamente descrito, com vista a ser posteriormente utilizado no desenvolvimento do projeto.

2.6.2. Aplicações

O método *Analytic Hierarchy Process* surgiu em 1970, criado por Thomas L. Saaty. Este método tem por base a atribuição de valores a ideias consoante o grau de importância entre elas. Assim, aquando de um determinado problema, é possível

primordialmente subdividi-lo em hierarquias e de seguida identificar o valor correlacional entre elas.

A hierarquia permite desta forma determinar o grau de importância funcional de uma ideia em relação à outra, bem como dos impactos no sistema. (Saaty, *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process*, 1994)

Saaty (2008) escreveu "*Decision making, for which we gather most of our information, has become a mathematical science today (Figuera et al., 2005). It formalises the thinking we use so that, what we have to do to make better decisions is transparent in all its aspects.*" Desta forma, Saaty oficializou o método AHP, sendo que para relacionar aspetos, é necessário ter conhecimento sobre a causa e assim matematicamente obter as decisões a tomar no final da análise.

O método AHP surgiu, segundo Schmidt (1995), com base na forma como o ser humano reflete sobre um determinado problema. Inicialmente, as variantes do problema são separadas em grupos. Estes, por sua vez, são criados com base em critérios comuns. Posteriormente, são hierarquizados de modo a definir o nível relacional.

O processo analítico hierárquico visa o conhecimento das pessoas, valorizando este tanto quanto os dados numéricos.

Como já foi dito anteriormente, o problema é decomposto em vários critérios e estes por sua vez são hierarquizados. De seguida os critérios são novamente decompostos e hierarquizados, realizando-se este processo até se obterem critérios simples e comparáveis, partindo do geral para o particular (Schmidt, 1995). A hierarquia é realizada de forma descendente, ficando no topo da mesma os objetivos finais e na base os resultados possíveis.

2.6.3. Etapas do processo AHP

O método AHP pode ser resumido em três etapas, sendo elas:

- 1º - Construção da hierarquia;
- 2º - Atribuição de prioridades;
- 3º - Razão lógica das prioridades.

Na primeira etapa é possível obter um diagrama (figura 7) do seguinte género:

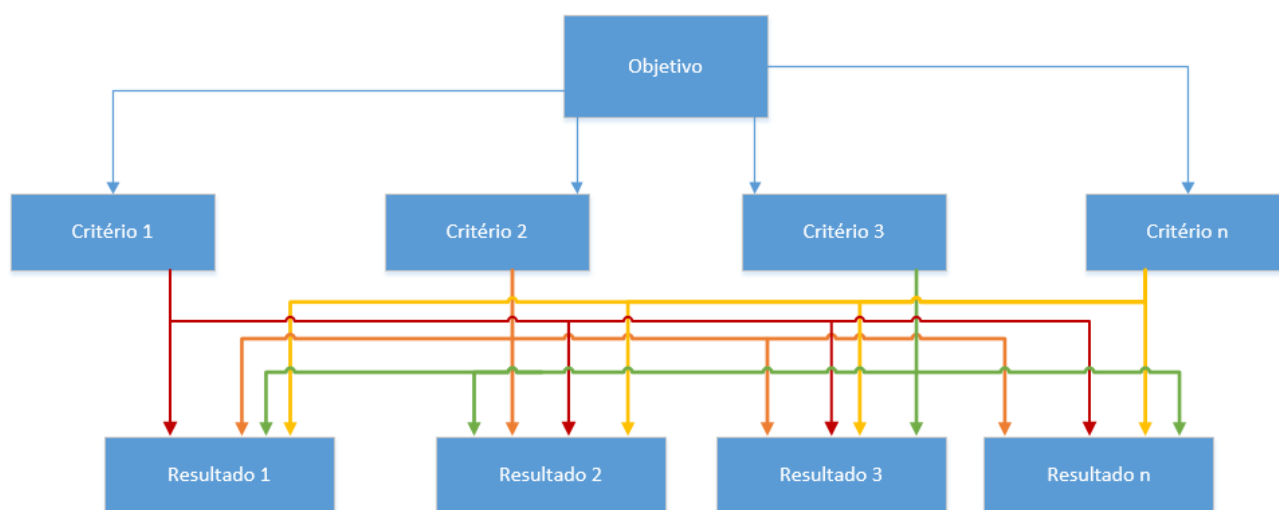


Figura 7 - Hierarquia de critérios

Onde é possível verificar a existência de 3 ou 4 níveis, sendo eles:

- 1º - Objetivo – Onde é obtido o termo da decisão;
- 2º - Critérios – Onde são distribuídos os critérios que advêm do problema em causa;
- 3º - Subcritérios (podem ou não existir) – Critérios que surgem dos critérios iniciais (2º nível);
- 4º - Resultados – Após os cálculos, são obtidos os resultados que permitem definir a decisão final.

Na realidade, não é possível seguir procedimentos para criar os níveis representados na figura 7. Aquando da existência de um problema complexo, devem-se escolher objetivos que o decomponham. Para esse efeito é então necessário ter conhecimento de causa sobre o tema (problema), sendo que por vezes é necessário recorrer a meios de enriquecimento do conhecimento para se conseguir decompor o problema sem qualquer relação de ordem.

Segundo Saaty (1994), a dificuldade não está em hierarquizar o problema, uma vez que a forma de o fazer pode ser semelhante para diversos problemas. Assim, a complexidade encontra-se sobretudo na familiarização do conhecimento já existente por parte das pessoas afetas ao sistema.

Hierarquizar o problema traz diversas vantagens, sendo elas as seguintes:

- É mais fácil de verificar como alterações nos níveis mais altos têm influência direta nos níveis mais baixos;
- É possível ver detalhadamente as informações sobre a estrutura e funções do sistema;
- Torna-se mais fácil o desenvolvimento eficiente dos sistemas;
- As hierarquias são um sistema estável e ao mesmo tempo flexível, na medida em que pequenas alterações não vão influenciar significativamente a hierarquia e, no caso de serem adicionados critérios, o desempenho da mesma não fica comprometido. (Saaty, 1994).

Segundo Schmidt (1995), também as hierarquias podem trazer algumas limitações, tais como:

- É essencial realizar uma análise prudente, a fim de caracterizar de forma eficiente as prioridades dos níveis de hierarquia que afetam o objetivo;
- O indivíduo que elabora a hierarquia tem influência na sua realização;
- É essencial dar prioridade aos níveis mais elevados, contudo esta tarefa deve ser realizada com cuidado, tendo em conta que o consenso entre os níveis é um ponto fulcral.
- Os critérios devem ser independentes.

Seguem-se os julgamentos entre os critérios que se podem reger segundo 4 axiomas. O primeiro axioma consiste em comparações recíprocas. Assim, o decisor que está a fazer os julgamentos deve satisfazer a condição de reciprocidade, ou seja, os elementos são comparados dois a dois, sendo que se A é n vezes mais preferido do que B, então B será $1/n$ vezes mais preferido do que A. Para o caso da condição não se verificar, devem ser reavaliados os julgamentos ou os níveis da hierarquia. O segundo axioma consiste na homogeneidade, onde, os elementos pertencentes a um mesmo nível hierárquico devem ser detentores de igual importância dentro do seu nível. Caso não se verifique esta condição, devem-se reformular os grupos e assim comparar elementos da mesma ordem de importância. O terceiro axioma remete para a independência, onde os elementos de um nível da hierarquia, quando comparados entre si, os pesos dos critérios devem ser independentes das propriedades das alternativas. Por último, o quarto axioma consiste na expectativa (suposição), em que se supõe que a hierarquia esteja completa para desta forma se poder tomar a decisão final. No caso do axioma não se cumprir, os problemas detetáveis podem ter a ver ou com o decisor não estar a

16

fazer uso de todos os critérios ou o decisor não faz uso de todas as alternativas necessárias (Vargas, 1990).

Saaty (1994) cria assim uma escala (escala fundamental de Saaty) que permite avaliar corretamente os critérios. Esta escala é constituída por 9 níveis e é assim possível ver de seguida na tabela 6:

Tabela 6 - Escala fundamental de Saaty

Intensidade	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou essencial	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau e certeza.

Assim é possível atribuir diversas intensidades às comparações entre os critérios, assumindo posteriormente o formato de uma matriz quadrada (figura 8), como é seguidamente apresentada.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 8 - Matriz de comparação (Granemann & Gartner, 1996)

As matrizes devem seguir três regras, sendo elas:

- $a_{ij} > 0$ (todos os elementos positivos);
- $a_{ii} = 1$ (todos os elementos da diagonal principal iguais a 1);
- $a_{ij} = 1/a_{ji}$ (propriedade das matrizes recíprocas).

Por último, é calculado com base nos julgamentos anteriormente definidos, o resultado preferencial.

Deste modo é possível obter uma decisão com base na avaliação dos critérios, sendo esta a mais preferível em detrimento dos outros resultados (alternativas).

Assim, o método AHP pode ser especialmente útil no solucionamento de problemas de carácter multicriterial, onde são tratados aspetos sociais, técnicos, culturais e económicos.

Este método apresenta algumas dificuldades no que toca à forma de abordar o problema e gerar os critérios, bem como na análise do mesmo. O conhecimento e experiência que o sujeito apresenta, são também fatores bastante relevantes na forma como todo o processo se irá desenvolver.

3 Metodologia experimental

Neste capítulo são aplicados todos os conhecimentos adquiridos e que se encontram no estado da técnica por forma a desenvolver uma metodologia que permita obter resultados face ao objetivo proposto.

3.1 Comparação entre equipamentos

De entre os equipamentos existentes no mercado, foram selecionados apenas 5, de entre os quais o braço articulado que pode ser avaliado ambigualmente face às suas vertentes de controlo por contacto ou por *laser scanning*.

Estes equipamentos são detentores de diversas características, as quais podem ser comuns entre os mesmos. As características, contudo, não têm a mesma importância para todos os equipamentos, realçando-se em função do objeto a ser controlado.

Por forma a poder comparar e obter resultados viáveis quanto ao equipamento mais adequado a ser utilizado para o controlo de um determinado objeto, foram pré-definidas também as dimensões dos equipamentos, com base nos mais utilizados na indústria.

A metodologia AHP requer critérios bem definidos que permitam a classificação e comparação entre eles. Para isso, foram avaliadas as características mais relevantes, tendo por base o *Quality Function Deployment* (QFD). Assim, foram tidas por base as características requeridas pelo cliente, uma vez que o QFD incita a avaliação das qualidades de um determinado produto tendo sobretudo em conta o cliente e a interação deste com o objeto, resultando num fluxograma representado na figura 9 (Abreu, 1997).

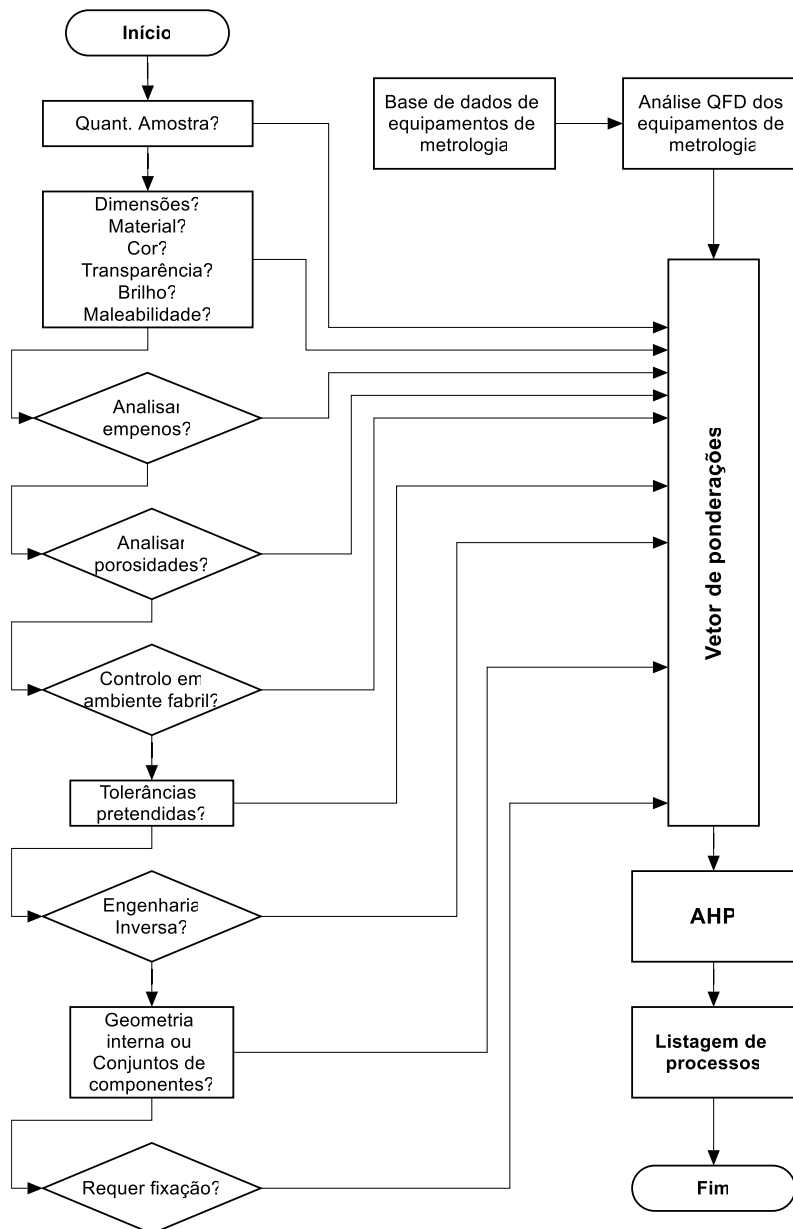


Figura 9 - Fluxograma da metodologia a implementar

O fluxograma é a representação da base do programa, onde as variáveis de entrada são as questões impostas ao utilizador na interface. Após estas serem preenchidas, vai ser gerado um vetor de ponderações. Por sua vez este vetor depende não só das variáveis da interface, como também dos dados de cada equipamento devidamente contextualizados com base na análise QFD.

Posteriormente, o vetor irá ser submetido a uma análise segundo a metodologia AHP, de onde se obtém uma listagem dos equipamentos viáveis ao controlo dimensional/engenharia inversa do objeto. A listagem revelará a ordem do equipamento mais adequado para o menos adequado.

3.2 Critérios de seleção do equipamento

De forma a compreender os critérios selecionados, seguem-se as definições para os mesmos.

Maleabilidade [A]: Capacidade de deformação de um material. Esta característica é fundamental visto que a análise de um determinado objeto pode ser ou não feita por contacto, sendo relevante a deformação. No caso de ser um objeto bastante maleável, não deve ser feito o controlo por contacto, dado que o toque o poderá deformar.

Dimensões [B]: As dimensões dos objetos são relevantes na medida em que o volume dos equipamentos é fixo, dependendo assim a viabilidade de utilização dos mesmos em função do tamanho do objeto.

Geometria interna [C]: Aquando da necessidade de analisar a geometria interna de um determinado objeto, há que ter em conta dois fatores. O primeiro prende-se à possibilidade de corte da peça, abrangendo assim um maior leque de equipamentos para o controlo dimensional. Caso não seja possível cortar (segundo fator) e o acesso pelo exterior seja complicado, a restrição é automática ao equipamento de tomografia, contudo, há que ter em conta as dimensões.

Repetibilidade [D]: A repetibilidade é a característica responsável pela possibilidade de repetição do controlo dimensional de um objeto. Assim, quando existem diversas peças iguais, onde é pretendido o mesmo tipo de controlo, pode ser utilizado um equipamento que permita a repetição.

Precisão [E]: Refere-se à característica do equipamento. O equipamento é submetido várias vezes ao mesmo teste, gerando um grau de variação de resultados (desvio-padrão). Este é então denominado de precisão.

Para o controlo dimensional são requeridas precisões distintas. Assim, para uma mesma distância pode ser pedida uma tolerância mais apertada (sendo necessário um equipamento mais preciso) ou uma tolerância maior, onde um equipamento menos preciso pode fazer o controlo com a mesma exatidão.

Montagem [F]: A montagem consiste, tal como o nome indica, na montagem de peças. Assim, para o controlo destas montagens, é preciso, tal como no controlo de geometria interna, ter em conta a possibilidade de separação e/ou corte. Caso contrário, apenas a tomografia estará apta ao controlo de peças montadas.

Material [G]: Os objetos podem ser constituídos por um ou mais materiais. Os materiais podem ser desde metal, polímero, cerâmico e/ou compósito. A principal influência tem

a ver com as densidades, ou seja, em objetos multimateriais é difícil avaliar por tomografia as zonas de junção de material devido à mistura de materiais/densidade. Outra influência será relativa aos materiais esponjosos terem elevada deformabilidade face ao toque.

Fixação [H]: A fixação torna-se relevante para o controlo por toque, uma vez que o objeto deve permanecer imóvel ao longo de todo o controlo dimensional, conferindo assim a maior estabilidade possível. Também aquando da digitalização é importante que o objeto se mantenha estático para não gerar nuvens de pontos mal sobrepostas. Na análise por tomografia é igualmente relevante a fixação para que o ficheiro gerado seja o mais próximo possível da realidade, não criando defeitos inexistentes. Por último, na análise através do vídeo a fixação torna-se importante na medida em que o objeto permanece fixo numa determinada posição, facilitando o controlo dimensional do mesmo.

A fixação pode ser realizada de várias formas, por recurso a kits (figura 10) próprios de fixação ou modelos específicos para uma determinada peça (gabarito) que lhe confere a adaptação equivalente à de montagem real, como é possível verificar na figura 11.

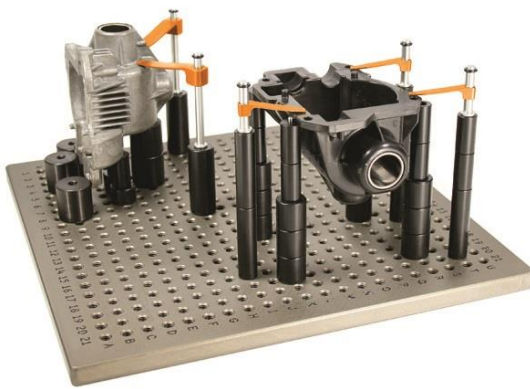


Figura 10 - Kit de fixação (Renishaw, 2017)



Figura 11 - Gabarito (Alibaba, 2017)

Análise empenos [I]: A análise de empenos remete para a análise de deformações num determinado objeto. Este tipo de análise pode ser realizada por meio de comparação entre a peça e o seu modelo 3D. De um modo geral, com a digitalização ou através da tomografia é possível sobrepor o ficheiro 3D com o gerado a partir da peça real e assim analisar onde existe mais ou menos material. De outra forma, a análise de empenos

pode ser realizada por meio de controlo de dimensões, sendo deste modo viável a utilização de outros equipamentos.

Análise porosidades [J]: A porosidade remete para o espaço vazio no interior de um determinado material. Esta pode ter diversas formas e ocupar volumes distintos.

Para avaliar a porosidade (figura 12), é necessário ter um meio de análise do interior das paredes de um objeto. Esta análise só é então possível através da tomografia, uma vez que todos os outros equipamentos apenas permitem uma análise externa, ou com deformação do interior (através de corte).

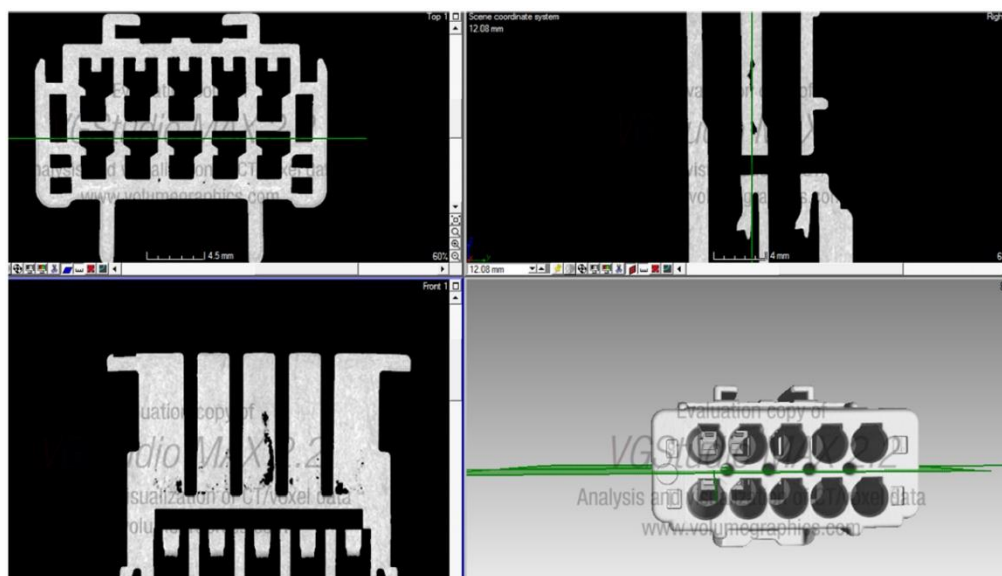


Figura 12 - Porosidades e interior de um objeto obtidas por tomografia (imagens cedidas pela Micronsense, Lda.)

Engenharia inversa [K]: A engenharia inversa consiste na obtenção de modelos 3D que ainda não existam, a partir de peças reais. A reengenharia de um determinado produto também é possível com este processo. Permite ainda otimizar processos através do ficheiro gerado, bem como alterar o próprio objeto de forma mais fácil.

Assim, com a obtenção de uma malha que por meio de diversos passos permite gerar um produto final (ficheiro STL), é possível partir de um objeto já existente e criar o ficheiro CAD.

Controlo em ambiente fabril [L]: A análise dos objetos pode ser realizado em diversos ambientes, dos quais se destacam o ambiente fabril e o ambiente controlado (laboratório). No caso de um objeto não permitir mobilidade (ex.: molde de elevadas dimensões, asa de avião, etc...) é necessário o deslocamento e controlo no próprio ambiente fabril.

Ao obter as características (figura 13) desta forma, é possível otimizar o programa para que este possa ser utilizado de forma mais fácil pelo cliente.

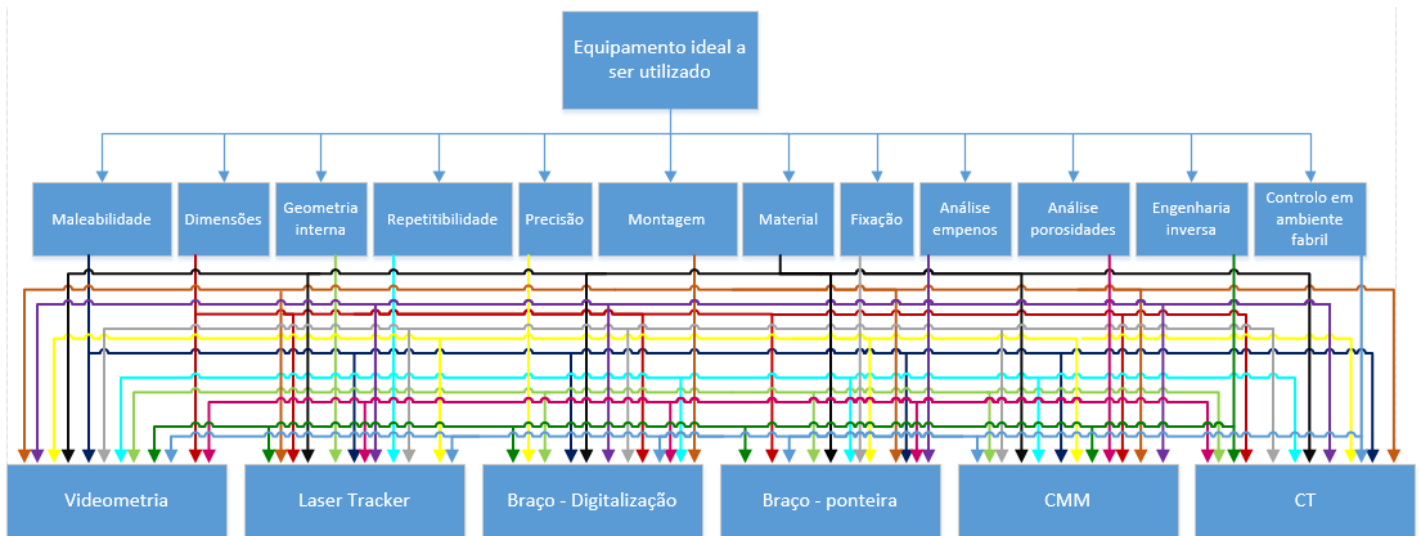


Figura 13 - Características dos equipamentos

Com vista a identificar quais as características mais relevantes para cada equipamento, seguem-se as tabelas (tabela 7 – tabela 18) que relacionam o mesmo com a capacidade para a característica.

Na tabela seguidamente apresentada (tabela 7) é possível avaliar a capacidade de cada equipamento realizar o controlo dimensional de um objeto, tendo em conta a sua maleabilidade.

Tabela 7 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme maleabilidade

	Maleabilidade	
	Maleável	Rígida
CT	✓	✓
Videometria	✓	✓
Braço-Digitalização	✓	✓
Laser Tracker	✓	✓
CMM		✓
Braço-Ponteira		✓

Assim, o facto de uma peça ser maleável apenas terá influência na CMM e no Braço-Ponteira, que, derivado ao controlo por toque, pode existir deformação devido à maleabilidade, sendo por isso mais viável o uso de qualquer outro equipamento que não faça a análise através de contato.

Nas tabelas 8 e 9 é possível verificar a viabilidade de cada equipamento para o controlo de objetos mediante as suas dimensões.

Tabela 8 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme dimensões (equipamentos sem contato)

	Dimensões		
	Menor que 300mm	Entre 300 e 1000mm	Maior que 1000mm
CT	✓		
Videometria	✓		
Braço-Digitalização		✓	✓
Laser <i>Tracker</i>		✓	✓

Tabela 9 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme dimensões (equipamentos com contato)

	Dimensões		
	Menor que 300mm	Entre 300 e 1000mm	Maior que 1000mm
CMM	✓	✓	
Braço-Ponteira	✓	✓	✓

Assim, para objetos com dimensões inferiores a 300mm será viável a utilização de CT, Vídeo, CMM e Braço ponteira. Já para objetos com dimensões entre os 300 e 1000mm poderão se utilizados o Braço- digitalização e ponteira, o Laser *Tracker* e a CMM. Para objetos com dimensões superiores a 1000mm, o Braço – ponteira e digitalização, bem como o Laser *Tracker*, serão os equipamentos viáveis.

A análise de geometria interna apenas pode ser feita de duas formas, com corte ou sem ele. Desta forma é possível verificar na tabela 10 que, para todos os equipamentos, é viável a avaliação da geometria interna caso o corte no objeto seja permitido, caso contrário, apenas através do CT será possível essa análise.

Tabela 10 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme corte para análise de geometria interna

	Geometria interna	
	Sem corte	Com corte
CT	✓	✓
Videometria		✓
Braço-Digitalização		✓
Laser <i>Track</i>		✓
CMM		✓
Braço-Ponteira		✓

A repetibilidade só é possível através da automação de um programa. Para tal o equipamento não pode depender exclusivamente do controlo humano. Assim, como é possível verificar na tabela 11, apenas o CT, o vídeo e a CMM permitem repetibilidade.

Tabela 11 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme repetibilidade

	Repetibilidade	
	Sim	Não
CT	✓	
Videometria	✓	
Braço-Digitalização		✓
Laser <i>Tracker</i>		✓
CMM	✓	
Braço-Ponteira		✓

Nas seguintes tabelas (tabelas 12, 13 e 14) é possível verificar a influência da cor, transparência e brilho do objeto a ser analisado na viabilidade do uso do equipamento.

Tabela 12 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme cor do objeto

	Cor		
	Preto	Preto com spray	Outra
CT	✓		✓
Videometria	✓		✓
Braço-Digitalização		✓	✓
Laser <i>Tracker</i>	✓		✓
CMM	✓		✓
Braço-Ponteira	✓		✓

Tabela 13 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme transparência do objeto

	Transparência		
	Transparente	Transparente com spray	Opaco
CT	✓		✓
Videometria	✓		✓
Braço-Digitalização		✓	✓
Laser Tracker	✓		✓
CMM	✓		✓
Braço-Ponteira	✓		✓

Tabela 14 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme brilho do objeto

	Brilho		
	Brilhante	Brilhante com spray	Baço
CT	✓		✓
Videometria	✓		✓
Braço-Digitalização		✓	✓
Laser Track	✓		✓
CMM	✓		✓
Braço-Ponteira	✓		✓

Como é possível constatar, tanto a cor preta, como o facto de um objeto ser transparente, ou brilhante, apenas tem influência na digitalização, pelo que, caso o equipamento escolhido seja o braço – digitalização, o objeto preto, transparente ou brilhante deve ser pintado de forma a tornar refletora a superfície da peça. Qualquer outra cor/opacidade ou ausência de brilho, num objeto, pode ser avaliada em todos os equipamentos.

A precisão é distinta para cada equipamento, sendo por isso apresentados na tabela 15 os equipamentos que se enquadram nas diferentes incertezas abordadas.

Tabela 15 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme precisão para cotas das dimensões indicadas

	Incerteza		
	Menor que 0,03mm	Entre 0,03 e 0,04 mm	Maior do que 0,04mm
CT	✓		
Videometria	✓		
Braço-Digitalização		✓	
Laser Tracker			✓
CMM	✓		
Braço-Ponteira	✓		

Após uma breve análise é possível verificar que os equipamentos mais precisos, ou seja, com uma incerteza absoluta menor, sendo estes o CT, o vídeo, a CMM e o braço ponteira. Para incertezas entre os 0,03 e os 0,04 encontra-se o braço- digitalização e para incertezas superiores a 0,04 apenas o laser *tracker*.

O controlo de peças montadas não é possível de ser realizado em todos os equipamentos, sendo na tabela seguinte (16) apresentados os equipamentos que o permitem.

Tabela 16 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme montagem de peças

	Montagem	
	Peças montadas	Peças não montadas
CT	✓	✓
Videometria		✓
Braço-Digitalização		✓
Laser <i>Tracker</i>		✓
CMM		✓
Braço-Ponteira		✓

É possível constatar que apenas o CT permite a análise de peças montadas, uma vez que, todos os outros equipamentos assumem como inacessíveis as zonas de encaixe.

Na tabela 17 é possível verificar a viabilidade de um equipamento para analisar um objeto constituído por um único material ou vários.

Tabela 17 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme materiais constituintes do objeto

	Materiais	
	Vários	Único
CT		✓
Videometria	✓	✓
Braço-Digitalização	✓	✓
Laser <i>Tracker</i>	✓	✓
CMM	✓	✓
Braço-Ponteira	✓	✓

Posto isto, apenas o CT mostra que para vários materiais a viabilidade não é a mesma quando comparada com os outros equipamentos.

O controlo dimensional/ engenharia inversa pode requerer fixação, dependendo do equipamento a ser utilizado.

Na tabela 18 é possível ver quais os equipamentos que requerem o uso de fixação/ imobilidade face aos que permitem a análise com o objeto no estado livre.

Tabela 18 - Viabilidade da medição dos equipamentos conforme fixação requerida para o objeto

	Fixação	
	Estado livre/ Sem fixação	Imóvel/Com fixação
CT	✓	✓
Videometria	✓	✓
Braço-Digitalização	✓	✓
Laser <i>Tracker</i>	✓	✓
CMM		✓
Braço-Ponteira		✓

A CMM e o braço – ponteira, são os únicos equipamentos que requerem que o objeto se encontre fixo/imóvel, visto que através do toque, não pode existir qualquer deslocamento e/ou deformação.

Após a análise QFD, foi assim possível avaliar as capacidades dos critérios, gerando assim uma matriz como a seguidamente apresentada na figura 14.

	maleabilidade	dimensões	geometria interna	repetibilidade	precisão	montagem	material	fixação	análise empenos	análise porosidades	engenharia inversa	controlo em ambiente fabril
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
maleabilidade												
dimensões												
geometria interna												
repetibilidade												
precisão												
montagem												
material												
fixação												
análise empenos												
análise porosidades												
engenharia inversa												
controlo em ambiente fabril												

Figura 14 - Matriz AHP

Nesta matriz é possível verificar que não existirá relação abaixo da diagonal principal, uma vez que esta relação é recíproca da metade superior. Também os valores da diagonal, como já é conhecido, terão igual importância, pressupondo-se automaticamente o valor de 1, ou seja, não terão qualquer influência na relevância das características. Assim, apenas a parte superior da matriz (acima da diagonal principal) terá efetivamente pertinência para o estudo do (s) equipamento (s) mais adequado (s) para a medição do objeto.

3.3 Programa de seleção de características

Para o correto preenchimento da matriz AHP é necessário identificar qual a relevância de uma característica face a outra, para tal, é definido um conjunto de parâmetros que permite orientar o utilizador para as características mais importantes relativas ao produto a controlar. Os parâmetros seleccionados adequam-se a todos os ramos da indústria, não existindo uma rotina específica para cada sector. No final é obtido o resultado, mediante as opções seleccionadas, de qual o equipamento mais adequado.

A fim de automatizar este processo, de forma a minimizar o tempo e facilitar o uso das capacidades de seleção da matriz, foi desenvolvido um programa em Microsoft Excel, implementado através de macros programadas em VBA.

Sendo de seguida apresentado na figura 15 uma breve síntese de como funciona o código da macro relativa à característica da maleabilidade, estando o restante código, relativo às outras características, no Anexo III.

```
Sheets("AHP").Visible = True  
Sheets("AHP").Select  
If UserForm1.OptionButton4.Value = True Then  
Dim e As Integer  
For e = 3 To 13  
If Cells(4, e).Value = "" Then  
Cells(4, e).Value = "A9"
```

- É selecionada a folha onde se encontra a matriz AHP
- Se a opção OptionButton4 (pouco maleável) for selecionada, nas células das colunas de 3 a 13 e na linha 4 (corresponde à linha da maleabilidade) são preenchidas com o valor "A9", sendo "A" a letra que representa a maleabilidade e 9 a importância em relação às outras características. (foi escolhido o valor de 9 para pouco maleável, visto materiais mais rígidos apresentarem menos dificuldades face ao controlo).

```
If onlyDigits(Cells(4, e).Value) > 9 Then  
Else  
Cells(4, e).Value = "A9"  
End If
```

- Caso alguma das células da linha 4 já esteja preenchida e o valor for inferior a 9 (ex: C7, D4, etc...) então essa célula será substituída por "A9", visto ser mais importante.

A

A

```
If UserForm1.OptionButton5.Value = True  
Then  
  
Dim f As Integer  
  
For f = 3 To 13  
  
If Cells(4, f).Value = "" Then  
  
Cells(4, f).Value = "A3"
```

- Quando a opção Button5 é selecionada (maleável) então, as células de 3 a 13 da linha 4, na matriz AHP, são preenchidas com o valor de "A3" visto a tua importância ser mais reduzida do que objetos pouco maleáveis ("A9").

```
If onlyDigits(Cells(4, f).Value) > 3 Then  
  
Else  
  
Cells(4, f).Value = "A3"  
  
End If
```

- Para as células da linha da maleabilidade que tenham valor superior a 3 (ex: B7, E9, etc...) não acontece nada, caso contrário (ex: D1, F2, etc...) estas serão substituídas por "A3".

```
If UserForm1.OptionButton6.Value = True  
Then  
  
Dim g As Integer  
  
For g = 3 To 13  
  
If Cells(4, g).Value = "" Then  
  
Cells(4, g).Value = "A1"
```

- Se a opção OptionButton6 (muito maleável) for selecionada, nas células das colunas de 3 a 13 e na linha 4, são preenchidas com o valor "A1", sendo a característica muito maleável atribuída com a importância de 1, visto a sua importância ser reduzida na seleção de um equipamento.

```
If onlyDigits(Cells(4, g).Value) > 1 Then  
  
Else  
  
Cells(4, g).Value = "A1"  
  
End If
```

- Para as células da linha 4 que tenham valor superior a 1, permanecem iguais, caso contrário estas assumirão o valor de "A1".

Figura 15 - Explicação da macro da maleabilidade

Neste programa são selecionadas as características do objeto, bem como os seus meios e necessidades de controlo. As características têm associadas valores de importância que, ao serem selecionadas, vão preenchendo a matriz AHP.

Para melhor se entender o programa, ficam de seguida três imagens (figura 16, 17 e 18) com ilustrações da interface. Inicialmente o utilizador, ao abrir o programa, depara-se com a interface da figura 16, onde é possível encontrar indicações para o seu correto funcionamento.

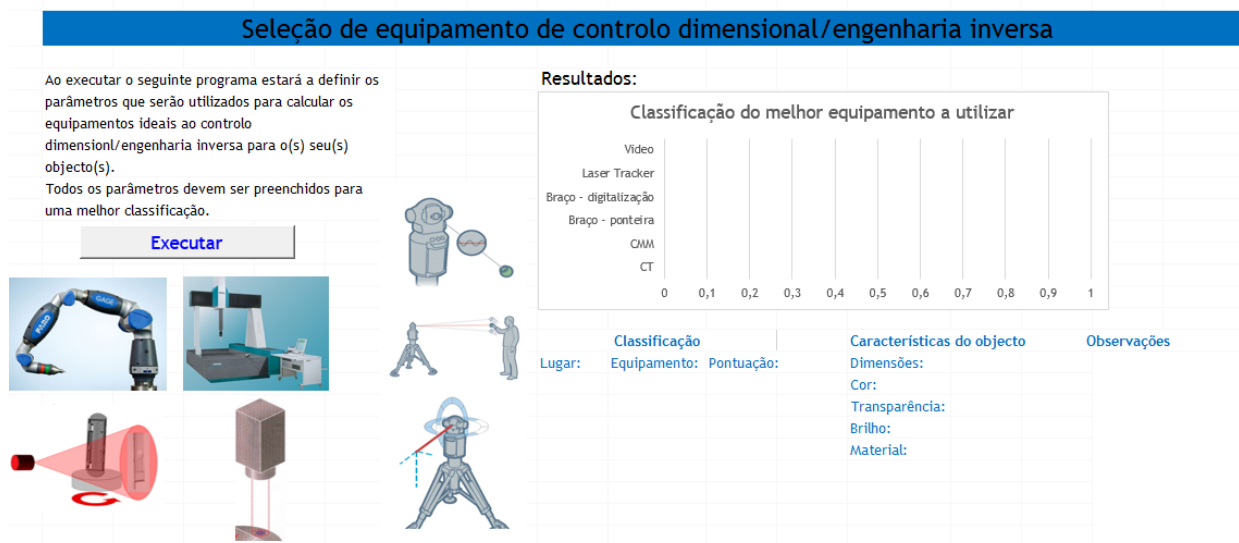


Figura 16 - Interface da abertura do programa

Ao seleccionar o botão “Executar” irá abrir uma janela (figura 17) onde poderá escolher:

- Quantidade da amostra: Característica que permite avaliar a necessidade de um equipamento que permita repetibilidade no caso de ser escolhida mais do que uma amostra;
- Dimensões da peça: Aqui é possível seleccionar o comprimento máximo da peça para análise, sendo:
 - <300mm, onde são admissíveis o CT, a Videometria, a CMM e o braço – ponteira;
 - de 300 a 1000mm, sendo admissíveis a CMM, o braço (ambos) e o laser tracker;
 - > 1000mm, apenas para o braço (ambos) e o laser tracker.
- Material: O utilizador pode neste parâmetro escolher quais os materiais constituintes do seu objeto para avaliação, sendo que, no caso de um objeto multimaterial, o CT fica condicionado;

- Parâmetros de cor: Dentro desta área encontram-se as características que permitem ao utilizador realizar uma avaliação visual, sendo que para o caso de uma peça ser preta, transparente e/ou brilhante, o programa avisa o utilizador que, no caso de ser viável a utilização do braço – digitalização, será necessária a utilização de spray para cobrir a peça.

Parâmetros base | Parâmetros secundários

Parâmetros base

Quantidade da amostra:

Dimensões da peça:

Material:

- Metal
- Cerâmica
- Polímero
- Compósito

Parâmetros de Cor:

Cor:

- Preto
- Outra

Transparência:

- Opaca
- Transparente

Brilho:

- Muito brilhante (ex: Superfície polida)
- Brilhante (ex: Superfície porosa)
- Baço

Seguinte

Figura 17 - Parâmetros base (interface programa)

Após serem preenchidos os parâmetros base, o utilizador pode continuar a sua avaliação nos parâmetros secundários (figura 18). Nesta fase é possível seleccionar a importância dos objetivos finais pretendidos, desde análise à geometria interna até à engenharia inversa.

Figura 18 - Parâmetros secundários (interface programa)

Este programa abrange todas as características identificadas como essenciais para a seleção do equipamento mais adequado ao controlo do objeto, onde são atribuídos valores de 1 (pouco importante) a 3 (muito importante).

Após o teste do programa, através de vários casos de estudo, a base do mesmo teve de ser alterada, uma vez que, foi verificada a inviabilidade dos resultados. Assim, após a geração do vetor de ponderações, vão ser introduzidas as condicionantes e posteriormente com a aplicação da metodologia AHP será obtida a listagem dos equipamentos (figura 19).

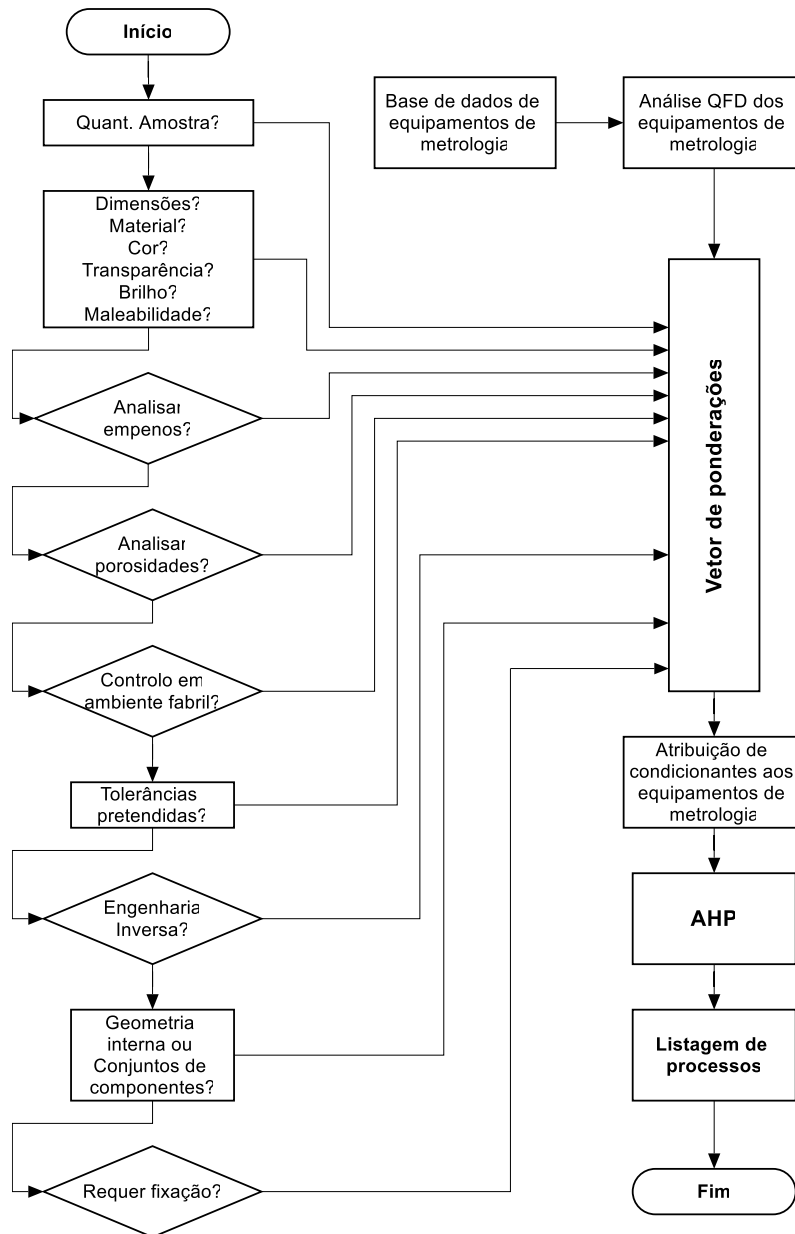


Figura 19 - Fluxograma da metodologia a implementar com condicionantes

O programa elaborado tem por base o Microsoft Excel, onde a programação foi elaborada em VBA (figura 20).

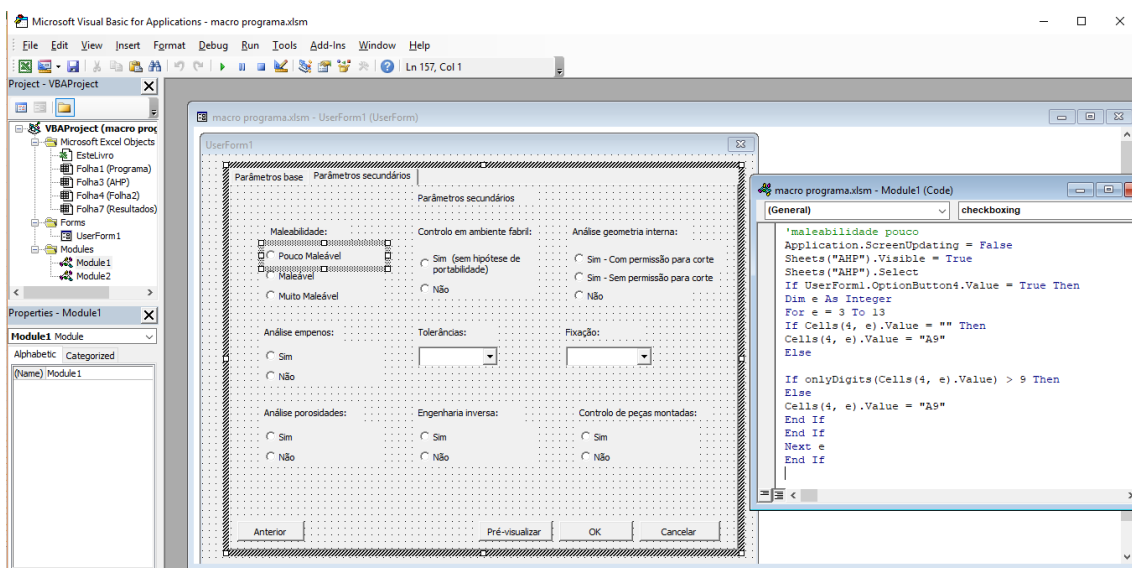


Figura 20 - Base de programação

Cada parâmetro preenchido vai, como já foi dito anteriormente e segundo o código adjacente, permitir o preenchimento da matriz AHP. O código é semelhante em toda a sua constituição, mudando apenas as características, bem como a avaliação a que estão associados.

Desempenho dos equipamentos

Para o cálculo da pontuação de cada equipamento foi necessário ter em conta a sua aptidão para a característica em causa, tendo em conta as capacidades de cada um. Assim, foi elaborada uma tabela (tabela 20), onde, após o preenchimento da matriz, entram as ponderações obtidas para cada característica.

Os valores de seguida apresentados na tabela 19, regem-se por:

Tabela 19 - Legenda dos valores de desempenho

Valor	Desempenho
0	A característica não é relevante no equipamento.
1	A característica é minimamente relevante no equipamento.
3	A característica é relevante no equipamento.
9	A característica é muito relevante no equipamento.

Através desta tabela e com as ponderações resultantes da matriz, é então possível obter várias pontuações que determinarão por ordem a viabilidade do uso do equipamento para determinado objeto.

Tabela 20 - Desempenho de cada característica face a cada equipamento

	maleabilidade	dimensões			geometria interna	repetibilidade	precisão	montagem	material	fixação	análise empenos	análise interna	engenharia inversa	controlo em ambiente fabril	Somatório
		<300	300 a 1000	>1000											
CT	3	9	0	0	9	9	9	9	3	3	9	9	9	0	0
CMM	1	3	9	1	3	9	7	3	9	9	3	0	3	0	0
Braço - ponteira	1	1	9	7	3	1	3	3	9	9	3	0	3	9	0
Braço - digitalização	3	1	9	7	1	1	1	1	9	3	3	0	9	9	0
Tracker	3	0	7	9	1	1	1	1	9	1	1	0	3	9	0
Vídeo	3	9	0	0	3	9	9	1	9	3	1	0	3	0	0
Ponderação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Para obter a ponderação, é calculada toda a importância atribuída a cada característica (representada por x) individualmente e posteriormente dividida pela soma total (representada por i), como é possível observar na equação 1:

$$Ponderação = \frac{\sum_{x=0}^{\infty} x}{\sum_{i=0}^{\infty} i} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

4 Testes experimentais

Para que seja possível obter resultados, foram escolhidas duas peças com diferentes características. Estas foram testadas e estão de seguida apresentadas como caso I e II.

4.1 Caso I – Peça de média dimensão

O primeiro caso de estudo é de média dimensão, com cerca de 400x150x100mm constituída apenas por um material plástico (figuras 21 e 22).



Figura 21 - Peça caso 1 - vista frontal



Figura 22 - Peça caso 1 - vista lateral

Existem imagens da peça em estudo, assim como também desenhos conforme a figura 23 (anexo II), onde é possível constatar algumas dimensões, bem como avaliar as tolerâncias aplicadas. Para esta peça as tolerâncias rondarão as décimas, pelo que torna viável toda uma panóplia de equipamentos.

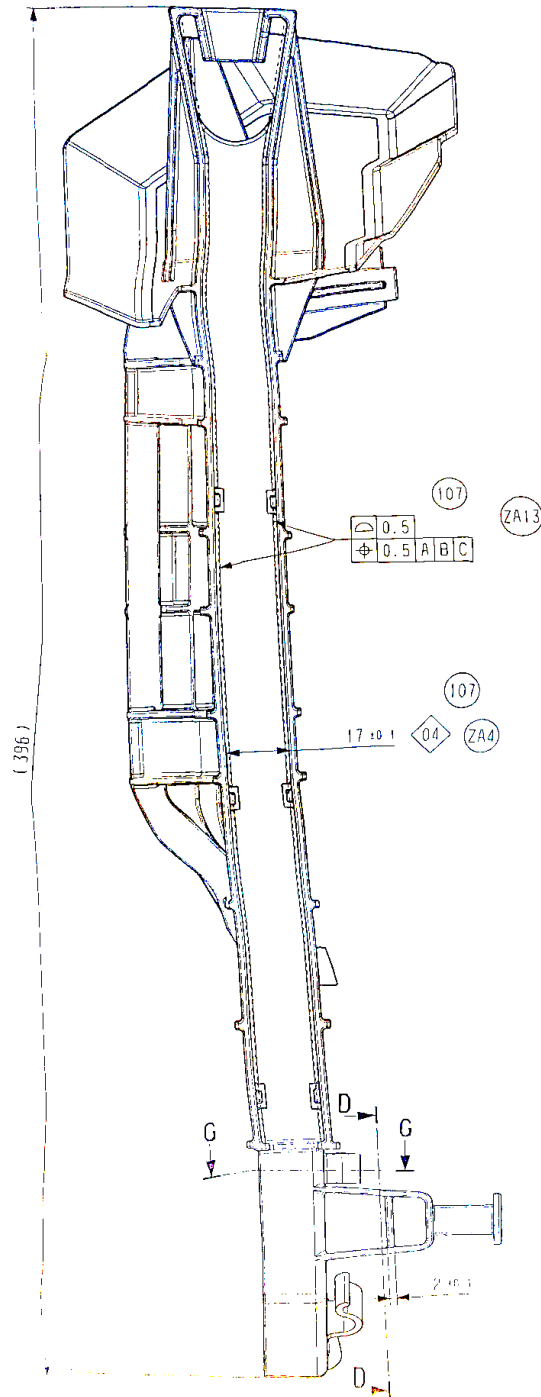


Figura 23 - Desenho do caso 1

Neste específico caso, será apenas estudada uma peça, não se aplicando repetibilidade.

Esta peça é de cor preta, é baça e opaca, resultando assim numa primeira fase o programa (figura 24):

The image shows a software interface with two tabs: 'Parâmetros base' and 'Parâmetros secundários'. The 'Parâmetros base' tab is selected. The interface contains several configuration options:

- Quantidade da amostra:** A text input field containing the number '1'.
- Dimensões da peça:** A dropdown menu showing '300 a 1000mm'.
- Material:** A list of checkboxes: 'Metal' (unchecked), 'Cerâmica' (unchecked), 'Polímero' (checked), and 'Compósito' (unchecked).
- Parâmetros de Cor:** Radio buttons for 'Cor: Preto' (selected) and 'Outra' (unchecked).
- Transparência:** Radio buttons for 'Opaca' (selected) and 'Transparente' (unchecked).
- Brilho:** Radio buttons for 'Muito brilhante (ex: Superfície polida)' (unchecked), 'Brilhante (ex: Superfície porosa)' (unchecked), and 'Baço' (selected).

A 'Seguinte' button is located at the bottom right of the interface.

Figura 24 - Parâmetros base caso 1

Para a análise de uma peça deste tipo podemos observar que serão necessárias avaliações a nível dimensional e geométrico e não irá ser considerado o controlo de geometrias internas, empenos, nem de defeitos porosos.

Também não será considerada a engenharia inversa, uma vez que para este caso apenas se pretende o controlo dimensional e não uma criação do modelo 3D da peça.

Esta peça garante que a análise possa ser realizada num laboratório, dadas as suas dimensões e facilidade de transporte.

A maleabilidade é reduzida, sendo a peça bastante rígida, no entanto necessitará de um kit de fixação, visto que só desta forma se garante a estabilidade da mesma.

Assim, no programa serão selecionadas as opções abaixo (figura 25):

Figura 25 - Parâmetros secundários caso 1

Após a seleção de todos os parâmetros é possível escolher a opção Pré-visualizar, que permite apenas observar os resultados, sem os aceitar definitivamente, sendo possível ainda alterar algum parâmetro e verificar a sua influência na classificação dos equipamentos. Por outro lado, ao clicar OK, aceitam-se os resultados para os parâmetros selecionados, sem hipótese de alteração.

Assim, ao aceitar (OK) obtêm-se os seguintes resultados (figura 26):

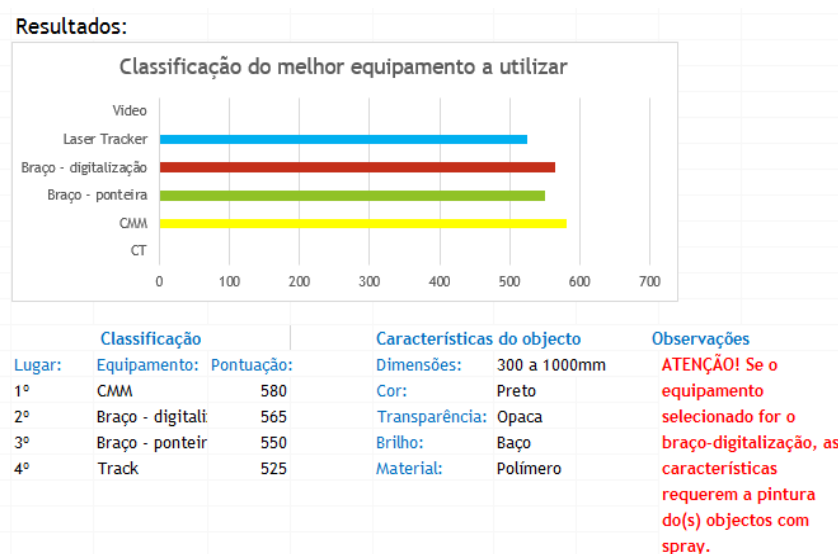


Figura 26 - Resultados do caso 1

Após uma breve análise é possível constatar que as tolerâncias são um pouco mais apertadas do que as do caso 1, rondando sobretudo as centésimas.

Ao nível de características-base, a peça é maioritariamente preta e é opaca, porém há que ter em conta os insertos metálicos, possuindo assim algum brilho que pode perturbar uma digitalização por *laser scanning*.

Depois desta primeira análise é possível preencher o programa (figura 30) da seguinte forma:

Parâmetros base | Parâmetros secundários

Parâmetros base

Quantidade da amostra:
8

Dimensões da peça:
< 300mm

Material:
 Metal
 Cerâmica
 Polímero
 Compósito

Parâmetros de Cor:
Cor:
 Preto
 Outra

Transparência:
 Opaca
 Transparente

Brilho:
 Muito brilhante (ex: Superfície polida)
 Brilhante (ex: Superfície porosa)
 Baço

Seguinte

Figura 30 - Parâmetros base da análise 1 - caso 2

Este tipo de peça é bastante rígida, pelo que a maleabilidade será reduzida. Não serão feitas análises à porosidade, nem ao nível de empenos.

Apesar das tolerâncias serem um pouco apertadas, ainda assim são superiores a 0,04mm.

Caso se queira alterar algum parâmetro, tal é possível.

Assim, pode ser agora considerada a análise de empenos, mantendo-se os restantes parâmetros iguais e obtendo-se os seguintes resultados (figura 33):

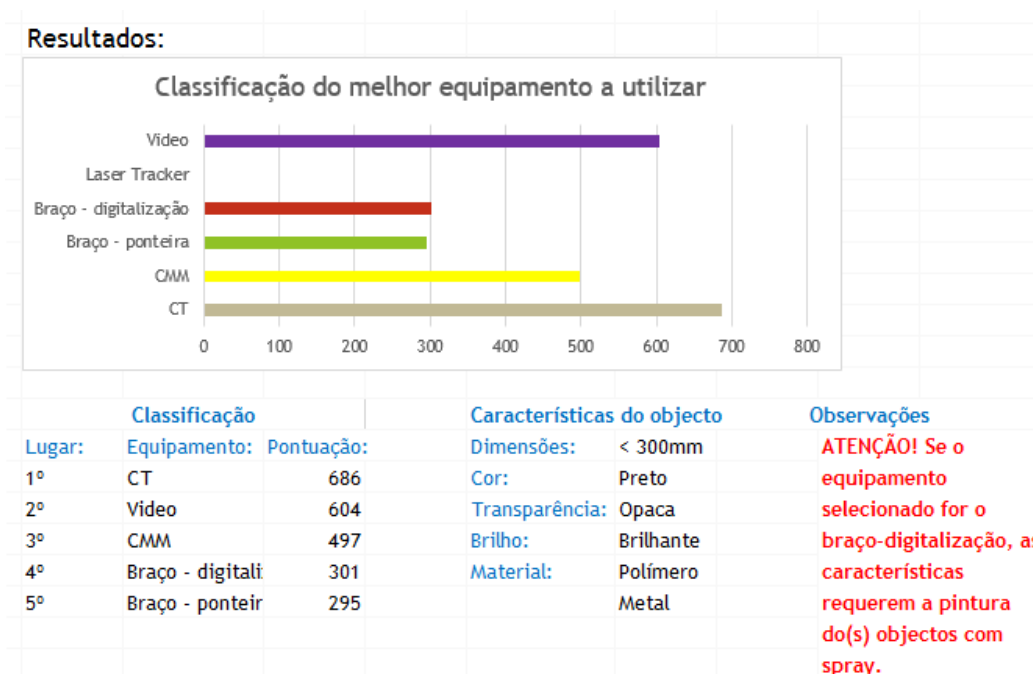


Figura 33 - Resultados da análise 2 - caso 2

5 Discussão de resultados

De seguida serão discutidos os resultados mediante as características selecionadas e os valores da classificação dos equipamentos obtidos.

5.1 Análise de resultados - Caso I

Como é possível constatar, o equipamento mais adequado, para o caso I será a CMM, seguindo-se o Braço – digitalização, posteriormente com uma classificação próxima, o Braço através de ponteira e por último o *laser tracker*.

Em especial atenção, quando existem peças com brilho, transparentes ou pretas, há que ter em conta o aviso a vermelho, onde se faz notar a viabilidade do uso do equipamento braço-digitalização apenas com o uso de um spray para tornar a peça mais baça, opaca e branca (que permite melhor reflexão do feixe de luz emitido pelo equipamento de digitalização).

A matriz AHP (figura 34) ficou assim com a seguinte configuração:

	maleabilidade	dimensões	geometria interna	repetibilidade	precisão	montagem	material	fixação	análise empenos	análise porosidades	engenharia inversa	controlo em ambiente fabril
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
maleabilidade		A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3
dimensões			B3	B3	B3	B3	G9	B3	B3	B3	B3	B3
geometria interna				D1	E1	F1	G9	H3	C0	J0	K0	C0
repetibilidade					E1	D1	G9	H3	D1	D1	D1	D1
precisão						E1	G9	H3	E1	E1	E1	E1
montagem							G9	H3	I0	J0	K0	L0
material								G9	G9	G9	G9	G9
fixação									H3	H3	H3	H3
análise empenos										J0	K0	L0
análise porosidades											J0	J0
engenharia inversa												K0
controlo em ambiente fabril												

Figura 34 - Matriz AHP do caso I

Onde foi feita automaticamente a contagem dos valores atribuídos a cada característica e realizada por consequente, a sua ponderação (tabela 21).

Tabela 21- Contagem e ponderação resultantes da matriz do caso 1

	Contagem	Ponderação
A	99	38,97
B	27	10,62
C	0	0
D	6	2,36
E	7	2,75
F	1	0,39
G	90	35,43
H	24	9,44
I	0	0
J	0	0
K	0	0
L	0	0

A ponderação da característica representada pela letra “A” (maleabilidade) é então calculada da seguinte forma, através da equação 1:

$$Ponderação_A = \frac{\sum_{x=0}^{\infty} x}{\sum_{i=0}^{\infty} i} \times 100$$

$$Ponderação_A =$$

$$\frac{\sum_{A=0}^{\infty} A}{\sum_{A=0}^{\infty} A + \sum_{B=0}^{\infty} B + \sum_{C=0}^{\infty} C + \sum_{D=0}^{\infty} D + \sum_{E=0}^{\infty} E + \sum_{F=0}^{\infty} F + \sum_{G=0}^{\infty} G + \sum_{H=0}^{\infty} H + \sum_{I=0}^{\infty} I + \sum_{J=0}^{\infty} J + \sum_{K=0}^{\infty} K + \sum_{L=0}^{\infty} L} \times 100$$

$$Ponderação_A = \frac{9+9+9+9+9+9+9+9+9+9}{99+27+0+6+7+1+90+24+0+0+0+0} \times 100$$

$$Ponderação_A = \frac{99}{254} \times 100 = 38,97$$

De seguida a ponderação é aplicada na tabela 20 resultado assim na tabela 22:

Tabela 22 - Valores resultantes da multiplicação das ponderações com o desempenho do equipamento para a característica caso 1

	maleabilidade	dimensões			geometria interna	repetibilidade	precisão	montagem	material	fixação	análise empenos	análise interna	engenharia inversa	controlo em ambiente fabril
		<300	300 a 1000	>1000										
CT	116,9	0	0	0	0	21,3	24,8	3,54	106,3	28,35	0	0	0	0
CMM	38,98	0	95,7	0	0	21,3	19,3	1,18	318,9	85,04	0	0	0	0
Braço - ponteira	38,98	0	95,7	0	0	2,36	8,27	1,18	318,9	85,04	0	0	0	0
Braço - digitalização	116,9	0	95,7	0	0	2,36	2,76	0,39	318,9	28,35	0	0	0	0
Laser Tracker	116,9	0	74,4	0	0	2,36	2,76	0,39	318,9	9,449	0	0	0	0
Vídeo	116,9	0	0	0	0	21,3	24,8	0,39	318,9	28,35	0	0	0	0
Ponderação	38,98	0	10,6	0	0	2,36	2,76	0,39	35,43	9,449	0	0	0	0

Contudo, como é possível observar, existem valores na linha da videometria e CT, pelo que foram necessários ajustes a fim de corrigir os resultados para quando estes não são viáveis, nomeadamente, serem listados equipamentos como solução, quando as suas especificações não o permitem. Assim, para algumas características foram geradas condições que limitam o aparecimento dos equipamentos inadequados, sendo que os valores consideram apenas o somatório resultante da tabela com a ponderação, ou então zero, conforme a tabela 23:

Tabela 23 - Condicionantes dos resultados caso 1

Equipamento	Condicionantes				Somatório
	Dimensões	Análise porosidades	Geometria interna sem corte	Controlo em ambiente fabril	
CT	0	0	0	0	0
CMM		580,31	580,31	580,31	580
Braço - ponteira		550,39	550,39	550,39	550
Braço - digitalização		565,35	565,35	565,35	565
Track	525,19	525,19	525,19	525,19	525
Vídeo	0	0	0	0	0

5.2 Análise de resultados – Caso II

No segundo caso, é possível observar que a videometria será o equipamento mais adequado, com uma pontuação de 732, seguindo-se o CT com 671, depois a CMM com 559, o braço – digitalização com 310 e por último o braço – ponteira com 304.

A matriz AHP (figura 35) ficou assim com a seguinte configuração:

	maleabilidade	dimensões	geometria interna	repetibilidade	precisão	montagem	material	fixação	análise empenos	análise porosidades	engenharia inversa	controle em ambiente fabril
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
maleabilidade		B9	A9	D9	A9	A9	A9	A9	A9	A9	A9	A9
dimensões			B9	B9	B9	B9	B9	B9	B9	B9	B9	B9
geometria interna				D9	E1	F1	G9	H3	C0	J0	K0	C0
repetibilidade					D9	D9	D9	D9	D9	D9	D9	D9
precisão						E1	G9	H3	E1	E1	E1	E1
montagem							G9	H3	I0	J0	K0	L0
material								G9	G9	G9	G9	G9
fixação									H3	H3	H3	H3
análise empenos										J0	K0	L0
análise porosidades											J0	J0
engenharia inversa												K0
controle em ambiente fabril												

Figura 35 - Matriz AHP da análise 1 - caso 2

Onde os parâmetros mais relevantes se mostram ser as dimensões, seguindo-se a repetibilidade, a maleabilidade e posteriormente o material, como é possível observar na tabela 24 seguinte:

Tabela 24 - Contagens e ponderações da matriz AHP análise 1 caso 2

	Contagem	Ponderação
A	81	21,89
B	99	26,75
C	0	0
D	90	24,32
E	6	1,62
F	1	0,27
G	72	19,45
H	21	5,67
I	0	0
J	0	0
K	0	0
L	0	0

Comparativamente, ao ser alterado um parâmetro (análise de empenos) a matriz AHP (figura 36) muda de imediato, sendo gerada da seguinte forma:

	maleabilidade	dimensões	geometria interna	repetibilidade	precisão	montagem	material	fixação	análise empenos	análise porosidades	engenharia inversa	controle em ambiente fabril
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
maleabilidade		B9	A9	D9	A9	A9	A9	A9	I9	A9	A9	A9
dimensões			B9	B9	B9	B9	B9	B9	B9	B9	B9	B9
geometria interna				D9	E1	F1	G9	H3	I9	J0	K0	C0
repetibilidade					D9	D9	D9	D9	I9	D9	D9	D9
precisão						E1	G9	H3	I9	E1	E1	E1
montagem							G9	H3	I9	J0	K0	L0
material								G9	I9	G9	G9	G9
fixação									I9	H3	H3	H3
análise empenos										I9	I9	I9
análise porosidades											J0	J0
engenharia inversa												K0
controle em ambiente fabril												

Figura 36- Matriz AHP da análise 2 - caso 2

Aqui é possível observar que a importância de algumas características variou, sendo neste caso as mais relevantes, por ordem, as dimensões, a análise de empenos, a repetibilidade, a maleabilidade e o material. Assim, ao selecionar a análise de empenos, passa de uma contagem de 0 para 90, assumindo uma importância bastante alta face a outras características (tabela 25).

Tabela 25- Contagem e ponderação da matriz AHP da análise 2 do caso 2

	Contagem	Ponderação
A	72	16,78
B	99	23,07
C	0	0
D	81	18,88
E	5	1,16
F	1	0,23
G	63	14,68
H	18	4,19
I	90	20,97
J	0	0
K	0	0
L	0	0

Assim, enquanto primeiramente o vídeo será o equipamento ideal, onde soma 732 valores, tal não seria para a análise de empenos, sendo o equipamento mais adequado o CT com 686 valores.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

6 Conclusões e trabalhos futuros

Para a elaboração de um programa como o desenvolvido ao longo deste projeto há que ter em conta diversas vertentes, desde a informação a utilizar, a metodologia, a seleção dos itens mais relevantes, o que irá permitir fazer distinção entre os diversos parâmetros e a apresentação.

Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível adquirir mais e melhores conhecimentos ao nível dos equipamentos utilizados para controlo dimensional e engenharia inversa, bem como de ferramentas de seleção.

Inicialmente a ideia surgiu aquando da interação com pessoas que, apesar do seu conhecimento de causa sobre as técnicas, não faziam ideia de como se procederia à análise. Assim, para que este problema fosse solucionado, surgiu a ideia de criar uma interface, que, por meio do interessado, permitisse ter uma noção de qual o equipamento mais adequado para realizar um determinado tipo de controlo.

Para que fosse possível começar a desenvolver o algoritmo do programa, foi necessário aprofundar os conhecimentos sobre cada equipamento escolhido, tendo sido realizada uma pesquisa que permitiu encontrar características comuns e outras únicas de entre as especificações dos equipamentos.

A implementação do QFD foi fundamental para definir a maior ou menor aptidão de cada equipamento face às necessidades do controlo a realizar, seja este de natureza dimensional, realizado em ambiente fabril ou laboratório, entre outros.

Por forma a tornar este programa intuitivo, fiável e para que os resultados fossem completamente sustentados, foi implementada a metodologia AHP. Esta metodologia permite a escolha das características e estruturação das ponderações com base nas escolhas disponíveis no programa. A metodologia AHP foi a selecionada, uma vez que mostrou uma maior adequabilidade face ao objetivo pretendido, sendo mais simples e fácil de aplicar do que o método DEA que gera vários resultados viáveis ou o TOPSIS que requer inúmeras iterações. O ambiente de desenvolvimento escolhido para o programa foi o Microsoft Excel pela sua versatilidade na manipulação de dados, recorrendo-se a macros ou sub-rotinas de programação, programadas em VBA, para automatizar tarefas.

A ideia inicial passou pelo preenchimento manual da matriz, tornando-se esta ideia completamente inviável, visto que, além do exaustivo trabalho e tempo, não seria clara, nem funcional para a definição do equipamento.

Posteriormente surgiu a ideia de interligar o programa por meio de macros com o preenchimento automático da matriz. A implementação da metodologia AHP revelou várias dificuldades, sobretudo no que se refere à interligação o programa com o preenchimento automático da matriz, realizado de forma transparente para o utilizador. Desta forma foi então possível criar uma interface com vários códigos subentendidos e que ao serem preenchidos de uma determinada forma, permitiam o preenchimento automático das células da matriz. Contudo, as características inicialmente selecionadas não foram todas aplicadas, uma vez que eram demasiadas e tornavam o programa demasiado exaustivo e pouco intuitivo.

Após a criação do diagrama com todas as características a serem utilizadas, foi então possível avaliar também a sua importância em cada equipamento e assim criar uma tabela onde as ponderações entrariam.

Na fase de testes do programa, surgiram problemas nos resultados devido ao facto de não serem os mais adequados face às características selecionadas. Este problema foi solucionado com a integração de uma tabela de condicionantes com alguns valores atribuídos nas dimensões, análise de porosidades, geometria interna sem corte e controlo em ambiente fabril.

Assim, após todos os ajustes necessários, foi possível obter um programa intuitivo, onde qualquer indivíduo com o mínimo conhecimento técnico pode fazer uso do mesmo e obter uma noção de qual equipamento escolher. No caso de ser pretendida uma futura aquisição, o programa é útil para listar os equipamentos viáveis ao controlo dimensional/engenharia inversa dos objetos e assim permitir ao indivíduo procurar adquirir um equipamento dentro dos resultados obtidos, por outro lado, caso se recorra a um laboratório especializado, poderá ter uma noção de como será realizada a avaliação. Com isto, é possível concluir que os objetivos inicialmente propostos foram conseguidos com sucesso. A utilização do programa permite determinar o que é mais importante para o utilizador e obter como resultado a classificação dos equipamentos mais adequados.

O programa desenvolvido adequa-se às necessidades especificadas e resolve o problema de escolha de equipamento adequado face às características impostas, tendo este sido testado com exemplos reais e como foi possível verificar, os resultados obtidos foram fiáveis.

No que diz respeito a trabalhos futuros, a metodologia implementada no programa desenvolvido é uma plataforma aberta e apta para adição de novas funcionalidades.

O programa elaborado não é de todo fechado, ou seja, foi elaborado tendo por base os equipamentos atuais e os mais utilizados em Portugal, contudo, esta evolução é constante e o programa ficaria rapidamente obsoleto se não puder ser atualizado.

Uma das opções para trabalhos futuros é a possível adaptação do programa para funcionar com uma KDB (*Knowledge DataBase*) realizada e assim atualizar os dados caso estes se tornem obsoletos ou não sejam os adequados à situação (equipamentos mais utilizados noutra país podem ser diferentes e por consequente as suas características serão diferentes).

O alargamento da aplicação da tabela de condicionantes deverá ser estudado em detalhe para avaliar eventuais resultados inviáveis e prevenir que estes voltem a ocorrer. As características, no futuro, podem ser consideradas de forma diferente, pelo que a macro no anexo III permite ter conhecimento de como o programa foi elaborado e serve de suporte ao desenvolvimento de um outro programa, tendo por base o executado neste projeto.

Os dados característicos impostos no programa elaborado, como as gamas de dimensões ou as gamas de tolerâncias são fixos, ou seja, não permitem ao utilizador alterá-los. Contudo, considerando por exemplo os diversos volumes de equipamentos existentes no mercado, este programa pode ser desenvolvido de forma a selecionar um intervalo ou até mesmo no final revelar a gama de volumes existentes e com isto conceder ao utilizador uma escolha ainda mais vasta de equipamentos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Bibliografia

- Abreu, F. d. (1997). QFD - Desdobramento da função qualidade - estruturando a satisfação do cliente. *Revista de Administração de Empresas*, 37, 47-55.
- Alibaba. (2017). *Peças de automóvel jig e fixação design, auto peças de gabaritos de soldagem e acessórios fabricante*. Obtido em 06 de Agosto de 2017, de Alibaba: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail-img/pe-as-de-autom-vel-jig-e-fix-a-design-auto-pe-as-de-gabaritos-de-soldagem-e-acess-rios-fabricante-60209604112.html>
- Bloch, S. (Junho de 2011). Multisensor metrology comes of age. *Quality Magazine*, 50, pp. 29-33.
- BRIDGES, B. (2017). *How Laser Trackers Work*. Obtido em 27 de Janeiro de 2017, de Quality Digest: <https://www.qualitydigest.com/inside/twitter-ed/how-laser-trackers-work.html#>
- Company, G. E. (2016). phoenix v|tome|x m. pp. 1-3.
- Faro. (2013). Faro Edge Scan Arm. *Faro Edge*, pp. 1-2.
- Faro. (2013). Faro Laser Tracker Vantage. *Faro Laser Tracker*, pp. 1-2.
- Faro. (2017). *Faro Arm*. Obtido em 20 de Janeiro de 2017, de Faro: <http://www.faro.com/pt-br/produtos/factory-metrology/faroarm/>
- Faro. (2017). *Faro Laser Tracker*. Obtido em 27 de Janeiro de 2017, de Faro: <http://www.faro.com/pt-br/produtos/metrologia/faro-laser-tracker/visao-geral>
- Faro. (2017). *Faro Scan Arm*. Obtido em 20 de Janeiro de 2017, de Faro: <http://www.faro.com/pt-br/produtos/factory-metrology/faro-scanarm/>
- Fleißner, M., Helmecke, E., & Hausotte, T. (2014). *Uncertainty of Dimensional Measurements using*. Erlangen: FAU.
- Granemann, S. R., & Gartner, I. R. (1996). *Seleção de Financiamento para Aquisição de Aeronaves: Aplicação de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão*. Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Han, K. (1997). *Automatic knowledge database generation for classifying objects and systems therefor*. California: KLA-Tencor Corporation.
- Hiller, J., Genta, G., Barbato, G., Chiffre, L. D., & Levi, R. (2014). Measurement Uncertainty Evaluation in Dimensional. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING*, 617-622.
- Hopkins, D. J. (2012). Radian. *Radian*, 1.
- Junior, F., Osiro, L., & Carpinetti, L. (2014). A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing*, 194-209.

- Kupiec, M. (2012). COORDIANATE MEASURMENT SYSTEMS CMM AND CMA – CHARACTERISTC AND METHODS OF THEIR ACCURACY EVALUATION. *Advances in Science and Technology Research Journal* , 18-23.
- Ltd., A. (2017). *Axiom too CNC CMM*. Obtido em 28 de Setembro de 2017, de Aberlink: <https://www.aberlink.com/products/cmm/axiom-too-cnc/>
- Marques, F. J. (2009). *CONTROLO DE QUALIDADE EM TOMOGRAFIA COMPUTORIZADA*. Lisboa: Universidade de Lisboa.
- Mendes, L. P. (2013). *ANÁLISE DOS MÉTODOS DE SELEÇÃO DE FORNECEDORES*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Neto, J. C. (2013). *Metrologia e Controle Dimensional*. Elsevier.
- NV, N. M. (2017). *iNEXIV VMA-2520 - High-speed, high accuracy benchtop video measuring system*. Obtido em 28 de Setembro de 2017, de Nikon: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/inexiv-vma-2520>
- OGP. (2017). *SmartScope ZIP Systems*. Obtido em 12 de Fevereiro de 2017, de OGP: <https://www.ogpnet.com/north-america/systems/video-multisensor/smartscope-zip/index>
- Quality Vision International, I. (2017). *SmartScope ZIP 250*. Obtido em 28 de Setembro de 2017, de OGP: <https://www.ogpnet.com/north-america/systems/video-multisensor/smartscope-zip/smartscope-zip-250/index>
- Renishaw. (2017). *Suporte de fixação*. Obtido em 07 de Março de 2017, de Renishaw: <http://www.renishaw.com/media/img/gen/e55a8abfec0f48b2adef38a95a02095b.jpg>
- Saaty, T. L. (1994). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 83-98.
- Schmidt, A. M. (1995). *Processo de apoio à tomada de decisão Abordagens AHP e Macbeth*.
- Sousa, C. (2008). *Categorias da metrologia*. Porto: CATIM.
- subsidiaries, H. A. (2017). *GLOBAL Performance*. Obtido em 28 de Setembro de 2017, de Hexagon: <http://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/global-performance>
- Technologies, K. (2017). *Ace measuring arm , portable CMM*. Obtido em 28 de Setembro de 2017, de Kreon: <https://kreon3d.com/scanning-arms-portable-cmm/ace-measuring-arm-portable-cmm/>
- Vargas, L. G. (1990). An Overview of the Analytic Hierarchy Process and Its Applications. *European Journal of Operational Research*, v. 48, p. 2-8.

Verwyns, B. (Maio de 2010). Scanning interferometry Advances measurement. *Quality magazine*, 49, 20.

Wenzel. (2017). *Xtreme Bridge CMMs*. Obtido em 10 de Janeiro de 2017, de Web site de Wenzel: <http://usedcmm.net/xtreme-bridge-cmm.aspx>

Zeiss, C. (2017). *Metrotom. The Revolution in Metrology*. 1-12. Germany: Carl Zeiss.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

Anexo I - *Datasheets* dos equipamentos

Anexo II - Desenhos das peças dos casos de estudo

Anexo III - Macros

Anexo I - Datasheets dos equipamentos

Kreon



Ace 7 axes

	Probing performance, Point repeatability	Probing performance, Volumetric accuracy	Scanning performance, Ace + Zephyr II blue	Scanning performance, Ace + Solano blue
ACE-7-20	0.022mm	0.032 mm	0.039 mm	0.047 mm
ACE-7-25	0.027 mm	0.038 mm	0.045 mm	0.053 mm
ACE-7-30	0.042 mm	0.051 mm	0.058 mm	0.066 mm
ACE-7-35	0.054 mm	0.062 mm	0.069 mm	0.077 mm
ACE-7-40	0.069 mm	0.074 mm	0.081 mm	0.089 mm
ACE-7-45	0.078 mm	0.089 mm	0.096 mm	0.104 mm

Faro Braço

FARO Edge ScanArm® ES

www.faro.com



FARO Laser Line Probe Specifications

Accuracy:	±35µm (±0.0014")	Points per line:	752 points/line
Repeatability:	35µm, 2σ (0.0014")	Scan rate:	60 frames/second x 752 points/line = 45,120 points/sec.
Stand-off:	80mm (3.15")	Laser:	660nm, CDRH Class II/IEC Class 2M
Depth of field:	85mm (3.35")	Weight:	222.4g (0.49lbs.)
Effective scan width:	Near field 53mm (2.09") Far field 90mm (3.5")		

Performance Specifications

Contact			
Measurement Range (m/ft)	Repeatability* (mm/inch)	Accuracy** (mm/inch)	FaroArm Weight (kg/lbs.)
	7 axes	7 axes	7 axes
Edge 1.8 6	0.024 0.0009	±0.034 ±0.0013	10.7 23.6
Edge 2.7 9	0.029 0.0011	±0.041 ±0.0016	10.9 24.1
Edge 3.7 12	0.064 0.0025	±0.091 ±0.0035	11.3 24.9

FaroArm test methods - (Test methods are a subset of those given in the B89.4.22 standard.)
 *Single point articulation performance test (Max-Min)/2: The probe of the FaroArm is placed within a conical socket, Q and individual points are measured from multiple approach directions. Each individual point measurement is analysed as a range of deviations in X, Y, Z. This test is a method for determining articulating measurement machine repeatability.
 **Volumetric maximum deviation: Determined by using traceable length artifacts, which are measured at various locations and orientations throughout the working volume of the FaroArm. This test is a method for determining articulating measurement machine accuracy.

Hexagon

Measuring Range (in mm)		
X	Y	Z
500	500 - 700	500
700	700 - 1000	500 - 660
900	1200 - 1500 - 2000	800
1200	1500 - 2200 - 3000	1000
Accuracy: MPE _E = from 1.5 + L/333 µm		

- First class accuracy and dynamics
- State-of-the-art scanning throughput
- Wide range of tactile and non-contact sensors for a multitude of applications
- PC-DMIS Adaptive Scanning to reach best scanning performance by a few clicks
- All-aluminium ultra-rigid frame
- Patented TRICISION design with triangular cross section which provides optimum stiff-to-mass ratio for unquestioned precision and long-term stability
- High-rigidity large-section Z spindle optimises the use of vertically extended tooling
- High-resolution scales
- One-piece table construction, patented dovetail guideways are precision-machined in granite to improve accuracy and repeatability
- Ergonomic and intuitive-to-use icon-based Universal JogBox, optional PC-DMIS interactivity for optimised workflow operations
- CLIMA structural temperature compensation (16 - 26 °C)
- No step access to working area from all sides
- Minimum footprint for easy fit in tight spaces

Aberlink

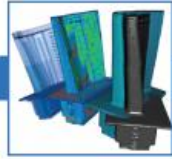
Axis Travel (mm)	X 640 Y 600, 900, 1200, 1500 Z 500
Overall Size (mm)	X 1130 Y 900, 1200, 1500, 1800 Z 2320
*Volumetric Accuracy	TP20 (2.4 + 0.4L/100) µm TP200 (2.3 + 0.4L/100) µm SP25M (2.1 + 0.4L/100) µm
Scale Resolution	0.5µm
**Optimum Temp Range	18 - 22°C
Operational Temp Range	0 - 45°C
Table	Honeycomb aluminium & granite or solid granite
Table Load Capacity	300kg (Honeycomb) or 500kg (Solid)
Max. Velocity Vector	600mm/sec
Max. Acceleration Vector	600mm/sec ²
Air Consumption	50 l/min (1.8 cfm)
Required Air Pressure	4 bar (60 psi)

OGP

XYZ Stage Travel:	300 x 150 x 200 mm
Area Accuracy:	(1.8 + 6L/1000) μm
Z Accuracy:	up to (1.4 + 5L/1000) μm

Nikon

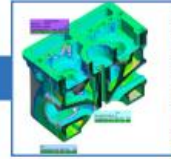
Stroke (X x Y x Z)	250 x 200 x 200 mm (10 x 8 x 8")
Minimum readout	0.1 μm
Maximum workpiece weight	15 kg (up to 5 kg accuracy guaranteed)
MPE *	XY MPEE1: 2+8L/1000 μm XY MPEE2: 3+8L/1000 μm Z MPEE1: 3+L/50 μm
Camera	1/3-in. 3CCD color Progressive scan (B/W optional)
Working distance	73.5 mm (63 mm with LAF)
Magnification	Optical: 0.35 to 3.5x On screen: 12 to 120x (with 17" monitor at SXGA resolution)
FOV size	13.3 x 10 to 1.33 x 1 mm
Auto focus	Vision AF and optional Laser AF
Illumination	
Contour Illumination	White LED illumination
Surface Illumination	White LED illumination
Oblique Illumination	8-segment white LED ring
Video resolution	640 x 480 (pixels)
Touch probe	Renishaw® TP200/TP20 (option)
Power source	100-240 V, 50/60 Hz
Power consumption	5-2.5 A (excluding power consumption of host computer and its peripherals)
Dimensions & weight	
Main body (W x D x H)	565 x 690 x 740 mm (minimum height), 72 kg
Controlle	145 x 400 x 390 mm, 13 kg
Table for main body (option)	600 x 700 x 825 mm, 38 kg
Recommended workbench	Min. load capacity 1000kg or more
Temperature	10 to 35°C
Humidity	70% or less



3D analyses of a scanned turbine blade.



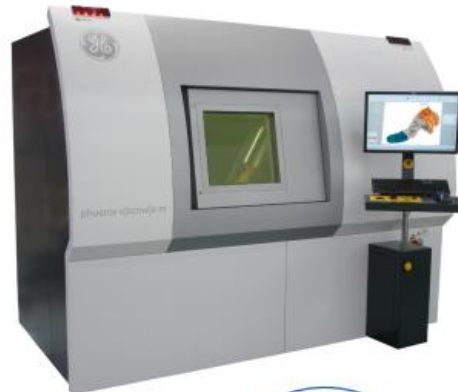
Automatic pore volume analysis in an aluminum casting.



3D measurements and nominal-actual CAD comparison on an aluminum cylinder head.

Key features & benefits

- scatter|correct: Highly improved CT quality level compared to conventional microfocus cone beam CT
- high-flux|target: Maintain high image quality and scan much faster, or with improved accuracy
- dynamic 41|100 detector: Doubled CT resolution at same scanning time or doubled throughput at same quality level compared to state of the art 200 μm pitch DXR detectors
- Unique dual|tube configuration for high power μCT as well as high resolution nanoCT[®]
- metrology|edition for precision measurements with up to 4+L/100 μm referring to VDI 2630 guideline*
- Optional production|edition for fully automated high throughput CT inspection
- Max. sample size up to 500 mm \varnothing x 600 mm in height; 3D scanning area max. 290 mm \varnothing x 400 mm; up to 50 kg (110 lbs.)



Zeiss

Key features



Comprehensive design

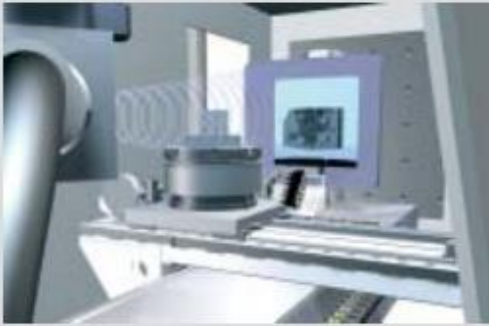
- 3D computer tomography with micro-focus x-ray tubes and detector
- Rotary table for clamping device and positioning device from Carl Zeiss

Safe technology

- Full-protection enclosure
- Meets radiation protection regulations in accordance with DIN 54113 for full-protection devices (0.5 mr/h on external skin) of this type
- Ergonomic design (unique loading position)



Machine technology



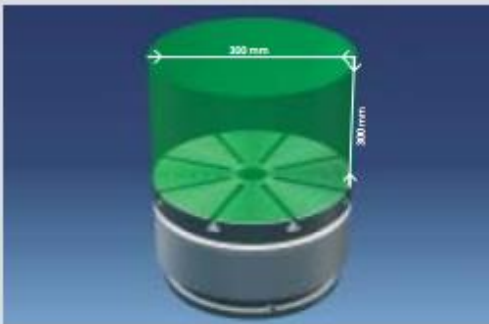
Proven linear technology

- In-house machine components related to precision
- Compensation of guideway errors (CAA corrected)

Original Carl Zeiss Rotary Table

- Rotary table with direct drive
- In-house air bearings
- Resolution: 0.036"
- Max. load (centric): 500 N

Measuring range



Optimum measuring range

- 300 x 300 x 300 mm

Inspectable materials

- Dependent on the amount of total material thicknesses and composition
- Plastics up to 250 mm thick
- Light metal alloys up to 120 mm thick (Al, Mg)
- Model construction materials up to 200 mm thick (plaster, wood, bakelite, resin and sand cores)
- Ceramics and compound materials (depending on the density, porosity and composition)
- Steel (Metrotomography* up to 10 mm, defect checks up to 15 – 18 mm)

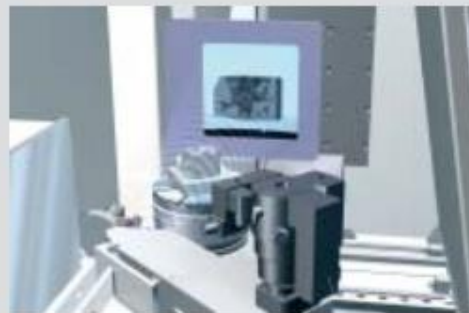
Sensor systems

Micro-focus x-ray tubes

- High voltage: 10 – 225 keV
- Tube power: 5 – 3000 μ A
- Target performance: 320 W max.
- Angle of reflected beam: 50° conical
- Angle of useful beam: 30° conical
- Size of focal point: > 7 μ m

Flatbed detector:

- Detector system with extremely high sensitivity
- 1024 x 1024 pixels at 400 μ m² for 3D-CT
- Low distortion, digital radioscopy



Operation

Simple and safe

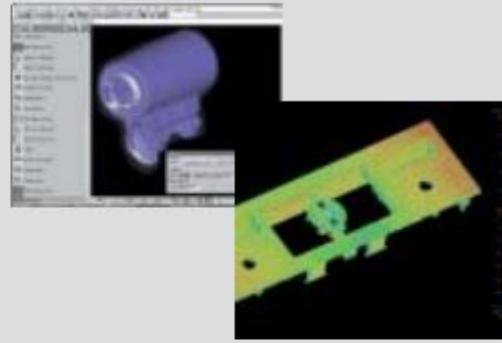
- Doors close automatically as soon as measurement starts
- Easy-to-understand operation and advanced ergonomic design
- Operator never has to enter the measuring area
- Metrology evaluation in a familiar software environment
- Minimal training required



Software

Easy-to-use, precise software

- New technology, known evaluation environment: Calypso
- All evaluation possibilities: testing and measuring with Calypso, reverse engineering and geometry comparison
- Unique: automatic recognition of cavities
- Analysis separate from the machine
- Already generated protocols can be reused with Calypso



Precision

Optimum accuracy

- Unparalleled precise results for internal and external geometries
- Accurate with most aluminum, plastic and elastomer applications
- Exact verification of accuracy after a GR&R (Gage Repeatability & Reproducibility) measurement on a workpiece



With a ZEISS METROTOM computed tomograph, you can successfully perform measuring and inspection jobs yourself with only one X-ray scan.

> **ZEISS METROTOM** - Measure and evaluate entire components with X-Ray-Technology.

Resolution: 3.5 - 6 μm

Accuracy: Down to 2.9 μm + L/100 Sphere center point error

Faro Tracker

System Specifications	
Dimensions	
Head size: (w x h):	224mm x 416mm
Head weight:	12.6kg
Controller size (l x d x h):	290 x 158 x 214mm without filters 316 x 158 x 214mm with filters
Controller weight:	4.8kg
Range	
Horizontal envelope:	360° - Infinite rotation
Vertical envelope:	130° (+77.9° to -52.1°)
Minimum working range:	0m
Maximum working range:	80m* with selected targets & 10°C and 35°C temperature range 60m with standard 1.5" & 7/8" SMRs 30m with standard 1/2" SMR
MultiView Cameras	
Field of view:	30°
Single Point Repeatability	
25 points at 1.6m:	8µm
Environmental	
Altitude:	-700m to 9,000m****
Humidity:	0 to 95% non-condensing
Operating temperature:	-15°C to 50°C
Laser Emission**	
	653-663nm Laser, 1 milliwatt max/cw, Class II Laser Product
Distance Measurement Performance***	
TruADM	
Resolution:	0.5µm
Sample rate:	16,000 points/sec
Accuracy (MPE):	1.6µm + 0.8µm/m
R0 parameter (MPE):	1.6µm
Max radial acceleration:	30m/sec ²
Max radial velocity:	>25m/sec
Angle Measurement Performance***	
Angular accuracy (MPE):	20µm + 5µm/m
Maximum angular velocity:	180°/sec
Precision level accuracy:	±2 arcseconds
Max angular acceleration:	860°/sec ²

API

Parameter	Specification
Range of Measurements	
Linear Range (Diameter):	100 m (328 ft)
<i>Also Available:</i>	40 m (132 ft) 160+ m (526+ ft)
System Performance	
Azimuth Range:	± 320° (640° end to end)
Elevation Range:	+ 79° / -60°
Angular Resolution:	± 0.018 arc seconds
Angular Accuracy:	3.5 µm/m
System Resolution:	0.1 µm (0.0000039 in)
Maximum Lateral Target Speed:	6 m/sec (20 ft/sec)
Maximum Acceleration:	> 2 g
Internal Level Accuracy:	±2 arc-second
Accuracy	
Static Measurement (IFM):	±10 µm or 5 ppm (2 sigma) <i>whichever is greater</i>
Laser	
HeNe Laser (IFM):	Class II (eye safe)
Resolution:	0.08 µm (0.0000031 in)
Accuracy:	Better Than ±0.5 ppm
IR Laser (ADM-Maxx™):	Class I (eye safe)
Resolution:	0.1 µm (0.0000039 in)
Lock-on Accuracy:	±10 µm (±0.00039 in) or 1 ppm <i>whichever is greater</i>

Environmental	
Operating Temperature:	-10° C to > 45° C (14° F to > 113° F)
Storage Temperature:	-10° C to 60° C (14° F to 140° F)
Barometric Pressure:	225 mmHg - 900 mmHg
Relative Humidity:	0-100% non-condensing
Altitude:	3000 m (9842.49 ft)
I-Vision™	
Working Range:	0 - 25 m (0 - 82 ft) (typical)
Field of Vision:	30° (diagonal)
Dimensions	
Tracker Weight:	9 kg (19.8 lb)
Tracker Size:	177 mm x 177 mm x 355 mm (7 in x 7 in x 14 in)
Controller Weight:	3.2 kg (7 lb)
Controller Size:	110 mm x 160 mm x 310 mm (4.3 in x 6.3 in x 12.2 in)
	EN0512

Anexo III – Macros

'material

Dim count As Integer

'Check for multiple checkboxes

Application.ScreenUpdating = False

Sheets("AHP").Visible = True

Sheets("AHP").Select

If UserForm1.CheckBox1 = True Then

count = count + 1

End If

If UserForm1.CheckBox2 = True Then

count = count + 1

End If

If UserForm1.CheckBox3 = True Then

count = count + 1

End If

If UserForm1.CheckBox4 = True Then

count = count + 1

End If

If count > 1 Then

Application.ScreenUpdating = False

Sheets("AHP").Visible = True

Sheets("AHP").Select

Dim a As Integer

For a = 9 To 13

If Cells(10, a).Value = "" Then

Cells(10, a).Value = "G1"

Else

If onlyDigits(Cells(10, a).Value) > 1 Then

Else

Cells(10, a).Value = "G1"

End If

End If

Next a

Application.ScreenUpdating = False

Sheets("AHP").Visible = True

Sheets("AHP").Select

Dim b As Integer

For b = 4 To 9

If Cells(b, 8).Value = "" Then

Cells(b, 8).Value = "G1"

Else

If onlyDigits(Cells(b, 8).Value) > 1 Then

Else

Cells(b, 8).Value = "G1"

End If

End If

Next b

Else

Application.ScreenUpdating = False

Sheets("AHP").Visible = True

Sheets("AHP").Select

Dim c As Integer

For c = 9 To 13

If Cells(10, c).Value = "" Then

Cells(10, c).Value = "G9"

```

Else
If onlyDigits(Cells(10, c).Value) > 9 Then
Else
Cells(10, c).Value = "G9"
End If
End If
Next c

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim d As Integer
For d = 4 To 9
If Cells(d, 8).Value = "" Then
Cells(d, 8).Value = "G9"
Else
If onlyDigits(Cells(d, 8).Value) > 9 Then
Else
Cells(d, 8).Value = "G9"
End If
End If
Next d
End If

```

'maleabilidade pouco

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton4.Value = True Then
Dim e As Integer
For e = 3 To 13
If Cells(4, e).Value = "" Then
Cells(4, e).Value = "A9"
Else
If onlyDigits(Cells(4, e).Value) > 9 Then
Else
Cells(4, e).Value = "A9"
End If
End If
Next e
End If

```

'maleabilidade - maleável

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton5.Value = True Then
Dim f As Integer
For f = 3 To 13
If Cells(4, f).Value = "" Then
Cells(4, f).Value = "A3"
Else
If onlyDigits(Cells(4, f).Value) > 3 Then
Else
Cells(4, f).Value = "A3"
End If
End If
Next f
End If

```

'maleabilidade - muito

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton6.Value = True Then
Dim g As Integer
For g = 3 To 13
If Cells(4, g).Value = "" Then
Cells(4, g).Value = "A1"
Else
If onlyDigits(Cells(4, g).Value) > 1 Then
Else
Cells(4, g).Value = "A1"
End If
End If
Next g
End If
```

'peças montadas

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton16.Value = True Then
Dim h As Integer
For h = 8 To 13
If Cells(9, h).Value = "" Then
Cells(9, h).Value = "F9"
Else
If onlyDigits(Cells(9, h).Value) > 9 Then
Else
Cells(9, h).Value = "F9"
End If
End If
Next h
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim i As Integer
For i = 4 To 8
If Cells(i, 7).Value = "" Then
Cells(i, 7).Value = "F9"
Else
If onlyDigits(Cells(i, 7).Value) > 9 Then
Else
Cells(i, 7).Value = "F9"
End If
End If
Next i
End If
```

'peças não montadas

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton17.Value = True Then
Dim j As Integer
For j = 8 To 13
If Cells(9, j).Value = "" Then
Cells(9, j).Value = "F0"
Else
```

```

If onlyDigits(Cells(9, j).Value) > 0 Then
Else
Cells(9, j).Value = "F0"
End If
End If
Next j
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim k As Integer
For k = 4 To 8
If Cells(k, 7).Value = "" Then
Cells(k, 7).Value = "F1"
Else
If onlyDigits(Cells(k, 7).Value) > 1 Then
Else
Cells(k, 7).Value = "F1"
End If
End If
Next k
End If

```

fixação

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.ComboBox4.Value = "Sem fixação" Then
Dim l As Integer
For l = 10 To 13
If Cells(11, l).Value = "" Then
Cells(11, l).Value = "H0"
Else
If onlyDigits(Cells(11, l).Value) > 0 Then
Else
Cells(11, l).Value = "H0"
End If
End If
Next l
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim m As Integer
For m = 4 To 10
If Cells(m, 9).Value = "" Then
Cells(m, 9).Value = "H0"
Else
If onlyDigits(Cells(m, 9).Value) > 0 Then
Else
Cells(m, 9).Value = "H0"
End If
End If
Next m
Else

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.ComboBox4.Value = "Gabarit" Then
Dim n As Integer
For n = 10 To 13

```

```

If Cells(11, n).Value = "" Then
Cells(11, n).Value = "H9"
Else
If onlyDigits(Cells(11, n).Value) > 9 Then
Else
Cells(11, n).Value = "H9"
End If
End If
Next n
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim o As Integer
For o = 4 To 10
If Cells(o, 9).Value = "" Then
Cells(o, 9).Value = "H9"
Else
If onlyDigits(Cells(o, 9).Value) > 9 Then
Else
Cells(o, 9).Value = "H9"
End If
End If
Next o
Else

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.ComboBox4.Value = "Kit de fixação" Then
Dim p As Integer
For p = 10 To 13
If Cells(11, p).Value = "" Then
Cells(11, p).Value = "H3"
Else
If onlyDigits(Cells(11, p).Value) > 3 Then
Else
Cells(11, p).Value = "H3"
End If
End If
Next p
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim q As Integer
For q = 4 To 10
If Cells(q, 9).Value = "" Then
Cells(q, 9).Value = "H3"
Else
If onlyDigits(Cells(q, 9).Value) > 3 Then
Else
Cells(q, 9).Value = "H3"
End If
End If
Next q
End If
End If
End If

```

'repetibilidade

```
Application.ScreenUpdating = False
```

```

Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.TextBox1.Value <= 1 Then
Dim r As Integer
For r = 6 To 13
If Cells(7, r).Value = "" Then
Cells(7, r).Value = "D1"
Else
If onlyDigits(Cells(7, r).Value) > 1 Then
Else
Cells(7, r).Value = "D1"
End If
End If
Next r

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim s As Integer
For s = 4 To 6
If Cells(s, 5).Value = "" Then
Cells(s, 5).Value = "D1"
Else
If onlyDigits(Cells(s, 5).Value) > 1 Then
Else
Cells(s, 5).Value = "D1"
End If
End If
Next s
Else

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim t As Integer
For t = 6 To 13
If Cells(7, t).Value = "" Then
Cells(7, t).Value = "D9"
Else
If onlyDigits(Cells(7, t).Value) > 9 Then
Else
Cells(7, t).Value = "D9"
End If
End If
Next t

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim u As Integer
For u = 4 To 6
If Cells(u, 5).Value = "" Then
Cells(u, 5).Value = "D9"
Else
If onlyDigits(Cells(u, 5).Value) > 9 Then
Else
Cells(u, 5).Value = "D9"
End If
End If
Next u

```

End If

'precisão

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.ComboBox3.Value = "<0,03mm" Then
Dim v As Integer
For v = 7 To 13
If Cells(8, v).Value = "" Then
Cells(8, v).Value = "E9"
Else
If onlyDigits(Cells(8, v).Value) > 9 Then
Else
Cells(8, v).Value = "E9"
End If
End If
Next v
```

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim w As Integer
For w = 4 To 7
If Cells(w, 6).Value = "" Then
Cells(w, 6).Value = "E9"
Else
If onlyDigits(Cells(w, 6).Value) > 9 Then
Else
Cells(w, 6).Value = "E9"
End If
End If
Next w
Else
```

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.ComboBox3.Value = "0,03 a 0,04mm" Then
Dim x As Integer
For x = 7 To 13
If Cells(8, x).Value = "" Then
Cells(8, x).Value = "E3"
Else
If onlyDigits(Cells(8, x).Value) > 3 Then
Else
Cells(8, x).Value = "E3"
End If
End If
Next x
```

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim y As Integer
For y = 4 To 7
If Cells(y, 6).Value = "" Then
Cells(y, 6).Value = "E3"
Else
If onlyDigits(Cells(y, 6).Value) > 3 Then
```

```

Else
Cells(y, 6).Value = "E3"
End If
End If
Next y
Else

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.ComboBox3.Value = ">0,04mm" Then
Dim z As Integer
For z = 7 To 13
If Cells(8, z).Value = "" Then
Cells(8, z).Value = "E1"
Else
If onlyDigits(Cells(8, z).Value) > 1 Then
Else
Cells(8, z).Value = "E1"
End If
End If
Next z

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim aa As Integer
For aa = 4 To 7
If Cells(aa, 6).Value = "" Then
Cells(aa, 6).Value = "E1"
Else
If onlyDigits(Cells(aa, 6).Value) > 1 Then
Else
Cells(aa, 6).Value = "E1"
End If
End If
Next aa
End If
End If
End If

```

'análise empenos - sim

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton20.Value = True Then
Dim ab As Integer
For ab = 11 To 13
If Cells(12, ab).Value = "" Then
Cells(12, ab).Value = "I9"
Else
If onlyDigits(Cells(12, ab).Value) > 9 Then
Else
Cells(12, ab).Value = "I9"
End If
End If
Next ab

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True

```

```

Sheets("AHP").Select
Dim ac As Integer
For ac = 4 To 11
If Cells(ac, 10).Value = "" Then
Cells(ac, 10).Value = "I9"
Else
If onlyDigits(Cells(ac, 10).Value) > 9 Then
Else
Cells(ac, 10).Value = "I9"
End If
End If
Next ac
End If

```

'análise empenos não

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton21.Value = True Then
Dim ad As Integer
For ad = 11 To 13
If Cells(12, ad).Value = "" Then
Cells(12, ad).Value = "I0"
Else
If onlyDigits(Cells(12, ad).Value) > 0 Then
Else
Cells(12, ad).Value = "I0"
End If
End If
Next ad

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim ae As Integer
For ae = 4 To 11
If Cells(ae, 10).Value = "" Then
Cells(ae, 10).Value = "I0"
Else
If onlyDigits(Cells(ae, 10).Value) > 0 Then
Else
Cells(ae, 10).Value = "I0"
End If
End If
Next ae
End If

```

'dimensões

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.ComboBox1.Value = "< 300mm" Then
Dim af As Integer
For af = 4 To 13
If Cells(5, af).Value = "" Then
Cells(5, af).Value = "B9"
Else
If onlyDigits(Cells(5, af).Value) > 9 Then
Else
Cells(5, af).Value = "B9"

```

```

End If
End If
Next af
If Cells(4, 3).Value = "" Then
Cells(4, 3).Value = "B9"
Else
If onlyDigits(Cells(4, 3).Value) > 9 Then
Else
Cells(4, 3).Value = "B9"
End If
End If

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
Cells(17, 14).Value = "< 300mm"
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Else
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.ComboBox1.Value = "300 a 1000mm" Then
Dim ag As Integer
For ag = 4 To 13
If Cells(5, ag).Value = "" Then
Cells(5, ag).Value = "B3"
Else
If onlyDigits(Cells(5, ag).Value) > 3 Then
Else
Cells(5, ag).Value = "B3"
End If
End If
Next ag
If Cells(4, 3).Value = "" Then
Cells(4, 3).Value = "B3"
Else
If onlyDigits(Cells(4, 3).Value) > 3 Then
Else
Cells(4, 3).Value = "B3"
End If
End If

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
Cells(17, 14).Value = "300 a 1000mm"
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Else
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.ComboBox1.Value = ">1000mm" Then
Dim ah As Integer
For ah = 4 To 13
If Cells(5, ah).Value = "" Then
Cells(5, ah).Value = "B1"

```

```

Else
If onlyDigits(Cells(5, ah).Value) > 1 Then
Else
Cells(5, ah).Value = "B1"
End If
End If
Next ah
If Cells(4, 3).Value = "" Then
Cells(4, 3).Value = "B1"
Else
If onlyDigits(Cells(4, 3).Value) > 1 Then
Else
Cells(4, 3).Value = "B1"
End If
End If
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
Cells(17, 14).Value = ">1000mm"
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
End If
End If
End If

```

'controle em ambiente fabril sim

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton26.Value = True Then
Dim ai As Integer
For ai = 4 To 14
If Cells(ai, 13).Value = "" Then
Cells(ai, 13).Value = "L9"
Else
If onlyDigits(Cells(ai, 13).Value) > 9 Then
Else
Cells(ai, 13).Value = "L9"
End If
End If
Next ai
End If

```

'controle em ambiente fabril não

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton27.Value = True Then
Dim aj As Integer
For aj = 4 To 14
If Cells(aj, 13).Value = "" Then
Cells(aj, 13).Value = "L0"
Else
If onlyDigits(Cells(aj, 13).Value) > 0 Then
Else
Cells(aj, 13).Value = "L0"
End If
End If
Next aj

```

```

End If
Sheets("AHP").Visible = False
'geometria interna com corte
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton7.Value = True Then
Dim ak As Integer
For ak = 5 To 13
If Cells(6, ak).Value = "" Then
Cells(6, ak).Value = "C3"
Else
If onlyDigits(Cells(6, ak).Value) > 3 Then
Else
Cells(6, ak).Value = "C3"
End If
End If
Next ak
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim al As Integer
For al = 4 To 5
If Cells(al, 4).Value = "" Then
Cells(al, 4).Value = "C3"
Else
If onlyDigits(Cells(al, 4).Value) > 3 Then
Else
Cells(al, 4).Value = "C3"
End If
End If
Next al
End If

```

'geometria interna sem corte

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton32.Value = True Then
Dim am As Integer
For am = 5 To 13
If Cells(6, am).Value = "" Then
Cells(6, am).Value = "C9"
Else
If onlyDigits(Cells(6, am).Value) > 9 Then
Else
Cells(6, am).Value = "C9"
End If
End If
Next am
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim an As Integer
For an = 4 To 5
If Cells(an, 4).Value = "" Then
Cells(an, 4).Value = "C9"
Else
If onlyDigits(Cells(an, 4).Value) > 9 Then
Else

```

```

Cells(an, 4).Value = "C9"
End If
End If
Next an
End If

```

'geometria interna nao

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton8.Value = True Then
Dim ao As Integer
For ao = 5 To 13
If Cells(6, ao).Value = "" Then
Cells(6, ao).Value = "C0"
Else
If onlyDigits(Cells(6, ao).Value) > 0 Then
Else
Cells(6, ao).Value = "C0"
End If
End If
Next ao
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim ap As Integer
For ap = 4 To 5
If Cells(ap, 4).Value = "" Then
Cells(ap, 4).Value = "C0"
Else
If onlyDigits(Cells(ap, 4).Value) > 0 Then
Else
Cells(ap, 4).Value = "C0"
End If
End If
Next ap
End If
Sheets("AHP").Visible = False

```

'engenharia inversa sim

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton24.Value = True Then
If Cells(14, 13).Value = "" Then
Cells(14, 13).Value = "K9"
Else
If onlyDigits(Cells(14, 13).Value) > 9 Then
Else
Cells(14, 13).Value = "K9"
End If
End If
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim aq As Integer
For aq = 4 To 13
If Cells(aq, 12).Value = "" Then
Cells(aq, 12).Value = "K9"
Else

```

```

If onlyDigits(Cells(aq, 12).Value) > 9 Then
Else
Cells(aq, 12).Value = "K9"
End If
End If
Next aq
End If

```

'engenharia inversa não

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton25.Value = True Then
If Cells(14, 13).Value = "" Then
Cells(14, 13).Value = "K0"
Else
If onlyDigits(Cells(14, 13).Value) > 0 Then
Else
Cells(14, 13).Value = "K0"
End If
End If
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim ar As Integer
For ar = 4 To 13
If Cells(ar, 12).Value = "" Then
Cells(ar, 12).Value = "K0"
Else
If onlyDigits(Cells(ar, 12).Value) > 0 Then
Else
Cells(ar, 12).Value = "K0"
End If
End If
Next ar
End If

```

'análise porosidades sim

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton22.Value = True Then
Dim au As Integer
For au = 12 To 13
If Cells(13, au).Value = "" Then
Cells(13, au).Value = "J9"
Else
If onlyDigits(Cells(13, au).Value) > 9 Then
Else
Cells(13, au).Value = "J9"
End If
End If
Next au
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim av As Integer
For av = 4 To 12
If Cells(av, 11).Value = "" Then
Cells(av, 11).Value = "J9"

```

```

Else
If onlyDigits(Cells(av, 11).Value) > 9 Then
Else
Cells(av, 11).Value = "J9"
End If
End If
Next av
End If
Sheets("AHP").Visible = False

```

'análise porosidades não

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
If UserForm1.OptionButton23.Value = True Then
Dim aw As Integer
For aw = 12 To 13
If Cells(13, aw).Value = "" Then
Cells(13, aw).Value = "J0"
Else
If onlyDigits(Cells(13, aw).Value) > 0 Then
Else
Cells(13, aw).Value = "J0"
End If
End If
Next aw
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("AHP").Visible = True
Sheets("AHP").Select
Dim ax As Integer
For ax = 4 To 12
If Cells(ax, 11).Value = "" Then
Cells(ax, 11).Value = "J0"
Else
If onlyDigits(Cells(ax, 11).Value) > 0 Then
Else
Cells(ax, 11).Value = "J0"
End If
End If
Next ax
End If

```

'continuação material

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.CheckBox5.Value = True Then
If Cells(21, 14).Value = "Compósito" Then
Else
If Cells(22, 14).Value = "Compósito" Then
Else
If Cells(23, 14).Value = "Compósito" Then
Else
If Cells(24, 14).Value = "Compósito" Then
Else
If Cells(21, 14).Value = "" Then
Cells(21, 14).Value = "Compósito"
Else
If Cells(22, 14).Value = "" Then
Cells(22, 14).Value = "Compósito"

```

```

Else
If Cells(23, 14).Value = "" Then
Cells(23, 14).Value = "Compósito"
Else
Cells(24, 14).Value = "Compósito"
End If
End If
End If
End If
End If
End If
End If

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.CheckBox6.Value = True Then
If Cells(21, 14).Value = "Polímero" Then
Else
If Cells(22, 14).Value = "Polímero" Then
Else
If Cells(23, 14).Value = "Polímero" Then
Else
If Cells(24, 14).Value = "Polímero" Then
Else
If Cells(21, 14).Value = "" Then
Cells(21, 14).Value = "Polímero"
Else
If Cells(22, 14).Value = "" Then
Cells(22, 14).Value = "Polímero"
Else
If Cells(23, 14).Value = "" Then
Cells(23, 14).Value = "Polímero"
Else
Cells(24, 14).Value = "Polímero"
End If
End If
End If
End If
End If
End If
End If

If UserForm1.CheckBox7.Value = True Then
If Cells(21, 14).Value = "Cerâmica" Then
Else
If Cells(22, 14).Value = "Cerâmica" Then
Else
If Cells(23, 14).Value = "Cerâmica" Then
Else
If Cells(24, 14).Value = "Cerâmica" Then
Else
If Cells(21, 14).Value = "" Then
Cells(21, 14).Value = "Cerâmica"
Else
If Cells(22, 14).Value = "" Then
Cells(22, 14).Value = "Cerâmica"
Else

```

```

If Cells(23, 14).Value = "" Then
Cells(23, 14).Value = "Cerâmica"
Else
Cells(24, 14).Value = "Cerâmica"
End If
End If
End If
End If
End If
End If
End If
End If

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.CheckBox8.Value = True Then
If Cells(21, 14).Value = "Metal" Then
Else
If Cells(22, 14).Value = "Metal" Then
Else
If Cells(23, 14).Value = "Metal" Then
Else
If Cells(24, 14).Value = "Metal" Then
Else
If Cells(21, 14).Value = "" Then
Cells(21, 14).Value = "Metal"
Else
If Cells(22, 14).Value = "" Then
Cells(22, 14).Value = "Metal"
Else
If Cells(23, 14).Value = "" Then
Cells(23, 14).Value = "Metal"
Else
Cells(24, 14).Value = "Metal"
End If
End If
End If
End If
End If
End If
End If
End If

```

'cor preto

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.OptionButton28.Value = True Then
Cells(18, 14).Value = "Preto"
Else
End If

```

'cor outro

```

Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.OptionButton29.Value = True Then
Cells(18, 14).Value = "Outra"
Else

```

End If

'brilhante

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.OptionButton34.Value = True Then
Cells(20, 14).Value = "Brilhante"
Else
End If
```

'muito brilhante

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.OptionButton13.Value = True Then
Cells(20, 14).Value = "Muito Brilhante"
Sheets("AHP").Visible = False
Else
End If
```

'baço

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.OptionButton15.Value = True Then
Cells(20, 14).Value = "Baço"
Else
End If
```

'opaca

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.OptionButton11.Value = True Then
Cells(19, 14).Value = "Opaca"
Else
End If
```

'transparente

```
Application.ScreenUpdating = False
Sheets("Programa").Visible = True
Sheets("Programa").Select
If UserForm1.OptionButton12.Value = True Then
Cells(19, 14).Value = "Transparente"
Else
End If
End Sub
```

'mensagem erro se campo não preenchido ou preenchido com texto em vez de número

```
Private Sub TextBox1_Exit(ByVal Cancel As MSForms.ReturnBoolean)
    If Not IsNumeric(Me.TextBox1.Value) Then
        MsgBox "Por favor, insira um número na quantidade da amostra."
        Cancel = True
    End If
Me.TextBox1.Visible = True
End Sub
```