

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

Comparação do impacto ambiental entre
fabricação convencional (CNC) e fabrico aditivo
metálico (PBF)

Hélder da Silva Gameiro

Leiria, 30 de Setembro de 2023

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

Comparação do impacto ambiental entre
fabricação convencional (CNC) e fabrico aditivo
metálico (PBF)

Hélder da Silva Gameiro

Projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Joel Oliveira Correia
Vasco e do Professor Doutor Nelson Simões Oliveira

Leiria, 30 de Setembro de 2023

Agradecimentos

Uma dissertação é um trabalho maioritariamente de resiliência mental e luta constante contra todos os imprevistos e variáveis que dela dependem. No entanto, apesar de ter passado a maior parte do tempo a trabalhar nesta dissertação em modo solitário, foi necessário rodear-me de pessoas que me apoiassem. O conhecimento técnico e experiência profissional, foi tão importante como o apoio dado nos momentos mais difíceis que aconteceram no decorrer deste mestrado. É com uma enorme gratidão que agradeço às seguintes pessoas e entidades que contribuíram de qualquer forma para que conseguisse concluir este trabalho.

Em primeiro lugar, estou profundamente grato aos meus pais pelo apoio incansável que têm me proporcionado ao longo da minha vida. Eles sempre acreditam nas minhas capacidades. Além disso, eles fizeram esforços incalculáveis para garantir que eu tivesse acesso a oportunidades educacionais que eles próprios não puderam desfrutar. Sem dúvida, são pilares fundamentais no meu futuro.

Em segundo lugar, à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do IPL por me ter transmitido o conhecimento e proporcionado as melhores condições para conseguir realizar este projeto. Em especial aos orientadores, o Joel Vasco pelo conhecimento das tecnologias de fabrico aditivo, e ao Nelson Oliveira pelo seu conhecimento de análises de ciclo de vida, e no domínio do software GaBi.

Para encerrar o pódio, um agradecimento especial ao Luís Dias e à Centimfe pelos dados relativos ao fabrico aditivo. A equipa da Sbmolde, pela cedência dos casos de estudo e pelo conhecimento e experiência que tenho recebido aos longos dos anos e pela flexibilidade dada para desenvolvimento da tese. Um agradecimento especial ao Edgar Santos por programar o CAM dos casos de estudo.

Ao Fábio Coelho da Frumolde e ao Fábio Cravo da RMC pelos dados relativos à maquinação CNC e ar comprimido que de outra forma não teria acesso.

Por último, um especial agradecimento especial aos meus colegas de turma, que me ajudaram em momentos difíceis, e às amigas que ficaram.

Resumo

Existem vários métodos de produção de peças metálicas, no entanto na produção de peças para moldes de injeção de plásticos, a maquinação ainda é maioritariamente feita por controlo numérico computadorizado (CNC). Com os desenvolvimentos feitos nos métodos de fabrico aditivo metálico por fusão em camada de pó (PBF), a sua entrada no mercado tem vindo a ser gradual, e o setor dos moldes não é exceção, mais concretamente para a produção de insertos moldantes.

A sustentabilidade é cada vez mais um fator importante no desenvolvimento tecnológico, e os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) definidos pela ONU em 2015 veem evidenciar essa preocupação. O objetivo deste trabalho é analisar qual o método produtivo com menor impacto ambiental, através de uma análise de impacto de ciclo de vida (AICV). E com esta análise pretende-se mostrar para a comunidade científica e o sector industrial, se o fabrico aditivo é realmente ou não mais sustentável. Apesar de importantes, não serão considerados fatores económicos.

Apesar de os resultados identificarem o método mais sustentável entre os casos de estudo, a diferença é pouco significativa. No entanto, existem vários fatores que foram identificados que determinam a sustentabilidade de um processo em relação ao outro.

Palavras-chave: Controlo Numérico Computorizado, *Powder Bed Fusion*, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Abstract

There are several methods of producing metal parts, however in the production of parts for plastic injection moulds, the machining is still mostly done by computer numerical control (CNC). With the developments made in metal additive manufacturing methods by powder layer fusion (PBF), its entry into the market has been gradual, and the mould sector is no exception.

Sustainability is increasingly an important factor in technological development, and the sustainable development goals (SDGs) defined by the UN in 2015 highlight this concern. The objective of this work is to analyze which production method has the lowest environmental impact, through a life cycle impact analysis (LCIA). And with this analysis we intend to show the scientific community and the industrial sector whether additive manufacturing is more sustainable or not. Although important, economic factors will not be considered.

Although the results identify the most sustainable method among the study cases, the difference is not significant. However, there are several factors that have been identified that determine the sustainability of one process over another.

Keywords: Computer numerical control, Powder Bed Fusion, Life Cycle Impact Analysis

Índice de figuras

Figura 1: Desenho de um molde, com os vários componentes	7
Figura 2: Exemplo de configuração de uma máquina de 5 eixos	9
Figura 3: Esquema de uma máquina de PBF	13
Figura 4: Categorização das propriedades na fabricação por MPBF	14
Figura 5: Postiço com canais conformáveis para molde injeção de plásticos.....	16
Figura 6: Implante para o quadril	16
Figura 7: Pinça de travões do Bugatti Chiron fabricada em SLM	16
Figura 8: Evolução da produção de aço, consumo de água e reciclagem.....	17
Figura 9: Distribuição dos vários processos de produção	18
Figura 10: Processo BOF	18
Figura 11: Método de produção EAF e DRI	19
Figura 12: Métodos de atomização	21
Figura 13: Comparação do impacto ambiental entre CNC, Fundição, BJ, BPE e PBF..	26
Figura 14: Diagrama de fluxo de processos de AICV da maquinação CNC	27
Figura 15: Diagrama de fluxo de processos de AICV por fabricação híbrida.....	28
Figura 16: Peça do caso de estudo 1.....	32
Figura 17: Peça do caso de estudo 2.....	33
Figura 18: Fluxo de trabalho para produção em CNC.....	34
Figura 19: Blocos de aço das peças dos casos de estudo.....	35
Figura 20: Posições de trabalho para fabricação CNC das peças.....	37
Figura 21: Fluxo de trabalho para produção em PBF.....	43
Figura 22: Disposição das peças na câmara de construção.	44
Figura 23: A diferença entre a peça original e a peça com sobre espessura no CE1....	46
Figura 24: Modelação do AICV no GaBi da produção CNC do CE1.	56
Figura 25: Consumo energético por kg de aço H13 produzido.....	57

Figura 26: Modelo de AICV no GaBi da produção PBF+CNC do CE1.	58
Figura 27: Categorização dos vários impactos ambientais.....	59
Figura 28: Valores normalizados dos impactos ambientais da produção CNC no CE1.	61
Figura 29: Impactos ambientais por kg de peça produzida por CNC.....	62
Figura 30: Distribuição do impacto ambiental da produção CNC (...)	63
Figura 31: Mix energético em Portugal entre 1 de Janeiro e 30 de Junho de 2023	64
Figura 32: Origem das emissões de CO ₂ eq. na produção CNC.....	65
Figura 33: Emissões de CO ₂ eq. por kg de peça produzida em CNC.....	65
Figura 34: Impactos normalizados da produção PBF+CNC do CE1.	66
Figura 35: Impactos ambientais por kg de peça produzida por PBF+CNC.....	67
Figura 36: Distribuição do impacto ambiental da produção PBF+CNC	68
Figura 37: Distribuição do impacto ambiental a produção PBF+CNC (azoto estimado).	69
Figura 38: Origem das emissões de CO ₂ eq. na produção PBF+CNC.	70
Figura 39: Emissões de CO ₂ eq. por kg de peça produzida em PBF+CNC.....	70
Figura 40: Impacto do acabamento CNC nos CE's.	71
Figura 41: Comparação dos impactos entre CNC e PBF (sem acabamento CNC).	73

Índice de tabelas

Tabela 1: Dimensões, volume do bloco de aço inicial e quantidade de apara.....	36
Tabela 2: Consumo de ar comprimido na produção convencional.	40
Tabela 3: Somatório do tempo de trabalho em cada tipo de operação.	40
Tabela 4: Somatório do consumo de energia em cada tipo de operações.	41
Tabela 5: Contabilização do consumo energético para fabricação em CNC.	42
Tabela 6: Dados recolhidos no processo CNC.....	42
Tabela 7: Dados da simulação PBF.....	45
Tabela 8: Massa de pó necessária e desperdiçada.	46
Tabela 9: Cálculo do consumo de energia elétrica na produção PBF.	47
Tabela 10: Dados do consumo de azoto.....	48
Tabela 11: Dados da simulação CAM para PBF.....	49
Tabela 12: Massa da peça, pó necessário e apara.....	50
Tabela 13: Dados do consumo de ar comprimido.	50
Tabela 14: Consumo de ar comprimido no acabamento de CNC.....	51
Tabela 15: Somatório do tempo de trabalho em cada tipo de operação em CNC.	51
Tabela 16: Somatório do consumo de energia no acabamento em CNC.....	52
Tabela 17: Dados recolhidos no processo PBF+CNC.....	53
Tabela 18: Inventário da fabricação CNC	54
Tabela 19: Inventário para a fabrico em PBF+CNC.	55
Tabela 20: Resumo dos impactos ambientais dos CE's.....	72
Tabela 21: Impacto ambiental apenas do processo PBF.	72

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento dos casos de estudo	1
1.2.	Enquadramento da sustentabilidade	2
1.3.	Objetivos e estrutura do trabalho	3
2.	Revisão bibliográfica	5
2.1.	Moldes para injeção de plástico	5
2.1.1.	Evolução histórica.....	5
2.1.2.	Princípios base do molde.....	6
2.2.	Fabricação por CNC	8
2.2.1.	Evolução histórica.....	8
2.2.2.	O Processo de corte por arranque de apara	10
2.3.	Fusão a LASER seletiva de metais	11
2.3.1.	Evolução histórica.....	11
2.3.2.	Descrição do processo	13
2.3.3.	Propriedades e características.....	14
2.3.4.	Aplicações	16
2.4.	Produção da matéria-prima	17
2.4.1.	Produção de aço.....	17
2.4.2.	Pós metálicos para fabrico aditivo.....	20
2.5.	Avaliação de ciclo de vida	23
2.5.1.	Objetivos e Âmbito.....	23
2.5.2.	Análise de Inventário	24
2.5.3.	Avaliação do impacto.....	25
2.5.4.	Interpretação	25
2.6.	Comparação do impacto entre FC, FA e FAH	26

3.	Metodologia	29
3.1.	Objetivos e âmbito	30
3.2.	Casos de estudo	31
3.2.1.	Caso de estudo 1	32
3.2.2.	Caso de estudo 2	33
3.3.	Simulação em fabrico convencional	34
3.3.1.	Quantidade de material	35
3.3.2.	Quantidade de apara	35
3.3.3.	Simulação CAM	36
3.3.4.	Tempo de fabricação	38
3.3.5.	Tempo de preparação e aquecimento	38
3.3.6.	Troca de ferramentas e plano de trabalho	38
3.3.7.	Volume de fluido de refrigeração	39
3.3.8.	Consumo de ar comprimido	39
3.3.9.	Consumo de energia elétrica	40
3.3.10.	Resumo dos dados recolhidos	42
3.4.	Simulação de fabrico em PBF+CNC	43
3.4.1.	Simulação de produção PBF	44
3.4.2.	Quantidade de pó	45
3.4.3.	Consumo de energia elétrica	47
3.4.4.	Quantidade de azoto	48
3.4.5.	Simulação CAM do acabamento em CNC	49
3.4.6.	Quantidade de apara	50
3.4.7.	Volume de fluido de refrigeração	50
3.4.8.	Consumo de ar comprimido (PBF)	50
3.4.9.	Consumo de ar comprimido (CNC)	51
3.4.10.	Consumo de energia elétrica do acabamento CNC	51

3.4.11. Resumo dos dados recolhidos	53
3.5. Análise de Inventário.....	54
3.6. Modelação do AICV no GaBi	56
3.6.1. Modelo da produção por CNC	56
3.6.2. Modelo da produção por PBF+CNC.....	57
4. Análise e discussão de resultados.....	59
4.1. Produção por CNC.....	60
4.1.1. Distribuição detalhada dos impactos ambientais.....	60
4.1.2. Distribuição dos impactos ambientais por kg de peça.....	62
4.1.3. Influência dos parâmetros produtivos no impacto ambiental ...	63
4.1.4. Potencial de aquecimento global	64
4.2. Produção por PBF+CNC	66
4.2.1. Distribuição detalhada dos impactos ambientais.....	66
4.2.2. Distribuição dos impactos ambientais por kg de peça.....	67
4.2.3. Influência dos parâmetros produtivos no impacto ambiental ...	68
4.2.4. Estimativa do consumo de azoto real	69
4.2.5. Potencial de aquecimento global	70
4.2.6. Impacto do acabamento CNC na produção PBF+CNC.....	71
4.3. Comparação global dos resultados	72
5. Conclusões.....	74
5.1. O fabrico PBF tem menor impacto ambiental que CNC?.....	74
5.2. Qualidade do estudo e respetivos resultados.....	75
5.3. Trabalhos futuros	76
5.4. Considerações Finais.....	77
6. Referências Bibliográficas	79
7. Anexos	83

Lista de siglas

ACV – Avaliação Ciclo de Vida

AICV– Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

AISI - *American Iron and Steel Institute*

AM – *Additive Manufacturing*

ASTM – *American Society for Testing Materials*

BF-BOF – *Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace*

CAD – *Computer Aided Design* / Modelação Assistida por Computador

CAM – *Computer Aided Manufacturing* /Fabricação Assistida por Computador

CE – Caso de estudo

CNC – Controlo Numérico Computadorizado

DED – *Directed Energy Deposition*

DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*

DRI – *Direct Reduced Iron*

EAF – *Electric Arc Furnace*

ESTG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

EF – *Environmental Footprint*

FA – Fabrico Aditivo

FAH – Fabrico Aditivo Híbrido

FC – Fabrico convencional

HAM – *Hybrid Additive Manufacturing*

ICV – Inventário de Ciclo de Vida

ISO – *International Standards Organization* / Organização Internacional de Normalização

LASER – *Light Amplified Stimulated Emission Radiation*

LCA – *Life-Cycle Assessment*

LCI – *Life Cycle Inventory*

LCIA – *Life Cycle Impact Assessment*

LMF – *Laser Metal Fusion*

MPBF - *Metal Powder Bed Fusion*

ODS – *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*

PBF – *Powder Bed Fusion*

PREP – *Plasma Rotating Electrode Process / Processo de Eletrodo Rotativo de Plasma*

SLM – *Selective Laser Melting*

1. Introdução

A produção industrial moderna é um pilar essencial da sociedade, impulsionando o desenvolvimento tecnológico e económico. De um lado há a fabricação convencional com raízes profundas na sociedade. Do outro lado, a recente tecnologia do fabrico aditivo metálico Ambas têm as suas vantagens e desvantagens, no entanto, à medida que se avança em direção a um futuro mais sustentável, torna-se essencial avaliar e comparar os impactos ambientais destas tecnologias (Mecheter, Tarlochan, & Kucukvar, 2023). Ao longo desta introdução será feito o enquadramento dos casos de estudo e da importância da sustentabilidade no desenvolvimento tecnológico. Por fim é feita uma apresentação da estrutura do trabalho e o seu objetivo

1.1. Enquadramento dos casos de estudo

O constante avanço tecnológico na indústria e o aumento nos padrões de qualidade das peças a serem produzidas, têm obrigado o setor dos moldes para plásticos a usar a melhor tecnologia de fabricação existente no mercado (Khosravani & Nasiri, 2020).

Existem vários métodos de processar o metal: processos de subtração de material (corte por arranque de aparas, eletroerosão, LASER, jato de água e abrasão), processos de ligação (soldadura e brasagem), processos de enformação (laminação, estampagem, fundição e extrusão). No entanto, no fabrico de moldes, os mais usados são o corte por arranque de aparas e a eletroerosão (Matos, et al., 2003). E mais recentemente, o fabrico aditivo também entrou para esta lista de processos usados (Asnafi, 2021).

As tecnologias subtrativas surgem no final do século XVIII, após a invenção da máquina a vapor. Como o nome indica, consiste na produção de peças pela remoção de material a um bloco. Os principais processos são o torneamento, fresagem e furação. Estes processos podem ser realizados em equipamentos individuais (com ou sem computadorização) ou em centros de maquinaria automatizados, vulgarmente designadas de “CNC” (Relvas, 2002).

O FA metálico surgiu em meados dos anos 80 como uma tecnologia de produção de peças a partir de modelos CAD 3D por construção camada a camada (Bourell, et al., 2017). Os métodos de FA englobam um conjunto de tecnologias que permitem obter componentes

físicos a partir de modelos CAD ou pela conversão de dados digitais provenientes de sistemas de Engenharia Inversa (Pagac, et al., 2021).

Na indústria de moldes para injeção de plásticos, a utilização das tecnologias de FA, mais concretamente a fusão em camada de pó metálico (PBF), tem vindo a aumentar ao longo dos anos. Para este incremento contribuiu a maturidade que a tecnologia tem vindo a mostrar: melhor qualidade do produto final devido grão de pó mais fino e homogéneo que melhora o acabamento superficial da peça, mais rapidez com a adição de mais LASER's em simultâneo na câmara, e precisão devido à constante melhoria das tolerâncias de funcionamento dos equipamentos. Mas, acima de tudo a redução dos preços dos equipamentos, que se têm tornado cada vez mais acessíveis. Este aumento constante da utilização deste método, é uma confirmação real das vantagens ao produzir peças por fabrico aditivo comparativamente aos métodos convencionais usados na indústria (Asnafi, 2021) (Kirchheim, Katrodiya, Zumofen, Ehrig, & Wick, 2021).

O uso do FA nos moldes de injeção de termoplásticos, está quase exclusivamente dedicado aos canais conformáveis. Canais conformáveis são circuitos de refrigeração com percursos e geometrias feitos especificamente para uma determinada peça, que conseqüentemente, apenas se conseguem produzir por fabrico aditivo. As duas principais vantagens são a melhor qualidade das peças injetadas e a redução do custo de produção/injeção (devido à redução do tempo de ciclo de injeção), ambas resultantes da utilização dos canais conformáveis no molde (Asnafi, 2021) (Kirchheim, Katrodiya, Zumofen, Ehrig, & Wick, 2021). Estas duas vantagens enquadram-se num bom exemplo de como os avanços tecnológicos têm melhorado os produtos com a utilização de menos recursos (neste caso menos tempo de ciclo de produção e, conseqüentemente, menos energia).

1.2. Enquadramento da sustentabilidade

A sustentabilidade e o ciclo de vida dos produtos é um tema com cada vez mais importância nos dias de hoje. As tecnologias de fabricação têm evoluído de forma a produzirem produtos e peças da forma mais eficiente e sustentável. O fabrico aditivo destaca-se pela eficiência no uso dos recursos materiais e energéticos assim como no

modo como a produção pode ser descentralizada, contribuindo também para menos recursos logísticos (Liu, Jiang, Cong, Li, & Zhang, 2018).

Em 2015, a ONU definiu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas a serem atingidas até 2030. Assim, as tecnologias de fabrico (aditivo e subtrativo) estão inseridas na ODS 9 – Indústria, Inovação e infraestruturas, mas também no ODS 12 – Consumo e produção responsáveis (ODS, 2023).

O ODS 9 define várias metas, nas quais se destaca a 9.4 – “Até 2030, modernizar as infraestruturas e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com maior eficiência no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com as suas respectivas capacidades”. Com o respetivo indicador 9.4.1 - “Emissão de CO₂ por unidade de valor acrescentado”.

O ODS 12 define várias metas transversais a vários setores da sociedade, ao qual se destaca a meta de reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização (ODS, 2023). Este ODS veio realçar a importância, da já conhecida, política dos 3R's (Reduzir, Reciclar e Reutilizar) (Yu, Zhang, Li, Montenegro-Marin, & Kumar, 2021).

1.3. Objetivos e estrutura do trabalho

O objetivo deste trabalho é comparar o impacto ambiental entre duas peças produzidas por meios convencionais (CNC) e fabrico aditivo (PBF). Esta comparação é feita utilizando uma avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) em dois casos de estudo, pretendendo-se avaliar qual dos dois processos tem o menor impacto.

A estrutura de um projeto desta magnitude é essencial para organizar e apresentar de forma coerente e clara o trabalho desenvolvido. Além da fundamental introdução e conclusão, o corpo do trabalho está dividido em três capítulos: a revisão bibliográfica, metodologia e discussão de resultados.

A revisão bibliográfica é o alicerce do estudo, onde é explorada e analisada a literatura existente sobre os vários temas enquadrados. Este capítulo permite que o leitor compreenda os vários tópicos abordados nos capítulos seguintes.

A metodologia descreve o caminho pelo qual o estudo foi conduzido, incluindo detalhes sobre a recolha dos dados e os vários métodos utilizados para chegar a resultados fidedignos, fornecendo assim a base científica para o projeto.

Por fim, a discussão dos resultados é o momento em que se apresentam e interpretam os resultados da pesquisa, relacionando-os com a revisão bibliográfica e contextualizando-os dentro do campo de estudo. Esta estrutura proporciona uma progressão lógica e coesa ao trabalho, permitindo que o leitor compreenda o contexto, o processo e os significados dos resultados obtidos.

2. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica está dividida em seis subcapítulos distintos, mas essenciais para fundamentar e enquadrar vários tópicos e termos usados ao longo deste trabalho. Em primeiro lugar é feito um enquadramento e descrição geral do funcionamento de um molde de injeção de plásticos. Em segundo lugar, a maquinaria CNC. Em terceiro lugar, o fabrico aditivo metálico, nomeadamente a sinterização a LASER seletiva de metais (MPBF). Em quarto lugar, uma breve descrição dos processos da produção da matéria-prima para ambos os métodos de Fabrico Aditivo (FA) e Fabrico Convencional (FC). Em quinto, a análise de ciclo de vida, descrevendo o processo.

2.1. Moldes para injeção de plástico

A injeção de plástico é atualmente o método mais comum para a produção de artigos em plástico. Por ser um processo rápido, com uma elevada cadência e repetibilidade, é utilizado em quase todas as áreas industriais (Kanbur, et al., 2022). O produção de peças plásticas por injeção é composto por três elementos-chave: uma máquina de injeção, um molde e o material a injetar (Matos, et al., 2003).

2.1.1. Evolução histórica

A primeira máquina de injeção foi patenteada nos EUA pelos irmãos John e Isaiah Hyatt em 1872, surgindo assim também o processo de injeção (Goodship, 2004). No entanto, as primeiras máquinas ainda estavam limitadas ao processamento de celulose e isso provocou uma estagnação no processo. A evolução começou nos anos 20 com o aparecimento dos termoplásticos. No entanto, o grande crescimento, deu-se durante a Segunda Guerra Mundial. A escassez de metais provocada pela guerra, conduziu à procura de materiais alternativos. Os plásticos entraram em cena para preencher a lacuna, fornecendo um substituto acessível. À medida que os plásticos se popularizaram gradualmente, o mesmo aconteceu com a moldagem por injeção de plástico. A sua eficácia nesta época foi atribuída principalmente à fabricação eficiente, acessível e em grande escala (Bryce, 1996).

A tecnologia base usada atualmente é bastante semelhante às tecnologias usadas no passado. No entanto, os computadores tornaram todo o processo de design e fabricação mais fácil, rápido e eficiente, levando a que as peças de plástico são frequentemente a escolha preferida para aplicações tecnológicas e científicas avançadas (Goodship, 2004).

2.1.2. Princípios base do molde

O molde, de uma forma simples, é constituído por duas partes que quando fechadas formam uma cavidade com a geometria da peça a produzir. A parte do molde que fica no lado da injeção do material é denominado cavidade, a parte do lado onde a peça é extraída é a bucha. No entanto, existem muitos outros elementos (Figura 1), cada um com a sua função específica (Matos, et al., 2003). Segundo o Manual do Projetista de (Matos, et al., 2003), existem seis sistemas funcionais num molde:

- ▶ **Zonas moldantes** – Todas as peças que dão forma ao material injetado, isto inclui cavidades, buchas, elementos móveis, balancés e postigos.

- ▶ **Sistema de guiamento e travamento** – Além do sistema de guiamento presente nas máquinas de injeção, o molde também tem de ter um sistema de guiamento próprio. O guiamento é sempre constituído por duas peças distintas que deslizam entre si, de modo a guiar o molde durante o fecho. O mais comum são guias redondas com casquilhos.

Os sistemas de travamento, são um complemento ao guiamento do molde. O sistema de guiamento, apesar de muito preciso, tem de ter alguma folga para funcionar corretamente. Estas folgas, podem causar a típica “rebarba” nas peças. O objetivo destes mecanismos é garantir uma precisão maior nos últimos milímetros de curso, durante o fecho do molde.

- ▶ **Sistema de alimentação** – É o sistema responsável pela entrada de material plástico no interior das zonas moldantes.

- ▶ **Sistema de escape de gases** – É o sistema responsável pela libertação do ar no interior do molde durante a injeção do material plástico.

► **Sistema de controlo de temperatura** – Idealmente, na injeção de polímeros, o molde deveria estar à temperatura do fundido durante a fase de injeção, e no momento da extração, molde e peças deveriam estar à temperatura ambiente. Nestas condições ideais, a pressão de injeção necessária seria muito reduzida. Por outro lado, o custo de produção das peças seria inoportável devido ao seu longo ciclo de produção, portanto há que encontrar equilíbrio ideal entre tempo de ciclo e qualidade das peças.

O controlo da temperatura do molde é um aspeto importantíssimo no processo. Por razões económicas o tempo de ciclo tem de ser o menor possível, pelo que a porção do ciclo dedicada a esta etapa é a maior de todo o ciclo. Este controlo é feito por transferência de calor dos canais de refrigeração para as superfícies moldantes. Deste modo a maneira como se faz o arrefecimento deve ser controlada, não só através do gradiente de temperatura do fluido refrigerador, mas também, da sua uniformidade na superfície da zona moldante, de forma a evitar empenos nas peças finais.

► **Sistema de extração** – É o conjunto de equipamentos e peças no molde que contribuem para a retirada da peça do interior do mesmo. Um sistema de extração simples é constituído por um conjunto de chapas de extração e extratores.

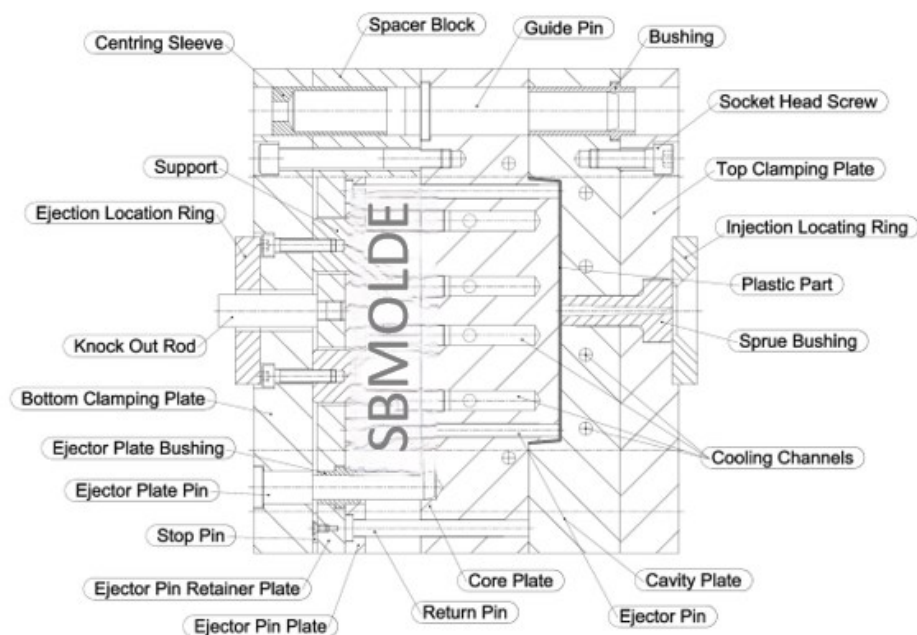


Figura 1: Desenho de um molde, com os vários componentes (Cortesia da Sbmolde Lda).

2.2. Fabricação por CNC

A fabricação por corte por arranque de apra em CNC atua pela remoção do material com uma ferramenta de corte. A constante evolução nas tecnologias de fabrico, têm tornado a fabricação subtrativa em CNC cada vez mais rápida, precisa e eficiente. No sector da metalomecânica, mais concretamente dos moldes para injeção de plástico, a fabricação de peças por este meio tem sido o motor de desenvolvimento desta indústria. Os equipamentos CNC (máquina e respetivas ferramentas de corte) que produzem um molde têm uma relação direta na sua qualidade e precisão, pela elevada precisão necessária para produzir as peças.

2.2.1. Evolução histórica

Desde a pré-História que o Homem procura facilitar e automatizar os meios de fabrico. Desde então, as máquinas e ferramentas têm sido construídas e melhoradas, mas a um ritmo muito lento até à primeira revolução industrial. Apesar da máquina a vapor ter sido criada por James Watt em 1766, só dez anos mais tarde é que John Wilkinson construiu a primeira mandriladora. Apesar das suas limitações, esta máquina resultou num desenvolvimento industrial, que iniciou a produção em massa de novas máquinas (Relvas, 2002).

Com o desenvolvimento dos computadores nos anos 40, surgiu também o controlo numérico. O pioneiro desta tecnologia foi John Parsons, que teve a ideia de comandar uma fresadora a partir de um computador, para a produção de uma peça complexa da indústria aeronáutica. Em 1949, Parsons juntamente com o MIT e a força aérea dos EUA, acoplaram um sistema de leitura de dados, a partir de uma cassete de fita perfurada, numa fresadora. Esta fita era portadora de um conjunto de instruções de código binário, que comandavam os eixos da máquina, definindo a trajetória da ferramenta (Relvas, 2002).

Durante muitos anos, este foi o tipo de comunicação usado na indústria metalomecânica, até o M.I.T ter desenvolvido uma linguagem de modo de programação manual baseada em funções. Algum tempo depois, a adoção desta tecnologia por outros construtores, levou a uma variedade de linguagens, visto que todas elas se empenharam no desenvolvimento das suas próprias versões. Com esta situação começou a surgir a

necessidade uniformizar as linguagens entre máquinas diferentes. Para resolver esta questão de dispersão de linguagens, o MIT em 1980 normaliza esta linguagem, ficando então conhecida, na versão americana, por Norma RS274D. Associada a uma dada máquina, esta linguagem tinha algumas diferenças, visto que cada fornecedor poderia usar uma descrição diferente, mas tendo sempre como base a Norma DIN66025/ISO6983 (Xu & He, 2004).

Em 1965, a *Lockheed* comercializou o CADAM, o primeiro software CAD/CAM. Este software surge pela necessidade de arranjar soluções para a fabricação de peças com geometrias complexas (Xu & He, 2004).

Com este avanço tecnológico, a indústria deu um salto na produção, reduzindo o tempo de fabrico dos componentes, devido à facilidade de criação de modelos 3D e à criação automática de trajetórias de maquinação. Contudo, tal como se tinha passado anteriormente, com a linguagem das máquinas, o mesmo aconteceu no fabrico de *softwares*, onde surgiram dezenas de softwares de CAD/CAM. Esta situação levou à falta de comunicação entre *softwares*, mas com a vantagem de todos possuírem pós-processadores, capazes de converter toda a informação para os diferentes tipos de máquinas CNC (Xu & He, 2004).

Ao longo dos anos, a necessidade de responder às várias necessidades tecnológicas levou a que estas máquinas se diversificassem em vários tipos. Segundo (Smid, 2008), as máquinas de CNC podem ser divididas em três tipos:

- ▶ Pelo número de eixos – 3, 5, etc... (Figura 2);
- ▶ Pela presença ou ausência de um trocador automático de ferramentas;
- ▶ Pela orientação dos eixos.

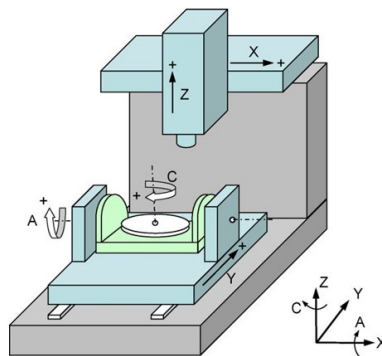


Figura 2: Exemplo de configuração de uma máquina de 5 eixos (Ibaraki, Sawada, Matsubara, & Matsushita, 2010).

2.2.2. O Processo de corte por arranque de apra

O CNC é um método que utiliza controlo numérico dos eixos da máquina para a manipulação da posição da mesa ou da ferramenta de corte. Todos os movimentos são controlados por um computador de forma totalmente automática. Com este método, é possível fabricar praticamente qualquer tipo de peças dentro das dimensões máximas de trabalho da máquina (Relvas, 2002).

A fabricação CNC é composta por vários processos, tais como o torneamento, fresagem, furação, retificação, entre outros processos existentes. A fresagem é um processo de corte polivalente, usado amplamente na produção de peças com geometrias complexas. Por este motivo, tornou-se uma tecnologia essencial na fabricação de moldes, componentes na indústria aeroespacial e automóvel (Perez, Diez, Perez, & Vizan, 2013).

Na operação mais comum, a fresagem, a ferramenta de corte roda em torno de um eixo, deslocando-se esta também segundo um determinado movimento linear ou circular. Nesta sequência constante de movimentos, existe uma coordenação de movimentos entre a ferramenta e a peça a maquinar (Matos, et al., 2003).

Por último, um fator importante neste processo é a refrigeração e lubrificação. Além de reduzir a temperatura na zona de corte, reduz as forças de corte e melhora também o escoamento das aparas, contribuindo para uma maior segurança no processo. Existem diferentes tipos de fluidos usados para este fim, óleo, ar comprimido, refrigeração criogénica, no entanto, o mais comum é a mistura de água e óleo (Le, Pham, & Tien, 2022).

2.3. Fusão a LASER seletiva de metais

Os vários processos que existem no mercado, obrigaram à criação de normas para a categorização dos mesmos. Assim, em 2015 foi criada a norma ISO/ASTM 52900:2015 destinada a normalizar e categorizar os vários processos de fabrico aditivo.

Em 2021, a norma de 2015 é revista e sofre alterações com o objetivo de tornar claras as categorias de fabrico, não obstante as designações comerciais adotadas por diversos fabricantes, surgindo a ISO/ASTM 52900:2021. Dentro das várias categorias, esta revisão bibliográfica vai incidir no processo da categoria 5 – Processos de fusão em camada de pó, denominada em inglês por *Powder Bed Fusion* (PBF). Segundo a norma ISO/ASTM 52900:2021, este processo utiliza uma fonte de energia térmica para ligar pós em regiões previamente selecionadas. Dentro da subcategoria PBF, existem ainda o varrimento por feixe de eletrões (*Electron Beam Melting* - EBM) e a sinterização LASER de pós poliméricos (SLS) (Zhang, Song, Wei, Bourell, & Shia, 2019).

2.3.1. Evolução histórica

O primeiro processo aditivo com pós foi a sinterização seletiva com LASER - *SLS* (*Selective LASER Sintering*). Este processo foi desenvolvido em 1986 por Deckard da Universidade do Texas em Austin, com a finalidade de produzir objetos poliméricos. O equipamento era constituído por um laser de CO₂, e os resultados conseguidos foram satisfatórios, devido à baixa temperatura de processamento dos polímeros (Zhang, Song, Wei, Bourell, & Shia, 2019).

Contudo, a ambição era produzir peças metálicas. Isto foi conseguido inicialmente através da mistura de pós metálicos com pós poliméricos dando-se a ligação entre as partículas pela presença de uma fase líquida. Porém, este método incorre na realização de uma tarefa extra que consiste na remoção do polímero, seguida de sinterização e infiltração o que o torna moroso e inviável economicamente para a maioria das aplicações, exopto se o objetivo é que este seja poroso (Zhang, Song, Wei, Bourell, & Shia, 2019).

Em 1994, é introduzida a fusão em fase líquida/fusão parcial a partir de misturas metálicas, em que o metal com menor temperatura de fusão serviu de ligante da matriz. Ao contrário do que ocorria com a mistura de pós metálicos e pós poliméricos em que era

necessária uma etapa de remoção do polímero seguida de sinterização, o novo processo permitiu produzir componentes metálicos com uma porosidade residual de cerca de 5% numa única etapa. Esta melhoria no processo, direcionou foco e investimento na técnica de fusão direta de metais por LASER . Esta técnica, comercializada pela *EOS–Manufacturing solutions* apresentava a fusão parcial como um dos mecanismos de ligação de pós metálicos disponibilizando vários materiais para este efeito (Simchi, Petzoldt, & Pohl, 2003).

Em 1997, W. Meiners e K. Wissenbach do “Fraunhofer Institute” em parceria com M. Fockele e D. Schwarze da “F&S Company”, desenvolveram novos LASER com comprimento de onda de 1 μm . Este comprimento é mais favorável à absorção de radiação, o que permite que ocorra a fusão total dos pós metálicos. Este foi o passo que viabilizou este processo, surgindo assim a sinterização LASER de metal (Simchi, Petzoldt, & Pohl, 2003).

A comercialização desta técnica/processo ocorreu em 2000 e pela *MCP Technology* antes designada por *F&S Company* e atualmente designada de *SLM Solutions*. Em 2004, M. Fockele cria a *Realizer GmbH*, tornando-se uma das grandes impulsionadoras desta tecnologia a par da *Concept Laser* para a qual esta técnica assumiu a designação de *LaserCusing*. (Yap, et al., 2015).

Atualmente, a tecnologia tem evoluído no sentido do aumento da cadencia de produção com a introdução de mais LASER a funcionar em simultâneo na mesma câmara. Existem vários fabricantes destas máquinas no mercado, cada um com a sua designação comercial entre os quais se destacam: *Direct Metal LASER Sintering* (DMLS) da *EOS* (EOS, 2023), *Laser Cusing* da *Concept Laser* (atualmente pertence ao grupo *General Electric*) (GE, 2023), *Selective LASER Maltng* (SLM) da *SLM Solutions* (SLMSolutions, 2023), *Direct Metal Printing* (DMP) da *3D Systems* (3DSystems, 2023) e *LASER Metal Fusion* (LMF) da *Trumph* (TRUMPF, 2023).

2.3.2. Descrição do processo

O primeiro passo no processo de produção é deposição de uma camada de pó sobre a plataforma de construção existente no equipamento, sendo esta camada a base de construção do componente. De seguida, um feixe LASER varre uma trajetória pré-definida da camada de pó, fundindo-a em simultâneo com as camadas já produzidas. Após a fusão da área a densificar, a plataforma desce o correspondente a uma espessura da camada e uma nova camada de pó é depositada sobre a camada previamente solidificada (Figura 3). Este processo repete-se até que o componente esteja finalizado. No fim do processo, procede-se à limpeza do componente, em que o pó excedente pode ser parcialmente reutilizado (Nagarajan, Hu, Song, Zhai, & Wei, 2019).

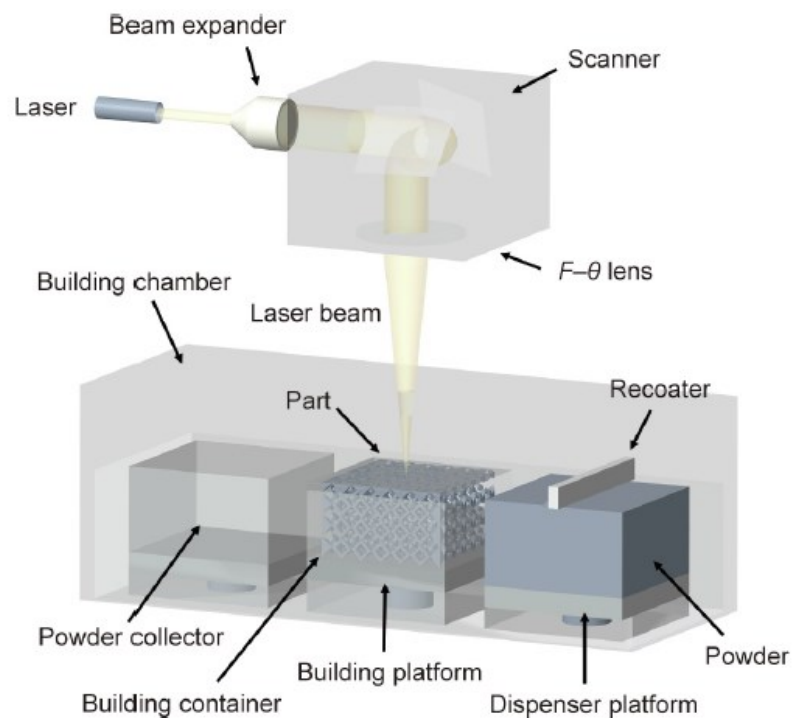


Figura 3: Esquema de uma máquina de PBF (Nagarajan, Hu, Song, Zhai, & Wei, 2019).

De modo a prevenir a oxidação na superfície da peça e os riscos que possam resultar da elevada reatividade dos pós metálicos com o oxigénio atmosférico, o processamento é geralmente realizado numa atmosfera inerte. O tipo de gás de inertização utilizado varia consoante o metal em processamento, em materiais reativos como ligas de titânio e alumínio é utilizado argón, para os restantes pode ser usado azoto (Marques, Souza, & Yadroitsau, 2015).

Existem vários parâmetros no PBF, alguns deles ajustáveis que podem ser classificados em três grupos: variáveis relacionadas ao pó, relacionadas ao LASER e relacionadas às propriedades do pó (Figura 4) A maioria dos parâmetros de processo relacionados ao pó são variantes no ambiente de produção real (Nagarajan, Hu, Song, Zhai, & Wei, 2019).

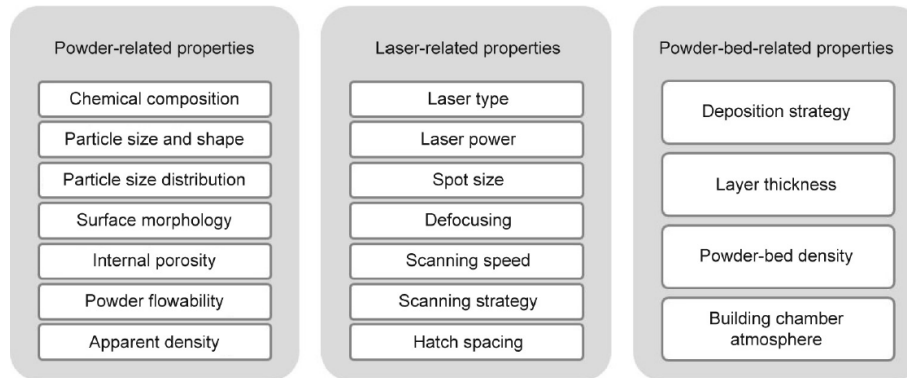


Figura 4: Categorização das propriedades na fabricação por MPBF (Nagarajan, Hu, Song, Zhai, & Wei, 2019)

2.3.3. Propriedades e características

Das sete categorias de processos de fabricação aditiva, é importante salientar que apenas a categoria 5 e 7 usam integralmente metal como matéria-prima. Nas categorias 1, 2, 3 e 4, o metal pode ser usado, mas apenas indiretamente como reforço da matriz polimérica. No âmbito da sustentabilidade é também importante evidenciar que aproximadamente 95% do material (pó) que não é usado pode ser reutilizado para futuras construções, sem que o mesmo necessite de qualquer tipo de processo de reciclagem (Zhang, Dembinski, & Coddet, 2013). Com isto, as principais vantagens do PBF são:

- ▶ A possibilidade de produzir peças com elevado grau de complexidade 100% em metal;
- ▶ Ao ser usado uma ferramenta ótica – LASER – e não uma ferramenta física, sem contacto físico, será a vida útil do próprio LASER a condicionar a disponibilidade do processo.
- ▶ Peças com excelentes propriedades mecânicas e químicas;

- ▶ Processo sustentável pela otimização dos processos produtivos e pelo menor desperdício de matéria-prima.

A principal desvantagem ainda é o custo dos equipamentos e da matéria-prima. Na gama mais baixa destes equipamentos inclui-se, por exemplo, a *Trumpf TruPrint 1000* com um volume de construção de 100 x 100 x 100 mm a um preço aproximado de 200.000€. Mas os valores podem facilmente chegar à ordem dos milhões, dependendo do volume de construção, potência do LASER e quantidade de LASER (All3DP, 2022). O preço do pó metálico varia imenso, dependendo do material.

Ligas de aço com elevados teores de carbono quando aquecidas e arrefecidas rapidamente, como ocorre no processo PBF, sofrem um fenómeno de têmpera conforme as camadas são fabricadas, gerando tensões internas muito elevadas. Neste contexto, procura-se substituir estes materiais por ligas com baixos teores de carbono. Por exemplo, na fabricação de insertos para moldes de injeção é comum utilizar-se os aços AISI 420 e AISI P20, materiais estes que possuem teor de carbono elevado. Nessas condições, para o processamento por PBF, estes aços podem ser substituídos pelos AISI 316L e H13, que possuem teor de carbono menor que 0,03%, e mantêm as principais características e propriedades necessárias para o processamento. Apesar de tudo, e independentemente do material usado, pode ser necessário realizar tratamentos térmicos para reduzir as tensões internas nas peças (Marques, Souza, & Yadroitsau, 2015).

Assim, como principais desvantagens do processo temos:

- ▶ Elevados preços do equipamento e matéria-prima;
- ▶ Rugosidade superficial;
- ▶ Necessidade de tratamentos térmicos para aliviar tensões.

2.3.4. Aplicações

A tecnologia PBF é utilizada com sucesso em vários sectores da indústria. Um desses casos, é na fabricação de insertos para moldes para injeção de plásticos, permitindo a fabricação de zonas moldantes com canais conformáveis (Figura 5). Os ganhos em tempo de ciclo de injeção e, conseqüente, maior cadência produtiva permitem que o investimento feito em peças fabricadas por estes processos seja indiscutivelmente compensatório (Asnafi, 2021).

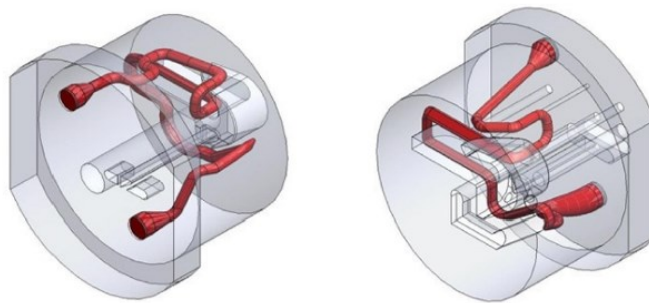


Figura 5: Postiço com canais conformáveis para molde injeção de plásticos (Asnafi, 2021).

Na indústria médica/odontológica, é possível a fabricação de próteses complexas com forma personalizada e com porosidades específicas para favorecer a formação óssea (Figura 6). O uso do design generativo aliado a este processo, permite uma redução de peso significativo, o que na indústria aeroespacial e desporto automóvel de alta competição é um fator crucial. Em vários setores económicos por vezes surge a necessidade de criar peças em metal que satisfaçam necessidades específicas, seja a redução do peso, a dissipação de calor (Figura 7) ou uma geometria complexa e única como acontece na joalheria (Marques, Souza, & Yadroitsau, 2015).

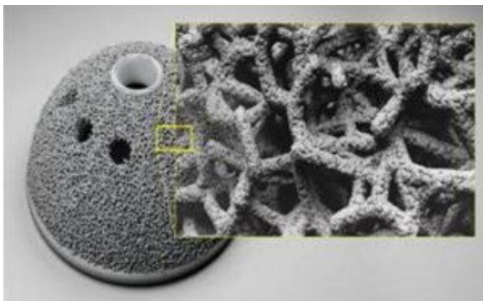


Figura 6: Implante para o quadril (Marques, Souza, & Yadroitsau, 2015).



Figura 7: Pinça de travões do Bugatti Chiron fabricada em SLM para facilitar a dissipação de calor e redução de peso. (SLM Solutions, 2019).

2.4. Produção da matéria-prima

Os métodos de produção da matéria-prima, mais concretamente o pó de aço, são importantes, pois existe uma grande diferença entre produzir lingotes para a fabricação convencional e produzir pó metálico para FA. Estas diferenças também são refletidas no impacto ambiental do processo final, pois o método de produção da matéria-prima é um dos fatores mais relevantes a considerar na análise de ciclo de vida.

2.4.1. Produção de aço

A indústria de produção de aço é de longe a maior consumidora de energia no mundo. Com a relação existente entre o consumo de energia e o impacto ambiental, a produção do aço tem um elevado impacto ambiental. No entanto há outros fatores com forte impacto ambiental na produção, o consumo de água, que apesar de ter vindo a diminuir com a maior eficiência dos processos, ainda é considerável (Figura 8). Outro aspeto relevante é a criação de enormes quantidades de subprodutos e desperdícios (*slag*). Contudo, é importante destacar o facto de o aço ser atualmente o material mais reciclado, com valores próximos de 95% (Conejo, Birat, & Dutta, 2020).

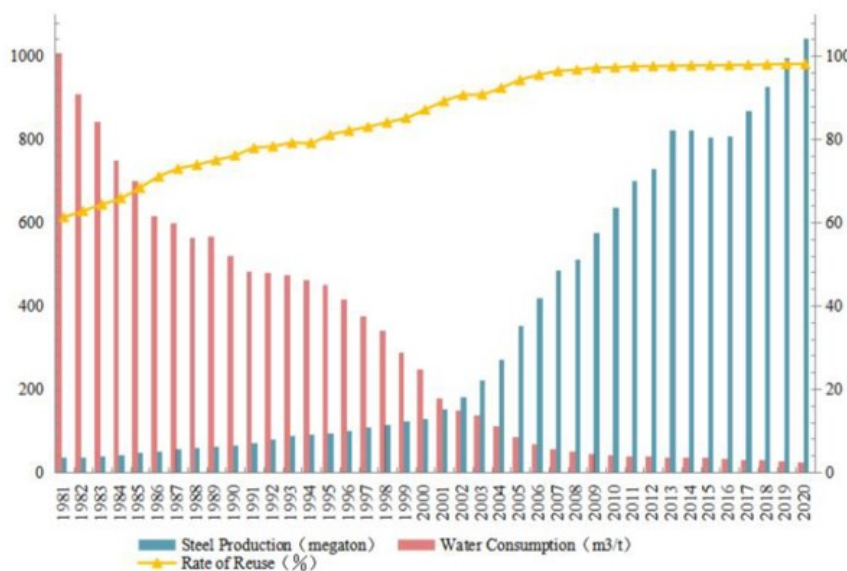


Figura 8: Evolução da produção de aço, consumo de água e reciclagem (Liang, et al., 2023).

Atualmente produção de aço está dividida em dois tipos: a siderurgia integrada do minério de ferro com o processo de *Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace* (BF-BOF) e a siderurgia elétrica a partir de sucata com os processos (Electric Arc Furnace - EAF e Direct Reduced Iron - DRI) (Norgate, Jahanshahi, & Rankin, 2007). Na Figura 9, pode-se observar que o método BF-BOF, é de longe o mais utilizado.

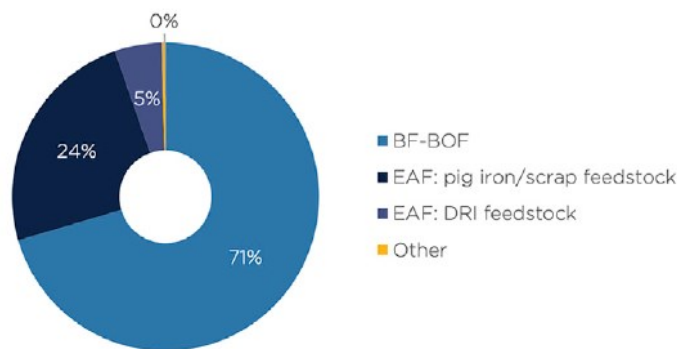


Figura 9: Distribuição dos vários processos de produção (Fan & Friedmann, 2021).

BF-BOF: Este processo depende quase completamente do carvão, emitindo 70% do CO₂ de todo o processo. O ferro quente é então carregado em um forno básico de oxigênio (BOF) para produzir o aço (Figura 10) (Fan & Friedmann, 2021).

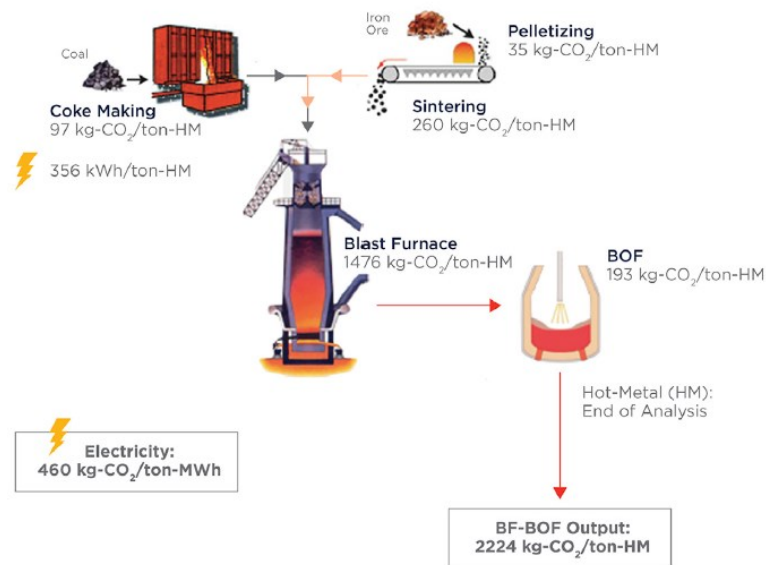


Figura 10: Processo BOF (Fan & Friedmann, 2021).

EAF: Este processo de fabricação usa arco elétrico para aquecer materiais carregados, como ferro-gusa, sucatas de aço e produto de ferro reduzido direto (DRI). Atualmente, o EAF é a abordagem dominante para a reciclagem de aço (Figura 11). A produção de aço EAF opera por lotes em vez de contínua como uma instalação de produção em BF-BOF (Fan & Friedmann, 2021).

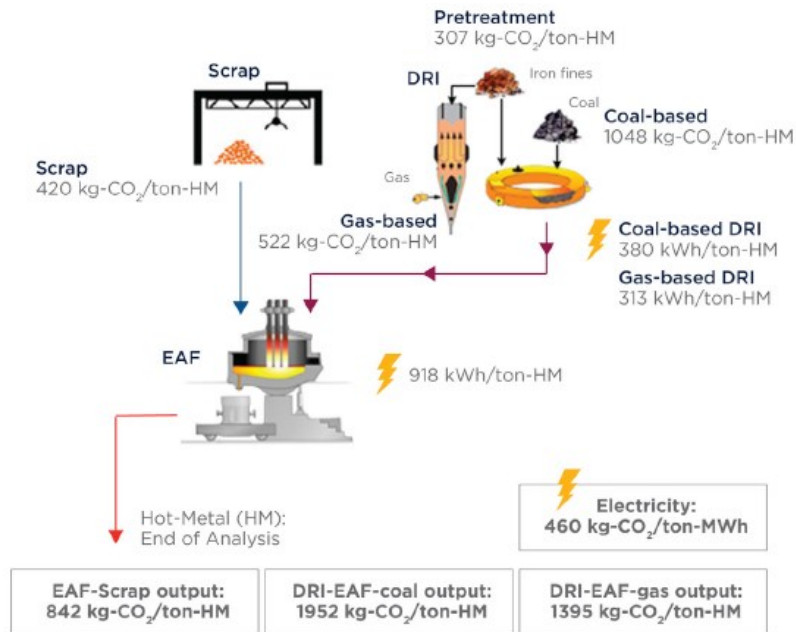


Figura 11: Método de produção EAF e DRI (Fan & Friedmann, 2021).

DRI: Este processo de produção de aço reduz diretamente o minério de ferro no estado sólido com a temperatura de reação abaixo do ponto de fusão do ferro. Embora a produção de DRI seja mais eficiente energeticamente do que a produção de ferro-gusa a partir de BF, é necessário processamento adicional (normalmente EAF) para escoar o ferro-esponja DRI para o mercado (Figura 11) (Fan & Friedmann, 2021).

Atualmente estão a ser feitas vários esforços para reduzir o impacto ambiental da produção de aço. Existem vários pontos de melhoria a curto e longo prazo. A curto prazo pode-se mudar para a utilização de hidrogénio proveniente de fontes menos poluentes, melhorar a eficiência dos processos e equipamentos usados. No entanto estas mudanças, apesar de positivas não têm um impacto significativo. A longo prazo, as mudanças passam por utilizar fontes de energia totalmente limpas e a utilização de hidrogénio verde (Fan & Friedmann, 2021).

2.4.2. Pós metálicos para fabrico aditivo

Todos os metais ou ligas metálicas, teoricamente, podem ser processados por FA. No entanto, a gama de metais comercialmente disponíveis ainda tem alguma limitação, em grande parte devido a algumas propriedades físicas dos materiais, como por exemplo, o ponto de fusão e a capacidade de absorção da radiação laser (Mohsin, 2018).

Os materiais usados no FA podem ser divididos em duas categorias, ferrosos e não ferrosos. Nos metais ferrosos os mais utilizados são o aço inoxidável austenítico (316L) e aço ferramenta (H13 - 1.2344). Nos metais não ferrosos, os mais utilizados são as ligas de titânio, ligas de cobalto-crómio e ligas de alumínio. No caso da joalheria, também são usados materiais nobres como o ouro, a prata, a platina e o paládio (Mohsin, 2018).

Atualmente, a nível industrial, existem quatro formas genéricas de produzir pós metálicos: A redução ao estado sólido, a eletrólise, a precipitação química e a atomização. Para FA, o método geralmente usado é a atomização, pois os outros métodos não são viáveis para esta indústria. No caso da eletrólise e precipitação química, o processo é demasiado oneroso, no processo de redução ao estado sólido, a sua produção consome demasiado tempo e os pós produzidos têm pouca qualidade para o fabrico aditivo (Moghimiana, et al., 2021).

Atomização é o termo utilizado na metalurgia para o processo de fragmentação do líquido em gotículas finas. Todos os métodos de atomização usam uma fonte de alta energia para fundir a matéria-prima numa corrente fundida dentro de um ambiente ajustado para este solidificar de maneira controlada. Dentro da atomização, existem quatro métodos diferentes que são usados para pós metálicos de FA (Figura 12). Os quatro métodos de atomização são: gás, água, plasma e elétrodo rotativo (Moghimiana, et al., 2021).

A atomização de gás é um processo de fabricação tradicional para obtenção de pós quase esféricos, que foi patenteado pela primeira vez em 1872 por Marriott de Huddersfield, que usava vapor como gás de atomização do material fundido (Yang, et al., 2017).

Na primeira etapa deste método, a matéria-prima é fundida. Em segundo lugar, será derramada livremente (por gravidade). A massa fundida é então pulverizada em gotículas usando um jato de gás nobre de alta velocidade, geralmente árgon ou azoto. Também podem ser utilizados ar ou hélio como gás de atomização. A escolha do gás de atomização

depende de seu custo, da sua condutividade térmica e da reatividade com a liga metálica. Como etapa final, as gotículas de metal arrefecem para formar partículas de pó (Figura 12 a). As características do pó atomizado (tamanho e homogeneidade) resultante dependem de vários parâmetros, como o diâmetro e a velocidade da corrente de fusão e as taxas de corte do gás de atomização. Este método permite atomizar uma ampla gama de distribuições de tamanho de pó abaixo de 500 μm (Moghimiana, et al., 2021).

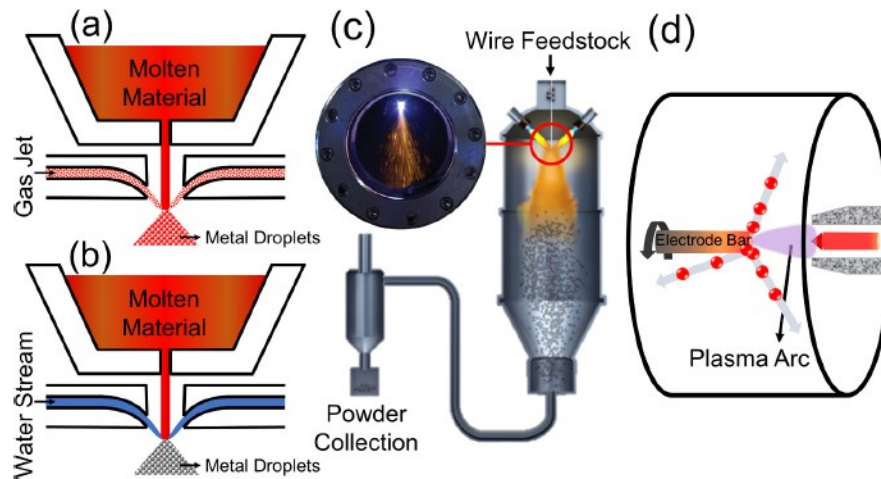


Figura 12: Métodos de atomização (Moghimiana, et al., 2021).

A tecnologia de atomização de água é semelhante ao processo de atomização de gás como mostrado na Figura 12 b. No entanto, usa uma corrente de água de alta pressão como fluido de atomização para produzir as gotículas. A transferência de calor e o momento são muito maiores na atomização de água em comparação com a atomização a gás, onde o jato de atomização tem uma taxa de fluxo de massa e capacidade de calor muito menores. Com isto pode aumentar a irregularidade da forma e a porosidade do pó. A atomização da água beneficia de um custo de produção relativamente baixo e alta taxa de produtividade ($\sim 1 \text{ ton/min}$). É o método mais utilizado para a produção de pós de metais ferrosos (Schade, Murphy, Bernhard, Lawley, & Doherty, 2018). Com materiais reativos há uma limitação para a pureza do pó. As desvantagens deste método incluem baixa esfericidade de pós com alto teor de oxigênio e oxidação da superfície devido à reação com moléculas de água (Moghimiana, et al., 2021).

A atomização de plasma foi desenvolvida em 1996 por Entezarian et al. para produzir pós altamente esféricos de metais reativos com um tamanho médio de partícula de 40 μm (Entezarian, Allaire, Tsantrizos, & Drew, 1996).

Este método foi patenteado pela *Pegasus Refractory Materials e Hydro-Québec* no Canadá em 1998. Este permite uma operação de uma etapa, combinando as etapas de fusão e atomização usando um fio pré-ligado como matéria-prima, conforme mostrado na Figura 12 c. Portanto, o risco de contaminação da cerâmica pela fusão de um metal reativo no recipiente foi eliminado, garantindo uma alta pureza no produto final em pó (Entezarian, Allaire, Tsantrizos, & Drew, 1996). Neste método, o material fundido é superaquecido usando um plasma de argônio extremamente quente (até 11.000° K) produzido por tochas de plasma convergentes. Isso inibe as partículas de metal fundido de solidificar rapidamente em formas irregulares. As gotas fundidas passam tempo suficiente no estado superaquecido, permitindo que adotem uma forma de equilíbrio impulsionada pelas forças de tensão superficial: esferas ideais. Este método tem sido usado com sucesso para metais reativos e não reativos como titânio, níquel, alumínio e cobre, mas também para cerâmicas como carbonetos (Moghimiana, et al., 2021).

O processo de eletrodo rotativo de plasma (PREP) foi desenvolvido pela *Nuclear Metals Inc.* em 1980. Neste processo de atomização centrífuga, mostrado na Figura 12 d, o material de alimentação vem na forma de uma barra de eletrodo que será girada a aproximadamente 15.000 rpm enquanto é derretida por um arco de plasma. As forças centrífugas ejetam o material fundido da barra e as partículas solidificam antes de atingir a parede da câmara. Este método foi inventado como uma resposta ao alto volume de consumo de gás por unidade de peso de pó atomizado e um rendimento geralmente muito baixo de partículas de pó fino pela atomização de gás tradicional (USA Patente Nº 3826598A, 1974). No processo PREP, esse rendimento depende da força centrífuga, portanto, da velocidade de rotação. Tal como acontece com a atomização a plasma, este método também é um processo livre de cerâmica, uma vez que não há contato entre o metal fundido e o recipiente. No entanto, o PREP tem uma amplitude de distribuição do tamanho de partícula mais estreita em relação aos outros métodos (Moghimiana, et al., 2021).

Por último, o consumo da matéria-prima (pó) tem aumentado significativamente nos últimos anos. Segundo a consultora alemã *Ampower*, é esperado um aumento no consumo superior a 30% anualmente até 2026 (Anexo 1). Este aumento no consumo deve ser acompanhado por uma tendência de descida dos preços, pelo efeito de produção em escala massificada (FonMag, 2023).

2.5. Avaliação de ciclo de vida

A avaliação de ciclo de vida é um método usado para quantificar e analisar os potenciais impactos ambientais associados a um sistema de produto, processo ou atividade. Este método considera de forma abrangente a aquisição de material, fabricação, transporte, uso e descarte ou reciclagem do objeto avaliado ao longo de seu ciclo de vida (Alhazmi, Almansour, & Aldhafeeri, 2021).

De modo a assegurar uma uniformidade das avaliações do ciclo de vida, a Organização Internacional de Normalização (ISO) introduziu duas normas complementares: os princípios e a estrutura das avaliações do ciclo de vida estão descritos na ISO 14040; os requisitos em si estão estabelecidos na ISO 14044 (ISO, 2023). A análise de ciclo de vida inclui quatro etapas:

- ▶ Definição do objetivo e âmbito (*Goal and Scope*);
- ▶ Análise de inventário;
- ▶ Avaliação do impacto;
- ▶ Interpretação.

2.5.1. Objetivos e Âmbito

Segundo a norma ISO 14044, os objetivos e âmbitos são a etapa inicial e crucial que ajuda a definir claramente os objetivos da análise de ciclo de vida e os limites do estudo. Isso é importante para garantir que a AICV seja realizada de maneira consistente e que os resultados sejam relevantes e úteis para a tomada de decisões.

O “objetivo” explica as razões que levam a fazer o estudo e especificar as intenções na utilização dos resultados (aplicação) e as decisões que poderão vir a ser tomadas tendo por base os resultados obtidos. É também justificando a contextualização do mesmo e são definidos os agentes envolvidos (quem faz, quem apoiou, quem financiou, etc..). Podem também ser descritas as possibilidades e limitações do estudo, e até justificar se é ou não a melhor ferramenta (ISO, 2023).

O “âmbito” define os limites da análise, ou seja, quais aspectos do ciclo de vida serão incluídos e quais serão excluídos. Isso inclui decisões sobre quais etapas do ciclo de vida serão consideradas (da extração de matérias-primas à disposição final) e quais impactos

ambientais específicos serão avaliados (por exemplo, emissões de gases de efeito estufa, uso de recursos hídricos, etc.). Também pode incluir restrições geográficas, temporais e funcionais (ISO, 2023).

Analisando o objetivo e âmbito do trabalho de DeBoer, et al (2021) é possível identificar os vários pontos definidos pela ISO 14044. O objetivo do estudo está definido quando este diz que a AICV foi conduzida para estudar o consumo de energia, consumo de água e emissões de CO₂. No âmbito estão definidos os limites quando é dividida a parte do ciclo de vida em quatro fases (pré-produção, fabricação, vida útil e reciclagem). Foi também restringido os efeitos externos na AICV, foi excluído o impacto ambiental dos equipamentos de fabricação.

2.5.2. Análise de Inventário

Segundo a norma ISO 14044, o inventário é a fase em que é modelado o sistema do produto, sendo definidos os seguintes parâmetros:

- ▶ As fronteiras do sistema, delimitam o processo em análise, indicando os inputs e outputs que devem ser considerados. Existem quatro tipos de delimitações de fronteira possíveis (Sahoo, Bergman, & Khatri, 2021):
 - *Cradle-to-grave*: Ciclo de vida completo;
 - *Cradle-to-gate*: Considera as fases de aquisição das matérias-primas e produção;
 - *Gate-to-grave*: Considera apenas as fases de distribuição, utilização e fim de vida;
 - *Gate-to-gate*: Considera apenas um processo específico.
- ▶ Os diagramas de fluxo com a conceção dos processos unitários (Figura 14 e Figura 15);
- ▶ Inventário na forma de tabela mostrando todas as entradas e saídas para o ambiente associados à unidade funcional;

2.5.3. Avaliação do impacto

Segundo a norma ISO 14044, esta é a fase em que o conjunto de resultados do Inventário principalmente da tabela de inventário é processada e interpretada em termos de impactos ambientais e sociais. Com isto é definida a seguinte lista de categorias: eutroficação, alteração climática, acidificação, toxicidade humana, ecotoxicidade (marinha, águas doces, terrestre), entre outros.

É feita uma seleção dos modelos para relacionar as intervenções ambientais para cada indicador da categoria das categorias de impacto selecionadas: *CML baseline 2*, *CML 2001*, *Eco indicator*, *Cumulative Energy Demand*, etc. Existem 2 metodologias distintas:

- ▶ Orientada para temas ou categorias ambientais – mid points
- ▶ Orientada para danos ambientais – end points.
 - Saúde pública (aquecimento global, diminuição de camada de ozono, efeitos cancerígenos, efeitos respiratórios, radiações ionizantes);
 - Ecossistemas (ecotoxicidade, acidificação, eutrofização,
 - Recursos (terreno agrícola, florestal, minérios, minerais

2.5.4. Interpretação

Segundo a norma ISO 14044 é a fase em que os resultados da análise e de todas as escolhas e pressupostos feitos durante o curso da análise são avaliadas em termos de robustez e de solidez, e em que as conclusões gerais são elaboradas. Os principais elementos da fase de Interpretação é uma avaliação de resultados (em termos de consistência e completude), uma análise dos resultados (por exemplo, em termos de robustez), e a formulação de conclusões e recomendações do estudo.

É constituída pelos seguintes passos:

- ▶ Identificação das maiores cargas e impactes;
- ▶ Identificação de pontos chave no ciclo de vida;
- ▶ Análise de sensibilidade, consistência e integridade;
- ▶ Formulação de conclusões e recomendações.

2.6. Comparação do impacto entre FC, FA e FAH

Atualmente o FA ainda é o processo mais adequado para a produção de pequenos lotes (Liu, Islam, Era, & Grandhi, 2023). Com o aumento do volume de produção e do nível de complexidade das peças, o custo de produção e o consumo de energia por unidade de peça permanecem relativamente constantes. Na fabricação tradicional, onde há a necessidade de ferramentas e moldes, o custo e o consumo de energia aumentam com o nível de complexidade da peça, mas diminuem com o aumento do volume de produção (Liu, Islam, Era, & Grandhi, 2023).

Existem vários e diferentes processos de fabrico, tanto aditivos como convencionais, desse modo, é complexo fazer uma comparação direta entre o FA e FC. Nessas situações é necessário definir que a peça a fabricar seja igual, seja constituída pelo mesmo material, a recolha dos mesmos parâmetros de produção, entre outros. Apesar das dificuldades, têm sido feitas várias investigações e publicações sobre este tópico na comunidade científica. No trabalho feito por Deboer et al. (2021), foi feita uma comparação entre o impacto ambiental entre vários métodos convencionais e de fabrico aditivo. No fabrico convencional foi estudado a CNC e a fundição, no fabrico aditivo foi o Binder Jetting (BJ), *Bound Powder Extrusion* (BPE) e Powder Bed Fusion (PBF). Os parâmetros avaliados foram o consumo de água, consumo de energia e emissões de CO₂. Como se pode ver na Figura 13, o consumo de água é o valor onde a diferença entre CNC e o FA é mais assinalável (devido à refrigeração na maquinação). No consumo de energia e emissões de CO₂ os valores entre o CNC e PBF estão mais próximos, mas ainda assim o FA tem sempre valores inferiores (DeBoer, Nguyen, Diba, & Hosseini, 2021).

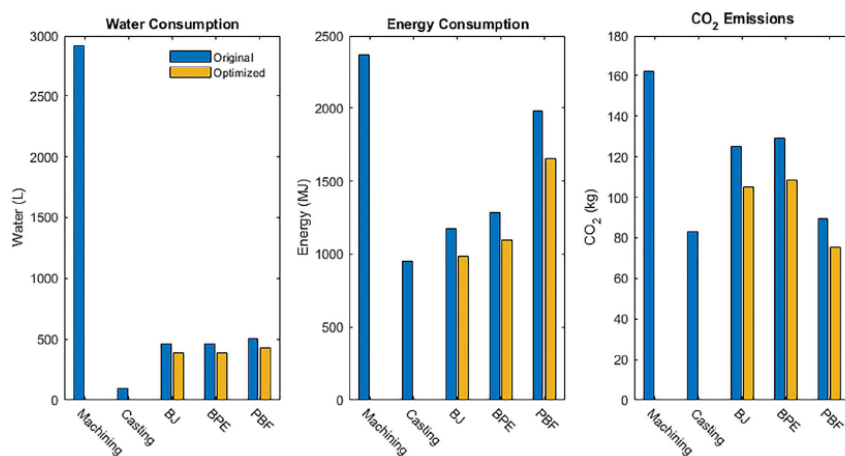


Figura 13: Comparação do impacto ambiental entre CNC, Fundição, BJ, BPE e PBF (DeBoer, Nguyen, Diba, & Hosseini, 2021).

No caso mais específico do fabrico aditivo de metal, Simon Ford et al. (2016) investigou os benefícios sustentáveis do fabrico aditivo sobre o fabrico tradicional a partir de quatro aspetos, redesenho do processo, entrada de material, componentes feitos sob encomenda e fabricação do produto (Ford & Despeisse, 2016). O desempenho ambiental do FA de metal varia caso a caso. Foi provado que o desempenho ambiental do FA de metal está diretamente relacionado ao tamanho da peça e ao volume de remoção de material no pós-processamento. A ACV e o consumo específico de energia (CEE) são os fatores mais usados para determinar a avaliação de sustentabilidade do FA de metal (Paris, Mokhtarian, Coatanéa, Museau, & Ituarte, 2016).

No caso do fabrico aditivo híbrido (FAH) Liu et al. (2012) comparou a quantidade de energia necessária nos processos FAH para a fabricação de suportes de mancal. Eles descobriram que a fase de fabricação no processo FAH consumia a maior parte da energia, no entanto, a produção de material no processo CNC representa a maior proporção do consumo de energia (Liu, et al., 2021).

No estudo feito por Liu, Islam, Era, & Grandhi, (2023) foram usados métodos quantitativos na avaliação de sustentabilidade do processo de deposição direcionada de energia (DED), incluindo ACV, avaliação de impacto/risco ambiental, análise de decisão multicritério, gestão de risco, etc. Os fluxos de material, energia e resíduos são aparentemente diferentes dos da fabricação tradicional, o que traz desafios para sua avaliação de sustentabilidade ambiental de acordo com a Figura 14 e com a Figura 15 (Liu, Islam, Era, & Grandhi, 2023).

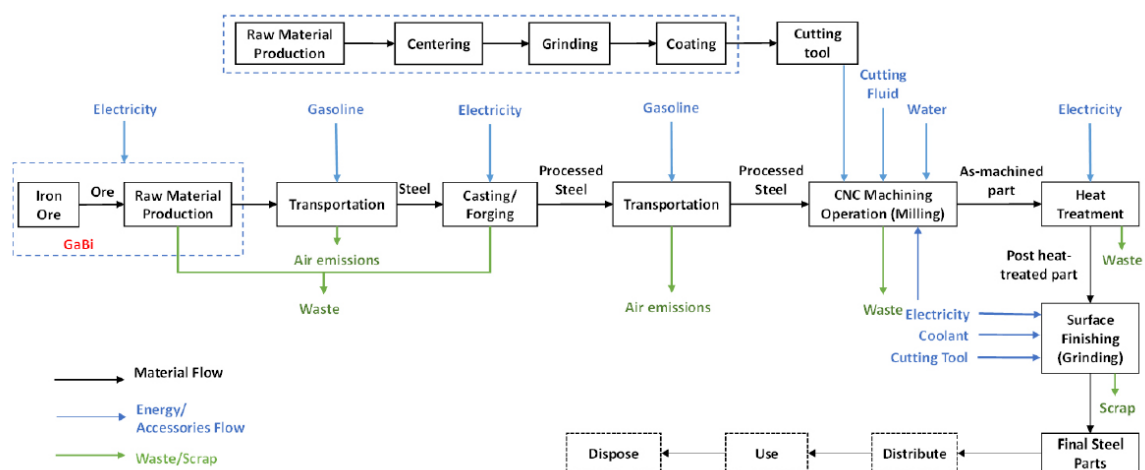


Figura 14: Diagrama de fluxo de processos de AICV da maquinação CNC (Liu, Islam, Era, & Grandhi, 2023).

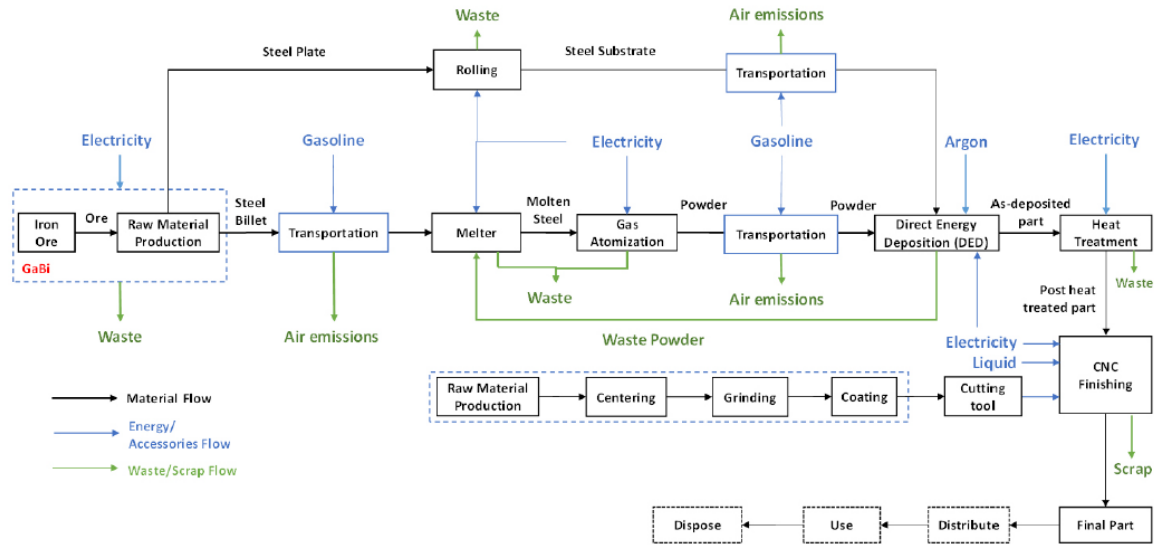


Figura 15: Diagrama de fluxo de processos de AICV por fabricação híbrida (Liu, Islam, Era, & Grandhi, 2023).

Os principais desafios são: traçar um limite completo da avaliação, a recolha de dados de dados e a avaliação científica das emissões ambientais. Além disso, peças com materiais, tamanhos, designs e complexidade diferentes afetarão o desempenho geral da sustentabilidade (Liu, Islam, Era, & Grandhi, 2023).

3. Metodologia

A metodologia utilizada para este estudo tem a seguinte ordem de trabalhos:

1. Problema a investigar: Comparar o impacto ambiental entre FC e FA.

Objetivos e âmbito

2. Apresentação dos casos de estudo

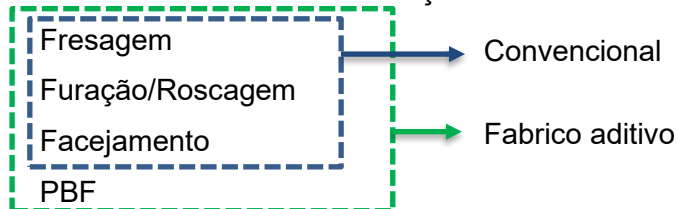
Caso de estudo 1

Caso de estudo 2

3. Analisar peças

Material, geometria, volume, etc..

4. Analisar características de fabricação necessárias



5. Simulação de produção

Fabrico Convencional (CAM)

Fabrico em PBF (Simulação PBF + CAM CNC)

6. Produtos necessários e resultantes para a produção das peças (entradas e saídas)

Peça final
 Bloco de aço e apara (kg)
 Massa de pó necessária e perdida (kg)
 Volume de fluído de refrigeração (L)
 Energia elétrica consumida (kW)
 Azoto consumido (kg)
 Ar comprimido (kg)

7. Modelação da AICV dos CE's

Inventário do sistema

Modelação do sistema no GaBi.

8. Análise e comparação dos resultados (Capítulo 4)

Análise, interpretação e comparação dos resultados dos CE's

3.1. Objetivos e âmbito

A avaliação de impacto de ciclo de vida, está enquadrada na sustentabilidade dos processos industriais, de forma a saber qual o impacto ambiental para produzir uma peça. Existe atualmente uma grande euforia nos processos de fabrico aditivo metálico, mérito de todas as suas vantagens já validadas pela indústria, também nos moldes de injeção para plástico. A finalidade desta AICV é comparar o impacto ambiental entre CNC e PBF, e confirmar se efetivamente o FA é mais sustentável que o FC.

Os agentes envolvidos neste estudo são o autor deste projeto, a equipa de orientadores e empresas e entidades interessadas.

Por limitação de recursos e, principalmente, pela escolha em limitar os fatores externos necessários para realizar este estudo, optou-se por não fabricar nenhuma peça, mas sim, simular a sua produção. Esta opção pode limitar a exatidão de alguns valores simulados comparativamente com a realidade, nomeadamente no consumo de energia elétrica. No entanto, foram escolhidos dois casos de estudo com peças reais.

O alvo deste estudo, é a comunidade académica no setor do fabrico aditivo metálico, com especial atenção para o setor dos moldes de injeção. Os dados resultantes desta investigação serão apresentados no capítulo 4.

Como este AICV analisa duas peças de moldes fabricados em Portugal, foram utilizados dados e valores de referência na zona da União Europeia, para a modelação do sistema no software de AICV, recorrendo à base de dados Ecoinvent 3.9.1

3.2. Casos de estudo

Este estudo comparativo de impacto ambiental foi feito com base em dois casos de estudo (CE1 e CE2). As peças de ambos os casos de estudo, são provenientes de dois moldes para componentes da indústria automóvel, projetados na Sbmolde.

A SB Molde Lda. é uma empresa com 25 anos de experiência na área de consultoria, projeto e comercialização de software (CAD, CAM e CAE) para o setor dos moldes para injeção e ferramentas para estampagem. No entanto, por motivos de confidencialidade e proteção de propriedade industrial, não serão expostas as empresas responsáveis pela produção das peças.

Originalmente, estas peças foram projetadas e fabricadas de forma convencional nos respetivos moldes. Assim, de modo a haver uma comparação fidedigna entre os dois métodos produtivos, foi feita uma cópia e alteração das peças originais. Nessas duas cópias, as peças de fabrico aditivo foram adaptadas, mais concretamente a modelação dos circuitos de refrigeração (canais conformáveis). Esta alteração não altera a sua funcionalidade, é apenas uma forma de as aproximar o mais possível da realidade, como se as peças tivessem sido efetivamente produzidas por PBF.

3.2.1. Caso de estudo 1

A peça é um postigo moldante com refrigeração (Figura 16). A peça tem uma geometria semicircular, com uma base de apoio e fixação com 14 mm de espessura. A zona moldante é composta por quatro protrusões, radialmente equidistantes, mas com espessura variável. Para mais detalhes, consultar o Anexo 2.

Características da peça:

- ▶ Dimensões: 57.37 x 101.66 x 53.25 mm;
- ▶ Material: 1.2344 (H13);
- ▶ Volume / Peso:
 - Convencional: 70.048 mm³ / 546 g;
 - Fabrico aditivo com canais conformáveis: 69.448 mm³ / 542 g;
- ▶ 2 furos mandrilados H7 Ø5;
- ▶ 1 furo roscado M5;
- ▶ Os canais de refrigeração – Ø6;
- ▶ Rosca dos tampões dos circuitos de refrigeração – M7x1;
- ▶ 2 tampões M7x1.

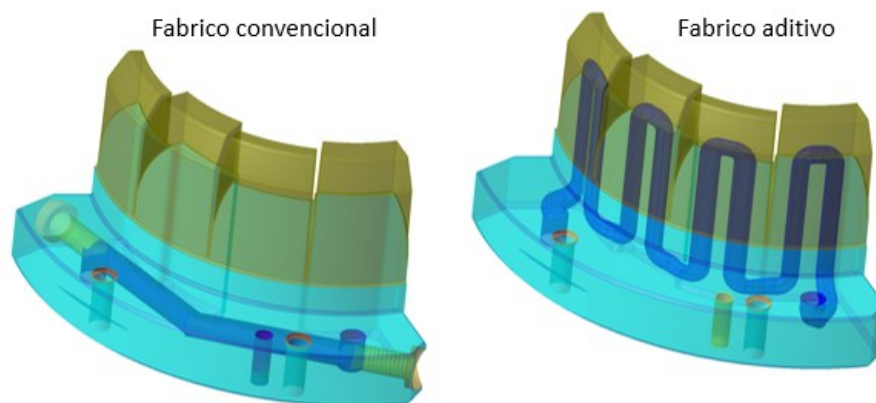


Figura 16: Peça do caso de estudo 1.

3.2.2. Caso de estudo 2

A peça é a zona moldante de um balancé com refrigeração (Figura 17). A peça tem uma geometria trapezoidal, com uma base de fixação de uma haste. A zona moldante conta com umas pequenas ranhuras (razão pela qual existe um balancé nesta zona) que implicam logo à partida que esta peça tem de ser fabricada numa máquina CNC de 5 eixos. Esta peça devido às suas características de funcionamento, teria um tratamento térmico de nitruração para diminuir o atrito e consequentemente aumentar a sua durabilidade. No entanto, este tratamento térmico não foi contabilizado na AICV, devido à dificuldade em encontrar bases de dados para este processo no AICV. E sendo este um processo comum para ambos os tipos de fabricação, esta etapa teria o mesmo valor relativo no impacto em ambos os métodos. Para mais detalhes, consultar o Anexo 3.

Características da peça:

- ▶ Material: 1.2344 (H13);
- ▶ Dimensões: 62.48 x 65.85 x 115.33 mm;
- ▶ Volume / Peso:
 - Convencional: 171.686 mm³ / 1339 g;
 - Fabrico aditivo com canais conformáveis: 170.457 mm³ / 1330 g;
- ▶ Tratamento térmico de nitruração.
- ▶ Furo mandrilado para haste respigada Ø20 e Ø24;
- ▶ 2 furos roscados M4 para fixação da chaveta da haste;
- ▶ Os canais de refrigeração – Ø6 e Ø8;
- ▶ Rosca dos tampões dos circuitos de refrigeração – M7x1
- ▶ 5 tampões M7x1.

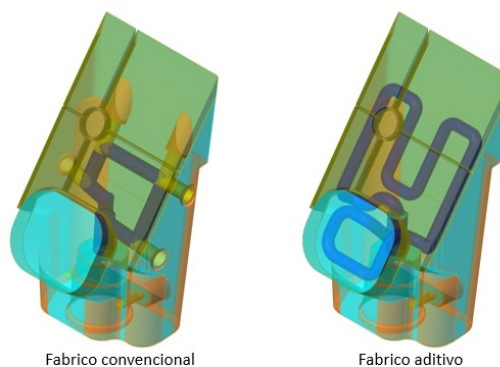


Figura 17: Peça do caso de estudo 2.

3.3. Simulação em fabrico convencional

Para a avaliação de impacto de ciclo de vida, são necessários vários dados para o inventário, referentes ao seguinte fluxo de trabalho (Figura 18):

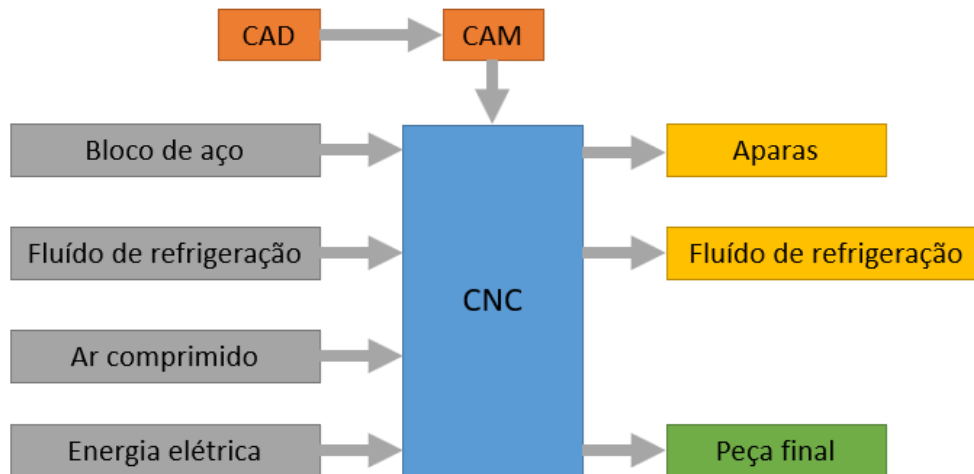


Figura 18: Fluxo de trabalho para produção em CNC.

Deste fluxo de trabalho são definidas as entradas e saídas do sistema modelado da AICV. Assim, para a construção do inventário é necessária a seguinte informação:

- ▶ Volume do bloco de aço inicial;
- ▶ Quantidade de material removido (apara);
- ▶ Tempos de produção, programação, preparação, entre outros (são necessários para calcular o consumo de energia e de fluido de refrigeração);
- ▶ Quantidade de fluido de refrigeração usado;
- ▶ Quantidade de ar comprimido usado;
- ▶ Quantidade de energia consumida.

3.3.1. Quantidade de material

O bloco de construção inicial tem uma sobre espessura geral mínima de 1 mm, com a exceção da altura (z), a que foi dado mais 10 mm de modo a haver uma base suficiente de aperto para facilitar as maquinações no segundo plano (Figura 19).

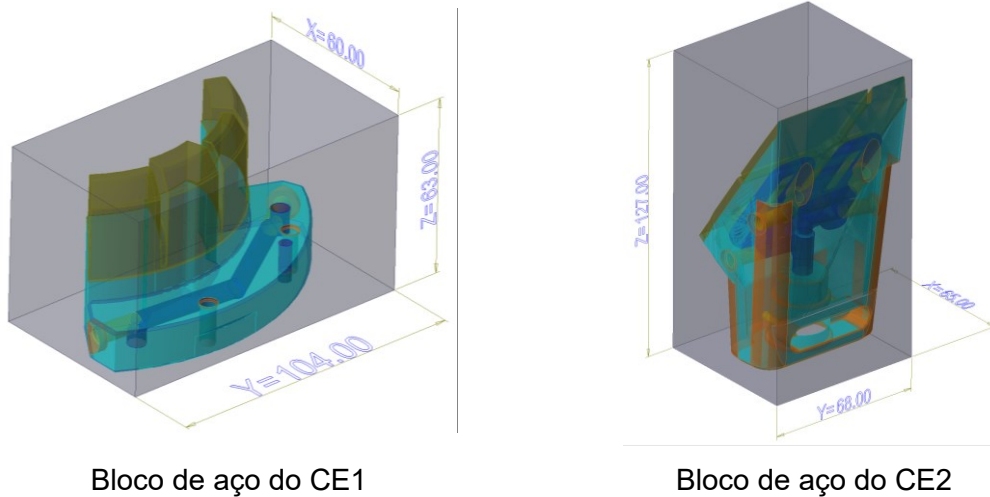


Figura 19: Blocos de aço das peças dos casos de estudo.

Com isto obtemos um bloco com as dimensões de 60.00 x 104.00 x 63.00 mm para o CE1 e um bloco de 65.00 x 68.00 x 127.00 para o CE2.

3.3.2. Quantidade de apara

A quantidade de apara (mm^3) é determinada pela subtração do volume da peça final ao bloco de aço inicial (equação 1):

$$V_{\text{apara}} = V_{\text{bloco}} - V_{\text{peça}} = 393.120 - 70.048 = 323.072 \text{ mm}^3 \quad (1)$$

Sabendo que a massa volúmica do aço usado (H13) é de $7,8 \text{ kg/dm}^3$, conseguimos transpor o volume (mm^3) em massa (kg) (equação 2):

$$\text{Massa}_{\text{bloco}} = V_{\text{bloco}} \times \text{Massa volúmica (H13)} = \frac{393.120 \times 7,8}{1000} = 3,07 \text{ kg} \quad (2)$$

$$Massa_{apara} = \frac{323.072 \times 7,8}{1000} = 2,52 \text{ kg}$$

Com isto podemos ainda obter a relação volúmica entre o bloco inicial e a peça, e entre o bloco inicial e a apara (equação 3).

$$\%_{Apara} = \frac{Apara}{Bloco} \times 100 = \frac{2520}{3066} \times 100 = 82\% \quad \%_{Peça} = 100 - \%_{Apara} \quad (3)$$

Em suma, obtemos os dados na seguinte Tabela 1:

Tabela 1: Dimensões, volume do bloco de aço inicial e quantidade de apara.

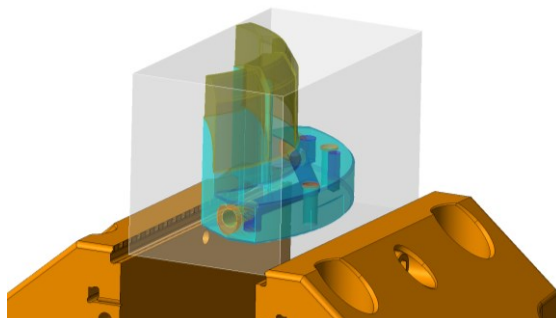
Atributos	Peça CE1	Peça CE2
Dimensões da peça X,Y,Z (mm)	57,37 x 101,66 x 53,25	62,48 x 65,85 x 115,33
Dimensões do bloco X,Y,Z (mm)	60,00 x 104,00 x 63,00	65,00 x 68,00 x 127,00
Volume do bloco inicial (mm ³)	393,120	561,340
Massa do bloco inicial (kg)	3,07	4,38
Volume da peça final (mm ³)	70,048 (18%)	171,686 (31%)
Massa da peça final (kg)	0,546	1,34
Volume de apara (mm ³)	323.072	389.654
Massa de apara (kg)	2,52 (82%)	3,04 (69%)

3.3.3. Simulação CAM

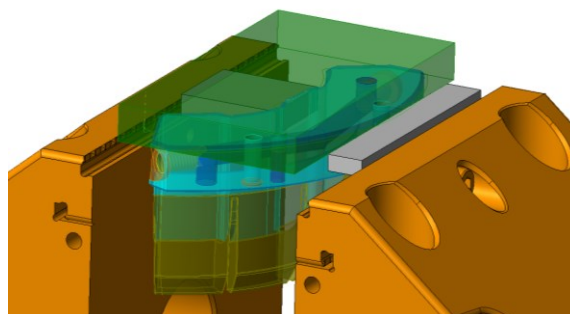
Para obter os restantes dados, principalmente o tempo de fabricação, foi necessário fazer uma programação CAM das peças de ambos os casos de estudo. A simulação da fabricação convencional (programação CAM), foi realizada na empresa SB Molde, Lda., realizada com o software VISI. Esta programação demorou aproximadamente 3 h no CE1 e 4 h no CE2. Estes tempos de programação também incluem o tempo de cálculo do software e o pós-processamento. Para ver os resultados a simulação CAM, ver Anexos 4 e 5.

Ambas as peças necessitam de operações em todas as faces, logo foi necessário dividir as operações CAM em duas posições de trabalho diferentes (Figura 20).

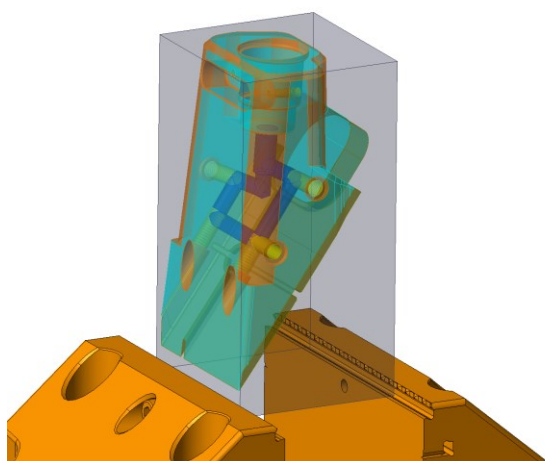
Peça CE1 na posição de trabalho 1



Peça CE1 na posição de trabalho 2



Peça CE2 na posição de trabalho 1



Peça CE2 na posição de trabalho 2

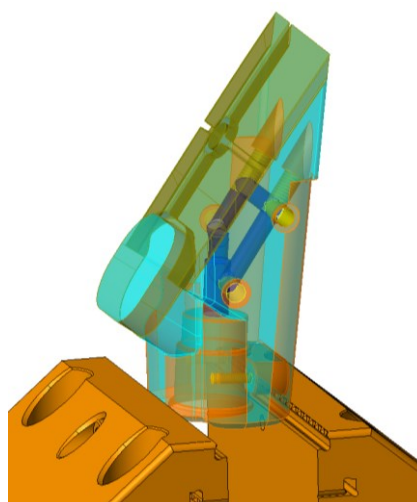


Figura 20: Posições de trabalho para fabricação CNC das peças.

Para mais informações sobre a sequência de operações feitas nas peças do caso de estudo, consultar os Anexos 4 e 5.

Pela geometria da peça, e as conseqüentes operações necessárias, a máquina CNC para fabricar esta peça tem de ter as seguintes características:

- ▶ Um volume de trabalho mínimo de 150 x 150 x 150 mm;
- ▶ Múltiplos eixos de trabalho, pode ser 3+2 (5 eixos não contínuos) ou 5 eixos contínuos.

3.3.4. Tempo de fabricação

Segundo os dados gerados pela simulação do CAM, a peça do CE1 tem um tempo de fabricação de 1 h 20 min 49 s. Deste tempo, 1 h 15 min 5 s correspondem à maquinação realizada na posição 1, e 5 min 44 s na posição 2. Esta diferença deve-se ao facto de ser na posição 1 que ocorrem quase todas as operações. Além disso, na posição 2 a peça não requer trabalhos minuciosos que demoram muito tempo (Figura 20 e Anexo 4).

Em relação à peça do CE2, foi calculado que o tempo de fabricação é de 4 h 1 min 2 s. Deste tempo, 3 h 21 min 41 s correspondem à maquinação realizada na posição 1, e 39 min 20 s na posição 2 (Anexo 5).

3.3.5. Tempo de preparação e aquecimento

Em geral, as máquinas CNC possuem um tempo de aquecimento que pode variar de alguns minutos a horas. Durante esse período, a máquina é ligada e os componentes internos, como o motor do eixo, o sistema hidráulico e os sistemas eletrónicos, são aquecidos gradualmente até atingir a temperatura de operação ideal. Durante este tempo o bloco de aço é colocado na máquina e é feita a preparação da peça. Como a peça já tem modeladas faces de desempenho, o que facilita o trabalho, foi estimado que o tempo de preparação e desempenho desta peça seja estimado aproximadamente em 20 min.

3.3.6. Troca de ferramentas e plano de trabalho

A geometria das peças implica a utilização de várias ferramentas de corte diferentes, logo, é necessário contabilizar o tempo do processo de troca de ferramentas. Neste caso, o método é totalmente automático, demorando apenas aproximadamente 3 segundos (Li, Xiao, Tang, & Li, 2016).

Como a peça tem de ser maquinada em 2 planos de trabalho diferentes, é necessário contabilizar o tempo desta troca. Como a peça já tem modeladas faces de desempenho, o que facilita o trabalho, foi estimado que o tempo de troca entre planos de trabalho seja aproximadamente 20 min (contabilizado como tempo em *stand by*).

3.3.7. Volume de fluido de refrigeração

O volume de fluido de refrigeração (VFR) utilizado nestes casos de estudo é um dado com muitas variáveis diversas complexas de calcular com exatidão. O fluido é reutilizado ciclicamente, ou seja, o fluido é projetado, colhido, filtrado, armazenado e arrefecido e volta a ser utilizado novamente. O importante é determinar a vida útil do fluido e conseguir transpor essa vida útil para o tempo de fabricação dos casos de estudo, e com isso estimar uma quantidade de fluido utilizada/perdida. No entanto a vida útil depende de vários fatores, como o material maquinado, a limpeza e manutenção da máquina, entre outros.

Como fluido de referência escolheu-se usar o HAKUFLUID 150® da *Kluthe*. Este fluido sintético à base de água (95%) e 5% óleo sintético (Anexo 8). Foi possível apurar junto do departamento técnico da *Kluthe Ibérica*, que este fluido tem uma vida útil de 1 ano. A máquina selecionada, a *Grob G350* de 2020 tem um sistema de tratamento com a capacidade de 100 L. Com esta informação, podemos estimar que 100 L têm a duração de 1 ano em condições de funcionamento normais. Atribuindo uma carga de trabalho média de 5000 h/ano (média na indústria dos moldes), consegue-se estimar a quantidade de fluido dispendido na produção das peças dos CE's com a seguinte equação 4:

$$VFR_{CE1} = \frac{\text{Litros/Ano}}{\text{Utilização/Ano}} \times T_{\text{Fabricação}} = \frac{100L}{5.000h} \times 1,3 h = 0,03 L \quad (4)$$

$$VFR_{CE2} = \frac{100L}{5.000h} \times 4 h = 0,08 L$$

3.3.8. Consumo de ar comprimido

O consumo do ar comprimido na produção em CNC está relacionado com o acoplamento das ferramentas de corte e com a refrigeração dos vários motores elétricos da máquina. Segundo os dados da produção, a máquina G350 da Grob consome entre 180 L/min a 250 L/min, dependendo das velocidades de corte. Como as velocidades de corte usadas são relativamente baixas, estimou-se o valor médio de 200 L/min (0,2 m³/min).

Com este consumo unitário, calculamos o seguinte consumo presente na Tabela 2:

Tabela 2: Consumo de ar comprimido na produção convencional.

	CE1	CE2
Tempo de produção	1 h 20 min 49 s	4 h 1 min 2 s
Tempo de Aquecimento e <i>stand by</i>	20+20	20+20
Tempo total da máquina ligada	2 h 1 min 34 s	4 h 41 min 44 s
Consumo de ar comprimido (m ³)	24,20	56,20

3.3.9. Consumo de energia elétrica

O consumo de energia depende de vários parâmetros: eficiência da máquina, o material, o tipo de operação, a estratégia utilizada, entre outros. Segundo Zhao et al. (2019), as máquinas CNC têm uma eficiência aproximada de 30% em funcionamento, e apenas 15% do consumo energético da máquina é proveniente do processo de maquinação. Infelizmente, de forma a obter um valor rigoroso, este teria de ser medido fisicamente durante a produção das peças em estudo.

No entanto, de forma a ultrapassar esta limitação com o máximo de realismo possível, procedeu-se da seguinte forma: dividiram-se as operações de maquinação em quatro tipos, consoante o tipo de operação, desbaste, acabamento planar, acabamento de contornos e furação. Com os dados do CAM (Anexos 4 e 5), foi feito o somatório do tempo em cada tipo de operação, obtendo-se a seguinte Tabela 3.

Tabela 3: Somatório do tempo de trabalho em cada tipo de operação.

Operação	CE1	CE2
Aquecimento	20 min	20 min
<i>Stand by</i>	20 min	20 min
Troca de ferramentas	3x15 = 45 s	3x14 = 42 s
Desbaste	7min 38s	57min 15 s
Acabamento planar	75 s	14 s
Acabamento de contornos	6 9min 10 s	177 min 33 s
Furação	150 s	348 s

Por último, foi feita a leitura do consumo de energia por minuto a efetuar o mesmo tipo de operações em condições e estratégias semelhantes. A máquina escolhida (*Grob G350*) obedece às especificações necessárias descritas na simulação de CAM. O Anexo 9 pode ser consultado para verificar os dados relacionados com o consumo elétrico desta máquina. A máquina tem 5 eixos de trabalho e tem um volume de trabalho de 600 x 855 x 750. Deste modo, é possível obter os consumos de energia aproximados, apresentados na Tabela 4:

Tabela 4: Somatório do consumo de energia em cada tipo de operações.

Operação	Consumo unitário (kWh)	CE1 (kWh)	CE2 (kWh)
Aquecimento	5,30	1,77	1,77
Stand by	4,10	1,37	1,37
Troca de ferramentas	4,10	0,05	0,05
Desbaste	19,30	2,46	18,42
Acabamento planar	16,20	0,34	0,06
Acabamento de contornos	16,20	18,68	47,94
Furação	19,50	0,81	1,89
Total	N/A	25,46	71,48

Apesar de ser quase insignificante no global do processo, também é importante determinar o consumo energético da operação de programação CAM. Neste caso já há dados mais concretos do consumo:

- ▶ Consumo elétrico mensal médio na SB Molde, Lda. (9 funcionários) = 500 kWh
- ▶ Horas de trabalho mensais = 168 h (21x 8h)
- ▶ Tempo utilizado para CAM = 3 h (CE1) 4 h (CE2);

Com isto resulta a seguinte equação 5:

$$C. Prog. CAM = \frac{\text{Consumo médio mensal}}{\text{Nº Funcionários} \times \text{Horas mensais}} \times T_{CAM} = \frac{500}{9 \times 168} \times 3 = 1 \text{ kWh} \quad (5)$$

Em conclusão, obtém-se os consumos apresentados na seguinte Tabela 5:

Tabela 5: Contabilização do consumo energético para fabricação em CNC.

Consumos (kWh)	CE1	CE2
Programação CAM	1,00	1,30
Fabricação CNC	25,46	71,48
Total	26,46	72,78

3.3.10. Resumo dos dados recolhidos

Em suma, os dados recolhidos relativos à produção em convencional das peças dos dois casos de estudo estão apresentados na seguinte Tabela 6:

Tabela 6: Dados recolhidos no processo CNC

Designação	Unidades	Peça CE1	Peça CE2
Massa do bloco inicial	kg	3,07	4,38
Massa da peça final	kg	0,55	1,34
Quantidade de apara	kg	2,52	3,04
Volume de lubrificante de corte	L	0,03	0,08
Tempo de fabricação	h	1 h 20 min 49 s	4 h 1 min 2 s
Tempo de programação CAM	h	3 h	4h
Tempo de preparação e aquecimento	min	20 min	20 min
Tempo de troca de plano de trabalho	min	20 min	20 min
Tempo de troca de ferramenta	s	3x15 = 45 s	3x14 = 42 s
Consumo de ar comprimido	m ³	24,20	56,20
Consumo de energia	kWh	26,46	72,78
Tempo de produção total	h	5 h 1 min 34 s	8 h 41 min 44 s

3.4. Simulação de fabrico em PBF+CNC

O fabrico das peças dos casos de estudo em PBF contempla duas etapas: o fabrico aditivo e maquinação CNC para o acabamento final. Assim, o fabrico em PBF + CNC tem o seguinte fluxo de trabalho (Figura 21):

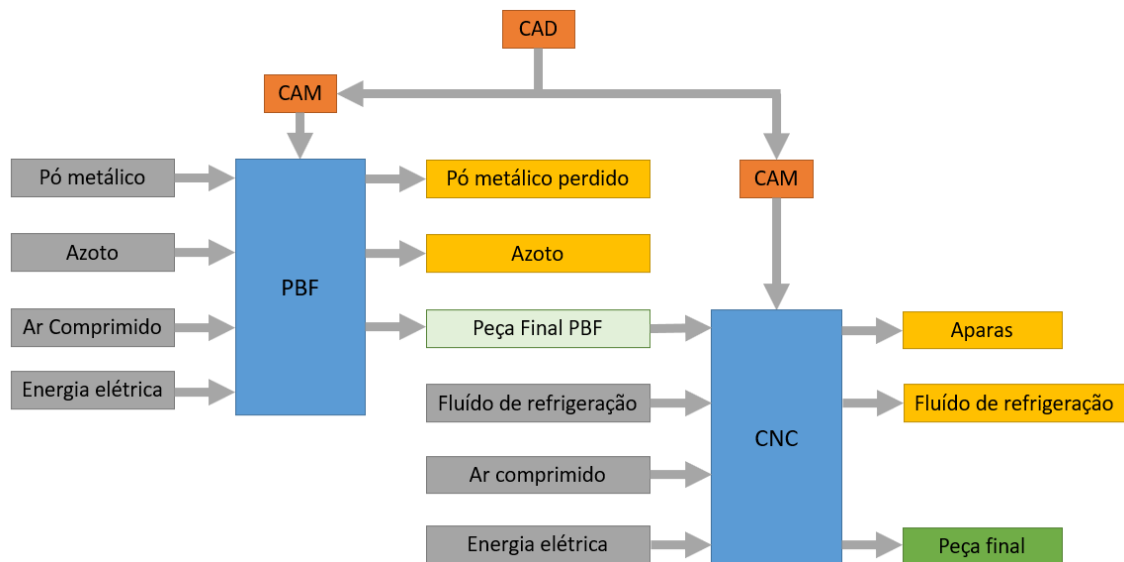


Figura 21: Fluxo de trabalho para produção em PBF.

Deste fluxo de trabalho são definidas as entradas e saídas do sistema modelado da AICV. Assim, para a construção do inventário relativamente ao fabrico por PBF necessitamos da seguinte informação:

- ▶ Quantidade de pó usado e desperdiçado;
- ▶ Tempo de fabricação, preparação, limpeza, etc...
- ▶ Consumo de energia;
- ▶ Consumo de azoto;
- ▶ Consumo de ar comprimido.

Relativamente ao acabamento final em CNC, são necessários os seguintes dados:

- ▶ Quantidade de material removido (apara);
- ▶ Tempos de produção, programação, preparação, etc...
- ▶ Quantidade de fluido de refrigeração usado;
- ▶ Consumo de ar comprimido;
- ▶ Quantidade de energia consumida.

3.4.1. Simulação de produção PBF

A simulação da produção por fabrico aditivo, foi realizada no Centimfe. O equipamento de PBF utilizado foi a TruPrint3000 (Trumpf SE+Co. KG, Ditzingen, Alemanha). Esta máquina universal de formato médio conta com um LASER de 700 Watts e uma câmara de construção de 300 mm de diâmetro com 400 mm de altura. É utilizado azoto para a inertização do processo.

Para o funcionamento desta máquina é fundamental haver ligação a uma rede industrial normal de ar comprimido (6 a 10 bar). O ar comprimido é usado na refrigeração do LASER, no processo de inertizarão da câmara e também para limpeza das peças.

As peças foram simuladas em simultâneo, na configuração apresentada na Figura 22. A peça do CE1 não necessita de suportes, no entanto a peça do CE2 precisa. A altura máxima de construção é 66 mm.

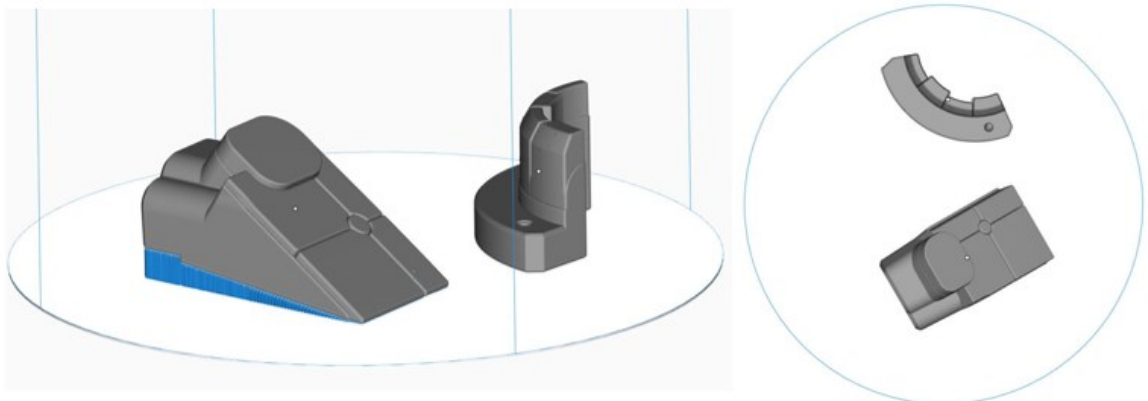


Figura 22: Disposição das peças na câmara de construção.

Com a simulação da produção das peças obtivemos os dados apresentados na seguinte Tabela 7.

Tabela 7: Dados da simulação PBF.

Designação	Unidades	Total
Volume das peças	mm ³	289.407
Volume dos suportes	mm ³	30.833
Volume total processado	mm ³	320.240
Altura de construção (mm)	mm	66
Volume total de pó necessário	mm ³	9.330.530
Tempo de preparação, CAM e limpeza	h	4
Tempo de produção	h	20
Consumo energético médio	kWh	4 x 20 = 80
Consumo de azoto	L	1.060
Consumo de ar comprimido	L	12000

O volume total de pó necessário corresponde ao volume total de pó na câmara de produção na altura máxima necessária para produzir as peças. Como neste processo o pó é deslocado de um compartimento para o outro, é necessário o mesmo volume de pó na câmara de produção e na câmara de material. Deste modo obtém-se a seguinte quantidade de pó necessária para produção (equação 6):

$$V_{câmara} \times 2 = (\pi \times r^2 \times h) \times 2 = \pi \times 150^2 \times 66 \times 2 = 9.330.530 \text{ mm}^3 \quad (6)$$

3.4.2. Quantidade de pó

A quantidade de pó necessária (mm³) é determinado pelo volume da peça final com uma sobre-espessura. Esta sobre-espessura é necessária para o acabamento final em CNC. Em geral a sobre-espessura é de +1 mm, mas em algumas zonas, simplesmente eliminaram-se alguns detalhes geométricos (Figura 23). No software CAD é possível ter acesso ao volume e massa da peça (Tabela 8).

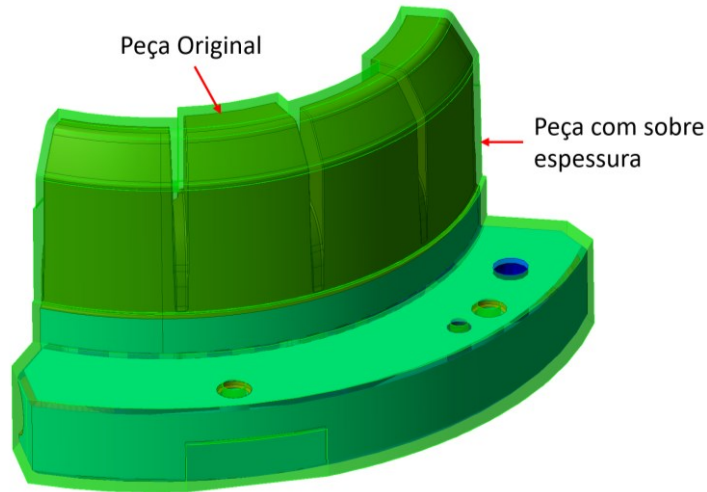


Figura 23: A diferença entre a peça original e a peça com sobre espessura no CE1.

O acréscimo de massa derivado da sobre-espessura não é constante nos dois casos de estudo. No CE1 tem 22% de acréscimo enquanto no CE2 o valor é de 15%, isto deve-se ao facto de o valor da sobre-espessura ser absoluto e igual para as duas peças (+1 mm). Com isto é normal que a peça mais pequena (CE1) tenha mais incremento no volume que a peça maior (CE2) (Tabela 8). Estas relações entre massa original e massa necessária é feita com a seguinte equação 7:

$$\%Incremento = 1 - \left(\frac{Volume\ Original}{Volume\ necessário} \right) \times 100 = 1 - \left(\frac{69.448}{88.919} \right) \times 100 = 22\% \quad (7)$$

Segundo dados estimados empiricamente, a quantidade de pó desperdiçado corresponde geralmente entre 5 a 10% do volume da peça final. Para ambos os casos de estudo, escolheu-se um valor médio de 7,5%. Assim, a massa de material desperdiçado é determinada pela multiplicação do coeficiente de desperdício à massa de pó necessária (equação 8) (Tabela 8).

$$M_{desperdício\ CE1} = M_{pó} \times K_{desperdício} = 694 \times 0,075 = \pm 52\ g \quad (8)$$

Tabela 8: Massa de pó necessária e desperdiçada.

	CE1	CE2
Volume da peça original (mm ³)	69.448	170.457
Massa da peça original (kg)	0,542	1,33

Volume da peça com sobre espessura (mm ³)	88.919 (+22%)	200.488 (+14%)
Volume de suportes (mm ³)	0	30.833
Massa de pó em suportes (kg)	0	0,240
Massa de pó processado (kg)	0,694	1,804
Massa de pó desperdiçada (kg)	0,052	0,135
Massa de pó total (kg)	0,746	1,939

3.4.3. Consumo de energia elétrica

A máquina TruPrint3000 tem um consumo médio em produção de 4 kW. (ver anexo 10). Utilizando os dados da simulação realizada, podemos obter uma relação entre o volume de pó processado de cada peça e o tempo de produção (Tabela 9).

Tabela 9: Cálculo do consumo de energia elétrica na produção PBF.

	Un.	Total	CE1	CE2
Volume de pó processado	mm ³	320.240	88.919 (28%)	231.321 (72%)
Tempo de fabrico	h	20	5,6	14,4
Tempo de preparação, CAM, etc..	h	4	2	2,5*
Consumo energético produção	kWh	80	22,40	57,60
Consumo energético inertização	kWh	N/A	0,50	0,50
Consumo energético total	kWh	80	22,90	58,10

O tempo de preparação, CAM e limpeza das peças é relativamente igual para ambas as peças. No entanto, nas peças do CE2 existem suportes para remover, daí ser necessário mais tempo.

3.4.4. Quantidade de azoto

Existem duas etapas distintas no consumo do azoto durante o processo. Antes de se iniciar o fabrico, a câmara tem de estar numa atmosfera inerte, rica em azoto. Para isso, antes de se iniciar a produção é feita a inertização da atmosfera, substituindo todo o ar por azoto. Para esta máquina, este processo tem um consumo fixo de 420 L de azoto.

Durante a produção é necessário garantir que a atmosfera se mantém inerte. Como o equipamento não é 100% estanque e vai havendo uma agitação do pó no incremento das camadas, é necessário ir adicionando mais azoto de forma a manter os níveis de oxigénio abaixo dos limites. Este consumo de azoto é de aproximadamente 32 L/h.

Como a simulação das peças dos casos de estudo foi feita em simultâneo, foi feita uma relação entre o volume de pó processado em cada CE e o volume total processado. Desta maneira, obtém-se um valor aproximado do tempo de produção para cada CE (Tabela 10).

Tabela 10: Dados do consumo de azoto.

	Unidades	CE1	CE2
Tempo de produção	h	5,6	14.4
Volume de azoto na Inertização	L	420	420
Volume consumido durante a produção	L	179	460
Volume total consumido	L	599	880
Massa total consumida	kg	13,76	20,23

O consumo de azoto e ar comprimido é medido em unidades de volume (L), mas para o AICV é necessária uma massa (kg). Sendo o azoto armazenado a 200bar de pressão, usamos a regra dos gases perfeitos (equação 9).

$$PV = nRT = 20.000.000 \times 0,599 = n \times 8,314 \times 293 \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow n_{CE1} = \frac{20.000.000 \times 0,599}{8,314 \times 293} = 491 \quad n_{CE2} = \frac{20.000.000 \times 0,88}{8,314 \times 293} = 722$$

p = Pressão em Pascal (200bar \approx 20.000.000 Pa);

V = Volume em m^3 (CE1 = 0,599 m^3 e CE2 = 0,88 m^3);

n = Quantidade de substância em moles;

R = Constante dos gases ideais (valor aproximado de 8,314 J/(mol·K));

T = Temperatura em Kelvin (temperatura ambiente 20 °C = 293 K).

A massa molar do azoto é de 28,0134g/mol;

Aplicando a equação do cálculo da Massa (kg) (equação 10):

$$Massa_{CE1} = Massa_{molar} \times N^{\circ}_{moles} = 28,0134 \times 491 = 13.755g = 13,76 kg \quad (10)$$

$$Massa_{CE2} = 28,0134 \times 722 = 20.226g = 20,23 kg$$

3.4.5. Simulação CAM do acabamento em CNC

O acabamento final das peças foi feito em CNC, seguindo a mesma sequência de trabalhos da fabricação totalmente convencional já descritos anteriormente (ver Anexos 6 e 7), e com isso obtiveram-se os dados da seguinte Tabela 11:

Tabela 11: Dados da simulação CAM para PBF.

	CE1	CE2
Posição de trabalho 1	Acabamento planar	Acabamento de contornos (x4)
	Acabamento de contornos (x4)	Acabamento planar
	Furos mandrilados Ø5 (x2)	Pontear (x1)
	Furo roscado M5 (x1)	Furo Ø3.25 (x2)
		Furo roscado M4 (x2)
Posição de trabalho 2	Acabamento planar	Acabamento de contornos (x2)
		Acabamento planar
T. Fabricação	1 h 10 min 41 s	2 h 58 min 1 s
T. Prog. CAM	1 h 30 min	2 h

3.4.6. Quantidade de apara

Nesta situação de maquinação CNC após PBF, a quantidade de apara (kg), é calculada pela subtração da massa da peça final pelo de pó necessário. Ou seja, a quantidade de sobre espessura que foi deixada para o acabamento de CNC é totalmente apara (Tabela 12).

Tabela 12: Massa da peça, pó necessário e apara.

Massa	Unidades	CE1	CE2
Peça original	kg	0,542	1,330
Pó necessário	kg	0,694	1,564
Apara	kg	0,152	0,234

3.4.7. Volume de fluido de refrigeração

O método de cálculo é o mesmo do usado anteriormente na equação 4:

$$VLL_{CE1} = \frac{\text{Litros/Ano}}{\text{Utilização/Ano}} \times T_{\text{Fabricação}} = \frac{100L}{5.000h} \times 1,17 h = 0,02 L \quad (4)$$

$$VLL_{CE2} = \frac{100L}{5.000h} \times 3 h = 0,06 L$$

3.4.8. Consumo de ar comprimido (PBF)

Segundo o manual desta máquina (Anexo 11), o consumo de ar comprimido é de 0,6 m³/h. Com esta informação obtemos os dados da Tabela 13.

Tabela 13: Dados do consumo de ar comprimido.

	Unidades	CE1	CE2
Tempo de produção	h	5,6	14,4
Volume total consumido	m ³	3,36	8,64

3.4.9. Consumo de ar comprimido (CNC)

Utilizando os valores de consumo de 0,2 m³/min e aplicando-os aos tempos de maquinação, obtém-se os valores da Tabela 14:

Tabela 14: Consumo de ar comprimido no acabamento de CNC.

	CE1	CE2
Tempo de produção	1 h 10 min 27 s	2 h 58 min 1 s
Tempo de Aquecimento e <i>standby</i>	20+20	20+20
Tempo total da máquina ligada	1 h 50 min 27 s	3 h 38 min 1 s
Consumo de ar comprimido (m ³)	22,00	43,60

3.4.10. Consumo de energia elétrica do acabamento CNC

Os dados referentes aos consumos de energia elétrica na fabricação por CNC, seguem o mesmo conceito da fabricação CNC. Deste modo são apresentados na Tabela 15 os tempos de maquinação em cada tipo de operação:

Tabela 15: Somatório do tempo de trabalho em cada tipo de operação no acabamento em CNC.

Operação	CE1	CE2
Aquecimento	20 min	20 min
<i>Standby</i>	20 min	20 min
Troca de ferramentas	3x9 = 9 s	3x5 = 15 s
Desbaste	N/A	N/A
Acabamento planar	75 s	14 s
Acabamento de contornos	69 min 10 s	177 min 33 s
Furação	13 s	14 s

Calculando os valores do tempo de programação CAM, e utilizando os dados da mesma máquina da fabricação convencional, foram obtidos os seguintes valores, presentes na Tabela 16:

Tabela 16: Somatório do consumo de energia no acabamento em CNC.

Operação	Consumo unitário (kWh)	CE1 (kWh)	CE2 (kWh)
Programação CAM	0,33	0,50	0,66
Aquecimento	5,30	1,77	1,77
<i>Standby</i>	4,10	1,37	1,37
Troca de ferramentas	4,10	0,01	0,02
Desbaste	19,30	N/A	N/A
Acabamento planar	16,20	0,34	0,06
Acabamento de contornos	16,20	18,68	47,94
Furação	19,50	0,07	0,08
Total	N/A	23,13	52,29

3.4.11. Resumo dos dados recolhidos

Os dados recolhidos para os dados de produção em FA (PBF + CNC) estão apresentados na seguinte Tabela 17:

Tabela 17: Dados recolhidos no processo PBF+CNC

Designação	Unidades	CE1	CE2
PBF			
Massa de pó utilizado	kg	0,694	1,804
Massa de pó perdido	kg	0,052	0,135
Massa de suportes	kg	0	0,24
Tempo de fabricação	h	5 h 36 min	14 h 24 min
Tempo de preparação, limpeza e CAM	h	2h	2 h 30 min
Consumo de energia elétrica	kWh	22,90	58,10
Consumo de Azoto	kg	13,76	20,23
Consumo de ar comprimido (PBF)	m ³	3,36	8,64
Tempo de produção em fabrico aditivo	h	6 h 36 min	15 h 24 min
CNC			
Quantidade de apara	kg	0,152	0,234
Volume de fluido de refrigeração	L	0,02	0,06
Tempo de fabricação	h	1 h 10 min 27 s	2 h 58 min 1 s
Tempo de programação CAM	h	1 h 30 min	2 h
Tempo de preparação (aquecimento)	min	20 min	20 min
Tempo de troca de plano de trabalho	min	20 min	20 min
Tempo de troca de ferramenta	s	3 x 3 = 9 s	5 x 3 = 15 s
Consumo de ar comprimido (CNC)	m ³	22,00	43,60
Consumo de energia elétrica	kWh	23,13	52,29
T.de produção em fabrico convencional	h	3 h 20 min 36 s	5 h 38 min 16 s
Tempo de produção total	h	10 h 56 min 36 s	22 h 32 min 16 s

3.5. Análise de Inventário

O fluxo de trabalho entre produzir convencionalmente e por fabrico aditivo é diferente. Apesar de haver processos iguais (CNC), as diferenças começam pela matéria-prima (pó e bloco de aço), mas estendem-se ao longo de todo o processo, com diferentes entradas e saídas do sistema ao longo de todo o processo (Figura 18 e Figura 21). Estas diferenças implicam que sejam criados dois inventários diferentes para ambos os processos.

Para a fabricação convencional apresenta-se o inventário descrito na Tabela 18:

Tabela 18: Inventário da fabricação CNC

Entradas	Unidades	Peça CE1	Peça CE2
Bloco de aço	kg	3,066	4,378
Energia elétrica CNC	kWh	26,46	72,78
Fluído de refrigeração	L	0,03	0,08
Ar comprimido	m ³	24,20	56,20
Transporte*	km	1.000	1.000
Saídas			
Peça final	kg	0,546	1,339
Apara	kg	2,520	3,039
Fluído de refrigeração	L	0,03	0,08

Na produção CNC, o valor do transporte corresponde à distância média entre a fundição onde são produzidos os blocos de aço e a unidade industrial onde se produz a peça. Este valor médio de 1000km, foi atribuído pela razão de a origem do aço ser variável (Portugal, Espanha, Alemanha, China, ou outro país)

Para a fabricação em PBF e o posterior acabamento em CNC, apresenta-se o inventário resumido na Tabela 19:

Tabela 19: Inventário para a fabrico em PBF+CNC.

Entrada PBF	Unidades	Peça CE1	Peça CE2
Pó metálico	kg	0,746	1,939
Energia elétrica	kWh	22,90	58,10
Azoto	kg	13,755	20,226
Ar comprimido	m ³	3,36	8,64
Transporte*	km	2700	2700
Saída PBF			
Peça PBF	kg	0,694	1,804
Pó metálico perdido	kg	0,052	0,135
Azoto	kg	13,755	20,226
Suportes	kg	0	0,240
Entrada CNC			
Peça PBF	kg	0,694	1,804
Energia elétrica CNC	kWh	23,13	52,29
Fluído de refrigeração	L	0,02	0,06
Ar comprimido (CNC)	m ³	22,00	43,60
Saída CNC			
Peça final	kg	0,542	1,330
Apara	kg	0,152	0,234
Fluído de refrigeração	L	0,02	0,06

Na produção PBF+CNC, o valor do transporte corresponde à distância média entre o local onde é produzido o pó metálico e a unidade industrial onde se produz a peça. Como o pó utilizado em Portugal vem tipicamente da Alemanha, foi definido o valor genérico de 2700Km (Leiria-Berlim).

3.6. Modelação do AICV no GaBi

Para realizar a AICV, foi usado o software GaBi da *Sphera Solutions GmbH*, disponibilizado pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) do Instituto Politécnico de Leiria. O GaBi oferece acesso a funcionalidades abrangentes e fáceis de usar para analisar ciclos de vida dos produtos ou processos. No GaBi foi utilizada a base de dados da *Ecoinvent*, uma associação ambiental não lucrativa baseada em Zurique (Suíça). A metodologia de avaliação de impacto *Environmental Footprint 3.1* (EF3.1) foi utilizada nos casos de estudo para avaliar os impactos ambientais. Nesta metodologia contamos com várias categorias de impacto ambiental listadas na Figura 27.

3.6.1. Modelo da produção por CNC

A modelação do AICV para a produção em CNC (Figura 24), tem oito parâmetros no fluxo do ciclo de vida. Como na base de dados da *Ecoinvent*, não há nenhum processo para o fluido de refrigeração, pelo que se modelou o processo com base nos dados das especificações do fluido. Sabendo a proporção de água (95%) e óleo (5%) que existe no fluido de refrigeração em estudo. Inserimos os dados fluxos de entrada individualmente, a água assinalada no ponto 4 e o óleo no ponto 8 da Figura 24. O tratamento do fluido é feito em conjunto no ponto 7.



Figura 24: Modelação do AICV no GaBi da produção CNC do CE1.

1. Energia elétrica do mercado português;
2. Aço produzido na Europa;
3. Tratamento e reciclagem das aparas;
4. Água (95% do fluido de refrigeração);
5. Transporte;
6. Ar comprimido a 800 kPa (8 bar);
7. Tratamento do fluido de refrigeração;
8. Óleo de corte (5% do fluido de refrigeração).

Para os dados relativos ao CE2, consultar o Anexo 12.

3.6.2. Modelo da produção por PBF+CNC

A modelação do AICV para a produção em PBF+CNC (Figura 26), tem nove parâmetros diferentes no fluxo do ciclo de vida. O pó metálico ou o processo de atomização do pó metálico não está presente na base de dados da *Ecoinvent*. No entanto, de modo a contornar esta situação, criou-se um processo “*Steel powder production for AM*”. Os dados inseridos neste processo correspondem ao processo de atomização por água. Os valores referentes à quantidade de energia e água necessária por quilo de pó produzido são fundamentados pelos artigos de Kruzhanov & Arnhold (2011) e de Kokare, Oliveira, & Godina (2023). Com estes valores, foi possível obter o consumo energético de 7 kWh/kg e o consumo de água de 4,5l/kg (Figura 25).

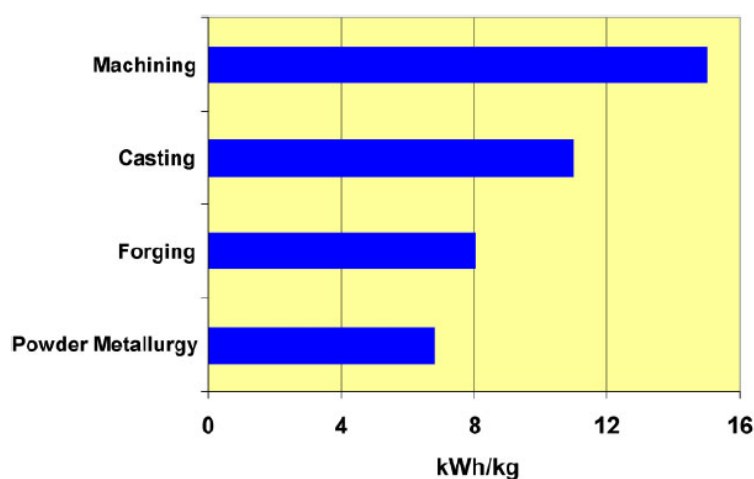


Figura 25: Consumo energético por kg de aço H13 produzido (Kruzhanov & Arnhold, 2011).

4. Análise e discussão de resultados

A análise de discussão de resultados está dividida em três partes: produção por CNC, PBF+CNC e comparação global dos resultados. Em ambos os métodos de produção serão analisados e discutidos os parâmetros de produção com maior impacto, assim como o tipo de impacto com maior peso em cada um. A apresentação dos dados será feita maioritariamente na forma percentual a cada caso de estudo, de maneira que seja mais fácil a sua análise e comparação.

Existe uma ideia parcialmente errada de quantificar o impacto ambiental de um produto contabilizando a pegada de carbono ou a quantidade de CO₂ equivalente emitida também denominado de potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*). Esta quantidade de CO₂ engloba todas as emissões resultantes do processo. Embora sejam libertados vários gases diferentes, é feita uma equivalência de todos eles com o CO₂ consoante o seu impacto no aquecimento global (Anexo 14). No entanto, este fator apenas contabiliza o impacto sobre o aquecimento global, desprezando outros fatores importantes não emissores de gases, portanto em muitos casos não é o método mais realista para quantificar o impacto ambiental. Na Figura 27 está apresentada os vários tipos de impactos ambientais, os tipos de categorias onde se enquadram e os respetivos danos que provocam.

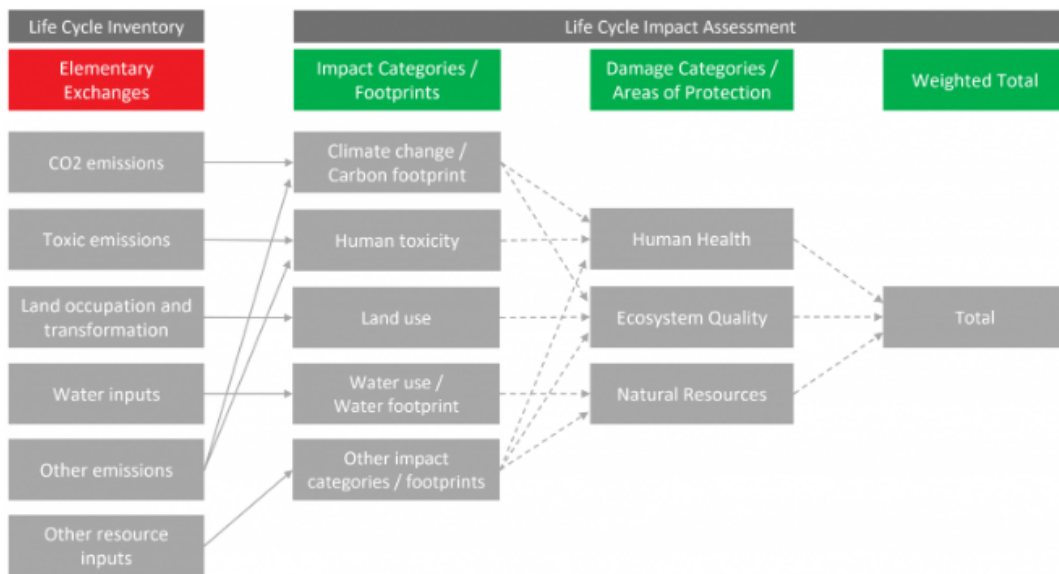


Figura 27: Categorização dos vários impactos ambientais (Ecoinvent, 2023).

Na AICV existem dezenas de fatores avaliados e contabilizados, e cada um deles tem uma unidade específica. Entre os vários fatores analisados estão o potencial de aquecimento global (GWP – CO₂eq.), eutrofização dos solos e oceanos (kg N eq), toxicidade humana (CTUh), uso de recursos minerais (kg) e fósseis (MJ), ou outros. Como cada um destes fatores tem uma unidade específica não é possível fazer uma comparação direta entre eles. Assim, de modo que se consiga comparar e quantificar os impactos dos vários parâmetros medidos, é feita uma normalização dos dados. O objetivo da normalização é colocar os dados de diferentes categorias de impacto numa escala comparável. Esta normalização consiste em aplicar fatores de ponderação para cada categoria de impacto ambiental, com base numa referência ou valor de referência. O software GaBi já faz esta normalização dos dados. O GaBi e a *Ecoinvent*, seguem a regulamentação da União Europeia relativa aos AICV, utilizando as mais recentes diretrizes nesta área. A unidade de referência usada para os valores normalizados é a “Pegada ecológica por pessoa equivalente” (*EF3.0 Person Equivalent – EF3.0 P.eq.*) (EU, 2023). É com base nos dados normalizados que serão analisados e discutidos os resultados.

4.1. Produção por CNC

Após a normalização dos dados, no CE1 tem um impacto de 0,0296 EF3.0 P.eq. e o CE2 tem 0,0674 EF3.0 P.eq. No inventário da fabricação CNC (Tabela 6) denota-se a existência de uma proporção direta entre o CE1 e CE2. A proporção de aproximadamente 2,5, é evidente nos valores da massa da peça final, consumo energético e tempo de fabricação. Como resultado disso, os valores do impacto ambiental têm também uma proporcionalidade semelhante aos valores do inventário, neste caso de aproximadamente 2,3.

4.1.1. Distribuição detalhada dos impactos ambientais

Observando a distribuição dos impactos ambientais do CE1 na Figura 28 (Anexo 15 para dados do CE2), os impactos ambientais com mais relevância são: “*Resource use, mineral and metals*”, “*Eutrophication, freshwater*”, “*Resource use, fóssil*”, “*Human toxicity, cancer*” e “*Ecotoxicity, freshwater*”. De uma forma genérica não há surpresas nestas

estatísticas, os fatores de produção com mais importância como a energia elétrica e produção da matéria-prima, têm fortes impactos no meio ambiente, nomeadamente nos solos e meios aquáticos. Segundo os dados apresentados, aproximadamente 50% dos impactos ambientais totais são de apenas três fatores específicos. Destes três o “*Ecotoxicity, freshwater*” (toxicidade em água doce) é o maior, com valores acima de 20% em ambos os CE’s.

Impactos ambientais normalizados do CE1

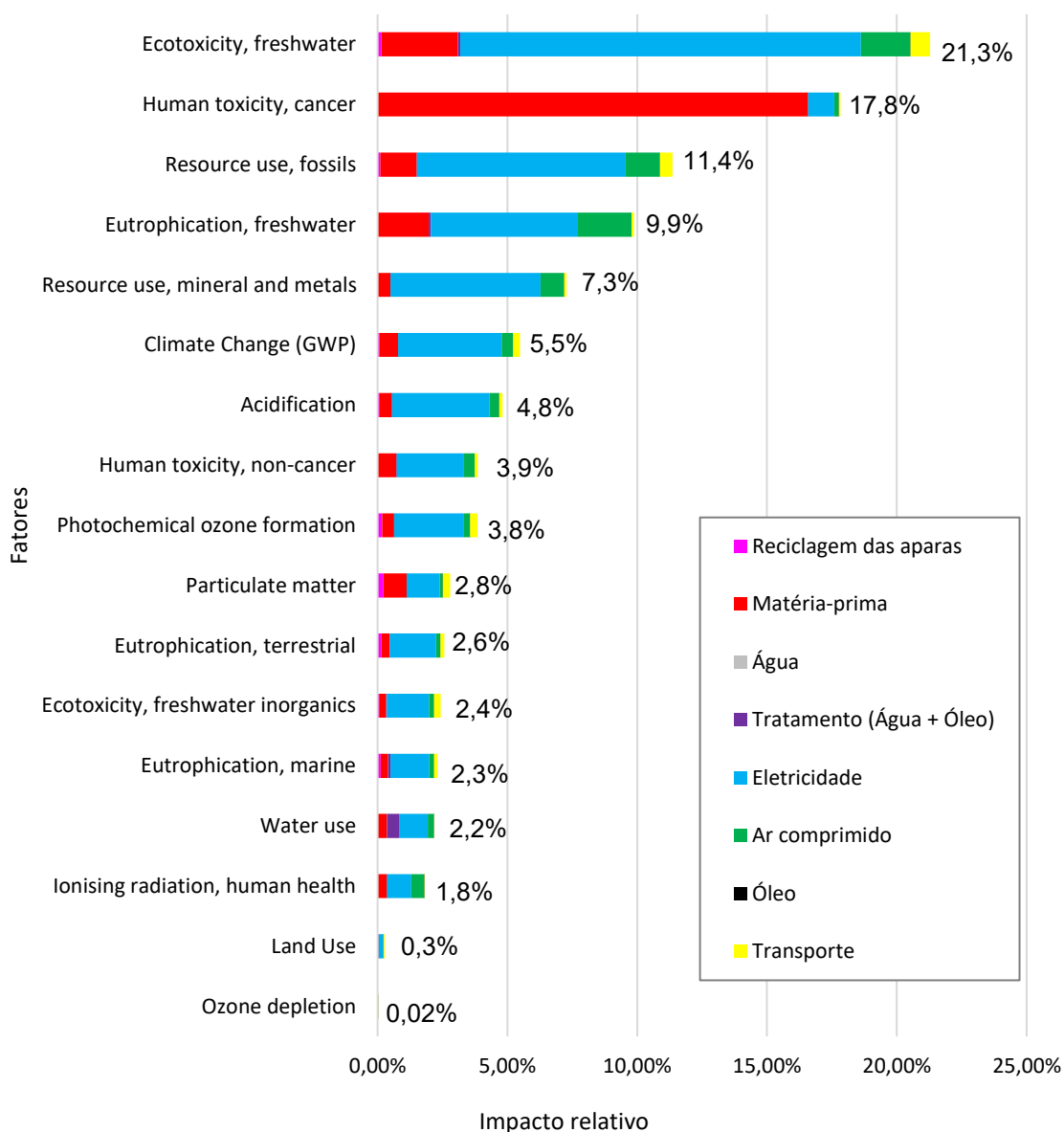


Figura 28: Valores normalizados dos impactos ambientais da produção CNC no CE1.

4.1.2. Distribuição dos impactos ambientais por kg de peça

De maneira a conseguir comparar e analisar os dados de ambos os CE's, foi feita uma transformação dos dados para cada quilograma de peça final produzida (Figura 29). Desta forma é possível destacar mais facilmente as diferenças entre os dois casos e com isso evidenciar fatores chave no impacto ambiental.

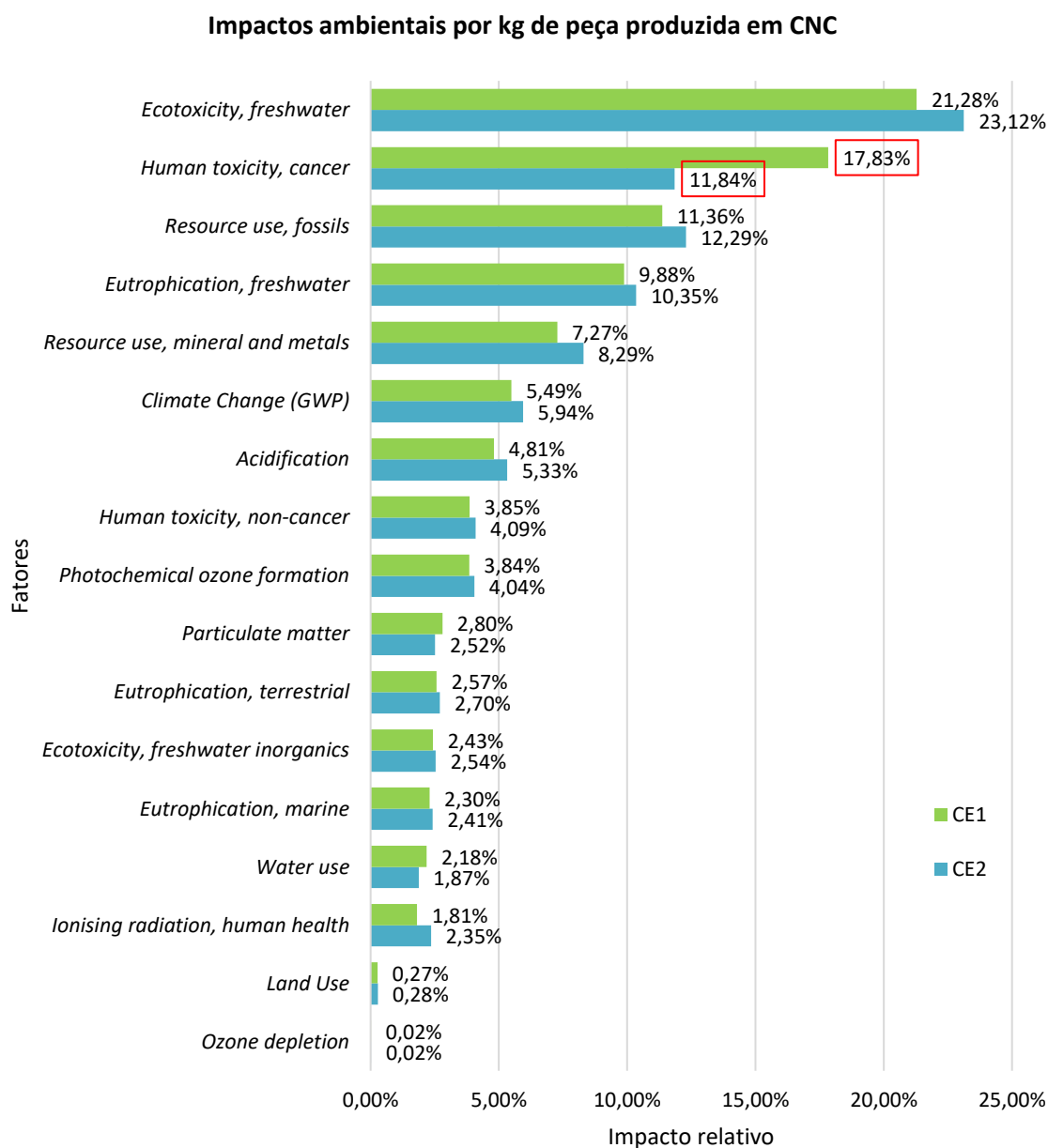


Figura 29: Impactos ambientais por kg de peça produzida por CNC.

De um modo geral os impactos ambientais analisados na Figura 29 têm valores ligeiramente superiores para o CE2, à exceção do “*Human toxicity, cancer*”, com uma diferença de 50% entre os valores. Examinando a Figura 28, a eletricidade representa a maior fatia em todos eles, à exceção do “*Human toxicity, cancer*”, cujo maior impacto é relativo à produção do aço, que representa 28% da totalidade dos impactos ambientais (ver Figura 30). (No seguinte capítulo está explicado o impacto da matéria-prima na diferença entre o CE1 e CE2.)

4.1.3. Influência dos parâmetros produtivos no impacto ambiental

Analisando a Figura 30 destaca-se também que a maior diferença é na produção do aço (+50% no CE1). Isto deve-se fundamentalmente à quantidade de aço que é necessária para produzir as peças. Ao analisar o inventário do CE1 (Tabela 1) onde a quantidade de apara corresponde a 80% no CE1 enquanto no CE2 era de 70%, logo é normal que o impacto por quilo de peça seja muito maior no CE1. Esta diferença no aproveitamento do material explica a diferença dos impactos visíveis na Figura 29. O transporte e a respetiva reciclagem do material é diretamente proporcional à massa de matéria-prima, logo também é superior no CE1.

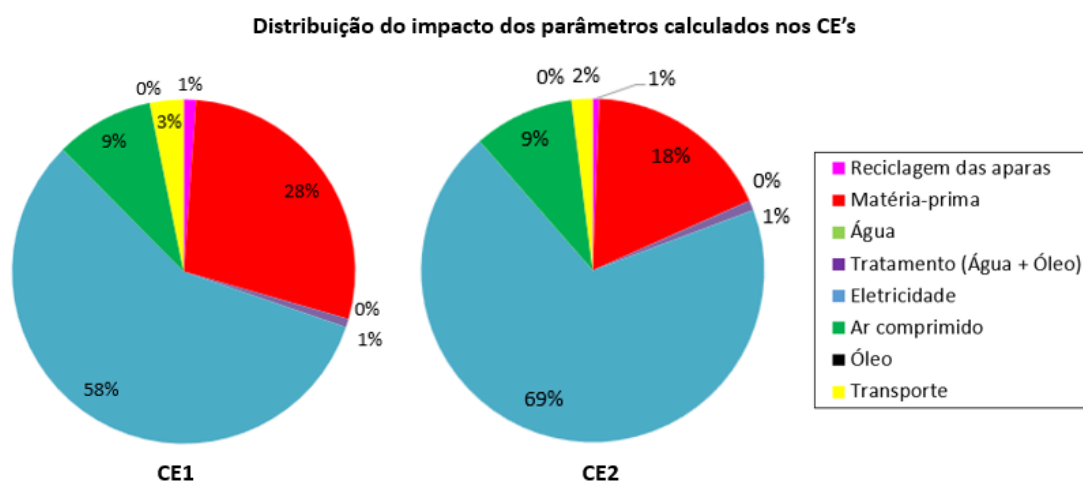


Figura 30: Distribuição do impacto ambiental da produção CNC pelos vários parâmetros calculados no CE1 e CE2.

Na Figura 30, observa-se também que 98% do impacto ambiental é causado por quatro fatores da produção. Em primeiro lugar com 58% no CE1 e 69% no CE2, produção

do aço com 28% no CE1 e 18 % no CE2, o ar comprimido em terceiro lugar com 9% e transporte com 3% no CE1 e 2% no CE2.

A grande surpresa é o impacto ambiental provocado pelo consumo de ar comprimido durante a produção. O ar comprimido apesar de se ser muito vulgar industrialmente é um processo pouco eficiente. Entre o processo de compressão, secagem e transporte do ar, existem muitas perdas e estima-se que apenas 10-30% da energia utilizada para comprimir o ar tenha realmente aplicabilidade (Eras, Gutiérrez, Santos, & Ulloa, 2020).

O grande peso da eletricidade nos impactos ambientais significa que a forma como esta energia é gerada influencia bastante o impacto global. Atualmente o mix energético português (o que foi usado no estudo) tem uma grande percentagem de energias limpas (Figura 31), o que pode alterar as conclusões deste estudo noutras regiões onde as fontes de energia elétrica são principalmente de fontes de origem fóssil ou nuclear.

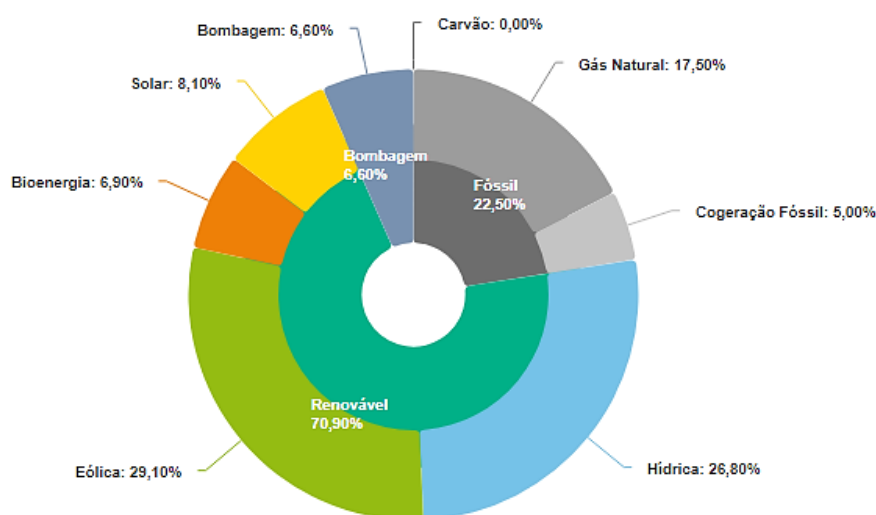


Figura 31: Mix energético em Portugal entre 1 de Janeiro e 30 de Junho de 2023 (APREN, 2023).

4.1.4. Potencial de aquecimento global

Por último, fazendo uma análise os principais fatores pelas emissões de CO₂ eq. Que contribuem para o potencial de aquecimento global (GWP), observa-se que quase 80% das emissões correspondem ao consumo de energia elétrica (Figura 32). Com um impacto significativamente menor segue-se a matéria-prima (10%), ar comprimido (8%), transporte (4%) e a reciclagem das aparas (1%). Os restantes parâmetros têm um impacto próximo

de 0, sendo desprezável para esta análise. Esta distribuição segue os valores da distribuição dos impactos ambientais.

Origem das emissões de CO2 na produção CNC (média dos CE's)

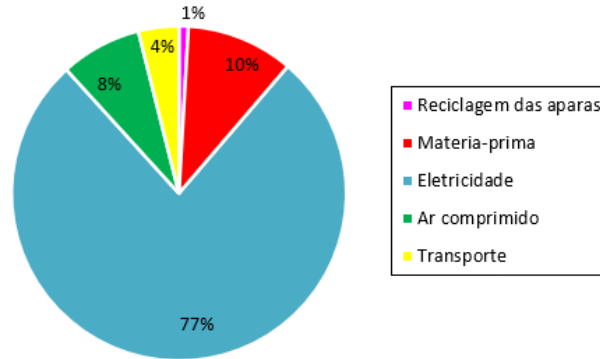


Figura 32: Origem das emissões de CO₂ eq. na produção CNC.

Transformando os dados dos casos de estudo para um quilograma de peça final produzida, chega-se à conclusão de que as peças têm emissões de CO₂ praticamente iguais (Figura 33). Apesar de haver um maior consumo de energia elétrica no CE2, os valores referentes ao transporte e matéria-prima superiores no CE1 anulam a diferença.

Emissões de CO₂ eq. por kg de peça produzida em CNC

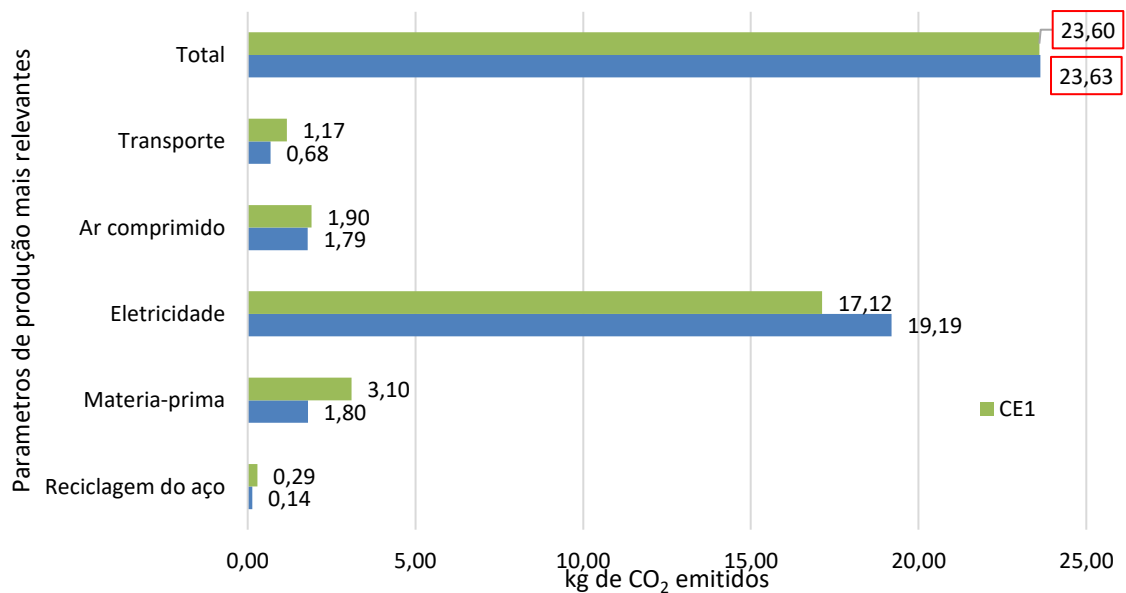


Figura 33: Emissões de CO₂ eq. por kg de peça produzida em CNC.

4.2. Produção por PBF+CNC

A produção por FA, conta com mais uma varável no processo produtivo, o azoto. Os valores da energia elétrica, ar comprimido e reciclagem das aparas e pó, de cada uma das etapas produtivas (PBF e CNC), foram apresentados em conjunto em algumas situações.

4.2.1. Distribuição detalhada dos impactos ambientais

Após a normalização dos dados (feito automaticamente no software), o CE1 tem um impacto de 0,040 EF3.0 P.eq. e o CE2 de 0,091 EF3.0 P.eq. O processo PBF+CNC tem aproximadamente um impacto ambiental 33% superior à produção CNC. Apesar do impacto superior, existem diferenças nos tipos de impactos mostrados na Figura 34 (Anexo 16 para consultar os dados do CE2).

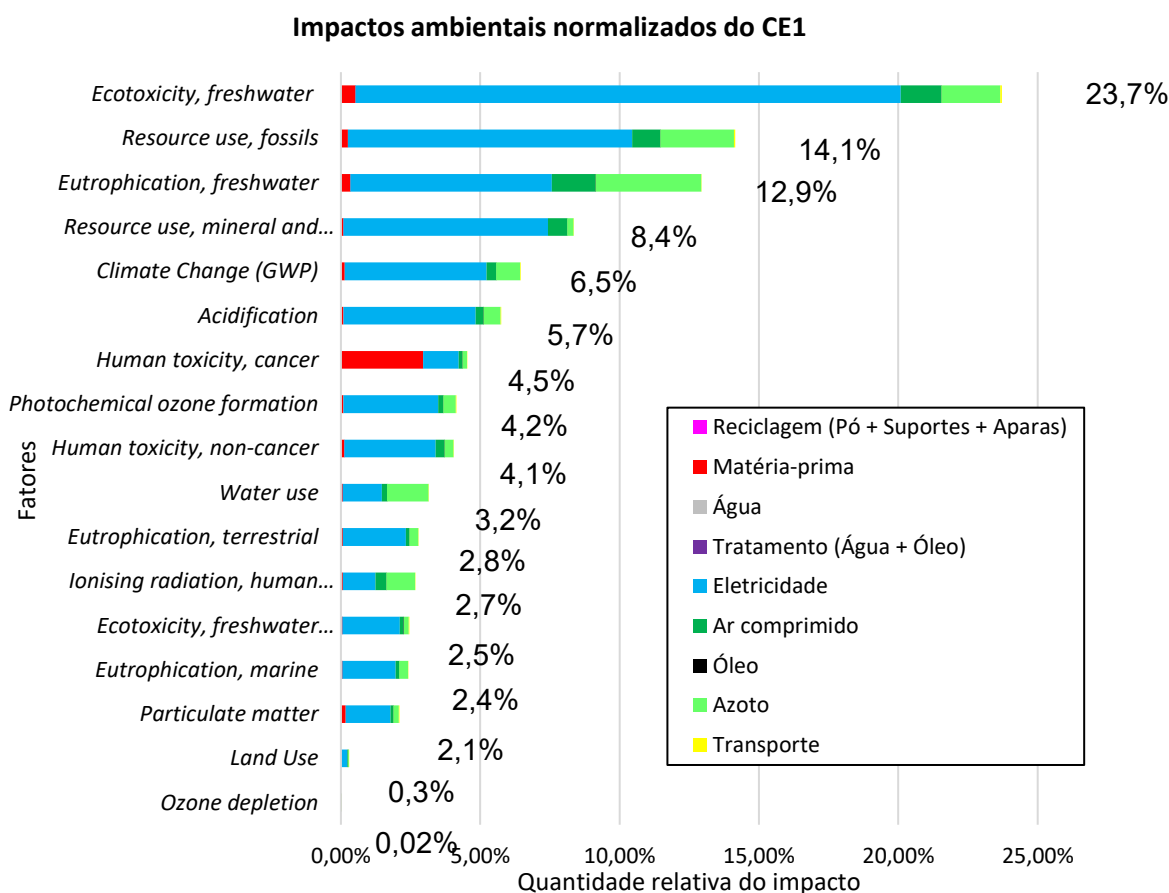


Figura 34: Impactos normalizados da produção PBF+CNC do CE1.

4.2.2. Distribuição dos impactos ambientais por kg de peça

Transformando os dados dos CE's para quilograma de peça produzida (Figura 35), observa-se pouca diferença entre os dados apresentados.

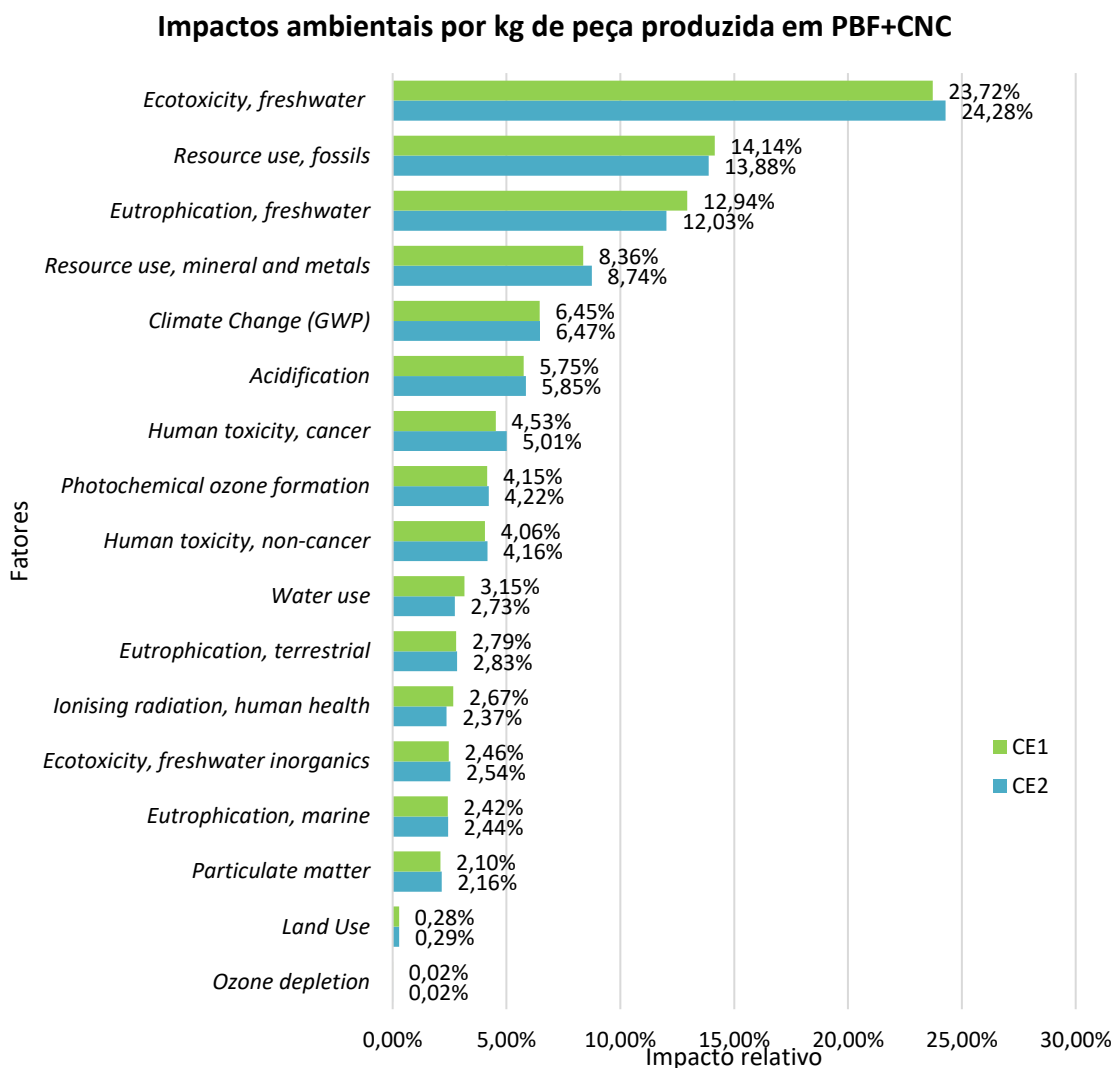


Figura 35: Impactos ambientais por kg de peça produzida por PBF+CNC.

Observando a distribuição dos impactos ambientais do CE1 na Figura 34 (Anexo 16 para dados do CE2), os impactos ambientais com mais relevância são os mesmos da produção CNC: “*Ecotoxicity, freshwater*”, “*Resource use, fósil*” e “*Eutrophication, freshwater*”. Estes três impactos assumem 50% de todos os impactos provocados. Destes três o “*Ecotoxicity, freshwater*” (toxicidade em água doce) é o maior, com valores próximos de 25% em ambos os CE's (Figura 34).

4.2.3. Influência dos parâmetros produtivos no impacto ambiental

Observando a Figura 36, referente à distribuição dos vários tipos de impactos, o azoto surge como parâmetro de produção com o segundo maior impacto. Na Figura 34, o azoto é facilmente detetável nos três principais indicadores, especialmente no “*Eutrophication, freshwater*”.

O azoto é um dos principais compostos usados na fertilização dos solos, por ser um elemento essencial no crescimento das plantas. Contudo, a eutrofização (excesso de azoto) cria vários problemas, incluindo “zonas mortas” hipóxicas que impedem o crescimento de peixes. Outro problema é a proliferação de algas nocivas que criam problemas de sabor e odor e ameaçam a segurança da água potável, assim como estimula a emissão de gases com efeito de estufa (Wurtsbaugh, Paerl, & Dodds, 2019). Isto justifica os valores do impacto ambiental apresentados.

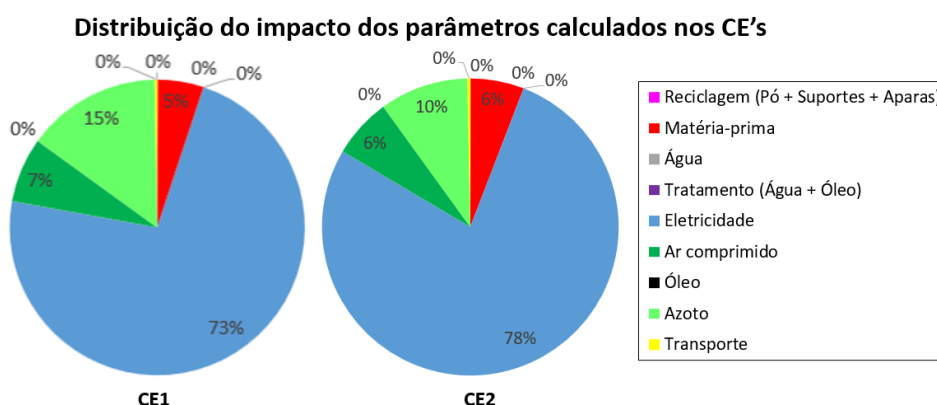


Figura 36: Distribuição do impacto ambiental (EF3.0 P.eq) da produção PBF+CNC pelos parâmetros calculados no CE1 e CE2.

A diferença do impacto do azoto entre os dois casos de estudo observável na Figura 36 existe pela circunstância da maior parte do azoto ser consumido no processo de inertização da câmara de produção (Tabela 10). O facto das peças terem sido simuladas individualmente, tem um impacto significativo no consumo de azoto, pois neste caso temos o mesmo consumo de azoto para a inertização de uma peça ou da câmara totalmente cheia de peças. Isto significa que independentemente do tempo de produção ou da quantidade de material usada o consumo base será sempre elevado. Como o CE2 consome mais recursos (eletricidade, matéria-prima, ar comprimido, etc..) o impacto do azoto foi diluído, nomeadamente na eletricidade.

4.2.4. Estimativa do consumo de azoto real

Na realidade a produção de peças em PBF é sempre otimizada de forma que a câmara de produção contenha a maior quantidade de peças possível. Sabendo que o volume da câmara de trabalho da máquina de fabrico aditivo e o volume das peças em estudo, consegue-se estimar um consumo de azoto para um câmara cheia de peças.

- ▶ A câmara de fabrico (Ø300x400) contabilizando o volume de 28.260.000 mm³;
- ▶ As peças têm o volume:
 - CE1 = 88.919 mm³ (± 0,3% do volume da câmara usado);
 - CE2 = 200.488 mm³ (±0,7% do volume da câmara usado);
- ▶ Quantidade de azoto para inertização = 420 L;

Apenas com estes dados já se consegue estimar que o consumo de azoto na inertização torna-se quase insignificante. Teoricamente, assumindo a câmara cheia de peças (317 Peças CE1 e 141 peças CE2), teríamos um consumo e azoto por peça na inertização de 1,3 L no CE1 e 3 L no CE2. Com isto teríamos os seguintes resultados:

- ▶ Consumo total de azoto no CE1 = 179 (produção) + 1,3 = 180,3 L, resultando numa redução de 70%;
- ▶ Consumo total de azoto no CE2 = 460 (produção) + 3 = 463 L, resultando numa redução de 53%;

Com estas estimativas, observa-se na Figura 37, que a distribuição dos impactos ambientais fica praticamente igual entre o CE1 e CE2.

Distribuição do impacto dos parâmetros calculados (consumo de azoto estimado)

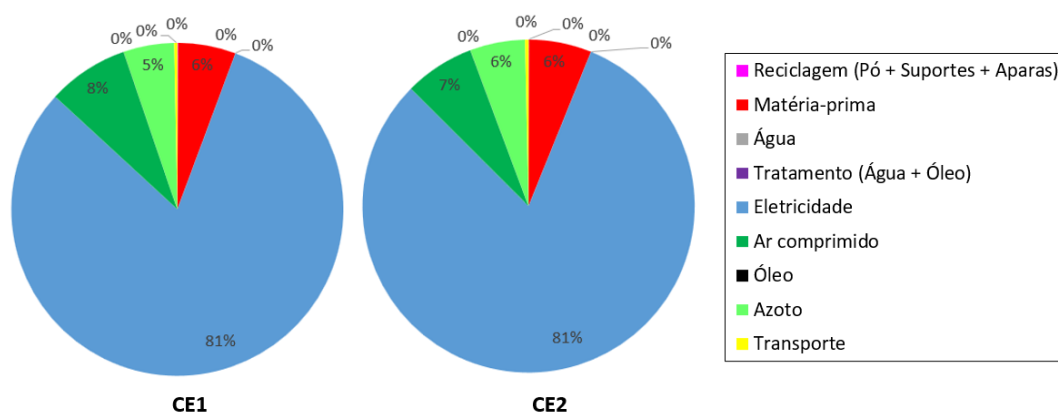


Figura 37: Distribuição do impacto ambiental (EF3.0 P.eq) da produção PBF+CNC (consumo de azoto estimado).

4.2.5. Potencial de aquecimento global

Efetuada uma análise os principais fatores pelas emissões de CO₂ eq., observamos que mais 80% das emissões correspondem ao consumo de energia elétrica (Figura 38). Com um impacto significativamente menor segue-se o azoto (11%), ar comprimido (5%), matéria-prima (2%) e o transporte (1%). Os restantes parâmetros têm um impacto próximo de 0, sendo desprezável para esta análise.

Origem das emissões de CO₂ na produção PBF+CNC (média dos CE's)

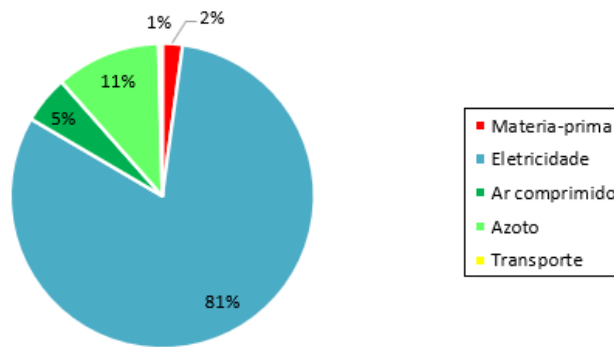


Figura 38: Origem das emissões de CO₂ eq. na produção PBF+CNC.

Calculando as emissões de CO₂ eq. para ambos os casos de estudo, na Figura 39 observa-se que as emissões são ligeiramente superiores no CE1, sendo a maior diferença no azoto. Como já referido anteriormente o consumo de azoto é superior no CE1, logo é normal que exista esta pequena diferença entre eles.

Emissões de CO₂ eq. por kg de peça produzida em PBF+CNC

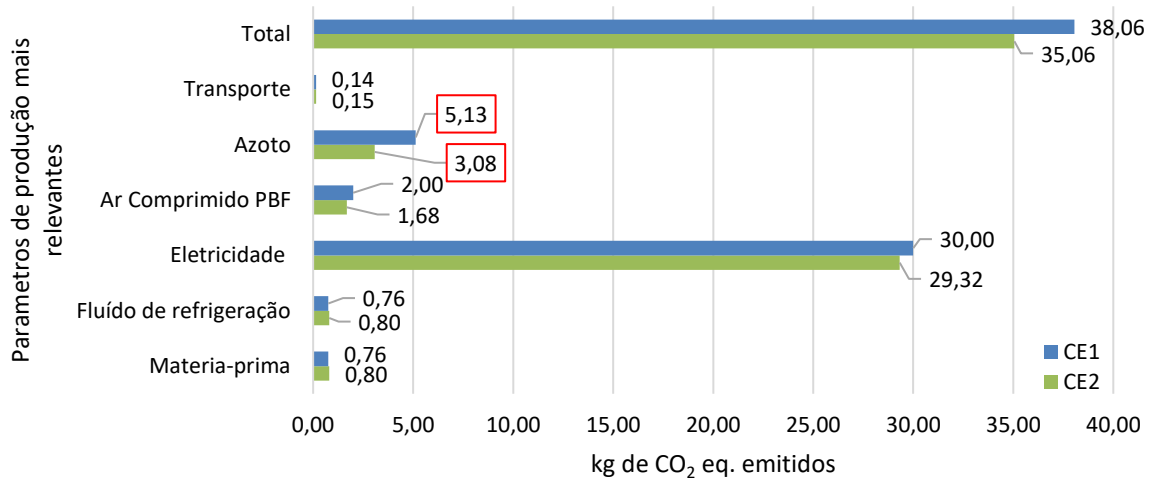


Figura 39: Emissões de CO₂ eq. por kg de peça produzida em PBF+CNC.

4.2.6. Impacto do acabamento CNC na produção PBF+CNC

De forma a conseguir quantificar os impactos ambientais do fabrico aditivo, foi feita a separação entre PBF e CNC. A finalidade desta análise é compreender o peso do acabamento CNC na produção de uma peça em fabrico aditivo.

Na Figura 40, está apresentada o impacto do acabamento CNC no processo PBF+CNC. Esta distribuição foi feita seguindo os inventários de fluxos da Tabela 19. Os valores referentes ao processo CNC não apresentados (reciclagem, água, óleo e tratamento) têm valores próximos de 0, pelo que não acrescenta valor à informação apresentada.

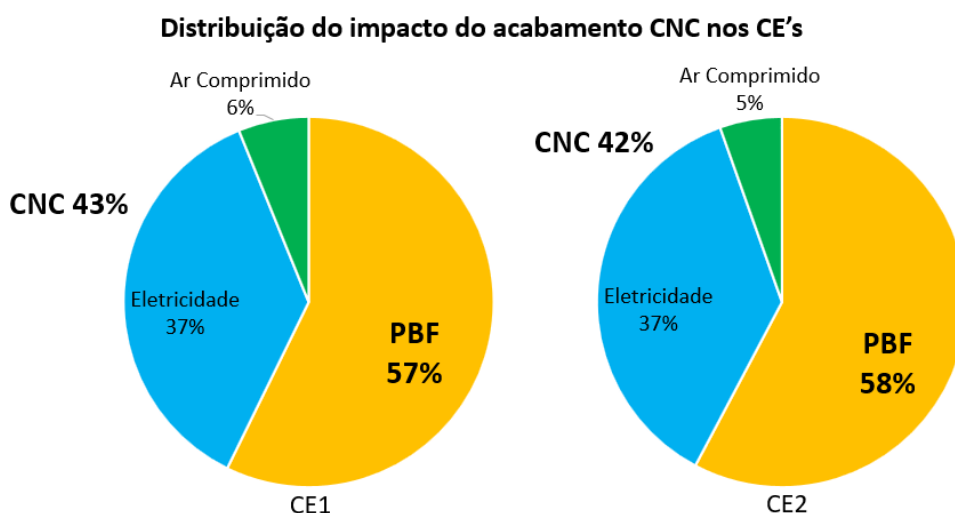


Figura 40: Impacto do acabamento CNC nos CE's.

A percentagem de impacto ambiental que o acabamento CNC tem no processo PBF+CNC é idêntica nos casos, 43% no CE1 e 42% no CE2. Isto é um dado muito importante, pois a necessidade de um acabamento de elevada qualidade implica quase o dobro do impacto ambiental. A grande diferença entre a maquinaria total em CNC e o acabamento CNC é a ausência ao desbaste feito ao bloco de aço, pois todas as outras operações de acabamento, furação e roscagem foram feitas em ambos os processos.

4.3. Comparação global dos resultados

Analisando os dados de ambos os processos de fabrico para cada caso de estudo, obtemos a seguinte Tabela 20:

Tabela 20: Resumo dos impactos ambientais dos CE's.

Casos	Massa da peça final (kg)		Impacto ambiental (EF3.0 P. eq.)			
	CNC	PBF	CNC	CNC*	PBF+CNC	PBF+CNC*
CE1	0,546	0,542	0,030	0,054	0,041 (+37%)	0,075 (+38%)
CE1	1,339	1,330	0,067	0,050	0,091 (+35%)	0,069 (+36%)

*Impactos ambientais ajustados a 1kg de peça produzida.

No CE1 observa-se que o impacto ambiental é 37-38% superior na fabricação PBF+CNC. No CE2, o valor é idêntico, com valores 35-36% superiores. Como já discutido anteriormente, mais de 40% do impacto ambiental na produção PBF+CNC é derivado do acabamento em CNC realizado.

De uma forma experimental, tendo em consideração que para os casos de estudo em análise, a exclusão do acabamento CNC não coloca as peças fabricadas por CNC e PBF ao mesmo nível de funcionalidade e qualidade, foi separada a parte de acabamento CNC do processo PBF. Com mais de 40% dos impactos associados ao acabamento CNC, e com os dados já apresentados anteriormente da Figura 40, consegue-se calcular a diferença direta entre produção por CNC e PBF, apresentada na Tabela 21.

Tabela 21: Impacto ambiental apenas do processo PBF.

	CNC	PBF+CNC	Acab. CNC *	Apenas PBF
CE1	0,030	0,041	0,017 (43%)	0,023 (-22%)
CE2	0,067	0,091	0,038 (42%)	0,053 (-22%)

*Valores calculados com os dados da Figura 40

Como se pode observar, sem o acabamento CNC a produção PBF tem um impacto ambiental 22% inferior ao método convencional. Associados a estes dados, foram criados gráficos comparativos entre a produção exclusivamente em PBF, com os consumos de azoto estimados para produção real (Figura 41).

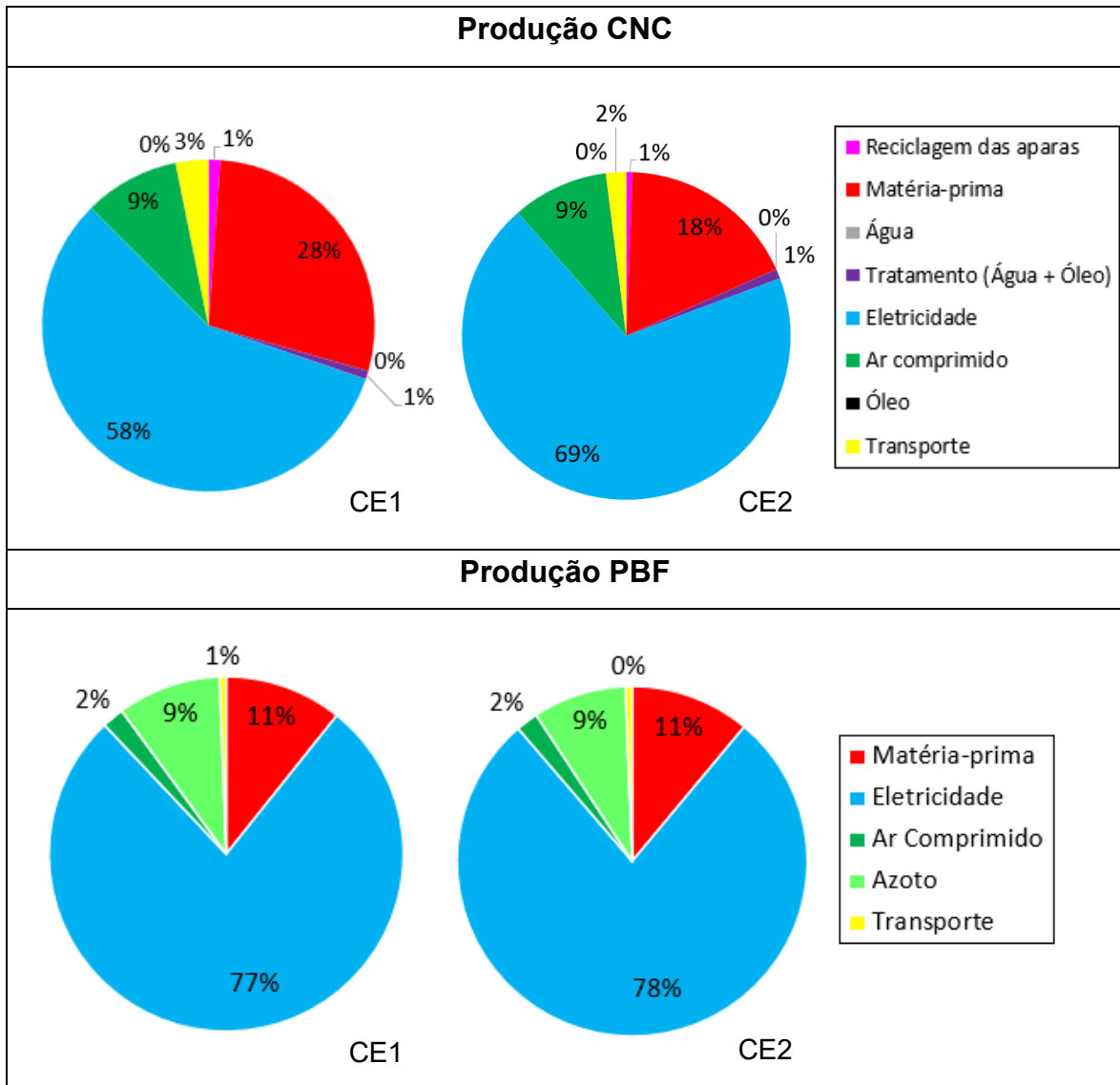


Figura 41: Comparação dos impactos entre CNC e PBF (sem acabamento CNC).

O consumo de energia elétrica tem mais peso nos impactos ambientais na produção PBF. No entanto, os outros parâmetros como a matéria-prima e transporte têm muito menos impacto pela necessidade de menos quantidade. Embora o azoto tenha uma relevância acentuada, a redução ou quase inexistência de ar comprimido baixa os impactos no processo PBF.

Em conclusão, isto significa que o ponto de divergência entre o processo PBF ter mais ou menos impacto ambiental que o processo CNC, é a necessidade ou ausência de acabamento em CNC.

5. Conclusões

Ao longo deste trabalho, foi explorada a complexidade e relevância do fabrico PBF e CNC, mergulhando nos diversos parâmetros associados à produção de peças para moldes. Esta investigação levou à compreensão das implicações dos parâmetros de fabricação nos impactos ambientais, e a abrir a porta para futuras investigações. Nestas conclusões estão reunidos os principais pontos-chave que se retiram deste trabalho.

5.1. O fabrico PBF tem menor impacto ambiental que CNC?

Depende. Na indústria dos moldes, como a qualidade do acabamento superficial é um fator fundamental nesta área, sendo assim, é sempre necessário acabamento em CNC. No entanto, como foi possível concluir, a linha que separa o maior ou menor impacto ambiental depende exclusivamente da necessidade ou não do posterior acabamento em CNC, situação que para os moldes de injeção é totalmente incontornável. Contudo, também foi evidenciado que a fonte de energia elétrica tem um peso gigante no impacto ambiental global. E isto não exclui a possibilidade de uma fábrica com meios próprios de produção de energia 100% renovável consiga produzir peças com baixo impacto ambiental, sejam elas produzidas por PBF ou CNC.

A necessidade de canais conformáveis nas peças é um fator importante. Esta necessidade, além de todas as questões técnicas, pode reduzir significativamente o tempo de ciclo e consequentemente os custos de produção. O tempo de ciclo tem um impacto ambiental associado, a redução deste tempo reduz naturalmente o impacto. Nesta situação, contabilizando o impacto da produção das peças do molde com o impacto dos ciclos de injeção, pode resultar em menor impacto ambiental.

Para peças sem grandes necessidades estéticas ou cuja rugosidade superficial não seja problema, permitindo que a peça já saia final do fabrico PBF, o impacto ambiental é seguramente mais baixo.

5.2. Qualidade do estudo e respetivos resultados

A opção de escolher realizar um trabalho deste tipo com base em simulações CAM é arriscado, mas permitiu diminuir drasticamente os fatores externos de produção, os quais seriam extremamente difíceis de controlar por este trabalho ser realizado em ambiente industrial. Para tentar contornar essa situação tentou-se incluir o maior número de variáveis para tornar o estudo o mais fidedigno possível.

Os resultados do estudo estão dentro do expectável embora estes não aparentem ser tão favoráveis ao fabrico aditivo como se vê noutros trabalhos na comunidade científica. No entanto há que realçar os vários fatores importantes a considerar neste estudo e nas respetivas conclusões. O lote de peças é um fator importante, e neste estudo, o lote era de de uma peça. Para quantidades maiores, os resultados podem variar.

Em primeiro lugar, é de enorme importância evidenciar que os casos de estudo são de peças reais com características e necessidades de fabricação específicos para moldes de injeção de plásticos. Isto teve várias implicações muitas vezes não observadas em trabalhos académicos. Um desses casos é a necessidade de vários planos de trabalho na maquinação CNC e a necessidade de vários tipos de operações diferentes.

Outro aspeto importante foi a realização de um inventário completo que incluiu todos os parâmetros de produção necessários. Neste grupo inclui-se claramente o ar comprimido, uma forma de energia usada em quase todo o tipo de indústrias. Contudo, nas bibliografias consultadas este fator foi completamente excluído dos fluxos, tendo entrado no inventário já numa fase bastante avançada deste trabalho. E no fim comprovou-se ser um fator com impacto ambiental significativo. Além dos fatores diretamente associados à produção, foram também tidos em consideração os tempos e consumo de programação e *standby*.

Ao realizar este estudo com base em simulações CAM existem sempre erros associados. O principal erro estará no consumo energético, pois não foi medido fisicamente. No entanto, também é importante dizer que o consumo e eficiência das máquinas varia muito dependendo do modelo, operações, material, entre outros. Apesar do consumo ser estimado, segundos os responsáveis pela unidade insutrial de onde foram recolhidos os dados, a diferença para os valores reais ascendem, no máximo, a 20%. Segundo as empresas consultadas, os dados do consumo reais da máquina de CNC tem

um erro de 10 a 20% dos valores mostrados pelo display da máquina (o que foi retirado). Como referido anteriormente a fonte de geração de energia é dos fatores mais importantes. Ter uma fábrica abastecida com eletricidade gerada a partir de fontes 80% renováveis ou com 50% carvão, levará necessariamente a conclusões diferentes.

Ao longo do trabalho foram contabilizados os tempos de produção, mas não foram analisados, pois o objetivo deste estudo não era saber qual o mais rápido, mas permite ter uma noção nas diferenças entre os processos. Existe ainda outro fator importantíssimo, o preço. Apesar dos avanços tecnológicos no FA, no setor dos moldes para injeção de plásticos, a produção CNC é muito mais rápida e barata, e este é ainda um fator crucial numa indústria tão competitiva como esta.

Por último, existe o fator de individualidade. Isto é, as peças foram simuladas a serem produzidas individualmente, o que na realidade da indústria dos moldes raramente acontece. Nos meios convencionais muitas vezes as peças são desbastadas em conjuntos com várias peças do mesmo tipo. Isto permite economizar tempo e matéria-prima, pois consegue-se aproveitar melhor os “espaços mortos” dos blocos de aço. No caso do fabrico em PBF acontece o mesmo, tenta-se preencher o máximo possível a câmara de trabalho. Esta situação foi analisada e comparada no consumo de azoto, mas não se consegue reproduzir tão bem para os outros fatores.

5.3. Trabalhos futuros

A indústria dos moldes usa constantemente múltiplas tecnologias de fabrico para a produção das peças necessárias. A segunda tecnologia mais utilizada no fabrico de moldes é a eletroerosão (penetração e fio). A exclusão desta tecnologia neste estudo deveu-se à complexidade acrescida nos parâmetros e fluxos de trabalho, associados ao processo. Assim, sendo esta uma tecnologia muito usada, faz todo o sentido estudar os impactos ambientais deste método de fabrico.

Outra situação interessante é a criação de uma AICV para peças de fabrico híbrido. Na gama de tecnologias de fabrico híbrido, existem equipamentos capazes de adicionar e remover material sem haver fluxos de trabalho distintos. Seria importante aprofundar os impactos desse tipo de produção e compará-la com outros métodos.

O fluxo de trabalho PBF+CNC era composto pela criação completa da peça em fabrico aditivo e posterior acabamento em CNC. Por experiência própria, há situações em que a ordem de trabalhos é invertida, a primeira etapa é a maquinação convencional e posteriormente é feita a adição de material para responder às mais diversas exigências. A comparação do fluxo de trabalho PBF+CNC com o fluxo de trabalho CNC+PBF trará certamente novas conclusões quanto às abordagens de produção.

5.4. Considerações Finais

O presente trabalho de investigação revela uma análise abrangente e esclarecedora sobre as implicações ambientais destas duas tecnologias. Ambas as abordagens têm suas vantagens e desafios, mas fica claro que o fabrico aditivo tem potencial para reduzir significativamente o impacto ambiental em comparação com o fabrico por CNC.

O desenvolvimento deste trabalho apresentou vários desafios técnicos, e científicos. Apesar de haver um cronograma previamente estabelecido de metas e objetivos, ao qual se tentou ser o mais fiel possível, isso nem sempre aconteceu. O processo mais complexo foi a obtenção dos dados de produção para a produção PBF e CNC. Apesar de ter conseguido com relativa facilidade o CAM para CNC, a obtenção dos dados relativos aos consumos de produção, exigiu um trabalho árduo.

Para o processo PBF, a dificuldade foi encontrar um parceiro disponível para simular a produção das peças. O método já possui maturidade na indústria, no entanto o preço dos equipamentos faz com que não haja muitos equipamentos na região, e na maioria das empresas consultadas não havia disponibilidade para colaborar neste estudo.

Apesar de todas as dificuldades nesta jornada, é com sentimento de dever cumprido e um grande orgulho que divulgo os resultados desta investigação. Estando envolvido profissionalmente na área dos moldes, retiro daqui muita informação valiosa para o meu o meu quotidiano profissional. Há vários anos que mantenho uma postura ativa com os impactos ambientais e sustentabilidade. A escolha deste tema enquadra-se nessa área, de maneira que a nível pessoal também fossem desenvolvidas novas áreas de conhecimento.

Em suma, considerando a crescente preocupação global com as mudanças climáticas e a necessidade de transição para uma economia mais verde, é evidente que o

fabrigo aditivo pode ser um aliado essencial nessa jornada. A indústria deve adotar uma abordagem mais holística, considerando não apenas a eficiência da produção, mas também a sustentabilidade ambiental como um fator-chave para a tomada de decisões.

6. Referências Bibliográficas

- 3DSystems. (08 de 05 de 2023). *DMP Flex 350 - Metal 3D Printer* | 3D Systems. Obtido de 3dsystems: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/dmp-flex-350>
- Alhazmi, H., Almansour, F. H., & Aldhafeeri, Z. (2021). Plastic waste management: a review of existing life cycle assessment studies. *Sustainability*, 5340.
- All3DP. (16 de 04 de 2022). *All3DP*. Obtido de How Much Does a Metal 3D Printer Cost? | All3DP: <https://all3dp.com/2/how-much-does-a-metal-3d-printer-cost/>
- APREN. (31 de 07 de 2023). *APREN*. Obtido de APREN - Produção: <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>
- Asnafi, N. (2021). Application of Laser-Based Powder Bed Fusion for Direct Metal Tooling. *Metals*, 458.
- Bourell, D., Kruth, J., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*, 659-681.
- Bryce, D. M. (1996). *Plastic Injection Molding: Manufacturing Process Fundamentals*. Michigan: Society of manufacturing engineers.
- Conejo, A. N., Birat, J. P., & Dutta, A. (2020). A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. *Journal of environmental management*, 259.
- DeBoer, B., Nguyen, N., Diba, F., & Hosseini, A. (2021). Additive, subtractive, and formative manufacturing of metal. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 413-432.
- Ecoinvent. (31 de 07 de 2023). *Impact Assessment - ecoinvent*. Obtido de Ecoinvent: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/impact-assessment/#1598279945956-2002a3fb-d3a91611227980159166141833340316614291937081661429832917>
- Entezarian, M., Allaire, F., Tsantrizos, P., & Drew, R. (1996). Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders. *JOM Orig.*, 53-55.
- EOS. (06 de 05 de 2023). *Additive Manufacturing solutions & industrial 3D printer by EOS*. Obtido de Metal 3D printer|DMLS Printer|Additive Manufacturing Systems: <https://www.eos.info/en/industrial-3d-printer/metal>
- Eras, J., Gutiérrez, A., Santos, V., & Ulloa, M. (2020). Energy management of compressed air systems. Assessing the production and use of compressed air in industry. *Energy*, 118662.
- EU. (31 de 07 de 2023). *Developer Environmental Footprint (EF)*. Obtido de European Platform on LCA | EPLCA: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/EF_archive.xhtml
- Fan, Z., & Friedmann, S. J. (2021). Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, 829-862.

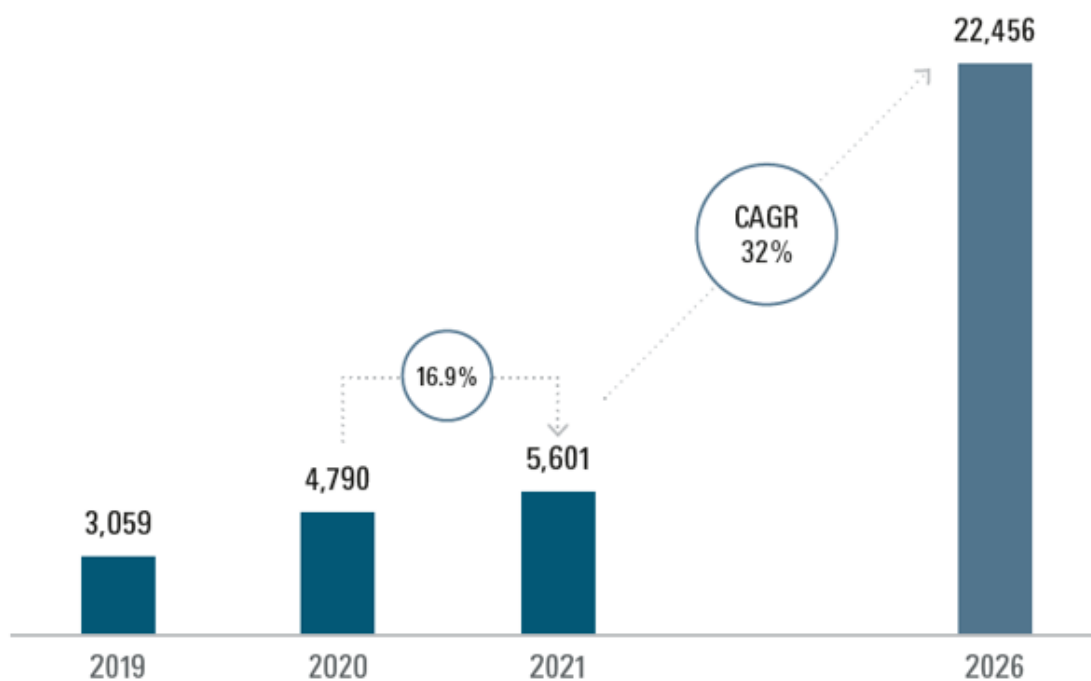
- FonMag. (01 de 2023). *Fiercely contested and full of opportunities*, 15-16. Alemanha.
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 1573-1587.
- Garniwa, I., & Herdiansyah, H. (2018). CO2 Emission Reduction from Solar Power Plant in Rural Area (Study of Solar Power Plant in Sukaraksa Village, Tanjung Sari Sub-District, Bogor Regency). *In E3S Web of Conferences*, 05017.
- GE. (07 de 05 de 2023). *DMLM Machines*. Obtido de <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines>
- Goodship, V. (2004). *ARBURG practical guide to injection moulding*. UK: Smithers Rapra.
- Ibaraki, S., Sawada, M., Matsubara, A., & Matsushita, T. (2010). Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools. *Precision engineering*, 387-398.
- ISO. (13 de 05 de 2023). *iso.org*. Obtido de ISO 14040:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- Kanbur, B. B., Zhou, Y., Shen, S., Wong, K. H., Chen, C., Shocket,, A., & Duan, F. (2022). Metal additive manufacturing of plastic injection molds with conformal cooling channels. *Polymers*, 424.
- Kaufmann, A. (1974). *USA Patente N° 3826598A*.
- Khosravani, M. R., & Nasiri, S. (2020). Injection molding manufacturing process: Review of case-based reasoning applications. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 847-864.
- Kirchheim, A., Katrodiya, Y., Zumofen, L., Ehrig, F., & Wick, C. (2021). Dynamic conformal cooling improves injection molding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107-116.
- Kruzhanov, V., & Arnhold, V. (2011). Energy consumption in powder metallurgical manufacturing. *Powder Metallurgy*, 14-21.
- Le, T. H., Pham, V. B., & Tien, D. H. (2022). Surface Finish Comparison of Dry and Coolant Fluid High-Speed Milling of JIS SDK61 Mould Steel. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8023-8028.
- Li, C., Xiao, Q., Tang, Y., & Li, L. (2016). A method integrating Taguchi, RSM and MOPSO to CNC machining parameters optimization for energy saving. *Journal of Cleaner Production*, 263-275.
- Liang, S., Du, Y., Liu, Q., Li, J., Liu, Z., Xu, Y., . . . Hong, H. (2023). Wastewater reuse and recycling of the steel industry in China: history, current situation, and future perspectives. *Water Reuse*.
- Liu, W., Deng, K., Wei, H., Zhao, P., Li, J., & Zhang, Y. (2021). A decision-making model for comparing the energy demand of additive-subtractive hybrid manufacturing and

- conventional subtractive manufacturing based on life cycle method. *Journal of Cleaner Production*, 127795.
- Liu, Z., Islam, F., Era, I. Z., & Grandhi, M. (2023). LCA-based environmental sustainability assessment of hybrid additive manufacturing of a turbine blade. *Green Manufacturing Open*, 2:1.
- Liu, Z., Jiang, Q., Cong, W., Li, T., & Zhang, H. C. (2018). Comparative study for environmental performances of traditional manufacturing and directed energy deposition processes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2273-2282.
- Marques, s., Souza, A., & Yadroitsau, I. (2015). Parâmetros do processo de fabricação por fusão seletiva a laser–Selective Laser Melting (SLM). *Revista Ferramental*, 1-14.
- Matos, A., Pouzada, A. S., Ferreira, E. C., Soares, R., Campante, H., Pontes, A. J., & Brito, A. M. (2003). *Manual do Projetista para moldes de injeção de plástico*. Marinha Grande: Centimfe.
- Mecheter, A., Tarlochan, F., & Kucukvar, M. (2023). A Review of Conventional versus Additive Manufacturing for Metals: Life-Cycle Environmental and Economic Analysis. *Sustainability*, 12299.
- Moghimiana, P., Poiriéb, T., Habibnejad-Korayem, M., Zavalab , J. A., Kroegerb, J., Marionb , F., & Laroucheb, F. (2021). Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys. *Additive Manufacturing*.
- Mohsin, M. (2018). Mechanical properties of SLM-titanium materials for biomedical applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 17906-17913.
- Nagarajan, B., Hu, Z., Song, X., Zhai, W., & Wei, J. (2019). Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and. *Engineering*, 702–720.
- Norgate, T. E., Jahanshahi, S., & Rankin, W. J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, 838-848.
- ODS. (26 de 04 de 2023). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o BCSD Portugal*. Obtido de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: <https://www.ods.pt/>
- Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing. *Polymers*, 598.
- Paris, H., Mokhtarian, H., Coatanéa, E., Museau, M., & Ituarte, I. (2016). Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals*, 29-32.
- Perez, H., Diez, E., Perez, J., & Vizan, A. (2013). Analysis of machining strategies for peripheral milling. *Procedia engineering*, 573-581.
- Relvas, C. (2002). *Controlo Numérico Computorizado*. Porto: Publindustria Edições Técnicas.
- Sahoo, K., Bergman, R., & Khatri, P. (2021). Cradle-to-Grave Life-Cycle Assessment of Cellulosic Fiberboard. *Recent Progress in Materials*, 1-28.

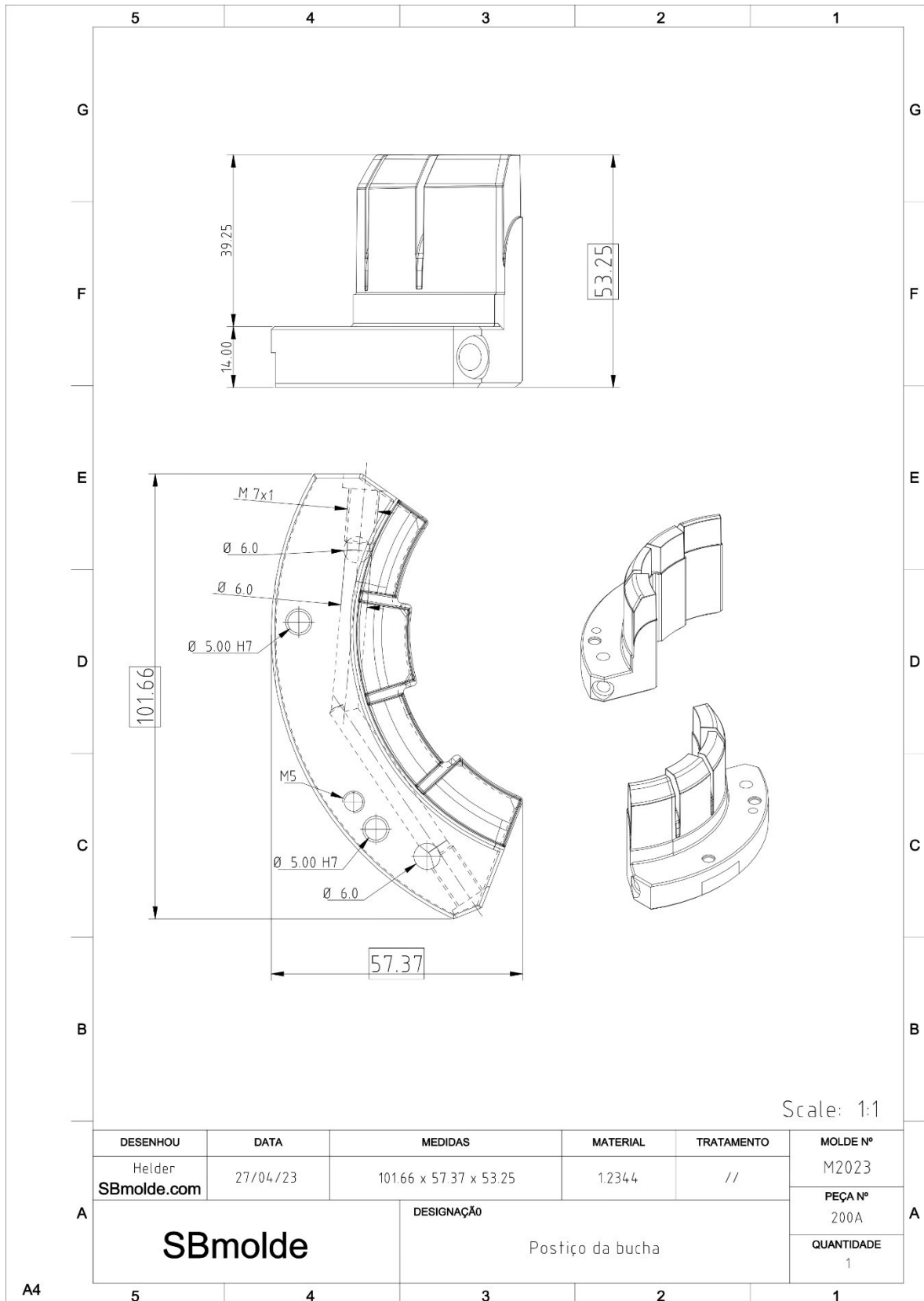
- Schade, C. T., Murphy, T. F., Bernhard, G., Lawley, A., & Doherty, R. (2018). Titanium alloy development for AM utilising gas atomization. *International Journal of Powder Metallurgy*, 54.
- Simchi, A., Petzoldt, F., & Pohl, H. (2003). On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 319–328.
- SLM Solutions. (11 de 03 de 2019). *Bugatti Develops and Builds Functional Components for High-Performance Vehicles with the SLM® Additive Manufacturing Technology from SLM Solutions*. Obtido de SLM Solutions: <https://www.slm-solutions.com/company/news/detail/bugatti-develops-and-builds-functional-components-for-high-performance-vehicles-with-the-slmr-additive-manufacturing-technology-from-slm-solutions/>
- SLMSolutions. (07 de 05 de 2023). *High-Quality Industrial Metal 3D Printers*. Obtido de SLM Solutions: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/>
- Smid, P. (2008). *CNC Programming Handbook*. New York: Industrial Press Inc.
- TRUMPF. (06 de 05 de 2023). *Additive production systems*. Obtido de TRUMPF: https://www.trumpf.com/en_CA/products/machines-systems/additive-production-systems/
- Wurtsbaugh, W. A., Paerl, H. W., & Dodds, W. K. (2019). Nutrients, eutrophication and harmful algal blooms along the freshwater to marine continuum. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1373.
- Xu, X. W., & He, Q. (2004). Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC. *Robotics and Computer-Integrated*, 101-109.
- Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., & Wiener, S. (2017). *Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production*. Springer.
- Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*.
- Yu, K. H., Zhang, Y., Li, D., Montenegro-Marin, C. E., & Kumar, P. M. (2021). Environmental planning based on reduce, reuse, recycle and recover using artificial intelligence. *Environmental Impact Assessment Review*, 106492.
- Zhang, B., Dembinski, L., & Coddet, C. (2013). The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder. *Materials Science and Engineering: A*, 21-31.
- Zhang, J., Song, B., Wei, Q., Bourell, D., & Shia, Y. (2019). A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology*, 270-284.

7. Anexos

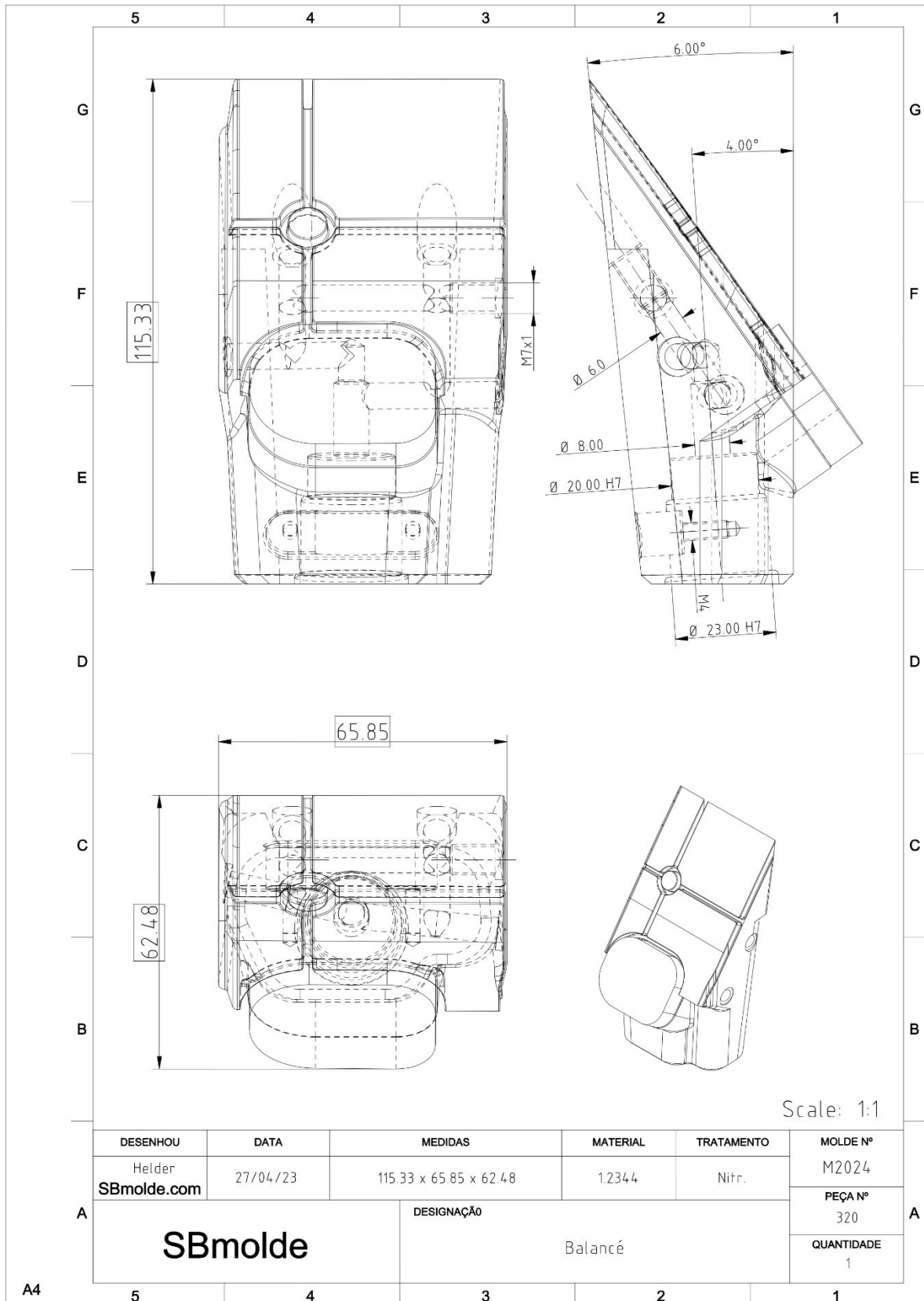
Anexo 1: Tendência expectável do consumo do mercado de pós metálicos para fabrico aditivo (FonMag, 2023)



Anexo 2: Desenho da peça do CE1



Anexo 3: Desenho da peça do CE2



Anexo 4: Dados CAM para fabrico convencional do CE1

Strategy	Tool position	Tool type	Assembly name	Internal code 1	Presetting	Tool diameter (D x R)	Side allowance	Bottom allowance	Spindle speed (n)	Feedrate (Vf)	Coolant	Min Z	Total Length	Feed time
Waveform roughing	7	Endmill	ISO50	M30200CN	70	20x0	0.3	0.1	6000	4000	Jet	-55	11466.1064	00:02:51
Planar	5	Bullnose	Ass_13	6-6	65	6x0.5	0.5	0	5000	2500	None	-39.252	943.2428	00:00:22
Waterline	6	Bullnose	Ass_14	10-10	65	8x0.5	0	0	6000	3000	None	-53.765	124259.7007	00:41:25
Morph	2	Ballnose	Ass_11	6-6	30	6x3	0	0	6000	2000	None	-0.1315	6060.9114	00:03:01
Waterline rest	18	Bullnose	-	-	80	1.5x0.2	0.02	0.02	6000	2000	None	-32.499	33257.4071	00:16:37
Waterline	29	Ballnose	Holder G	6-4	10	1.5x0.75	0	0	10000	4000	None	-53.5	16070.6855	00:04:01
Sax	28	Ballnose	Holder G	6-4	20	1.5x0.75	0	-	10000	4000	None	-53.2803	16421.0862	00:04:06
Drill	19	Spot drill	-	-	0	12x0	-	-	1592	32	None	-40.9838	11.1962	00:00:20
Drill	20	Drill	-	D100550CC	69	5x0	-	-	1000	200	None	-55.2518	36	00:00:10
Drill C	19	Spot drill	-	-	0	12x0	-	-	1592	32	None	-40.4065	3.1547	00:00:05
Drill	21	Drill	Drilling	D10060CC	75	6x0	-	-	3183	64	None	-48.9838	11.7321	00:00:10
Drill	22	Tap	-	T00050CN	0	5x0	-	-	955	764	None	-48.6485	11.3967	00:00:00
Profiling Face de Aperto	27	Facemill	ISO40	M10500AN	80	20x0	0	0	2500	1000	None	-53.2415	232.3338	00:00:13
Drill	26	Flat bottom drill	ISO40	-	50	10x0	-	-	2122	42	None	47.6299	5.2196	00:00:07
Drill	24	Spot drill	Ass_100	-	30	8x0	-	-	2387	48	None	46.6195	3.0104	00:00:03
Drill	21	Drill	Drilling	D10060CC	75	6x0	-	-	1500	200	None	-7.1022	56.7321	00:00:17
Drill	25	Tap	Tapping	-	56	7x0	-	-	682	512	None	33.6299	19.2196	00:00:02
Drill	26	Flat bottom drill	ISO40	-	50	10x0	-	-	2122	42	None	46.4376	5.4858	00:00:07
Drill	24	Spot drill	Ass_100	-	30	8x0	-	-	2387	48	None	45.4272	3.0104	00:00:03
Drill	21	Drill	Drilling	D10060CC	75	6x0	-	-	3183	64	None	-4.5513	52.9889	00:00:49
Drill	25	Tap	Tapping	-	56	7x0	-	-	682	512	None	32.4376	19.4858	00:00:02
Roughing	9	Bullnose	-	M90260CN	77.5	20x1	0.1	0.1	4000	3000	None	-12.501	14352.1996	00:04:47
Planar	5	Bullnose	Ass_13	6-6	65	6x0.5	0	0	5000	2500	None	-10	1160.92	00:00:27
Drill	19	Spot drill	-	-	0	12x0	-	-	1592	32	None	-10.866	2.866	00:00:05
Drill	21	Drill	Drilling	D10060CC	75	6x0	-	-	3183	64	None	-19.7321	11.7321	00:00:10
Chamfering	30	Chamfering	-	M60100C6	0	10x0	0	0	3820	1284	None	-11.5	283.2981	00:00:13
Total project time														01:20:49

Anexo 5: Dados CAM para fabrico convencional do CE2

Strategy	Tool position	Tool type	Assembly name	Internal code 1	Presetting	Tool diameter (D x R)	Side allowance	Bottom allowance	Spindle speed (n)	Feedrate (Vf)	Coolant	Min Z	Total Length	Feed time
Roughing	9	Bullnose	ISO40	M90260CN	130	16x1	0,3	0,3	4000	2000	None	-116	66778.4833	00:33:23
Waterline	18	Bullnose	ISO40	M90260CN	130	10x1	0	0	4000	2000	None	-121	293151.9972	02:26:34
Waterline rest	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	-43.1239	21513.5679	00:07:10
Planar	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	0	719.0227	00:00:14
Drill	19	Centre drill	-	D00100CE	0	10x0	-	-	1910	38	None	-3.5889	6,5	00:00:10
Drill	20	Drill	-	D10080CC	0	8x0	-	-	2387	48	None	-48.3709	51.282	00:01:04
Roughing	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0,25	0,25	6000	3000	None	-29.221	16455.3535	00:05:29
Waterline	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	-29.541	15227.5087	00:05:04
Waterline	21	Bullnose	Ass_10	6-4	36	6x0.5	0	0	8000	3000	None	-9.276	7008.6319	00:02:20
Drill	22	Drill	-	D100550CC	69	3.25x0	-	-	1000	200	None	-22.3289	30.1053	00:00:09
Drill	23	Tap	-	T00040CN	0	4x0	-	-	1194	836	None	-21.3763	28.2	00:00:02
Roughing	7	Bullnose	-	M30200CN	100	20x1.5	0,3	0,3	5000	3000	None	-95.5	55160.8422	00:18:23
Waterline	24	Bullnose	ISO40 Tapered Est	-	20	1.5x0.3	0	0	16000	4000	None	-10	45758.0451	00:11:26
Raster	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	0.0679	2768.0227	00:00:55
Raster C	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	-2.4622	12222.9252	00:04:04
Drill	25	Flat bottom drill	-	-	0	9x0	-	-	2122	42	None	30.1576	3.8944	00:00:05
Drill	29	Centre drill	-	D00060CL	0	6x0	-	-	3183	64	None	28.302	4.25	00:00:03
Drill	28	Drill	-	D10060CC	0	6x0	-	-	3183	64	None	-15.448	49.5	00:00:46
Drill	25	Flat bottom drill	-	-	0	9x0	-	-	2122	42	None	29.4873	3.8095	00:00:05
Drill	19	Centre drill	-	D00100CE	0	10x0	-	-	1910	38	None	27.5468	4.25	00:00:06
Drill	28	Drill	-	D10060CC	0	6x0	-	-	3183	64	None	-3.7032	37	00:00:34
Drill	25	Flat bottom drill	-	-	0	9x0	-	-	2122	42	None	33.5505	3.4798	00:00:04
Drill	19	Centre drill	-	D00100CE	0	10x0	-	-	1910	38	None	31.2802	4.25	00:00:06
Drill	28	Drill	-	D10060CC	0	6x0	-	-	3183	64	None	5.0302	32	00:00:29
Drill	25	Flat bottom drill	-	-	0	9x0	-	-	2122	42	None	-30.6829	19.0264	00:00:27
Drill	25	Flat bottom drill	-	-	0	9x0	-	-	2122	42	None	-30.1197	18.4632	00:00:26
Drill	29	Centre drill	-	D00060CL	0	6x0	-	-	3183	64	None	-31.1565	7	00:00:06
Drill	28	Drill	-	D10060CC	0	6x0	-	-	3183	64	None	-57.6565	30	00:00:28
Drill	28	Drill	-	D10060CC	0	6x0	-	-	3183	64	None	-68.6565	41	00:00:38
Total project time														04:01:02

Anexo 6: Dados CAM para acabamento CNC do fabrico aditivo do CE1

Strategy	Tool position	Tool type	Assembly name	Internal code 1	Presetting	Tool diameter (D x R)	Side allowance	Bottom allowance	Spindle speed (n)	Feedrate (Vf)	Coolant	Min Z	Total Length	Feed time
Planar	5	Bullnose	Ass_13	6-6	65	6x0.5	0.5	0	5000	2500	None	-39.252	943.2428	00:00:22
Waterline	6	Bullnose	Ass_14	10-10	65	8x0.5	0	0	6000	3000	None	-53.765	124259.7007	00:41:25
Morph	2	Ballnose	Ass_11	6-6	30	6x3	0	0	6000	2000	None	-0.1315	6060.9114	00:03:01
Waterline rest	18	Bullnose	-	-	80	1.5x0.2	0.02	0.02	6000	2000	None	-32.499	33257.4071	00:16:37
Waterline	29	Ballnose	Holder G	6-4	10	1.5x0.75	0	0	10000	4000	None	-53.5	16070.6855	00:04:01
Sax	28	Ballnose	Holder G	6-4	20	1.5x0.75	0	-	10000	4000	None	-53.2803	16421.0862	00:04:06
Drill	20	Drill	-	D100550CC	69	5x0	-	-	1000	200	None	-55.2518	36	00:00:10
Drill	22	Tap	-	T00050CN	0	5x0	-	-	955	764	None	-48.6485	11.3967	00:00:00
Planar	5	Bullnose	Ass_13	6-6	65	6x0.5	0	0	5000	2500	None	-10	1160.92	00:00:27
Chamfering	30	Chamfering	-	M60100C6	0	10x0	0	0	3820	1284	None	-11.5	283.2981	00:00:13
Total project time														01:10:27

Anexo 7: Dados CAM para acabamento CNC do fabrico aditivo do CE2

Strategy	Tool position	Tool type	Assembly name	Internal code 1	Presetting	Tool diameter (D x R)	Side allowance	Bottom allowance	Spindle speed (n)	Feedrate (Vf)	Coolant	Min Z	Total Length	Feed time
Waterline	18	Bullnose	ISO40	M90260CN	130	10x1	0	0	4000	2000	None	-121	293151.9972	02:26:34
Waterline rest	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	-43.1239	21513.5679	00:07:10
Planar	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	0	719.0227	00:00:14
Waterline	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	-29.541	15227.5087	00:05:04
Waterline	21	Bullnose	Ass_10	6-4	36	6x0.5	0	0	8000	3000	None	-9.276	7008.6319	00:02:20
Drill	22	Drill	-	D100550CC	69	3.25x0	-	-	1000	200	None	-22.3289	30.1053	00:00:09
Drill	23	Tap	-	T00040CN	0	4x0	-	-	1194	836	None	-21.3763	28.2	00:00:02
Waterline	24	Bullnose	ISO40 Tapered Est	-	20	1.5x0.3	0	0	16000	4000	None	-10	45758.0451	00:11:26
Raster	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	0.0679	2768.0227	00:00:55
Raster C	5	Bullnose	Ass_13	6-6	70	6x0.5	0	0	6000	3000	None	-2.4622	12222.9252	00:04:04
Total project time														02:58:01

Anexo 8: Especificações do HakuFluid® 150



Harmony in
Chemistry

Emissão: 14/10/2021

Versão: 1

Ficha de dados de segurança
conforme REGULAMENTO (UE) 2020/878 DA COMISSÃO

HAKUFLUID 150
62000150

SECÇÃO 6: MEDIDAS EM CASO DE FUGA ACIDENTAL (continuação)

6.2 Precauções a nível ambiental:

Produto não classificado como perigoso para o meio ambiente. Manter afastado dos esgotos, das águas superficiais e subterrâneas

6.3 Métodos e materiais de confinamento e limpeza:

Recomenda-se:

Absorver o derrame através de areia ou absorvente inerte e trasladar para um local seguro. Não absorver com serradura ou outros absorventes combustíveis. Para qualquer consideração relativa à eliminação, consultar a epígrafe 13.

6.4 Remissão para outras secções:

Veja as secções 8 e 13.

SECÇÃO 7: MANUSEAMENTO E ARMAZENAGEM

7.1 Precauções para um manuseamento seguro:

A.- Precauções para a manipulação segura

Cumprir a legislação vigente em matéria de prevenção de riscos laborais quanto ao manuseamento de cargas. Manter ordem, limpeza e eliminar por métodos seguros (epígrafe 6).

B.- Recomendações técnicas para a prevenção de incêndios e explosões.

Produto não inflamável em condições normais de armazenamento, manipulação e uso. É recomendado que o produto seja transvazado a velocidades lentas para evitar a geração de cargas electrostáticas que possam afectar produtos inflamáveis. Consultar a epígrafe 10 sobre condições e matérias que devem ser evitadas.

C.- Recomendações técnicas para prevenir riscos ergonómicos e toxicológicos.

Não comer nem beber durante o seu manuseamento, lavando as mãos posteriormente com produtos de limpeza adequados.

D.- Recomendações técnicas para prevenir riscos meio ambientais.

É recomendado dispor de material absorvente nas imediações do produto (ver epígrafe 6.3)

7.2 Condições de armazenagem segura, incluindo eventuais incompatibilidades:

A.- Medidas técnicas de armazenamento

Tempo máximo: 12 meses

B.- Condições gerais de armazenamento.

Evitar fontes de calor, radiação, electricidade estática e o contacto com alimentos. Para informação adicional, ver epígrafe 10.5

7.3 Utilização(ões) final(is) específica(s):

Excepto as indicações já especificadas, não é necessário realizar nenhuma recomendação especial quanto às utilizações deste produto.

SECÇÃO 8: CONTROLO DA EXPOSIÇÃO/PROTECÇÃO INDIVIDUAL

8.1 Parâmetros de controlo:

Substâncias cujos valores limite de exposição ocupacional devem ser controladas no ambiente de trabalho:

Não existem valores limites ambientais para as substâncias que constituem o produto.

DNEL (Trabalhadores):

Identificação		Curta exposição		Longa exposição	
		Sistémica	Locais	Sistémica	Locais
2,2'-(metilimino)dietanol CAS: 105-59-9 EC: 203-312-7	Oral	Não relevante	Não relevante	Não relevante	Não relevante
	Cutânea	Não relevante	Não relevante	5,6 mg/kg	Não relevante
	Inalação	Não relevante	Não relevante	7,9 mg/m ³	Não relevante

DNEL (População):

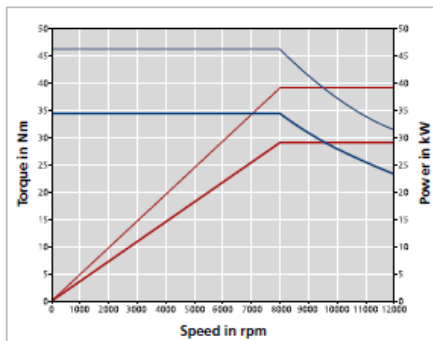
- CONTINUA NA PÁGINA SEGUINTE -

Anexo 9: Dados sobre o consumo de energia da CNC Grob G350

GROB motorized spindles

Besides the broad range of spindles, the motorized spindles designed and produced by GROB itself are the preferred choice for optimized process design. These are optimally matched to the G-modules and have optimized quality features:

- Shortest ramp-up times
- Good accessibility & maintenance
- Suitable for all standard cutting fluids
- Universal applicability
- Best mechanical characteristics
- Durability



Motorized spindle 47 Nm, 12,000 rpm (standard)	
Tool interface	HSK-A63
Spindle bearing Diameter at front bearing [mm]	70
Speed n_{max} [rpm]	12,000
Max. drive power at 100%/40% duty cycle [kW]	29/39
Max. spindle torque at 100%/40% duty cycle [Nm]	34.6/46.6

Anexo 10: Dados sobre o consumo de energia da TruPrint3000



Valores de ligação/consumo de potência

Nota

Oscilações de tensão inadmissíveis interferem com o bom funcionamento da máquina e reduzem a sua potência. É necessário um estabilizador de tensão.

Tensão de medição	Frequência
400 V ± 10 % (IEC)	50 Hz ± 1 %
460 V $+10$ % / -5 % ⁴ (NEC).	60 Hz ± 1 %

Tensão de medição e frequência

Tab. 2-16

	Máquina	Unidade de refrigeração externa (versão para climas tropicais)	Estação de desempacotamento	Estação de peneiração	
Valor de ligação IEC (consumo de potência fictícia)	7.5	3.9 (5.5)	1.4	1.1	kVA
Valor de ligação NEC (consumo de potência fictícia)	-	5.1 (7.5)	-	-	
Protecção fusível (IEC): ▪ a 400 V, 50 Hz ▪ M (tipo de fusível)	32	16 (16)	16	16	A
Protecção fusível (NEC): ▪ a 460 V, 60 Hz ▪ M (tipo de fusível)	32	16 (16)	16	15	
Corrente máx. com 400 V	31	9.4 (12.4)	3	3	
Corrente máx. com 460 V	29	9.9 (13.4)	3	6	

Valores de ligação da TruPrint 3000 e periférico

Tab. 2-17

	Consumo de potência	
Consumo médio de potência na produção	4	kW

Consumo de potência da TruPrint 3000

Tab. 2-18

	Consumo de potência	
Consumo médio de potência na produção	2	kW

Consumo de potência da estação de desempacotamento

Tab. 2-19

4 A especificação corresponde às normas do American National Standard (ANSI), C84.1-1989, Tabela 1 "Gama de tensão A".

Anexo 11: Dados sobre o consumo de ar comprimido da TruPrint3000

5. Alimentação de ar comprimido

Símbolo no plano de instalação



Fig. 11140

- Ligação de ar comprimido**
- A ligação de ar comprimido na máquina pode ser feita com tubos flexíveis ou rígidos.
 - A conexão da máquina é feita através de um conector de ficha de 12 mm.
 - A conexão da estação de peneiração, estação de desempacotamento e transportador de vácuo é efectuada através de um acoplamento rápido de ar comprimido DN 7.2.

Valores de ligação e consumo

Pressão de rede necessária	-	-	6 (87) a 10 (145)	bar (psi)
Consumo de ar comprimido (volume em condições normais; caudal necessário de acordo com norma ISO 1217 ou DIN 1945)	Máquina	Min.	≥0.6 (0.35)	m ³ /h (cfm)
		∅	0.4 (0.24)	
	Transportador de vácuo	Min.	520	l/min
	Estação de desempacotamento	Min.	100	l/min
	Estação de peneiração	Min.	540	l/min

Valores de ligação do abastecimento de ar comprimido

Tab. 2-13

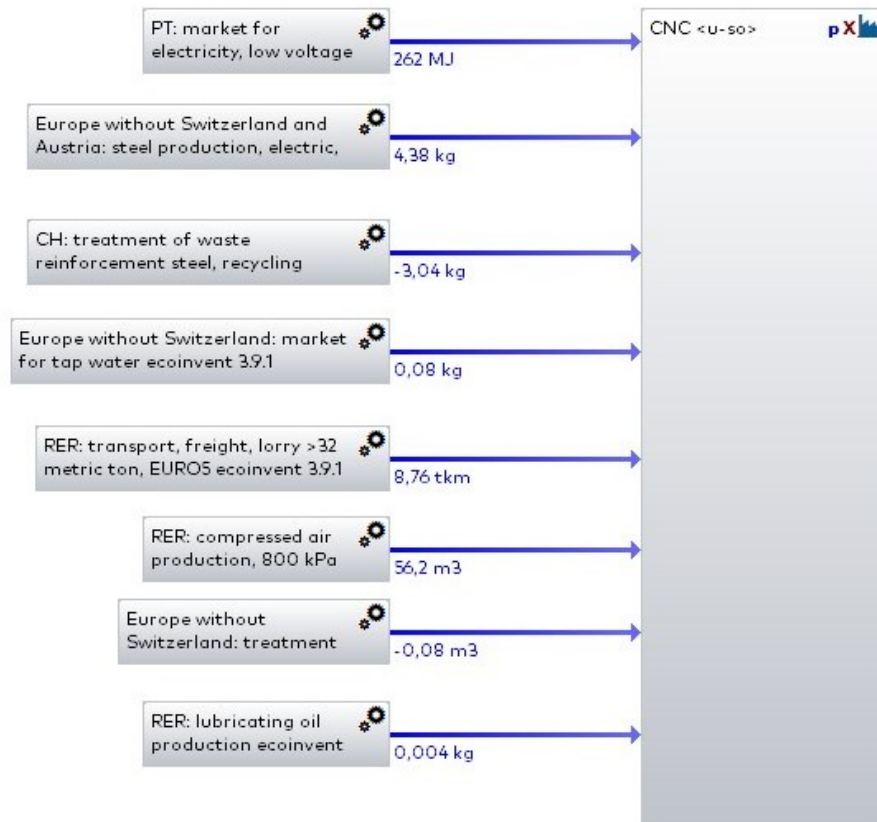
Condutores da máquina

Largura nominal mínima das condutas	½" (DN13)	-
Comprimento da canalização	máx. 50 (164) (devido à formação de água de condensação)	m (ft)
Diâmetro do condutor de circuito fechado	mín. 1" (26 mm)	-
Comprimento do tubo de ligação do condutor de circuito fechado ao ponto de conexão da máquina	máx. 5 (16)	m (ft)

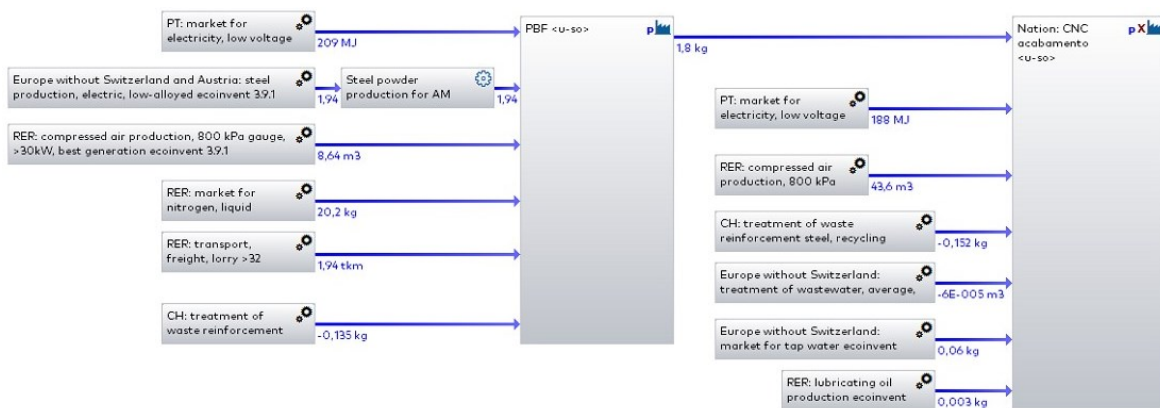
Condutores da máquina

Tab. 2-14

Anexo 12: Modelo do AICV da produção CNC do CE2



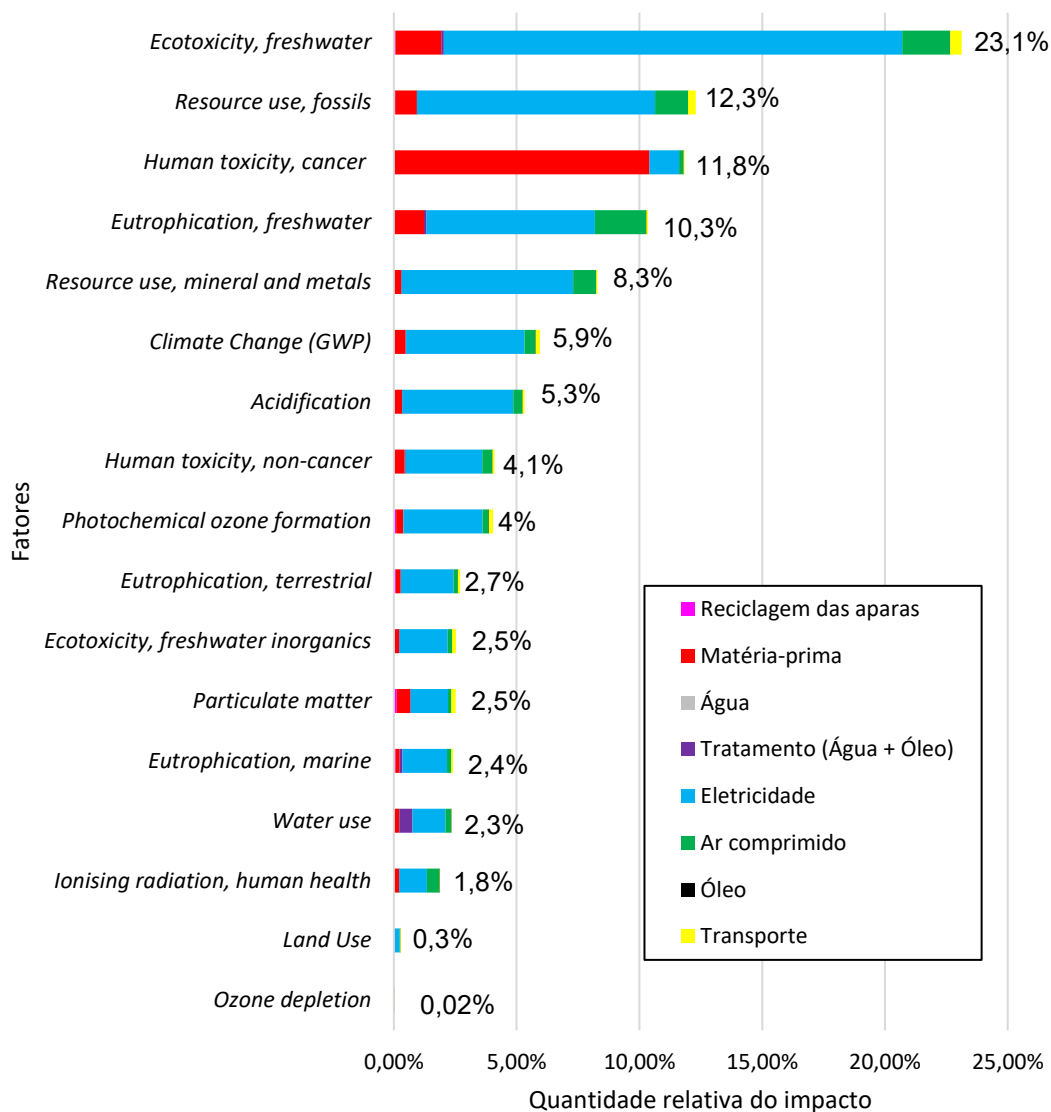
Anexo 13: Modelo do AICV da produção PBF+CNC do CE2



Anexo 14: Tabela do potencial de aquecimento global dos vários gases (Garniwa & Herdiansyah, 2018).

No	Type	Chemical Formula	GWP 100-year
1	Carbon dioxide	CO ₂	1
2	Methane	CH ₄	28
3	Nitrogen oxide	N ₂ O	265
4	CFC-11	CCl ₃ F	4,660
5	CFC-12	CCl ₂ F ₂	10,200
6	CFC-13	CClF ₃	13,900
7	CFC-113	CCl ₂ FCClF ₂	5,820
8	CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	8,590
9	CFC-115	CClF ₂ CF ₃	7,670

Anexo 15: Valores normalizados dos impactos ambientais na produção CNC no CE2.



Anexo 16: Valores normalizados dos impactos ambientais na produção PBF+CNC no CE2.

