

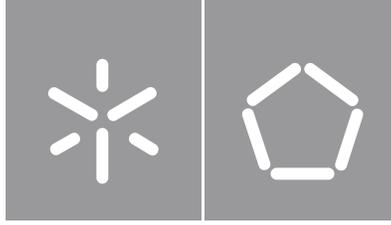


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Tiago Manuel da Silva Pinheiro

## **Aplicação do Design Heurístico no Robô de Manufatura Aditiva**





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Tiago Manuel da Silva Pinheiro

## **Aplicação do Design Heurístico no Robô de Manufatura Aditiva**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Engenharia de Produto

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)  
**Professor Doutor António José Vilela Pontes**  
**Professor Doutor Álvaro Miguel do Céu Gramaxo**  
**Oliveira Sampaio**

## **Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeite as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não prevista no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do reportório da UM da universidade do Minho.



**Atribuição-NãoComercial-SemDerivações**

**CC BY-NC-ND**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

## **Agradecimentos**

Muitas pessoas contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta dissertação de diversas formas. A todas elas tenho de expressar a minha gratidão, realçando:

Em primeiro lugar, ao Artur, ao professor Fernando e ao Afonso que foram as pessoas que mais orientações me deram a nível prático, para o desenvolvimento e construção deste trabalho.

Em segundo lugar, aos meus orientadores, Professor Álvaro M. Sampaio, e ao Professor António J. Pontes, pelo apoio, orientação e disponibilidade. Sem eles, com certeza este trabalho teria muitas mais dificuldades em desenvolver-se e concretizar-se.

Ao DONE Lab, onde tive a possibilidade de realizar este trabalho.

Agradecer á minha família, em especial aos meus pais, pois foram eles que sempre me apoiaram nesta grande jornada no ensino superior.

Á minha namorada também devo um grande agradecimento, pois foi ela que nunca me deixou desistir, e que sempre me apoiou nesta grande jornada.

Por último e não menos importante agradecer aos meus amigos, pelo companheirismo que sempre tivemos, sem dúvida os melhores.

## **Declaração de Integridade**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho

## **Resumo**

### **Aplicação de design heurístico no robô de fabrico aditivo**

O processo de fabricação aditiva de grande dimensão transformou a produção de protótipos ao viabilizar a criação de peças complexas e personalizadas com notável eficiência, acabamento e precisão. Para o sucesso deste método de fabrico, as peças padrões desempenham um papel essencial, pois são elas que conferem uma maior qualidade na produção, como será mais amplamente demonstrado neste trabalho.

Divergindo dos métodos tradicionais, a fabricação aditiva deposita material camada por camada a partir de diversas substâncias, como por exemplo plásticos e metais. Este método oferece vantagens significativas em termos de design e personalização, tornando-se uma opção atrativa para diversos setores.

A introdução de materiais mais avançados, como titânio e alumínio, no processo de fabrico aditivo de grande dimensão é um fator impulsionador, expandindo as aplicações industriais. Contudo, o êxito da fabricação aditiva não se resume à impressão de peças individuais. Este processo pode ser também especialmente útil na cooperação integral do processo de produção, incluindo alguns sistemas automatizados de robôs industriais.

A introdução de peças padrão no processo contribui para a qualidade das peças e para a calibração dos robôs que são usados nestes processos, assegurando que estas sejam produzidas com a devida consistência e qualidade, conforme o projetado.

Introduzindo nestes processos o design *heuristics*, a fabricação aditiva evidencia a importância de princípios e diretrizes de design/projeto que promovam a eficiência, precisão e consistência ao longo do processo de fabricação industrial, com benefícios destacados em diversos setores, como será demonstrado

**Palavras Chaves:** design heuristics, fabricação aditiva, impressão, robôs

## **Abstract**

### **Application of design heuristics on robotic additive manufacturing**

The large-scale additive manufacturing process has transformed prototype production by making it possible to create complex, customized parts with remarkable efficiency, finish and precision. Standard parts play an essential role in the success of this manufacturing method, as they are the ones that provide the highest quality in production, as will be demonstrated more extensively in this work.

Unlike traditional methods, additive manufacturing deposits material layer by layer from various substances, such as plastics and metals. This method offers significant advantages in terms of design and customization, making it an attractive option for many sectors.

The introduction of more advanced materials, such as titanium and aluminum, into the additive manufacturing process on a large scale is a driving factor, expanding industrial applications. However, the success of additive manufacturing is not just about printing individual parts. This process can also be especially useful in the integral cooperation of the production process, including some automated industrial robot systems.

The introduction of standard parts into the process contributes to the quality of the parts and the calibration of the robots that are used in these processes, ensuring that they are produced with the right consistency and quality, as designed.

By introducing design heuristics into these processes, additive manufacturing highlights the importance of design principles and guidelines that promote efficiency, precision and consistency throughout the industrial manufacturing process, with outstanding benefits in various sectors, as will be demonstrated.

**Keywords:** additive manufacturing, design heuristics, printing, robots

# Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Introdução ao DONE lab.....	2
1.1.1	Fabrico Digital .....	2
1.1.2	Projeto de Engenharia.....	2
1.1.3	Investigação e Desenvolvimento .....	3
1.2	Metodologia .....	4
2	Estado da Arte .....	5
2.1	O Processo Heurístico no Fabrico Robótico.....	5
2.2	Processos Heurísticos e a sua Relevância na Otimização de Produção.....	5
2.3	Heurísticas de Design na Ajuda da Fabricação Robótica (BAAM) .....	6
2.3.1	Otimização de Geometria .....	6
2.3.2	Redução de Peso e Material .....	7
2.3.3	Montagem e Integração de Peças.....	8
2.3.4	Personalização e Customização.....	8
2.3.5	Minimização de Falhas e Defeitos.....	9
2.4	Conclusão.....	10
3	Fabrico Aditivo .....	11
3.1	Processos de Fabrico Aditivo .....	12
3.1.1	Material Extrusion (FDM).....	13
3.1.2	Power Bed Fusion (SLS) .....	13
3.1.3	Vat Photopolymerization.....	13
3.1.4	Material Jetting.....	14
3.1.5	Blinder Jetting .....	14
3.1.6	Sheet Lamination.....	15
3.1.7	Directed Energy Deposition .....	15

3.2	Vantagens e Desvantagens do Fabrico Aditivo.....	16
3.2.1	Vantagens .....	16
3.2.2	Desvantagens.....	16
3.3	Conclusão.....	17
4	Fabrico Aditivo em Grandes Dimensões.....	18
4.1	Big Area Additive Manufacturing (BAAM).....	18
4.2	Robôs de Fabrico Aditivo .....	19
4.2.1	Tipos de Robôs de Fabrico Aditivo.....	20
4.2.1.1	Robôs Cartesianos .....	21
4.2.1.2	Robôs Articulados.....	21
4.2.1.3	Robôs SCARA.....	22
4.2.1.4	Robôs Delta .....	22
4.2.1.5	Robôs Cooperativos e não cooperativos .....	23
4.2.1.6	KUKA R120 R3100 .....	24
4.3	Software de Programação Paramétrica.....	25
4.3.1	Rhinoceros .....	25
4.3.2	Grasshopper.....	26
4.3.3	Comunicação Máquina-Robô.....	27
4.3.3.1	KUKA PRC .....	28
4.3.4	Sistemas Generativos .....	31
5	Caso de Estudo .....	33
5.1	Peça Padrão .....	33
5.2	Ponto de situação do equipamento.....	34
5.3	Peça Padrão Parametrizável (Desenvolvimento do Código) .....	40
5.4	Produção da Peça .....	48
5.5	Parâmetros de Avaliação .....	49

5.6. Valores Apresentados .....	53
6 Conceitos Desenvolvidos.....	56
Desenvolvimento de Código para Produção.....	62
7 Produção da Peça Final .....	64
7.1. Material Utilizado.....	64
7.2. Parâmetros .....	65
7.3. Parâmetros de Extrusão Utilizados.....	66
7.4. Considerações finais .....	66
7.4.1 Controlo da Qualidade do Material Depositado.....	67
7.4.2 Aderência Entre Camadas.....	68
7.4.3. Dimensões Finais da Peça .....	68
8 Conclusão .....	70
Referências Bibliográficas .....	73

## Índice de Figuras:

Figura 1: DONE LAB (Done Lab, 2022)	3
Figura 2: Double Diamond (Double Diamond, 2023)	4
Figura 3: Processos de Fabrico Aditivo (Processos de Fabrico Aditivo, 2020)	12
Figura 4: Robôs Cartesianos (Robo Cartesiano, 2019)	21
Figura 5: Robôs Articulados (Robô Articulado, 2020)	21
Figura 6: Robôs SCARA (Robô Scara , 2023)	22
Figura 7: Robôs Delta (Robô Delta , 2022)	23
Figura 8: KUKA R120 (KUKA R120 , 2022)	24
Figura 9: Rhinoceros (Rhinoceros, 2023)	26
Figura 10: Grasshopper (Grasshopper, 2022)	27
Figura 11: Ferramentas do KUKA PRC (Acervo do autor)	28
Figura 12: CORE (Acervo do autor)	28
Figura 13: Virtual Robot (Acervo do autor)	29
Figura 14: Virtual Tools (Acervo do autor)	29
Figura 15: Tool Path Utilities (Acervo do autor)	30
Figura 16: Utilities (Acervo do autor)	30
Figura 17: Sistema Generativo – Grashoper (Acervo do autor)	32
Figura 18: Esboços de Junção de Peças	36
Figura 20: Esboço de Exploração de Forma – Conceito A	37
Figura 19: Esboço de Exploração de Forma – Conceito A	37
Figura 21: Esboço de Exploração de Forma - Conceito B	38
Figura 22: Esboço de Exploração de Forma - Conceito C	38
Figura 23: Esboço de Exploração de Forma - Conceito D	39
Figura 24: Código de Programação	41
Figura 25: Angulo 1	42
Figura 26: Angulo 2	42
Figura 27: Alturas Exteriores	43
Figura 28: Altura Interior	43
Figura 29: Curvas Interiores	44
Figura 30: Ponte	45
Figura 31: Scale 1	46

Figura 32: Scale 2 _____	46
Figura 33: Ponto na Face _____	46
Figura 34: Raft/Brinth _____	47
Figura 35: Peça Padrão _____	48
Figura 36: Teste de Ângulo _____	53
Figura 37: Teste de Diâmetro Máximo _____	54
Figura 38: Teste de Ponte _____	54
Figura 39: Teste de Curva Interior _____	55
Figura 40: Teste de Ângulos Interiores _____	55
Figura 41: Esboços da Peça Final _____	56
Figura 42: Conceito Desenvolvido 1 _____	57
Figura 43: Conceito Desenvolvido 2 _____	58
Figura 44: Conceito Desenvolvido 3 _____	59
Figura 45: Conceito desenvolvido D _____	60
Figura 46: Conceito desenvolvido D _____	60
Figura 47: Conceito Desenvolvido Final _____	61
Figura 48: Valores Máximos _____	62
Figura 49: Parâmetros da Extrusora _____	62
Figura 50: Parâmetros de Extrusão - Peça _____	63
Figura 51: Material Utilizado _____	64
Figura 52: Peça final _____	65
Figura 53: pormenor da Peça Final _____	65
Figura 54: Parâmetros de Extrusão Utilizados _____	66

## **Índice de Tabela**

Tabela 1: qualidade das camadas.....	49
Tabela 2: adesão entre camadas .....	50
Tabela 3: Dimensão final .....	51
Tabela 4: Excesso de material.....	52

# 1 Introdução

## Motivação

Na atualidade, de forma a diferenciarem-se, os designers procuram constantemente formas e métodos de fabrico inovadores e diferenciados (como são o caso da injeção, impressão 3d, corte, ...), e para tal são necessários alguns equipamentos diferenciados dos habituais (como braços robóticos, extrusoras, ...). Com tudo isto, conseguem produtos novos, melhores e diferenciados dos existentes no mercado, que resultam em soluções mais vantajosas para cada tipo de produto. Ou seja, a cada dia que passa os equipamentos são mais e melhores, pois os designers procuramos sempre usar métodos mais recentes e melhorados de produção e de prototipagem. (Pontes & Sampaio, 2020)

Para a produção, normalmente temos um produto e só depois escolhemos o processo de fabrico que mais se adequa ao mesmo. O desafio a que nos propomos é um pouco diferente, pois teremos o processo de fabrico e, só depois, é que teremos de criar um produto. Esse produto deverá ter todos os elementos necessários de forma a percebermos os limites máximos da máquina e do material, sejam curvas, ângulos, perímetro máximo, altura e acabamento superficial. É com base neste contexto que será direcionada a dissertação, sendo que terá como premissa a utilização de algumas peças padrão para testar os novos materiais. Esta tecnologia de fabrico aditivo, são disponibilizadas pelo DONE LAB. (Pontes & Sampaio, 2020)

O fabrico aditivo é uma tecnologia bastante vantajosa de impressão 3D, através da qual é possível obter peças, protótipos e modelos. A matéria que é utilizada para estas peças diferem consoante o processo a utilizar, mas sendo que na sua utilização é sempre feita camada por camada, e sempre gerida pelo controlador da máquina. A tecnologia de impressão 3D já existe há bastantes anos e tem sido cada vez mais melhorada e desenvolvida, tanto a nível de design como a nível de software. Pode ser então uma mais-valia para a produção de alguns produtos, visto que cada empresa pode utilizar o material que pretende seja ele PLA, TPU, PP virgem etc.

## **1.1 Introdução ao DONE lab**

O DONE lab é um laboratório de fabrico aditivo avançado com o intuito de apoiar o desenvolvimento de novos produtos e ferramentas. Surge de uma parceria entre a Universidade do Minho e a Bosch Car multimédia S.A.

Num espaço moderno e funcional, o laboratório dispõe de várias tecnologias de fabrico de última geração capazes de assegurar a produção de muito protótipos experimentais e funcionais, combinando fabrico aditivo e subtrativo. (donelab.pt)

O DONE lab - três áreas principais:

### **1.1.1 Fabrico Digital**

O DONE lab considera uma abordagem de fabrico baseada em sistemas e processos interligados que permitem a conceção e fabrico de produtos. Para garantir a produção de protótipos são utilizadas ferramentas de alta qualidade num pequeno espaço de tempo, reunindo-se naquele espaço um conjunto de tecnologias avançadas, que incluem equipamento de fabrico subtrativo, formativo e aditivo.

Dispõe também de recursos a modelação 3d e simulação para alcançar o processo de desenvolvimento do produto ideal, no mais curto espaço de tempo.

### **1.1.2 Projeto de Engenharia**

O desenvolvimento de produtos centra-se num método iterativo, para a resolução de problemas, para criar soluções refinadas e avançadas.

Com vista ao apoio do design de produto e o desenvolvimento de produto, o DONE lab, recorre ao seu conhecimento interno que, para além dos seus colaboradores, conta também com várias universidades, para o fabrico de moldes, fabrico digital, entre outro.

A sua capacidade permite que o DONE lab aconselhe as soluções mais adequadas a cada método de fabrico, material a utilizar e em termos de design. Este método permite fornecer rapidamente soluções precisas e económicas que integrem todas as especificações, desde o protótipo até à sua viabilidade e desde a sua fase inicial até protótipos industriais.

### **1.1.3 Investigação e Desenvolvimento**

Tem como principal objetivo gerar conceitos e inovação no que diz respeito ao fabrico avançado de produtos e de ferramentas.

Em termos de instalações, equipamento e pessoal, proporciona um ambiente inventivo e estimulante que promove tanto a investigação como o desenvolvimento, conduzindo inevitavelmente a um crescimento constante. Na parte da investigação, centra-se na procura de novas matérias, na criação de novas metodologias e no aperfeiçoamento tecnológico para obter produtos de ponta. O DONE lab tem como objetivo implementar e partilhar as descobertas inovadoras que vai fazendo, para o avanço da comunidade académica e científica, sendo estes também um importante suporte para a excelência da comunidade industrial. (donelab.pt)



*Figura 1: DONE LAB (Done Lab, 2022)*

## 1.2 Metodologia

Para o desenvolvimento desta dissertação, foi utilizada a metodologia do *Double Diamond*. Este processo tem como base o *Design Thinking* tendo como objetivo desenvolver a melhor solução para o problema apresentado. Como o próprio nome indica, esta metodologia está dividida em dois diamantes, definidos por termos completamente diferentes, como apresentado na figura 2. O primeiro é o “Definition”, onde o objetivo é desenvolver e redefinir a solução do problema, o segundo passa pela “Execution”, em que o objetivo é executar a redefinição da ideia anterior. Pretende-se um design centrado em pessoas, sendo que estas são o centro dos problemas e soluções do design. Procurar novas soluções as vezes que forem necessárias, procurar novas ideias, criar, testar, voltar a criar, voltar a testar, será o processo que inevitavelmente terá de ser seguido (Design Council, 2004)

Desta forma, esta metodologia foi aplicada em toda a realização desta dissertação, em que inicialmente foi resolvido o primeiro diamante “Definition” que se encontrou no estado de arte do tema abordado nesta dissertação. Com tudo isto, foi possível entender e conciliar os vários designs heurísticos e também o fabrico aditivo, onde podemos conciliar toda a informação e entender quais os problemas que a mesma trará para a nossa sociedade, assim como a solução para combater esses mesmos problemas. Para além disto, foi recolhida informação sobre o robô (KUKA R120) e o que ele consegue ou não fazer, de modo a tirarmos o máximo proveito do mesmo a nível de processos de fabrico. Com estes pontos definidos, passamos ao “EXECUTION”, fase em que foi focado o desenvolvimento de todo o estudo de parametrização e de execução da peça. Desta forma é aplicado o desenvolvimento e produzido o projeto apresentado, através desta metodologia referida. (Design Council, 2005)

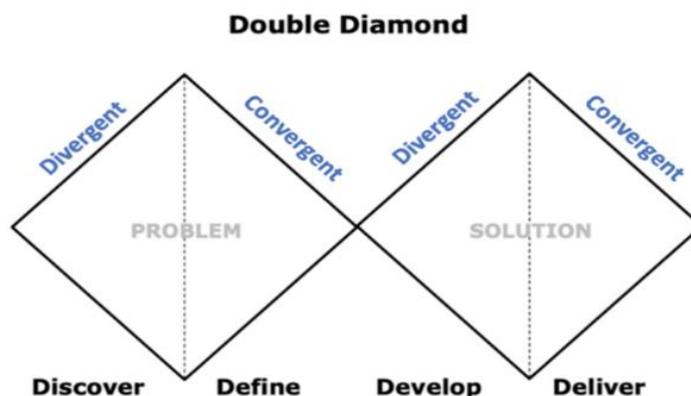


Figura 2: Double Diamond (Double Diamond, 2023)

## **2 Estado da Arte**

### **2.1 O Processo Heurístico no Fabrico Robótico**

Fabricação robótica e a tecnologia de BAAM (Big Area Additive Manufacturing), está a transformar fundamentalmente a indústria, oferecendo soluções inovadoras e eficientes para uma variedade de desafios na produção da era moderna (Hill et al., 2018b).

A fabricação robótica foi impulsionada pelo avanço tecnológico dos diversos tipos de robôs industriais, representando um salto significativo na automação e na eficiência dos seus processos de produção. Os diversos robôs industriais oferecem flexibilidade e adaptação, podendo ser reprogramados para se ajustar a diversas necessidades de produção e até trabalhar em colaboração com diversos trabalhadores (Roschli et al., 2019).

A tecnologia de BAAM está a redefinir os limites de fabricação aditiva, permitindo a produção de peças de grande escala com uma certa rapidez. Criar peças diretamente a partir de modelos digitais oferece liberdade de design sem precedentes, possibilitando a inovação e a otimização de desempenho numa variedade de indústrias (Roschli et al., 2019).

### **2.2 Processos Heurísticos e a sua Relevância na Otimização de Produção.**

Os processos heurísticos representam uma classe de técnicas de resolução de problemas que se baseiam em abordagens práticas, para encontrar soluções aproximadas em situações complexas. Ao contrário dos algoritmos exatos, que buscam encontrar a solução ótima de um problema, os processos heurísticos são mais flexíveis e fornecem soluções bastante satisfatórias em tempo bastante razoável. Na otimização da fabricação, o processo heurístico desempenha um papel fundamental devido à sua relevância em diversos aspetos:

Em primeiro lugar, eles oferecem uma abordagem eficiente para resolver problemas de otimização na fabricação, que podem ser extremamente complexos. Esse tipo de problemas pode envolver múltiplas variáveis e restrições. Os processos heurísticos são capazes de lidar com essa complexidade computacional de maneira eficaz, proporcionando soluções eficazes em tempo útil. Além de tudo isto, os processos heurísticos são altamente adaptáveis e flexíveis, podendo ser ajustados e personalizados de forma a adaptarem-se às características específicas dos problemas de produção, levando em consideração diferentes restrições. Os processos heurísticos podem não garantir a solução ótima desejada, mas oferecem soluções práticas e viáveis para os problemas de otimização na fabricação. Essas soluções são frequentemente suficientes para percebermos as necessidades práticas, equilibrando eficiência e qualidade. Assim o processo heurístico torna-se crucial na otimização da produção, pois oferece abordagens diferentes, adaptáveis e pragmáticas para lidar com os diversos desafios complexos enfrentados pela indústria moderna.

### **2.3 Heurísticas de Design na Ajuda da Fabricação Robótica (BAAM)**

Como já foi referido anteriormente, o “*Big Area Additive Manufacturing*” (BAAM) revolucionou a fabricação de peças de grande escala, uma vez que proporciona uma maior liberdade de design e reduz os custos de produção. No entanto, para tirar o máximo de proveito do potencial da tecnologia BAAM, é essencial aplicar heurísticas de design que orientem o processo de criação e otimização de peças produzidas. (Roschli et al., 2019)

#### **2.3.1 Otimização de Geometria**

A otimização geométrica é um componente fundamental do design heurístico no contexto da fabricação aditiva. Nesta abordagem, as heurísticas vão ser usadas para guiar a conceção de geometrias que sejam adequadas à tecnologia de impressão 3D e que maximizem a eficiência do processo de fabricação. O primeiro objetivo desta otimização de geometria é simplificar as formas complexas da peça, reduzindo em muito o seu tempo de produção e minimizando a necessidade de suportes, durante todo o processo de fabricação. Desta forma é crucial para minimizar a complexidade excessiva que pode aumentar os custos e diminuir a eficiência. (He et al., 2019)

Identificar padrões e regras práticas que visam permitir a simplicidade da geometria das peças sem nunca comprometer a sua funcionalidade ou desempenho. Por exemplo, pode-se evitar ângulos agudos ou características intrincadas que aumentem a dificuldade de impressão ou criem pontos de tensão durante a produção. A otimização geométrica na tecnologia BAAM também visa maximizar a eficiência do material, reduzindo consumos e consequentemente os custos. Isto pode ser alcançado através de estratégias inteligentes, que preencham o interior das peças com padrões específicos de forma a proporcionar maior resistência e estabilidade. Um exemplo prático para a otimização geométrica pode ser encontrado na indústria automóvel, onde peças estruturais como suportes de motor ou componentes de chassi são projetados com geometrias simplificadas e eficientes. Neste caso, as heurísticas são utilizadas para eliminar detalhes desnecessários e reduzir o peso. (J. Mech., 2016)

### **2.3.2 Redução de Peso e Material**

A redução de peso é precisamente um aspeto onde se pode aplicar heurísticas no contexto de fabricação aditiva. Nestes casos são utilizadas para orientar o processo de criação de peças que mantenham a sua resistência e funcionalidade, mas que sejam otimizadas para minimizar o consumo de material e redução de peso. A impressão de peças de grande dimensão é completamente possível nos dias de hoje, com a redução de peso e de material a assumirem um papel de grande importância, para tal ser possível. No entanto, nunca se pode comprometer a resistência estrutural necessária para suportar as diversas cargas que o produto vai ser sujeito. Quer-se a produção da peça de grande dimensão utilizando a menor quantidade de material possível. Uma abordagem comum para essa redução de peso é aplicação de padrões de *infill* inteligentes. Esses padrões preenchem o interior das peças com estruturas específicas que fornecem suporte e estabilidade com o menor material possível em vez de uma peça sólida. As heurísticas orientam uma seleção de padrões a utilizar para as aplicações mais adequadas considerando cargas aplicadas, geometria da peça e resistência. A fabricação de componentes para a indústria aeroespacial, onde a redução de peso é importante para o desempenho e eficiência. As heurísticas são aplicadas para criar estruturas otimizadas que mantenham a resistência necessária o mais leve possível. (Yilmaz & Seifert, 2010)

### **2.3.3 Montagem e Integração de Peças**

As heurísticas de design na montagem de integração de peças que se encaixam perfeitamente formando uma só, minimizando a necessidade de ajustes ou de alguma modificação onde reduz o tempo e os custos associados á montagem. As heurísticas ajudam a identificar geometrias e características que facilitam a montagem e garantem uma conceção segura e estável entre as peças, podendo incluir o uso de encaixes, pinos ou outras características que simplificam o processo de montagem. As heurísticas de design incentivaram a padronização de peças, permitindo, sempre que possível, que diferentes componentes sejam facilmente substituídas ou atualizadas.

Ao considerar cuidadosamente as interfaces entre as peças e os requisitos de montagem, pode-se criar sistemas mais robustos, confiáveis e fáceis de manter. (Blösch-Paidosh, 2019)

### **2.3.4 Personalização e Customização**

A personalização e customização no design heurístico refere-se à capacidade de adaptar e ajustar produtos de acordo com as preferências e requisitos específicos de cada cliente. Nesse sentido, as heurísticas oferecem diretrizes para criar produtos que possam ser facilmente adaptados e customizados, de forma a atender à variedade das necessidades que iremos encontrar. Uma das principais formas de aplicação de heurística para personalização e customização é através da parametrização e da flexibilidade de design. Isto significa criar produtos com padrões parametrizáveis e ajustáveis, que possam ser combinados de diferentes maneiras para atender às diversas preferências. Neste caso, as heurísticas orientam a criação de interfaces intuitivas e adaptáveis para que os utilizadores personalizem o seu produto de forma fácil e eficiente. O incentivo para a utilização de tecnologias de modelação 3D permite visualizar e modificar instantaneamente o produto de acordo com as suas preferências, antes da fabricação, proporcionando uma experiência mais interativa e fazendo com que o produto vá de encontro às necessidades para que está a ser concebido.

Um exemplo muito prático do que estamos a falar passa-se na indústria do calçado desportivo, em que várias empresas estão a fabricar palmilhas personalizadas a cada atleta, levando em consideração as suas características e preferências de conforto. Neste caso, as heurísticas de design são empregues para guiar o processo de criação de modelos personalizados que atendam, mais uma vez, às necessidades específicas de cada um. (Yilmaz & Seifert, 2010)

### **2.3.5 Minimização de Falhas e Defeitos**

Neste contexto, as heurísticas de design, são aplicadas para identificar, prevenir e mitigar potenciais problemas que possam comprometer a qualidade e a integridade das peças fabricadas, sendo o objetivo primordial garantir que as peças produzidas pela BAAM atendem aos mais altos padrões de qualidade. (Yilmaz & Seifert, 2010)

Isto envolve a identificação de possíveis pontos fracos ou áreas problemáticas e a implementação de medidas de correção para evitar eventuais falhas que possam existir durante todo o processo de fabricação. Para prevenir essas falhas e defeitos, a análise computacional antes da fabricação é importante, uma vez que as heurísticas de design nos orientam na realização de análises de elementos mais finos e nas simulações para avaliar a integridade estrutural, a sua resistência e vários outros aspetos. Desta forma, somos capazes de identificar possíveis problemas, como pontos de tensão e deformações, e tomar medidas corretivas para evitar essas mesmas falhas. (Yilmaz & Seifert, 2010)

Além desses pontos, as heurísticas incentivam a adoção de práticas para projetos robustos e tolerantes a falhas. Isso envolve a criação de peças com diversas margens de segurança adequadas e que possam resistir às variações no processo de fabricação. Este processo é aplicado nos equipamentos médicos, onde as precisões das peças são críticas para garantir a segurança dos pacientes. Neste mesmo contexto, as heurísticas são aplicadas para garantir que as peças atendam aos requisitos de qualidade, minimizando o risco de falhas e defeitos. (Yilmaz & Seifert, 2010)

## 2.4 Conclusão

O Design Heurístico, na fabricação robótica e no processo de *big area additive manufacturing*, representa um marco crucial na evolução da tecnologia moderna. Ao longo desta discussão, exploramos uma série de conceitos e estratégias que demonstram como é que as heurísticas estão a transformar fundamentalmente a maneira como projetamos, fabricamos e integramos produtos em larga escala. Tudo isto visa otimizar cada aspeto do processo, desde a conceção inicial até a produção final, promovendo também uma maior eficiência, flexibilidade e qualidade. A simplificação da forma complexa das peças, reduzindo o seu tempo de produção e consumo de material, é dos pontos mais fortes do design heurístico. (van de Ven et al., 2020)

A redução de material e de peso, por sua vez, busca criar estruturas mais leves e eficientes sem comprometer a resistência e a integridade estrutural.

Além disso, o design para a montagem e integração simplifica o processo de montagem, garantindo uma conexão de peças e reduzindo a necessidade de ajustes posteriores. A personalização e customização oferecem a oportunidade de adaptar as nossas peças, promovendo uma experiência mais envolvente e parametrizável. (van de Ven et al., 2020)

No centro deste progresso está o reconhecimento da importância do design heurístico como uma abordagem orientada e adaptativa, capaz de responder a vários desafios complexos e dinâmicos na fabricação moderna. Pois, ao fornecer diretrizes práticas e intuitivas, com estas heurísticas de design ficam capazes de explorar todo o potencial da fabricação robótica e do BAAM, impulsionando a inovação e excelência na indústria. À medida que avançamos para o futuro, é essencial continuar a explorar e a refinar essas práticas, procurando sempre por novas tecnologias emergentes e abordagens inovadoras para impulsionar ainda mais a eficiência e a qualidade da fabricação industrial. Sendo a abordagem heurística a forma central, podemos antecipar avanços extraordinários na fabricação. (van de Ven et al., 2020)

### **3 Fabrico Aditivo**

Ao contrário das técnicas de fabrico convencional que se baseiam em técnicas de subtração ou moldagem, o fabrico aditivo constrói artigos sobrepondo matéria, umas sobre as outras. O software de desenho assistido por computador (CAD) é geralmente usado para gerar este tipo de desenho digital, permitindo um controlo exato de todos os detalhes do produto final. (Bose et al., 2018)

A capacidade de criar bens altamente personalizados, com várias geometrias complexas, que seriam praticamente impossíveis de serem realizadas através dos processos de fabrico convencionais, é uma das principais vantagens do fabrico aditivo. Em áreas como a medicina, podem ser desenvolvidos implantes e equipamentos médicos específicos para cada paciente, de forma a ir de encontro às necessidades individualizadas, oferecendo por isso melhores resultados. (Bose et al., 2018)

Para além disso o fabrico aditivo, em termos de tempo, tem muito a oferecer ao consumidor (tempo e dinheiro). Esta técnica torna possível a prototipagem rápida e a personalização de pedido, eliminando a necessidade de ferramentas muito dispendiosas, assim como minimizar o desperdício de material. Permite também combinar numa única estrutura, vários componentes de nível de dificuldade elevado, exigindo menos montagem e simplicidade de peça. (Pham & Dimov, 2003)

O fabrico aditivo oferece, como já foi referido, vantagens a nível de sustentabilidade. Através de técnicas de subtração, o fabrico tradicional produz frequentemente uma quantidade significativa de resíduos. Em contrapartida, uma vez que é necessária a quantidade exata de material para construir certo objeto, o fabrico aditivo produz menos resíduos. Esta diminuição de resíduos, em conjunto com a capacidade de reciclagem que temos atualmente, torna possível um fabrico aditivo mais amigo do ambiente. (Thompson et al., 2016)

Ainda há dificuldades a resolver mesmo com estes avanços substanciais no fabrico aditivo. Nestas dificuldades incluem-se restrições à capacidade e à velocidade de fabrico, bem como a capacidade de desenvolver especificações de vária matéria. No entanto, os projetos contínuos de investigação e desenvolvimento estão constantemente a alargar a capacidade desta tecnologia, abrindo uma vasta gama de utilização e descoberta desta tecnologia de fabrico aditivo. O fabrico aditivo mudou a indústria do design, permitindo níveis de flexibilidade, personalização, eficiência e sustentabilidade, nunca vistos. À medida que a tecnologia se desenvolve, existe um grande potencial para transformar setores e estimular a criatividade que as pessoas e as organizações concretizam. (Wiberg, 2019)

### 3.1 Processos de Fabrico Aditivo

O fabrico aditivo revolucionou a forma como os objetos são concebidos, prototipados e produzidos. Com estes avanços tecnológicos surgiram diferentes formas de fabrico aditivo, onde cada uma tem as suas próprias características e aplicações específicas.

Estes novos processos dividem-se em três classes diferentes de acordo com o material utilizado. Base em pó, base em líquido e base sólida. No entanto, mais recentemente, a ASTM internacional criou uma classificação que se divide em sete categorias diferentes que irei passar a apresentar. (Relvas, 2018)

CATEGORIES	TECHNOLOGIES	PRINTED "INK"	POWER SOURCE	STRENGTHS / DOWNSIDES
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Thermoplastics, Ceramic slurries, Metal pastes	Thermal Energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inexpensive extrusion machine</li> <li>Multi-material printing</li> <li>Limited part resolution</li> <li>Poor surface finish</li> </ul>
	Contour Crafting			
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Polyamides /Polymer	High-powered Laser Beam	<ul style="list-style-type: none"> <li>High Accuracy and Details</li> <li>Fully dense parts</li> <li>High specific strength &amp; stiffness</li> <li>Powder handling &amp; recycling</li> <li>Support and anchor structure</li> <li>Fully dense parts</li> <li>High specific strength and stiffness</li> </ul>
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Atomized metal powder (17-4 PH stainless steel, cobalt chromium, titanium Ti6Al-4V), ceramic powder		
	Selective Laser Melting (SLM)			
	Electron Beam Melting (EBM)		Electron Beam	
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Photopolymer, Ceramics (alumina, zirconia, PZT)	Ultraviolet Laser	<ul style="list-style-type: none"> <li>High building speed</li> <li>Good part resolution</li> <li>Overcuring, scanned line shape</li> <li>High cost for supplies and materials</li> </ul>
Material Jetting	Polyjet / Inkjet Printing	Photopolymer, Wax	Thermal Energy / Photocuring	<ul style="list-style-type: none"> <li>Multi-material printing</li> <li>High surface finish</li> <li>Low-strength material</li> </ul>
Binder Jetting	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Polymer Powder (Plaster, Resin), Ceramic powder, Metal powder	Thermal Energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>Full-color objects printing</li> <li>Require infiltration during post-processing</li> <li>Wide material selection</li> <li>High porosities on finished parts</li> </ul>
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Plastic Film, Metallic Sheet, Ceramic Tape	Laser Beam	<ul style="list-style-type: none"> <li>High surface finish</li> <li>Low material, machine, process cost</li> <li>Decubing issues</li> </ul>
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electronic Beam Welding (EBW)	Molten metal powder	Laser Beam	<ul style="list-style-type: none"> <li>Repair of damaged / worn parts</li> <li>Functionally graded material printing</li> <li>Require post-processing machine</li> </ul>

Figura 3: Processos de Fabrico Aditivo (Processos de Fabrico Aditivo, 2020)

### **3.1.1 Material Extrusion (FDM)**

Este processo também é conhecido por *Fused Filament Fabrication*, onde envolve a extrusão de um filamento termoplástico através de um local aquecido (normalmente denominado de extrusora), que deposita esse material, agora em estado líquido, em camadas sucessivas para formar esse objeto. Este tipo de processo é muito utilizado na indústria, principalmente na prototipagem rápida e na produção de peças funcionais. (Leary, 2020)

### **3.1.2 Power Bed Fusion (SLS)**

Neste processo de fabrico aditivo é usado um laser de alta potência, para fundir partículas de pó de um certo material, como por exemplo o Nylon ou polímeros termoplásticos em pó, para criar uma certa forma que foi previamente desenhada em formato digital. À medida que cada camada é fundida, uma nova camada de pó é adicionada e o processo é repetido. O SLS utiliza-se normalmente para as peças com algum grau de resistência e de complexidade, mas com uma boa precisão dimensional. (Ian Gibson, 2009)

### **3.1.3 Vat Photopolymerization**

Neste processo, uma resina líquida fotossensível é solidificada camada a camada através da luz ultravioleta. Existem duas variáveis neste processo: SLA e DLP. O SLA é direcionado para uma resina líquida que está num reservatório. O feixe de luz solidifica para formar a camada desejada para o objeto. Ao contrário do SLA, no DLP é usado um projetor digital que projeta uma imagem digital de alta resolução de cada camada diretamente na resina. Ambas as variantes oferecem alta precisão e detalhe, permitindo alta qualidade de acabamento. Estes processos são usados maioritariamente no fabrico de joias, design industrial, ... (Ian Gibson, 2009)

### **3.1.4 Material Jetting**

Neste processo, o material é depositado camada por camada, usando pequenas gotículas líquidas, que são debitadas através da extrusão da impressora. As extrusoras, neste tipo de processo, são muito semelhantes às utilizadas normalmente nas impressoras 3D convencionais, mas em vez de filamento, são carregadas com material fotopolimerizável, como resinas líquidas ou matérias cerâmicas em forma de gotículas. As extrusoras depositam essas gotículas de material em locais específicos, formando camadas finas do objeto. A luz ultravioleta é então usada novamente neste processo, para solidificar estas gotículas, resultando em camadas sólidas e com bom acabamento . (Reyes-Luna et al., 2023)

### **3.1.5 Binder Jetting**

O método de “Binder Jetting” emprega dois materiais: um composto em pó e um aglutinante. O aglutinante desempenha a função de adesivo entre as diversas camadas de pó. Normalmente o aglutinante é em líquido, enquanto o material de construção é apresentado em forma de pó. Uma cabeça de impressão desloca-se na horizontal e na vertical, (ao longo dos eixos X e Y) da máquina, depositando camadas alternadas de material de construção. Após cada camada, o objeto a ser impresso, é recolhido da sua plataforma de construção. Devido à sua natureza de aglutinação, as propriedades do material nem sempre são ideais para componentes estruturais, e apesar da sua relativa rapidez de impressão, os rápidos procedimentos para produção, podem adicionar um considerável tempo ao processo global do mesmo. Assim como os outros métodos de fabrico baseado em pó, o objeto a ser impresso é autossustentado no leito de pó e é removido do pó não aglutinado ao término do processo. Essa tecnologia é comumente conhecida como tecnologia 3DP e está legalmente protegida por direitos autorais sob esse nome. (*Binder Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University, 2010*)

### **3.1.6 Sheet Lamination**

Neste processo, as camadas de material são folhas sobrepostas e unidas, para construir um objeto tridimensional. Existem 2 variantes de sheet Lamination: laminação em papel e laminação em metal. A laminação de papel é cortada em formas específicas por meio de corte a laser. Essas camadas são coladas umas as outras até que a forma desejada seja encontrada. Após as camadas estarem todas cortadas, o excesso de papel é removido e assim é encontrada a forma. Na laminação de metal, o processo é idêntico, mas a união das folhas é feita através de uma fonte de energia, seja ela calor ou laser. (Ian Gibson, 2009)

### **3.1.7 Directed Energy Deposition**

A “Directed Energy Deposition” abrange uma variedade de terminologias como a modelagem de redes por energia a laser, fabricação de luz direcionada, deposição direta de metal e revestimento 3D a laser. Este é um processo de impressão mais complexo, onde normalmente é usado para reparar ou acrescentar material adicional a componentes já existentes. (*Directed Energy Deposition | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University, 2010*)

Uma máquina tipicamente DED, é composta por um bocal montado num braço multi eixos, que deposita o material fundido na superfície específica, onde este é solidificado. O processo é parecido ao da extrusão de material, mas o local da base tem a capacidade de se movimentar em várias direções, onde não está fixo a um eixo fixo. O material, pode ser depositado de qualquer ângulo graças a máquinas de quatro, cinco eixos, onde é fundido após a deposição de um laser ou um feixe de elétrons. Embora este processo é aplicado a polímeros e cerâmicos, é mais comum ser utilizado com metais, seja em forma de pó ou fio. Algumas aplicações onde se pode ser utilizada esta tecnologia é na manutenção de peças estruturais. (*Directed Energy Deposition | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University, 2010*)

## 3.2 Vantagens e Desvantagens do Fabrico Aditivo

Comparando os métodos tradicionais com os métodos de produção aditiva, podemos constatar que existem diversas vantagens e desvantagens entre elas. Produzindo em escalas de grande dimensão e com acabamento personalizado, o método de produção aditiva destaca-se ao nosso método de fabrico tradicional. (*What Is Additive Manufacturing? (Definition & Types)* - TWI, 2022)

### 3.2.1 Vantagens

- **Design Complexo:** estes processos permitem a criação de geometrias complexas, que seriam difíceis ou impossíveis de produzir com métodos tradicionais normalmente usados;
- **Personalização:** objetos totalmente personalizados têm especialmente benefícios na área da medicina, permitindo a adaptação de próteses e dispositivos médicos, por exemplo;
- **Prototipagem Rápida:** estes processos aditivos permitem a prototipagem rápida o que representa grandes benefícios por acelerar o processo e reduzir os custos associados ao mesmo;
- **Redução de Desperdício de Material:** normalmente, os processos aditivos são mais eficientes que os processos usados tradicionalmente, pois a quantidade de material é exatamente a necessária para a produção destes produtos. Isso ajuda a reduzir o desperdício de material e ajuda a que este método seja mais sustentável que os tradicionais. (*What Is Additive Manufacturing? (Definition & Types)* - TWI, 2022)

### 3.2.2 Desvantagens

- **Custos Iniciais:** os equipamentos de fabrico aditivo podem ser mais lentos em comparação com os métodos tradicionais, especialmente ao produzir objetos de maior dimensão e mais complexos;

- **Limitação dos Materiais:** embora haja uma variedade de matéria utilizáveis pelos processos de fabrico aditivo, que se encontram em expansão, existem algumas limitações comparando com os métodos de produção tradicionais;

- **Tamanho do objeto:** apesar de produzirem objetos de grandes dimensões, o tamanho ainda é uma desvantagem em comparação aos métodos tradicionais.

É importante referir que estas vantagens e desvantagens variam consoante os métodos de produção que escolhermos. Cada processo tem as suas vantagens e desvantagens, características e considerações únicas. (*What Is Additive Manufacturing? (Definition & Types)* - TWI, 2022)

### **3.3 Conclusão**

Em formato de conclusão, o fabrico aditivo oferece uma forma inovadora de fabricação de novos produtos e objetos tridimensionais. A sua capacidade de criar geometrias complexas, personalização, prototipagem rápida, são algumas das vantagens dessas mesmas inovações. Para além disso, a redução de desperdício de material contribui para uma abordagem mais sustentável e eficiente em termos de custos. (Sampaio et al., 2020). Existem, no entanto, vários desafios a serem superados. A velocidade de produção ainda pode ser um fator que limite, especialmente quando é aplicado à produção em massa. Os custos iniciais envolvidos na aquisição de novos equipamentos e materiais, podem constituir uma barreira para certas empresas. Apesar de certas limitações, o fabrico aditivo continua a evoluir e a oferecer novas soluções em várias indústrias, desde a aeroespacial, automóvel até ao design e medicina. À medida que a tecnologia avança, novos materiais e processos são desenvolvidos, com vista à minimização ou até extinção das desvantagens aqui referidas. Em resumo, o fabrico aditivo representa uma mudança significativa no que respeita à produção de objetos. Com as suas vantagens exclusivas e o elevado potencial de desenvolvimento, espera-se que revolucione a indústria e dê oportunidades para uma maior criatividade na hora de produzir novos produtos (Sampaio et al., 2020)

## 4 Fabrico Aditivo em Grandes Dimensões

O fabrico aditivo em grande escala é também conhecido por “*large-scale additive manufacturing* (LSAM)” ou, Fabrico Aditivo em Escala Industrial. Refere-se à utilização de tecnologias de impressão 3D para criar objetos de grandes dimensões. As grandes dimensões referem-se ao tamanho que vai para além do tamanho convencional das impressoras 3D. (Bedsole et al., 2017)

A principal característica de fabrico aditivo em grandes dimensões é a sua capacidade de produzir peças em tamanhos grandes, como por exemplo moldes, ferramentas, protótipos de grande dimensão ou até mesmo estruturas de arquitetura. Outra característica do fabrico aditivo em grande escala é a produção de produtos, dispensando a fase de montagem e união de várias peças, para chegar ao produto final. Existem também vários tipos de fabrico aditivo, como o BAAM (*big area additive manufacturing*) o DED (*directed energy deposition*) e o WAAM (*wire arc additive manufacturing*). Estas tecnologias utilizam impressoras 3D avançadas, com extrusoras de grande dimensão e de grande capacidade, robôs industriais e cabeças de impressão com capacidade de depositar material camada por camada. (Bedsole et al., 2017)

Contudo, o fabrico aditivo de grande dimensão tem algumas desvantagens, sendo a maior delas a sua capacidade de acabamento. A sua precisão dimensional é afetada, em comparação aos métodos de produção mais normalizados e a escolha do material pode ser mais limitada. Para além disso os custos de adquirir, seja um robô industrial ou uma extrusora de grandes dimensões, são bastante elevados em comparação a outros métodos. (Hill et al., 2018a)

### 4.1 Big Area Additive Manufacturing (BAAM)

O fabrico aditivo de grandes dimensões (BAAM) ou fabrico aditivo em escala industrial foi concebido para criar objetos em escalas maiores do que os métodos tradicionais apresentam nas impressoras 3D convencionais. No processo de BAAM, uma extrusora de alta capacidade é utilizada para depositar camadas sucessivas de material. (Roschli et al., 2019)

Uma das principais vantagens do BAAM, como o seu próprio nome indica, é a produção em grande escala de uma determinada peça num curto espaço de tempo. A extrusora de alta capacidade permite a deposição rápida de material, resultando em tempos de fabricação significativamente menores, em comparação com as impressoras 3D tradicionais. Isso torna o BAAM adequado para aplicações como por exemplo a prototipagem rápida, construção de edifícios arquitetónicos e fabricação de componentes para a nossa indústria ou internacional do mercado automóvel e aeronáutico. (Big Area Additive Manufacturing (BAAM) OSTI.GOV, n.d.; Hill et al., 2018). Outra vantagem é a flexibilidade de materiais que se pode usar. Embora quase todos sejam termoplásticos, é possível explorar uma variedade de polímeros e compósitos. Isso permite criar peças em grandes dimensões com propriedades específicas concebidas adequadamente para aquela utilização. (Roschli et al., 2019)

No entanto, temos algumas desvantagens neste processo de BAAM. A sua precisão dimensional é menor que as impressoras 3D convencionais, isto devido ao tamanho que a sua extrusora pode apresentar e a deposição de material que são camadas relativamente mais grossas que o normal. O seu processo de escolha de material também pode ser uma desvantagem, em comparação aos métodos tradicionais, visto que métodos tradicionais já utilizam uma derivada panóplia de materiais que no processo de BAAM não estão estudadas. Apesar das limitações que este processo de BAAM tem, o método tem ficado popular entre as empresas de impressão 3D, devido à sua capacidade de produção em grande escala. Sendo uma tecnologia bastante promissora, que permite utilização de várias matérias e peças personalizadas, abre novos horizontes para os designers criarem produtos, fazendo com que a indústria continue a crescer. (*What Is Additive Manufacturing? (Definition & Types)* - TWI, 2022)

## **4.2 Robôs de Fabrico Aditivo**

Os robôs industriais são ferramentas bastante úteis para o fabrico aditivo e para o respetivo processo de impressão 3D. Nesse sentido, o robô é programado para controlar uma extrusora ou algum sistema parecido de deposição de matérias. Tudo junto permite a criação de objetos tridimensionais, camada por camada. Usar robôs industriais tem várias vantagens sendo uma delas a versatilidade e flexibilidade que este tipo de ferramentas proporciona.

Estes robôs podem-se mover até 6 eixos diferentes, permitindo a impressão de diferentes geometrias e superfícies bastante complexas. (Santos, 2021)

Como já foi referido, a estes robôs podem ser acoplados vários tipos de extrusoras ou algum mecanismo que debite filamento ou material em pó. Com esta diversidade de utilização de cabeças de impressão, é ampliada a possibilidade de utilizar vários tipos de materiais. O uso do robô permite fazer diversas peças de diversos tamanhos, desde o mais pequeno componente até estruturas de grande porte. Isso torna a *robotic additive manufacturing* adequada para várias aplicações industriais, incluindo a prototipagem rápida, fabricação personalizada, arquitetura e até componentes aeroespaciais. (Santos, 2021)

A redução de custos é outra das vantagens apresentada por estes robôs, apesar dos robôs industriais serem bastante dispendiosos, a redução de desperdício de material, a rápida prototipagem e a impressão em grande escala fazem com que os custos sejam bastantes mais baixos pois, para se conseguir algum resultado parecido, tinha-se de utilizar outro tipo de ferramentas. Para além disso, as diferentes possibilidades que este tipo de robôs proporciona, faz com que sejam adaptáveis a qualquer tipo de produção industrial. No entanto, estes robôs podem ter algumas falhas a nível de precisão dimensional, dependendo do robô que estejam a utilizar e da capacidade de precisão. Este tipo de ferramentas e este tipo de processo de fabrico, estão em constante desenvolvimento, fazendo com que, com estes avanços contínuos na programação dos sistemas de controlo e matérias, a indústria continue em constante desenvolvimento, permitindo objetos personalizados de uma gama bastante alta nos setores industriais. (Santos, 2021)

#### **4.2.1 Tipos de Robôs de Fabrico Aditivo**

Os robôs industriais são máquinas versáteis projetadas para automatizar tarefas e processos industriais, sendo usados para diversas utilizações desde a montagem e soldadura, passando pelo embalamento de produtos e controlo de qualidade. Estes robôs são classificados em diferentes categorias com base na sua estrutura, configuração e funcionalidade específica. (Santos, 2021)

#### 4.2.1.1 Robôs Cartesianos

Estes tipos de robôs são também conhecidos por serem lineares na sua movimentação e são compostos por 3 eixos lineares (X, Y, Z) que se movem nas ditas coordenadas cartesianas. São conhecidos pela sua precisão e movimentos rápidos em linhas retas onde são normalmente usados em tarefas industriais tais como montagem de equipamentos e embalagem. (*O Que é e Como Funciona Um Robô Cartesiano?* - PAHC Automação, 2022)



Figura 4: Robôs Cartesianos (Robo Cartesiano, 2019)

#### 4.2.1.2 Robôs Articulados

Estes tipos de robôs articulados são compostos por uma serie de braços ligados por juntas rotativas, muito semelhantes de um braço humano. Oferecendo uma vasta flexibilidade de movimento, podendo também executar tarefas mais complexas em espaços diversificados. Utilizações como pinturas, soldagem de equipamentos e montagem são as suas utilizações mais frequentes. (*Robôs Articulados: Onde Usar Na Indústria*, 2022)



Figura 5: Robôs Articulados (Robô Articulado, 2020)

#### 4.2.1.3 Robôs SCARA

SCARA é uma sigla em inglês (*“Selective compliance assembly robot arm”*), que traduzida para português significa: braço robótico de montagem de conformidade seletiva. Estes tipos de robôs possuem dois braços articulados e um eixo vertical que permite movimentos rápidos e precisos no plano horizontal. Estes robôs são utilizados mais frequentemente para aplicações de montagem, manipulação de peças e embalagem. (*FANUC SCARA Robots – Fast Precise Assembly and Handling - Fanuc, 2022*)



Figura 6: Robôs SCARA (Robô Scara , 2023)

#### 4.2.1.4 Robôs Delta

Este robô Delta possui uma estrutura de três braços ligados entre si a uma base fixa, formando um design em triângulo muito semelhante a uma pirâmide invertida. Design cinemático, velocidade, precisão e a sua flexibilidade de aplicação são algumas das vantagens trazidas por este robô. (Jody Muelaner, 2023)



*Figura 7: Robôs Delta (Robô Delta , 2022)*

#### **4.2.1.5 Robôs Cooperativos e não cooperativos**

Estes robôs são dois conceitos distintos que descrevem a interação entre robôs e os seres humanos em ambiente de trabalho. Robôs cooperativos, também conhecidos como COOBOTS, foram projetados para colaborar diretamente com os humanos, uma vez que os seus recursos de segurança avançados e sistemas de detecção de colisão avançado, garantem a segurança do trabalho dos colaboradores que manuseiam o mesmo. São projetados para compartilhar os espaços de trabalho com os humanos e para colaborar em tarefas conjuntas, possuindo sensores de proximidade e de movimento para evitar colisões entre si. São também projetados para facilitar a sua programação e serem flexíveis na mesma, pois são geralmente usados em processos de montagem e assistência aos operadores humanos. (Universal robots, 2015)

Já os robôs não cooperativos são projetados para operar em ambientes industriais, sem precisarem de interação direta com o ser humano no seu processo. São usados em processos que exigem a sua automação completa. Operam em ambientes isolados onde não há risco de colisão com seres humanos.

Geralmente são usados em tarefas perigosas ou inacessíveis de executar pelo ser humano. Importa de salientar que tanto os robôs cooperativos como os não cooperativos têm valores de importância em diferentes aplicações industriais. Os cooperativos têm como funcionalidade aumentar a segurança do trabalho, já os não cooperativos são projetados para tarefas totalmente automatizadas. (Universal robots, 2015)

#### **4.2.1.6 KUKA R120 R3100**

A KUKA R120 R3100 é um dos modelos fabricados pela marca alemã KUKA, especializada em robótica. A R120 faz parte da serie KR QUARTEC que oferece alta precisão, velocidade (6M/S) e capacidade de carga até 120KG, o que torna adequada para manusear objetos pesados durante o processo industrial. Tem um alcance de até 3.100mm permite uma área de trabalho bastante ampla para realização do fabrico aditivo. Este robô também consegue mover-se em 6 eixos diferentes desde a sua base até à flange. É controlada por um controlador avançado que é basicamente o cérebro do robô, tendo a vantagem de ser fácil de programar e ao mesmo tempo bastante flexível.

Este é o equipamento usado no processo de fabrico aditivo, em que acoplamos uma extrusora para executarmos o fabrico aditivo. A marca KUKA é conhecida pela sua experiência em robótica industrial, fornecendo soluções confiáveis e de alto desempenho para qualquer tipo de processo industrial que queiramos realizar, sendo a KUKA R120 só um exemplo de robô industrial da marca. (kuka, 2022)



*Figura 8: KUKA R120 (KUKA R120 , 2022)*

### **4.3 Software de Programação Paramétrica**

O software de programação paramétrica é uma ferramenta utilizada para criar modelos e design que facilitem a modificação de vários produtos, permitindo uma abordagem mais flexível e eficiente no processo de design e no processo de fabricação. Neste tipo de software, os parâmetros são definidos e podem ser facilmente alterados, resultando em atualizações instantâneas e automáticas de todo o modelo que desejamos, incluindo toda a sua forma, dimensão e características. Com este software, os designers podem criar modelos com base em parâmetros que podem ser facilmente modificados e que permite a rápida exploração de diferentes variantes de projeto e de adaptação aos requisitos impostos por esse mesmo projeto. O software de programação paramétrica também permite realizar simulações e análises com base nos modelos criados, permitindo testar diferentes cenários e condições para avaliar o desempenho do produto idealizado e assim otimizar os seus parâmetros. (*Programação Paramétrica / API / Integração Com ERP - Metalix CAD/CAM Sheet Metal Software, 2015*)

O uso da programação paramétrica facilita a colaboração de uma equipa de trabalho de design ou engenharia, uma vez que os modelos podem ser compartilhados entre si, permitindo a comunicação entre a equipa mais eficiente e rápida em projetos com um grau de complexidade maior. (Oliveira, 2016)

Alguns exemplos de softwares paramétricos são encontrados no Fusion 360, Rhinoceros, Solidworks, CATIA, entre muitos outros. (Oliveira, 2016)

#### **4.3.1 Rhinoceros**

O Rhinoceros, mais conhecido como Rhino, é um software de modelação 3D usado por vários profissionais desde a área do design até à área de engenharia. Desenvolvido pela McNeel North America, o Rhino é conhecido pela fácil interação, perceção e pela capacidade de criar e modificar modelos 3D com um certo grau de complexidade. (ishika Kapoor, 2022)

Usa a chamada modelagem NURBS (*Non-Uniform Rational B-splines*) para criação de modelos 3D. Esta abordagem matemática permite a criação de geometrias suaves, que exigem alta qualidade visual e precisão. Como já foi dito no início, usa uma interface intuitiva, com vários comandos com imagens para facilitar a utilização do software e para uma rápida percepção. O Rhino nasceu para ser um plug-in para AutoCAD, mas surge uma série de semelhanças com a interface gráfica e a barra de comandos. Posteriormente o software tornou-se independente. (ishika Kapoor, 2022)



*Figura 9: Rhinoceros (Rhinoceros, 2023)*

#### **4.3.2 Grasshopper**

O Grasshopper é um plug-in de modelação paramétrica visual do software Rhinoceros. Permite que os utilizadores criem e manipulem mais facilmente geometrias complexas num ambiente de programação visual intuitivo. O grasshopper é amplamente utilizado por arquitetos, designers e engenheiros, que querem explorar novas formas e possibilidades do design e automatizar o processo de criação dos objetos. Oferecendo uma abordagem paramétrica visual, o grasshopper tem uma abordagem baseada em “nós” (nodes) são conectados e relacionados entre si, permitindo a manipulação de geometrias com base em parâmetros definidos pelo programador. Permite aos utilizadores deste plug – in ajustar os parâmetros definidos e observar as mudanças em tempo real, facilitando a criatividade e a tomada de decisões importantes, baseadas no visual instantâneo. (Farias, 2020)

É totalmente integrado no rhinoceros, permitindo que os modelos criados no grasshopper sejam perfeitamente e facilmente transferidos para o ambiente de rhino.

Este plugg-in é uma poderosa ferramenta para exploração e criação de geometrias. Ao combinar o Grasshoper com o Rhinoceros, todos os utilizadores podem ampliar a sua capacidade de modelação 3D e automatizar processos de design, economizando bastante tempo. (Farias, 2020)



*Figura 10: Grasshopper (Grasshopper, 2022)*

#### **4.3.3 Comunicação Máquina-Robô**

Para conseguirmos uma comunicação com o robot é necessário a utilização de alguns softwares que permitam a programação das funções que estes irão ter.

Existem dois tipos de programação: a on-line e a offline.

- A programação on-line exige a presença do programador/operador junto do robô, sendo que serão estes que, manualmente, irão deslocar o robô através dos comandos existentes, percorrendo vários pontos da sua trajetória. No final, procedem à gravação para que o programa se repita autonomamente.

- A programação off-line não precisa de ter o programador/operador. Permite programar e executar através dos softwares de programação, antes da realização do mesmo.

Atualmente este tipo de software apresenta a possibilidade de executar uma simulação antes de o pormos em funcionamento, permitindo diminuir a ocorrência de incidentes ou erros, conseguindo assim resolver os mesmos sem gastar algum tipo de material. As marcas de robôs apresentam sempre um software com linguagem especifica, mas atualmente existem uma diversidade vasta de plug-ins que permitem fazer o mesmo. Isto acontece por exemplo na fabricante alemã KUKA que tem o seu próprio software de programação visual, desenvolvido para o grasshoper. Tem como nome KUKA PRC e usa uma linguagem KRL.

### 4.3.3.1 KUKA PRC

O KUKA PRC (*parametric robot control*), como já foi dito é um software de programação visual que oferece controlo e programação off-line dos robôs industriais KUKA. Desenvolvido pela *Association for robots in Architecture*, este plug.in foi desenvolvido para o grasshoper e permite o controlo do robô, neste caso a KUKA R120. O KUKA PRC oferece muitos tipos de robôs para programar, incluindo robôs colaborativos e robôs industriais, oferecendo interfaces de controlo, permitindo aos utilizadores do sistema utilizar o sistema robótico específico que têm à sua disposição. (*KUKA/prc - Parametric Robot Control for Grasshopper | Food4Rhino, 2016*)

Para utilizar o KUKA PRC é então necessário entender a sua interface. A mesma apresenta cinco grupos de funções que se agrupam em diferentes atalhos, sendo elas:



Figura 11: Ferramentas do KUKA PRC (Acervo do autor)

### 01 | Core

É o componente central do KUKA PRC pois desempenha um papel fundamental na geração de código de controlo para os robôs KUKA. Oferece uma serie de recursos e funcionalidades que permitem a programação e o controlo preciso do robô. Tem como principal função a geração de código, programação off-line e simulações. (*KUKA/prc - Parametric Robot Control for Grasshopper | Food4Rhino, 2016*)

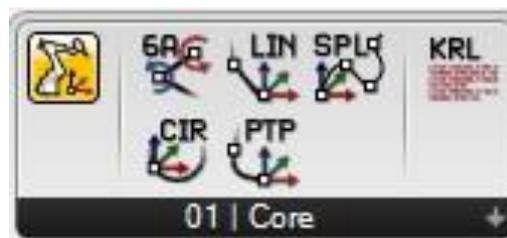


Figura 12: CORE (Acervo do autor)

## 02 | Virtual Robot

Este parâmetro permite selecionar o modelo que utilizamos do robô, tendo um papel fundamental na visualização dos movimentos do robô em ambiente virtual, o que permite que não haja colisões e erros de programação. Permite também que os utilizadores visualizem a trajetória e comportamento do robô. (*KUKA/prc - Parametric Robot Control for Grasshopper | Food4Rhino, 2016*)



Figura 13: Virtual Robot (Acervo do autor)

## 03 | Virtual Tools

Este parâmetro é um recurso importante, pois permite a simulação e a visualização de ferramentas virtuais, no ambiente de modelação 3D, desempenhando um papel fundamental ao criar e a definir propriedades das ferramentas usadas pelo robô kuka, durante todo o processo de simulação e programação. (*KUKA/prc - Parametric Robot Control for Grasshopper | Food4Rhino, 2016*)



Figura 14: Virtual Tools (Acervo do autor)

## 04 | Tool Path Utilities

Este parâmetro, é um conjunto de ferramentas utilitárias, que oferece recursos adicionais para a programação e simulação de trajetórias das ferramentas no ambiente grasshopper. Foram criados com o principal objetivo de facilitar a criação e a manipulação das trajetórias pretendidas, de ferramentas utilizadas pelo robô kuka, durante todo o processo de simulação. (KUKA/prc - Parametric Robot Control for Grasshopper / Food4Rhino, 2016)

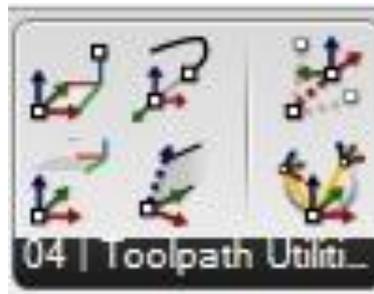


Figura 15: Tool Path Utilities (Acervo do autor)

## 05 | Utilities

O quinto parâmetro é um conjunto de ferramentas e recursos adicionais aos que já vimos anteriormente. Oferecendo funcionalidades extras e aprimoramento que complemente os recursos vistos anteriormente. (KUKA/prc - Parametric Robot Control for Grasshopper / Food4Rhino, 2016)



Figura 16: Utilities (Acervo do autor)

#### **4.3.4 Sistemas Generativos**

Os sistemas generativos apresentam uma abordagem promissora e inovadora a nível do design e da criação de peças complexas 3D. Combina algoritmo avançado e capacidades computacionais, sendo que o conjunto destas 2 vertentes oferece aos designers a oportunidade de explorar e gerar uma gama de soluções mais criativas. Este tipo de sistema generativo tem a capacidade de gerar automaticamente uma infinidade de alternativas de design com base em regras, algumas restrições e parâmetros fornecidos pelo designer que estará a modelar. Estas regras fazem com que o desenvolvimento de um sistema generativo se divida em 5 etapas que os designers devem ter em atenção na hora de criar os seus produtos através deste sistema: (Barrocal & de Toledo Sanjar Mazzilli, 2022)

- Compreensão do problema;
- Informação e dados dos problemas;
- Os parâmetros que devem de ser variáveis ou não;
- A estrutura logica para a resolução das soluções;
- O resultado das soluções.

Torna-se fundamental seguir estes parâmetros, pois podem interferir diretamente com as possíveis soluções apresentadas pelos sistemas. Um dos principais benefícios dos sistemas generativos é a capacidade de explorar uma ampla gama de alternativas de design, que não se consegue descobrir através dos sistemas de modelação mais tradicionais. Usando sistemas generativos, os designers estimulam a sua criatividade e inovação, enquanto estimula a sua capacidade de otimização, com base nos seus critérios. Podem usar algoritmos de otimização para ter uma eficiência maior, reduzir os custos de produção e assim melhorar o seu desempenho. No entanto, os sistemas generativos também apresentam limitações. (Barrocal & de Toledo Sanjar Mazzilli, 2022)

Eles precisam de um conhecimento profundo de algoritmo e de ferramentas computacional envolvidas em torno do software. Uma formação não precisa pode levar a erros e soluções não plausíveis. Estes sistemas generativos podem dividir-se em dois grupos muito distintos, sendo que um é baseado na lógica e outro na biologia. Dentro destes grandes grupos existem vários outros sistemas diferentes. (Barrocal & de Toledo Sanjar Mazzilli, 2022)

Os sistemas baseados na biologia são criados e inspirados em princípios e processos biológicos na criação de design. Esta abordagem é conhecida como “computação Bio inspirada” e procura anular estruturas e mecanismos encontrados na natureza para resolver problemas com uma certa complexidade de design. Dentro dos sistemas de lógica é onde se encontra o nosso Software grasshoper, pois não só se baseia na lógica, como também se destaca pela sua abordagem mais aplicada nos softwares. Os algoritmos baseados na lógica são feitos e projetados para encontrar uma solução que atenda às restrições impostas e otimizem determinados critérios. Os sistemas generativos de lógica usam o sistema de “logica” para gerar soluções viáveis e vantajosas.

Estando definidas as regras e restrições, bem como os objetivos do design, o software irá usar a lógica para gerar soluções que atendem aos critérios definidos, permitindo que os designers explorem e depois selecionem a solução mais adequada. (Barrocal & de Toledo Sanjar Mazzilli, 2022)

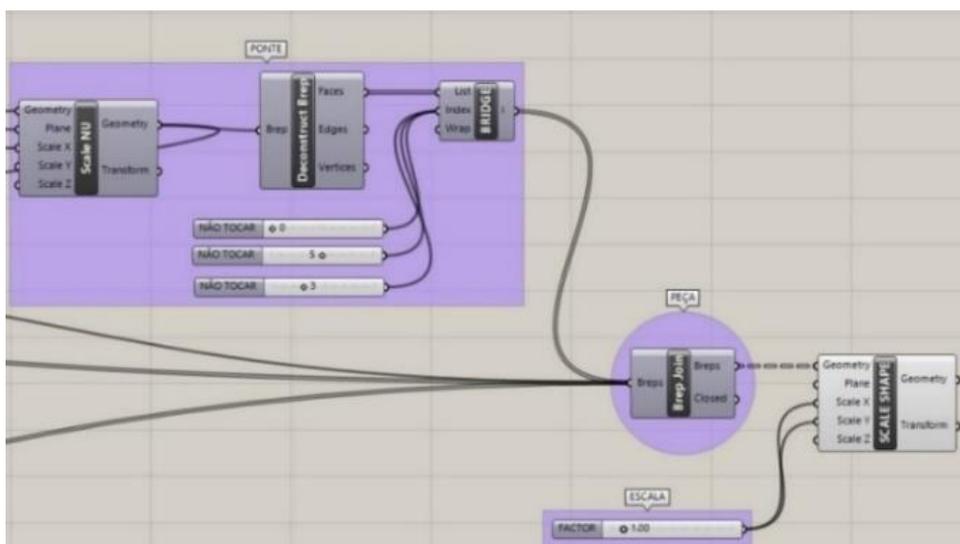


Figura 17: Sistema Generativo – Grasshoper (Acervo do autor)

## 5 Caso de Estudo

Concluída toda a bibliografia apresentada nos pontos acima, ficamos agora com a capacidade para aplicar todas as conclusões retiradas de cada um dos pontos num caso prático. Este caso prático será aplicado num objeto de design de interiores, com especial interesse para qualquer jovem/adulto que queira ter uma sensação de mais conforto e requinte em sua casa.

O caso prático aqui apresentado terá especial preocupação com a estética do objeto, pois consideramos que peças esteticamente agradáveis adicionem beleza e estilo ao espaço escolhido para as inserir.

Outros diversos objetivos para esta peça serão o conforto que trará à divisão onde a colocar e a inovação/originalidade, pois será uma peça pouco comum, produzida através de um processo de fabrico diferente e pouco usado para este tipo de finalidade. Atingidos estes objetivos, consideramos que a peça a produzir irá de encontro às expetativas do nosso consumidor alvo.

### 5.1. Peça Padrão

A Impressão 3D revolucionou a forma como criamos protótipos e peças personalizadas, podendo estas ser produzidas em diversas áreas, que vão da indústria à medicina, como já foi dito. Antes de imprimir qualquer peça, é preciso testar para garantir a qualidade, precisão e a funcionalidade que pretendemos. Para isso são usadas algumas peças padrão específicas para este tipo de testes.

As peças padrão são modelos pré projetados que possuem características conhecidas e são impressas várias vezes para avaliar os parâmetros de impressão, a configuração da máquina que estamos a utilizar e a qualidade do material. São desenvolvidas para desafiar as impressoras em diferentes aspetos, permitindo os ajustes necessários e assim conseguir peças com um determinado acabamento, qualidade e precisão.

Existem vários tipos de peças padrão utilizadas neste meio. As mais comuns são:

- O cubo de calibração;

- A torre de calibração;
- Teste de ponte;
- Teste de ângulo;
- Teste de superfícies;
- Teste de calibração;
- Teste de temperatura;
- Teste de tolerâncias.

Estas peças padrão e outras fornecem referências claras para avaliar a qualidade do produto e da impressão 3D, permitindo a identificação de problemas e assim resolvê-los atempadamente. Resumindo, as peças padrões desempenham um papel fundamental no aprimoramento dos processos de impressão, pois permitem fazer comparações a nível de desempenho e ajustes precisos, garantindo que as peças finais atendam às expectativas que estabelecemos.

## **5.2. Ponto de situação do equipamento**

Como já foi notório e dito várias vezes, as impressoras 3D têm revolucionado a forma como a fabricação de protótipos são realizadas, nas diversas indústrias. Uma das etapas essenciais é saber o que o equipamento consegue fazer e como fazer. Para tal os testes são fundamentais para podermos saber o que o nosso equipamento consegue fazer, porque nenhum é igual ao outro e, por isso, devemos de fazer alguns testes para compreender isso mesmo.

Neste momento, o robô ainda tem várias restrições. Só conseguimos move-lo nas coordenadas cartesianas normais (X, Y, Z), pelo que não conseguimos tirar o máximo proveito do braço de 5 eixos, disponíveis por ele mesmo.

Explorando esta vertente, conseguimos explorar quatro testes padrão, que serão os que nos iremos focar nos próximos pontos. São eles o teste de ângulo, teste de curvas, teste de ponte e teste de limite máximo de impressão.

Explicando melhor cada teste referido anteriormente:

## **Teste de Ângulos Inclinados**

O teste de ângulos é importante para imprimir certos e determinados ângulos inclinados. Geralmente estes testes consistem numa peça com ângulos de 45°, 60° ou 90°. São estes os ângulos mais comuns de testar, mas claro que cada peça é diferente entre si e dependente também do material usado.

Um bom resultado neste teste indica que a impressora consegue reproduzir com precisão as formas geométricas mais desejadas.

## **Teste de Curvas**

O teste de curvas visa avaliar a capacidade da impressora, em criar superfícies curvas, de forma suave e contínua. Geralmente é utilizada uma peça com diversas curvas e arcos de diferentes raios. Tendo isso bem ajustado, produz curvas com transições suaves com o objetivo de haver o mínimo de imperfeições possíveis, proporcionando superfícies uniformes. Ter uma impressora sem este teste, pode resultar em curvas irregulares, com ondulações indesejadas e ou até mesmo falhas de impressão.

## **Teste de Ponte**

O teste de ponte é projetado para avaliar a capacidade de impressão de estruturas suspensas, sem nenhum tipo de suporte. Essas estruturas são conhecidas como pontes e são bastante desafiadoras, devido à ausência de qualquer tipo de suporte na parte de baixo das mesmas. Se a impressora for bem calibrada e descoberta a distância máxima que consegue imprimir, resulta de camadas unidas sem deformação da primeira ou de queda de filamento. Resultando numa ponte suave e uniforme.

## **Teste de Diâmetro Máximo**

O teste de diâmetro máximo é elaborado para verificar a capacidade da impressora em reproduzir o máximo de diâmetro possível e se a mesa de impressão está devidamente calibrada e nivelada. Isto serve para a impressora garantir a impressão uniforme da peça desejada.

Ajuda a identificar problemas de calibração, como já referido, e assim ajustar conforme necessário e garantir que está pronta a imprimir.

Além disso, a realização periódica desses mesmos testes ajuda a monitorizar o desempenho da mesma ao longo do tempo e a identificar falhas e necessidades de manutenção ou reparos.

### 5.3. Desenvolvimento do Conceito da Peça Padrão

Com o objetivo de resolver o problema apresentado anteriormente, foram desenvolvidos diversos conceitos de forma a encontrar a resposta mais otimizada para os testes possíveis de realizar neste momento.

Desta mesma forma, e numa fase mais exploratória da forma, desenvolvemos um conjunto de formas para que fosse possível desbloquear diversos conceitos diferentes, atendendo sempre às restrições que o robô apresenta. Posto isto, vão ser apresentadas quatro formas diferentes, que permitiram um crescimento e evolução maior, desde a peça de princípio (Conceito A), que surgiu com vários problemas, até à peça final (Conceito D), de peça padrão.

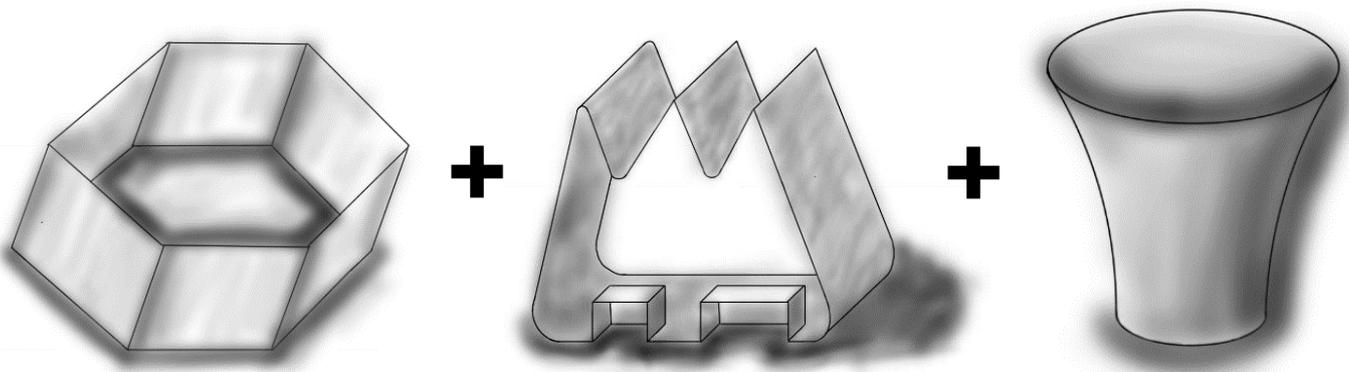


Figura 18: Esboços de Junção de Peças

## Conceito A

Este conceito consistia na primeira junção de formas, em que detetamos vários erros logo de início. A forma hexagonal, que serve para testarmos o diâmetro máximo da peça, deixaria de ter sentido, pois as formas curvas ultrapassavam os limites da forma hexagonal, como mostra na figura 21, marcada a vermelho.

Estas formas curvas que falamos anteriormente, mais à direita na figura 21, servem para testarmos a capacidade e o acabamento que o material consegue fazer em formas mais complicadas de realizar.

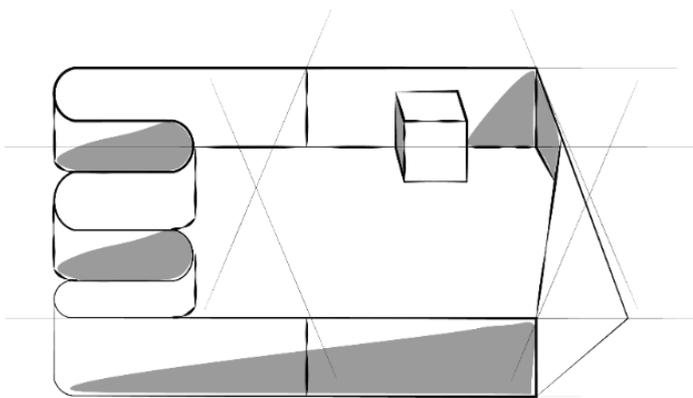


Figura 19: Esboço de Exploração de Forma – Conceito A

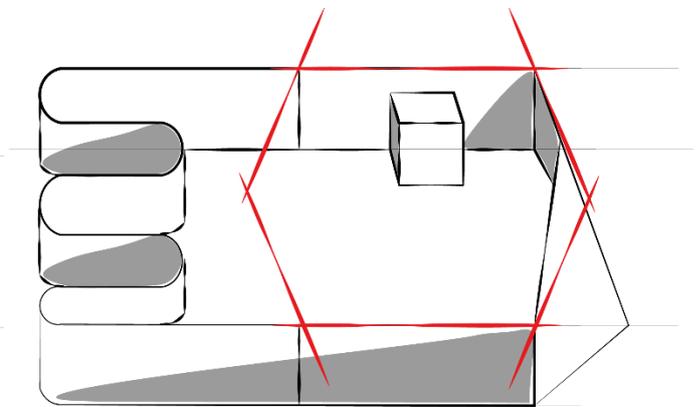


Figura 20: Esboço de Exploração de Forma – Conceito A

## Conceito B

Neste conceito conseguimos ver algumas melhorias a nível de diâmetro máximo.

Conseguimos inserir as formas curvas e retas no interior do hexágono. No entanto, devido a inserção das formas curvas e retas no interior do hexágono, perdemos espaço para fazer o teste de pontes, que era também um dos objetivos desta peça padrão. Decidimos também inserir dois ângulos nas extremidades do hexágono para podermos ter dois testes de ângulo por cada impressão

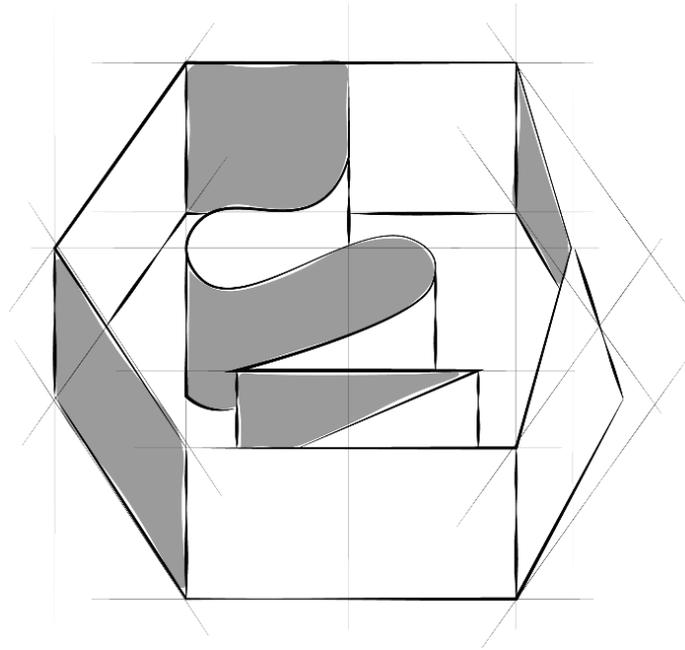


Figura 21: Esboço de Exploração de Forma - Conceito B

### Conceito C

Constatado o problema da falta do teste de ponte, foi desenvolvido o conceito C, precisamente para combater essa dificuldade. Optamos assim por pôr só um ângulo numa das extremidades, ficando com a outra completamente reta, para poder adicionar numa das faces o teste em falta. Sabendo que o robô neste momento não consegue parar a extrusão de filamento, optamos por fazer um conceito em que a peça fosse produzida de forma contínua, sem paragens nem cortes.

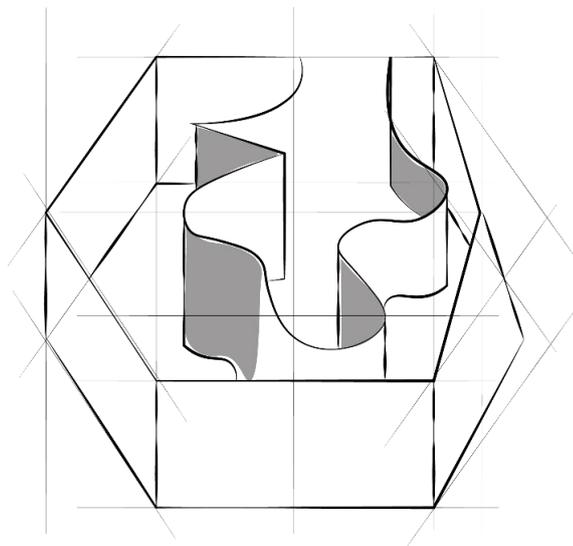


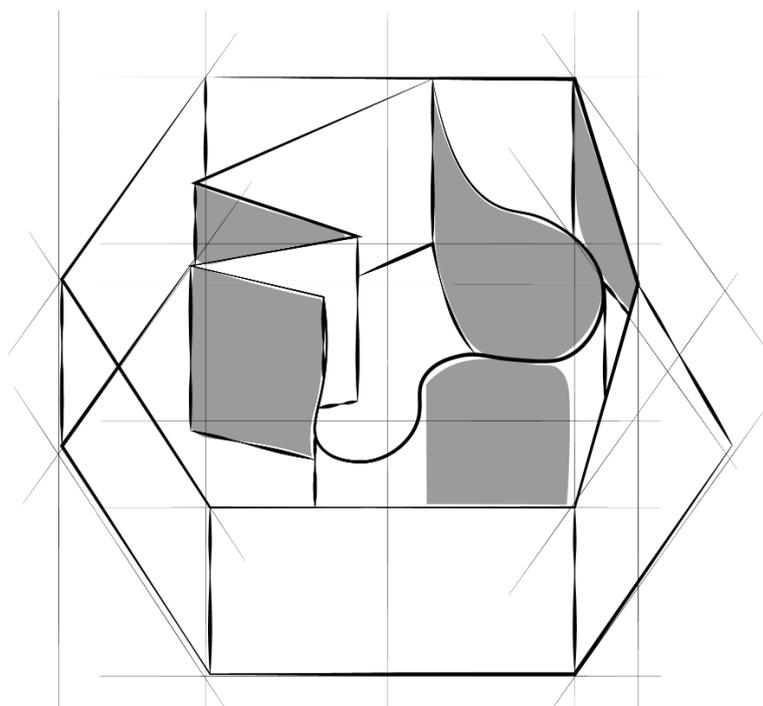
Figura 22: Esboço de Exploração de Forma - Conceito C

## Conceito D (Final)

Este conceito D é o conceito final para a peça padrão, onde contém tudo o que neste momento queremos testar. Testamos o diâmetro máximo devido aos seus seis pontos mais exteriores, conseguimos testar a inclinação que podemos aplicar a cada material, conseguimos testar as suas curvas e os seus ângulos horizontais, para podermos ver os acabamentos do material, e por último testar a distância, que conseguimos percorrer, sem precisar qualquer tipo de suporte.

Esta forma, mesmo sendo parecida ao conceito C, tem uma diferença significativa na hora de a produzirmos. Ao fechar a peça, tornamos o ponto de interseção entre o hexágono e as curvas interiores o mesmo. Apesar disso, continuamos a ter um percurso fechado, contínuo e a poder fazer a peça sem desperdício de material.

Outra questão levantada, para termos feito esta forma, era na hora de retirada da peça com a base de extrusão. Como já foi testado anteriormente, sabíamos que a peça na hora de a retirarmos da base, ia abrir, assim sendo, o resultado não era o pretendido. Devido a todas estas restrições e aos resultados dos testes conseguimos criar uma peça sustentável, por não termos de fazer várias peças, mais rápida e mais eficaz.



*Figura 23: Esboço de Exploração de Forma - Conceito D*

### **5.3. Peça Padrão Parametrizável (Desenvolvimento do Código)**

Com o conceito fechado, atingindo todos os pontos essenciais estudados, é hora de programar o robô, de forma que este, com a extrusora que lhe foi aplicada, produza esta forma.

Para executar toda esta tarefa é necessário o plug-in KUKA PRC, apresentado anteriormente, que funciona dentro do Grasshopper. No desenvolvimento deste tipo de programação são efetuados vários passos, de forma que este obtenha o melhor resultado e o melhor acabamento possível.

A programação do robô, se for desenvolvida do início, é executada em três fases distintas:

- 1- A primeira fase consiste na preparação dos parâmetros essenciais do robô;
- 2- A segunda fase consiste basicamente na programação do robô - definição de ações que serão dadas ao robô para execução da peça;
- 3- A terceira fase, que é a fase em que vamos trabalhar maioritariamente, é a validação das ações em ambiente controlado (Software).

Na figura 26 está representado todo o código de programação da peça padrão criada anteriormente.

Dentro desta imagem estão representados vários círculos vermelhos que representam os pontos que podemos mexer, para podermos ter uma peça plausível e de fácil percepção para quem está a interpretar este código.

Para uma melhor explicação decidimos dividir todos os pontos, para fazermos uma breve explicação de cada um.

Cada número representado, refere-se ao ponto onde se encontra cada parâmetro que vamos falar, para ser mais fácil de enquadrar onde fica cada padrão que se muda.

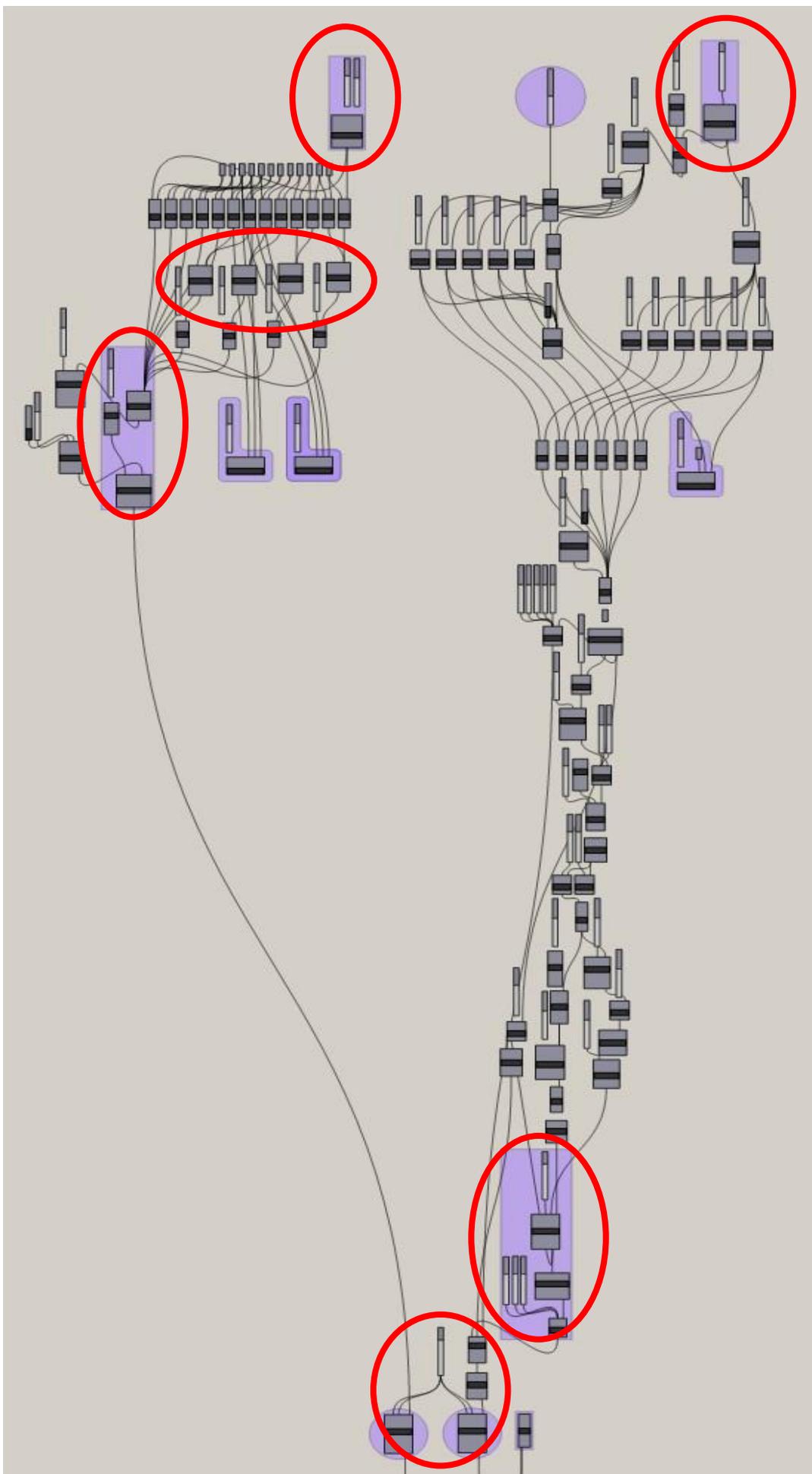


Figura 24: Código de Programação

## 1 - Ângulo

Para ser mais fácil a parametrização dos ângulos, decidimos pôr só um ponto para explicar e para mudar o ângulo que queremos, como mostram as figuras 25 e 27.

Nestas duas figuras, vimos as diferenças que causa na peça, mudando somente o valor que queremos. Podemos alterar para todo o tipo de números, desde que seja de 90 graus até 180.

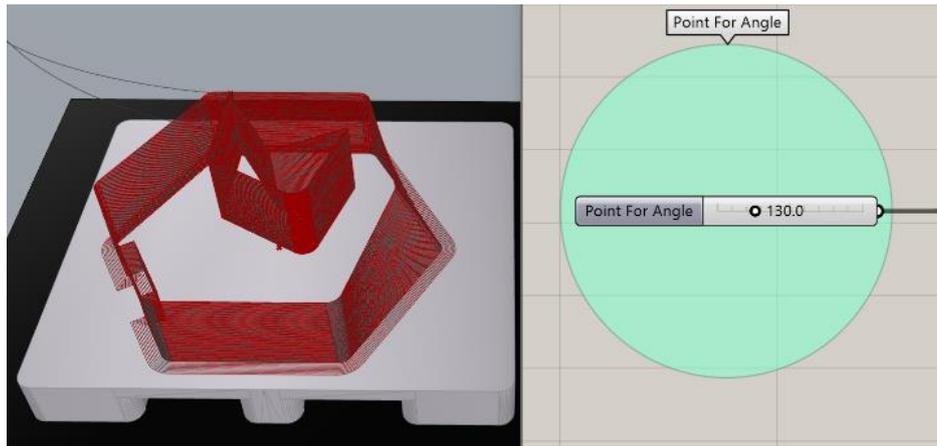


Figura 25: Angulo 1

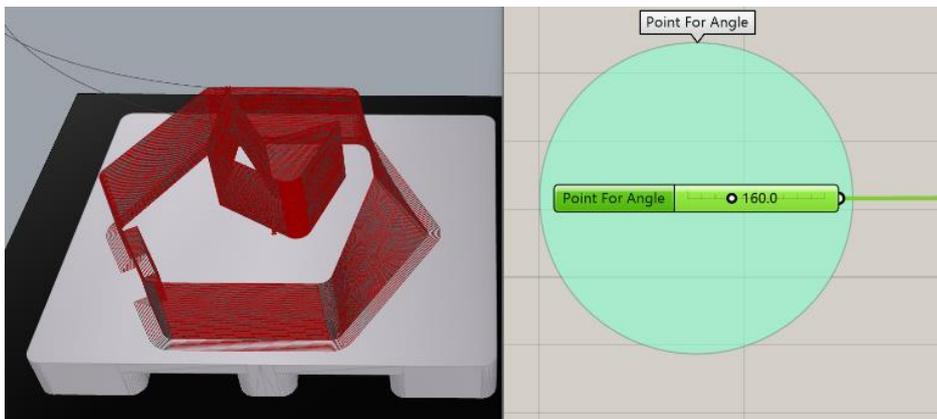


Figura 26: Angulo 2

## 2 - Altura das Camadas

Sendo difícil aumentar a altura ao mesmo tempo, devido ao ângulo ao lado direito, tivemos de fazer dois *number slides* diferentes.

Temos de ter atenção que este 2º número tem de ter o mesmo valor, visto que queremos que a peça cresça toda uniforme e tenha todo o mesmo tamanho. Alterando só o valor fica igual às Figuras 27 e 28.

Neste caso, podemos alterar o valor para o número que quisermos, visto que estamos a testar a altura máxima que o material consegue fazer.

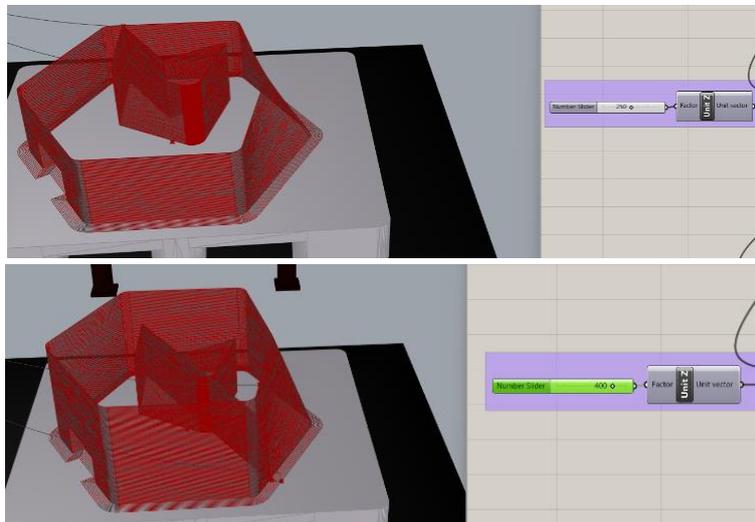


Figura 27: Alturas Exteriores

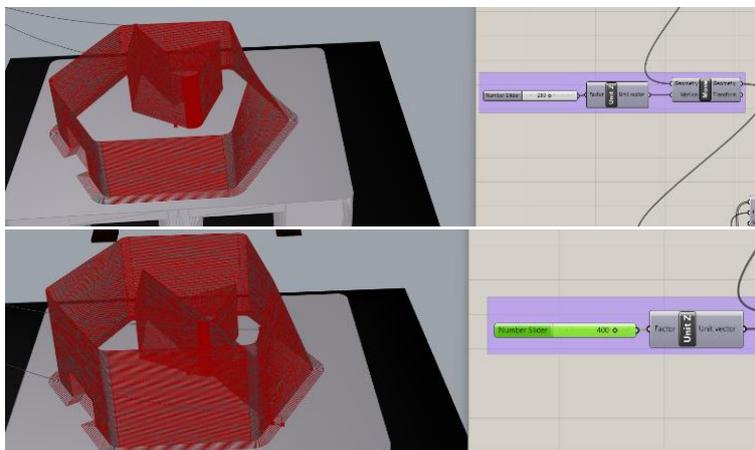


Figura 28: Altura Interior

### 3 – Interior

Nas curvas interiores, temos quatro curvas para podermos parametrizar, em que o *number slide* superior mexe na curva mais abaixo, como mostra a figura 29 e assim sucessivamente até ao *number slide* mais inferior, que mexe na curva mais superior.

Na figura 29 conseguimos perceber então a diferença que os valores podem fazer, neste caso foram valores para redução, mas também podemos aumentar os valores e ter raios maiores. A situação vai dependendo do raio que queremos testar.

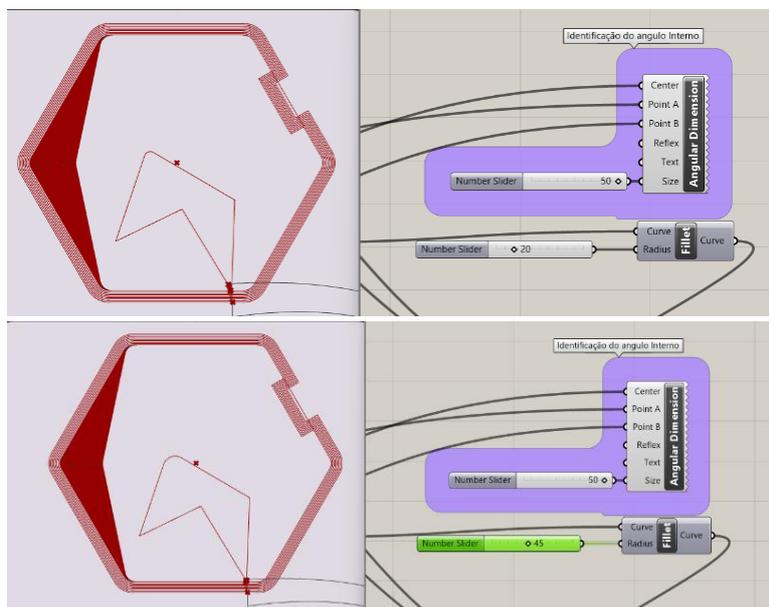


Figura 29: Curvas Interiores

### 4 – Ponte

Neste teste, conseguimos alongar a ponte para podermos ver qual o limite máximo que o material consegue imprimir, sem precisar de algum tipo de suporte.

Como mostra a figura 30, mudando o *number slide* para a distância que pretendemos, conseguimos deste modo alterar a mesma para o valor que pretendemos testar.

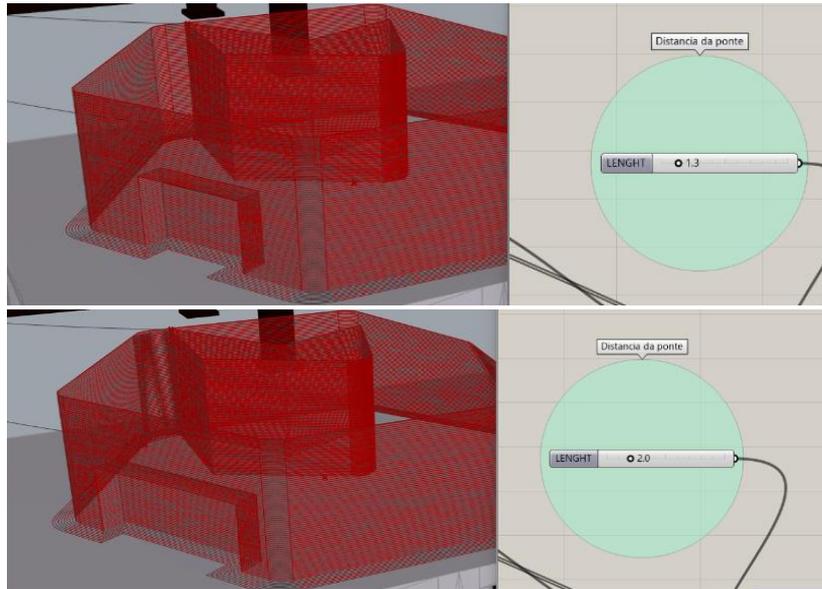


Figura 30: Ponte

## 5 – Scale

Para fazermos uma peça com tamanhos diferentes não chega só aumentar o tamanho do hexágono mais exterior, pois o interior e o exterior são duas peças distintas. Contudo temos de recorrer ao scale que se encontra na ponta mais á direita do código. Para este scale precisamos de fazer uma pequena regra de três simples.

A figura 31 tem o *number slide*, que denominei de “scale”, com o valor de 1 (um). Este valor representa 50cm (cinquenta centímetros) de diâmetro. Na figura 34 o *scale* tem o valor de 0.50, metade do valor da figura 32, isso significa que em vez de ter 50cm de diâmetro, vai ter 25cm de diâmetro. Este exemplo é um exemplo muito simples, pelo que a abaixo será demonstrado outro de forma a perceber-se melhor a função. Com este método podemos aumentar e diminuir a peça sem perdermos nada da mesma.

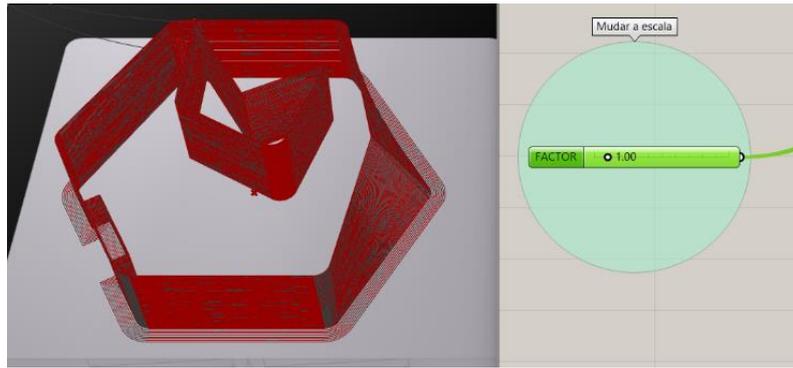


Figura 31: Scale 1

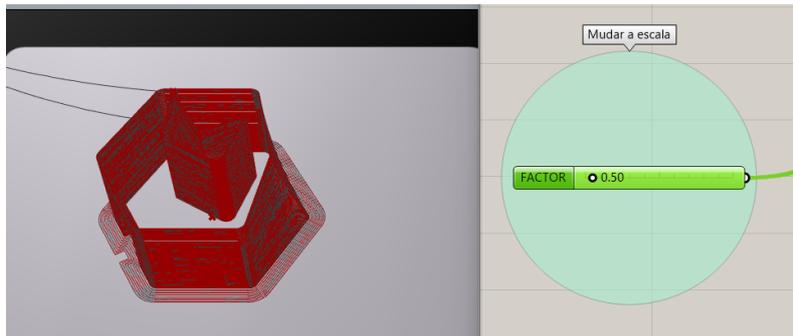


Figura 32: Scale 2

## 6 – Ponto na Face

O ponto onde queremos que comece o interior também podemos parametrizar. Neste momento, o ponto está num canto do hexágono, mas podemos pôr o mesmo no meio do hexágono como pretendemos, e como podemos ver na figura 33.

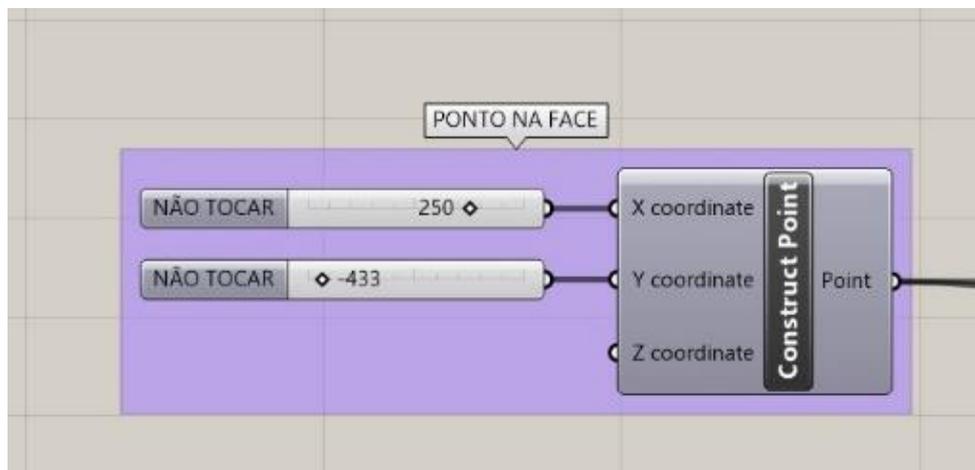


Figura 33: Ponto na Face

## 7 – Raft/Brinth

Para finalizar, o raft/Brinth pode ser parametrizável, podemos aumentar ou diminuir a camada de aderência da base de extrusão para o material não poder levantar. O objetivo é tentar sempre imprimir sem precisar do raft, para não haver desperdício de material, mas em alguns materiais, como no PP virgem, isso não é possível, pois os cantos da peça levantam com o passar das camadas. Neste caso, é necessário parametrizar o raft para que este consiga que a peça tenha uma aderência melhor há mesa.

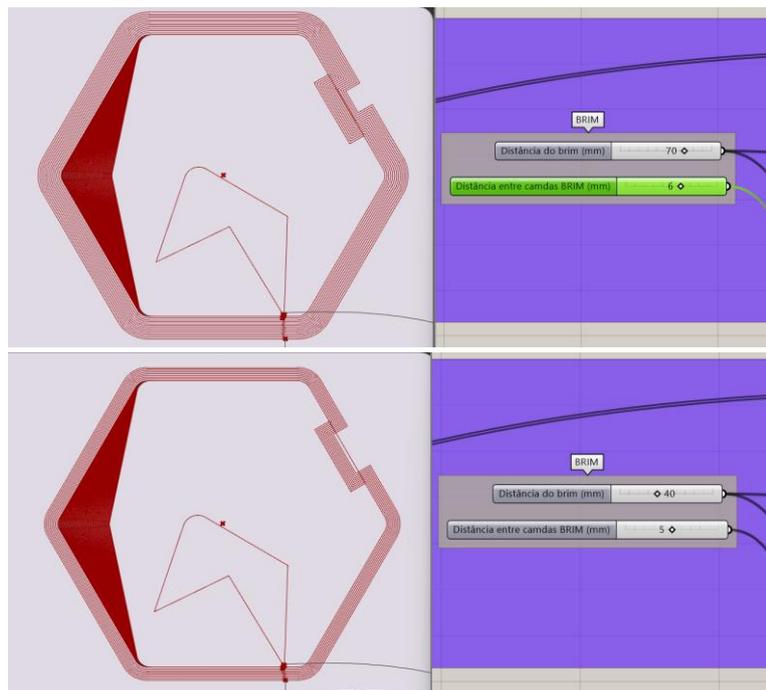


Figura 34: Raft/Brinth

## Conclusão

Concluindo, esta peça padrão é totalmente parametrizável, o que representa uma poupança de tempo significativa e um passo à frente na evolução deste tipo de processo de fabrico, capacitando os usuários de aprimorar a qualidade de impressão, aperfeiçoar a precisão da máquina e ampliar a capacidade de a impressora fazer coisas diferentes. Este avanço impulsiona a tecnologia de impressão 3D, mas também a criatividade e inovação dos que exploram as suas possibilidades.

#### **5.4. Produção da Peça**

No culminar do processo de criação da peça final com o desenvolvimento da parametrização da mesma, a conclusão é mais que um simples fechar de portas. É neste momento em que a virtualidade do design e a tangibilidade da realidade do design se encontram, fundindo-se numa manifestação tridimensional palpável. A conclusão desta peça padrão é uma nota na composição entre inovação e precisão, obedecendo aos comandos definidos e ao design estipulado anteriormente.

Algumas camadas um pouco imperfeitas, com trabalho e precisão do robô, podem chegar a uma linha limpa e a um produto sem qualquer tipo de defeito e com bom ruído visual. Assim sendo, na figura 35 encontra-se a peça padrão inicialmente pretendida a nível de design e a nível de programação, tendo em vista o melhoramento da precisão do robô. Cada detalhe que conseguimos melhorar neste processo de fabrico é um triunfo na revolução da fabricação, destacando a capacidade de transformar da tecnologia na materialização da criatividade. Para que vários designers possam procurar e executar as suas peças, este processo de teste é importante para que não haja erros.



*Figura 35: Peça Padrão*

## 5.5. Parâmetros de Avaliação

Após a conclusão da impressão da peça padrão será necessário realizar uma avaliação meticulosa, considerando diversos parâmetros essenciais. Esta etapa crítica visa extrair algumas conclusões altamente fundamentais, que tenha o objetivo a otimização da relação entre diferentes elementos para alcançar uma peça de qualidade o mais superior possível. Os parâmetros avaliados incluem a qualidade das camadas, a adesão entre camadas e as dimensões finais da peça. Ao proceder a avaliação das peças, decidi atribuir uma pontuação na escala de 1 a 5, onde 1 (um) representa um desempenho insatisfatório e o 5 (cinco) significa um desempenho excepcional. Estas pontuações são atribuídas com base em critérios específicos relacionados com o objeto tendo em conta a qualidade das camadas, adesão entre camadas, dimensão final e excesso de material.

### • Qualidade das Camadas

A qualidade das camadas é um aspeto primordial na avaliação pós-produção. Isso implica a uniformidade, textura e integridade das camadas individuais da peça. Uma distribuição consistente, regular e suave das camadas, contribui para a resistência, durabilidade e acabamento da peça final.

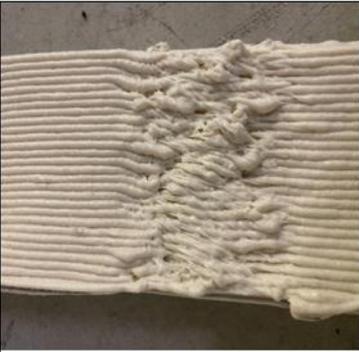
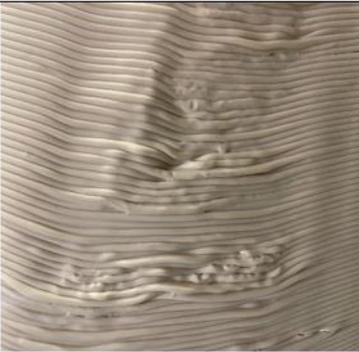
		
Podemos ver que a qualidade das camadas na imagem não é a melhor, o que traz diversos problemas de resistência e de aspeto à peça final.	Podemos ver que a qualidade da camada continua a não ser a melhor, mas mesmo assim é melhor que a anterior. Podemos observar evolução	Podemos concluir que esta camada uniforme e sem irregularidades é o esperado desejado em todas as peças produzidas futuramente.
<b>Avaliação: 1</b>	<b>Avaliação: 2</b>	<b>Avaliação: 5</b>
<b>Observação:</b>		

Tabela 1: qualidade das camadas

- **Adesão Entre Camadas**

A adesão entre camadas é outro aspeto importante na avaliação. Uma adesão inadequada pode resultar em algumas fragilidades estruturais, comprometendo a integridade da peça. Avaliar a adesão entre camadas é importante para garantir uma construção sólida e resistente.

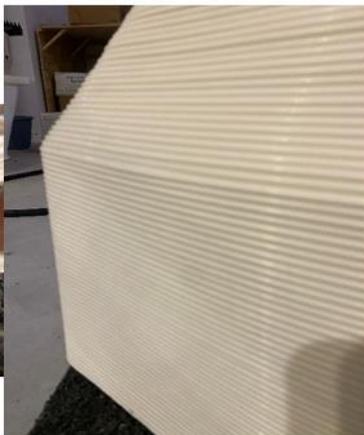
		
<p>Podes observar que houve uma camada que não aderiu direito e com isso o resto da peça, pode sair completamente deformada.</p> <p><b>Avaliação: 1</b></p>	<p>Podemos observar que uma camada não aderiu em condições apesar de parecer o contrário. É preciso ter em atenção estes pormenores pois podem causar problemas em futuras peças</p> <p><b>Avaliação: 3</b></p>	<p>Podemos observar que todas as camadas aderiram de forma regular e constante entre elas. É neste ponto que queremos que as nossas avaliações terminem.</p> <p><b>Avaliação: 4</b></p>
<p><b>Observação:</b></p>		

Tabela 2: adesão entre camadas

- **Dimensão Final**

Para além disso, a dimensão final da peça tem um papel importante na determinação da utilidade e conformidade com as especificações desejadas. A precisão dimensional é fundamental para garantir que a peça atenda aos requisitos exatos do projeto, evitando desvios que possam afetar a funcionalidade ou encaixes inadequados.

	
<p>Podemos observar que as bases destas 2 peças são diferentes porque a dimensão final não era a desejada, por isso a alteração da mesma para uma base diferente para ter a dimensão pretendida.</p> <p><b>Avaliação: 2</b></p>	<p>Podemos observar que nesta peça a base saiu consoante a dimensão pretendida. Sem formas muito orgânicas, nesta peça, podemos perceber que a dimensão final é a pretendida.</p> <p><b>Avaliação: 4</b></p>
<p><b>Observação:</b></p>	

*Tabela 3: Dimensão final*

- **Excesso de Material**

O excesso de material pode-se manifestar de várias maneiras, como saliências, rebarbas ou áreas de acumulação indesejadas. Essas irregularidades podem comprometer não apenas a estética, mas também a sua funcionalidade.

		
<p>Podemos observar um enorme excesso de material durante a produção, camadas com material a mais cria um efeito visual negativo e um não aproveitamento de todo o material utilizado.</p> <p><b>Avaliação: 1</b></p>	<p>Podemos observar um excesso de material nos diversos cantos, e na interseção das 2 linhas interiores.</p> <p><b>Avaliação: 2</b></p>	<p>Podemos observar que não há excesso de material nas paredes da peça. esta tudo uniforme. Só há um pequeno excesso de material na zona da aderência da peça com a base onde foi produzida.</p> <p><b>Avaliação: 4</b></p>
<p><b>Observação:</b></p>		

Tabela 4: Excesso de material

## Conclusão

Com estas avaliações podemos concluir que a nossa peça padrão foi bem produzida, apresentando valores positivos nos diversos parâmetros considerados anteriormente.

A qualidade das camadas tem uma pontuação de 5, destacando a uniformidade e ausência de falhas na deposição de material. As dimensões finais também são as melhores, sem falhar na dimensão máxima da peça.

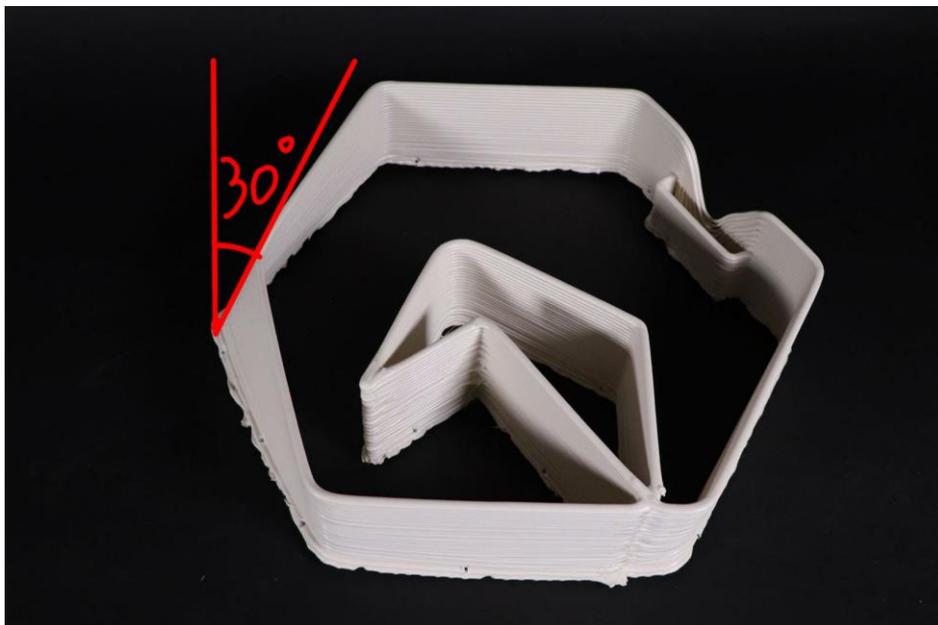
tendo a adesão entre as camadas e o excesso de material, tem margem para melhorias, recebe também nota bastante positiva em comparação á peças produzidas anteriormente. Esta peça demonstra assim uma boa integridade estrutural, resistência e acabamento, fazendo foco nas configurações utilizadas durante a impressão.

## 5.6. Valores Apresentados

Com a produção desta peça padrão, conseguimos perceber vários valores máximos, e tirar muitas conclusões da mesma, sendo elas as seguintes:

### Ângulo

Como mostra a figura 46 o ângulo máximo que conseguimos fazer é 30 graus a partir do eixo Z do robô.

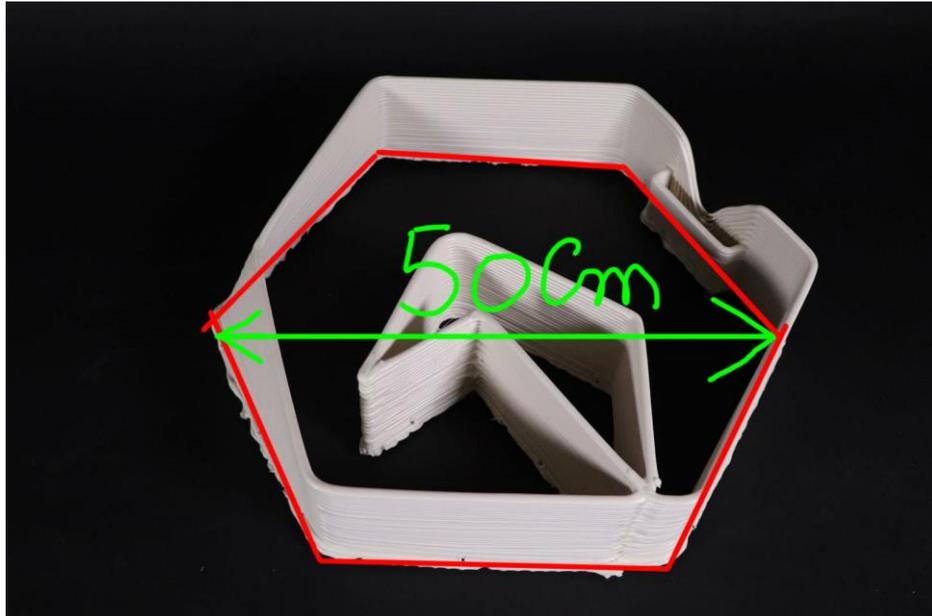


*Figura 36: Teste de Ângulo*

### Diâmetro Máximo

Na figura 47 conseguimos perceber que conseguimos fazer 50cm de diâmetro sem qualquer tipo de problema.

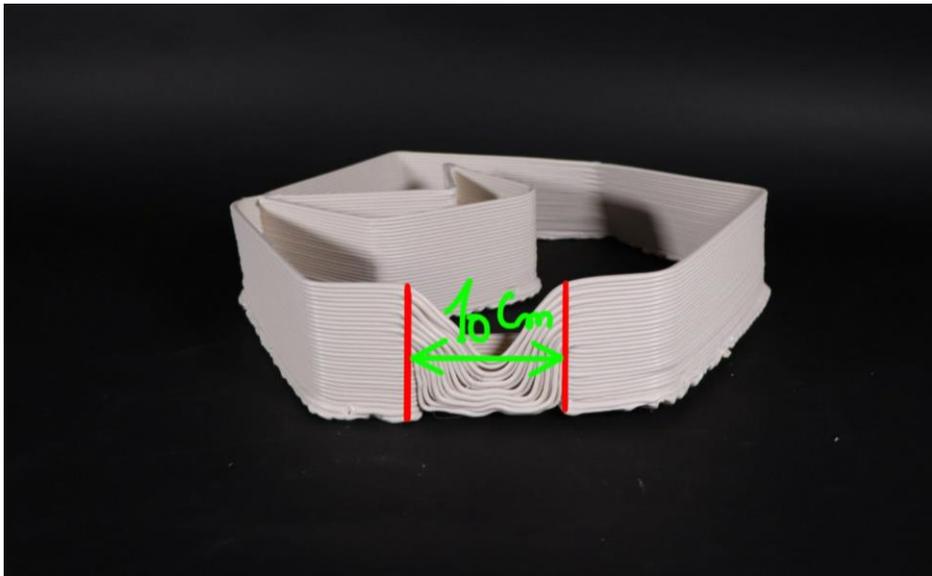
Apesar de conseguirmos fazer um diâmetro maior, decidimos por só 50cm de diâmetro para poder poupar material neste teste inicial da peça.



*Figura 37: Teste de Diâmetro Máximo*

### **Ponte**

Neste ponto conseguimos perceber que o material não consegue fazer nenhum tipo de ponte. Vai sempre precisar de algum tipo de suporte, isto para o material utilizado. Certamente existem outros materiais que conseguem fazer algum comprimento sem qualquer tipo de suporte.



*Figura 38: Teste de Ponte*

## Curva Interior

Na figura 49 conseguimos perceber que conseguimos fazer 30mm de curva, sem ter imperfeição e sem desperdiçar material. Curvas com um raio mais pequeno, deixa um excesso de material, e com esse excesso de material uma possível imperfeição durante a produção da mesma.

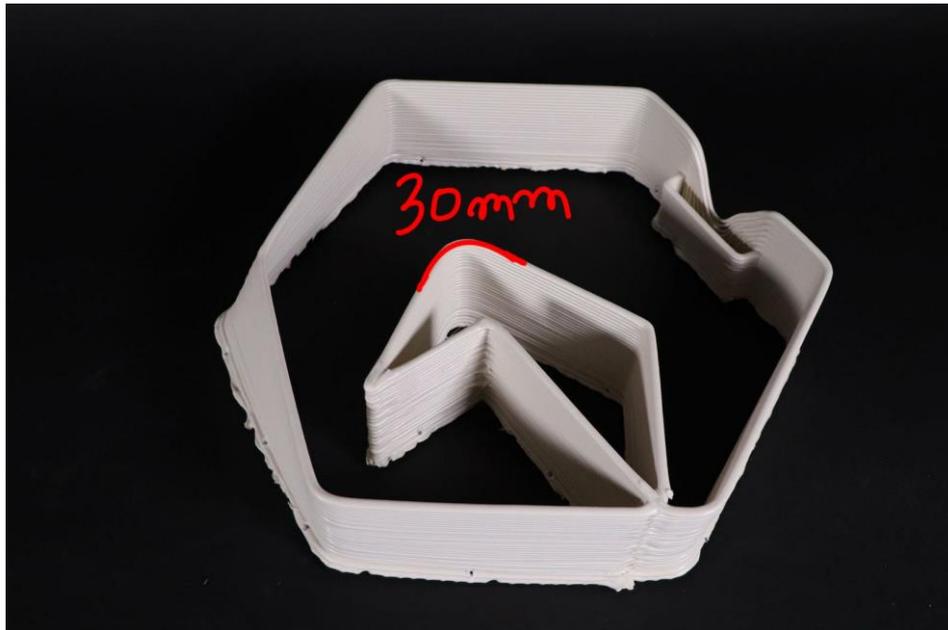


Figura 39: Teste de Curva Interior

## Ângulos interiores

Na parte dos ângulos interiores, conseguimos perceber que o ângulo de  $90^\circ$ , consegue fazer sem problema, e sem imperfeições. Na figura 50 o ângulo de 20 graus, já tem algumas imperfeições e com excesso material.



Figura 40: Teste de Ângulos Interiores

## 6 Conceitos Desenvolvidos

Com o objetivo de resolver o problema apresentado anteriormente foram desenvolvidos diversos conceitos de forma, para podermos encontrar a forma mais desejável e que melhor otimize a peça padrão apresentada anteriormente nos mais diversos parâmetros estudados. Desta forma, numa fase mais precoce e mais exploratória, desenvolveu-se um conjunto de formas para conseguirmos ter noção de vários conceitos e formas diferentes (figura 41). Após a execução das mesmas é feita uma reflexão para entender de que forma é que podemos dar seguimento e aprimorar o mesmo. Posto isso, foram selecionados quatro conceitos diferentes em que um deles foi evoluindo em mais quatro conceitos aprimorados.

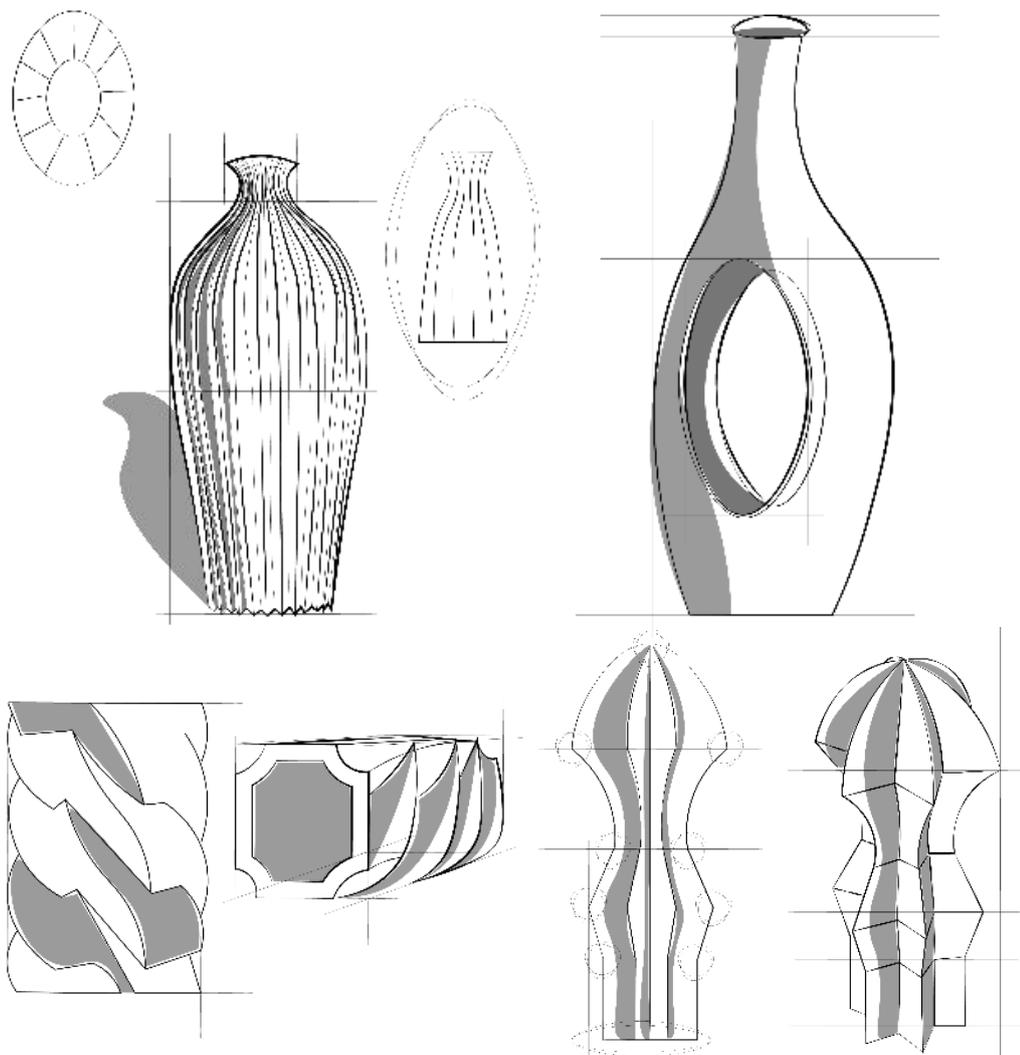


Figura 41: Esboços da Peça Final

## Conceito 1

Este conceito consiste numa estrutura oval, seguindo a filosofia do minimalismo elegante. Com linhas limpas e formas geométricas, este conceito destaca-se pelas linhas suaves que vão desde a parte inferior do produto até à parte superior do mesmo. Este tipo de peça de design pode ser um elemento essencial para ambientes mais modernos e minimalistas. Em espaços com graciosidade, este conceito torna-se numa testemunha silenciosa entre a forma e a sua função.

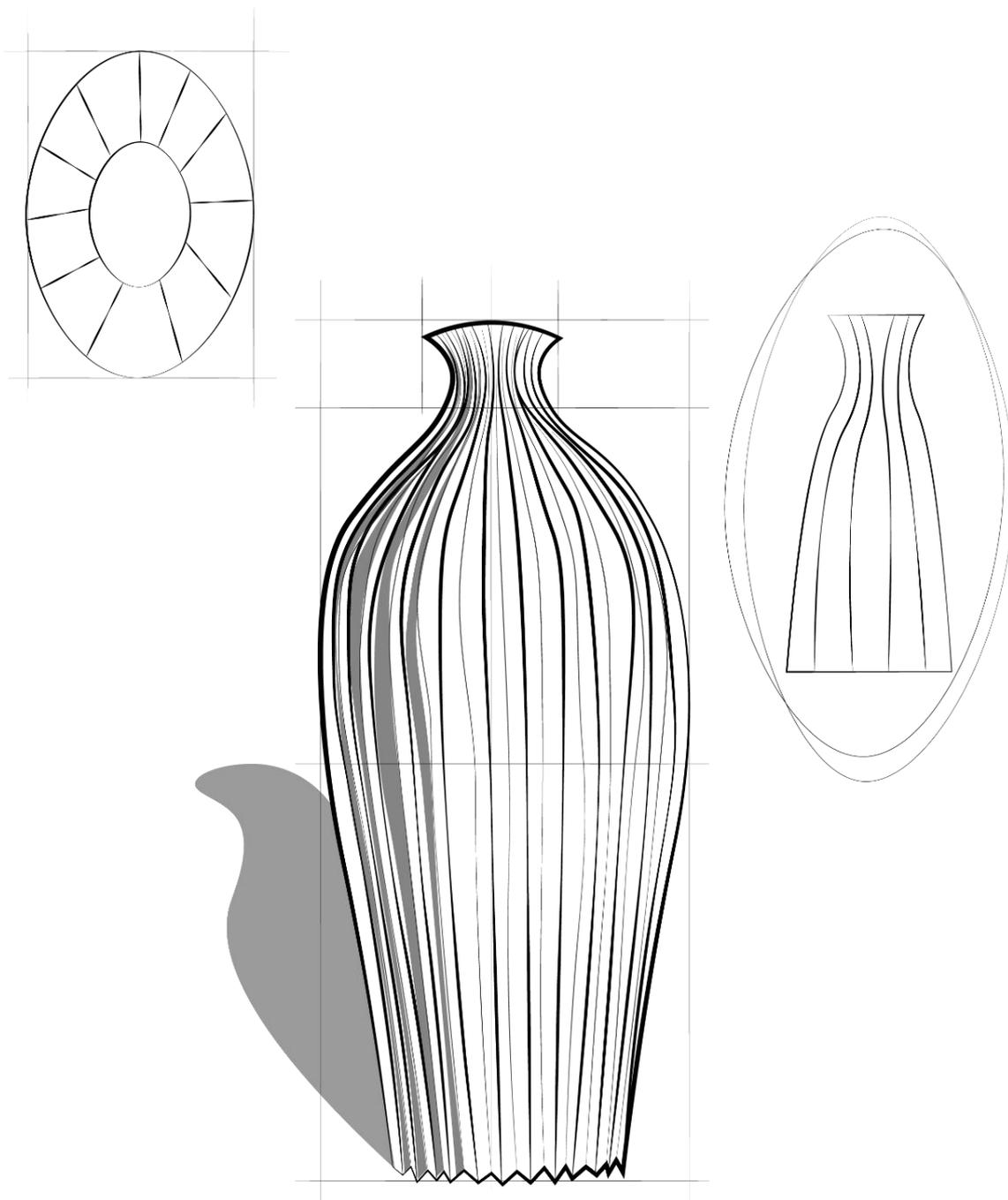
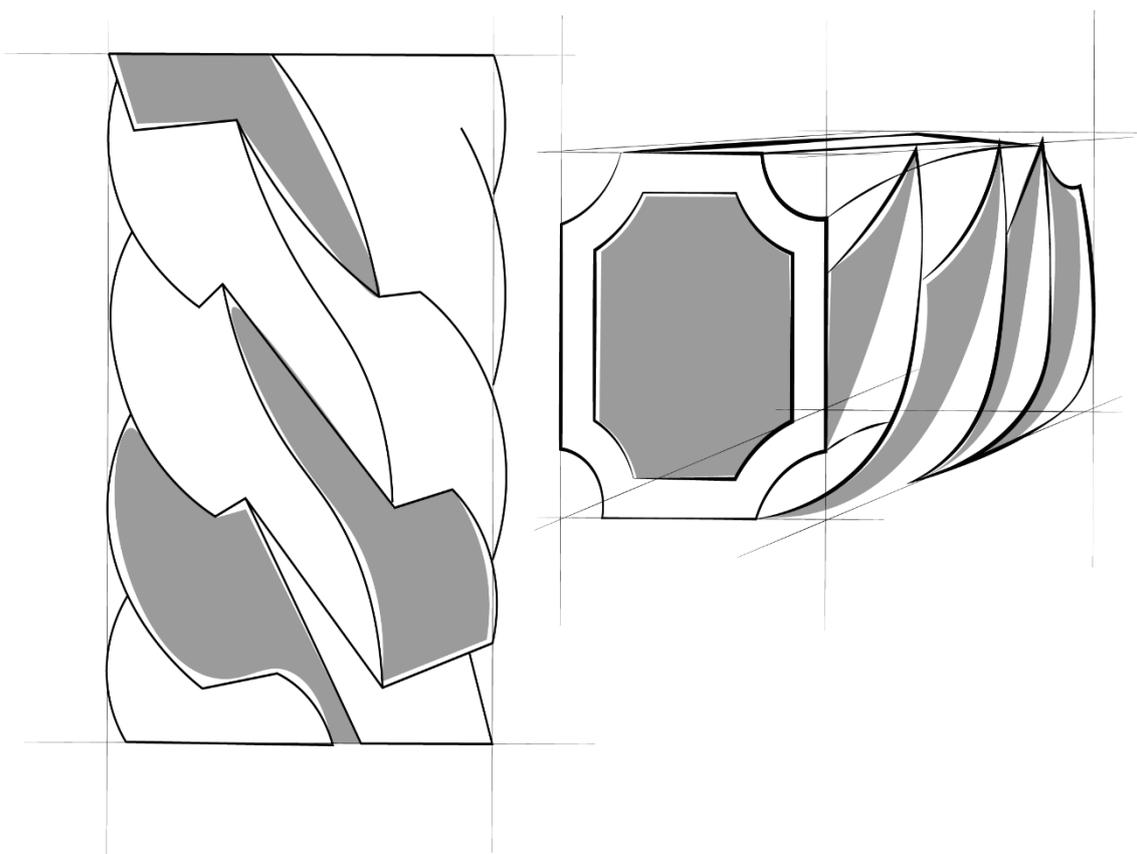


Figura 42: Conceito Desenvolvido 1

## Conceito 2

O conceito 2, consiste também numas linhas suaves que vão entre a parte inferior do produto até ao topo do mesmo. No entanto, a sua forma mais arredondada da parte superior, numa proporção e tamanho maiores, dá-lhe um toque de requinte e subtileza.

Este conceito também é desenhado de acordo com as formas possíveis que a tecnologia de produção nos oferece.

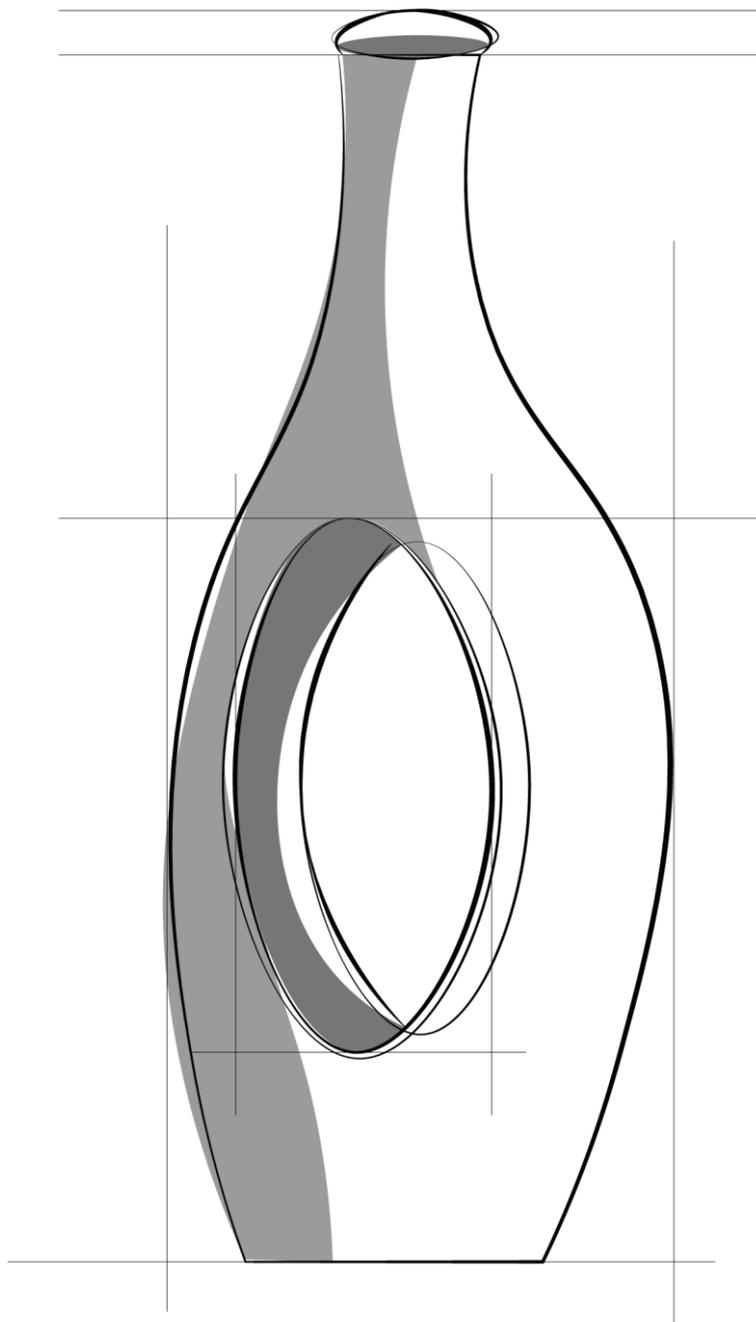


*Figura 43: Conceito Desenvolvido 2*

### Conceito 3

O conceito 3 consiste na criação de um orifício no meio da jarra para dar uma harmonia e subtileza na peça.

A inspiração na natureza é o ponto forte para a criação desta peça, revelando também a sua textura, criando um efeito visual cativante, transformando este conceito numa fonte de fascínio estético.



*Figura 44: Conceito Desenvolvido 3*

## Conceito 4

Este conceito 4, presente na figura 56 e 57 é um pouco diferente dos apresentados anteriormente. Bem mais pequeno que os outros três conceitos e com umas linhas e geometria bem mais complexa, é direcionado para as pessoas mais arrojadas e com um estilo mais vanguardista. A sua forma geometria é o ponto com mais interesse nesta peça e que mais se distingue.

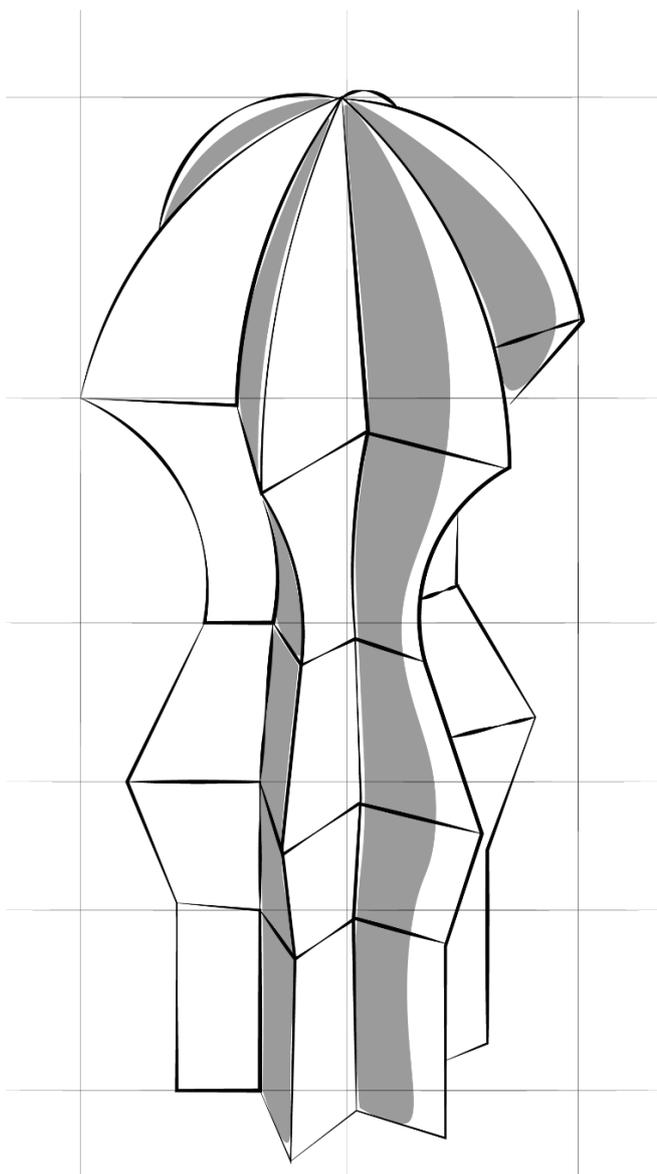


Figura 46: Conceito desenvolvido D

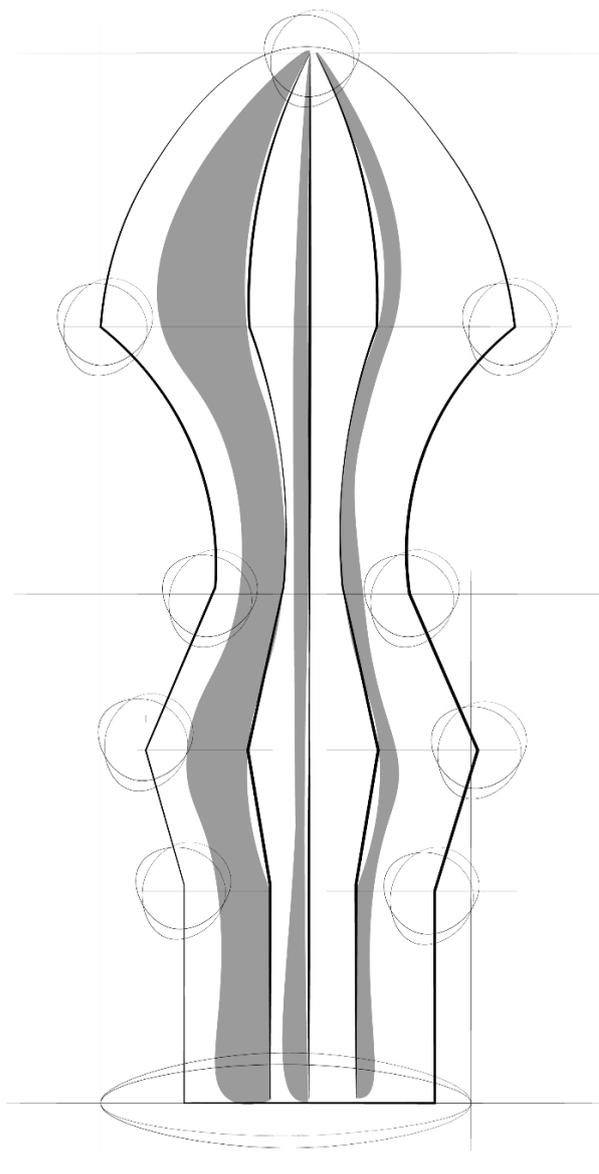


Figura 45: Conceito desenvolvido D

## Refinamento do Conceito Final

Com a seleção do conceito final escolhido (conceito 4) foi preciso um desenvolvimento mais profundo da sua estrutura, tendo em atenção as diversas restrições que o nosso processo de produção ainda tem. Este conceito foi escolhido porque todos os outros apresentavam alguma limitação que neste momento não conseguimos fazer no robô.

Assim sendo, todas estas estruturas, nos diversos ângulos, dimensão máxima e curvaturas, foram devidamente estudadas e programadas para que tudo corre-se pelo melhor.

A medida geral deste produto era de 1,60m de altura e 25cm de raio no pé da peça, sendo que mais em cima vai alcançar cerca de 50cm de diâmetro.



*Figura 47: Conceito Desenvolvido Final*

Assim sendo, nesta peça, todos os cantos com arestas vivas foram arredondados, para que não existisse excesso de material e para que todos os ângulos estudados fossem os corretos neste material, como já visto anteriormente na nossa peça padrão, não pode ultrapassar 30 graus de inclinação.

Tendo em vista estes pontos, chegamos à nossa peça final imagem 48, com os devidos valores para produção.

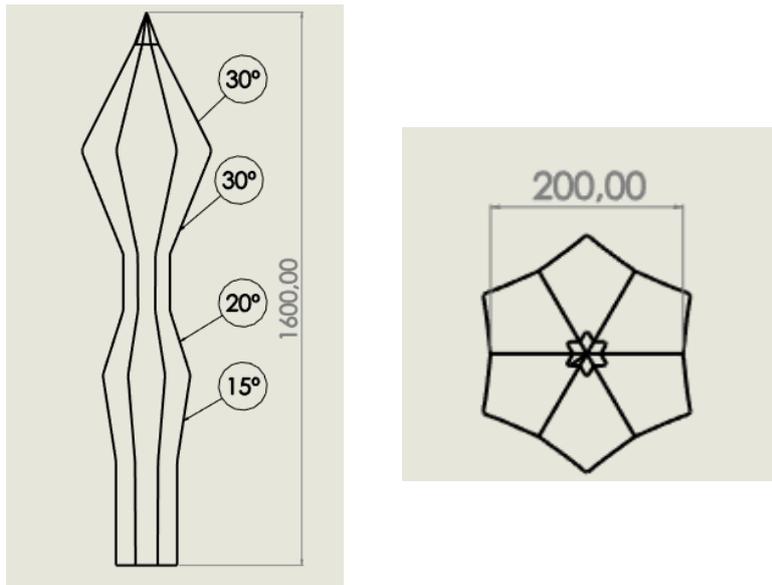


Figura 48: Valores Máximos

### Desenvolvimento de Código para Produção

Com o conceito completamente desenvolvido e fechado, seguimos para a programação do robô que vai realizar a produção do mesmo no método de produção já descrito anteriormente. Para realizar este processo, precisamos de usar o software apresentado também anteriormente, o KUKA PRC, como plug-in do Grasshopper. Neste desenvolvimento de código de produção foram efetuados vários passos, de forma a tirar o máximo rendimento e resultado possível.

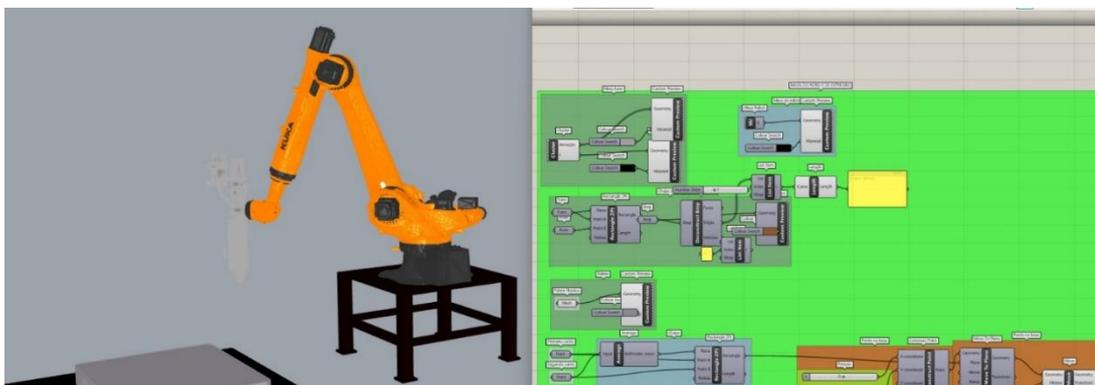
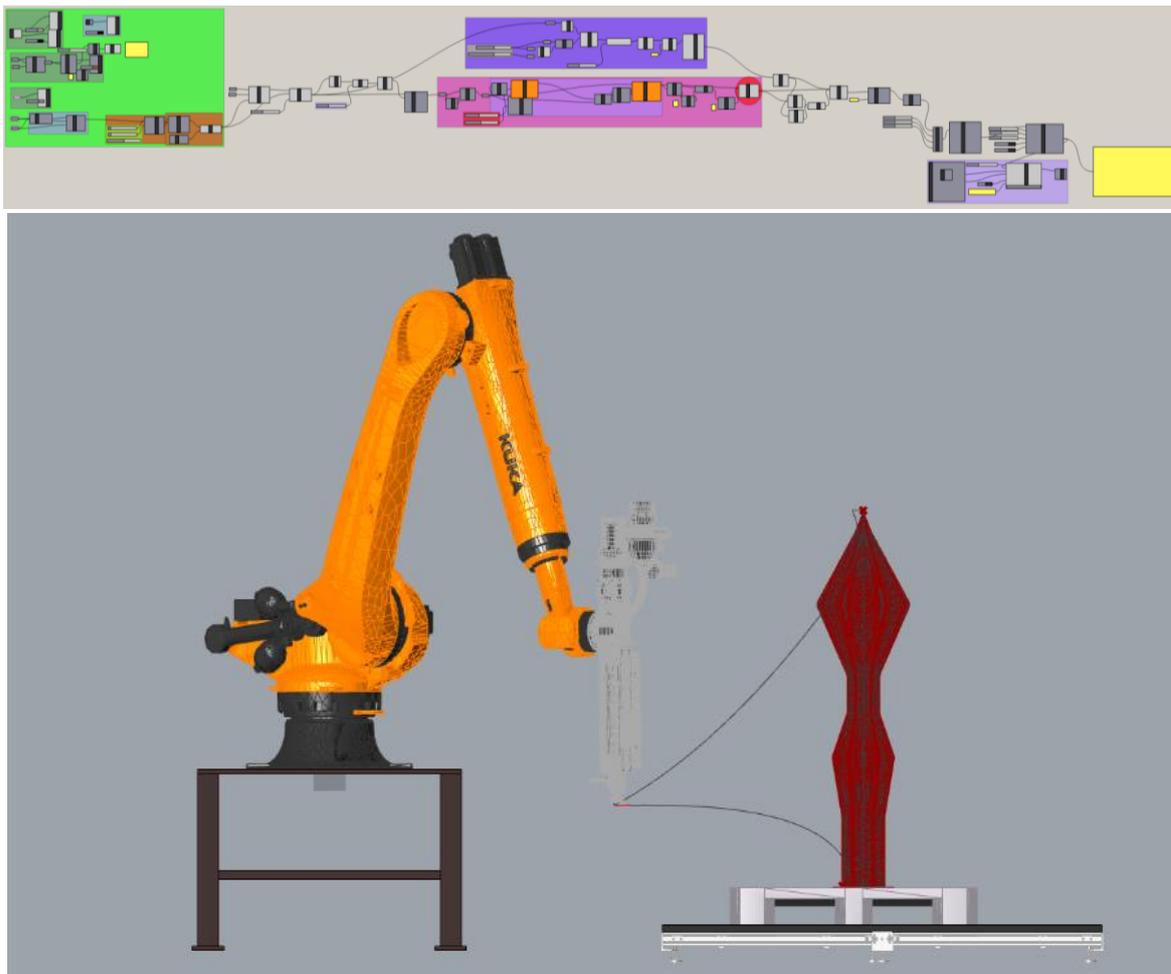


Figura 49: Parâmetros da Extrusora

A programação desta peça no robô é executada em três fases diferentes. A primeira fase consiste nos comandos básicos sobre o robô (modelo), na ferramenta que estamos a usar para a extrusão de filamento, no tipo de camadas que irá receber e na sua mesa de impressão. Estes são os principais parâmetros a inserir logo numa fase mais precoce da programação.

Com estes parâmetros definidos, programamos o modo do movimento do robô, que será entre pontos. Esta programação não lê linhas, mas sim pontos, pelo que temos de converter a linha para pontos.

Desta mesma forma foi executado um conjunto de comandos que transforma a geometria em linhas e depois em pontos, que o robô vai ler como caminho a seguir. Pretendemos então executar a interseção de planos, de forma a obter as linhas das diversas camadas que deve percorrer.



*Figura 50: Parâmetros de Extrusão - Peça*

## 7 Produção da Peça Final

De forma a entender a produção deste tipo de peças, nada melhor que produzir a mesma, para averiguar se está tudo conforme o projetado e desejado.

Este tipo de teste de material tem como objetivo entender quais os melhores parâmetros de produção para perceber se é ou não viável produzirem neste material.

### 7.1. Material Utilizado

**Nome técnico:** REC MX5200-5046 RS | Natural X3

**Nome comercial:** PP reciclado com 30% de carbonato de cálcio

 <b>Maxxam™ REC MX5200-5046 RS I Natural X3</b> Avient Corporation - Polypropylene			
Wednesday, August 23, 2023			
General Information			
<b>Product Description</b>			
The Maxxam® REC Series of compounds are based upon Post Consumer Recycled, PCR and/or Post Industrial, PIR, PP resins and/or fillers, with select combinations of unfilled, mineral or glass fiber reinforcements offering a unique balance of physical property and part performance. These materials have been specifically formulated to offer ease of processing in most standard thermoplastic processing equipment.			
<b>General</b>			
Generic Name	• Polypropylene, Unspecified (PP, Unspecified)		
Material Status	• Developmental		
Availability	• Europe		
Recycled Content	• Yes		
Features	• Good Impact Resistance	• Heat Stabilized	• Recyclable Material
Uses	• Automotive Applications	• Household Goods	• Packaging
	• General Purpose	• Industrial Applications	
Appearance	• Natural Color		
Forms	• Pellets		
ASTM & ISO Properties <sup>1</sup>			
Physical	Nominal Value	Unit	Test Method
Density <sup>2</sup>	1.16	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (230°C/2.16 kg)	10 to 20	g/10 min	ISO 1133
Mechanical	Nominal Value	Unit	Test Method
Tensile Modulus	1700	MPa	ISO 527-1
Tensile Stress	20.0	MPa	ISO 527-2
Tensile Strain (Break)	> 5.0	%	ISO 527-2
Impact	Nominal Value	Unit	Test Method
Charpy Notched Impact Strength	2.5	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
Charpy Unnotched Impact Strength	No Break		ISO 179
Flammability	Nominal Value	Unit	Test Method
Flame Rating	HB		UL 94
<b>Additional Information</b>			
Recycled content 60-70% PCR			
Processing Information			
Injection	Nominal Value	Unit	
Drying Temperature	80	°C	
Drying Time	1.0	hr	
Processing (Melt) Temp	180 to 220	°C	
Mold Temperature	25 to 55	°C	

Figura 51: Material Utilizado

## 7.2. Parâmetros

Como o material já foi testado anteriormente na peça padrão e a peça estando de acordo com os parâmetros feitos por essa mesma peça, estão reunidas condições para que o processo saia conforme o planejado. O que na realidade não acontece, como podemos ver nas figuras 52 e 53. É possível ver que uma das camadas não aderiu corretamente à camada inferior. Isto pode acontecer devido à velocidade de deslocação do braço robótico ou devido às correntes e ar existentes durante o processo de produção. Neste caso, como podemos ver na figura 53 o centro da peça marcada a vermelho começou a ficar com alguns defeitos em comparação com as camadas inferiores. Isto pode acontecer devido à geometria da peça ser complexa e as camadas começarem a ficar com alguns defeitos.

Tendo esse defeito, implica que toda as camadas superiores não ficassem devidamente corretas, o que pode ter causado esta deformação de peça.

Outro problema que pode ter acontecido é devido à temperatura de extrusão do material. Como o material tem de ser extrudido a uma temperatura de **185°**, pode ter escorrido um pouco para os lados e assim ganhar umas folgas, podendo, na camada que não aderiu, ter já uma folga de 1cm. Para evitarmos que este problema não torne a acontecer, devemos ligar as ventoinhas inseridas perto do bico de extrusão, para que, mal o material saia do bico de extrusão, seja arrefecido e solidifique mais rapidamente.



Figura 52: Peça final



Figura 53: pormenor da Peça Final

### 7.3. Parâmetros de Extrusão Utilizados

De forma a entender a produção de peças com a tecnologia que estamos a estudar, surge a necessidade de utilizar valores de temperatura de extrusão. Desta forma estamos mais perto de entender os parâmetros que devemos utilizar ou melhorar a peça em questão.

Tem como objetivo entender quais os melhores parâmetros para produção e se ainda é viável a sua produção ou necessidade de alteração de algum parâmetro.

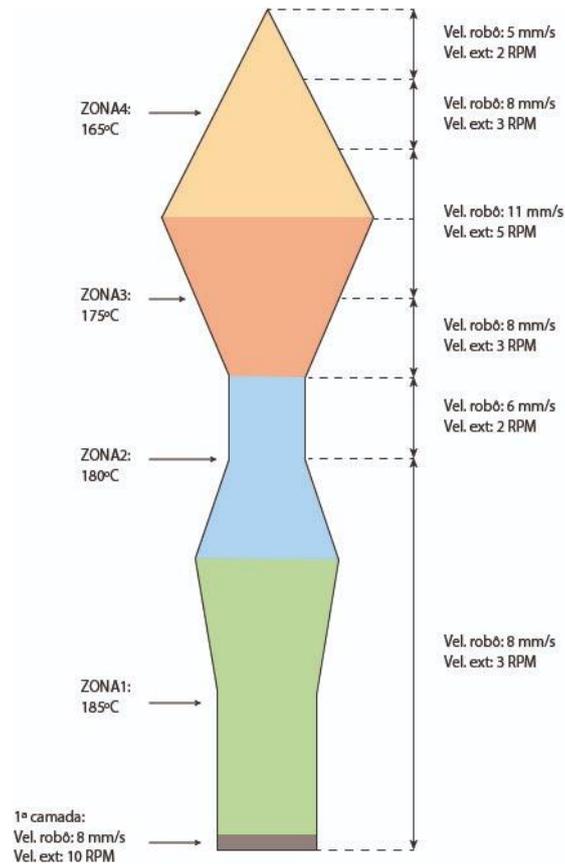


Figura 54: Parâmetros de Extrusão Utilizados

### 7.4. Considerações finais

Para alcançar a máxima eficiência e qualidade é necessário um controlo meticuloso de diversos parâmetros durante o processo, no ajuste de vários parâmetros diretamente do robô.

### **7.4.1 Controle da Qualidade do Material Depositado**

A manipulação eficiente da quantidade de material depositado é essencial para garantir a precisão e durabilidade das peças impressas. Diversos parâmetros estão envolvidos neste processo, sendo que cada um apresenta um papel com relativa importância.

- **Velocidade de Extrusão**

A velocidade de extrusão, que é medida em rotações por minuto (Rpm), desempenha um papel importante na quantidade de material depositado. Velocidades mais baixas resultam em depósitos mais finos, enquanto velocidades mais altas aumentam a quantidade de material depositado. A escolha de velocidade de extrusão é considerada uma estratégia para garantir a consistência e qualidade que desejamos na peça final.

- **Velocidade do Robô**

A velocidade do robô é um fator determinante. Isto significa que velocidades mais baixas permitem depositar mais material por camada, resultando em peças mais robustas. Velocidades mais altas significam menos deposição de material, reduzindo assim o tempo de produção das peças.

Encontrar um equilíbrio entre as duas coisas é um ponto também crucial para podermos criar peças com um elevado rigor de acabamento.

- **Temperatura de Extrusão do Material**

A temperatura do material é outro fator crítico que afeta diretamente a sua fluidez. As temperaturas influenciam diretamente a sua fluidez: temperaturas mais elevadas tornam o material mais fluido, o que pode ser vantajoso para depositar mais material; por outro lado, temperaturas mais baixas levam a depósitos mais controlados.

### **7.4.2 Aderência Entre Camadas**

- **Altura Entre Camadas**

A altura das camadas desempenha um importante papel na quantidade de material necessária para uma peça. Camadas mais altas exigem depósitos mais substanciais para garantir a integridade estrutural da peça, enquanto camadas mais baixas resultam em depósitos mais finos. Ao escolher a altura da camada pretendida, temos de pensar que é uma consideração chave para equilibrar a eficiência do processo com os requisitos específicos.

- **Aderências Entre Camadas**

Problemas como a falta de aderência entre camadas podem comprometer a qualidade da peça final. A temperatura do material desempenha um papel crucial nesse aspecto, afetando diretamente a aderência entre camadas. A distância também pode influenciar positivamente a aderência, sendo que em distâncias menores, melhora a coesão entre as mesmas.

A alteração para materiais com características de aderência aprimoradas ou de diferentes propriedades de comportamento também podem resolver problemas relacionados com a aderência entre camadas.

### **7.4.3. Dimensões Finais da Peça**

- **Variação Dimensional**

A variação dimensional da peça em relação ao modelo CAD é uma reocupação. Vários parâmetros podem influenciar este resultado: a aderência a base aquecida; a altura da primeira camada para aumentar a área de contacto com a base; e elementos de ligação ou fixação da peça à base. Tudo isto são estratégias para melhorar a estabilidade dimensional. Sendo que, a contração do material também é um fator importante, bem como a alteração para matérias mais estáveis.

- **Relação Entre Movimento do Robô e Material Depositado**

A sincronização adequada entre movimento do robô e o material depositado é fundamental para garantir uma distribuição uniforme e precisa de material. A otimização dessa relação, por meio de ajustes nos parâmetros de produção, é uma abordagem estratégica para garantir a consistência dimensional e a qualidade global da peça.

## 8 Conclusão

Ao longo da trajetória deste projeto, desenvolveu-se uma compreensão profunda e abrangente das diversas complexidades associadas à integração de tecnologias de fabricação aditiva em larga escala, destacando-se o uso da extrusão polimérica e o controlo preciso do braço robótico. Este empreendimento multidisciplinar não só proporcionou uma experiência prática valiosa, como também resultou numa aprendizagem abrangente que ultrapassa as fronteiras convencionais da engenharia, da tecnologia e do design.

Começando pelas heurísticas do design, concluímos que conseguimos prevenir ou detetar os erros por causa da peça padrão produzida, antes mesmo da peça ser produzida. O uso de princípios heurísticos de design no fabrico aditivo com robôs KUKA é fundamental para maximizar a inovação e eficiência nos processos de design e produção. Percebemos que são alguns conjuntos de princípios e diretrizes que orientam a resolução de problemas de design. A seleção de materiais compatíveis com este o processo de fabrico aditivo é crucial para garantir resultados e ideias, destacando a heurística relacionada a resistência do material. Processos automatizados e capacidade de personalização e adaptação de novos produtos às necessidades individuais, são aspetos fundamentais orientados pelos princípios heurísticos. A aplicação consistente desses princípios amplia o potencial da fabricação aditiva, possibilitando a criação de novos produtos mais avançados. Desta forma, conseguimos a criação de uma peça padrão, para testes de novos materiais e testes de limites máximos de produção. Vimos assim que com a definição clara destas diretrizes e respetiva estruturação, estas heurísticas encorajam a explorar novas ideias e abordagens de produção de novas peças.

Desta forma criamos uma peça padrão para testar também os limites do material utilizado (PP reciclado com 30% de carbonato de cálcio) onde concluímos que conseguimos fazer ângulos no eixo Z no valor máximo de 30°, conseguimos concluir também que para este tipo de material, é preciso suportes pois nenhuma medida conseguimos realizar neste teste. Os arredondamentos de todas as arestas vivas também é uma conclusão que chegamos devido a heurísticas do design.

Arestas arredondadas, criam menos tensão entre as paredes da peça e assim, um melhor acabamento e sobretudo não há desperdício de material. Em relação aos ângulos (X e Y) e curvaturas interior conseguimos concluir que este material quanto menor for o raio do arredondamento mais imperfeições existem nessa peça, logo consideramos que 3cm de raio é o mínimo que conseguimos fazer para este material, sem haver deformações ou imperfeições.

Já os ângulos retos, consideramos que tudo que seja menor que  $90^\circ$  tenha uma curvatura na aresta para não haver peças com defeito, e tudo que seja maior que  $90^\circ$  vai depender da funcionalidade que queremos dar ao produto, onde aconselho sempre a usar uma curvatura por causa das tensões aplicadas e dos defeitos que podem surgir.

Tendo uma peça padrão onde conseguimos ver todos os pontos cruciais do material, o passo seguinte foi a parametrização da mesma, para não ficarmos limitados a um só material e começar a explorar novos para produtos e futuros. Isto é, como temos uma rápida mudança de valores dentro da nossa peça padrão, podemos assim rapidamente testar novas matérias com valores completamente diferentes. No entanto, o limitado conhecimento de grasshoper, revelou-se o maior desafio desta dissertação. Aprender como trabalha o software de controlo do robô revelou-se bastante desafiante, mas ao mesmo tempo encorajador uma vez que é uma mais-valia em projetos futuros relacionados com novas tecnologias de fabrico aditivo.

Cada fase do projeto representou uma oportunidade valiosa para adquirir conhecimento, proporcionando conexões inestimáveis., tendo como ponto culminante desta jornada a fase de produção da peça final. Nesta fase, tornou-se evidente que o processo de produção estudado (BAAM) oferece uma notável versatilidade em comparação com métodos mais tradicionais, apesar da peça não ficar totalmente completa. O principal erro foi a geometria do meio da peça, onde sendo ela feita com um diâmetro muito pequeno, criou algumas irregularidades na peça, onde chegou ao ponto que uma camada não aderiu em perfeitas condições.

Apesar deste erro de produção da peça final, a minha peça padrão são plausíveis, porque todos os parâmetros foram feitos consoante os dados registados anteriormente na peça padrão realizada. Sendo uma peça viável esta tecnologia inclui vários pontos fortes e atrativos onde amplia as possibilidades geométricas e dimensionais das peças produzidas, como também destacou a capacidade de economizar de material, contribuindo significativamente para práticas sustentáveis.

Contudo, não se pode ignorar as limitações inerentes deste processo. A maior crítica reside na necessidade de controle meticuloso do processo de extrusão para garantir acabamentos superficiais de qualidade e controle dimensional preciso. A produção em larga escala, embora promissora, enfrenta desafios relacionados à inclinação das faces das peças, aos requisitos rigorosos de acabamento e ao controle preciso de extrusão. Algumas vantagens em relação à produção de larga escala são a liberdade geométrica, o seu tempo de produção, a redução de material necessário e, para finalizar, a automação de processos de produção.

## **Considerações Finais**

Este projeto não representa apenas um ponto de chegada, mas também um ponto de partida para futuras explorações e aprimoramentos. O conhecimento adquirido oferece uma base sólida para o desenvolvimento contínuo dessa tecnologia, que pode envolver a implementação de técnicas avançadas de controle, exploração de novos materiais e busca pela otimização contínua do processo de produção. À medida que o mundo se volta cada vez mais para práticas sustentáveis, o papel do fabrico aditivo em larga escala, especialmente com a fusão de extrusão polimérica e controle robótico, torna-se ainda mais crucial.

A capacidade de criar peças complexas, economizando material e permitindo uma produção eficiente posiciona essa tecnologia como uma força para o futuro da indústria.

Em última análise, este projeto não é apenas uma realização técnica, mas sim uma contribuição para a evolução contínua da fabricação aditiva. Ao enfrentar desafios, explorar limites e encontrar soluções inovadoras, abre-se um horizonte promissor para a integração harmoniosa de tecnologias avançadas no seio da sociedade moderna. O futuro da mobilidade e do estilo de vida sustentável encontra-se, sem dúvida, na interseção do conhecimento adquirido e da inovação contínua.

## Referências Bibliográficas

- Barrocal, C., & de Toledo Sanjar Mazzilli, C. (2022). *Designing with generative systems oriented discussion Projetando com sistemas generativos orientada a processos criativos*.
- Bedsole, R., Hill, C., Kunc, V., Wang, Y., & Rowe, K. (2017). Structural evaluation of complex subcomponents manufactured by large scale extrusion deposition of carbon fiber reinforced ABS. *32nd Technical Conference of the American Society for Composites 2017, 2*, 1524–1537. <https://doi.org/10.12783/ASC2017/15289>
- Binder Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University*. (2010). <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- Blösch-Paidosh, A. (2019). *Design Heuristics for Additive Manufacturing*.
- Bose, S., Khan, H. Z., Rashid, A., & Islam, S. (2018). What drives green banking disclosure? An institutional and corporate governance perspective. *Asia Pacific Journal of Management, 35*(2), 501–527. <https://doi.org/10.1007/s10490-017-9528-x>
- Design Council. (2004). *Framework for Innovation*. <https://www.designcouncil.org.uk/our-resources/framework-for-innovation/>
- Design Council. (2005). *Make life better by design*. <https://www.designcouncil.org.uk/>
- Directed Energy Deposition | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University*. (2010). <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
- Done lab*. (2022). <https://www.donelab.pt/>
- Double diamond*. (2023).
- FANUC SCARA robots – fast precise assembly and handling - Fanuc*. (2022). <https://www.fanuc.eu/pt/pt/rob%C3%B4s/p%C3%A1gina-filtro-rob%C3%B4s/scara-series>
- Farias, J. C. (2020). *O que é o Grasshopper? SPBIM*. <https://spbim.com.br/o-que-e-o-grasshopper/>
- Grasshopper*. (2022). <https://medium.com/data-mining-the-city-2022/tutorial-2-getting-started-in-grasshopper-8f38b982aca7>

- He, L., Gilbert, M., Johnson, T., & Pritchard, T. (2019). Conceptual design of AM components using layout and geometry optimization. *Computers and Mathematics with Applications*, 78(7), 2308–2324. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2018.07.012>
- Hill, C., Bedsole, R., Rowe, K., Duty, C., Ajinjeru, C., Kunc, V., & Riha, D. (2018a). *Big Area Additive Manufacturing (BAAM) Materials Development and Reinforcement with Advanced Composites*. <https://doi.org/10.2172/1434289>
- Hill, C., Bedsole, R., Rowe, K., Duty, C., Ajinjeru, C., Kunc, V., & Riha, D. (2018b). *Big Area Additive Manufacturing (BAAM) Materials Development and Reinforcement with Advanced Composites (Technical Report) / OSTI.GOV*. <https://www.osti.gov/biblio/1434289>
- Ian Gibson, D. W. R. B. S. (2009). *Additive Manufacturing Technologies*.
- ishika kapoor. (2022, September). *Everything You Need to Know About Rhino 3D*. <https://www.novatr.com/blog/ultimate-guide-to-rhino-3d>
- J. Mech. (2016). *Design Heuristics in Innovative Products*.
- Jody Muelaner. (2023, April 19). *Como a robótica Delta otimiza e simplifica os processos de fabricação de produtos eletrônicos*. <https://www.digikey.pt/pt/articles/how-delta-robotics-optimize-and-streamline-electronics-manufacturing-processes>
- kuka. (2022). *The future of your production*. [www.kuka.com](http://www.kuka.com).
- KUKA/prc - parametric robot control for Grasshopper / Food4Rhino. (2016). <https://www.food4rhino.com/en/app/kukaprc-parametric-robot-control-grasshopper>
- KUKA R120 . (2022). <https://www.quicktimeonline.com/cdn-cgi/image/quality%3D85/assets/images/products/r%20120%20r2700-2%20f.jpg>
- Leary, M. (2020). Material extrusion. *Design for Additive Manufacturing*, 223–268. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816721-2.00008-7>
- O que é e como funciona um robô cartesiano? - PAHC Automação*. (2022). <https://pahcautomacao.com.br/o-que-e-e-como-funciona-um-robo-cartesiano/>
- Oliveira, N. P. (2016). *Universidade do Minho Escola de Engenharia Estudo e Aplicação do Design Paramétrico à Superfície da Malha de Trama*.
- Pham, D. T., & Dimov, S. S. (2003). Rapid prototyping and rapid tooling - The key enablers for rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), 1–24. <https://doi.org/10.1243/095440603762554578>

- Pontes, A. J., & Sampaio, Á. M. (2020). *Engenharia e Design - Aditivo, contra o COVID-19* (pp. 417–429). <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.24.19>
- Processos de fabrico aditivo.* (2020). <https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSa9Ln5ygHW5MG-aElTvySjbNApEWsXeFbYHjoNgl64dDDDSsu1>
- Programação Paramétrica / API / Integração com ERP - Metalix CAD/CAM Sheet Metal Software.* (2015). <https://www.metalix.net/pt-br/solutions/parametric-programming-api-erp-integration/>
- Relvas, C. (2018). *Carlos Relvas O MUNDO DA IMPRESSÃO E O FABRICO DIGITAL.* [www.quanticaeditora.pt](http://www.quanticaeditora.pt)
- Reyes-Luna, J. F., Chang, S., Tuck, C. J., & Ashcroft, I. A. (2023). Material jetting high quality components via an inverse problem framework. *Additive Manufacturing*, 73, 103667. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2023.103667>
- Rhinoceros.* (2023). [https://gramaziokohler.github.io/teaching\\_materials/rhino/](https://gramaziokohler.github.io/teaching_materials/rhino/)
- Robô Articulado.* (2020). <https://www.directindustry.com/pt/prod/kuka-ag/product-17587-1653760.html>
- Robo Cartesiano.* (2019). <https://www.campetella.com/pt/rob%C3%B4s-cartesianos/cx1-prime-series/>
- Robô Delta .* (2022). <https://www.weiss-world.com/br-pt/products/robos-10327/robos-delta-211>
- Robô Scara .* (2023). [https://www.yaskawa.eu.com/products/robots/pick-place/productdetail/product/sg650\\_6642](https://www.yaskawa.eu.com/products/robots/pick-place/productdetail/product/sg650_6642)
- Robôs articulados: onde usar na indústria.* (2022). <https://www.universal-robots.com/br/blog/rob%C3%B4s-articulados-onde-usar-na-ind%C3%A9stria/>
- Roschli, A., Gaul, K. T., Boulger, A. M., Post, B. K., Chesser, P. C., Love, L. J., Blue, F., & Borish, M. (2019). Designing for Big Area Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 25, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.006>
- Sampaio, Á. M., Gonçalves, R., Lima, A., Cruz, P. J. S., Figueiredo, B., Carvalho, S., & Pontes, A. J. (2020). Design for additive manufacturing of mechanical connections toward hybrid products. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 975, 418–427. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3_39)

- Santos, A. A. (2021). *Revista robótica*. <https://www.robotica.pt/dossier/fabricacao-aditiva-2/>
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
- Universal robots. (2015). *O QUE SÃO OS COBOTS? | Universal Robots*. <https://www.universal-robots.com/pt/cobots-robots-colaborativos/>
- van de Ven, E., Maas, R., Ayas, C., Langelaar, M., & van Keulen, F. (2020). Overhang control based on front propagation in 3D topology optimization for additive manufacturing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 369. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113169>
- What is Additive Manufacturing? (Definition & Types) - TWI*. (2022). <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-additive-manufacturing>
- Wiberg, Anton. (2019). *Towards Design Automation for Additive Manufacturing A Multidisciplinary Optimization Approach*. Linköpings Universitet.
- Yilmaz, S., & Seifert, C. M. (2010). *COGNITIVE HEURISTICS IN DESIGN IDEATION*. [www.idsa.org](http://www.idsa.org)