



João Carlos Vicente Marto

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Avaliação da capacidade da Fusão Seletiva por Laser no fabrico de um componente metálico para a indústria automóvel

Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

setembro, 2023

Avaliação da capacidade da Fusão Seletiva por Laser no fabrico de um componente metálico para a indústria automóvel

Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

João Carlos Vicente Marto

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António José Freire Mourão

Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins

Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Doutor Valdemar Rebelo Duarte

Professor Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: Doutor António José Freire Mourão

Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da
Universidade NOVA de Lisboa

Membros: Engenheiro Armando Nelson Pedro da Silva

Engenheiro de Desenvolvimento, Hanon Systems Portugal

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

setembro, 2023

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Avaliação da capacidade da Fusão Seletiva por Laser no fabrico de um componente metálico para a indústria automóvel.

Copyright ©João Carlos Vicente Marto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família e aos meus amigos,

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor António Mourão, por todo o apoio dado ao longo da escrita da minha dissertação. O facto da minha dissertação ter acontecido num ambiente empresarial trouxe-me inúmeras vantagens, nomeadamente, o desenvolvimento de competências técnicas e sociais e, por isso, estou grato pela oportunidade dada.

Em segundo lugar, quero agradecer ao Engenheiro Armando Silva por todo o conhecimento transmitido e hospitalidade com que me recebeu. Quero também agradecer à Hanon Systems Portugal pela oportunidade que me deram e pela forma calorosa com que me receberam e integraram na empresa.

À minha família, quero deixar um agradecimento muito especial por me terem dado a possibilidade e todas as condições necessárias para atingir todos os meus objetivos académicos. Em particular aos meus pais e à minha irmã, sinto-me eternamente grato por tudo o que fizeram por mim e espero um dia poder retribuir toda a ajuda, amor e carinho que me deram durante esta etapa da minha vida.

Quero agradecer à minha namorada, Joana Babo, por todos os momentos passados nos últimos meses e acima de tudo pelo apoio e carinho incondicional que me deu.

Por último, mas não menos importante, quero deixar um grande abraço a todos os meus amigos que tiveram um papel fulcral nesta jornada. Quero agradecer a todos os elementos do grupo Alumina por todos os momentos vividos na faculdade e fora dela. Em especial, quero agradecer ao Daniel Amendoeira pela companhia e amizade que foi construída ao longo destes 5 anos. Ao Diogo Gonçalves, um grande abraço pelo apoio e companheirismo neste último ano de faculdade. E, ainda, um grande agradecimento ao meu amigo Pedro Almeida que sempre me acompanhou demonstrando-se disponível para ajudar em qualquer situação.

RESUMO

O fabrico aditivo ou impressão 3D tem sido a alternativa eleita para combater as novas exigências do mundo atual, uma vez que é um processo que possibilita o fabrico de peças com geometrias complexas reduzindo as etapas do processo de fabrico. O fabrico aditivo metálico destaca-se pela importância dos metais em indústrias como a indústria automóvel, que no paradigma atual, está a viver a uma grande revolução provocada pela transição de automóveis de combustão interna para automóveis híbridos e elétricos.

A presente dissertação tem como objetivo estudar a capacidade do fabrico aditivo metálico, em produzir peças, com aplicação na indústria automóvel, que cumprem os requisitos de projeto. Para este estudo foi utilizado um componente da estrutura externa de um compressor *scroll*, que é o tipo de compressor mais usual em sistemas de Ar Condicionado (A/C) em carros híbridos e elétricos. A metodologia usada consistiu na produção de peças por Fusão Seletiva por Laser, nomeadamente, a variante *Selective Laser Melting* (SLM), seguida da validação das mesmas segundo a sua geometria, integridade estrutural e funcionalidade.

Através dos resultados obtidos, foi possível verificar que as peças apresentavam integridade estrutural equivalente às peças produzidas pela metodologia de fabrico atual. Quanto à sua geometria, ocorreram alguns problemas traduzindo-se em incumprimento de tolerâncias dimensionais e geométricas. Contudo, as dificuldades encontradas não foram atribuídas à tecnologia de impressão 3D, mas sim aos parâmetros e condições de impressão utilizadas que, para este estudo, não foram controladas. A nível funcional, as peças não revelaram qualquer diminuição de performance em comparação com as peças produzidas pela metodologia de fabrico atual. Desta forma, conclui-se que a Fusão Seletiva por Laser tem capacidade de produzir peças que cumprem todos os requisitos de projeto, no entanto, um estudo intensivo tem de ser realizado com o intuito de melhorar os parâmetros utilizados.

Palavras-chave: Fabrico aditivo metálica; Fusão Seletiva por Laser (PBF); *Selective Laser Melting* (SLM); Avaliação tecnológica; Indústria automóvel.

ABSTRACT

Additive Manufacturing or 3D Printing has been the chosen alternative to tackle the new demands of the modern world, as it is a process that enables the manufacturing of high complexity parts, reducing steps in the manufacturing process. Metal Additive Manufacturing stands out for the importance of metals in industries such as the automotive industry, which, nowadays is seeing a huge revolution due to the transition of combustion engine cars to hybrid and electric cars.

The purpose dissertation aims to study the capability of metal Additive Manufacturing technology in manufacturing parts in the automotive industry that meet the design requirements. For this study, it was used a component of the external structure of a scroll compressor, which is the most common type of compressor used for air conditioning systems in hybrid and electric cars. The methodology used consisted in manufacturing parts through Powder Bed Fusion (PBF) technology, specifically Selective Laser Melting (SLM), followed by the validation of the parts' geometry, structural integrity and functionality.

Based on the results obtained, it was possible to see that the 3D printed parts exhibited structural integrity equivalent to the parts manufactured by the current manufacturing methodology. As for their geometry, there were some issues that meant non-compliance of some dimensional and geometry tolerances. However, the problems found were not attributed to the PBF technology itself, but to the printing parameters and printing conditions used that, in this study, were not controlled. Regarding functionality, the parts did not show any decreased in performance in comparison with the parts manufactured by the current manufacturing methodology. Thus, it was concluded that PBF technology has the capability to produce parts that meet the design requirements. However, an intensive study should be conducted in order to improve the parameters used.

Keywords: Metal Additive Manufacturing; Powder Bed Fusion (PBF); *Selective Laser Melting* (SLM); Technological Evaluation; Automotive Industry.

SIGLAS E ACRÓNIMOS

A/C	Ar Condicionado
ASTM	<i>American Society for Testing Material</i>
BJT	<i>Binder jetting</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CH	<i>Center housing</i>
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
DLMS	<i>Direct Laser Melting Sintering</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FS	<i>Fixed Scroll</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEX	<i>Material Extrusion</i>
MH	<i>Motor Housing</i>
MJT	<i>Material Jetting</i>
OS	<i>Orbiting Scroll</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion (Fusão Seletiva por Laser)</i>
PRV	Pressure Relief Valve
R&D	<i>Research and Development</i>
RH	<i>Rear Housing</i>
SHL	<i>Sheet Lamination</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>

SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
UTS	<i>Ultimate Tensile Strength</i>
VPP	<i>Vat Photopolymerization</i>

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ix
Resumo.....	xi
Abstract	xiii
Siglas e acrónimos.....	xv
Índice de figuras	xxi
Índice de tabelas	xxv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação e objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
2 Caso de estudo.....	5
2.1 Compressor <i>scroll</i>	5
2.1.1 Princípio de funcionamento.....	5
2.1.2 Componentes.....	5
2.2 Peça em estudo	7
2.2.1 Caracterização	7
2.2.1.1 Etapas do processo de produção e validação.....	10
2.2.2 Metodologia de fabrico atual.....	10
2.2.3 Especificações a cumprir.....	12
2.2.3.1 Introdução.....	12
2.2.3.2 Grupo dimensional, geométrico e de acabamento superficial.....	12
2.2.3.3 Grupo integridade estrutural.....	15
2.2.3.4 Grupo da funcionalidade	15
3 Pesquisa bibliográfica	17
3.1 Fabrico aditivo metálico.....	17
3.2 Fusão Seletiva a Laser.....	19

3.2.1	Descrição.....	19
3.2.2	Variantes.....	20
3.2.3	Parâmetros do SLM.....	21
3.2.4	Aplicações do SLM.....	22
3.2.4.1	Introdução.....	22
3.2.4.2	Casos de estudo	23
4	Métodos.....	33
4.1	Fabrico de peças impressas	33
4.1.1	Escolha da impressora.....	33
4.1.2	Impressão das peças	35
4.2	Análise do material.....	36
4.3	3D Scanning.....	36
4.4	Avaliação da maquinabilidade	38
4.5	Avaliação geométrica e dimensional.....	38
4.6	Teste de fugas.....	39
4.7	Teste de pressão	40
4.8	Testes elétricos	42
4.8.1	Teste de resistência de isolamento elétrico	42
4.8.2	Teste de ligação equipotencial	43
4.9	Teste de performance	43
4.10	Teste de corrosão.....	46
5	Resultados e discussão	49
5.1	Nível dimensional, geométrico e de acabamento superficial	49
5.1.1	3D Scanning	49
5.1.1.1	Avaliação da precisão dimensional	49
5.1.1.2	Avaliação da precisão geométrica.....	53
5.1.2	Avaliação da maquinabilidade	55
5.1.3	Avaliação geométrica e dimensional.....	60
5.1.3.1	Introdução.....	60

5.1.3.2	Análise geral.....	63
5.1.3.3	Análise detalhada	64
5.2	Grupo de integridade estrutural.....	73
5.2.1	Introdução.....	73
5.2.2	Análise do material.....	74
5.2.2.1	Análise química da composição do material	74
5.2.2.2	Análise ótica da microestrutura granular.....	75
5.2.2.3	Teste de dureza	76
5.2.3	Teste de pressão	77
5.3	Nível da funcionalidade	78
5.3.1	Introdução.....	78
5.3.2	Teste de fugas.....	79
5.3.3	Testes elétricos	80
5.3.4	Teste de performance	81
5.3.5	Teste de corrosão.....	86
6	Conclusões	89
	Bibliografia	91
	Anexos.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Fluxograma do procedimento experimental.	4
Figura 2.1: Fases do ciclo de compressão para um compressor <i>scroll</i> [2].	5
Figura 2.2: a) Compressor utilizado neste estudo; b) Corte de um modelo de compressor <i>scroll</i> .6	
Figura 2.3: Peça em estudo.	7
Figura 2.4: a) Aperto utilizado na área de produção; b) Aperto utilizado na área de R&D.	8
Figura 2.5: a) RH fabricado por bruto por maquinação; b) RH fabricado por fundição injetada.	11
Figura 2.6: Valores da rugosidade especificada depois da maquinação das peças.	13
Figura 2.7: Excertos do desenho técnico de fabrico.	14
Figura 3.1: Distribuição no mercado de fabrico aditivo metálico de todos os processos [4].	17
Figura 3.2: Ilustração do processo de PBF [14].	19
Figura 3.3: Principais parâmetros do SLM [18].	22
Figura 3.4: Direções de impressão das amostras [24].	23
Figura 3.5: Microestrutura granular de amostra produzida por SLM [26].	25
Figura 3.6: a) Modelo elaborado por K. Kamarudin; b) Zonas do modelo onde foram impressas rampas [27].	25
Figura 3.7: Impressão de amostras [29].	26
Figura 3.8: a) Valores reais do comprimento para as 12 amostras medidas; b) Valores reais da altura para as 12 amostras medidas. A vermelho estão assinaladas as amostras que cumprem a tolerância especificada [29].	27
Figura 3.9: Correlação entre a espessura da amostra e o erro de medição [29].	29
Figura 3.10: a) Obtenção das fatias por tomografia computadorizada; b) Ilustração do círculo teórico, o círculo medido e a geometria real do círculo [31].	30
Figura 3.11: Densidade de probabilidade dos desvios de cada grupo de amostra; a) 35,5°; b) 45°; c) 60°; d) 90° [31].	31
Figura 4.1: Impressora MetalFABG2, Additive Industries [37].	34
Figura 4.2: <i>Rear housings</i> impressos.	35
Figura 4.3: HandySCAN BLACK™ em funcionamento. Imagem genérica do funcionamento do equipamento, não representando qualquer etapa desta dissertação [39].	36
Figura 4.4: a) Alvos colocados na peça; b) Scan da peça e criação do modelo digital da peça. .	37
Figura 4.5: Doosan DVF 5000 [41].	38
Figura 4.6: Zeiss Accura [43].	39
Figura 4.7: Set up utilizado para o teste de fugas. 1: Monitor; 2: Câmara de vácuo; 3: Bomba de vácuo ASM 340.	40

Figura 4.8: HD tech LP-1322-4 [45].	41
Figura 4.9: Teste de pressão para: a) o compressor completo, b) o RH.	41
Figura 4.10: Set up utilizado para o teste de resistência de isolamento elétrico. Em cima: Chroma 19032-P; Em baixo: Câmara isolante.	42
Figura 4.11: Resistomat 2316 [46].	43
Figura 4.12: a) Pesagem do compressor e inserção do óleo; b) Compressor montado na câmara anecoica.	45
Figura 4.13: Set up do teste de performance. 1) Câmara anecoica; 2) Módulo complementar; 3) Máquina de carregamento de refrigerante.	45
Figura 4.14: WeissTechnik SaltEvent [47].	46
Figura 5.1: Exemplo de um ponto medido pelo <i>Scanning 3D</i> .	50
Figura 5.2: Captura de ecrã de uma peça no software do scan 3D.	50
Figura 5.3: Identificação dos pontos 11,12 e 13 na porta de descarga da peça.	52
Figura 5.4: Cotas e tolerâncias exigidas para os furos no desenho de fabrico.	54
Figura 5.5: Superfícies de referência para OP05. 1) Face lateral do <i>lug</i> ; 2) Face onde surge o <i>datum D</i> .	56
Figura 5.6: Desvio nos furos do <i>datum A'</i> .	56
Figura 5.7: Desvios nos chanfros. a) Face do <i>datum D</i> ; b) Furo de montagem.	57
Figura 5.8: Não maquinação da zona inferior da porta de descarga.	57
Figura 5.9: Resultados dos relatórios de medição. a) Planeza da superfície do <i>datum D</i> ; b) Circularidade de um furo na zona do <i>Fixed Scroll</i> .	58
Figura 5.10: Suporte usado para a medição do RH com os grampos identificados.	61
Figura 5.11: Pontos da peça que correspondem à zona que encaixa no suporte utilizado para medir as peças.	62
Figura 5.12: Zona da peça que foi maquinada na OP25.	62
Figura 5.13: Identificação do elemento geométrico que apresenta desvio do grupo PRV.	64
Figura 5.14: Valores dos desvios encontrados no grupo <i>datum</i> .	65
Figura 5.15: Identificação dos elementos geométricos que apresentam desvios do grupo <i>datum</i> .	66
Figura 5.16: Duas opções que podem levar ao incumprimento da tolerância de paralelismo. a) Peça não é assente corretamente no <i>datum A'</i> ; b) Peça é assente no <i>datum A'</i> mas a superfície do <i>datum A</i> está desviada.	67
Figura 5.17: Pontos medidos na superfície do <i>datum A</i> .	68
Figura 5.18: Desvios de posição dos furos de montagem das peças fundidas.	68
Figura 5.19: Desvios de posição dos furos de montagem das peças impressas.	69
Figura 5.20: Cotas de posição e de dimensão para os furos de montagem.	69
Figura 5.21: Orientação dos desvios dos furos de montagem de uma das peças.	70

Figura 5.22: Indicação das tolerâncias não cumpridas no grupo Porta de Descarga. A preto: tolerâncias dimensionais; a vermelho: tolerâncias de posição.	72
Figura 5.23: Identificação da tolerância de posição não cumprida no grupo Porta de Descarga.	73
Figura 5.24: Secção da peça que foi cortada e identificada por região.	73
Figura 5.25: Microestrutura granular da peça a) fundida, b) peça impressa, c) peça <i>billet</i>	76
Figura 5.26: Montagem utilizada para o teste de pressão.	78
Figura 5.27: Identificação das bolhas e do local de fuga de hélio no RH.	79
Figura 5.28: Identificação do problema encontrado na porta de descarga durante o teste de fugas.	80
Figura 5.29: Valores da Temperatura de Descarga para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.....	82
Figura 5.30:Valores do Caudal para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.....	83
Figura 5.31:Valores da <i>Back Pressure</i> para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.	83
Figura 5.32:Valores da PSU CRR para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.....	84
Figura 5.33:Valores do Ruído para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.	84
Figura 5.34:Valores da Vibração para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.....	85
Figura 5.35:RH 3D e RH fundido às 240 h do teste de corrosão.	86
Figura 5.36:RH 3D e RH fundido às 480 h do teste de corrosão.	87
Figura 5.37:RH 3D e RH fundido às 720 h do teste de corrosão. Identificação de zonas onde apareceu ferrugem férrea.....	87
Figura 5.38: Tear Down do RH 3D e do RH fundido.	88

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Identificação dos componentes principais do compressor <i>scroll</i>	6
Tabela 2.2: Identificação de zonas relevantes e dos <i>datums</i> da peça em estudo.	8
Tabela 2.3: Características da peça em estudo.	9
Tabela 2.4: Componentes complementares do <i>Rear Housing</i>	9
Tabela 3.1: Vantagens, Desvantagens e Aplicações de DED vs PBF.	18
Tabela 3.2: Características das variantes de PBF.	20
Tabela 3.3: Comparação das características da variante EBM e SLM.	21
Tabela 3.4: Resultados dos ensaios mecânicos das amostras [24].	23
Tabela 3.5: Propriedades mecânicas de amostras produzidas por SLM e por fundição com e sem tratamento térmico [26].	24
Tabela 3.6: Influência do ângulo de superfície em Ra e Rt [27].	26
Tabela 3.7: Valores medidos do comprimento e da altura para condição de reprodutibilidade [29].	28
Tabela 4.1: Especificações principais da MetalFABG2 [37].	34
Tabela 4.2: Parâmetros utilizados para o fabrico das peças.	35
Tabela 4.3: Principais especificações técnicas do HandySCAN BLACK™. [38].....	37
Tabela 5.1: Valores dos pontos de scan para as 9 peças.	51
Tabela 5.2: Percentagem de pontos acima do limite superior e abaixo do limite inferior e valores do desvio máximo e mínimo.	52
Tabela 5.3: Desvio de posição dos furos, em relação ao CAD, para as peças impressas e para a peça fundida.	54
Tabela 5.4: Desvio dos centros de cada par de semi-furos para as peças impressas e para a peça fundida.	55
Tabela 5.5: Identificação dos grupos, zona da peça correspondente e tipo dos elementos geométricos medidos.	60
Tabela 5.6: Número de desvios por grupo das peças fundidas.	63
Tabela 5.7: Número de desvios por grupo das peças impressas.	63
Tabela 5.8: Valor do desvio de posição na zona da PRV.	64
Tabela 5.9: Valores dimensionais do Scan 3D para os pontos do datum A.	67
Tabela 5.10: Valores dos desvios dimensionais presentes no grupo Porta de Descarga.	71
Tabela 5.11: Valores dos desvios das tolerâncias de posição no grupo Porta de Descarga.	71
Tabela 5.12: Composição química da peça fundida.	74
Tabela 5.13: Composição química da peça impressa.	74

Tabela 5.14: Composição química da peça <i>billet</i>	74
Tabela 5.15: Valores de dureza por região para cada tipo de peça.	77
Tabela 5.16: Valor das variáveis controláveis de cada ponto de funcionamento.....	81
Tabela 5.17: Parâmetros de teste das variáveis não controláveis escolhidas para cada ponto de funcionamento.....	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

À medida que as necessidades tecnológicas do mundo moderno aumentam, as tecnologias de fabrico necessitam de corresponder a esta evolução tecnológica, possibilitando a produção de componentes com requisitos cada vez mais exigentes. Até à atualidade, tecnologias como a estampagem, a fundição, a maquinação e a soldadura têm vindo a ser utilizados na produção de equipamentos e componentes, nos mais diversos ramos da indústria. No entanto, novas necessidades do mercado como a customização em massa e a crescente complexidade geométrica de partes, têm revelado algumas limitações destas tecnologias [1]. O elevado custo de implementação de tecnologias como a fundição e a estampagem leva a que estas não sejam economicamente viáveis para a produção de pequenas séries. Para além disso, na maquinação existe desperdício de grandes quantidades de material, como também restrições no que toca à geometria das peças que são possíveis obter. Por estas razões, surge a necessidade de desenvolver novas tecnologias de fabrico que complementem as atuais.

Uma tecnologia que pretende servir como resposta a estes problemas é o fabrico aditivo, também denominado de impressão 3D. Atualmente, o fabrico aditivo divide-se em inúmeras variantes, podendo ser utilizado para diferentes tipos de materiais. O fabrico aditivo metálico destaca-se pela importância dos metais em indústrias, como a indústria automóvel e a indústria aeroespacial. A indústria automóvel, particularmente, tem explorado cada vez mais as vantagens que o uso desta tecnologia pode proporcionar na produção de componentes com geometrias mais complexas, tal como na produção personalizada de ferramentas.

A introdução do fabrico aditivo metálico na indústria automóvel está a acontecer paralelamente com a transição da produção de automóveis com motor de combustão interna para automóveis híbridos e elétricos. Uma das diferenças entre estes dois tipos de automóveis é o sistema de ar condicionado (A/C) utilizado, que usualmente, era encarregue de controlar apenas a temperatura do habitáculo, sendo que atualmente, para alguns carros híbridos e elétricos também tem com função arrefecer as baterias. Este acréscimo de funções, juntamente com o facto de os motores elétricos não possuírem uma correia de transmissão, leva a uma transformação dos elementos do sistema de A/C, nomeadamente, do tipo de compressor utilizado que passa de um compressor mecânico para um compressor elétrico. De momento, o tipo de compressor mais comum para sistemas de A/C em carros híbridos e elétricos é o compressor *scroll*.

A presente dissertação junta o fabrico aditivo metálico com o compressor *scroll*, avaliando a capacidade desta tecnologia em produzir um componente do compressor que cumpre todos os

requisitos estabelecidos. A dissertação foi desenvolvida num contexto empresarial, por isso, serão utilizados vários termos em Inglês, dado que esta é a língua utilizada pela empresa para as suas operações do dia-a-dia. Dado este contexto, muita da informação seguidamente apresentada provém de conhecimento técnico que foi adquirido durante o desenvolvimento da dissertação. Os desenhos técnicos apresentados ao longo da dissertação utilizam o método americano para a representação das vistas, pois é o método utilizado na empresa. Alguns dos desenhos estão camuflados de modo a respeitar os requisitos de confidencialidade impostos pela empresa. De notar, que a dissertação foi realizada no departamento de Pesquisa e Desenvolvimento ou *Research and Development* (R&D) da empresa, o que significa que conceitos como “produção em série”, estarão sempre adaptados a esta realidade e não a uma realidade de linha de produção de alta cadência.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O componente do compressor *scroll* que foi estudado nesta dissertação é um componente produzido em alumínio que faz parte da estrutura externa do compressor. A metodologia atual de fabrico deste componente revela alguns problemas, levando a que se deseje encontrar uma metodologia diferente para os resolver. A solução em vista é fabricar o componente por fabrico aditivo metálico, permitindo uma maior liberdade na testagem de novos *designs*, assim como libertação de espaço nas máquinas para a produção de outras peças.

Neste contexto o principal objetivo desta dissertação é:

- Analisar a capacidade do fabrico aditivo metálico, especificamente a tecnologia de Fusão Seletiva por Laser, em fabricar peças que cumprem todos os requisitos do projeto do produto.

Do qual decorre:

- Conhecimento do processo de fabrico aditivo metálica utilizado;
- Adquirimento de *know-how* nesta nova tecnologia para aplicações futuras.
- Aprendizagem de todos os testes necessários para a validação das peças em estudo e, consequentemente, contacto com diferentes áreas de Engenharia Mecânica.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

No capítulo 1, Introdução, é feita a contextualização e são indicados os motivos que levaram à elaboração desta dissertação. Neste capítulo é também indicado o objetivo a alcançar com este estudo.

No capítulo 2, Peça em estudo, encontra-se a caracterização da peça que foi estudada, as especificações que a mesma tem de cumprir, a metodologia de fabrico atual e as respetivas desvantagens.

No capítulo 3, Pesquisa bibliográfica, é apresentado a tecnologia de fabrico aditivo metálico utilizado e as suas variantes, com explicação fundamentada da escolha da mesma.

No capítulo 4, Métodos, identifica-se a impressora 3D utilizada para a fabricação das peças em estudo e os métodos utilizados para validar as peças.

No capítulo 5, Resultados e Discussão, são apresentados os resultados obtidos para cada método de validação utilizado. Paralelamente, são discutidos estes resultados relacionando-os entre si e com a informação adquirida na pesquisa bibliográfica.

No capítulo 6, Conclusões, conclui-se se a tecnologia estudada é viável para substituir as tecnologias atualmente utilizadas. Também são sugeridos possíveis estudos futuros que seriam positivos para o desenvolvimento deste tópico.

De seguida na Figura 1.1 encontra-se o fluxograma que resume o procedimento experimental desta dissertação. Para além de ser possível observar as etapas de validação tomadas, estão também indicados o número e o tipo de peças que foi usado em cada uma.

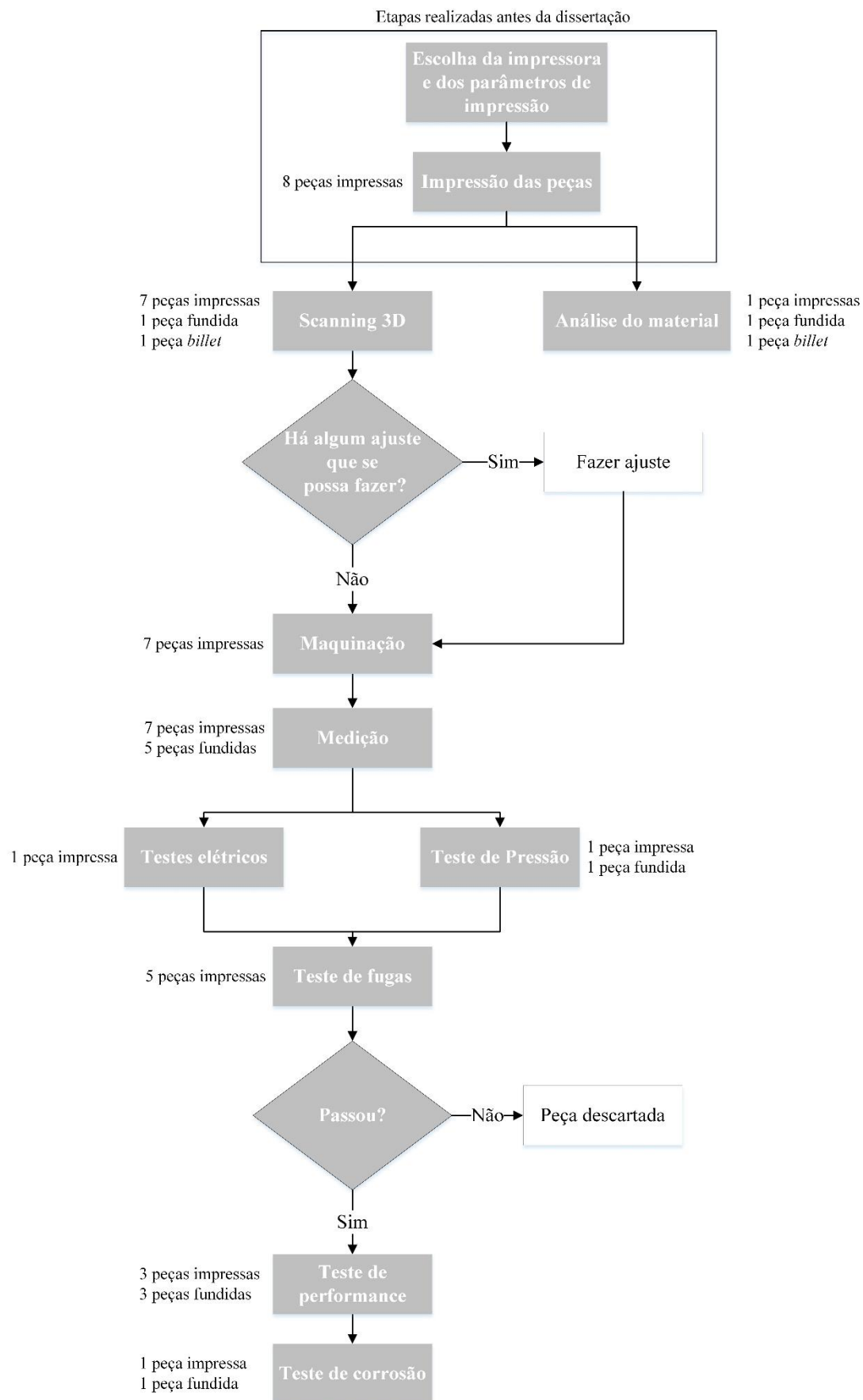


Figura 1.1: Fluxograma do procedimento experimental.

2 CASO DE ESTUDO

Este capítulo é dedicado à apresentação do caso de estudo desta dissertação. Primeiramente, será feita uma pequena introdução ao princípio de funcionamento e aos principais componentes de um compressor *scroll*. No entanto, o foco será na apresentação e caracterização da peça em estudo, incluindo o processo de fabrico atualmente utilizado, os requisitos que a peça tem de cumprir e outra informação relevante.

2.1 COMPRESSOR *SCROLL*

2.1.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento de um compressor *scroll* resume-se à interação entre dois componentes: *Orbital Scroll* (OS) e *Fixed Scroll* (FS). Tanto o OS como o FS possuem uma geometria em forma de espiral e é através do movimento orbital do OS em torno do FS que o refrigerante é comprimido. A Figura 2.1 representa as 3 fases do ciclo de compressão para um compressor *scroll*, que se inicia pela sucção do fluido (fase A), sendo seguida pela compressão progressiva do fluido (fase B) e terminando com a exaustão onde o fluido é expelido (fase C).

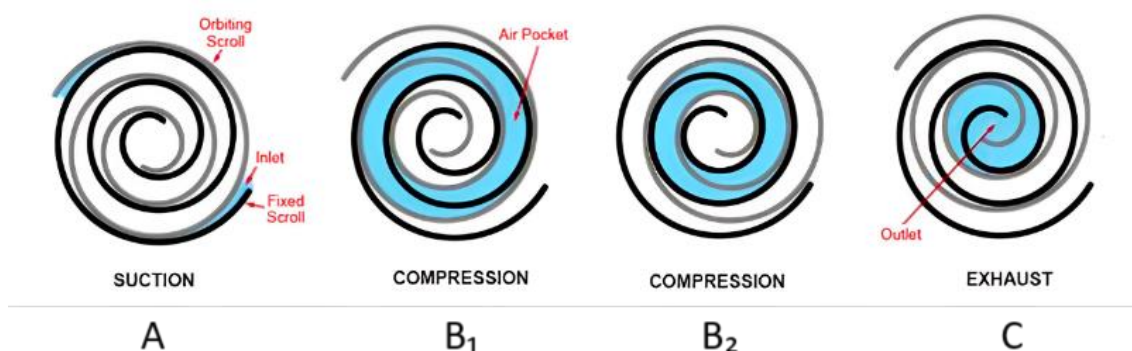


Figura 2.1: Fases do ciclo de compressão para um compressor *scroll* [2].

2.1.2 Componentes

Um compressor *scroll* pode ser constituído por mais de 100 componentes individuais. O compressor utilizado para este estudo encontra-se representado na Figura 2.2 a) enquanto que na Figura 2.2 b) está representado um corte que apesar de ser de outro compressor, tem os mesmos componentes internos principais. Os componentes assinalados na Figura 2.2 b) estão identificados na Tabela 2.1.

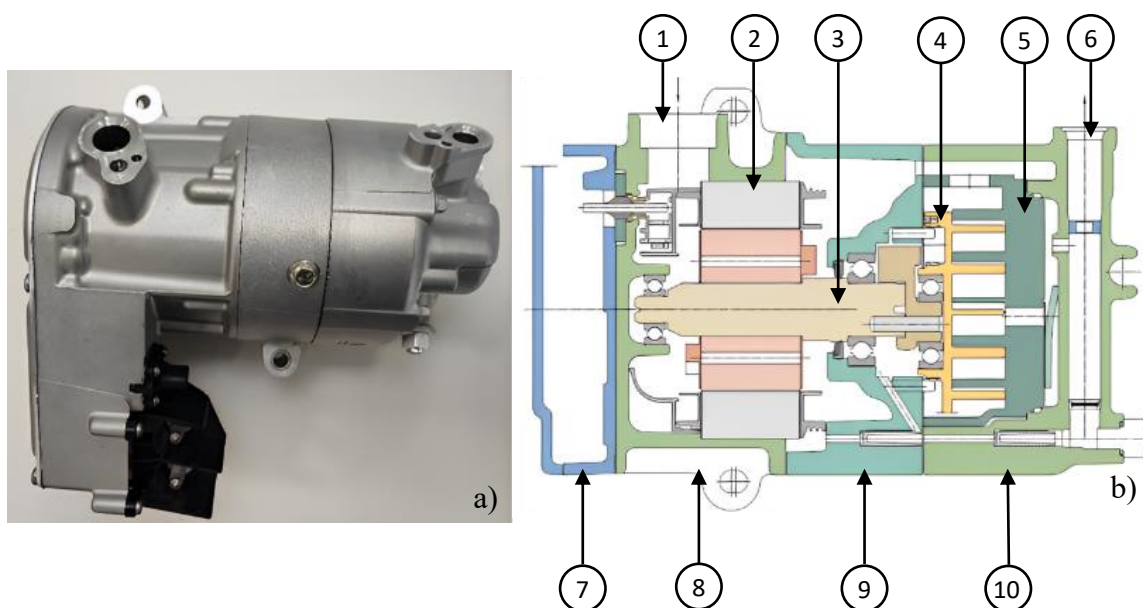


Figura 2.2: a) Compressor utilizado neste estudo; b) Corte de um modelo de compressor *scroll*.

Tabela 2.1: Identificação dos componentes principais do compressor *scroll*.

Número	Componente	Número	Componente
1	Porta de Sucção*	6	Porta de Descarga*
2	Motor elétrico	7	<i>Inverter</i>
3	Veio	8	<i>Motor housing</i>
4	<i>Orbiting Scroll</i>	9	<i>Center housing</i>
5	<i>Fixed Scroll</i>	10	<i>Rear housing</i>

*Nota: A porta de Sucção e de Descarga não são componentes, mas sim zonas muito relevantes para o funcionamento do compressor.

Todos os componentes do compressor podem ser agrupados em 3 grandes grupos consoante a sua localização e papel que têm para o funcionamento do compressor:

- ***Inverter***: Corresponde a todos os componentes da parte eletrónica do compressor.
- ***Housings***: Corresponde aos componentes que fazem parte da estrutura externa do compressor. Um compressor é constituído por 3 *Housings*: *Motor Housing* (MH), *Center Housing* (CH) e *Rear Housing* (RH).
- ***Core***: São todos os componentes interiores que possibilitam o funcionamento do compressor. A título de exemplo tem-se o OS e o FS, podendo destacar-se também o motor elétrico e o veio.

2.2 PEÇA EM ESTUDO

2.2.1 Caracterização

O componente do compressor escolhido para este estudo foi o *Rear Housing* ou *Rear Head* (RH) que faz parte do grupo dos *Housings*, ilustrado na Figura 2.3. Para estudar a viabilidade do fabrico aditivo metálico como tecnologia de fabrico de peças, considerou-se que os componentes que constituem o grupo dos *Housings* seriam os indicados, uma vez que têm requisitos a nível estrutural, dimensional e funcional menos exigentes do que outros. Dentro dos *Housings*, as razões que levaram à escolha do RH são enunciadas de seguida:

- Menor dimensão, complexidade geométrica e número de operações de maquinação quando comparado com o MH;
- Maiores tolerâncias de projeto quando comparando com o CH;
- Problemas na geometria do RH provenientes do facto da peça ser produzida por fundição.

Ao longo desta dissertação será necessário conhecer as diferentes zonas do RH tal como, pontos e superfícies de referência, denominadas de *datums*. Os *datums* ou sistemas de referência podem ser superfícies, planos ou pontos que asseguram o correto assentamento da peça de modo a que esta possa ser devidamente maquinada. Cada *datum* é constituído por *datum targets* que podem ser pontos, linhas ou áreas. Na Figura 2.3 estão assinaladas zonas relevantes e os *datums* da peça, estando a sua identificação presente na Tabela 2.2.

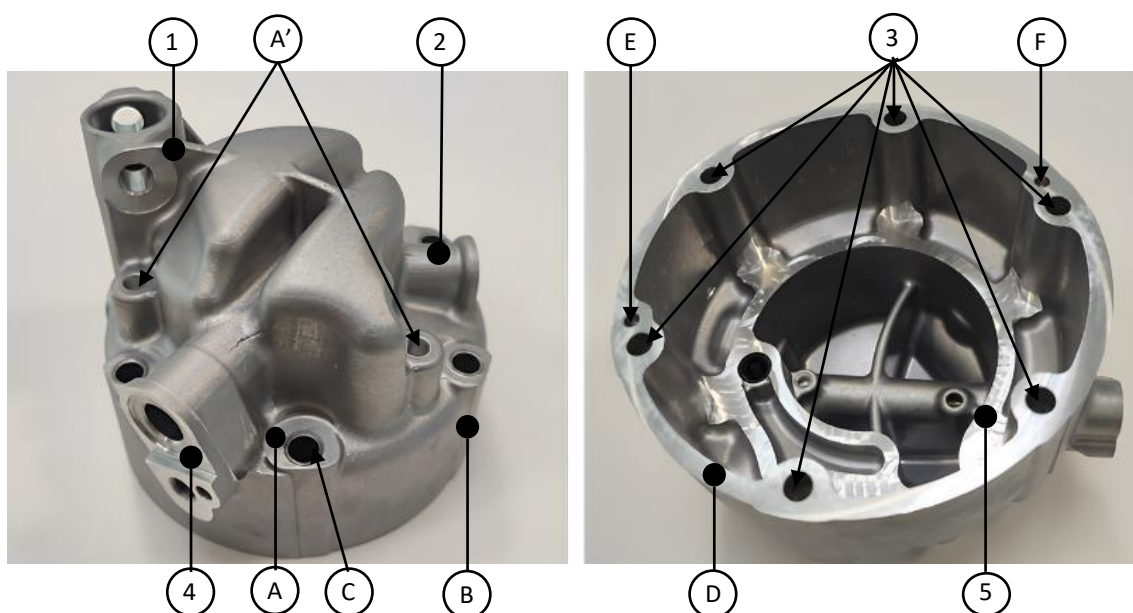


Figura 2.3: Peça em estudo.

Tabela 2.2: Identificação de zonas relevantes e dos *datums* da peça em estudo.

Número	Zona	Datum	Descrição
1	<i>Lug</i>	A	Plano
2	PRV	A'	Plano
3	Furos de Montagem	B	Superfície do diâmetro exterior da peça
4	Porta de Descarga	C	
5	<i>Fixed Scroll</i>	D	Plano
		E	Ponto
		F	Ponto

Na Tabela 2.2 é possível observar a existência de um *datum* A e um *datum* A' que correspondem a planos diferentes. Como foi referido em 1.1, a presente dissertação foi desenvolvida na área de R&D. Apesar de na área de R&D se utilizar o mesmo desenho de fabrico da área de produção, onde o *datum* A é indicado como referência, aquando da maquinação do RH é utilizado um aperto diferente que tem como referência o *datum* A'. Na Figura 2.4 está ilustrado o aperto utilizado na área de produção e o aperto utilizado na área de R&D, com os planos do *datum* A e do *datum* A' assinalados.

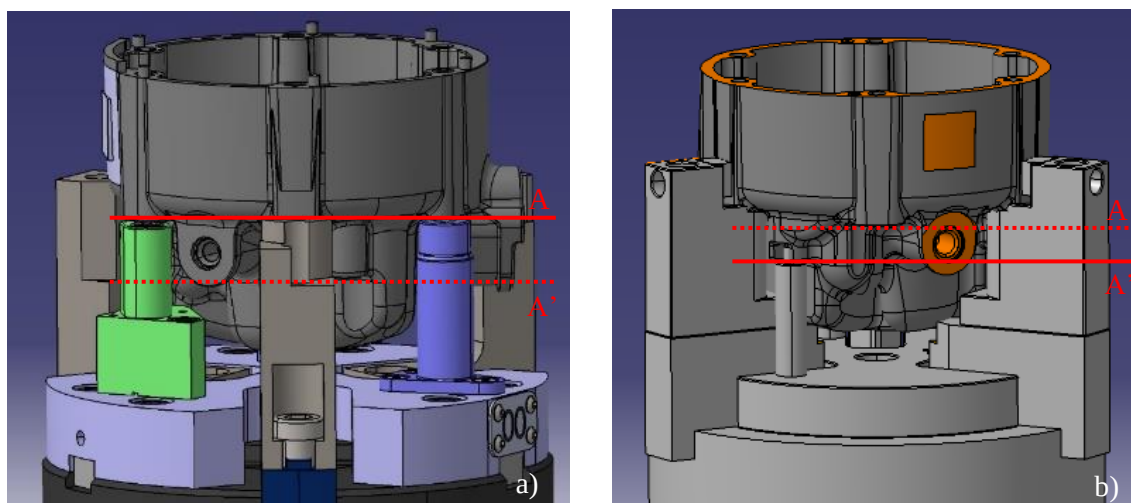


Figura 2.4: a) Aperto utilizado na área de produção; b) Aperto utilizado na área de R&D.

A diferença no aperto existe porque na área de produção o aperto é projetado especificamente para este modelo de RH, enquanto que na área de R&D, o mesmo aperto é utilizado para mais do que 1 modelo de RH. Esta necessidade de utilizar o mesmo aperto para diferentes modelos levou a que não fosse possível utilizar o *datum* original resultando na transposição do *datum* A para o *datum* A'.

A Tabela 2.3 indica o material, o volume, a massa volúmica e as dimensões máximas (dimensões do prisma que circunscreve a peça). De notar que, na coluna do material, são indicadas as diferentes ligas de alumínio que são utilizadas para a produção dos RH, consoante a disponibilidade do fabricante. As peças utilizadas neste estudo foram fabricadas em liga de alumínio com a composição química $AlSi_{10}Mg$ que, segundo a norma europeia, é identificada por EN AC-43000.

Tabela 2.3: Características da peça em estudo.

Característica	Material	Volume [mm ³]	Massa Volúmica [g/mm ³]	Dimensões Máximas [mm]
Dado	Liga de alumínio: <u>EN AC-43000</u> EN AC-46000 EN AC-47100	418837	0,0026	98 x 133 x 123

A montagem do compressor é organizada em subconjuntos onde alguns componentes secundários, como é o caso de pinos, *o-rings* e parafusos, são montados em componentes principais como os *Housings*. O subconjunto do RH é constituído pelo próprio RH e por outros três componentes complementares. A Tabela 2.4 identifica esses componentes e a sua função.

Tabela 2.4: Componentes complementares do *Rear Housing*.

Componente	Válvula de Segurança ou PRV	Filtro de Partículas	Anel de retenção
Ilustração			
Função	Válvula de segurança utilizada para deixar escapar a pressão, no caso em que esta ultrapasse um determinado valor.	Filtro para captar limalhas ou outro tipo de impurezas.	Retém o óleo dentro do compressor. Impede a passagem da mistura óleo/refrigerante para fora do compressor, deixando só passar refrigerante.

2.2.1.1 Etapas do processo de produção e validação

Ao longo desta dissertação será necessário conhecer as várias etapas e sub-etapas que constituem todo o processo de produção e validação do RH. De seguida, indicam-se as etapas mais relevantes, dado o contexto desta dissertação:

1. **Projeto:** O RH é projetado em software CAD (Desenho assistido por computador)
2. **Fabrico:** O RH é fabricado em duas fases. Inicialmente é por bruto por maquinaria e posteriormente por fundição injetada;
3. **Maquinação:** Maquinam-se as zonas que são especificadas no desenho técnico de maquinaria;
4. **Medição:** O RH é medido para verificar o cumprimento de todos os requisitos dimensionais e geométricos;
5. **Montagem:** O subconjunto do RH é montado aos restantes subconjuntos; de forma a obter o compressor completo;
6. **Testagem:** O compressor e, conseqüentemente, o RH realiza vários testes. Caso o compressor passe nos testes, este e todos os seus constituintes são validados

2.2.2 Metodologia de fabrico atual

Atualmente, a etapa de fabrico do RH pode dividir-se numa fase de desenvolvimento e numa fase de produção de protótipos.

- **Fase de desenvolvimento:** Depois de ser projetado, o RH é primeiramente produzido por **bruto por maquinaria** (Figura 2.5 a)). A peça é maquinada a partir de um bloco de alumínio maciço (*billet*). Esta tecnologia é utilizada, numa primeira fase, pois permite fazer, com mais facilidade, alterações na geometria do RH até a obtenção de uma geometria desejada. Esta flexibilidade, juntamente com o facto de as peças serem fabricadas internamente, levam a que esta tecnologia seja economicamente mais viável para a produção de pequenas quantidades, que na fase de desenvolvimento corresponde a 20 peças. Ademais, sabe-se que o bruto por maquinaria é a tecnologia que fabrica peças com melhores características estruturais, dimensionais e geométricas, no entanto, o elevado tempo inerente a esta tecnologia não permite utilizá-la para a produção de grandes quantidades. Durante o resto da dissertação, as peças fabricadas por esta tecnologia serão denominadas por “peças *billet*”.

- **Fase de produção de protótipos:** Tendo-se obtido uma geometria que cumpre todos os critérios estabelecidos, segue-se para a fase de produção de protótipos onde o RH passa a ser fabricado por **fundição injetada** (Figura 2.5 b)). A fundição injetada é uma tecnologia indicada para a produção de grandes quantidades de peças (acima das 100 unidades). Em contrapartida, sendo que nesta fase as peças são produzidas externamente, a sua entrega pode ser condicionada por atrasos ou faltas de material do fornecedor. Quando surgem este tipo de imprevistos, os *Rear Housings* são fabricados por fundição em molde de areia, porém, as características geométricas destas peças são de menor qualidade em comparação com as peças de fundição injetada.

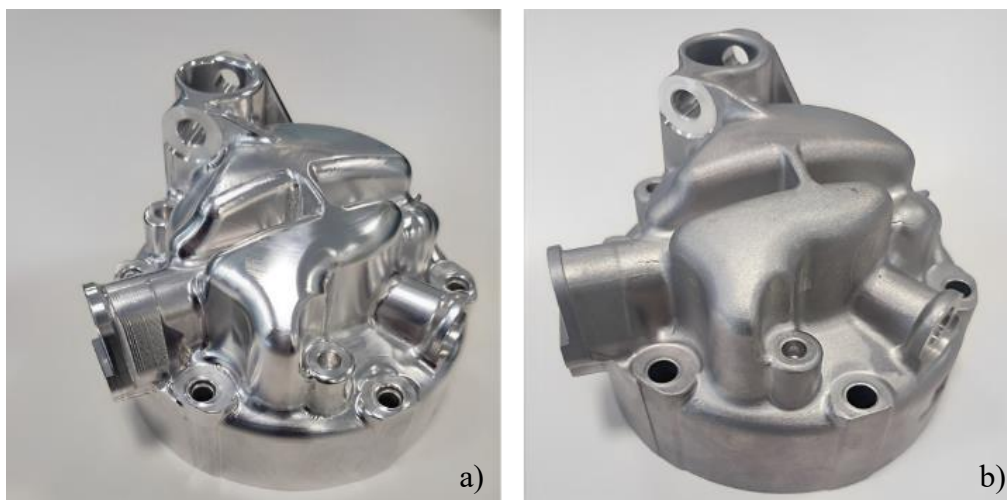


Figura 2.5: a) RH fabricado por bruto por maquinação; b) RH fabricado por fundição injetada.

Apesar desta metodologia de fabrico produzir peças que cumprem as especificações necessárias tanto por bruto por maquinação como por fundição injetada, surgem alguns problemas:

- **Elevado tempo de maquinação e programação:** As peças *billet* envolvem um enorme gasto de tempo na sua programação e posterior maquinação;
- **Grande quantidade de material desperdiçado:** O fabrico de peças *billet* também está associado a um grande desperdício de material;
- **Pouca flexibilidade geométrica:** Uma vez fabricado o molde para as peças fundidas, a possibilidade de alterar algum aspeto geométrico é limitada, pois pode implicar o fabrico de um novo molde, o que é bastante dispendioso;
- **Ocorrência de atrasos:** Tendo em conta que os RH fundidos não são fabricados internamente, o seu fabrico e entrega está sujeito a atrasos que influenciam todas as etapas posteriores.

Considerando todas as desvantagens da metodologia atual, é desejável encontrar uma tecnologia de fabrico que preencha as falhas acima mencionadas, mas que ao mesmo tempo, possibilite o fabrico de peças que cumpram os requisitos necessários.

2.2.3 Especificações a cumprir

2.2.3.1 Introdução

De modo a poder avaliar a capacidade do fabrico aditivo metálico em produzir *Rear Housings* que cumprem as especificações necessárias, é crucial conhecer essas mesmas especificações. As especificações podem dividir-se em 3 grupos:

- **Grupo dimensional, geométrico e de acabamento superficial;**
- **Grupo integridade estrutural;**
- **Grupo funcional.**

Os métodos utilizados para garantir que as peças cumprem todas as especificações serão abordados no Capítulo 4.

2.2.3.2 Grupo dimensional, geométrico e de acabamento superficial

A nível dimensional, geométrico e de acabamento superficial as peças fabricadas devem cumprir todas as tolerâncias dimensionais e geométricas que se encontram no desenho técnico de fabrico. Na Figura 2.7 é possível observar um excerto do desenho técnico de fabrico onde se pode verificar a grandeza das tolerâncias. A menor tolerância dimensional é de $\pm 0,1$ mm, enquanto que para as tolerâncias geométricas a menor tolerância é de posição e tem um valor de 0,2 mm.

Em relação ao acabamento superficial, pode-se fazer duas distinções:

- **Acabamento superficial antes da maquinação:** A tecnologia utilizada deve fabricar peças que apresentem um acabamento superficial que não comprometa a superfície dos *datums*. Durante a etapa da maquinação, o RH é sujeito a duas operações distintas denominadas de OP10 e OP20 que correspondem a dois apertos distintos. Para o aperto da OP10 são utilizados os *datums* A', B e C, identificados anteriormente. Se a tecnologia utilizada não fabricar peças com um acabamento superficial que, por exemplo, garanta que a peça assente no plano do datum A', ocorrerá problemas na maquinação pois a peça não terá a inclinação devida.
- **Acabamento superficial depois da maquinação:** As zonas maquinadas da peça devem possuir um acabamento superficial que está dentro das especificações indicadas no

desenho técnico de maquinação. Na Figura 2.6 estão ilustrados alguns excertos do desenho técnico de maquinação, onde estão assinaladas as cotas referentes à qualidade superficial exigida. Como se pode observar existem zonas com rugosidade média diferente sendo que a o menor valor encontrado no desenho é de 0,6 mm. A planeza de superfícies maquinadas e a circularidade de furos maquinados também são características que permitiram avaliar a qualidade superficial das peças.

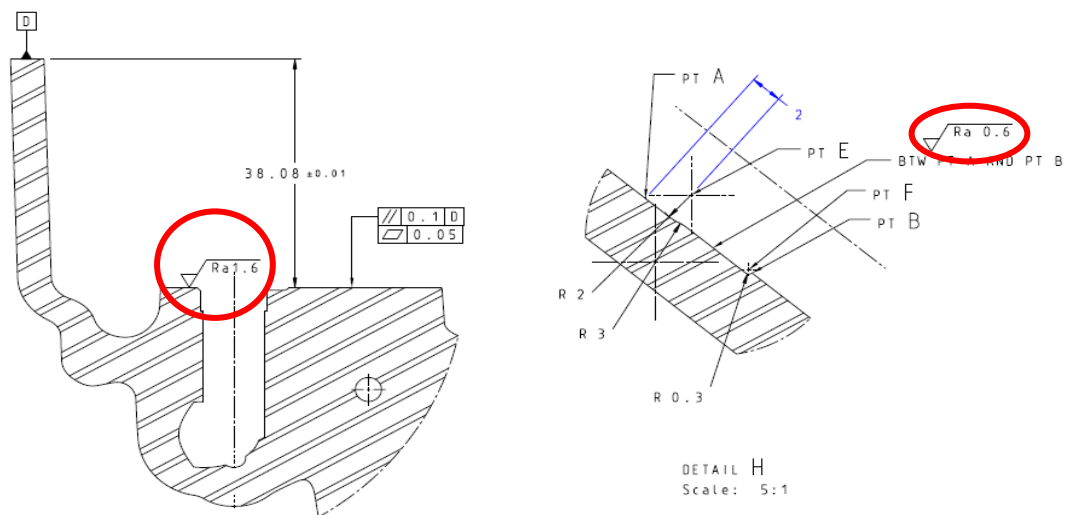


Figura 2.6: Valores da rugosidade especificada depois da maquinação das peças.

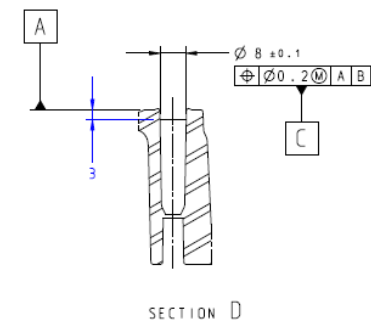
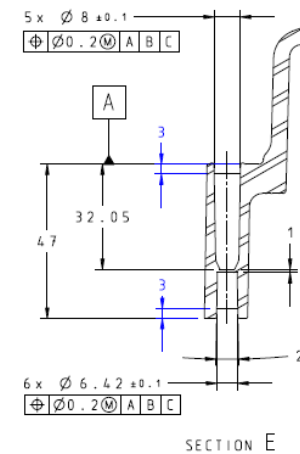
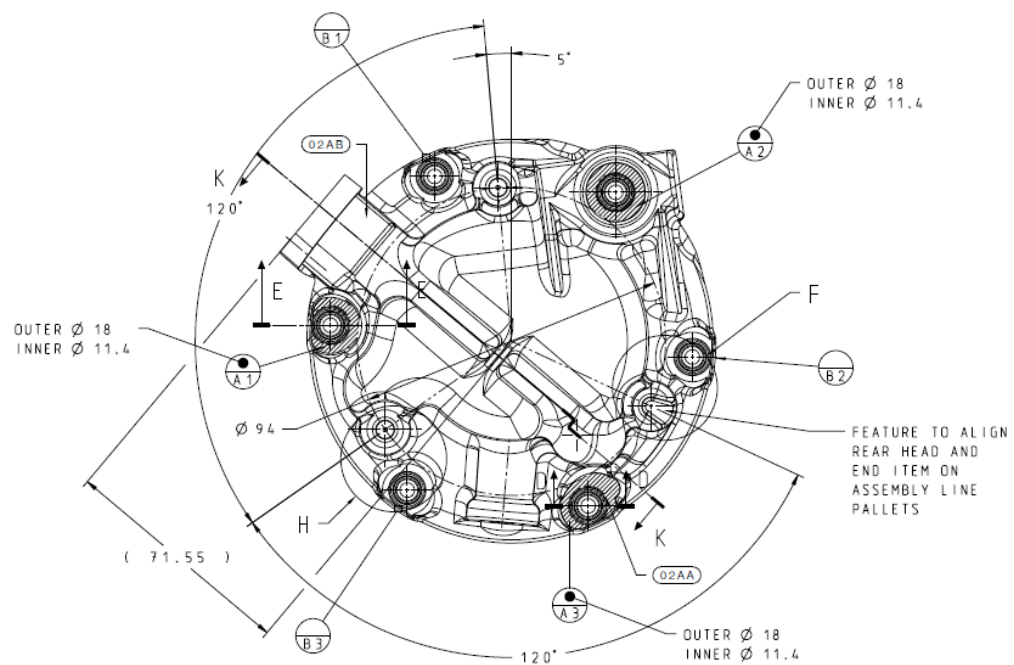


Figura 2.7: Excertos do desenho técnico de fabrico.

2.2.3.3 Grupo integridade estrutural

O RH é o componente do compressor que está sujeito a uma maior pressão, por isso é fulcral que possua um nível de integridade estrutural que permita o normal funcionamento do compressor. Para isso, o material escolhido para o fabrico aditivo metálico deve ter propriedades mecânicas equivalentes ou superiores, que o material atualmente utilizado e o RH deve cumprir os parâmetros de pressão máxima.

2.2.3.4 Grupo da funcionalidade

A nível da funcionalidade, as peças de fabrico aditivo não devem comprometer de qualquer modo a performance do compressor. Os requisitos funcionais dependem do modelo do compressor e normalmente são estabelecidos entre o cliente e o fornecedor. Dado o contexto desta dissertação, não existe necessidade de testar o compressor para todos os seus requisitos funcionais, uma vez que só se pretende estudar a influência do RH na performance do mesmo. Tendo isto em conta, os requisitos funcionais que foram estudados foram:

- Estanquidade do compressor;
- Performance do compressor;
- Resistência à corrosão.

3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo dedica-se à apresentação dos aspetos mais relevantes inerentes à pesquisa bibliográfica que foi realizada. O objetivo é dar a conhecer a informação que é essencial para este estudo, nomeadamente o tipo de tecnologia que foi utilizada e as suas características, bem como casos de estudo já realizados no mesmo contexto.

3.1 FABRICO ADITIVO METÁLICO

O fabrico aditivo ou impressão 3D é definido pela norma ISO/ASTM 52900: 2015 [3] como o processo de junção de material para produzir componentes, camada por camada, a partir de um modelo digital 3D. Atualmente, existem vários processos de fabrico aditivo que utilizam diferentes materiais, métodos de deposição do material e fontes de energia. Na mesma norma, a *American Society for Testing Material* (ASTM) identifica 7 tipos de processos de fabrico aditivo:

- *Binder jetting* (BJT);
- *Direct Energy Deposition* (DED);
- *Material Extrusion* (MEX);
- *Material Jetting* (MJT);
- *Powder Bed Fusion* (PBF);
- *Sheet Lamination* (SHL);
- *Vat Photopolymerisation* (VPP).

Dado que nesta dissertação se pretende analisar peças metálicas, o foco desta pesquisa passará pelos principais processos de fabrico aditivo que utilizam metais. Na Figura 3.1 está representada a distribuição de todos os processos no mercado de fabrico aditivo em 2020.

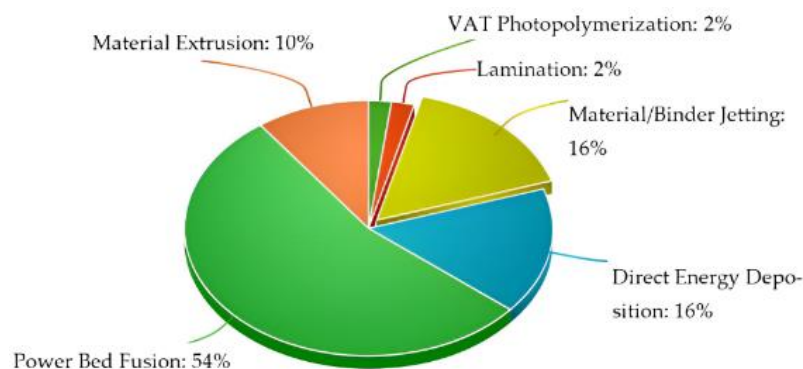


Figura 3.1: Distribuição no mercado de fabrico aditivo metálico de todos os processos [4].

Apesar de vários processos terem a capacidade de produzir componentes metálicos, somente PBF e DED têm capacidade de produzir peças com características aceitáveis para aplicações industriais de alta exigência [5]. O processo de PBF foi o processo utilizado para a produção das peças que foram analisadas nesta dissertação e por isso uma caracterização detalhada deste processo está apresentada na próxima secção. A razão que levou à escolha deste processo em detrimento do processo de DED é suportada pela Tabela 3.1, onde são identificadas as principais vantagens e desvantagens dos dois processos tal como as principais aplicações de cada um.

Tabela 3.1: Vantagens, Desvantagens e Aplicações de DED vs PBF [6], [7], [8] e [9].

Processo	DED	PBF
Vantagens	• Produção de peças grandes dimensões ($> 1 \text{ m}^3$); • Maior cadência de produção: (até 2 kg/h) • Menor custo de material	• Grande Variedade de materiais (incluindo metais) • Maior precisão ($0,05 \text{ mm}$) • Melhor qualidade superficial ($\text{Ra: } 10 \text{ }\mu\text{m}$)
Desvantagens	• Menor precisão ($0,25 \text{ mm}$) • Menor qualidade superficial ($\text{Ra: } 200 \text{ }\mu\text{m}$) • Menor densidade relativa • Não é indicada para a produção de peças pequenas com geometrias complexas devido a espessuras de camada elevadas ($1 - 3 \text{ mm}$)	• Menor cadência de produção: (até $0,3 \text{ kg/h}$) • Maior custo de material • Limitações na dimensão de peças a produzir ($< 0,03 \text{ m}^3$)
Aplicações	• Reparação de componentes	• Fabrico de ferramentas personalizadas • Fabrico de peças com geometrias complexas

Tendo em consideração as características de cada processo e os requisitos que a peça em estudo tem de cumprir, concluiu-se que o processo de *Powder Bed Fusion* era o mais indicado para a produção das novas peças, pois trata-se de uma peça de geometria complexa com dimensões reduzidas e necessidade de boa qualidade superficial.

3.2 FUSÃO SELETIVA A LASER

3.2.1 Descrição

Na Fusão Seletiva a Laser ou também denominada de *Powder Bed Fusion* (PBF), uma fonte de energia sinteriza ou funde partículas de pós, camada por camada, até se obter a geometria desejada [10]. Apesar do PBF apresentar algumas variantes, abordadas adiante, o princípio de funcionamento é semelhante para todas e descreve-se da seguinte forma [11], [12], [13]:

1. O ficheiro CAD da peça que se pretende produzir é carregado para o software da impressora 3D;
2. A impressora 3D divide digitalmente a peça em camadas de espessura bastante reduzidas, na ordem das dezenas de micron;
3. Uma camada de pó é depositada no tabuleiro de trabalho;
4. Uma fonte de energia de alta intensidade sinteriza ou funde os locais da camada de pó que correspondem a uma camada digital da peça;
5. O tabuleiro desce incrementalmente (correspondente à espessura de uma camada) para permitir a colocação de outra camada de pó;
6. As etapas 3 a 5 repetem-se até que a peça seja produzida.

A Figura 3.2 ilustra o funcionamento deste processo.

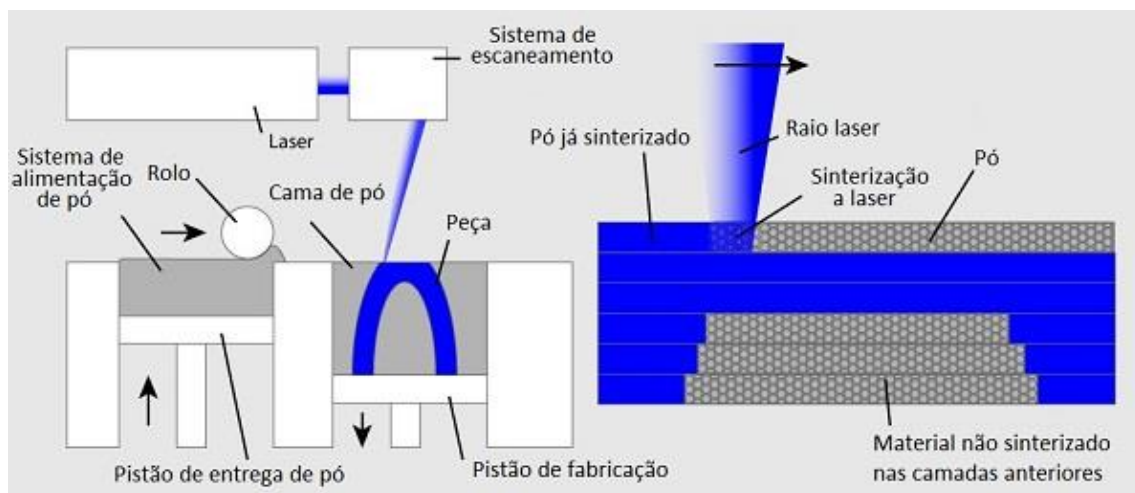


Figura 3.2: Ilustração do processo de PBF [14].

3.2.2 Variantes

Existem algumas discrepâncias no número e nomenclatura das variantes desta tecnologia sendo que, por exemplo, D. Dev Singh et. al. [11] considera a existência de 5 variantes enquanto que Silvia Vock et. al. [15] apenas considera a existência de 3 variantes. Para este estudo é seguido a classificação de Riya Singh et. al. [16] que divide o PBF em 4 variantes:

- *Selective Laser Sintering* (SLS);
- *Selective Laser Melting* (SLM);
- *Electron Beam Melting* (EBM);
- *Direct Laser Metal Sintering* (DLMS),

Estas variantes distinguem-se consoante 3 fatores principais: a fonte de energia, o tipo de material utilizado e o ponto a que o material é aquecido (Sinterizado ou fundido). A Tabela 3.2 caracteriza as variantes consoante estes três fatores. Para cada variante, está indicado um artigo que descreve detalhadamente as principais características da variante e que serviu de base para a informação apresentada na tabela.

Tabela 3.2: Características das variantes de PBF

Variante	SLS	SLM	EBM	DLMS
Fonte de Energia	LASER	LASER	Feixe de elétrons	LASER
Material utilizado	Polímeros	Metais	Metais	Metais
Ponto a que o material é aquecido	Sinterizado	Fundido	Fundido	Sinterizado
Referências	[17]	[18]	[19]	[20]

A variante escolhida para este estudo foi a SLM. Para justificar esta opção deve-se considerar, mais uma vez, as características e os requisitos que a peça em estudo deve cumprir. Sabendo que a peça é produzida a partir de alumínio, a variante SLS pode ser facilmente descartada. Para escolher entre as restantes variantes é necessário entender a diferença entre fundição e sinterização do material. Jyotirmoy Nandy et. al. [20] clarifica esta diferença dizendo que num estado de fundição as partículas de pó são totalmente fundidas enquanto que num estado de sinterização as partículas são apenas parcialmente fundidas. Jyotirmoy Nandy et. al. acrescenta que a sinterização de partículas, muitas vezes, resulta na fabricação de peças com densidades

relativas indesejáveis e variações na sua estrutura. Estas desvantagens da sinterização de pós levam a que variantes onde o material é completamente fundido sejam mais atrativas para a fabricação da peça em estudo.

Posto isto, resta apenas identificar as razões que levaram à escolha da SLM em detrimento da EBM. Semelhante ao que se fez em 3.1, na Tabela 3.3 comparam-se as principais características das duas variantes.

Tabela 3.3: Comparação das características da variante EBM e SLM [12], [10], [21].

Variante	EBM	SLM
Tipo de Laser	Feixe de eletrões	LASER
Atmosfera do tabuleiro	Vácuo	Gás inerte
Absorção de energia	Limitada por Condutividade	Limitada pela Absortividade
Cadência de produção	55-80 cm ³ /h	< 50 cm ³ /h
Custos de Energia	Moderados	Altos
Acabamento superficial	Ra 25-35 µm	Ra 9-12 µm
Precisão	±0.2 mm	0,05-0.2 mm
Tamanho de partículas de pó	Médio	Pequeno

Analisando as características mencionadas, verifica-se que SLM de facto, é a variante mais indicada para a produção das peças, já que oferece uma melhor precisão e um melhor acabamento superficial.

3.2.3 Parâmetros do SLM

As características de peças produzidas por SLM dependem totalmente dos parâmetros utilizados. Dado o objetivo desta dissertação, não é relevante mencionar como os parâmetros influenciam as características das peças, até porque existe uma literatura extensa sobre este tópico, destacando aqui alguns exemplos: Kaufamn et. al. [22], Ahmed H. Maamoun et. al. [23], Wei Xiong et. Al. [24]. Por esta razão, nesta secção pretende-se somente identificar alguns parâmetros, de modo a caracterizar melhor o processo. Nesma et. al. [18] refere que o número de parâmetros é ambíguo. A autora indica os parâmetros que têm maior influência nas características das peças impressas dividindo-os em 4 grupos diferentes: Laser, Scan, Pó e Temperatura (Figura 3.3).

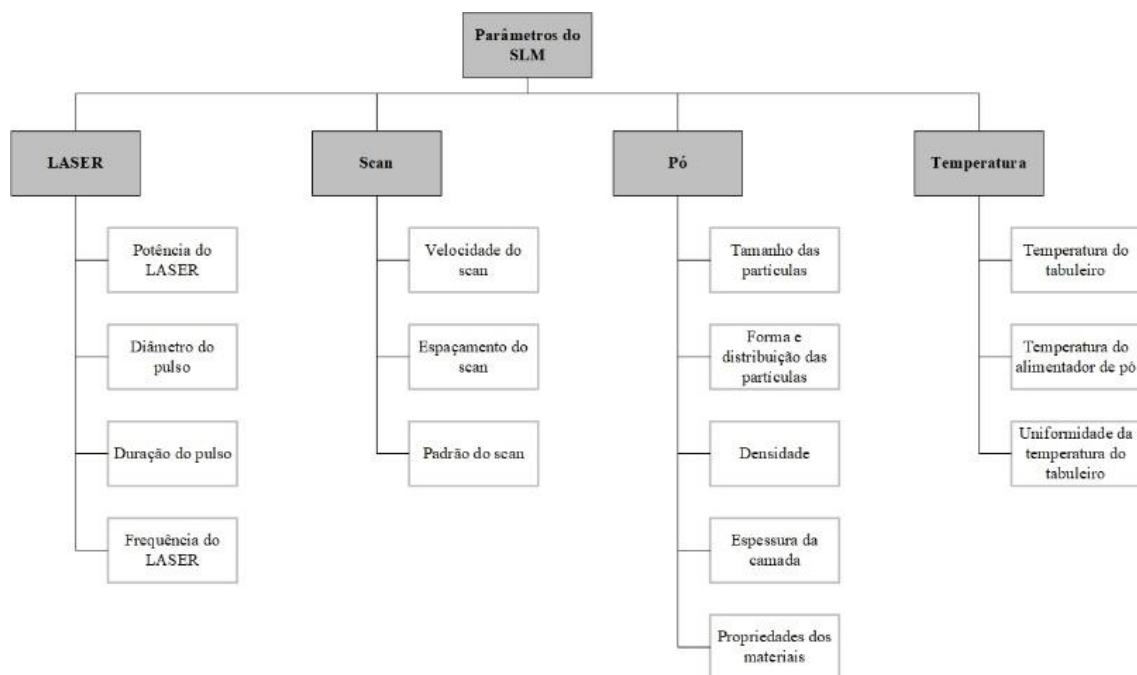


Figura 3.3: Principais parâmetros do SLM [18].

3.2.4 Aplicações do SLM

3.2.4.1 Introdução

A popularidade do processo de PBF, nomeadamente da variante SLM, leva a que já tenham sido realizados vários estudos para entender as vantagens que esta nova tecnologia pode trazer, assim como as suas atuais limitações. Nesta secção, serão apresentados estudos onde foram avaliadas diferentes características de peças produzidas por SLM, características que se enquadram nos três grupos de requisitos que a peça em estudo tem de cumprir. De notar que em todos os estudos apresentados foi utilizada a mesma liga de alumínio que é utilizada para a produção da peça em estudo. Os resultados encontrados nestes estudos ajudarão a compreender os resultados obtidos no estudo inerente a esta dissertação.

3.2.4.2 Casos de estudo

K. Kempen et. al. [25] avaliou as propriedades mecânicas de amostras produzidas por SLM, comparando-as com as propriedades de amostras produzidas por fundição em molde de areia e por fundição injetada de alta pressão com e sem tratamento térmico. Para isso, foram impressas amostras de SLM em duas direções diferentes, no plano XY e na direção Z como se pode observar na Figura 3.4. Foram realizados vários ensaios mecânicos às amostras impressas e às amostras fundidas, estando os resultados obtidos representados na Tabela 3.4.

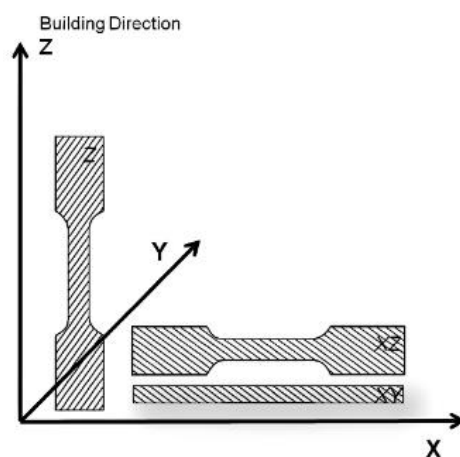


Figura 3.4: Direções de impressão das amostras [25].

Tabela 3.4: Resultados dos ensaios mecânicos das amostras [25].

$x \pm s$	E	UTS	ϵ_{break}	HV
	GPa	MPa	%	
XY direction	68 ± 3	391 ± 6	$5,55 \pm 0,4$	127
Z direction		396 ± 8	$3,47 \pm 0,6$	
conventional cast and aged [8]	71	300-317	2,5-3,5	86
high pressure die casting F*[9]	71	300-350	3-5	95-105
high pressure die casting T6*[9]	71	330-365	3-5	130-133

Como se pode observar, as amostras impressas apresentam tensão de rotura, ductilidade e dureza melhores ou equiparáveis às amostras fabricadas por fundição injetada de alta pressão com tratamento térmico T6. Também é possível verificar que as propriedades das amostras de SLM variam consoante a direção de impressão, revelando por isso alguma anisotropia, sendo que este resultado também foi verificado por S.A. Jawade et. al. [26].

Krystian Zyguła et. al. [27] realizou um estudo semelhante comparando as propriedades mecânicas de amostras fabricadas por SLM com amostras fabricadas por fundição, indo mais longe, e comparando também a microestrutura granular, a densidade e impacto do tratamento térmico T6. Quanto às propriedades mecânicas, Krystian Zyguła et. al. obteve resultados semelhantes a Kempen et. al. verificando que, na sua generalidade, SLM produzia peças com propriedades equivalentes às peças de fundição. Contudo, quando comparou o ganho das propriedades dos dois tipos de amostras quando sujeitas ao tratamento térmico T6, verificou que o ganho das propriedades mecânicas das peças fundidas era muito superior ao ganho nas peças de SLM (Tabela 3.5).

Tabela 3.5: Propriedades mecânicas de amostras produzidas por SLM e por fundição com e sem tratamento térmico [27].

	E, GPa	0,2 % Yield Stress, MPa	UTS, MPa	Elongation, %	HV₁	Impact energy, J/cm²
SLM	32	159	160	1.59	107 ± 2	3.4
cast	114	99	193	6.52	67 ± 3	3.8
SLM T6	64	171	192	1.77	109 ± 3	2.6
cast T6	104	242	309	6.89	108 ± 6	3.6

No que toca à microestrutura granular, observou que sem tratamento térmico as amostras de SLM apresentavam um tamanho de grão bastante mais pequeno do que as amostras de fundição. Krystian Zyguła et. al. chega a identificar três zonas diferentes na microestrutura do grão: uma zona de grão fino (*fine*), uma zona de grão maior (*coarse*) e a zona termicamente afetada (HAZ). Pode observar-se estas zonas na Figura 3.5. O impacto do tratamento térmico na microestrutura granular traduz-se numa diminuição do grão nas amostras fundidas e numa redistribuição e aumento dos precipitados de Silício nas amostras de SLM.

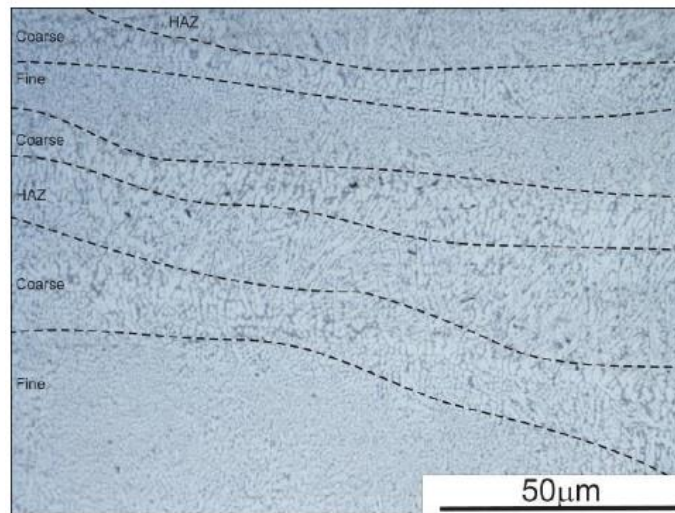


Figura 3.5: Microestrutura granular de amostra produzida por SLM [27].

K.Kamarudin et. al. [28] estudou a capacidade do SLM em produzir peças com boa rugosidade superficial e boa precisão dimensional. Para isso, elaborou um modelo (Figura 3.6 a)) com diferentes geometrias como cilindros, escadas, rampas, entre outras.

No que toca à avaliação da rugosidade superficial, K.Kamarudin et. al. mediu a rugosidade média, R_a , e a rugosidade entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo, R_t , nas zonas onde foram impressas rampas (Figura 3.6 b)), de modo a perceber a influência da inclinação da superfície nesta característica. Os resultados obtidos apresentam-se em seguida na Tabela 3.6.

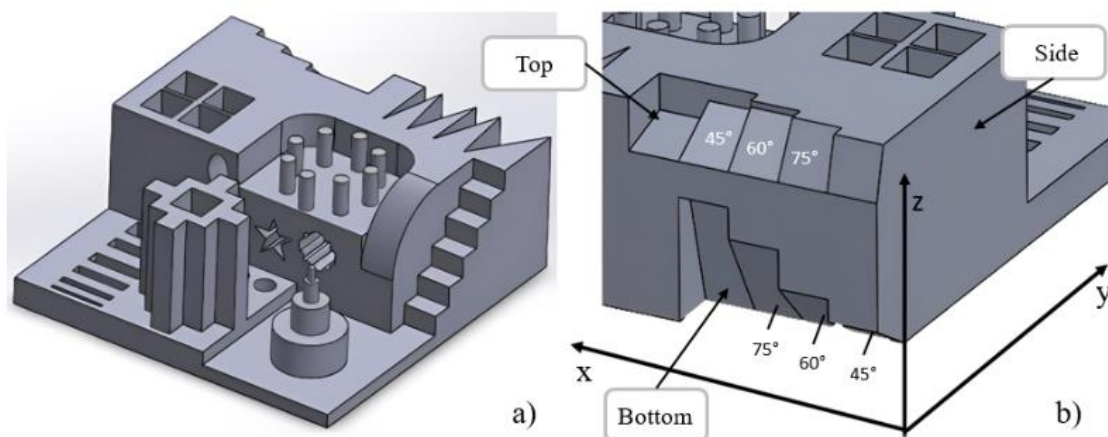


Figura 3.6: a) Modelo elaborado por K. Kamarudin; b) Zonas do modelo onde foram impressas rampas [28].

Tabela 3.6: Influência do ângulo de superfície em Ra e Rt [28].

No	Average	SLM AlSi10Mg						
		Top			Bottom			Side
		45°	60°	75°	45°	60°	75°	
1	Ra (μm)	3.35	2.28	3.43	9.20	8.32	7.19	2.29
2	Rt (μm)	15.05	12.16	15.63	42.16	43.61	34.96	11.45

Observando os resultados da Tabela 3.6 verifica-se que existe uma grande diferença entre a rugosidade no topo do modelo, comparando com a do fundo do modelo. K.Kamarudin et. al. atribuiu isto ao facto do tabuleiro da impressora ser pré-aquecido, o que faz com que as camadas da base estejam sujeitas a uma temperatura elevada durante mais tempo (menor taxa de arrefecimento), levando a maior rugosidade. Pode ainda observar-se que o ângulo da rampa tem também influencia na rugosidade, algo que foi explorado extensivamente por Giovanni Strano et. al. [29].

Altaf et. Al. [30] estudou a distorção e qualidade dimensional em amostras produzidas por SLM. O autor produziu 2 lotes de amostras, sendo que um primeiro lote englobava 3 conjuntos de 12 amostras e um segundo lote com somente 1 conjunto de 12 amostras. Os três conjuntos do primeiro lote serão identificados como lote 1,2 e 3, enquanto que o conjunto do segundo lote será o conjunto 4. Cada amostra individual apresenta dimensões de comprimento e altura fixas, 56 mm e 10,5 mm, respetivamente, e valores de espessura de 0,5; 0,8; 1,0; 1,20; 1,5; 1,8; 2,0; 2,50; 3,0; 3,5; 4,0; 5,0 mm. A orientação de impressão de cada amostra pode ser observada na Figura 3.7, onde também é perceptível a variação dos valores de espessura para cada amostra.

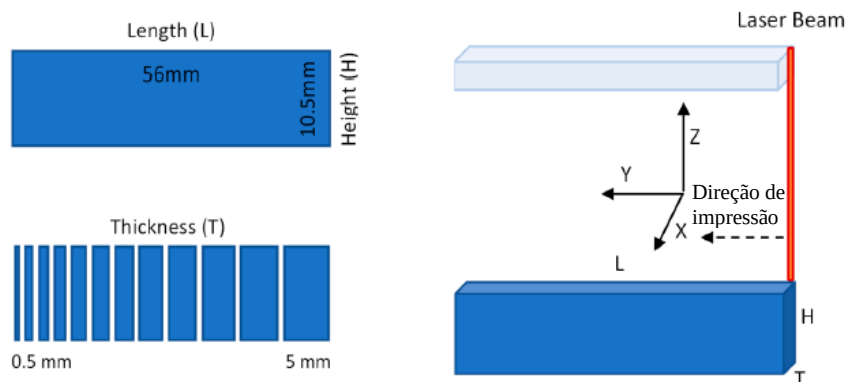


Figura 3.7: Impressão de amostras [30].

Com este estudo o autor pretendeu avaliar:

- A distorção e qualidade dimensional das amostras em condição de repetibilidade;
- A distorção e qualidade dimensional das amostras em condição de reprodutibilidade;
- O impacto da variação da espessura na distorção e qualidade dimensional das amostras;
- O impacto de tratamentos térmicos, nomeadamente o envelhecimento acelerado e tratamento térmico de solução, na distorção e qualidade dimensional das amostras.

Para esta dissertação só é interessante analisar os resultados obtidos sobre os três primeiros pontos.

A condição de repetibilidade acontece quando os parâmetros de teste, isto é, máquina, operador, método e material estão fixos e por isso as amostras comparadas têm de ser do mesmo lote (conjunto). Neste estudo, o autor mediu os valores do comprimento e da altura, correspondendo às direções y, z, das 12 amostras do conjunto 1. Altaf et. al. verificou que os valores medidos (valores reais) do comprimento das amostras não variavam significativamente entre si e que estavam próximos do valor nominal (*design length*) de 56 mm (ver Figura 3.8 a)). Por outro lado, quando o autor mediu os valores reais da altura, não só verificou que existia uma variação bastante mais elevada de amostra para amostra como também verificou que apenas 3 amostras cumpriam a tolerância especificada (ver Figura 3.8 b)).

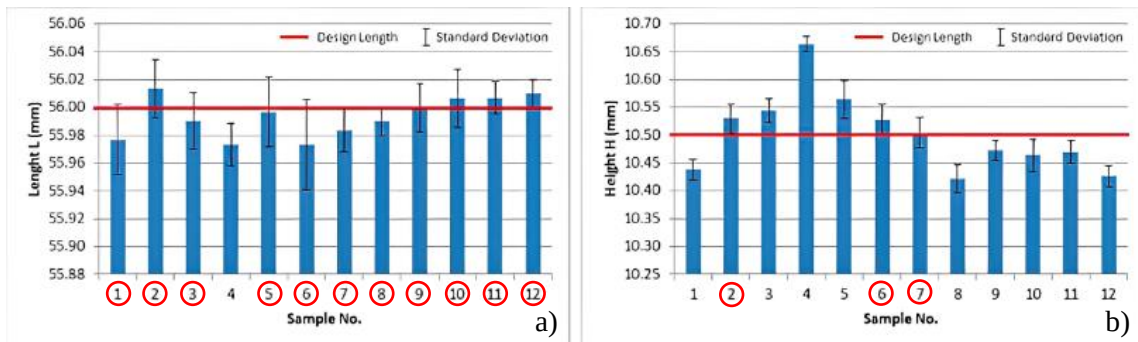


Figura 3.8: a) Valores reais do comprimento para as 12 amostras medidas; b) Valores reais da altura para as 12 amostras medidas. A vermelho estão assinaladas as amostras que cumprem a tolerância especificada [30].

Estes resultados podem ser correlacionados com os resultados de K.Kamarudin et. al., vistos anteriormente, onde também se verificou uma diferença nos resultados obtidos bastante significativa, ao longo do eixo z, mas para rugosidade superficial.

A condição de reprodutibilidade acontece quando pelo menos um parâmetro de teste, seja máquina, operador, localização ou tempo é alterado mantendo o mesmo método e material. Para esta condição o autor comparou os valores do comprimento e da altura das amostras do conjunto 1 e do conjunto 4, este último que foi produzido num lote diferente. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 3.7, onde se verifica que os desvios máximos da altura são maiores tanto para o conjunto 1 como para o conjunto 4. Para além disso, a diferença entre os desvios máximos dos dois conjuntos é quatro vezes maior na altura do que no comprimento. Também para esta condição verifica-se uma discrepância maior nos valores medidos ao longo do eixo z (altura) do que no plano xy (comprimento). Sendo assim, confirma-se uma tendência do SLM em produzir peças com maior homogeneidade ao longo do plano xy (plano paralelo ao tabuleiro de trabalho) do que ao longo do eixo z (direção perpendicular ao tabuleiro de trabalho).

Tabela 3.7: Valores medidos do comprimento e da altura para condição de reprodutibilidade [30].

Parâmetro	Comprimento (L)		Altura (H)	
	Conjunto 1	Conjunto 4	Conjunto 1	Conjunto 4
Valor nominal (mm)	56	56	10,5	10,5
Valor médio medido (mm)	55,993	56,006	10,502	10,591
Desvio máximo medido (mm)	0,027	0,05	0,164	0,258
Diferença entre dos desvios máximos (mm)	0,023		0,094	

Por fim, para observar o impacto da espessura na qualidade dimensional das peças, Altaf et. al. mediu os valores reais da espessura das amostras do conjunto 1 e constatou que para valores entre os 0,5 mm e os 2 mm, os erros de precisão eram aleatórios variando entre os 0,4% e os 3,8 %. Quando ultrapassou os 2 mm de espessura, observou que o aumento da espessura é inversamente proporcional ao erro de precisão como se pode observar pela Figura 3.9. Este resultado revela que a precisão do processo é limitada quando se trata de peças com espessura reduzida.

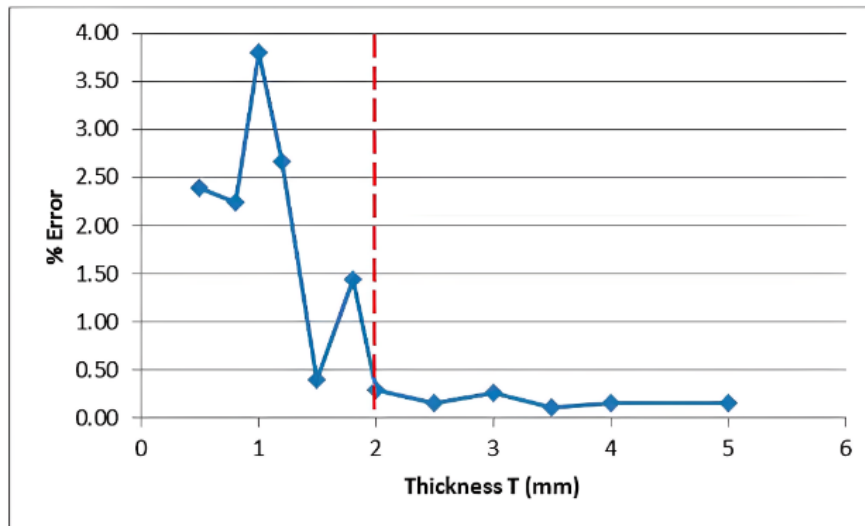


Figura 3.9: Correlação entre a espessura da amostra e o erro de medição [30].

Um fator que tem bastante influência, tanto nas propriedades mecânicas como nas propriedades geométricas, é a orientação da peça em relação ao plano do tabuleiro de impressão. Embora a influência desta variável tenha sido abordada por K.Kamarudin et. al., considerou-se importante proceder a uma explicação mais detalhada. Assim, destacam-se os estudos de Xiaofeng Li et. al. [31] e de Zhichao et. al. [32].

Xiaofeng et. al. concentrou-se na influência da orientação de amostras na microestrutura e nas propriedades mecânicas. Para isso, imprimiu 7 amostras com ângulos de impressão desde os 0° até aos 90° (em relação ao tabuleiro de trabalho), em incrementos de 15°. Xiaofeng et. al. verificou que a amostra produzida com um ângulo de 60° apresentava uma microestrutura caracterizada por grão regular e de tamanho reduzido tal como uma menor zona HAZ (*heat affected zone*). Isto leva a que esta amostra seja a que apresenta melhores propriedades mecânicas, apresentando o maior valor de tensão de rotura tal como de ductilidade e mantendo valores de tensão de cedência e de dureza semelhantes aos valores médios das 7 amostras. Estes resultados revelam que pode haver uma orientação preferencial para obter melhores valores das características e, mais uma vez, comprovam a grande influência desta variável nas propriedades de peças.

Zhichao et. al. conduziu um estudo bastante semelhante, tendo indo mais longe e estudando também a influência da orientação de amostras na precisão geométrica. O autor imprimiu várias amostras agrupando-as em 4 grupos segundo os 4 ângulos de impressão escolhidos: 35,5°; 45°; 60°; 90°. No que toca à microestrutura granular e às propriedades mecânicas, Zhichao et. al. obteve resultados semelhantes a Xiaofeng et. al., verificando também

uma correlação de proporcionalidade direta entre o ângulo de impressão e os valores das propriedades mecânicas das amostras.

Para a análise da precisão geométrica, o autor utilizou tomografia computadorizada por raio x, para obter “fatias” da secção transversal das amostras como está ilustrado na Figura 3.10 a). Nesta secção foram analisados um total de 500 fatias, sendo que uma delas está representada na Figura 3.10 b). Na Figura 3.10 b) estão indicados: o círculo teórico (*as-design circle*) que corresponde ao diâmetro de projeto; o círculo medido (*fitted circle*) que corresponde ao diâmetro medido pelo equipamento de medição; e a vermelho, a geometria real do círculo (*As-built cross-section shape*) que se obtém pela tomografia computadorizada.

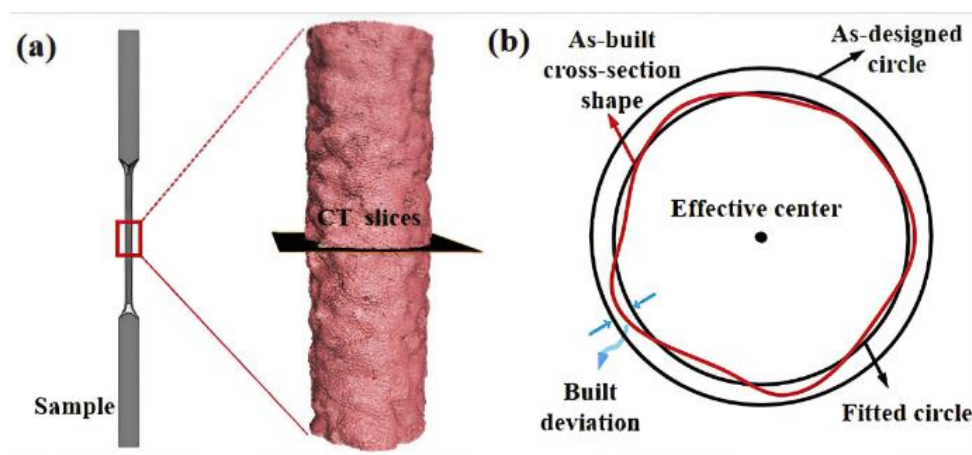


Figura 3.10: a) Obtenção das fatias por tomografia computadorizada; b) Ilustração do círculo teórico, o círculo medido e a geometria real do círculo [32].

Para a análise da precisão dimensional foram calculados os desvios entre o círculo medido e círculo teórico obtendo-se, para cada grupo, um gráfico de distribuição de probabilidade do desvio encontrado (Figura 3.11).

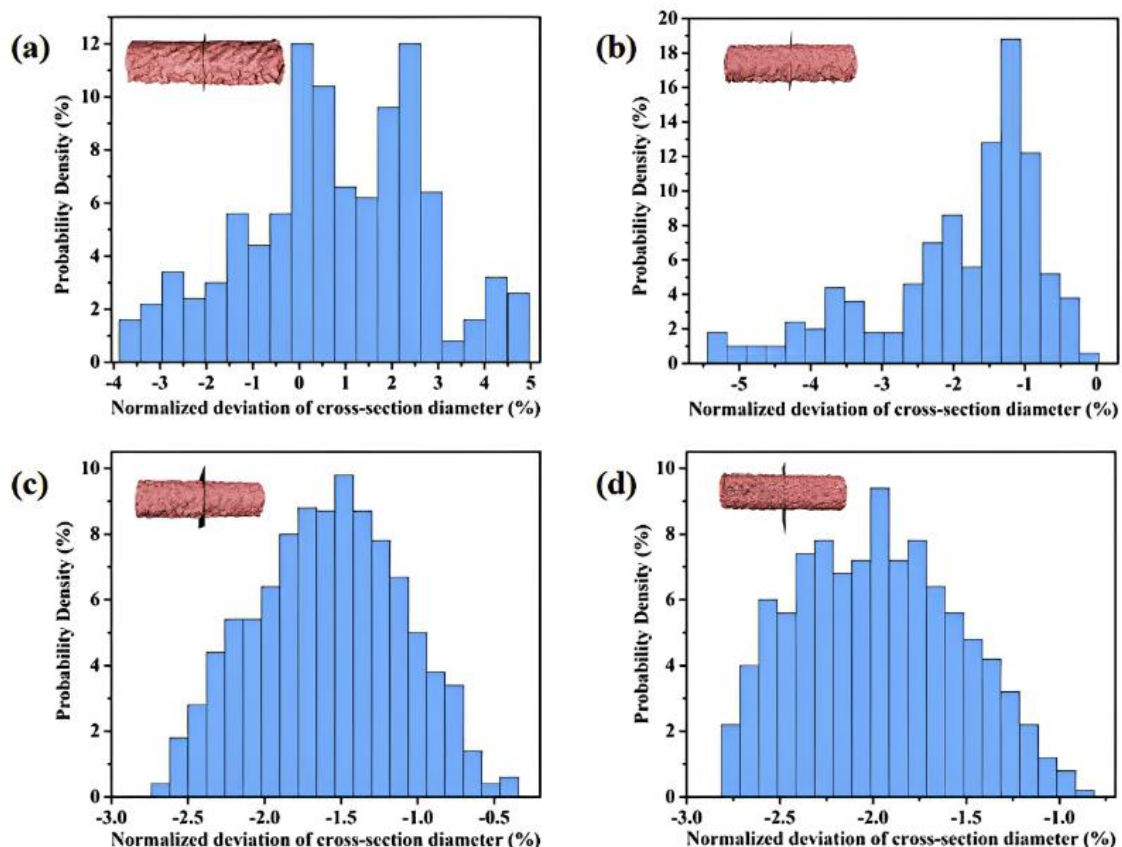


Figura 3.11: Densidade de probabilidade dos desvios de cada grupo de amostra; a) 35,5°; b) 45°; c) 60°; d) 90° [32].

O autor constatou que o grupo de amostras com maior intervalo de desvios foi o grupo das amostras impressas com 35,5° com desvios a variar entre os -4% e os 5%, o que significa que são as amostras que apresentam maior rugosidade superficial. Os grupos com menor intervalo de desvio foram os grupos dos 60° e dos 90°, com a maioria dos desvios entre os -2,7% e os -0,5% para ambos. Observando os gráficos destes dois grupos verifica-se que se assemelham a uma distribuição normal o que significa uma melhor rugosidade superficial pois existe menos variação nos desvios. Esta tendência de melhor qualidade superficial para ângulos mais elevados foi verificado por K.Kamarudin et. al. Um último comentário a fazer sobre estes resultados é o facto de que para todos os grupos de amostras, à exceção do grupo dos 35,5°, observa-se desvios negativos, o que pode ser indício de uma contração da geometria em peças produzidas por SLM.

Num âmbito industrial, é importante mencionar que esta tecnologia tem vindo a ganhar cada vez mais espaço sendo utilizada para diversas aplicações. Na indústria automóvel o SLM tem sido utilizado para duas vertentes: produção de peças de alta performance dando como exemplo [33], [34], [35] e produção de ferramentas personalizadas dando como exemplo [36].

4 MÉTODOS

Este capítulo indica os métodos que foram utilizados durante esta dissertação para verificar a viabilidade do processo de fabrico aditivo metálico para a produção de *Rear Housings*. Para cada método, é indicado o propósito do seu uso, o equipamento utilizado e as condições que as peças têm de cumprir para serem validadas.

4.1 FABRICO DE PEÇAS IMPRESSAS

4.1.1 Escolha da impressora

Para desenvolver esta dissertação foi necessário escolher uma impressora de impressão 3D metálica que tivesse capacidade de produzir as peças deste estudo. Atualmente, existe uma grande variedade de fornecedores que oferecem diferentes tipos de impressoras 3D dentro da tecnologia de *Powder Bed Fusion*. A dimensão do tabuleiro de trabalho, o tempo de cadeia de produção, a potência e número de lasers e os materiais utilizados são algumas especificações que variam entre as várias soluções de impressoras 3D. Relembrando que o objetivo deste estudo é verificar se a Fusão Seletiva por Laser é uma alternativa viável à metodologia de fabrico atual, os requisitos exigidos para a impressora foram os seguintes:

- A impressora deve ter uma cadência de produção que permita fabricar um número de peças equivalentes ao que são fabricadas com a metodologia atual (cerca de 20 compressores por semana);
- A impressora tem de produzir peças que cumprem os requisitos identificados em 2.2.3;
- Preferencialmente, a impressora deve possuir sistemas automatizados que tratam do pós-processamento das peças.

A escolha desta impressora foi auxiliada pela empresa CODI [37]. A CODI é uma empresa portuguesa dedicada ao fabrico e venda de soluções de impressão 3D. Dado os requisitos mencionados acima, a CODI indicou a impressora MetalFABG2 (Figura 4.1), da empresa holandesa Additive Industries [38]. A MetalFABG2 é uma impressora 3D topo de gama que utiliza a tecnologia de PBF, nomeadamente a variante SLM. As especificações mais relevantes estão indicadas na Tabela 4.1.



Figura 4.1: Impressora MetalFABG2, Additive Industries [38].

Tabela 4.1: Especificações principais da MetalFABG2 [38].

Especificações	Dados
Tecnologia	Powder Bed Fusion (SLM)
Tamanho do tabuleiro de trabalho	420×420×400 [mm]
Laser	<i>Yb fibre lasers</i> 500W
Número de Lasers	1 a 4
Tempo de operação autónoma	112 [horas]
Processos de pós- processamento	Completamente automático: inclui extração, limpeza e reciclagem do pó
Precisão*	$< 0.050 + 0.002 \times \text{comprimento da peça} $ [mm]
Repetibilidade*	$< 0.050 $ [mm]
Espessura de camada	20-100 [μm]
Materiais	Titânio (Ti6Al4V), Alumínio (AlSi10Mg), <i>ScalmAlloy</i> ®, Aço inoxidável(316L), Inconel (IN718), Aço rápido (1.2709)

*Nota: Estes valores variam consoante, o material utilizado, as dimensões e a geometria das peças.

4.1.2 Impressão das peças

Antes do começo desta dissertação, para além da escolha da impressora, foram também impressas as peças que são analisadas e comparadas neste estudo. Para este estudo foram impressos 8 *Rear Housings* (Figura 4.2) e foram utilizados os parâmetros de impressão indicados na Tabela 4.2. A escolha dos parâmetros foi feita por parte da Additive Industries com base na geometria e dimensão da peça e no material a utilizar que devia ser equiparável ou igual ao que é utilizado nas peças fundidas. De notar que dado que as 8 peças foram impressas simultaneamente está-se perante uma condição de repetibilidade. As peças foram numeradas de 1 a 8, sendo que a peça número 2 foi utilizada para a avaliação do material que ocorreu fora da empresa.



Figura 4.2: *Rear housings* impressos.

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados para o fabrico das peças.

Parâmetros	Dados
Espessura da camada	60 [μm]
Número de lasers	3
Número de peças impressas	8
Ângulo das peças em relação ao tabuleiro	45° (valor estimado)
Tempo de impressão	42 [horas]
Material	AlSi ₁₀ Mg
Tratamento térmico	SR2 de acordo com a norma ASTM F3318

Por razões de confidencialidade, a quantidade de parâmetros conhecidos é reduzida, no entanto, é crucial dar a conhecer estes parâmetros de modo a perceber os resultados que foram obtidos. As peças impressas serão denominadas por peças 3D.

4.2 ANÁLISE DO MATERIAL

A análise do material é um processo fundamental, dado que permite conhecer e perceber melhor as diferenças da composição e das propriedades mecânicas entre as peças 3D, as peças fundidas e as peças *billet*. Dado o contexto da dissertação, para a validação do material optou-se somente por recorrer a 2 tipos de análise e 1 tipo de ensaio mecânico:

- **Análise química da composição do material;**
- **Análise ótica da microestrutura granular;**
- **Ensaio de dureza (teste de Vickers).**

4.3 3D SCANNING

De modo a verificar a precisão dimensional e geométrica da tecnologia de fabrico aditivo metálico, foi utilizado um sistema de digitalização por varrimento ou 3D *Scanning*. O equipamento utilizado foi o HandySCAN BLACK™ |Elite da empresa Creaform [39] (Figura 4.3) e a medição foi realizada pela empresa S4Metro [40], certificada pela norma ISO 17025. As principais especificações técnicas do equipamento estão indicadas na Tabela 4.3.



Figura 4.3: HandySCAN BLACK™ em funcionamento. Imagem genérica do funcionamento do equipamento, não representando qualquer etapa desta dissertação [40].

Tabela 4.3: Principais especificações técnicas do HandySCAN BLACK™. [39]

Especificações	Dados
Precisão	Até 0,025 mm
Precisão volumétrica	0,02 mm + 0,04 mm/m
Resolução de medição	0,025 mm
Taxa de medição	1.300.000 medições/s
Intervalo de tamanho de peças (recomendada)	0,05 - 4 m

Esta tecnologia é um método de engenharia inversa, uma vez que se cria um modelo digital a partir da peça física. O procedimento de todo o processo é explicado em seguida e ilustrado na Figura 4.4 :

1. Colocam-se autocolantes, denominados de alvos, na peça que vai ser medida para servirem como pontos de referência para o scan. Estes alvos também estão presentes no tabuleiro onde a peça é assente (Figura 4.4 a)).
2. Inicia-se o primeiro scan com o operador apontando a “pistola” de lasers para a peça de modo a captar a sua geometria. O operador consegue verificar o nível de detalhe que está a ser captado pelo scan, pois um modelo digital da peça é criado em tempo real no software utilizado (Figura 4.4 b)).
3. Realiza-se o segundo scan para capturar o outro lado da peça. Caso não seja necessário mais nenhum scan, obtém-se o modelo digital final da peça.

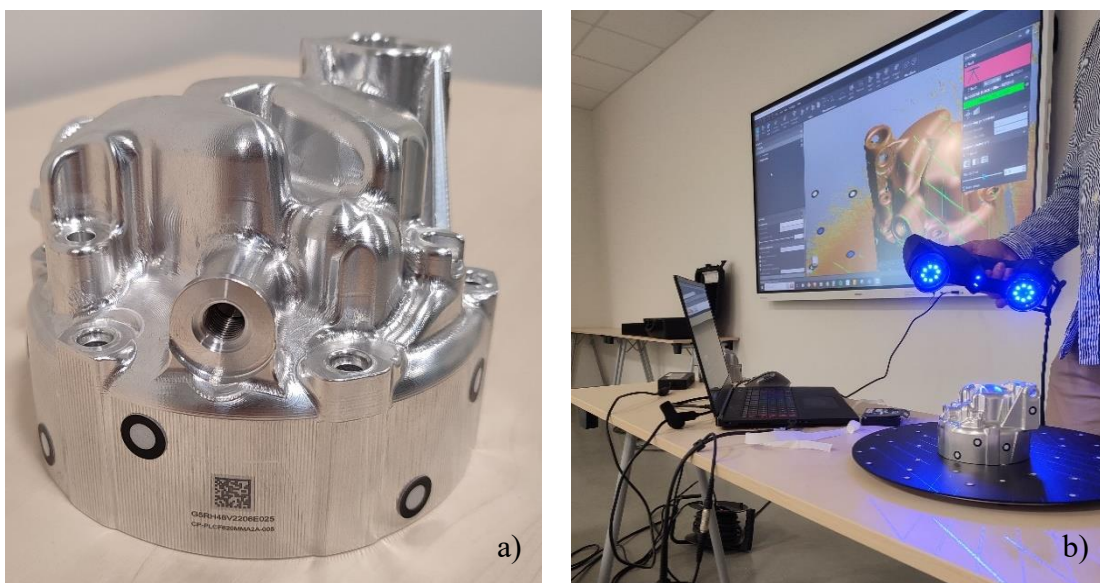


Figura 4.4: a) Alvos colocados na peça; b) Scan da peça e criação do modelo digital da peça.

4.4 AVALIAÇÃO DA MAQUINABILIDADE

A maquinação permite conferir as dimensões finais à peça, sendo por isso uma das etapas mais importantes em todo o processo de produção. O modo como a peça reage às operações de maquinação, ou por outras palavras, a maquinabilidade é uma característica que deve ser analisada pois pode influenciar todas as etapas posteriores. O equipamento utilizado para maquinar as peças foi a Doosan DVF 5000 [41] (Figura 4.5).



Figura 4.5: Doosan DVF 5000 [42].

A avaliação da maquinabilidade engloba: problemas que surgem na altura da maquinação; análise da qualidade das superfícies maquinadas, dada pela rugosidade, circularidade e planeza, o aspeto da limalha e o desgaste das ferramentas utilizadas.

4.5 AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA E DIMENSIONAL

Depois de serem maquinadas, as peças necessitam de ser controladas dimensionalmente e geometricamente para verificar se todos os elementos geométricos presentes no desenho técnico de maquinação se encontram dentro das tolerâncias especificadas. A máquina de medição por coordenadas ou CMM (*Coordinate Measuring Machine*) utilizada para a medição é a Zeiss Accura [43] (Figura 4.6).



Figura 4.6: Zeiss Accura [44].

Depois da medição de cada peça, é criado um relatório de medição, permitindo desta maneira verificar, com detalhe, todos os desvios a nível geométrico e dimensional que a peça apresenta.

4.6 TESTE DE FUGAS

A produção de um compressor 100% estanque é irrealista, pois envolveria uma alta precisão de fabrico e maquinação, tolerâncias extremamente baixas e acabamentos superficiais muito elevados. Tal compressor não seria economicamente viável, por isso é necessário especificar a quantidade aceitável de refrigerante que pode escapar durante a vida do compressor ou por outras palavras, o seu nível de estanquidade.

Com esta finalidade, é realizado o teste de fugas, onde o compressor é primeiramente pressurizado com hélio a 17 bar e, em seguida, colocado numa câmara de vácuo que mede a quantidade de gás que escapa do compressor, durante 30 segundos. A quantidade de hélio que pode escapar do compressor tem de ser inferior a 1×10^{-4} mbar.l/s. Esta especificação de teste provém de um acordo entre o cliente e a empresa uma vez que originalmente o teste era realizado com refrigerante R1234yf, implicando uma especificação diferente. Decidiu-se fazer o teste com hélio, já que é economicamente mais viável e não é necessário haver um sistema de recuperação do gás, como seria no caso da utilização do refrigerante. Caso a especificação não seja cumprida,

o compressor é mergulhado em água para se poder identificar o local que está a permitir fuga de refrigerante. O *set up* utilizado para este teste engloba a bomba de vácuo ASM 340 da empresa Pfeiffer Vacuum [45], a câmara de vácuo, onde é colocado o compressor e um monitor onde é apresentado o nível de hélio medido (Figura 4.7).

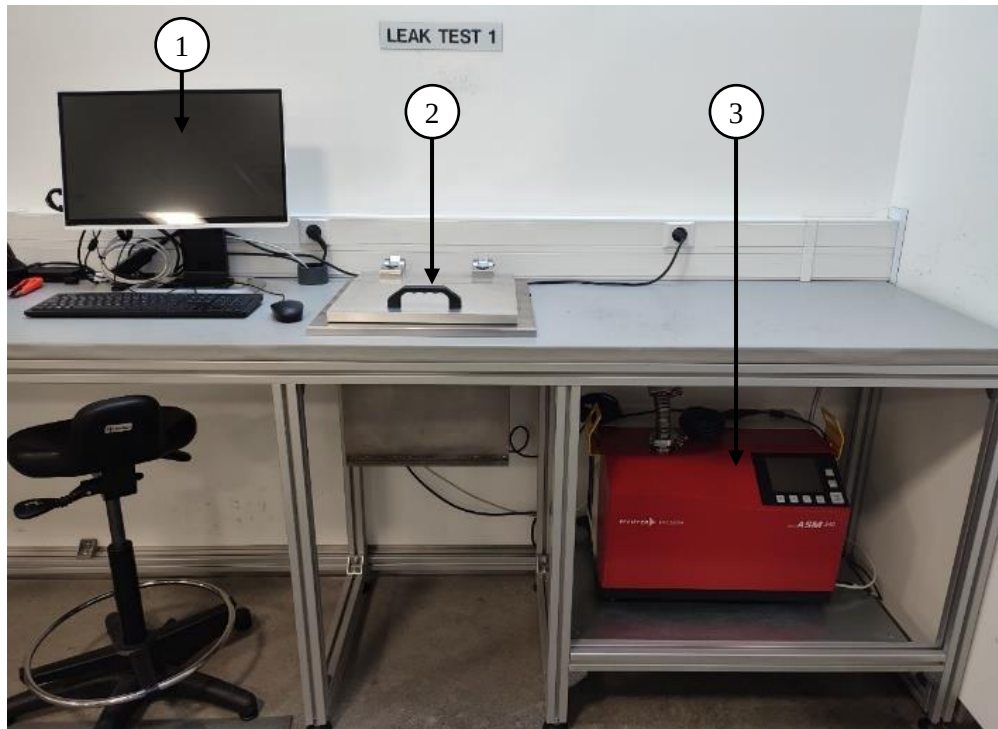


Figura 4.7: Set up utilizado para o teste de fugas. 1: Monitor; 2: Câmara de vácuo; 3: Bomba de vácuo ASM 340.

4.7 TESTE DE PRESSÃO

Para avaliar a integridade estrutural do RH, a análise do material e das suas propriedades acaba por não ser suficiente, uma vez que não se tem em consideração a geometria da peça. Por esta razão, numa visão mais funcional, realiza-se o teste de pressão com o intuito de verificar se o RH cumpre a condição de integridade estrutural imposta pelo cliente. O teste consiste em injetar água durante 1 minuto para o interior do RH a uma pressão de 90 bar, correspondendo a 3 vezes a pressão máxima de funcionamento, durante 1 minuto. Se o RH aguentar estas condições, não apresentando qualquer fissura, é considerado válido. O equipamento utilizado é a bancada de teste de pressão LP-1322-4 (Figura 4.8), da empresa alemã HD tech [46] .



Figura 4.8: HD tech LP-1322-4 [46].

Geralmente, este teste é realizado com o compressor totalmente montado, porém, dado que se pretende testar somente a resistência estrutural do RH, o *set up* normalmente utilizado tem de ser adaptado. Na Figura 4.9 pode observar-se a diferença na montagem de um teste de pressão com o compressor e um teste de pressão só para o RH. O desenho técnico do conjunto utilizado para a testagem do RH está representado no Anexo 1, de modo a visualizar os componentes que não são perceptíveis na Figura 4.9 b).



Figura 4.9: Teste de pressão para: a) o compressor completo, b) o RH.

4.8 TESTES ELÉTRICOS

4.8.1 Teste de resistência de isolamento elétrico

À semelhança com o que acontece com a estanquidade do compressor, é impossível obter um compressor que tenha isolamento elétrico perfeito. Por esta razão, é realizado o teste de resistência de isolamento elétrico com o objetivo de medir a capacidade do compressor em isolar a corrente elétrica. Os *Housings* e o *cover* do *Inverter* são os responsáveis por esta função, uma vez que são os componentes que estão em contacto com o exterior. Se estes componentes não garantirem um determinado nível de isolamento, o compressor consumirá mais energia, levando por isso a uma diminuição de rendimento e de performance. Decidiu-se realizar este teste uma vez que o material do RH 3D pode apresentar propriedades diferentes do que o do RH fundido. Para este teste foi utilizado o analisador de segurança elétrica Chroma 19032-P, em conjunto com uma câmara isolante, para proteger o compressor de variações de temperatura e humidade (Figura 4.10).



Figura 4.10: Set up utilizado para o teste de resistência de isolamento elétrico. Em cima: Chroma 19032-P; Em baixo: Câmara isolante.

A qualidade de isolamento do material é dada pela resistência elétrica medida em $M\Omega$. Assim, quanto maior for o valor de resistência elétrica medido, melhor é o isolamento, pois significa que a corrente tem mais dificuldade em atravessar o material. Para o RH ser validado, o valor medido deve ser superior a $0,8 M\Omega$.

4.8.2 Teste de ligação equipotencial

O segundo teste elétrico a realizar é o teste de ligação equipotencial. Este teste avalia a capacidade dos *Housings* em dispersar a corrente elétrica à superfície, sendo por isso um teste de segurança. Quando o compressor está a funcionar é percorrido por corrente elétrica, a qual não se deve acumular em nenhum *Housing*, pois pode provocar dano ao componente ou, em caso de manuseamento do compressor, pode provocar choque. Para a realização do teste, é utilizado o miliohmímetro digital Resistomat 2316 (Figura 4.11).



Figura 4.11: Resistomat 2316 [47].

Este teste distingue-se do teste anterior pois mede-se a resistência elétrica à superfície, sendo que, para este caso, se pretende obter o menor valor possível. Para o RH ser validado deve apresentar um valor de resistência menor que 0,2 mΩ.

4.9 TESTE DE PERFORMANCE

O Teste de Performance é o teste funcional mais importante, uma vez que é nesta fase que o compressor é testado. Durante a sua vida, o compressor é sujeito a diferentes condições de funcionamento que são simuladas durante o teste de performance através dos chamados pontos de funcionamento, onde os valores das variáveis de teste mudam consoante o ponto de funcionamento. No Teste de Performance existem 2 tipos de variáveis: variáveis controláveis e variáveis não controláveis. As variáveis controláveis possibilitam a sua alteração no decorrer do teste e por isso são as que caracterizam os pontos de funcionamento. As variáveis passíveis de controlo são:

- Temperatura de sucção;
- Pressão de sucção e de descarga;
- Rotações por minuto (RPM).

Por outro lado, as variáveis não controláveis são as variáveis medidas durante o funcionamento do compressor e que permitem avaliar o comportamento deste, ditando a sua validação ou não validação. Existem várias variáveis não controláveis, dando como exemplo:

- Temperatura de descarga;
- Caudal;
- Vibração e Ruído.

Os valores das variáveis controláveis e dos parâmetros que as variáveis não controláveis devem cumprir dependem do modelo de compressor que se pretende estudar. Os valores dos pontos de funcionamento para o modelo de compressor utilizado nesta dissertação serão abordados em 5.3.4. Apesar dos pontos de funcionamento variarem de compressor para compressor, o procedimento de teste é comum a todos:

1. O compressor é pesado em seco e é colocado óleo até atingir o valor especificado (Figura 4.12 a)).
2. O compressor é montado na máquina de teste, sendo anexado todos os conectores mecânicos e eletrônicos necessários (Figura 4.12 b)). O *set up* de teste é composto pela: câmara anecoica, onde o compressor é montado; um módulo onde se encontra todos os outros componentes do sistema de refrigeração termodinâmico e os sensores de medição; e ainda, a máquina que carrega o refrigerante e o óleo para o sistema (Figura 4.13).
3. O sistema é posto em vácuo, de modo a retirar todo o ar e seguidamente é colocado a quantidade de óleo e de refrigerante desejada.
4. A sequência dos pontos de funcionamento especificados é iniciada. Antes da sequência é feito o chamado ponto de óleo que tem como objetivo estabilizar os níveis de óleo do sistema.
5. Por fim, depois do teste ser efetuado, é analisado o relatório que indica o comportamento do compressor ao longo do teste.

Semelhante ao que acontece no teste de fugas, para a realização deste teste é utilizado o compressor completo. Consequentemente, a validação do RH dependerá se se verifica algum compromisso na performance do compressor.

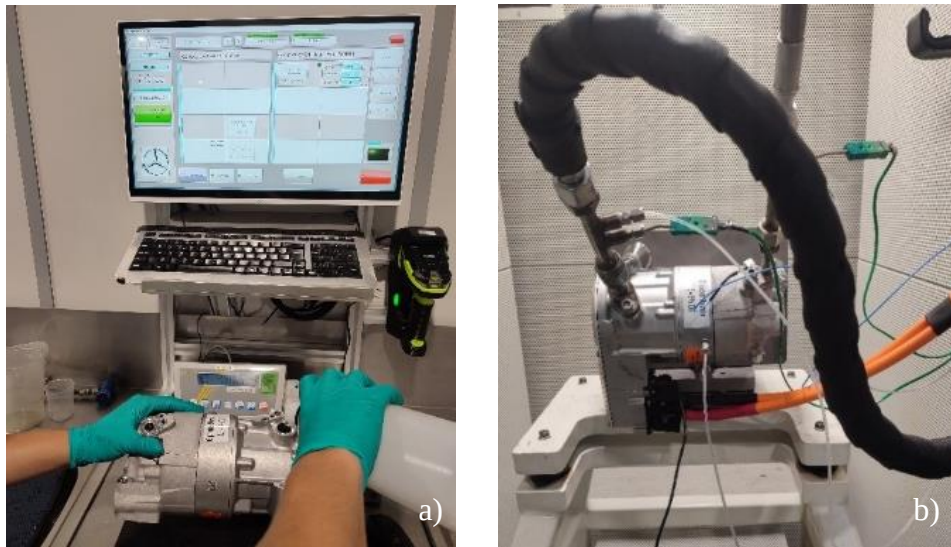


Figura 4.12: a) Pesagem do compressor e inserção do óleo; b) Compressor montado na câmara anecoica.

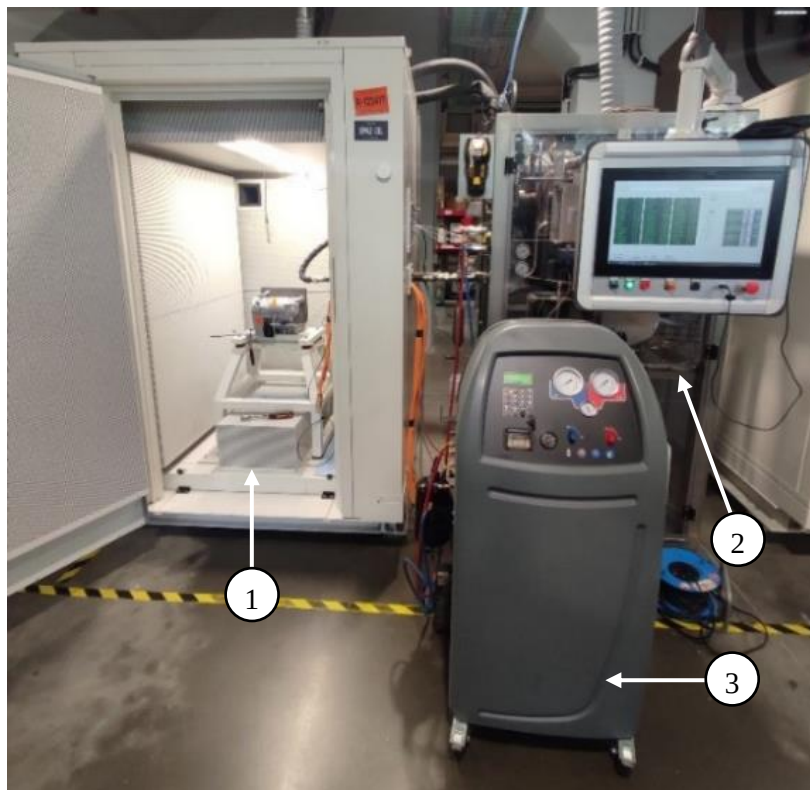


Figura 4.13: Set up do teste de performance. 1) Câmara anecoica; 2) Módulo complementar; 3) Máquina de carregamento de refrigerante.

4.10 TESTE DE CORROSÃO

Sendo o compressor um componente que está sujeito às condições climáticas do meio exterior, é importante verificar a sua capacidade de resistir a ambientes climáticos agrestes. Um dos ambientes que mais danifica um componente deste tipo é um ambiente com uma elevada presença de sal, uma vez que proporciona corrosão. Por esta razão, realiza-se o teste de corrosão de modo a ver como o compressor reage a um ambiente altamente corrosivo. Para isso, é utilizada a câmara climática WeissTechnik SaltEvent [48] (Figura 4.14).



Figura 4.14: WeissTechnik SaltEvent [48].

O teste denomina-se de *Salt Spray Test* e consiste em colocar um compressor completamente montado na câmara climática que simulará um ambiente salino (rico em sal), durante 720 horas. O teste é realizado de acordo com a norma ISO 9227 e, por isso, variáveis como a temperatura da câmara, as concentrações da solução salina, entre outras, são indicadas pela norma.

Tradicionalmente, o processo de validação consiste numa análise visual e num teste de performance que é efetuado depois do teste de corrosão. O objetivo deste teste de performance é verificar se houve perda de performance. Tendo em conta que o que se pretende validar é apenas o RH, não se considerou necessário realizar este teste, fazendo com que a validação esteja apenas dependente de uma análise visual.

A análise visual consiste em observar o RH periodicamente, a cada 240 horas, verificando se existe zonas onde ocorreu corrosão férrea (*red rust*), pois podem comprometer a integridade estrutural e funcional do componente e consequentemente do compressor. No fim das 720 horas é realizado o *tear down* que consiste em desmontar o compressor, neste caso, o RH, e observar se houve qualquer passagem de corrosão férrea para dentro da peça. Caso não haja passagem de corrosão férrea para o interior do RH, a peça é validada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo irão ser apresentados todos os dados obtidos pelos métodos referidos no capítulo anterior. O capítulo está dividido em 3 subcapítulos correspondendo aos 3 grupos de especificações que se pretendeu avaliar as peças 3D. Ao longo deste capítulo é feita a ligação entre os diferentes resultados.

5.1 NÍVEL DIMENSIONAL, GEOMÉTRICO E DE ACABAMENTO SUPERFICIAL

5.1.1 3D *Scanning*

Para o 3D *Scanning* foram utilizadas 7 peças 3D, 1 peça fundida e 1 peça *billet*. Com este método pretendeu-se avaliar duas características da tecnologia de fabrico aditivo metálico: Precisão dimensional e Precisão geométrica. A avaliação destas características foi feita comparando os resultados da peça fundida e da peça *billet*, que foram assumidas como representativas para cada tecnologia, com os resultados da peça impressa.

5.1.1.1 Avaliação da precisão dimensional

De modo a avaliar a precisão dimensional, procedeu-se à comparação de cada peça com o modelo CAD (modelo teórico). Para isso, utilizando o software do *Scanner*, sobrepôs-se o modelo digital de cada peça, que foi captado no *scan*, no modelo CAD. De seguida, foram escolhidos vários pontos incluindo pontos de *datums*, pontos de superfícies que serão maquinadas, e pontos em zonas de geometria mais complexa. Estes pontos eram comuns para todas as peças em análise, possibilitando uma comparação correta das peças. Para esta análise foram escolhidos um total de 48 pontos, sendo que na Figura 5.1, está ilustrado a informação lida para um desses pontos. Pela observação da Figura 5.1, é possível verificar o valor medido para esse ponto, que corresponde ao desvio da peça em relação ao CAD, e o valor da tolerância especificada, $\pm 0,3$ mm, que corresponde à tolerância geral do desenho técnico de fabrico.

Point 1			
Dimension	Nom.	Val.	Dev.
Normal±0.300	0.000	-0.567	-0.567

Figura 5.1: Exemplo de um ponto medido pelo *Scanning* 3D.

Para ajudar na visualização dos desvios de cada peça foram tiradas capturas de ecrã do software, onde é possível observar a informação de vários pontos, tal como, o leque de cores das peças que traduz os valores dos desvios (Figura 5.2). As zonas que apresentam tons próximos do vermelho representam um excesso de material em relação ao CAD enquanto que zonas com tons próximos do azul representam falta de material.

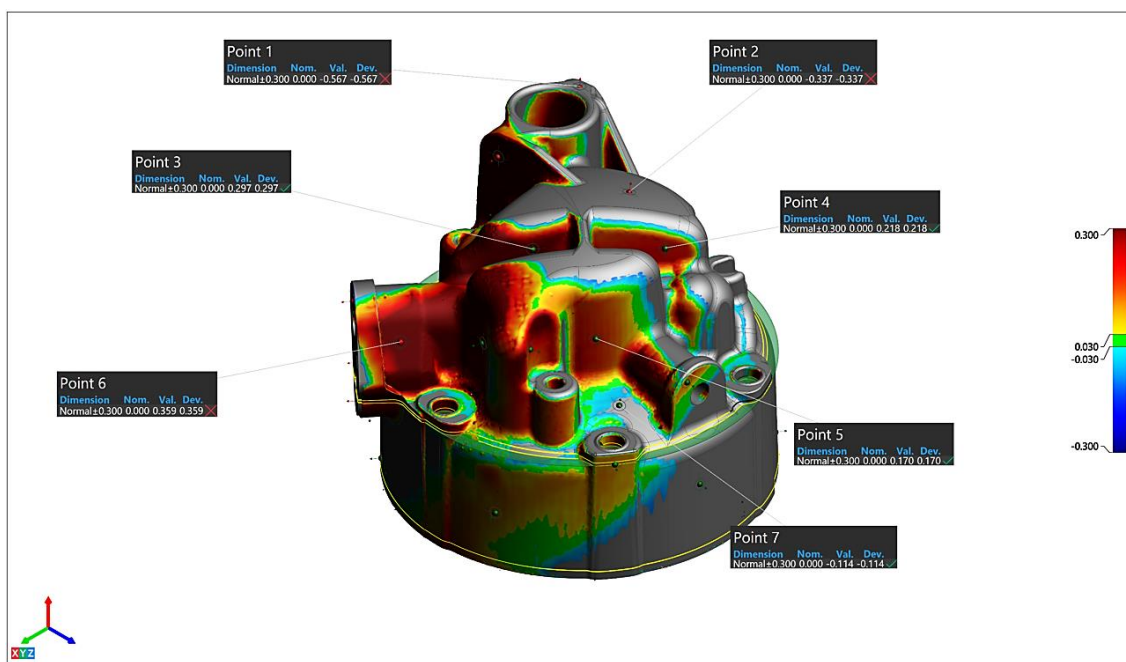


Figura 5.2: Captura de ecrã de uma peça no software do scan 3D.

A Tabela 5.1 apresenta os valores de cada ponto das 9 peças, sendo que os valores dos pontos que estão fora da tolerância estão assinalados a azul, caso se trate de falta de material, e a vermelho, quando existe excesso de material. Os pontos que estão assinalados a amarelo representam pontos em zonas que irão ser maquinadas. É importante relembrar que a peça *billet* já apresentava a geometria final, enquanto que a peça 3D e a peça fundida, nesta fase, ainda não se encontravam maquinadas. Por esta razão, a seguinte análise focou-se nas diferenças entre as peças impressas e a peça fundida.

Tabela 5.1: Valores dos pontos de scan para as 9 peças.

Peça	3D nº1	3D nº3	3D nº4	3D nº5	3D nº6	3D nº7	3D nº8	Fundida	Billet
Ponto 1	-0,567	-0,569	-0,737	-0,556	-0,646	-0,806	-0,802	-0,113	-0,011
Ponto 2	-0,337	-0,302	-0,411	-0,357	-0,368	-0,375	-0,350	-0,078	-0,114
Ponto 3	0,297	0,143	0,216	0,206	0,176	0,186	0,182	0,197	0,115
Ponto 4	0,218	0,124	0,144	0,164	0,138	0,173	0,224	0,042	0,114
Ponto 5	0,170	0,130	0,092	0,143	0,103	0,126	0,141	-0,023	0,085
Ponto 6	0,359	0,103	0,311	0,116	0,185	0,064	0,097	0,140	0,103
Ponto 7	-0,114	-0,150	-0,152	-0,094	-0,098	-0,130	-0,123	-0,086	-0,020
Ponto 8	0,148	0,232	0,132	0,214	0,224	0,129	0,136	0,042	0,060
Ponto 9	0,375	0,291	0,246	0,327	0,284	0,259	0,200	0,361	
Ponto 10	0,265	0,139	0,402	0,315	0,400	0,361	0,321	0,221	0,134
Ponto 11	0,301	0,563	0,149	0,271	0,242	0,628	0,383	0,165	-3,165
Ponto 12	-0,606	-0,287	-0,609	-0,587	-0,662	-0,292	-0,431	0,094	-1,642
Ponto 13	-0,792	-0,681	-0,823	-0,855	-0,882	-0,598	-0,648	0,130	-0,476
Ponto 14	-0,089	0,035	-0,024	0,024	-0,024	-0,013	-0,038	0,170	0,110
Ponto 15	-0,043	-0,033	0,007	-0,004	0,001	-0,032	-0,013	0,316	0,323
Ponto 16	0,076	-0,071	0,060	0,055	0,064	-0,002	-0,002	0,142	0,244
Ponto 17	0,251	0,291	0,210	0,189	0,213	0,295	0,225	0,182	0,281
Ponto 18	0,187	-0,030	0,147	0,067	0,074	-0,002	0,072	-0,065	-0,121
Ponto 19	0,124	0,099	0,017	0,025	0,005	0,042	0,036	-0,149	-1,601
Ponto 20	-0,370	-0,315	-0,421	-0,411	-0,381	-0,349	-0,361	-0,347	-0,239
Ponto 21	-0,248	-0,146	-0,208	-0,304	-0,225	-0,078	-0,083	-0,469	-1,302
Ponto 22	-0,456	-0,387	-0,447	-0,453	-0,441	-0,421	-0,450	-0,430	-0,245
Ponto 23	-0,322	-0,226	-0,279	-0,220	-0,251	-0,308	-0,266	-0,289	-0,222
Ponto 24	-0,208	-0,354	0,023	-0,258	-0,217	-0,345	-0,278	-0,293	-0,253
Ponto 25	-0,147	-0,281	-0,189	-0,240	-0,217	-0,230	-0,209	-0,054	-0,066
Ponto 26	-0,104	0,050	-0,009	0,056	-0,049	0,172	0,050	0,111	-0,747
Ponto 27	0,023	-0,290	0,025	-0,007	0,046	0,109	-0,007	-0,108	-0,625
Ponto 28	0,114	-0,124	0,179	0,202	0,233	0,192	0,104	-0,085	-0,801
Ponto 29	-0,023	0,246	0,192	0,291	0,204	0,259	0,215	0,017	-0,601
Ponto 30	0,094	0,090	0,249	0,288	0,272	0,237	0,182	0,013	-0,572
Ponto 31	0,408	0,372	0,471	0,552	0,552	0,563	0,457	0,026	0,055
Ponto 32	-0,185	0,066	-0,065	0,131	0,094	0,130	0,060	-0,236	-0,115
Ponto 33	0,430	0,496	0,453	0,461	0,450	0,529	0,478	0,322	0,194
Ponto 34	0,315	0,539	0,427	0,481	0,447	0,471	0,489	0,092	-0,004
Ponto 35	-0,013	0,165	0,028	0,059	0,054	0,076	0,077	-0,220	-0,203
Ponto 36	0,059	0,039	-0,041	0,003	-0,016	0,031	0,024	-0,379	-0,222
Ponto 37	0,058	-0,140	0,105	0,145	0,168	0,134	0,058	-0,024	-0,594
Ponto 38	-0,018	0,054	0,124	0,175	0,127	0,135	0,103	0,047	-0,538
Ponto 39	-0,171	-0,240	-0,225	-0,190	-0,227	-0,261	-0,191	-0,331	-0,268
Ponto 40	-0,199	-0,196	-0,253	-0,240	-0,259	-0,243	-0,184	-0,291	-0,194
Ponto 41	-0,061	-0,097	0,095	0,094	0,089	0,072	0,002	-0,049	0,116
Ponto 42	-0,456	-0,393	-0,500	-0,828	-0,550	-0,424	-0,419	-0,427	-0,222
Ponto 43	-0,049	-0,060	-0,068	-0,056	-0,045	-0,056	-0,051	-0,049	-0,040
Ponto 44	-0,028	0,000	-0,022	-0,003	-0,068	-0,027	-0,037	0,081	0,007
Ponto 45	-0,064	-0,072	-0,082	-0,090	-0,045	-0,114	-0,071	-0,066	-0,058
Ponto 46	0,068	0,032	-0,054	-0,039	-0,042	-0,047	-0,027	-0,178	-1,590
Ponto 47	-0,138	-0,176	-0,202	-0,210	-0,217	-0,187	-0,166	-0,197	-1,911
Ponto 48	-0,020	-0,099	-0,118	-0,105	-0,143	-0,111	-0,093	-0,167	-1,898

Os valores da Tabela 5.1 podem ser resumidos na Tabela 5.2 onde se constata que as peças impressas apresentam um maior número de pontos que não cumprem a tolerância especificada. Ademais, as peças impressas apresentam um intervalo médio entre os desvios máximos e mínimos mais elevado do que a peça fundida.

Tabela 5.2: Percentagem de pontos acima do limite superior e abaixo do limite inferior e valores do desvio máximo e mínimo.

Peça	3D nº1	3D nº3	3D nº4	3D nº5	3D nº6	3D nº7	3D nº8	Média 3D	Fundida
Pontos acima do limite superior	13%	8%	10%	10%	8%	10%	10%	10%	6%
Pontos abaixo do limite inferior	17%	15%	15%	17%	15%	17%	15%	15%	13%
Desvio máximo (mm)	0,430	0,563	0,471	0,552	0,552	0,628	0,489	0,526	0,361
Desvio mínimo (mm)	-0,792	-0,681	-0,823	-0,855	-0,882	-0,806	-0,802	-0,806	-0,469

De forma a compreender a criticidade dos resultados obtidos, observou-se com maior detalhe os pontos que correspondem a zonas que irão ser maquinadas. Numa primeira análise, a zona que revelou valores que são comprometedores foi a zona da porta de descarga, que corresponde aos pontos 11, 12 e 13 como se pode observar na Figura 5.3.

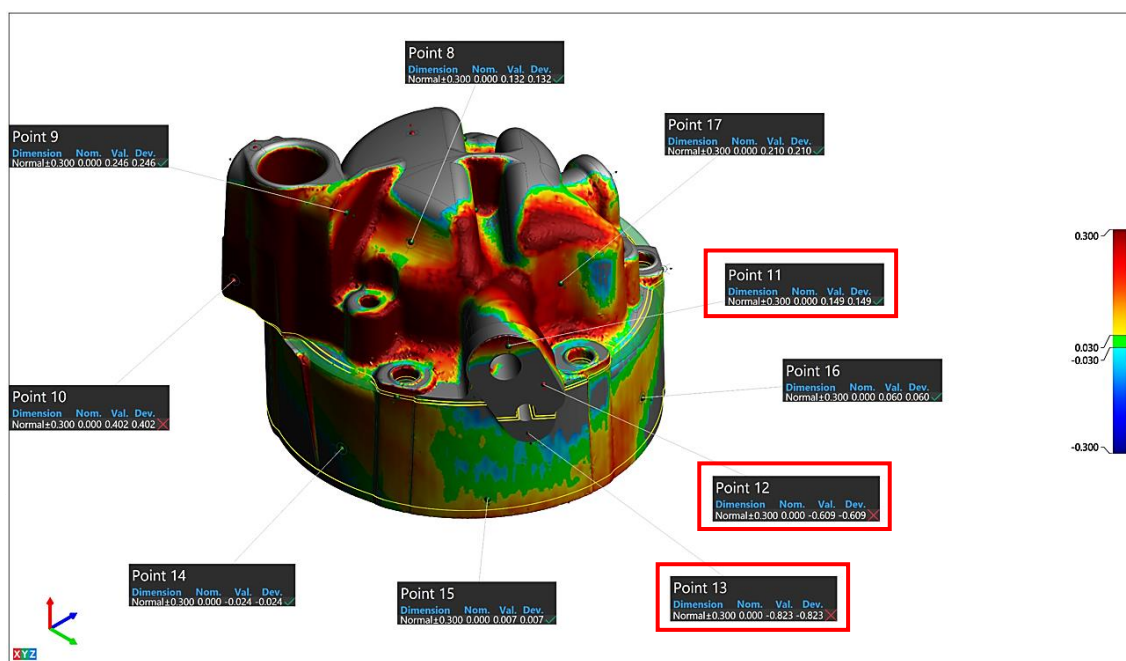


Figura 5.3: Identificação dos pontos 11,12 e 13 na porta de descarga da peça.

Observando os desvios destes pontos na Tabela 5.1, verifica-se que para a grande maioria das peças, o ponto 11 apresenta um excesso de material enquanto que os pontos 12 e 13 representam uma região da porta de descarga com falta de material. Tendo em conta que esta zona é maquinada, não existe problema se existir excesso de material pois será simplesmente retirado na etapa de maquinação. Contudo, a falta de material pode levar à não maquinação da região dos pontos 12 e 13 que levará ao não cumprimento das tolerâncias presentes no desenho técnico de maquinação. Analisando os valores destes pontos na peça *billet*, constata-se que para o ponto 13 existe menos material nas peças impressas do que na peça *billet*. Isto significa que irá existir uma região da porta de descarga que não será maquinada, no entanto, só será possível corroborar esta afirmação aquando as peças forem maquinadas.

Perante os dados da Tabela 5.2 e o problema da porta de descarga, avalia-se que a tecnologia de fabrico aditivo tem capacidade de produzir peças com precisão dimensional equivalente à peça fundida. Apesar dos valores da Tabela 5.2 mostrarem, à primeira vista, piores resultados para as peças impressas, a diferença não é considerada significativa porque o excesso de material não deve comprometer o funcionamento da peça. Já a quantidade de pontos onde se verifica falta de material é aproximadamente igual ao obtido para a peça fundida. Em relação ao problema da porta de descarga, considera-se que a causa não é a precisão da tecnologia, mas sim a orientação em que as peças 3D foram impressas. Evocando a Figura 4.2, observa-se que a porta de descarga foi originada em camadas inferiores, ou seja, perto do tabuleiro. Como K.Kamarudin et. al. [28] verificou, zonas das peças que são fabricadas nas primeiras camadas tendem a ter uma menor precisão dimensional e uma maior rugosidade superficial, especialmente, quando existe um determinado grau de orientação, como é o caso da porta de descarga. O facto de existirem suportes na zona da porta de descarga também pode ter levado à falta de material pois a remoção destes suportes pode ter provocado uma retirada excessiva de material na região do ponto 13.

5.1.1.2 Avaliação da precisão geométrica

Para avaliar a precisão geométrica, foram analisadas as posições dos furos de montagem, sobrepondo, mais uma vez, o modelo digital de cada peça no modelo CAD. Os furos de montagem do RH quando este é fabricado, não são passantes, sendo que cada furo é, na realidade, constituído por dois furos não passantes que têm diâmetros diferentes, como pode ser observado na Figura 5.4. Estes dois furos não passantes serão denominados por semi-furos e dar-se-á o nome de furo ao conjunto dos dois semi-furos. Na Tabela 5.3 estão indicados os desvios de posição de cada furo em relação ao centro dos furos do CAD segundo as direções Y e Z, sendo que, os desvios acima do limite superior estão representados a vermelho, e os desvios abaixo do limite inferior, estão representados a azul. De notar ainda que cada furo foi numerado de 1 a 6 e a tolerância de posição especificada é de 0,2 mm.

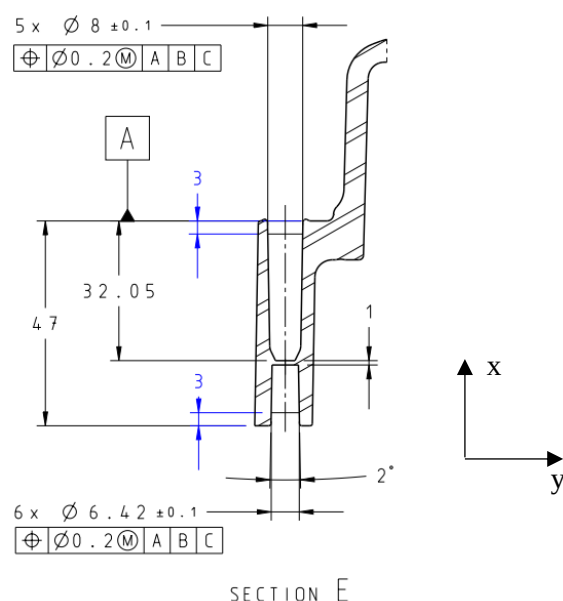


Figura 5.4: Cotas e tolerâncias exigidas para os furos no desenho de fabrico.

Tabela 5.3: Desvio de posição dos furos, em relação ao CAD, para as peças impressas e para a peça fundida.

Peça			3D nº1	3D nº3	3D nº4	3D nº5	3D nº6	3D nº7	3D nº8	Média 3D	Fundida
Furo 1	8 mm	Y	0,106	0,116	0,069	0,083	0,106	0,030	0,045	0,079	0,058
		Z	-0,057	-0,199	-0,088	-0,109	-0,129	-0,072	-0,082	-0,105	-0,083
	6,42 mm	Y	0,142	0,074	0,052	0,081	0,047	0,100	0,087	0,083	0,216
		Z	0,142	-0,069	0,130	0,088	0,129	0,048	0,117	0,084	0,005
Furo 2	8 mm	Y	0,168	0,206	0,152	0,173	0,163	0,144	0,152	0,165	0,142
		Z	-0,307	-0,390	-0,315	-0,388	-0,356	-0,332	-0,321	-0,344	-0,238
	6,42 mm	Y	-0,061	-0,056	-0,051	-0,095	-0,057	-0,121	-0,123	-0,081	0,177
		Z	-0,107	-0,482	-0,270	-0,294	-0,279	-0,290	-0,311	-0,290	-0,035
Furo 3	8 mm	Y	0,445	0,421	0,409	0,405	0,391	0,382	0,385	0,405	0,338
		Z	-0,371	-0,376	-0,392	-0,427	-0,394	-0,371	-0,376	-0,387	-0,286
	6,42 mm	Y	0,301	0,243	0,239	0,176	0,227	0,313	0,272	0,253	0,261
		Z	-0,260	-0,392	-0,323	-0,438	-0,316	-0,423	-0,413	-0,366	-0,269
Furo 4	8 mm	Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Z	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,42 mm	Y	0,588	0,322	0,525	0,501	0,471	0,536	0,500	0,492	0,372
		Z	-0,054	-0,196	-0,149	-0,192	-0,100	-0,184	-0,173	-0,150	-0,227
Furo 5	8 mm	Y	0,382	0,230	0,355	0,392	0,353	0,364	0,338	0,345	0,409
		Z	0,038	-0,085	-0,001	0,026	0,016	0,002	0,029	0,004	-0,022
	6,42 mm	Y	0,524	0,205	0,425	0,439	0,337	0,424	0,383	0,391	0,418
		Z	0,271	-0,002	0,159	0,121	0,106	0,154	0,167	0,139	-0,144
Furo 6	8 mm	Y	0,142	0,074	0,052	0,081	0,047	0,100	0,087	0,083	0,216
		Z	0,142	-0,069	0,130	0,088	0,129	0,048	0,117	0,084	0,005
	6,42 mm	Y	0,267	0,109	0,237	0,230	0,232	0,239	0,228	0,220	0,300
		Z	0,253	-0,160	0,022	0,106	0,072	0,106	0,037	0,062	-0,021

*Nota: Não foi possível registar informação sobre o semi-furo de 8 mm do furo 4.

Perante os dados da Tabela 5.3, verifica-se que, em média, os desvios de cada furo nas peças impressas são equiparáveis aos desvios obtidos na peça fundida. Adicionalmente, se se analisar os desvios dos centros de cada par de semi-furos para os 6 furos constata-se que estes são semelhantes para o caso das peças impressas tal como para as peças fundidas (Tabela 5.4).

Tabela 5.4: Desvio dos centros de cada par de semi-furos para as peças impressas e para a peça fundida.

Peça		3D nº1	3D nº3	3D nº4	3D nº5	3D nº6	3D nº7	3D nº8	Média 3D	Fundida
Furo 1	Y	0,036	0,042	0,017	0,002	0,059	0,070	0,042	0,038	0,158
	Z	0,199	0,130	0,218	0,197	0,258	0,120	0,199	0,189	0,088
Furo 2	Y	0,229	0,262	0,203	0,268	0,220	0,265	0,275	0,246	0,035
	Z	0,200	0,092	0,045	0,094	0,077	0,042	0,010	0,080	0,203
Furo 3	Y	0,144	0,178	0,170	0,229	0,164	0,069	0,113	0,152	0,077
	Z	0,111	0,016	0,069	0,011	0,078	0,052	0,037	0,053	0,017
Furo 4	Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Z	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Furo 5	Y	0,142	0,025	0,070	0,047	0,016	0,060	0,045	0,058	0,009
	Z	0,233	0,083	0,160	0,095	0,090	0,152	0,138	0,136	0,122
Furo 6	Y	0,125	0,035	0,185	0,149	0,185	0,139	0,141	0,137	0,084
	Z	0,111	0,091	0,108	0,018	0,057	0,058	0,080	0,075	0,026

Posto estes resultados, pode-se afirmar que as peças impressas têm uma precisão geométrica semelhante à precisão da peça fundida. Há que realçar, no entanto, que para esta análise foi somente considerado um elemento geométrico (a posição dos furos de montagem) sendo por isso, necessário corroborar esta afirmação com os resultados que serão obtidos nos métodos seguintes.

5.1.2 Avaliação da maquinabilidade

Para a avaliação da maquinabilidade foram consideradas apenas as peças 3D pois já existia conhecimento das características de maquinabilidade das peças fundidas e das peças *billet*. A avaliação da maquinabilidade envolveu a análise das características que já foram mencionadas em 4.4.

Antes do começo da maquinação das peças surgiram problemas em relação aos *datums*, nomeadamente o *datum* A'. Os furos do *datum* A', utilizados para a OP10, não apresentavam posição e diâmetro correto, o que levou à inclusão de uma sub-operação, podendo ser denominada de OP05, com o objetivo de alargar os furos. Tratando-se de uma operação diferente foi necessário escolher alguns pontos/áreas para servirem como *datums*. Os *datums* escolhidos foram a face lateral do *lug* e a face onde surge o *datum* D pois são áreas que apresentavam geometrias menos complexas. Na Figura 5.5 estão indicados, a laranja, as superfícies de referência utilizadas.

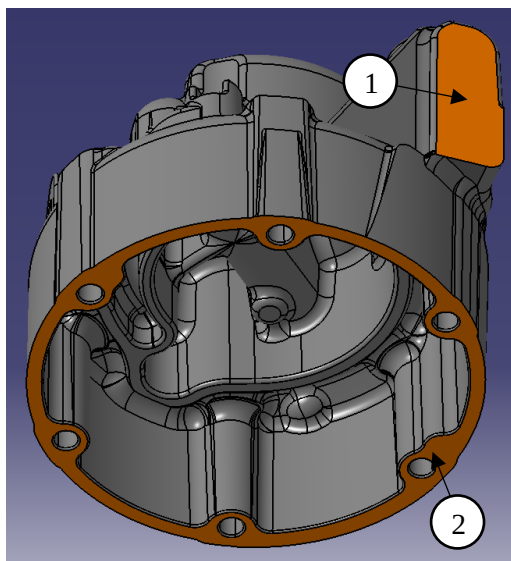


Figura 5.5: Superfícies de referência para OP05. 1) Face lateral do *lug*; 2) Face onde surge o *datum* D.

Apesar de estas áreas não terem geometrias complexas, não são projetadas para servirem como pontos de referência apresentando, por isso, diferenças na quantidade de material de peça para peça tal como desvios de planeza. Isto, juntamente com a variação da posição dos furos originaram desvios na OP05 como se pode observar na Figura 5.6. Estes desvios revelam alguma imprecisão dimensional da tecnologia para características da peça com dimensões reduzidas, podendo fazer-se o paralelo com os resultados obtidos por Altaf et. al. [30], onde foi verificado maior distorção dimensional em peças de espessura reduzida.

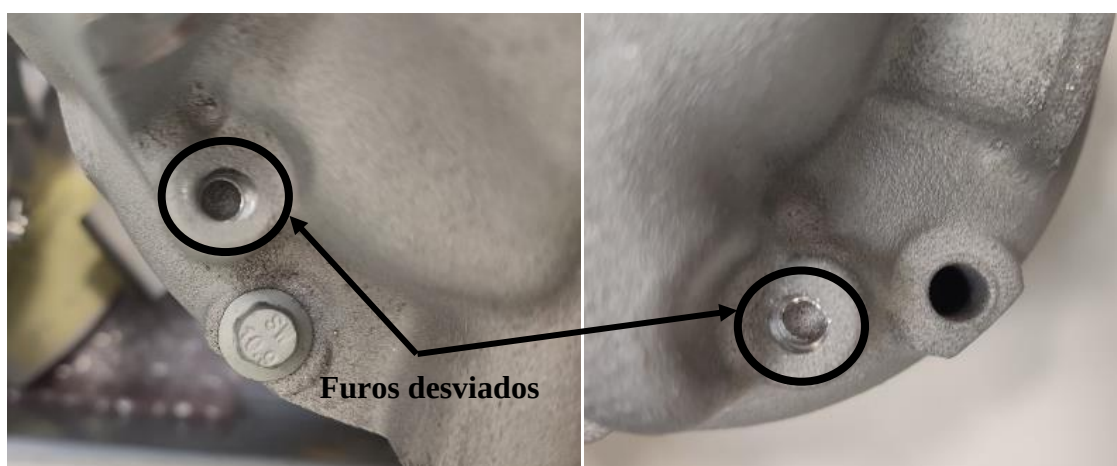


Figura 5.6: Desvio nos furos do *datum* A'.

Estes desvios na OP05 levaram a desvios nas operações subsequentes traduzindo-se em desvios na peça final. À primeira vista, foi possível identificar alguns desvios no RH maquinado, podendo ser observados na Figura 5.7, onde se verifica desvios no chanfro da face do *datum* D e no chanfro de um dos furos de montagem.

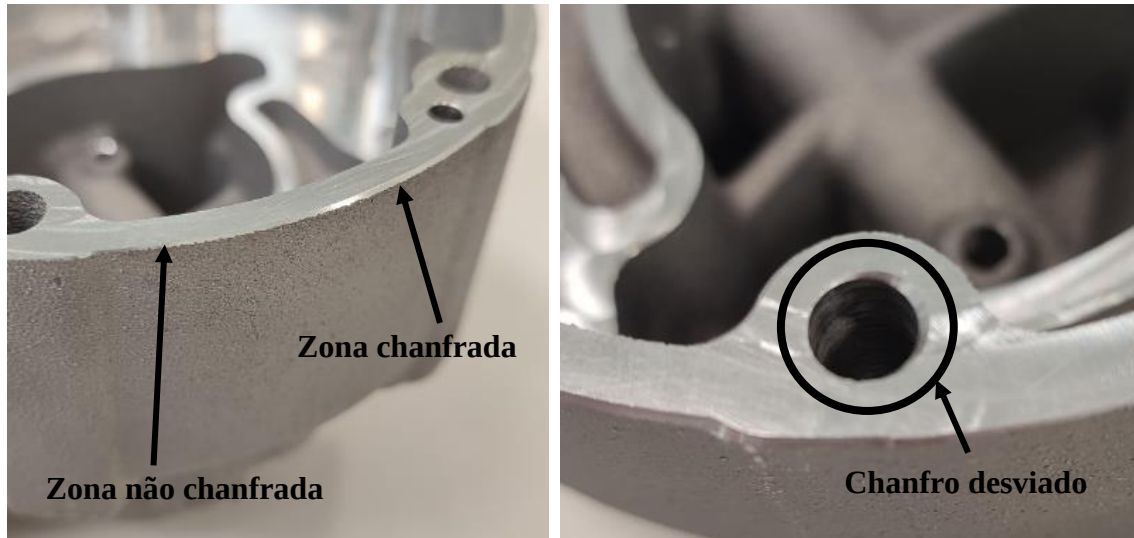


Figura 5.7: Desvios nos chanfros. a) Face do *datum* D; b) Furo de montagem.

Depois da maquinação de cada peça também se comprovou o que já tinha sido identificado nos resultados do Scanning 3D: a não maquinação da zona inferior da porta de descarga (Figura 5.8). Isto significa que o método de Scanning 3D consegue fornecer informação precisa sobre os aspetos dimensionais e geométricos da peça. A não maquinação da porta de descarga pode criar problemas nas próximas etapas de validação uma vez que pode comprometer a selagem do compressor.



Figura 5.8: Não maquinação da zona inferior da porta de descarga.

No que toca à qualidade das superfícies maquinadas, visualmente não se verificou nenhuma diferença em comparação com os outros tipos de peça. De modo a corroborar esta avaliação consultou-se os relatórios de medição, onde é medido a planeza e a circularidade de algumas superfícies maquinadas. Infelizmente não houve possibilidade de medir a rugosidade pois não havia o sensor necessário na área de R&D. Na Figura 5.9 vê-se os dados da medição da planeza da superfície do *datum* D e os dados da medição da circularidade para um furo na zona do *Fixed Scroll*. Através da leitura da Figura 5.9 a), constata-se que o desvio de planeza de 0,0101 mm encontra-se dentro da tolerância de + 0,05 mm. Na Figura 5.9 b) verifica-se um desvio de circularidade de 0,0109 mm encontrando-se, por isso, dentro da tolerância especificada de + 0,04 mm. Deste modo, assumindo estes dois exemplos como representativos para todas as superfícies maquinadas, conclui-se que as peças impressas apresentam boa qualidade superficial uma vez que as tolerâncias especificadas são cumpridas.

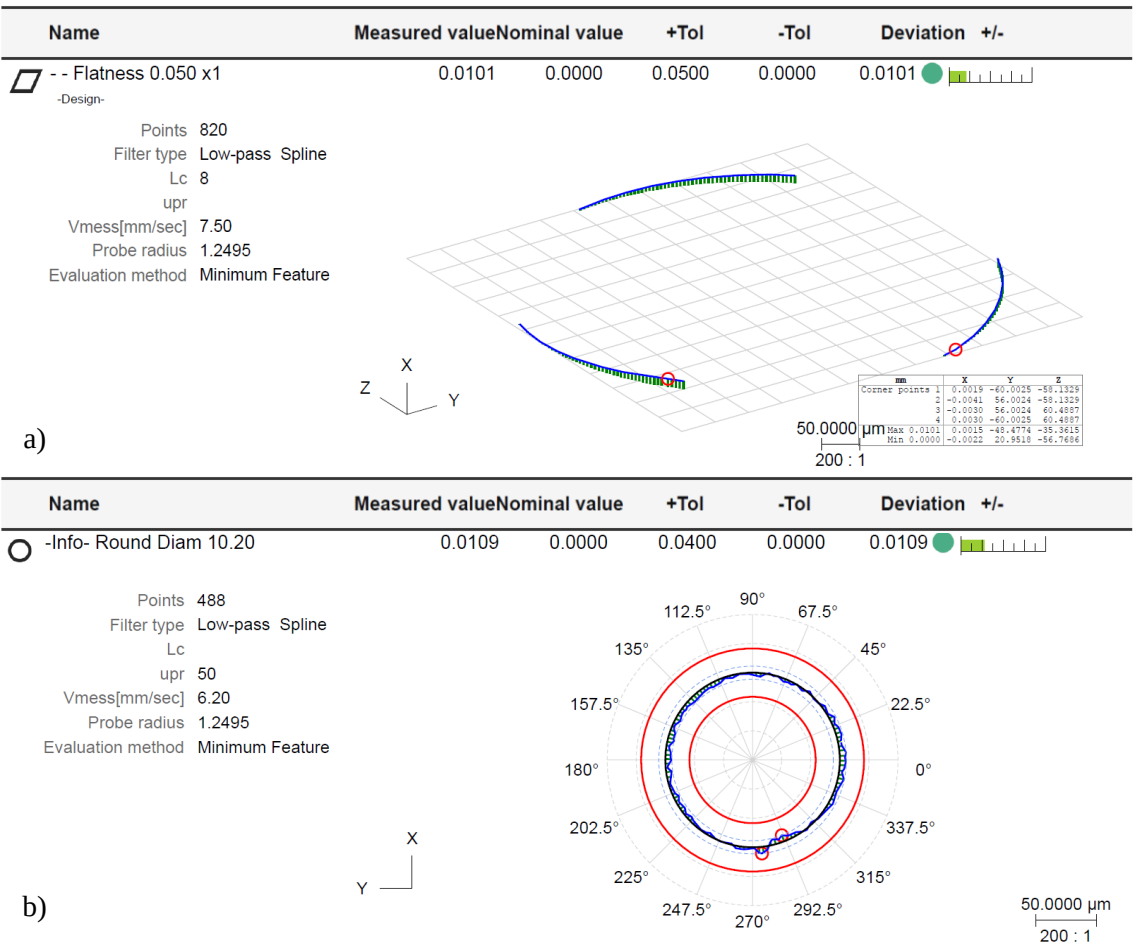


Figura 5.9: Resultados dos relatórios de medição. a) Planeza da superfície do *datum* D; b) Circularidade de um furo na zona do *Fixed Scroll*.

No que toca à avaliação do aspeto da limalha das peças de fabrico aditivo metálico, não foi possível fazer uma análise comparativa com a limalha das peças fundidas ou das peças *billet* pois nenhuma peça deste tipo foi maquinada no decorrer desta dissertação. Contudo, observou-se que durante a maquinação das peças não houve acumulação de limalha na ferramenta, existindo por isso, quebra da limalha. O técnico responsável pela secção de maquinação afirmou que não foi visível qualquer diferença entre o aspeto da limalha das peças impressas e dos outros dois tipos de peças.

Por fim, embora só se tenha maquinado 7 peças impressas, não foi visível qualquer desgaste das ferramentas utilizadas na maquinação fora do que é habitável na maquinação dos outros tipos de peças.

5.1.3 Avaliação geométrica e dimensional

5.1.3.1 Introdução

A avaliação geométrica e dimensional consistiu na análise dos relatórios de medição das 7 peças impressas maquinadas, seguida por uma comparação dos dados obtidos com dados de 5 relatórios de peças fundidas (previamente fabricada e medidas). Os elementos geométricos medidos estão divididos em 6 grupos diferentes. Na Tabela 5.5 são indicados os grupos, a zona da peça correspondente e o tipo dos elementos geométricos medidos.

Tabela 5.5: Identificação dos grupos, zona da peça correspondente e tipo dos elementos geométricos medidos.

Grupo	Zona da peça	Tipo
<i>Datums</i>	Zonas que apresentam <i>datums</i>	Distância entre superfícies Planeza e paralelismo de superfícies Diâmetro e posição de furos
Parafusos Montagem	Furos de Montagem	Diâmetro e posição de furos
<i>Fixed Scroll</i>	<i>Fixed Scroll</i>	Distância entre superfícies Planeza e paralelismo de superfícies Diâmetro e posição de furos
Furos de Montagem	<i>Lug</i>	Distância entre superfícies Diâmetro e posição de furos
Porta de Descarga	Porta de Descarga	Distância entre superfícies Planeza e paralelismo de superfícies Diâmetro e posição de furos
PRV	PRV	Distância entre superfícies Diâmetro e posição de furos

Antes de se apresentar os resultados obtidos nos relatórios de medição considerou-se importante mencionar um problema ocorrido aquando da medição das peças. As peças para serem medidas na CMM são colocadas num suporte (Figura 5.10) que permite medir todos os elementos geométricos de uma só vez, sem haver a necessidade de mudar a orientação da peça. A peça fica presa no suporte através de 3 grampos, identificados na Figura 5.10, que exercem força na parede interior da peça.



Figura 5.10: Suporte usado para a medição do RH com os grampos identificados.

Antes da medição observou-se que ao tentar colocar as peças no suporte, estas não encaixavam do modo pretendido. Posto isto, recorreu-se novamente aos resultados do *scan* 3D com o intuito de verificar o que poderia estar a causar este problema. Na Figura 5.11 estão assinalados os pontos correspondentes à zona da peça que encaixa no suporte, sendo possível observar que estes indicam um excesso de material. Mais uma vez, comprova-se a capacidade do *scan* 3D em identificar problemas com a geometria da peça. Para resolver este problema, procedeu-se a uma nova operação de maquinação, que será denominada de OP25, com o objetivo de aumentar o diâmetro interior da peça. Este problema encontrado pode ser indício de uma contração da peça, algo que foi verificado por Zhichao et. al. [32]. Na Figura 5.12 é possível observar a zona da peça que foi maquinada nesta nova operação.

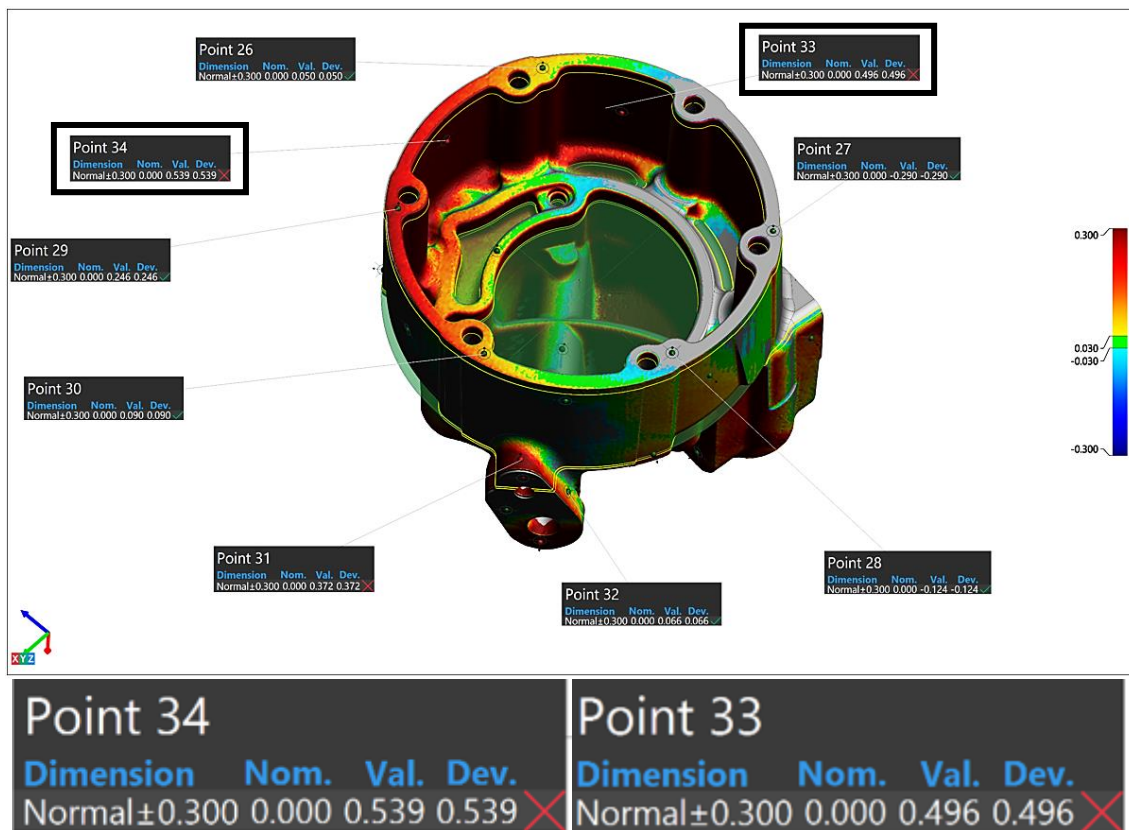


Figura 5.11: Pontos da peça que correspondem à zona que encaixa no suporte utilizado para medir as peças.

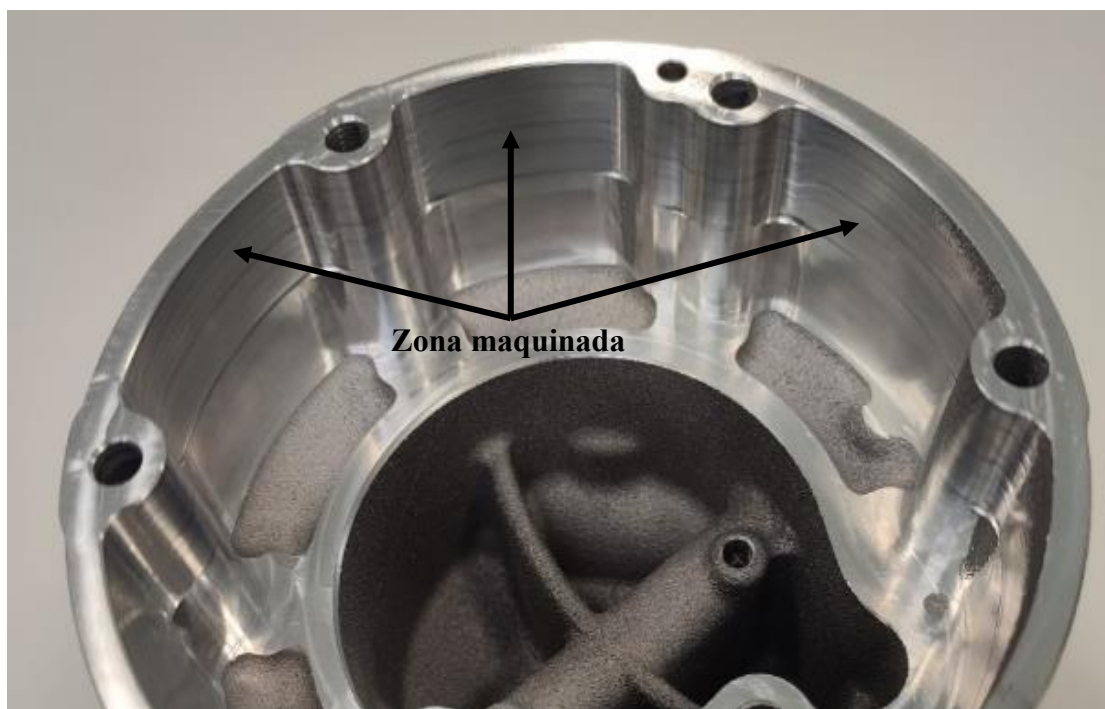


Figura 5.12: Zona da peça que foi maquinada na OP25.

5.1.3.2 Análise geral

Olhando para os relatórios de medição, pode-se fazer uma análise mais geral, observando somente a quantidade de desvios de cada peça, e uma análise mais detalhada, observando e tentando justificar cada desvio detalhadamente. Numa visão mais geral, estão indicadas de seguida a Tabela 5.6 e a Tabela 5.7 que indicam a quantidade de desvios medidos para os diferentes grupos das peças fundidas e das peças 3D, respetivamente. De salientar que os relatórios de medição das peças fundidas foram numerados de 1 a 5 e os relatórios de medição das peças fundidas numerados de 1 a 8, correspondendo ao número de cada peça.

Tabela 5.6: Número de desvios por grupo das peças fundidas.

Número do relatório	Grupo						Total
	<i>Datums</i>	Parafusos Montagem	<i>Fixed Scroll</i>	Furos de Montagem	Porta de Descarga	PRV	
RH Impresso 1	0	3	0	0	0	1	4
RH Impresso 2	0	5	0	0	0	1	6
RH Impresso 3	0	2	0	0	0	1	3
RH Impresso 4	0	5	0	0	0	1	6
RH Impresso 5	0	3	0	0	0	1	4
Média	0	3,6	0	0	0	1	4,6

Tabela 5.7: Número de desvios por grupo das peças impressas.

Número do relatório	Grupo						Total
	<i>Datums</i>	Parafusos Montagem	<i>Fixed Scroll</i>	Furos de Montagem	Porta de Descarga	PRV	
RH 3D 1	2	6	0	0	6	1	15
RH 3D 3	4	6	0	0	7	1	18
RH 3D 4	4	7	0	0	7	1	19
RH 3D 5	4	6	0	0	5	1	16
RH 3D 6	3	6	0	0	4	1	14
RH 3D 7	3	6	0	-	7	0	16
RH 3D 8	4	7	0	0	7	1	20
Média	3,4	6,3	0	0	6,1	0,9	18,4

Observando ambas as tabelas verifica-se que as peças impressas apresentam quase 4 vezes mais desvios do que as peças de fundição. As peças fundidas só apresentam desvios no grupo Parafusos Montagem e no grupo PRV, enquanto que as peças 3D, apresentam desvios no grupo *Datums*, grupo Parafusos Montagem, grupo Porta de Descarga e grupo PRV. À primeira vista, estes resultados parecem ser bastante desfavoráveis no que toca à capacidade das peças 3D em cumprir os requisitos de projeto. Por isso, de seguida irá analisar-se com maior detalhe os dados dos relatórios de medição de modo a poder retirar conclusões mais precisas.

5.1.3.3 Análise detalhada

Sendo que as peças 3D são as peças que se pretendem validar, irá analisar-se os resultados dos relatórios destas peças com o objetivo de verificar quais os desvios que são críticos. Cada grupo abordado está acompanhado por excertos do desenho técnico de maquinação de modo a ajudar a visualizar qual o desvio a que se está a referir e por excertos dos relatórios de medição que indicam o valor dos desvios. Os excertos dos relatórios de medição apresentados serão sempre da peça com desvios mais elevados.

➤ **Grupo PRV**

No grupo PRV, o desvio comum a todas as peças trata-se de um desvio de posição da caixa onde assenta o o-ring para a válvula PRV (Figura 5.13). A função do o-ring é selar esta zona do RH de modo a que durante o funcionamento do compressor não haja fuga do refrigerante. A severidade do desvio é baixa, uma vez que, o valor do desvio é de 0,0244 mm (Tabela 5.8), muito reduzido, não representando qualquer compromisso para funcionamento do o-ring. Esta avaliação tem de ser comprovada no Teste de Fugas.

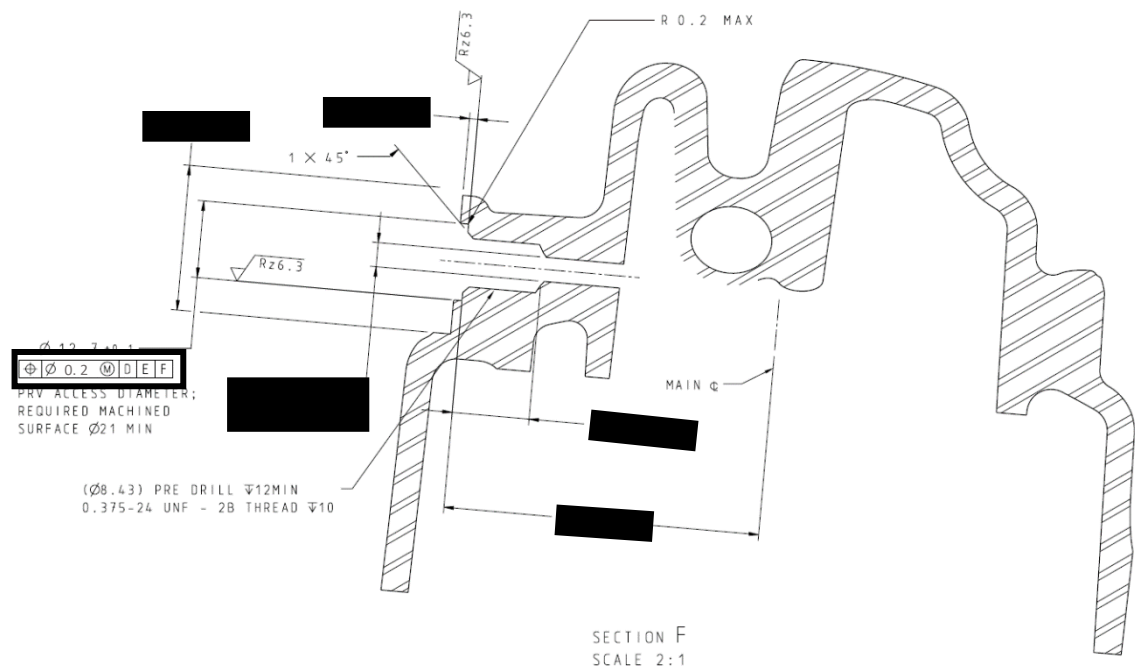


Figura 5.13: Identificação do elemento geométrico que apresenta desvio do grupo PRV.

Tabela 5.8: Valor do desvio de posição na zona da PRV.

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Deviation	+/-
TP 0.2 UNF -Design-	0.2244	0.0000	0.2000	0.0000	0.2244	0.0244

➤ Grupo Datum

Os elementos geométricos do grupo *datum* que apresentam desvios são:

- Distância entre *datum* A e *datum* D
- Paralelismo entre superfície do *datum* A e superfície do *datum* D
- Posição do *datum* E e F

Estes elementos geométricos estão identificados na Figura 5.15 e os valores dos seus desvios estão indicados na Figura 5.14.

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Deviation	+/-
 - Distance 46.3 -Design-	46.1265	46.3000	0.1500	-0.1500	-0.1735	 -0.0235
 - Parallelism 0.3 -Design-	0.8938	0.0000	0.3000	0.0000	0.8938	 0.5938
 - Diameter 4.045 x1 -Design-	4.0481	4.0450	0.0150	-0.0150	0.0031	
 - Diameter 4.045 x2 -Design-	4.0498	4.0450	0.0150	-0.0150	0.0048	
 - TP 0.3 Diam 4.045 x1 -Design-	0.7001	0.0000	0.2000	0.0000	0.7001	 0.5001
 - TP 0.3 Diam 4.045 x2 -Design-	0.3106	0.0000	0.2000	0.0000	0.3106	 0.1106

Figura 5.14: Valores dos desvios encontrados no grupo *datum*.

Para analisar corretamente estes resultados é necessário relembrar os problemas encontrados nos *datums* iniciais (*datum* A') na fase da maquinação que originaram desvios em toda a peça. Para além de desvios nos chanfros, que foram rapidamente detetados, os problemas encontrados no *datum* A' originam desvios nos elementos geométricos da peça, especialmente desvios de posição dado que a peça não é assente no aperto com a orientação pretendida. Os desvios de posição do *datum* E e F são exemplos deste fenómeno, uma vez que os furos dos *datums* são só criados na etapa de maquinação, o que significa que a única forma de destes desvios acontecerem é a peça estar orientada indevidamente.

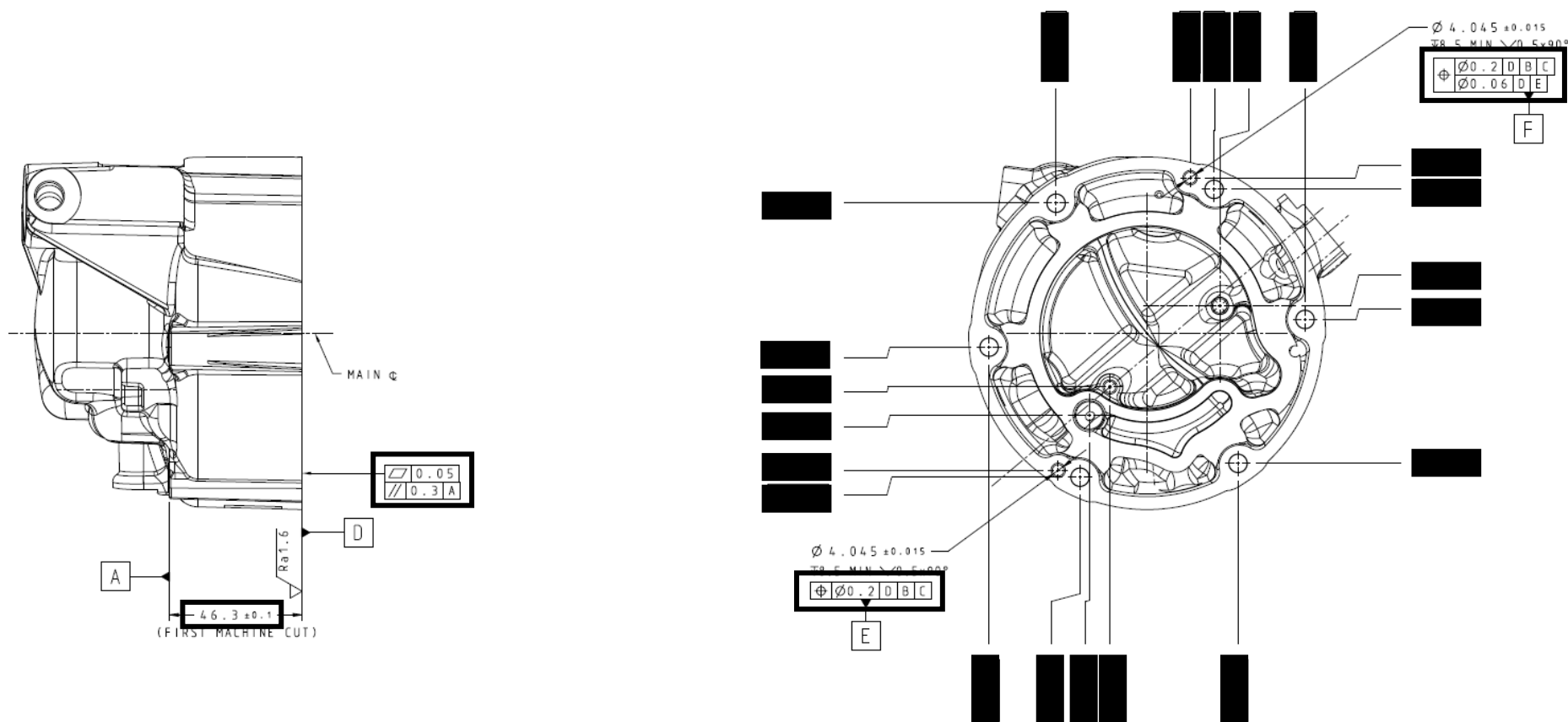


Figura 5.15: Identificação dos elementos geométricos que apresentam desvios do grupo *datum*.

Recordando, o *datum* A representado na Figura 5.15 não é usado na área de R&D, no entanto, o programa de medição de coordenadas mede os elementos geométricos em relação a este *datum*. O desvio de paralelismo encontrado neste grupo é provocado por um de dois motivos (Figura 5.16). O primeiro (Figura 5.16 a)) é o não assentamento correto da peça no *datum* A', que leva a um desvio na maquinação do *datum* D. O plano de maquinação está assinalado na Figura 5.16 por PM. Alternativamente, (Figura 5.16 b)) a superfície do *datum* A pode apresentar muitas discrepâncias na quantidade de material, levando a que o plano do *datum* A medido pela CMM não seja paralelo ao plano do *datum* A'. Isto resultaria numa situação em que o *datum* D apresentava paralelismo dentro da tolerância em relação ao *datum* A', mas desvio de paralelismo em relação ao *datum* A.

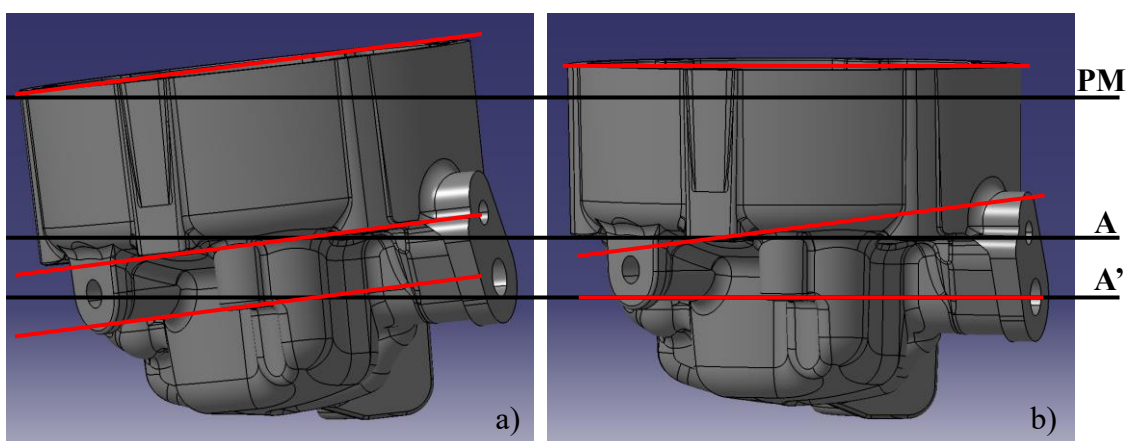


Figura 5.16: Duas opções que podem levar ao incumprimento da tolerância de paralelismo. a) Peça não é assente corretamente no *datum* A'; b) Peça é assente no *datum* A' mas a superfície do *datum* A está desviada.

De forma a verificar qual destas situações acontece, consultou-se de novo os dados da Tabela 5.1, nomeadamente os pontos 43, 44, 45 (Tabela 5.9) que correspondem a pontos da superfície do *datum* A (Figura 5.17). Como pode ser observado pela Tabela 5.9, para nenhuma das peças impressas, os valores dos desvios dimensionais para estes pontos estão fora da tolerância especificada ($\pm 0,3$ mm), o que significa que o desvio de paralelismo encontrado é causado pelo um assentamento incorreto das peças no plano A'. O desvio da distância entre o *datum* A e o *datum* D, também encontrado, provém deste desvio de paralelismo.

Tabela 5.9: Valores dimensionais do Scan 3D para os pontos do *datum* A.

Peça	3D nº1	3D nº3	3D nº4	3D nº5	3D nº6	3D nº7	3D nº8	Fundida	Billet
Ponto 43	-0,049	-0,060	-0,068	-0,056	-0,045	-0,056	-0,051	-0,049	-0,040
Ponto 44	-0,028	0,000	-0,022	-0,003	-0,068	-0,027	-0,037	0,081	0,007
Ponto 45	-0,064	-0,072	-0,082	-0,090	-0,045	-0,114	-0,071	-0,066	-0,058

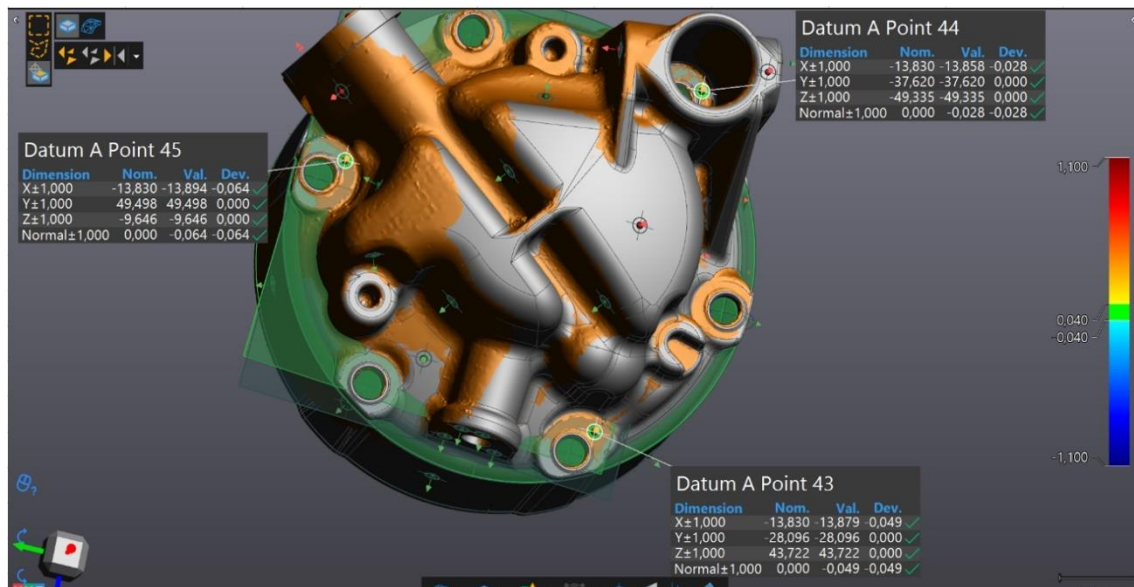


Figura 5.17: Pontos medidos na superfície do datum A.

➤ Grupo Parafusos Montagem

Os desvios encontrados no grupo Parafusos Montagem são maioritariamente desvios de posição dos furos onde são inseridos os parafusos de montagem. Ambas as peças 3D e as peças fundidas apresentam estes desvios, no entanto, enquanto que nas peças fundidas o maior desvio é de 0,1256 mm (Figura 5.18), nas peças 3D encontram-se vários desvios na ordem de 1 mm, sendo o maior de 1,66 mm (Figura 5.19). Obviamente os desvios encontrados nas peças 3D são bastante grandes. Como justificação destes resultados foram identificadas duas razões: Desvios dos semi-furos e o desvio dos *datums* E e F.

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Deviation	+/-
Ø -- Diameter 6.3 x6 -Design-	6.3221	6.3000	0.1000	-0.1000	0.0221	0.0221
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x1 -Design-	0.0633	0.0000	0.1000	0.0000	0.0633	0.0633
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x2 -Design-	0.1376	0.0000	0.1000	0.0000	0.1376	0.0376
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x3 -Design-	0.1044	0.0000	0.1000	0.0000	0.1044	0.0044
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x4 -Design-	0.2145	0.0000	0.1000	0.0000	0.2145	0.1145
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x5 -Design-	0.2256	0.0000	0.1000	0.0000	0.2256	0.1256
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x6 -Design-	0.1973	0.0000	0.1000	0.0000	0.1973	0.0973

Figura 5.18: Desvios de posição dos furos de montagem das peças fundidas.

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Deviation +/-
⌀ -- Diameter 6.3 x6 -Design-	6.3593	6.3000	0.1000	-0.1000	0.0593
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x1 -Design-	1.5459	0.0000	0.1000	0.0000	1.5459
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x2 -Design-	1.7663	0.0000	0.1000	0.0000	1.7663
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x3 -Design-	1.5562	0.0000	0.1000	0.0000	1.5562
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x4 -Design-	1.0428	0.0000	0.1000	0.0000	1.0428
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x5 -Design-	0.4240	0.0000	0.1000	0.0000	0.4240
⊕ -- TP 0.1 Diam 6.3 x6 -Design-	0.8218	0.0000	0.1000	0.0000	0.8218

Figura 5.19: Desvios de posição dos furos de montagem das peças impressas.

Como foi referido em 5.1.1.2, cada furo antes de ser maquinado é na realidade um par de dois semi-furos ($\varnothing 6,42$ mm e $\varnothing 8$ mm). Como também foi verificado em 5.1.1.2, existia desvios de posição destes dois semi-furos em relação ao CAD. Quando, na etapa da maquinação, a ferramenta (broca) entra no semi-furo de 8 mm para perfurar o material entre os dois semi-furos, acaba por ser guiada por este. Este fenómeno leva a que o desvio de posição do semi-furo se conserve.

A segunda razão para a ordem de grandeza dos desvios de posição dos furos encontrados nos relatórios de medição é os próprios desvios dos *datums* E e F. Como foi mencionado anteriormente, os *datums* E e F apresentam desvios de posição. Pela observação da Figura 5.20, constata-se que a posição dos furos é medida em relação aos *datums* E e F. Tendo em conta que estes *datums* apresentam desvios de posição, a leitura da posição dos furos de montagem será influenciada, ou seja, a posição dos furos real pode estar dentro da tolerância especificada, mas como os pontos de referência (*datums* E e F) apresentam desvios, o relatório indicará desvio na posição dos furos.

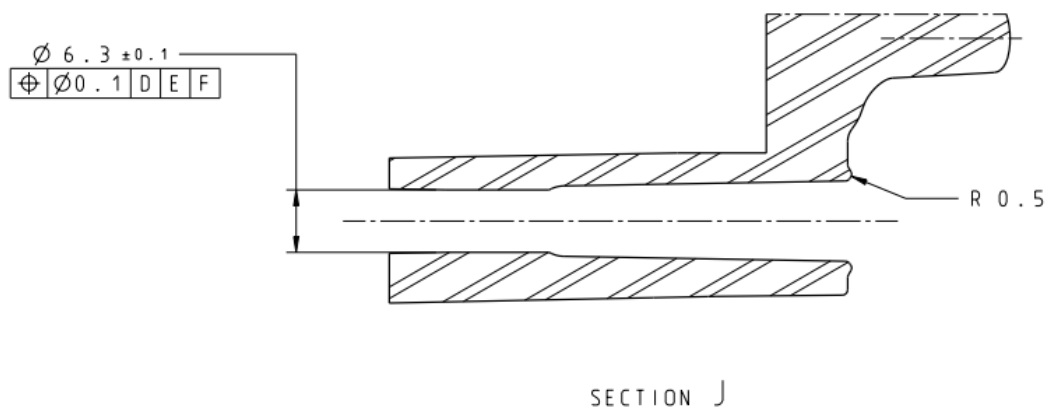


Figura 5.20: Cotas de posição e de dimensão para os furos de montagem.

Para além da indicação numérica dos desvios de posição dos furos, os relatórios de medição também indicam a posição dos furos graficamente. A Figura 5.21 indica a posição dos furos de uma das peças impressas. Pela leitura da Figura 5.21 verifica-se que todos os furos estão desviados com uma orientação semelhante que varia, aproximadamente, entre os 35° e os 60 ° com o eixo Z. Relembrando que o ângulo de impressão estimado foi de 45°, esta orientação comum de todos os desvios sustenta a hipótese de os desvios presentes nos furos antes da maquinação poderem ter sido influenciados pela orientação escolhida para a impressão das peças.

Tendo em conta a informação exposta consegue-se perceber melhor a razão que leva à ordem de grandeza dos desvios na posição dos furos. A única maneira de comprovar se estes desvios têm um impacto significativo para o funcionamento do RH ou do compressor é verificar se existe algum problema na montagem do compressor.

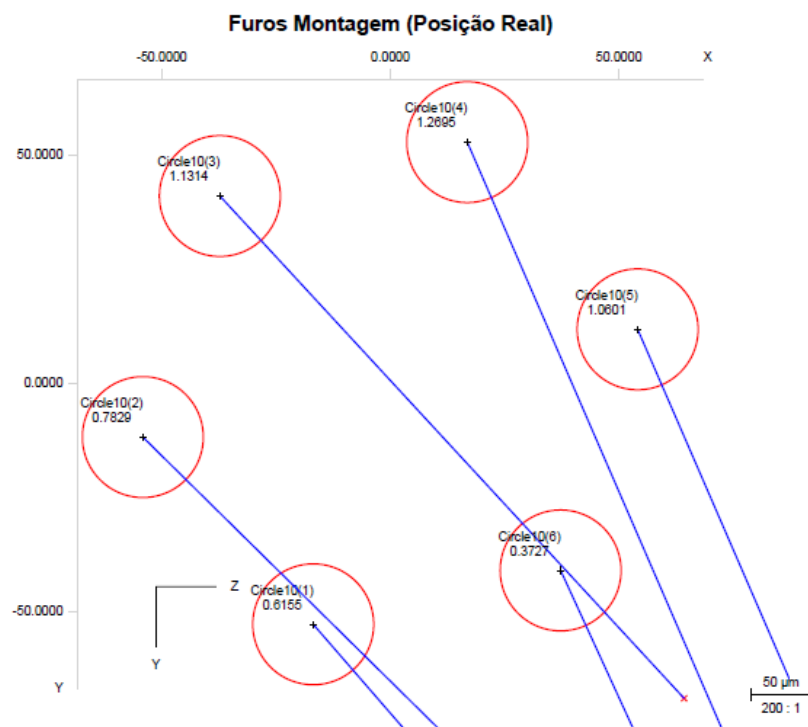


Figura 5.21: Orientação dos desvios dos furos de montagem de uma das peças.

➤ Grupo Porta de Descarga

O grupo Porta de Descarga é um grupo que apresenta bastantes desvios nas peças impressas e nenhum desvio nas peças fundidas. A grande maioria dos desvios encontrados são desvios dimensionais e desvios de posição. As cotas dimensionais que apresentaram desvios estão assinaladas de seguida, a preto, na Figura 5.22 e os seus valores indicados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Valores dos desvios dimensionais presentes no grupo Porta de Descarga.

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Deviation	+/-
 -- Distance 75.85 -Design-	70.3448	70.8524	0.1500	-0.1500	-0.5076	 -0.3576
 -- Distance 12.00 -Design-	11.9426	12.0000	0.1500	-0.1500	-0.0574	
 -- Distance 2.76 -Design-	2.4333	2.7600	0.0800	-0.0800	-0.3267	 -0.2467
 -- Distance 3.66 -Design-	3.3328	3.6600	0.1200	-0.1200	-0.3272	 -0.2072

Observando a Figura 5.22, entende-se a razão para os desvios dimensionais mencionados acima, pois as cotas dimensionais que apresentam desvios são medidas em relação à zona inferior da porta de descarga. Recordando, esta zona apresentava falta de material acabando por não ter sido maquinada como foi referido em 5.1.2. Por esta razão, o aparecimento de desvios negativos era esperado porque a superfície de referência não se encontra no plano devido.

As tolerâncias de posição que não são cumpridas estão assinaladas a vermelho na Figura 5.22 e na Figura 5.23 e os seus valores indicados na Tabela 5.11. Os desvios aqui encontrados são bastante semelhantes aos desvios de posição dos furos de montagem na medida em que as causas para estes desvios são as mesmas. Também aqui, a posição dos furos é medida em relação aos *datum* E e F que, novamente, apresentam desvios de posição levando a uma leitura da CMM incorreta da posição real dos furos. Adicionalmente, estes furos também são pré-fabricados na impressão das peças o que significa que parte dos desvios provêm da própria tecnologia de fabrico, nomeadamente das condições de impressão.

Tabela 5.11: Valores dos desvios das tolerâncias de posição no grupo Porta de Descarga.

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Deviation	+/-
 -- TP 0.3 M8x1.25 6H -Design-	0.5876	0.0000	0.2000	0.0000	0.5876	 0.3876
 -- TP 0.2 Diam 11.79 -Design-	0.2960	0.0000	0.2000	0.0000	0.2960	 0.0960
 -- TP 0.2 Diam 11.5 -Design-	0.4234	0.0000	0.2000	0.0000	0.4234	 0.2234

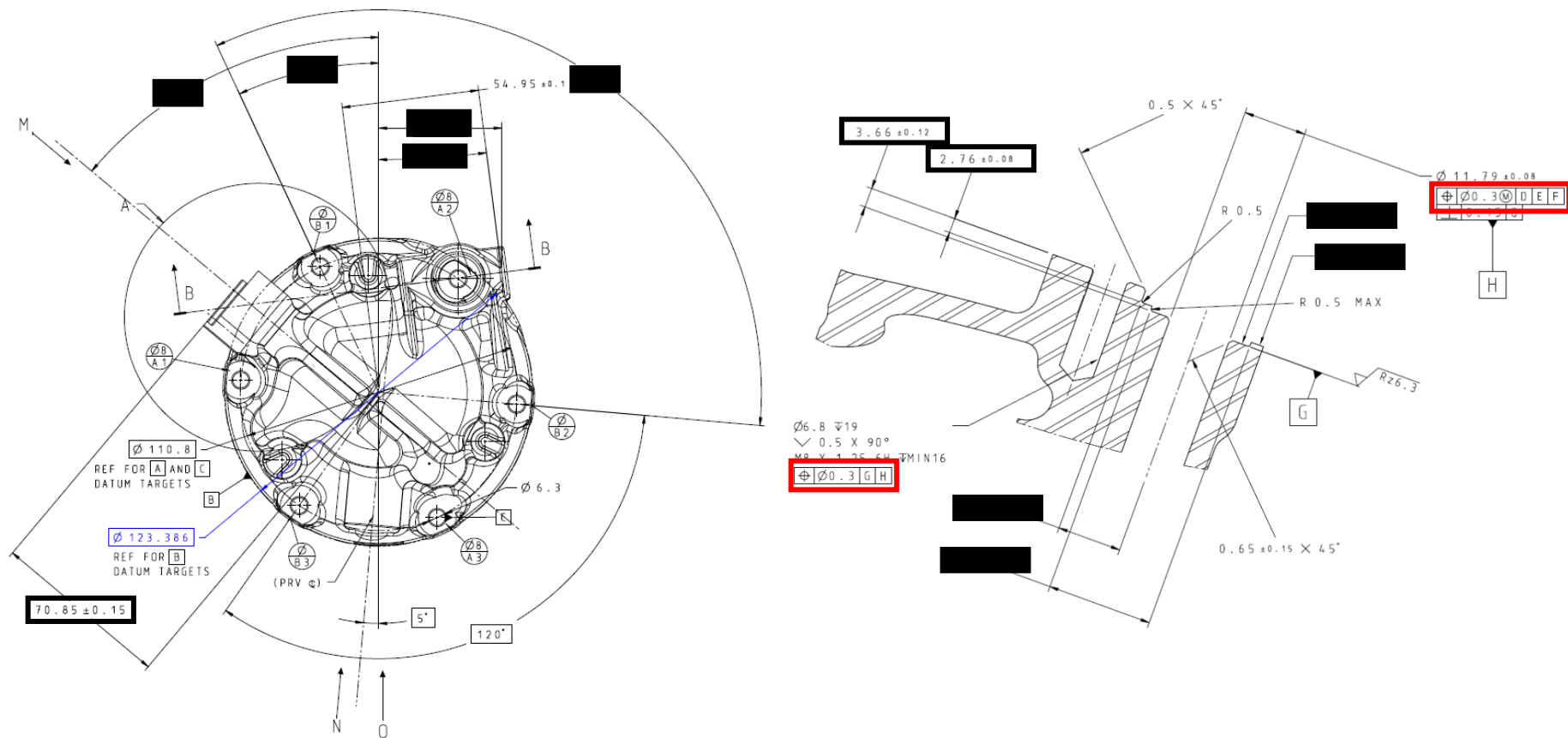


Figura 5.22: Indicação das tolerâncias não cumpridas no grupo Porta de Descarga. A preto: tolerâncias dimensionais; a vermelho: tolerâncias de posição.

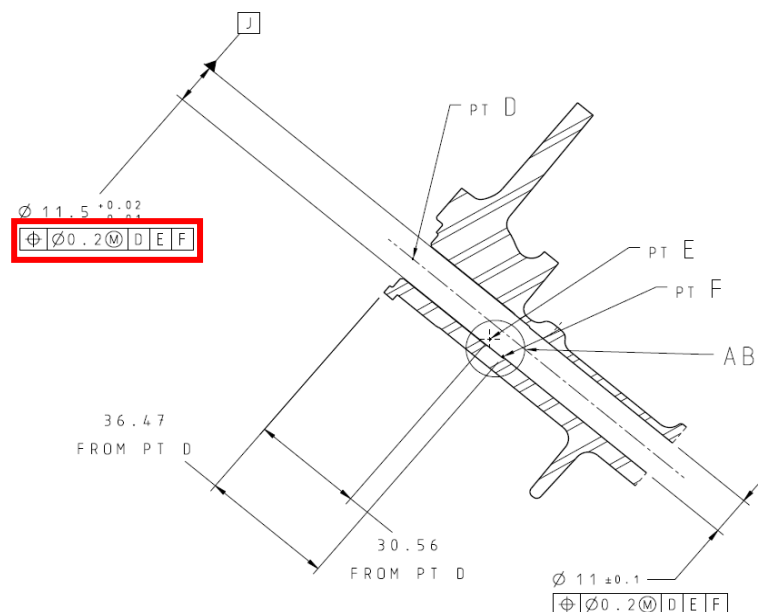


Figura 5.23: Identificação da tolerância de posição não cumprida no grupo Porta de Descarga.

5.2 GRUPO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL

5.2.1 Introdução

Para a validação da integridade estrutural do RH considerou-se dois métodos: a análise do material e o teste de pressão. Na análise do material, foram utilizadas 3 peças, 1 peça de cada tecnologia de fabrico. Cada peça foi cortada e dividida em 5 regiões diferentes (Figura 5.24), com o propósito de verificar a diferença das suas características ao longo da sua altura. Já para o teste de pressão, apenas foram utilizados um RH fundido e um RH 3D.

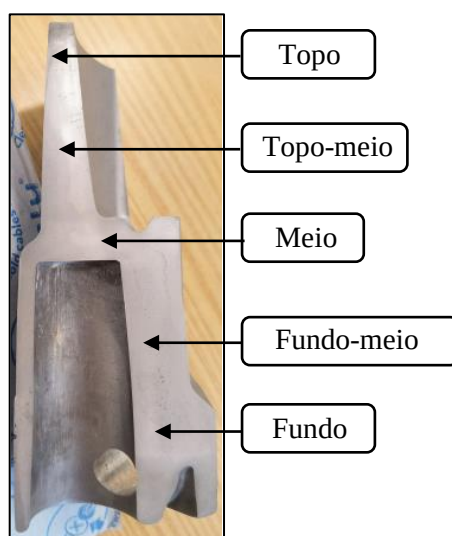


Figura 5.24: Secção da peça que foi cortada e identificada por região.

5.2.2 Análise do material

5.2.2.1 Análise química da composição do material

Nas Tabela 5.12, Tabela 5.13 e Tabela 5.14 estão indicadas as composições químicas da peça fundida, da peça impressa e da peça *billet*, respectivamente. Relembrando, a peça fundida e a peça impressa são fabricadas na mesma liga de alumínio, AlSi₁₀Mg, enquanto que a peça *billet* é fabricada na liga AlMg4.5Mn0.7.

Tabela 5.12: Composição química da peça fundida.

Elemento/ Localização	Al	Si	Cu	Fe	Zn	Mn	Mg	Pb	Ni	Outros
Topo	85,68	11,35	0,94	0,83	0,56	0,27	0,14	0,05	0,05	Balanço
Topo-meio	85,62	11,25	0,99	0,88	0,58	0,30	0,17	0,05	0,05	Balanço
Meio	82,50	13,80	1,22	1,09	0,69	0,32	0,08	0,07	0,07	Balanço
Fundo-meio	78,29	15,81	1,74	1,47	0,97	0,45	0,88	0,1	0,09	Balanço
Fundo	83,22	13,45	1,07	0,97	0,61	0,28	0,13	0,06	0,06	Balanço

Tabela 5.13: Composição química da peça impressa.

Elemento/ Localização	Al	Si	Cu	Fe	Zn	Mn	Mg	Pb	Ni	Outros
Topo	91,03	8,31	0,01	0,18	0,02	-	0,39	-	0,01	Balanço
Topo-meio	91,13	8,22	-	0,12	0,02	-	0,43	-	0,01	Balanço
Meio	90,60	8,4	0,01	0,43	0,02	-	0,47	-	0,01	Balanço
Fundo-meio	90,93	8,11	0,01	0,14	0,02	-	0,7	-	0,01	Balanço
Fundo	91,24	8,09	-	0,1	0,02	-	0,5	-	-	Balanço

Tabela 5.14: Composição química da peça *billet*.

Elemento/ Localização	Al	Si	Cu	Fe	Zn	Mn	Mg	Pb	Ni	Outros
Topo	94,19	0,47	2,95	0,28	0,31	0,55	0,48	0,58	0,01	Balanço
Topo-meio	93,85	0,40	3,16	0,30	0,35	0,55	0,56	0,65	0,02	Balanço
Meio	93,94	0,46	3,06	0,33	0,32	0,56	0,56	0,56	0,02	Balanço
Fundo-meio	92,64	0,46	3,68	0,42	0,40	0,69	0,69	0,78	0,02	Balanço
Fundo	93,93	0,46	3,00	0,32	0,31	0,54	0,73	0,54	0,02	Balanço

Comparando a composição química da peça fundida com a peça impressa verifica-se algumas diferenças nos valores de cada elemento químico. As discrepâncias dos valores dos elementos químicos com menor percentagem ($< 1\%$), são consideradas irrelevantes, destacando-se assim, as diferenças na percentagem de Alumínio (Al), Silício (Si) e Cobre (Cu). Para comentar as diferenças das percentagens destes elementos é crucial ter em consideração as diferenças das tecnologias usadas para fabricar os dois tipos de peça. O facto de a peça fundida ser fabricada por fundição, leva a que o material necessite de ter um maior grau de fluidez de modo a preencher totalmente o molde, daí, a maior percentagem em Silício, uma vez que é um elemento que promove esta característica. Por outro lado, as peças fabricadas por fundição, quando saem do molde, ficam expostas ao ar atmosférico que promove a corrosão especialmente enquanto as peças encontram-se a uma elevada temperatura. Por esta razão, era expectável observar uma maior percentagem de Cobre neste tipo de peças. Por outro lado, as peças impressas são fabricadas numa câmara com gás inerte, não havendo necessidade de prevenir a corrosão. Por fim, a menor quantidade de Alumínio na peça fundida deve-se simplesmente à maior percentagem dos outros elementos químicos.

Além de uma comparação entre cada peça, também é possível verificar a composição química de cada uma ao longo das diferentes regiões. Constatou-se que a peça impressa e a peça *billet* apresentam grande homogeneidade ao longo da peça enquanto que para a peça fundida verifica-se alguma variação, contudo, esta variação não é muito elevada. O ponto a realçar com esta análise é a capacidade da tecnologia de PBF, nomeadamente o SLM em produzir peças homogêneas quanto à sua composição química.

5.2.2.2 Análise ótica da microestrutura granular

Na Figura 5.25 é possível observar a microestrutura granular de cada peça ao longo das diferentes regiões. Analisando a microestrutura granular dos 3 tipos de peças facilmente se identificam diferenças no aspeto do grão, que são provocadas, mais uma vez, pelas tecnologias de fabrico de cada peça.

A peça fundida é produzida através de um molde o que significa que quando o material, no estado líquido, é depositado na cavidade demora algum tempo a solidificar levando a um tamanho de grão superior quando comparado com as outras tecnologias. Este fenómeno pode ser observado na estrutura granular da peça fundida quando se compara o tamanho do grão das zonas mais exteriores, que arrefecem mais rapidamente, com o tamanho do grão nas zonas mais interiores da peça que arrefecem mais lentamente.

O processo de fabrico aditivo metálico, como foi já explicado em 3.2.1, consiste na deposição de camadas de espessura reduzidas seguido da fundição do material em cada camada. Dado a espessura reduzida das camadas o material depois de ser fundido arrefece rapidamente levando a um tamanho de grão pequeno.

Já a peça *billet* apresenta uma clara orientação do grão que é explicada pelo processo de obtenção do *billet* que é a laminagem. Todos estes resultados vão de acordo com o que foi obtido por Krystian Zyglia et. al. [27].

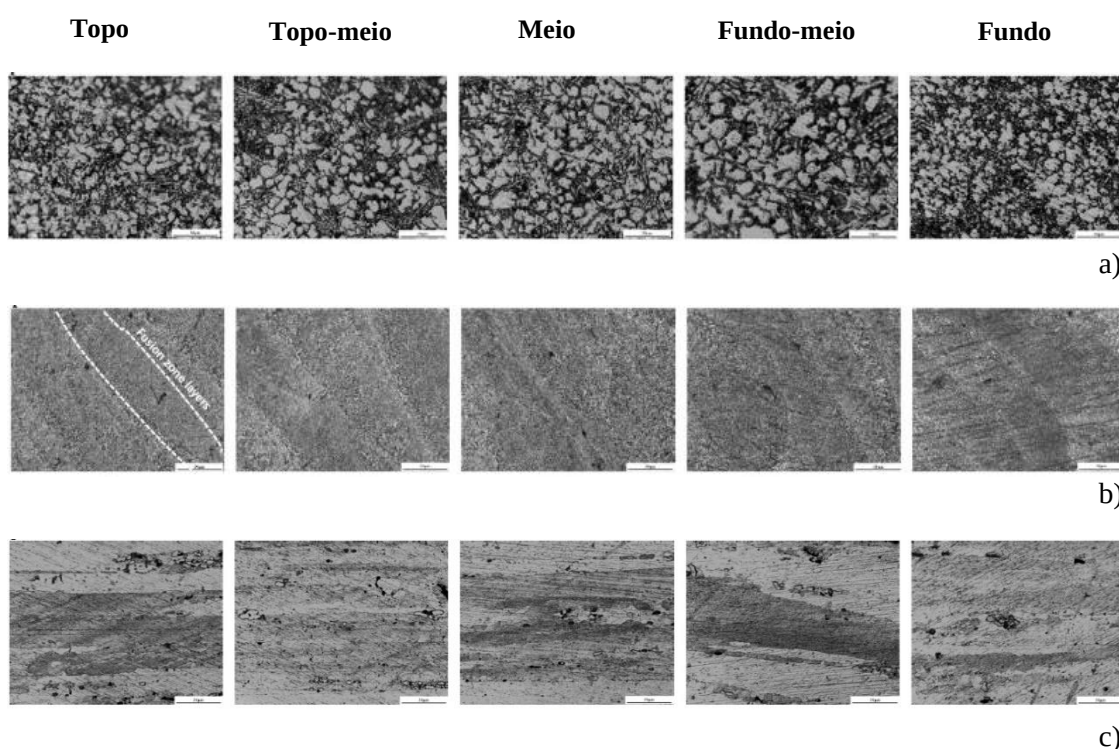


Figura 5.25: Microestrutura granular da peça a) fundida, b) peça impressa, c) peça *billet*

5.2.2.3 Teste de dureza

O teste de dureza realizado foi o teste de Vickers que mede a indentação no material. Para o teste de dureza foi realizado três medições para cada região da peça, de modo a uniformizar os resultados obtidos. A Tabela 5.15 indica os valores medidos no teste de dureza para os três tipos de peça.

Olhando para os valores da dureza em cada peça ao longo das diferentes regiões, é possível tecer alguns comentários. Para a peça fundida não existe nenhuma correlação visível entre as diferentes regiões e os valores de dureza. Quanto às peças impressas, verifica-se um valor mais elevado de dureza nas regiões mais próximas do topo, podendo constituir mais uma evidência de uma melhor qualidade da peça em zonas mais longe do tabuleiro de trabalho. Para a

peça *billet* constata-se um aumento nos valores de dureza nas regiões mais centrais da peça. Isto pode ser devido a inúmeras razões tal como diferenças na composição química da peça, tratamentos térmicos usados e ainda tensões residuais que se acumulam ao longo do processo de obtenção do *billet*.

Tabela 5.15: Valores de dureza por região para cada tipo de peça.

Tipo de Peça/ Região	Fundida	Impressa	<i>Billet</i>
	Média (HV0.3)	Média (HV0.3)	Média (HV0.3)
Topo	89	103,3	102,3
Topo-meio	97,7	105	106,7
Meio	89,3	106,7	122
Fundo-meio	73,7	91,3	111
Fundo	86,7	88,3	106,7
Média	87,3	98,9	109,7

Comparando os resultados das 3 peças, verifica-se que a peça impressa apresenta um valor de dureza superior à peça fundida. Este resultado faz sentido, pois o material da peça 3D apresenta um grão menor, o que significa mais limites de grão que por sua vez fazem aumentar a dureza da peça. Já a peça *billet* apresenta o maior valor de dureza devido ao processo de obtenção do *billet*. Na laminagem, o material entra no domínio plástico, levando ao fenómeno do encruamento que faz aumentar a tensão de cedência do material. Tendo em conta que a dureza é definida como a resistência do material à deformação plástica, se a tensão de cedência aumentar, a dureza também irá fazer o mesmo, segundo a documentação lecionada na cadeira de Ciências dos Materiais dada pelo Professor Doutor João Pedro Veiga.

5.2.3 Teste de pressão

Para a realização do teste era suposto utilizar o *set up* anteriormente mostrado na Figura 4.9; no entanto, devido à falta do conector que permite a passagem de água através do furo da PRV, foi necessário fazer uma adaptação. A solução encontrada passou por ter somente entrada de água no RH sem ter saída ou, por outras palavras, em vez de um circuito fechado onde a água sai da máquina passa pela peça e volta para a máquina, passou-se a ter um circuito aberto onde a água sai da máquina e fica na peça (Figura 5.26).

Uma vez que se trata de condições de teste nunca antes utilizadas, para a realização do teste foi utilizado um RH 3D e um RH fundido. Devido a falta de conhecimento no uso da máquina, não foi possível sujeitar as peças às condições exatas. Os resultados observados para cada peça foram:

- O RH fundido foi capaz de suportar 140 bar de pressão durante 1 min, o que significa que a peça suportou mais de 55% do que a pressão especificada (90 bar).
- O RH 3D suportou cerca de 120 bar de pressão durante 1 min, o que quer dizer que a peça estava a suportar mais 33% do que a pressão especificada. Quando se tentou aumentar a pressão, verificou-se uma fuga na zona da porta de descarga, o que não é surpreendente devido aos problemas já encontrados nesta região.

Apesar do RH 3D não ter chegado ao valor de pressão do RH fundido, ultrapassou claramente a pressão especificada o que permite afirmar que a peça, quanto à sua integridade estrutural, é válida.

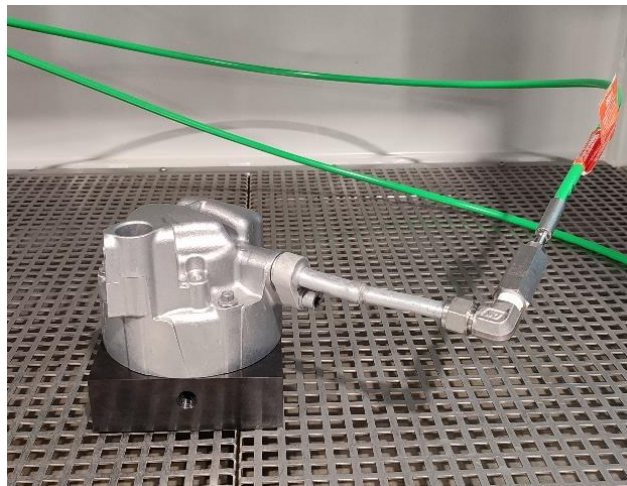


Figura 5.26: Montagem utilizada para o teste de pressão.

5.3 NÍVEL DA FUNCIONALIDADE

5.3.1 Introdução

Antes de se realizar qualquer teste de funcionalidade foram selecionados 5 compressores já totalmente validados, correspondendo aos 5 *rear housings* 3D que estavam disponíveis para esta fase de validação. Recordando, 1 RH 3D foi utilizado no teste de pressão é um teste destrutivo, logo considerou-se que não fazia sentido utilizar uma peça que poderia estar estruturalmente comprometida. O outro RH 3D foi deixado de parte, depois da avaliação geométrica e dimensional, para servir de reserva, caso algo corresse mal.

Para estes testes, pretendeu-se realizar uma análise comparativa apenas para o RH, o que significa que os outros componentes do compressor necessitam de ser os mesmos. Desta forma, antes do teste de fugas, o primeiro teste funcional realizado, substituiu-se os *rear housings*

fundidos pelos *rear housings* impressos, obtendo assim uma condição de comparação ideal. No momento de montagem não se verificou qualquer problema o que significa que os desvios de posição dos furos, mencionados em 5.1.3.3, não são críticos.

5.3.2 Teste de fugas

Para a realização do teste de fugas foram utilizados 5 compressores com RH impressos. Dos 5 compressores, somente 3 cumpriram a especificação, significando que dois apresentaram fuga. Seguindo a metodologia do método utilizado, de forma a identificar o local da fuga para os RH que não passaram no teste, os compressores foram colocados num tanque com água. Como se pode observar pela Figura 5.27, a zona que apresentou fuga (identificada pelas bolhas) foi a zona da porta de descarga. Isto significa confirma a não severidade do desvio da caixa do o-ring da PRV mencionado em 5.1.3.3.



Figura 5.27: Identificação das bolhas e do local de fuga de hélio no RH.

Antes de se explicar a razão para o problema encontrado, é importante visualizar a Figura 5.28 de modo a ajudar a perceber o problema. O acessório que se insere na porta de descarga possui um o-ring que tem como objetivo garantir a estanquidade da porta de descarga. No entanto, como se pode ver na Figura 5.28 a), quando se assenta o acessório na porta de descarga (antes de apertar o parafuso) existe uma folga demasiado grande entre a superfície do acessório e a superfície da porta de descarga onde assenta o acessório (identificada na figura). A razão para o tamanho excessivo desta folga é, mais uma vez, uma falta de material nesta região.

Para a selagem ser feita corretamente, o o-ring deve assentar na sua caixa ao mesmo tempo que a superfície do acessório assenta na superfície da porta de descarga. Como existe falta de material nesta região, o que acaba por acontecer é que o o-ring assenta primeiro na caixa, sem que o parafuso esteja completamente apertado. Quando se continua a apertar o parafuso, o o-ring tem tendência a afastar-se da caixa fazendo um efeito de alavanca, levando a uma selagem incorreta. Este fenómeno é elucidado na Figura 5.28 b), onde se verifica que a superfície do acessório (linha vermelha) não é perpendicular ao eixo y, criando um ângulo α com o eixo x.

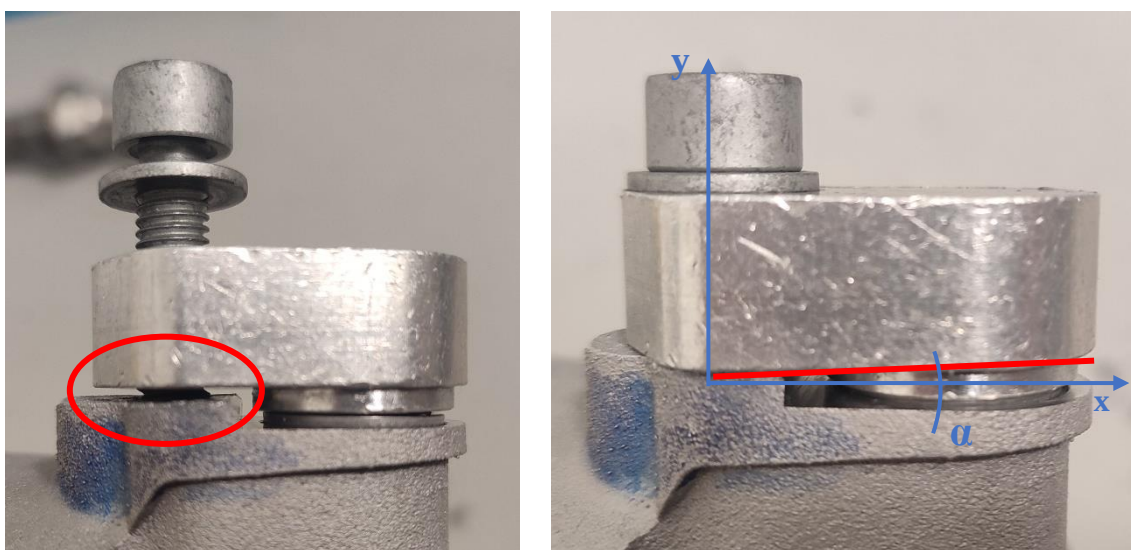


Figura 5.28: Identificação do problema encontrado na porta de descarga durante o teste de fugas.

Apesar da falta de material na zona da porta de descarga ser comum a todas as 5 peças 3D, existem variações de material de peça para a peça daí o fenómeno explicado anteriormente não comprometer todos os RH 3D. Apesar de 2 compressores não terem passado no teste de fugas, considera-se que as peças 3D têm capacidade de serem estanques.

5.3.3 Testes elétricos

Para os testes elétricos foi utilizado apenas 1 compressor com RH 3D pois já havia informação sobre o comportamento de um compressor com RH fundido. Os dados obtidos foram de 13 M Ω para o teste de resistência de isolamento elétrico, o que significa que cumpre o parâmetro, e de 0,081 m Ω para o teste *equipotencial bonding*, cumprindo também o parâmetro estabelecido. Dado estes resultados, pode-se afirmar que o RH 3D não apresenta nenhuma quebra nos resultados dos testes elétricos.

5.3.4 Teste de performance

Para realizar o teste de Performance foram utilizados os 3 compressores que passaram no teste de fugas. Os resultados obtidos foram comparados aos resultados do teste de performance dos compressores com o RH original (RH fundido).

Para o modelo de compressor utilizado neste estudo, o teste de performance é realizado com 3 pontos de funcionamento. Cada ponto de funcionamento é definido pelo seu conjunto de valores das variáveis controláveis. A Tabela 5.16 caracteriza cada ponto de funcionamento.

Tabela 5.16: Valor das variáveis controláveis de cada ponto de funcionamento.

Ponto de Funcionamento	RPM	Pressão de Sucção (bar)	Pressão de Descarga (bar)	Temperatura de Sucção (°C)
Ponto 1	800	4	7	25
Ponto 2	1500	2	19	24
Ponto 3	8500	2	26	24

Dada o elevado número de variáveis não controláveis medidas no teste de performance, é necessário escolher quais variáveis devem ser avaliadas para validar o uso do RH 3D. De seguida são enunciadas as variáveis que foram analisadas e é explicado o porquê da escolha de cada uma.

- **Temperatura de Descarga (TD):** A temperatura de descarga é medida à saída da porta de descarga. Uma vez que se está a testar a viabilidade do RH e dado os problemas que se encontraram nesta zona, faz todo o sentido considerar esta variável;
- **Caudal (Q):** O caudal também é medido à saída do compressor, sendo uma das variáveis mais importantes no teste;
- **Back Pressure (BP):** A *Back Pressure* pode ser influenciada por uma má selagem na face do RH onde o FS encosta, tal como por uma má montagem do *Oil Difuser* e do *Screen Filter*;
- **PSU Crr:** PSU Crr ou Power Supply Current traduz a potência que o compressor está a consumir, logo pode verificar-se se a mudança do RH tem alguma influência na potência consumida;
- **Ruído:** Pretende-se saber se o RH 3D tem influência no ruído do compressor;
- **Vibração (Vib):** Pretende-se saber se o RH 3D tem influência na vibração do compressor.

De notar que, apesar destas variáveis poderem ser influenciadas pelo RH, os seus valores podem ser alterados devido a fatores independentes do RH. Para todas as condições de teste estarem bem definidas, falta somente definir os parâmetros que cada variável não controlável deve cumprir. Na Tabela 5.17 são indicados os intervalos para cada variável.

Tabela 5.17: Parâmetros de teste das variáveis não controláveis escolhidas para cada ponto de funcionamento.

Ponto de Funcionamento	TD (°C)	Q (Kg/h)	BP (bar)	PSU Crr (A)	Ruído (dB)	Vib (m/s ²)
Ponto 1	[0;62]	[32;999]	[6,2;7,1]	[0;4,6]	[0;62,1]	[0;5]
Ponto 2	[0;138]	[32;999]	[6;7]	[0;24]	[0;68,3]	[0;11]
Ponto 3	[0;139]	[196;999]	[6,5;7,6]	[0;120]	[0;88,3]	[0;70]

Conhecendo agora todas as condições de teste, é possível avançar para a apresentação e para a análise dos resultados obtidos. De seguida nas Figuras Figura 5.29, Figura 5.30, Figura 5.31, Figura 5.32, Figura 5.33 e Figura 5.34 estão representados 6 gráficos correspondendo às 6 variáveis medidas onde cada gráfico apresentando cada um valores para cada compressor e por ponto de funcionamento. Os três compressores foram designados de compressor A (Comp A), compressor B (Comp B) e compressor C (Comp C).

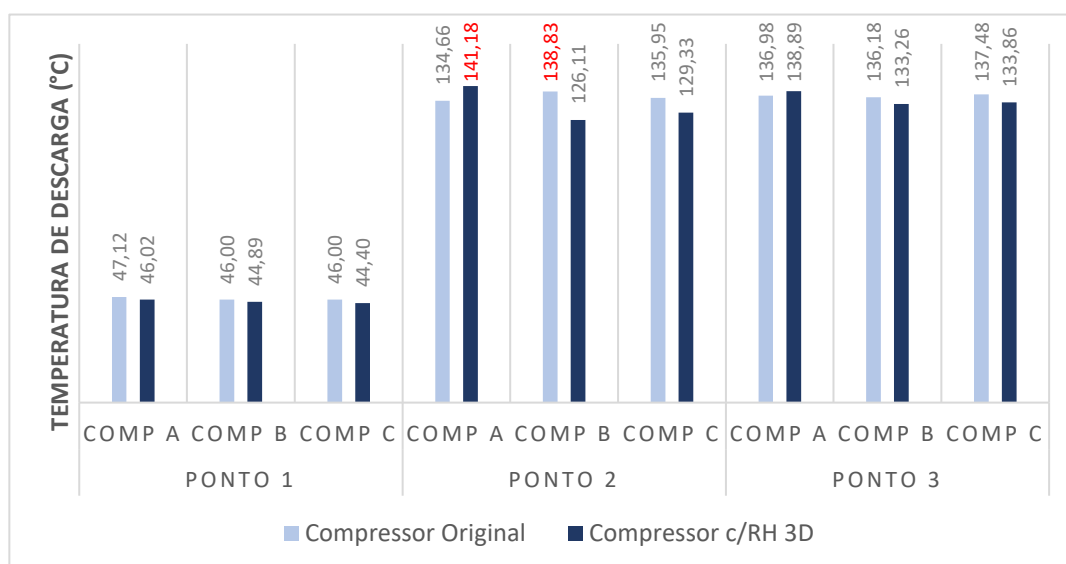


Figura 5.29: Valores da Temperatura de Descarga para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.

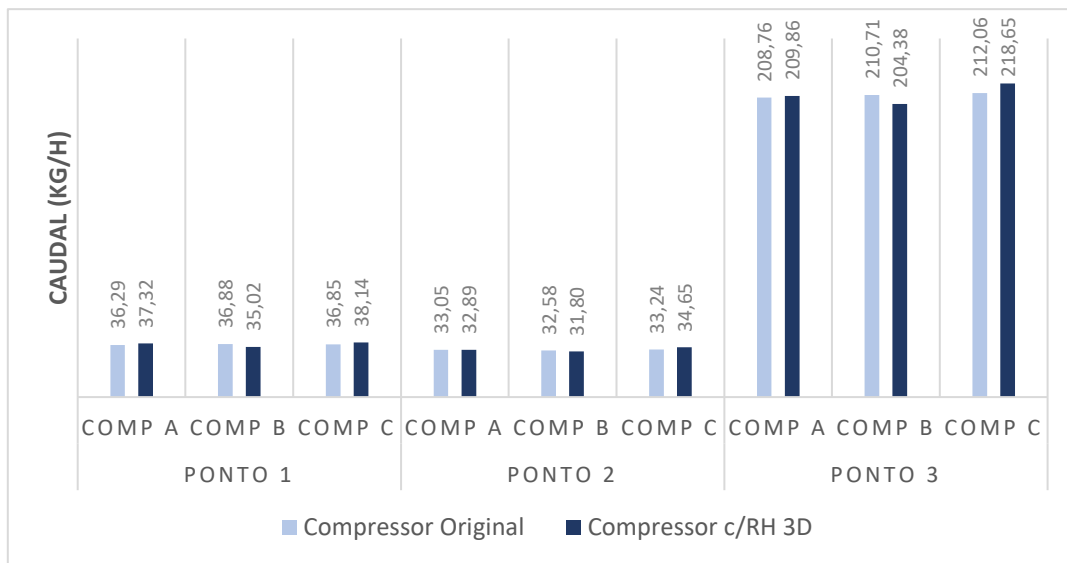


Figura 5.30: Valores do Caudal para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.

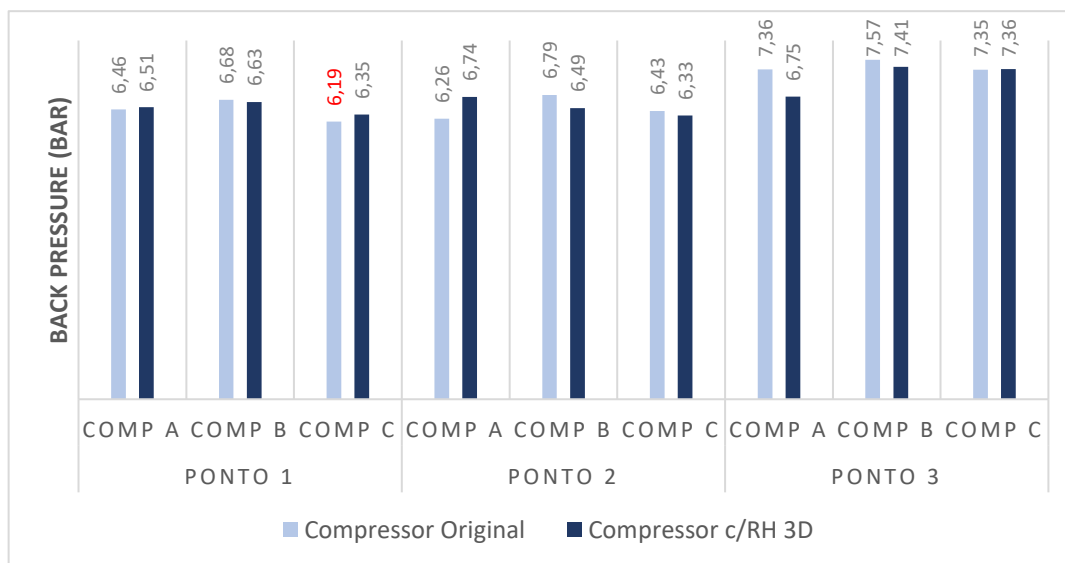


Figura 5.31: Valores da *Back Pressure* para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.

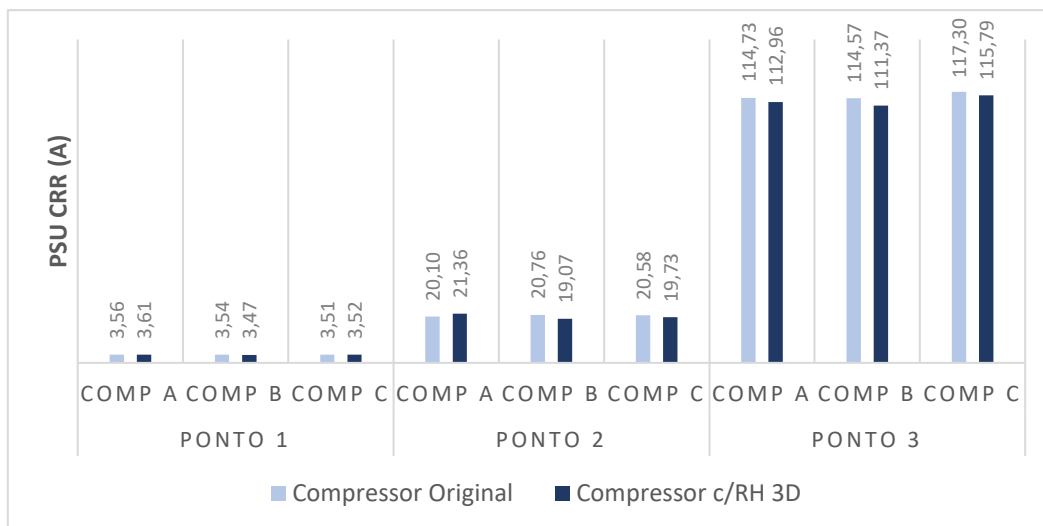


Figura 5.32: Valores da PSU CRR para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.

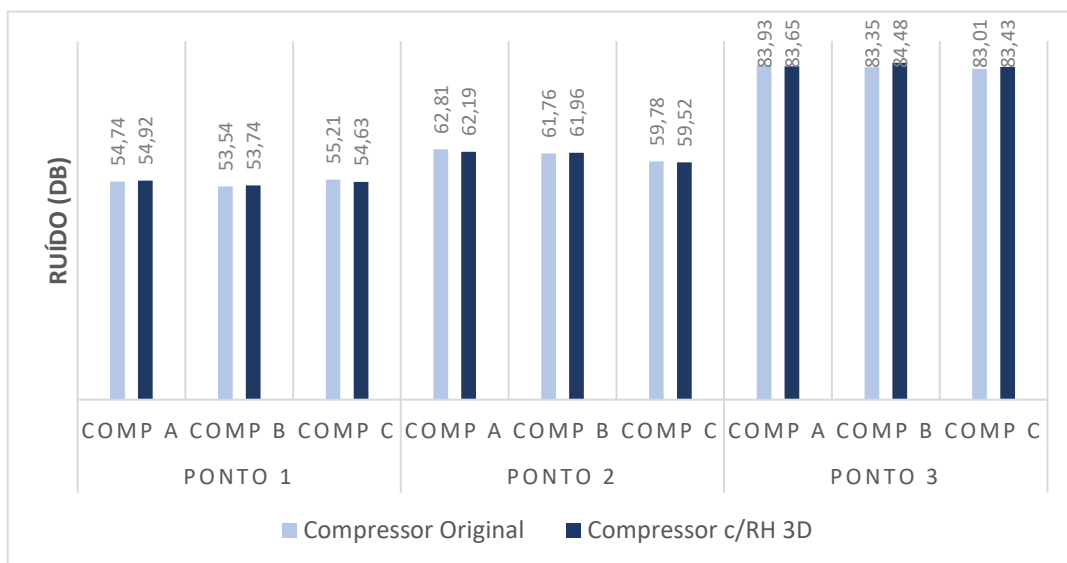


Figura 5.33: Valores do Ruído para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.

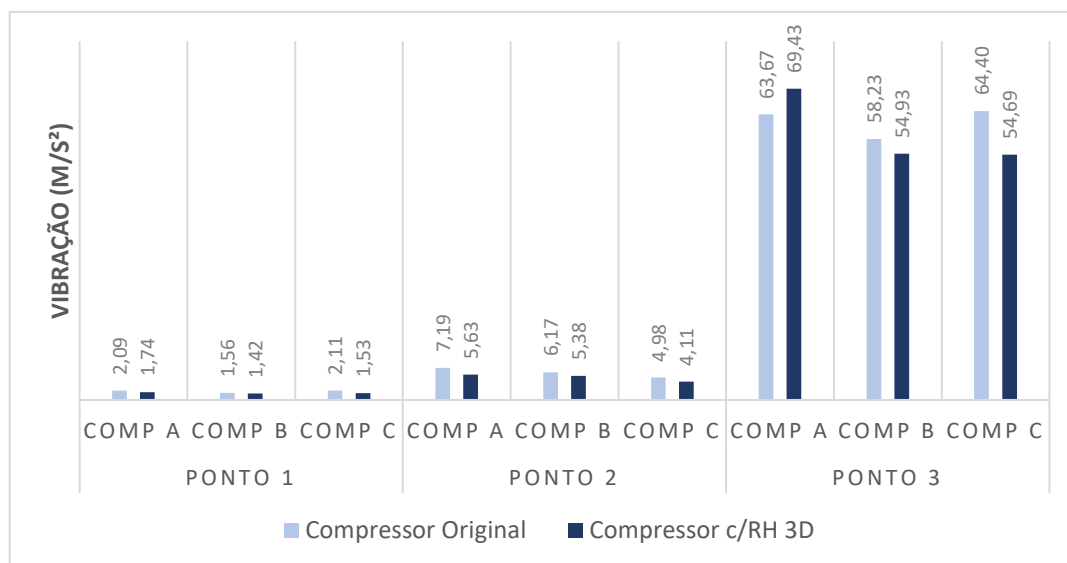


Figura 5.34: Valores da Vibração para os 3 compressores nos 3 pontos de funcionamento.

Observando os dados medidos é possível tecer alguns comentários.

De modo geral, não se verifica nenhuma correlação positiva ou negativa entre o uso do RH 3D e os dados de performance. Todos os valores, à exceção de 3, estão dentro dos parâmetros estabelecidos. Em relação aos valores que se encontram fora dos parâmetros, trata-se: do valor da *Back Pressure* do Compressor C original para o ponto de funcionamento 1; do valor da Temperatura de Descarga do Compressor A com RH 3D para o ponto de funcionamento 2; e do valor da Temperatura de Descarga do Compressor B original para o ponto de funcionamento 2.

O primeiro valor apresenta um desvio de 0,2 % do valor mínimo considerando-se por isso um desvio insignificante. Já os presentes no gráfico da temperatura de descarga para o ponto de funcionamento 2 são significativamente superiores, sendo que o segundo valor representa um desvio superior de 2,3% e o terceiro valor um desvio superior de 0,6 % em relação ao parâmetro estabelecido. Os desvios deste ponto de funcionamento podem ser justificados pelas condições de teste associadas ao próprio ponto de funcionamento, ou seja, aos valores das variáveis controláveis. Observando a Tabela 5.17, verifica-se que para o ponto de funcionamento 2 se pede ao compressor um grande diferencial de pressão para valores de rotação baixos. Estas condições fazem com que este ponto seja o ponto mais difícil de se cumprir sendo que é comum, em outras testagens, existirem incumprimentos dos parâmetros da temperatura de descarga. Posto isto, concluiu-se que a ocorrência destes desvios não é provocada pelo RH, até porque um destes desvios encontra-se num compressor com o RH 3D e o outro encontra-se num compressor com o RH original.

5.3.5 Teste de corrosão

Para o teste de corrosão foram utilizados dois compressores: 1 compressor com o RH 3D e outro compressor com o RH fundido. Os compressores foram colocados lado a lado, na mesma posição, na câmara climática e a cada 240 horas foram retiradas e analisados a olho nu para verificar a ocorrência de ferrugem férrea no RH. No final das 720 horas, foi realizada a inspeção habitual seguida do chamado *tear down*, que consiste em desmontar o RH e observar se houve passagem de ferrugem férrea para o seu interior.

As Figuras Figura 5.35, Figura 5.36, Figura 5.37, Figura 5.38 mostram o aspeto das peça 3D e da peça fundida às 240 h, 480 h, 720 h e o *tear down*, respetivamente. Pela observação das figuras constata-se que somente às 720 h se identificou zonas de ferrugem férrea em ambas as peças, estando estas zonas identificadas na Figura 5.37. Apesar do aparecimento de ferrugem férrea no exterior dos rear *housings*, não se verificou qualquer passagem desta para o interior do Rh quando se realizou o *tear down*. Estes resultados levam a que a peça 3D seja validada no que toca à sua capacidade de resistir à corrosão.



Figura 5.35: RH 3D e RH fundido às 240 h do teste de corrosão.



Figura 5.36: RH 3D e RH fundido às 480 h do teste de corrosão.



Figura 5.37: RH 3D e RH fundido às 720 h do teste de corrosão. Identificação de zonas onde apareceu ferrugem férrea.

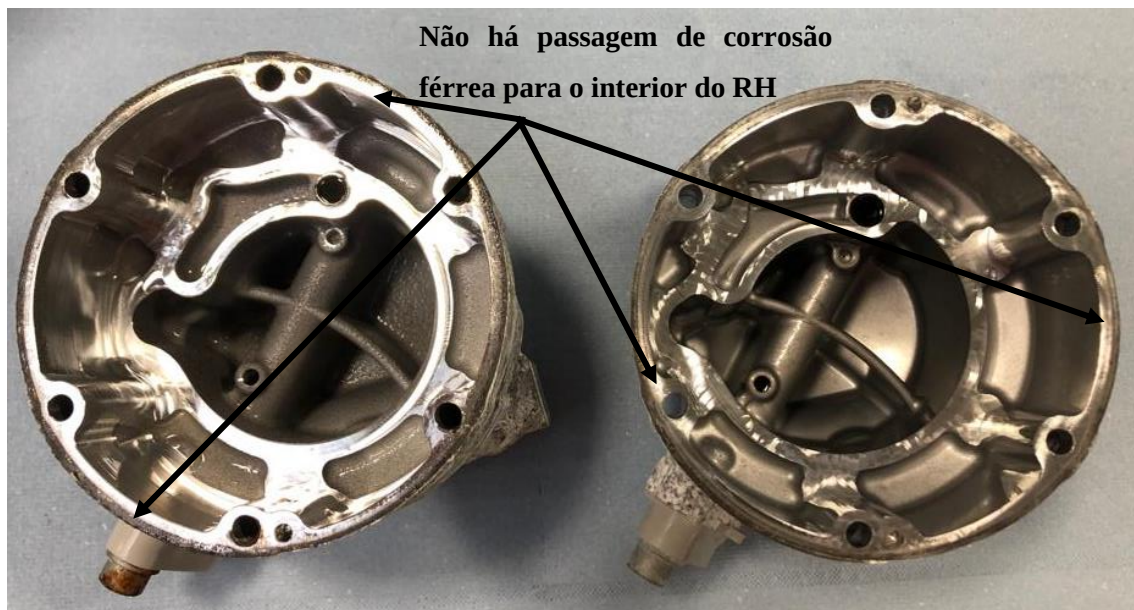


Figura 5.38: Tear Down do RH 3D e do RH fundido.

6 CONCLUSÕES

Com o presente trabalho foi estudado a capacidade do fabrico aditivo metálico, nomeadamente o processo de Fusão Seletiva por Laser em produzir peças metálicas que cumprem requisitos a nível estrutural, geométrico e funcional. Através de vários métodos e da contínua comparação com peças produzidas por métodos tradicionais, foi possível analisar as peças e perceber quais são as vantagens e desvantagens do uso desta tecnologia numa visão tecnológica. Considera-se que os objetivos iniciais foram alcançados, sendo possível tirar as seguintes conclusões:

1. No que toca à integridade estrutural, a tecnologia de PBF tem capacidade de produzir peças com propriedades mecânicas equivalentes ou até melhores do que comparado com o processo de fundição injetada.
2. Todos os problemas encontrados se deveram ao não cumprimento de certos aspetos geométricos, dando como exemplo a falta de material na zona da porta de descarga. Estes problemas podem ter sido provocados por um uso de parâmetros de processo sub ótimo, tal como por uma orientação da peça inadequada.
3. A nível funcional não se verificou qualquer quebra no funcionamento do compressor devido ao uso de RH 3D. Os únicos problemas encontrados foram no teste de fugas e foram causados, uma vez mais, pela falta de material na zona da porta de descarga.

Posto isto, considera-se que a tecnologia de Fusão Seletiva por Laser tem capacidade de produzir peças equivalentes às peças produzidas pela metodologia de fabrico atual. O fabrico das peças utilizadas neste estudo foi realizado sem ter em consideração os requisitos que a peça deve cumprir. Por esta razão, no caso de uma futura impressão e sabendo agora os problemas encontrados admite-se que será possível produzir peças que não apresentem quaisquer problemas. Tendo em vista trabalhos futuros, é possível destacar alguns exemplos:

1. Otimização dos parâmetros do processo e da orientação de impressão, tendo em consideração os problemas encontrados neste estudo;
2. *Redesign* das peças em função do processo de fabrico aditivo metálico.

BIBLIOGRAFIA

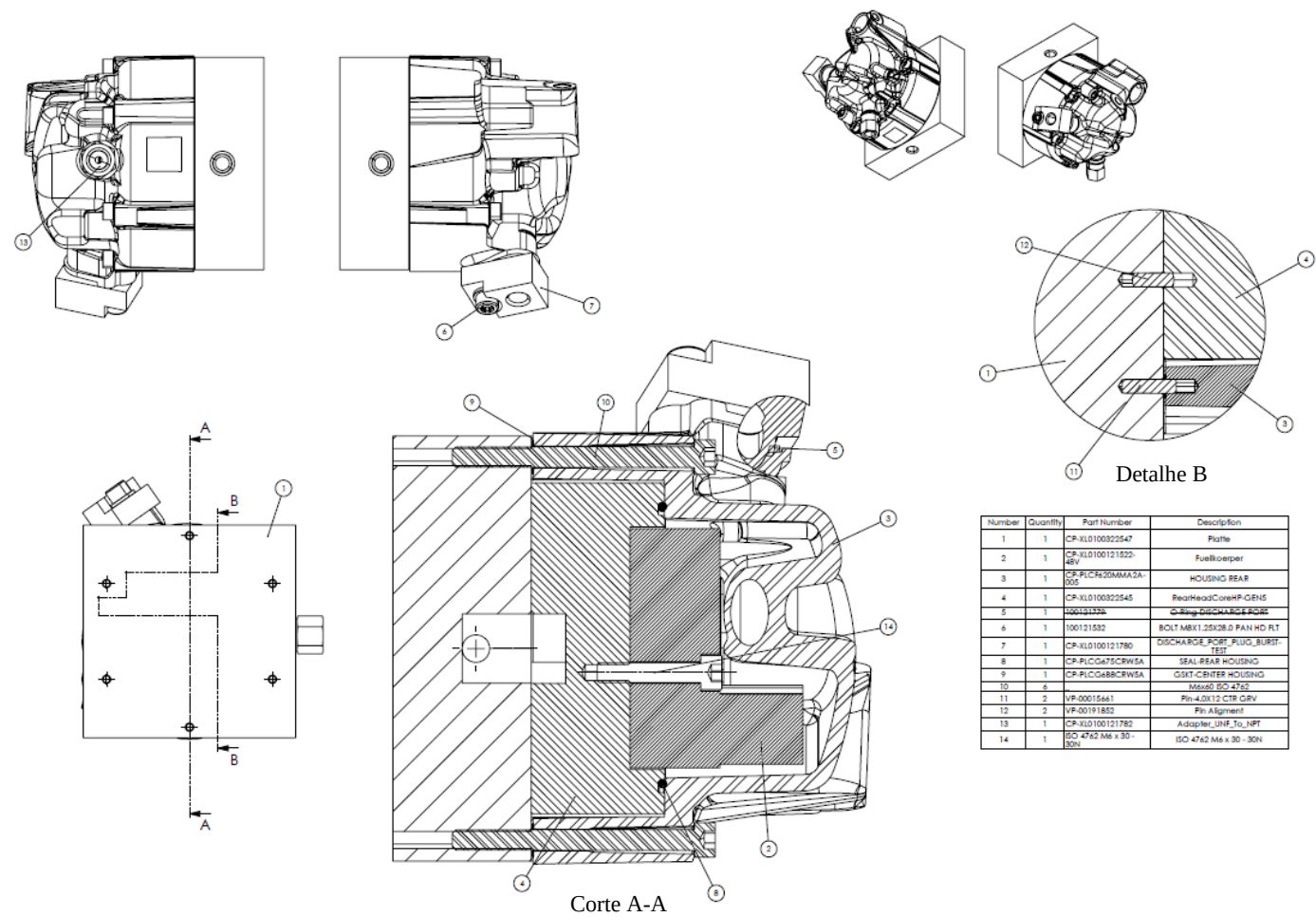
- [1] T. Zheng, M. Ardolino, A. Bacchetti, M. Perona, The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review, *Int. J. Prod. Res.* 59 (2021) 1922–1954. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824085>.
- [2] <https://www.bac-compressors.com/>, (n.d.).
- [3] ISO/ASTM 52900:2015 -Additive manufacturing — General principles — Terminology, 2015.
- [4] A. Vafadar, F. Guzzomi, A. Rassau, K. Hayward, Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges, *Appl. Sci.* 11 (2021) 1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>.
- [5] N. Kladovasilakis, P. Charalampous, I. Kostavelis, D. Tzetzis, D. Tzovaras, Impact of metal additive manufacturing parameters on the powder bed fusion and direct energy deposition processes: a comprehensive review, *Prog. Addit. Manuf.* 6 (2021) 349–365. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00180-8>.
- [6] S.-H. Li, P. Kumar, S. Chandra, U. Ramamurty, Directed energy deposition of metals: processing, microstructures, and mechanical properties, *Int. Mater. Rev.* 68 (2023) 605–647. <https://doi.org/10.1080/09506608.2022.2097411>.
- [7] B. Barroqueiro, A. Andrade-Campos, R.A.F. Valente, V. Neto, Metal Additive Manufacturing Cycle in Aerospace Industry: A Comprehensive Review, *J. Manuf. Mater. Process.* 3 (2019) 52. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030052>.
- [8] Madeleine P., PBF vs. DED: Which Metal 3D Printing Process Should You Choose?, *3D Nativ.* (2023).
- [9] Carlota V., The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing, *3D Nativ.* (2019).
- [10] L. Ladani, M. Sadeghilaridjani, Review of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing for Metals, *Metals (Basel)*. 11 (2021) 1391. <https://doi.org/10.3390/met11091391>.
- [11] D. Dev Singh, T. Mahender, A. Raji Reddy, Powder bed fusion process: A brief review,

- Mater. Today Proc. 46 (2021) 350–355. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.415>.
- [12] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, Springer New York, New York, NY, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
- [13] Calignano, Galati, Iuliano, A Metal Powder Bed Fusion Process in Industry: Qualification Considerations, Machines 7 (2019) 72. <https://doi.org/10.3390/machines7040072>.
- [14] <https://www.tudosobreplasticos.com/>, Impressoras 3D, (n.d.).
- [15] S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, B. Kieback, Powders for powder bed fusion: a review, Prog. Addit. Manuf. 4 (2019) 383–397. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>.
- [16] R. Singh, A. Gupta, O. Tripathi, S. Srivastava, B. Singh, A. Awasthi, S.K. Rajput, P. Sonia, P. Singhal, K.K. Saxena, Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview, Mater. Today Proc. 26 (2020) 3058–3070. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.635>.
- [17] W. Han, L. Kong, M. Xu, Advances in selective laser sintering of polymers, Int. J. Extrem. Manuf. 4 (2022) 042002. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac9096>.
- [18] N.T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, R. Hague, 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting, Prog. Mater. Sci. 106 (2019) 100578. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>.
- [19] C. Körner, Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review, Int. Mater. Rev. 61 (2016) 361–377. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>.
- [20] J. Nandy, H. Sarangi, S. Sahoo, A Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling, Lasers Manuf. Mater. Process. 6 (2019) 280–316. <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00094-y>.
- [21] D.V. Michaela Roudnicka, Michal Misurak, Differences in the Response of Additively Manufactured Titanium Alloy to Heat Treatment – Comparison between SLM and EBM, (2019).
- [22] N. Kaufmann, M. Imran, T.M. Wischeropp, C. Emmelmann, S. Siddique, F. Walther, Influence of Process Parameters on the Quality of Aluminium Alloy EN AW 7075 Using

- Selective Laser Melting (SLM), *Phys. Procedia* 83 (2016) 918–926.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.096>.
- [23] A. Maamoun, Y. Xue, M. Elbestawi, S. Veldhuis, The Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys, *Materials (Basel)*. 12 (2018) 12. <https://doi.org/10.3390/ma12010012>.
- [24] W. Xiong, L. Hao, Y. Li, D. Tang, Q. Cui, Z. Feng, C. Yan, Effect of selective laser melting parameters on morphology, microstructure, densification and mechanical properties of supersaturated silver alloy, *Mater. Des.* 170 (2019) 107697.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107697>.
- [25] K. Kempen, L. Thijs, J. Van Humbeeck, J.-P. Kruth, Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting, *Phys. Procedia* 39 (2012) 439–446.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.059>.
- [26] S.A. Jawade, R.S. Joshi, S.B. Desai, Comparative study of mechanical properties of additively manufactured aluminum alloy, *Mater. Today Proc.* 46 (2021) 9270–9274.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.096>.
- [27] K. Zyguła, B. Nosek, H. Pasiowiec, N. Szysiak, Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique, *World Sci. News* (2018).
- [28] K. Kamarudin, M.S. Wahab, Z. Shayfull, A. Ahmed, A.A. Raus, Dimensional Accuracy and Surface Roughness Analysis for AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting (SLM), *MATEC Web Conf.* 78 (2016) 01077. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167801077>.
- [29] G. Strano, L. Hao, R.M. Everson, K.E. Evans, Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting, *J. Mater. Process. Technol.* 213 (2013) 589–597.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011>.
- [30] Ahmed, Majeed, Atta, Guozhu, Dimensional Quality and Distortion Analysis of Thin-Walled Alloy Parts of AlSi10Mg Manufactured by Selective Laser Melting, *J. Manuf. Mater. Process.* 3 (2019) 51. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020051>.
- [31] X. Li, D. Yi, X. Wu, J. Zhang, X. Yang, Z. Zhao, Y. Feng, J. Wang, P. Bai, B. Liu, Y. Liu, Effect of construction angles on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting, *J. Alloys Compd.* 881 (2021) 160459.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160459>.

- [32] Z. Dong, Y. Liu, W. Li, J. Liang, Orientation dependency for microstructure, geometric accuracy and mechanical properties of selective laser melting AlSi10Mg lattices, *J. Alloys Compd.* 791 (2019) 490–500. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.344>.
- [33] SLM Solutions, Bugatti Develops and Builds Functional Components for High-Performance Vehicles with the SLM® Additive Manufacturing Technology from SLM Solutions, (2019).
- [34] Porsche, 3D printing technology optimises pistons for the powerful 911 GT2 RS, (n.d.).
- [35] Additive Industries, Design & Manufacture of AM F1 Chassis Inserts, (2021).
- [36] Additive Industries, Volkswagen realizes a 650% cost reduction on Tiguan production tooling using the MetalFAB industrial metal Additive Manufacturing equipment, (n.d.).
- [37] <https://www.codi.pt/>, (n.d.).
- [38] <https://www.additiveindustries.com/>, (n.d.).
- [39] <https://www.creaform3d.com/pt>, (n.d.).
- [40] <https://www.solutions4metrology.com/>, (n.d.).
- [41] <https://www.doosan.com/en>, (n.d.).
- [42] <https://mtdcnc.com/news/mills-cnc-ltd/latest-doosan-dvf-5000-to-be-showcased-by-mills-cnc-at-the-southern-manufacturing-show>, (n.d.).
- [43] <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>, (n.d.).
- [44] <https://www.directindustry.com/pt/prod/zeiss-metrologie-industrielle/product-210459-2150391.html>, (n.d.).
- [45] <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/>, (n.d.).
- [46] <https://www.hdtech.com/>, (n.d.).
- [47] <https://www.burster.com/en/measure-test-devices/p/detail/resistomatr-2316>, (n.d.).
- [48] <https://www.weiss-technik.com/pt/>, (n.d.).

Anexo 1





2023

João Marto

Avaliação da capacidade da Fusão Seletiva por Laser no fabrico de um componente metálico para a indústria automóvel