



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Rui Alexandre Silva Ferreira

**Exploração dos Benefícios da Utilização de  
Manufatura Aditiva na Produção de  
Joalheria**



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Rui Alexandre Silva Ferreira

**Exploração dos Benefícios da Utilização de  
Manufatura Aditiva na Produção de  
Joalheria**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Engenharia do Produto

Trabalho efetuado sob a orientação do:  
**Professor Doutor Óscar Samuel Novais de Carvalho**

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas 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 previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### **Licença concedida aos utilizadores deste trabalho**



**Atribuição-NãoComercial**  
**CC BY-NC**

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

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade do Minho por me proporcionar esta oportunidade.

A todos os docentes que participaram na minha passagem pelo Mestrado em Engenharia do Produto. Com todos desenvolvi novas capacidades e aprendi algo, sendo que este trabalho não seria o mesmo se não fosse por todas essas influências.

Ao meu orientador Professor Doutor Óscar Carvalho por todo o apoio, orientação e ajuda prestado ao longo do trabalho.

Ao Professor Filipe Silva por todo o auxílio e esclarecimento que me ofereceu.

Ao Professor Paulo Pinto por todo o seu apoio, ajuda e companhia ao longo do trabalho.

Ao João Pinto por, embora não tenha sido meu orientador, foi imprescindível para a realização do trabalho. Não há palavras para descrever o quão agradeço a sua ajuda.

Ao Sr. Agostinho, ao seu filho e à ASP – Jóias de Autor por todo o serviço prestado, a ajuda, as boas conversas, os lanches e os cafés.

A todos os trabalhadores, investigadores e alunos que conheci no CMEMS, com os quais interagi e trabalhei.

A todos os amigos que me ajudaram.

E, finalmente, à minha família, por todo o apoio e amor incondicional, sem a qual nenhum trabalho valeria a pena. Amo-vos.

## **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

### **Exploração dos Benefícios da Manufatura Aditiva na Produção de Joalheria**

No âmbito da unidade curricular Dissertação, do 2º ano do Mestrado em Engenharia do Produto da Universidade do Minho do ano lectivo 2022/2023 e em articulação com o CMEMS (*Center for Microelectromechanical Systems*) realizou-se um trabalho de desenvolvimento e produção de joalheria, com o propósito de explorar os benefícios que processos de CAM (*Computer Aided Manufacturing*), com auxílio de CAD (*Computer Aided Design*) e CAE (*Computer Aided Engineering*) poderiam trazer para o ramo da joalheria, considerando em específico a produção de anéis. Os benefícios considerados foram: a precisão dimensional; e a capacidade para produzir geometrias de espessura reduzida. Já os processos considerados foram: manufatura aditiva (neste caso, de ceras que seriam posteriormente utilizadas em fundição por cera perdida); modelação tridimensional; e análises de elementos finitos.

Analisou-se o estado da arte, explorando-se: os métodos tradicionais de produção de joalheria; a fundição e a sua relação com a joalheria; a utilização de CAD e CAM na joalheria; análises de elementos finitos; o mercado da joalheria; a história da joalheria; e o papel do *designer*.

Iniciou-se um trabalho de idealização aonde se buscou inspiração a diferentes conceitos, correntes (em específico a Arte Nova) e ideias, começando-se assim a conceber diferentes conceitos de produto. Desenvolveu-se então dois conceitos de anel onde se explorou a cravação e a utilização de esmalte. Para a tomada de decisões relativas ao design dos anéis realizou-se análises de elementos finitos. Nestas análises considerou-se duas questões: a cravação da pedra num anel; e a fundição necessária para a produção dos anéis. Posteriormente realizou-se a fundição dos anéis, estando os anéis produzidos comparou-se o trabalho projectado com trabalho final, identificando as diferenças.

Concluiu-se que a utilização de CAD, CAM e CAE foi possível produzir peças com desenhos altamente detalhados de espessura bastante reduzida que seria difícil de produzir utilizando métodos tradicionais, sendo estas peças: um anel com uma pedra cravada com recurso a garras que não necessita de um cravador para a realização da cravação; e um anel esmaltado que conjuga desenhos altamente detalhados com a transparência possível no esmalte. Ambos estes anéis seriam difíceis de produzir utilizando métodos tradicionais.

---

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Joalheria; Análise de Elementos Finitos; Fundição por Cera Perdida; Manufatura Aditiva

# ABSTRACT

## Exploring the Benefits of Additive Manufacturing in Jewelry Production

As part of the Dissertation curricular unit of the 2nd year of the Master's in Product Engineering at the University of Minho in the 2022/2023 academic year and in conjunction with CMEMS (Center for Microelectromechanical Systems), work was carried out on the development and production of jewellery, with the aim of exploring the benefits that CAM (Computer Aided Manufacturing) processes with the help of CAD (Computer Aided Design) and CAE (Computer Aided Engineering) could bring to the jewellery industry, looking specifically at the production of rings. The benefits considered were: dimensional precision; and the ability to produce geometries with reduced thickness. The processes considered were: additive manufacturing (in this case, of waxes that would later be used in investment casting); three-dimensional modelling; and finite element analyses.

An analysis of the state-of-the-art was made where: traditional jewellery production methods; casting and its relationship with jewellery; the use of CAD and CAM in jewellery; finite element analysis; the jewellery market; the history of jewellery; and the role of the designer were explored.

A process of idealisation was carried out where inspiration was sought from different concepts, currents (specifically Art Nouveau) and ideas, thus beginning to conceive different product concepts. Two ring concepts were then developed, in which stone setting and the use of enamel were explored. In order to make decisions about the design of the rings, finite element analyses were carried out, these analyses considered two issues: the setting of the stone in a ring; and the casting required to produce the rings. Subsequently, the rings were cast, once produced the designed work was compared with the final work, identifying the differences.

It was concluded that by using CAD, CAM and CAE it was possible to produce parts with highly detailed designs of a very reduced thickness that would be difficult to produce using traditional methods. These parts are: a ring with a stone set using claws that does not require a setter to carry out the setting; and an enamelled ring that combines highly detailed designs with the transparency possible in enamel. Both of these rings would be difficult to produce using traditional methods.

---

### KEYWORDS

Jewelry; Finite-Element Analysis; Lost Wax Casting; Additive Manufacturing

## ÍNDICE

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Índice.....	viii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas.....	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Objectivos.....	1
1.2. Estrutura do Projeto.....	2
2. Estado da Arte.....	3
2.1. Métodos Tradicionais de Produção de Joalheria.....	4
2.1.1. Cortes de Pedras e Métodos de Cravação.....	7
2.1.2. Métodos de Utilização de Esmalte.....	11
2.1.3. Fundição na Joalheria.....	13
2.2. Utilização de CAD e CAM na Produção de Joalheria.....	18
2.2.1. Estereolitografia.....	20
2.2.2. Fusion Deposition Modeling.....	22
2.3. Análise de Elementos Finitos.....	24
2.4. Análise de Mercado.....	27
2.5. Análise da História da Joalheria.....	29
2.6. Metodologia de Design.....	35
3. Desenvolvimento de Produto.....	41
3.1. Busca por Inspiração.....	42
3.2. Conceptualização.....	46
3.3. Modelação dos Anéis Recorrendo a CAD.....	50
3.1.1. Anel_Pedra.....	51
3.1.2. Anel_Esmalte.....	54
3.4. Análise da Cravação Realizada com CAE.....	57
3.4.1. Parâmetros.....	58
3.4.2. Resultados.....	61
3.5. Análise de Fundição Realizada com CAE.....	66
3.5.1. Parâmetros.....	66
3.5.2. Resultados.....	68
4. Produção dos Anéis.....	70

4.1. Desenvolvimento dos Suportes com FDM.....	71
4.2. Impressão dos Modelos com SLA e Análise.....	76
4.3. Fundição por Cera Perdida dos Anéis.....	80
4.3.1. Análise dos Anéis antes do Acabamento.....	84
4.3.2. Acabamento Superficial .....	88
4.3.3. Análise dos Anéis após o Acabamento.....	91
4.3.4. Anéis Finais .....	96
5. Conclusões .....	98
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	98
6. Referências .....	100

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do trabalho.....	2
Figura 2 - Banca de joalheiro, fonte:[135].....	4
Figura 3 - Ferramentas, fonte:[136].....	4
Figura 4 - Metal sendo recosido, fonte:[137].....	5
Figura 5 - Peça no branqueamento, fonte:[138].....	5
Figura 6 - Polimento de uma peça, fonte:[139].....	6
Figura 7 - Trabalho em cera, fonte:[140].....	6
Figura 8 - Anatomia de um cabochão, adaptado de:[6].....	7
Figura 9 - Anatomia de uma pedra facetada, adaptado de:[6].....	7
Figura 10 - Diferentes tipos de cabochão, adaptado de:[6].....	8
Figura 11 - Diferentes tipos de pedras facetadas, adaptado de:[6].....	8
Figura 12 - Cravação com Garra, fonte:[141].....	8
Figura 13 - Cravação flush/gipsy, fonte:[142].....	9
Figura 14 - Cravação pavê, fonte:[141].....	9
Figura 15 - Cravação com bisel, fonte:[141].....	9
Figura 16 - Cravação ilusão, fonte:[143].....	10
Figura 17 - Cravação em canal, fonte:[141].....	10
Figura 18 - Cravação de tensão, fonte:[144].....	10
Figura 19 - Esmalte Cloisonné, fonte:[145].....	11
Figura 20 - Esmalte Champlevé, fonte:[146].....	11
Figura 21 - Esmalte Ronde Bosse, fonte:[147].....	12
Figura 22 - Esmalte Plique-à-Jour, fonte:[148].....	12
Figura 23 - Preparação da árvore, fonte:[149].....	13
Figura 24 - Diagrama da fundição por cera perdida utilizando moldes de borracha, adaptado de:[150].....	14
Figura 25 - Máquina de Vácuo, fonte:[151].....	15
Figura 26 - Centrifugadora, fonte:[152].....	15
Figura 27 - Exemplo de arrastamento de ar, fonte:[153].....	16
Figura 28 - Exemplo de enrugamento da superfície, fonte:[154].....	16
Figura 29 - Exemplo de fendas frias, fonte:[155].....	17

Figura 30 - Exemplo de porosidade, fonte:[156] .....	17
Figura 31 - Impressão de um modelo 3D, fonte:[157].....	18
Figura 32 - Diagrama de Impressoras Top-Down e Bottom-Up, adaptado de:[158] .....	20
Figura 33 - Impressora DigitalWax 008J, fonte:[132] .....	21
Figura 34 - Diagrama sobre FDM, adaptado de:[159] .....	22
Figura 35 - Efeito "escada" nas paredes verticais de uma impressão FDM, fonte:[160] .....	23
Figura 36 - Anycubic i3 Mega S/Pro, fonte:[131].....	23
Figura 37 - Análises lineares / não-lineares, adaptado de:[83] .....	24
Figura 38 - Criação de malha, fonte:[161] .....	24
Figura 39 - Gráfico de força/extensão, adaptado de:[162] .....	25
Figura 40 - Gráfico tensão/deformação, fonte:[163] .....	25
Figura 41 - Estudo de mercado, fonte:[5] .....	25
Figura 42 - Estudo de mercado, fonte:[87] .....	27
Figura 43 - Percentagem de vendas offline e online, fonte:[88] .....	28
Figura 44 - Jóias indicas diversas, fonte: [164] .....	29
Figura 45 - Colar egípcio, fonte: [165] .....	29
Figura 46 - Pulseira grega que faz recurso à serpente, fonte:[166].....	29
Figura 47 - Nó de Hércules numa bracelete grega, fonte:[167] .....	29
Figura 48 - Fíbula visigótica, fonte: [169].....	30
Figura 49 - Camafeu renascentista, fonte:[168] .....	30
Figura 50 - Bracelete barroca, fonte:[170] .....	30
Figura 51 - Devant-de-corsage, fonte:[171] .....	30
Figura 52 - Anel revivalista de fins do séc. XIX, fonte:[172] .....	31
Figura 53 - Broche de fins do séc. XIX, fonte:[106] .....	31
Figura 54 - Pendente da Arte Nova, fonte:[173] .....	31
Figura 55 - Bracelete da Arte Déco, fonte:[174] .....	31
Figura 56 - Anel Apollo de Moritz Glik, fonte:[176] .....	32
Figura 57 - Anel Solon Hematite Intalgio da Olithica, fonte:[175].....	32
Figura 58 - Colecção de peças de várias épocas que representam a natureza .....	32
Figura 59 - Pendente de Mucha e Fouquet, fonte:[178] .....	33
Figura 60 - Pingente/broche de Vever, fonte:[177] .....	33
Figura 61 - Pingente de Lalique, fonte:[179] .....	34

Figura 62 - Ovo Fabergé, fonte:[180].....	34
Figura 63 - Broche de Tiffany, fonte:[181] .....	34
Figura 64 - Anel por Stuart Cathey, fotografia por Robert Diamante .....	35
Figura 65 - Friedrich Nietzsche, fonte:[182].....	36
Figura 66 - Bruno Munari, fonte:[183] .....	37
Figura 67 - Esquema representativo de design holístico .....	38
Figura 68 - Divisão de linha de acordo com a Proporção Dourada, fonte:[184] .....	38
Figura 69 - Exemplos da Proporção Dourada na natureza, fonte:[185] .....	39
Figura 70 - Resultado da experiência de Fechner .....	39
Figura 71 - Fotografias do Museu dos Biscainhos .....	42
Figura 72 - Esboços realizados na visita .....	42
Figura 73 - Fotografias do anel e esboço realizado pelo aluno, fonte das fotografias:[118] .....	43
Figura 74 - Coleção de imagens de fumo.....	44
Figura 75 - Coleção de imagens referentes a árvores, raízes e folhas .....	45
Figura 76 - Desenhos relativos a fumo e ramos .....	46
Figura 77 - Combinações de imagens de ramos .....	47
Figura 78 - Simplificação das imagens na Fig. 28.....	47
Figura 79 - Simplificação das imagens na Fig.29 .....	48
Figura 80 - Desenvolvimentos das ideias na Fig.30.....	48
Figura 81 - Desenhos relativos às folhas e às suas nervuras .....	49
Figura 82 - Exploração de movimento numa folha .....	49
Figura 83 - Esquissos variados .....	49
Figura 84 - Modelações conceptuais diversas .....	50
Figura 85 - Evolução do Anel_Pedra.....	51
Figura 86 - Vista lateral do anel, foco nas garras.....	52
Figura 87 - Medidas de diâmetros do Anel_Pedra, medidas em mm .....	52
Figura 88 - Comprimento do anel e diâmetro da pedra, medidas em mm .....	53
Figura 89 - Render do Anel_Pedra.....	53
Figura 90 - Evolução do Anel_Esmalte.....	54
Figura 91 - Render do Anel_Esmalte .....	55
Figura 92 - Vista superior do Anel_Esmalte.....	56
Figura 93 - Comparação entre as duas versões do anel .....	56

Figura 94 - Movimento pretendido para a cravação da pedra .....	57
Figura 95 - Ponto de fixação e deslocação do Teste 1 .....	58
Figura 96 - Recortes, Teste 3 .....	59
Figura 97 - Novos pontos de fixação, Teste 2.....	59
Figura 98 - Malha, Teste 2 e Teste 10, respetivamente.....	60
Figura 99 - Teste 2.....	61
Figura 100 - Teste 1 .....	61
Figura 101 - Teste 4 .....	61
Figura 102 - Teste 3 .....	61
Figura 103 - Teste 6 .....	62
Figura 104 - Teste 5 .....	62
Figura 105 - Teste 8 .....	62
Figura 106 - Teste 7 .....	62
Figura 107 - Teste 10 .....	63
Figura 108 - Teste 9 .....	63
Figura 109 - Teste 12 .....	63
Figura 110 - Teste 11 .....	63
Figura 111 - Teste 13 .....	64
Figura 112 - Teste 14 .....	64
Figura 113 - Teste 16 .....	64
Figura 114 - Teste 15 .....	64
Figura 115 - Geometria utilizada para o Teste 1.....	66
Figura 116 - Estudo de convergência de malha .....	67
Figura 117 - Teste 1 .....	68
Figura 118 - Teste 2 .....	68
Figura 119 - Teste 3 .....	68
Figura 120 - Teste 6 .....	68
Figura 121 - Teste 4 .....	68
Figura 122 - Teste 3 .....	68
Figura 123 - Anel no Cura (brim em azul).....	71
Figura 124 - Impressão falhada.....	71
Figura 125 - Impressão com o anel inclinado e as garras impressas separadamente .....	72

Figura 126 - Suportes automáticos.....	73
Figura 127 - Zona de maior necessidade de suporte.....	73
Figura 128 - Primeira tentativa de suporte manual.....	74
Figura 129 - Suportes manuais .....	74
Figura 130 - Modelação do suporte final.....	75
Figura 131 - Impressão com o suporte final.....	75
Figura 132 - Diferença entre a impressão projetada (esquerda) e a real (direita) .....	75
Figura 133 - Impressão do Anel_Esmalte, (desenhos côncavos) .....	76
Figura 134 - Impressão do Anel_Esmalte, (desenhos salientes) .....	76
Figura 135 - Medidas do Anel_Esmalte (desenhos salientes) .....	77
Figura 136 - Medidas do Anel_Esmalte (desenhos côncavos).....	77
Figura 137 - Impressão de Anel_Pedra sem argola.....	78
Figura 138 - Impressão do Anel_Pedra com argola.....	78
Figura 139 - Medidas do Anel_Perda sem argola.....	78
Figura 140 - Medidas do Anel_Perda com argola.....	79
Figura 141 - Criação da árvore .....	81
Figura 142 - Colocação do molde no forno .....	81
Figura 143 - Fundição do metal.....	82
Figura 144 - Colocação do molde no vácuo .....	82
Figura 145 - Vazamento do metal no molde .....	83
Figura 146 - Anel_Pedra com argola após a fundição .....	84
Figura 147 - Anel_Pedra sem argola após a fundição .....	84
Figura 148 - Anel_Esmalte (desenhos salientes) após fundição.....	85
Figura 149 - Anel_Esmalte (desenhos côncavos) após fundição.....	85
Figura 150 - Jito concebido de modo a reduzir os defeitos de fundição .....	86
Figura 151 - Novos Anel_Esmalte (desenhos salientes) após fundição .....	87
Figura 152 - Novos Anel_Esmalte (desenhos côncavos) após fundição.....	87
Figura 153 - Utilização do branqueamento .....	88
Figura 154 - Utilização de uma máquina de agulhas.....	88
Figura 155 - Utilização de lixas.....	89
Figura 156 - Utilização de uma polidora .....	89
Figura 157 - Utilização de limpeza ultra-sónica nos anéis.....	90

Figura 158 - Medidas do Anel_Pedra sem argola .....	91
Figura 159 - Medidas do Anel_Pedra com argola.....	91
Figura 160 - Método utilizado para cravar a pedra .....	92
Figura 161 - Vistas do Anel_Pedra com argola após a cravação .....	92
Figura 162 - Comparação de medidas da pedra .....	93
Figura 163 - Anel_Pedra após arredondamento das garras.....	93
Figura 164 - Comparação de medidas do Anel_Esmalte (desenhos salientes) .....	94
Figura 165 - Comparação de medidas do Anel_Esmalte (desenhos côncavos) .....	94
Figura 166 - Face interior do Anel_Esmalte (desenhos salientes) .....	95
Figura 167 - Face interior do Anel_Esmalte (desenhos côncavos) .....	95
Figura 168 - Anel_Pedra (argola).....	96
Figura 169 - Anel_Esmalte (desenhos salientes) .....	97
Figura 170 - Anel_Esmalte (desenhos côncavos) .....	97

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Testes de cravação .....	59
Tabela 2 - Propriedades da Prata 925 .....	60
Tabela 3 - Resultado dos testes de cravação.....	65
Tabela 4 - Testes de fundição.....	67
Tabela 5 - Resultados dos testes de fundição.....	69

# 1. INTRODUÇÃO

Joalheria – ou seja, o acto de adornar o corpo com objectos – acompanha o ser humano desde os seus primórdios até aos tempos modernos. Como qualquer outro elemento da vida humana, a joalheria e a sua utilização são indissociáveis das circunstâncias históricas, tecnológicas e políticas nas quais se inserem.

Devido ao facto da joalheria não ser meramente uma indústria artística, mas estar sujeita às leis de mercado, há uma competição por processos cada vez mais eficientes que tragam vantagens competitivas às empresas que os adoptarem, ao mesmo tempo, devido a ser uma indústria que trabalha com elementos culturais, históricos e étnicos, existe uma apreciação pelo trabalho artesanal que pode ser uma vantagem competitiva se o *marketing* da empresa for orientado nesse sentido.

Esta mesma lógica pode e deve ser adaptada ao próprio conteúdo da joalheria. Se por um lado as temáticas abordadas por uma jóia estão sujeitas à circunstância onde a mesma se insere também existem temáticas que transpõe as diferentes épocas e tanto são abordadas agora, como há 500 anos, como daqui a 500 anos o serão.

É neste contexto que se insere o trabalho realizado na presente dissertação. Considera-se o mercado actual aonde existe uma procura cada vez maior por respostas rápidas e de volumes reduzidos[1] e procura-se explorar situações concretas nas quais a manufatura aditiva e modelação tridimensional trazem vantagens para a indústria, criando assim sínteses entre a arte e a engenharia e entre o tradicional e o moderno. Para tal, realizou-se um trabalho de PBL (*Project Based Learning*). No trabalho analisou-se a história da joalheria, identificando a natureza como motivo recorrente, e, com esta base, desenvolveu-se conceitos que explorassem a utilização de manufatura aditiva para produzir um anel com cravação e um anel esmaltado.

## 1.1. OBJECTIVOS

Este projecto pretende explorar a precisão dimensional e a capacidade para produzir geometrias de espessura reduzida que a utilização de: manufatura aditiva; software de modelação tridimensional; análise de elementos finitos; e fundição por cera perdida trazem para a produção de joalheria através do desenvolvimento e produção de dois anéis que exploram diferentes questões.

Um anel tem uma pedra cravada com garras, onde se procurou desenvolver uma geometria que permitisse a cravação da pedra sem recorrer a um cravador especializado. No outro anel, que é

esmaltado, procurou-se explorar a criação de geometrias detalhas que simultaneamente acrescentassem valor a uma peça com esmalte, aproveitando a potencial transparência do mesmo, e que dispensasse do trabalho extra associado à construção tradicional de peças com esmalte.

## 1.2. ESTRUTURA DO PROJETO

O trabalho desta dissertação realizou-se de um modo iterativo onde os diferentes processos dependiam uns dos outros, ou seja, se um processo posterior resultasse numa alteração voltava-se atrás e repetia-se o processo anterior, processo este visível na Fig. 1. Considerou-se que seria muito difícil redigir um relatório de modo coeso sem simplificar o processo.

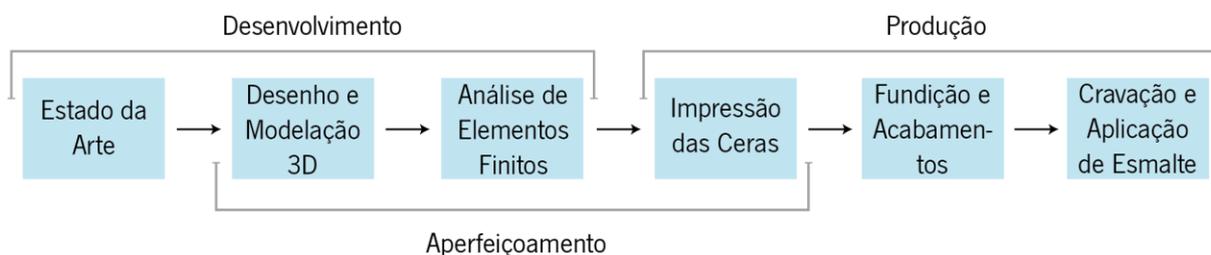


Figura 1 - Estrutura do trabalho

Decidiu-se então, para o relatório, simplificar o processo de modo a facilitar a leitura. A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

O primeiro capítulo envolve a abordagem das temáticas diretamente relacionadas com o projeto de dissertação: a introdução; os objetivos; e o subcapítulo presente que fala sobre a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo diz respeito ao estado de arte. Neste apresenta-se: métodos tradicionais de produção de joalheria; fundição e a sua relação com a joalheria; a utilização de CAD e CAM na joalheria; análises de elementos finitos; o mercado da joalheria; a história da joalheria; e o papel do *designer*.

O terceiro capítulo refere-se ao trabalho de idealização dos diferentes artigos de joalheria produzidos, onde se abordam questões como a inspiração, o desenho, a modelação tridimensional e uma serie de análises de elementos finitos realizados.

No quarto capítulo aborda-se: a produção dos anéis, começando pela impressão dos modelos em resina; o processo de fundição; o acabamento superficial; a análise dos resultados; e apresenta-se os demonstradores finais da dissertação.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros que procuram complementar o trabalho realizado.

## 2. ESTADO DA ARTE

O Estado de Arte aborda diferentes questões pertinentes ao trabalho realizado, nomeadamente técnicas e tecnologias utilizadas na produção de joalheria, um estudo de mercado, a história da joalheria e o *design*.

Considerando que a dissertação abrange o desenvolvimento de produto e a exploração dos benefícios que a manufatura aditiva oferece à produção de joalheria, decidiu-se iniciar o trabalho com uma pesquisa sobre a produção tradicional de joalheria com foco especial em cortes de pedra, métodos de cravação, na utilização de esmalte e a fundição por cera-perdida.

Seguidamente, aborda-se a manufatura aditiva com foco nos métodos utilizados na dissertação, nomeadamente *Fuse Deposition Modeling* (FDM) e Estereolitografia (SLA), onde se aborda a natureza de cada um destes processos e as vantagens e desvantagens associadas a cada um.

De seguida, procura-se compreender o que são análises de elementos finitos.

Estuda-se os mercados internacional e, mais especificamente, europeu de joalheria com o propósito de entender a realidade atual da indústria.

Realiza-se uma análise histórica da joalheria à procura de elementos a ser utilizados na fase do desenvolvimento.

Finalmente, procura-se entender o papel do *designer* visto que foi esse o papel desempenhado pelo aluno.

## 2.1. MÉTODOS TRADICIONAIS DE PRODUÇÃO DE JOALHARIA

Os livros *Making of Silver Jewelry*[2] por Louise Marie Muttit, *Know All About Jewelry Making, Jewelry Designing and Metal Working*[3] por Olen Sampson e Ariel Needham, *Professional Jewelry Making*[4] por Alan Revere e *Jewelry Making and Design*[5] por Augustus F. Rose e Antonio Cirino abordam em alto pormenor todas as técnicas tradicionais utilizadas em joalheria, pelo que ir-se-á aqui resumir.

O trabalho é realizado numa mesa, utiliza-se uma banca de joalheiro com uma cavilha de madeira, é nesta cavilha onde se trabalha de modo a ter uma base que não estraga o material[2,4,5]. Debaixo da cavilha, e entre as pernas da mesa, existe um sistema de apanha de limalhas de metal, diferentes modelos resolvem esta questão de diferentes maneiras, mas o propósito é que as limalhas que se vão criando ao longo do trabalho caiam numa zona onde possam ser facilmente recolhidas no fim[2,4,5].



Figura 2 - Banca de joalheiro, fonte:[135]



Figura 3 - Ferramentas, fonte:[136]

Tradicionalmente, trabalha-se através da formação do metal[2,3,4,5]. Para ter a matéria-prima ou se compra o metal desejado em formas pré-definidas (em laminas, fios, etc.) ou compra-se o metal em estado puro, em grão, e cria-se a liga desejada fundindo as matérias num forno[2,3,4,5]. Tem-se então o metal desejado que é sujeito a uma serie de processos de deformação de modo a obter a forma desejada, sendo que a escolha dos processos depende do resultado pretendido. As ferramentas utilizadas, resumidamente são: serras, limas, martelos, máquinas de puxar fio, laminadores e brocas e os correspondentes motores[2,3,4,5].

Durante este processo de formação o metal vai-se endurecendo, recose-se o metal de modo a reduzir a sua rigidez, para tal utilizam-se maçaricos[2,3,4,5].



Figura 4 - Metal sendo recosido, fonte:[137]

Este mesmo maçarico também é utilizado para soldar[2,3,4,5]. De modo a unir duas peças de metal utiliza-se a solda como material aglomerante devido a ser uma liga do metal em questão com um ponto de fusão inferior (mas próximo)[2,3,4,5]. O processo decorre do seguinte modo: coloca-se um bocado de bórax/tinca nas zonas que se quer soldar para impedir a oxidação do metal; aquece-se o metal por todo; coloca-se a solda, garantindo que se apega ao metal; aquece-se a zona de solda até que a solda se derrete e espalha[2,3,4,5]. Posteriormente, a peça é colocada no branqueamento (ácido sulfúrico diluído em água) de modo a remover impurezas[2,3,4,5].



Figura 5 - Peça no branqueamento, fonte:[138]

Quando a forma geral da joia está finalizada costuma estar num estado ainda muito bruto onde a qualidade superficial é insatisfatória[2,3,4,5]. Seguem-se os processos de acabamento onde se utilizam novamente as limas, mas sobretudo lixas e máquinas polidoras[2,3,4,5]. Finalmente, dependendo do que é pretendido no trabalho também se realizam banhos com outras ligas metálicas após o acabamento superficial ter sido realizado[2,3,4,5].



Figura 6 - Polimento de uma peça, fonte:[139]

Existe também a opção de esculpir as peças de joalheria para depois serem produzidas com fundição por cera-perdida[4,5]. Para tal, utilizam-se ferramentas tradicionais de escultura e aquecimento assim como massa de modelar para trabalhos de grande escala e cera dura para trabalhos de pequena escala[4,5].



Figura 7 - Trabalho em cera, fonte:[140]

### 2.1.1. CORTES DE PEDRAS E MÉTODOS DE CRAVAÇÃO

De modo a entender os diferentes tipos de cravação é também importante conhecer os diferentes cortes de pedra. Os livros *Creative Stonesetting*[6] por John Cogswell e *Making of Silver Jewelry*[2] abordam estas mesmas questões em profundidade, pelo que ir-se-á apresentar os principais tópicos abordados de modo sucinto.

Existem dois tipos de cortes de pedra principais, o cabochão e a pedra facetada[2,6]. O cabochão, visível na Fig. 8, tem um topo arredondado (a coroa ou cúpula) e a base plana, o perímetro exterior do cabochão, onde a coroa e a base se encontram, é designado por cintura[2,6]. A maior parte dos cabochões são opacos (impenetráveis à luz), ou translúcidos (permitem a passagem de alguma luz), pedras transparentes são usualmente lapidadas como pedras facetadas para tirar partido da iluminação e reflexão que resultam da interação com a luz[2,6].

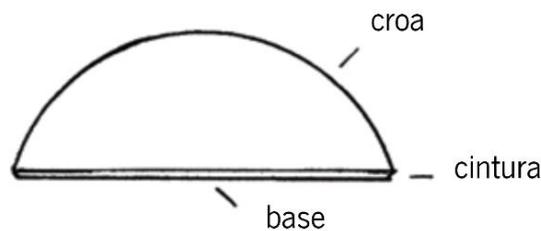


Figura 8 - Anatomia de um cabochão, adaptado de:[6]

Já pedras facetadas, como visível na Fig. 9, são lapidadas em planos de modo a refletir a luz para realçar o brilho. A face plana no topo da pedra, paralela ao plano da cintura, é chamada de mesa. A ponta facetada na base do pavilhão é chamada de culeta[2,6].

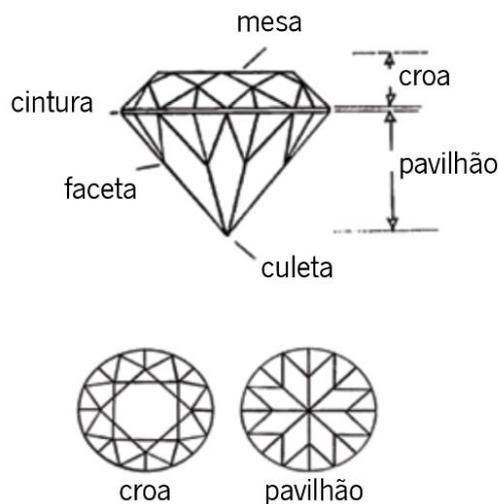


Figura 9 - Anatomia de uma pedra facetada, adaptado de:[6]

Posteriormente, existem variações destes mesmos cortes, variações estas visíveis nas Fig. 10 e 11.

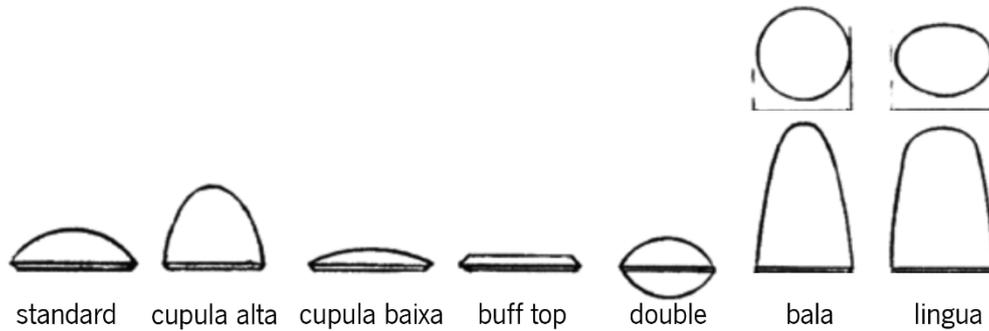


Figura 10 - Diferentes tipos de cabochão, adaptado de:[6]

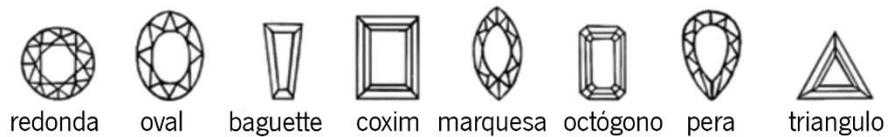


Figura 11 - Diferentes tipos de pedras facetadas, adaptado de:[6]

A cravação das pedras consiste na arte de engastar ou fixar com segurança pedras em joias [2,6]. É, normalmente, realizada manualmente por um cravador especializado devido a ser uma área que requiere especialização [2,6]. Existem vários métodos de cravação, os principais são:

- Garra: Utiliza-se duas ou mais garras que funcionam como braços que fazem pressão na pedra de modo a fixar-lha no local [2,6].



Figura 12 - Cravação com Garra, fonte:[141]

- *Flush* ou *Gipsy*: A pedra é embutida no anel, depois crava-se a pedra utilizando um brunidor para deformar o metal [2,6].



Figura 13 - Cravação flush/gipsy, fonte:[142]

- *Pavê*: Coloca-se várias pedras pequenas próximas umas das outras em profundos, presas por pequenas contas ou pinos que são pouco visíveis, criando assim cria o aspeto de uma superfície pavimentada de pedras[2,6].



Figura 14 - Cravação pavê, fonte:[141]

- *Bisel*: Utiliza-se uma caixa para cravar a pedra, normalmente utilizada em pedras cabochão [2,6]. A caixa tem a abertura superior onde se coloca a pedra e uma abertura inferior, de tamanho mais reduzido, de modo que a luz atravesse a pedra [2,6].



Figura 15 - Cravação com bisel, fonte:[141]

- Ilusão: Semelhante ao bisel mas a caixa é facetada e também se usam garras, estas construídas de modo a dar a entender que o bisel faz parte da pedra, realçando assim a pedra e dando a entender que a pedra é maior, logicamente utilizado com metais e pedras de cores semelhantes [2,6].



Figura 16 - Cravação ilusão, fonte:[143]

- Canal: Colocam-se uma serie de pedras entre duas paredes de metal e uma superfície, sendo fixas devido a um ligeiro rebordo nas paredes, assim como os furos onde as pedras estão colocadas [2,6].



Figura 17 - Cravação em canal, fonte:[141]

- Tensão: Constrói-se o anel de modo que haja duas extremidades de metal de cada lado da pedra com ligeiras entradas onde a pedra é colocada [2,6]. A pedra estando colocada entre as duas barras fica cravada pela pressão exercida pelas mesmas, dando a ideia de que está a flutuar [2,6].



Figura 18 - Cravação de tensão, fonte:[144]

### 2.1.2. MÉTODOS DE UTILIZAÇÃO DE ESMALTE

Também chamado de esmalte vítreo, para o separar de materiais esteticamente semelhantes, como resinas – o esmalte é criado utilizando areia de sílica, feldspato, bórax, carbonato de sódio e fluoreto de sódio, matérias que são colocadas num forno a uma temperatura entre 1200°C e 1350°C[7] até que todas se fundam e misturem[5]. Posteriormente, a mistura é removida e arrefecida em água fria, uma vez fria, é moída até se tornar em pó[5]. Durante o processo de fundição pode-se adicionar aditivos que conferem cor, transparência ou opacidade, resistência aos ácidos e outras propriedades[5].

Existem vários tipos de utilização de esmalte que diferem na sua composição ou modo de utilização, segue-se uma lista com descrições de alguns tipos comuns:

- *Cloisonné*: Consiste em soldar fios achatados sobre uma base metálica para criar um desenho, os espaços individuais formados pelos fios são, posteriormente, preenchidos com o esmalte[5]. Inicialmente, desenha-se os traços onde se quer colocar os fios numa folha e coloca-se o desenho sobre um bloco de carvão vegetal, dobra-se e une-se os fios de acordo com a forma do desenho em cima da folha, de seguida soldasse os fios e durante este processo o papel vegetal é queimado[5].



Figura 19 - Esmalte Cloisonné, fonte:[145]

- *Champlevé*: Neste processo, a base metálica é esculpida ou gravada para formar canais e compartimentos que são preenchidos com esmalte[5].



Figura 20 - Esmalte Champlevé, fonte:[146]

- *Ronde Bosse*: Este é um método de esmaltagem tridimensional, no qual uma goma adesiva (goma de tragacanto) é aplicada ao metal para ajudar o esmalte a aderir[5]. Pintam-se várias camadas de esmalte, uma cor por camada, após a aplicação de cada cor, recose-se a peça para fixar cada camada, repetindo-se o processo até chegar ao resultado pretendido[5]. As cores são pintadas por ordem dos seus pontos de fusão, começando pela temperatura mais quente, para evitar que as cores se misturem. Quando a peça vai ao formo a goma é queimada e desaparece[5]



Figura 21 - Esmalte Ronde Bosse, fonte:[147]

- *Plique-à-Jour*. Esta técnica consiste em criar desenhos com arames (semelhante ao Cloisonné) numa folha fina de mica ou de metal, que pode ser removida após a cozedura, e no preenchimento destes com esmalte[5]. Depois de retirada a folha, a peça fica com um aspeto semelhante ao de um vitral visto que a luz atravessa o esmalte de um lado ao outro[5].



Figura 22 - Esmalte Plique-à-Jour, fonte:[148]

### 2.1.3. FUNDIÇÃO NA JOALHARIA

Na metalurgia e na joalheria, a fundição é um processo utilizado onde o metal líquido é vertido para dentro de um molde que contém o negativo da forma pretendida, o metal e o molde são então arrefecidos e a peça metálica é extraída[8]. A fundição é mais frequentemente utilizada para produzir formas complexas que seriam difíceis ou pouco económicas de produzir por outros métodos, é amplamente utilizada em esculturas, joalheria, armas e ferramentas[8]. 90% dos bens duradouros contêm peças fundidas, incluindo automóveis, camiões, aviões, comboios, equipamento de construção, eletrodomésticos, dispositivos médicos, brinquedos, entre outros[9]. As técnicas tradicionais incluem a fundição por cera perdida, fundição em gesso e fundição em areia[8]. É o primeiro método que é utilizado em joalheria – corresponde a 80% de toda a produção de joalheria[1] – devido à principal vantagem do molde não ser dividido, resultado numa fundição sem linhas de separação, por ter um excelente grau de precisão dimensional, por resultar em superfícies relativamente bem acabadas e por permitir produção em grande escala[1,10,11,12].



Figura 23 - Preparação da árvore, fonte:[149]

O processo da fundição por cera perdida em joalheria inicia-se com a criação de um modelo em cera, aqui o processo pode divergir dependendo do contexto[13,14]:

- Fundição de cera para dentro de um molde de borracha, molde este produzido a partir de uma joia já produzida;
- Escultura de cera;
- Manufatura aditiva.

Tendo o modelo em cera, seguem-se os seguintes passos:

- 1 – Reproduz-se a quantidade desejada de modelos[13,14];
- 2 – Monta-se os modelos num único grande objeto de cera para se fundir várias peças num único vazamento, chama-se a este grande objeto de “árvore”[13,14]. Esta união é realizada com ferramentas de aquecimento com as quais se unem as peças originais a jitos e os jitos à árvore[13,14];
- 3 – A árvore é mergulhada numa pasta de sílica, colocada num frasco de cobre ou aço inoxidável e envolvida em gesso líquido e espera-se que o gesso solidifique, criando o molde/revestimento[13,14]. Também é costume revestir-se o interior do frasco com uma pasta de mistura de água com amianto ou um substituto de amianto que absorve a expansão do molde[9,13,14];
- 4 – Aquece-se um forno, coloca-se o molde dentro do forno e aumenta-se a temperatura progressivamente até chegar à temperatura desejada[13,14];
- 5 – O metal é fundido, durante o processo coloca-se tincal/bórax no metal para impedir que se oxide, posteriormente verte-se o metal para dentro do molde por gravidade, vácuo ou utilizando uma centrífugadora[13,14];
- 6 – Estando realizada a fundição, coloca-se o molde em água e este desfaz-se [13,14]. Com a árvore fundida, utiliza-se uma serie de ferramentas, como escovas e jatos de água, e um banho de branqueamento para remover quaisquer impurezas ou óxidos da superfície da fundição[13,14];
- 7 – Posteriormente, cortam-se as diferentes peças pelos jitos e tem-se então a peça desejada que, depois, passa pelos processos desejados para que se obtenha o resultado pretendido (polimento, cravação, etc.)[13,14].

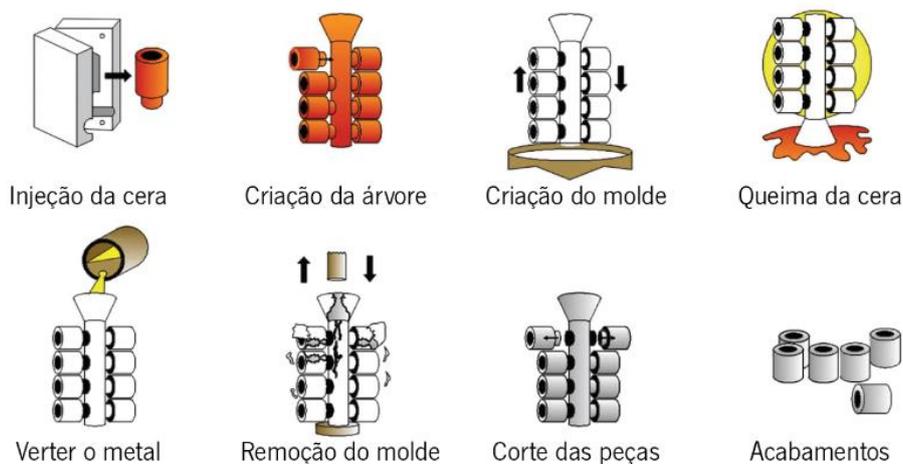


Figura 24 - Diagrama da fundição por cera perdida utilizando moldes de borracha, adaptado de:[150]

Existem dois subtipos principais de fundição dentro da fundição por cera perdida, a fundição por vácuo e a fundição centrífuga[13,14,15,16]:

- A fundição centrífuga utiliza a força de uma centrifugadora para encher a cavidade oca do molde. Todo o mecanismo é encerrado num tambor para conter o metal caso o molde se parta ou seja utilizado excesso de metal. O molde é colocado num braço dentro da centrifugadora alinhado com um cadinho no qual o metal é fundido enquanto o braço está na posição de engate. Quando o metal atinge a temperatura desejada o braço é libertado e a centrifugadora começa a girar, lançando o metal a alta velocidade, enchendo o molde[14,15,16];

- A fundição sob vácuo utiliza uma máquina de vácuo, requer que o frasco seja carregado para dentro de uma câmara para permitir que um vácuo forçado inale o metal fundido, enchendo as cavidades do molde e removendo qualquer ar excessivo que exista dentro do mesmo[13,15,16].

A fundição por vácuo é mais rápida e detalhada do que a fundição centrífuga, no entanto, o resultado possui propriedades mecânicas inferiores e o custo de produção é superior do que utilizando uma centrifugadora[15,16].



Figura 25 - Máquina de Vácuo, fonte:[151]



Figura 26 - Centrifugadora, fonte:[152]

As diferenças entre a fundição por cera perdida quando utilizada na joalheria ou outras áreas devem-se, essencialmente, à escolha de revestimento. Para joalheria quer-se um revestimento, geralmente mais caro, que resulte num molde com maior precisão dimensional; que aguarde a queima da cera a 700°C e o metal derretido a 1000°C; que retenha água e consiga expandir sem rachar, ambos durante a queima da cera[17].

No que toca a defeitos, existem vários defeitos na fundição por cera perdida, algumas das principais são:

- Arrastamento de ar: Este fenómeno pode acontecer de duas maneiras: a primeira é durante o processo de verter a cera, em que o ar acompanha a cera para dentro do molde; a segunda é o ar entrar no molde a partir de fontes externas[14,18,19]. Uma das principais causas deste defeito é um sistema de ventilação do molde defeituoso que não permite que o ar saia das cavidades, resultando na formação de bolhas dentro da estrutura do objeto, causando quebras, resultando num objeto frágil, sendo assim essencial verificar a qualidade do sistema de ventilação do molde[14,18,19]. No caso de o ar estar na cera, antes da fundição, pode-se utilizar uma ferramenta de calor para remover as bolhas[14,19].

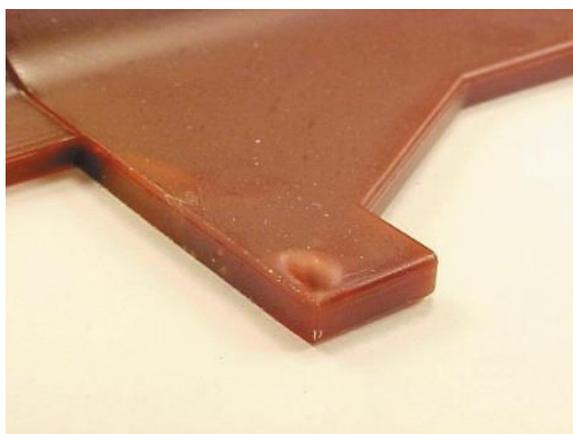


Figura 27 - Exemplo de arrastamento de ar, fonte:[153]

- Enrugamento da superfície: Ocorre frequentemente durante a queima da cera e é provocado por um aquecimento demasiado rápido do molde[14,18,19,20]. Esta rapidez de aquecimento pode ser atribuída ao posicionamento dos frascos, caso se coloque o molde descentrado no forno é possível que o aquecimento não seja uniforme e certas zonas aqueçam demasiado rápido[14,19].

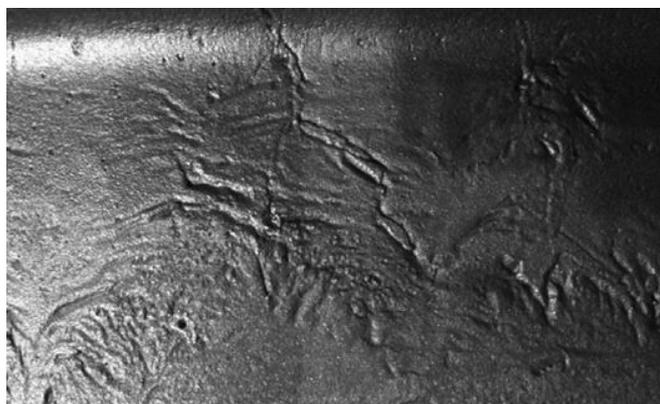


Figura 28 - Exemplo de enrugamento da superfície, fonte:[154]

- Fendas frias: Acontecem quando a temperatura do molde ou do metal é demasiado baixa, resultando em pouca fluidez quando o metal é vertido no molde e tenta penetrar as cavidades[14,18,19,20]. Certas partes do metal solidificam ao entrarem em contacto com o molde e endurecem antes do tempo, resultando em endurecimentos que causam uma turbulência na fluidez do metal e os defeitos superficiais chamados de fendas frias. O aumento da temperatura de fundição ajuda, no entanto, deve ter-se o cuidado de aumentar apenas dentro de limites que não excedam os necessários para evitar a formação de outros defeitos[14,19,20].

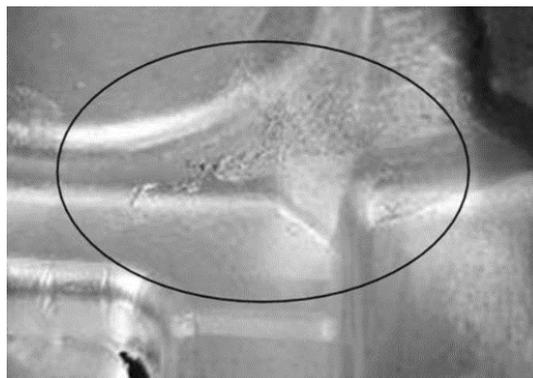


Figura 29 - Exemplo de fendas frias, fonte:[155]

- Porosidade: A existência de poros pode acontecer tanto no exterior como no interior da peça, pode aumentar a rugosidade da superfície ou enfraquecê-la. Este defeito é causado por uma alimentação insuficiente de material durante a solidificação, à medida que o material se solidifica também contrai, sendo assim necessário um fornecimento suficiente de material para contrariar a redução do volume – o jito deve ser corretamente concebido de modo a minimizar este fenómeno[14,18,19,20]. O armazenamento correto dos materiais, a inclinação do molde aquando do vazamento e o cumprimento da temperatura adequada de vazamento auxiliam, em geral, na redução da porosidade[14,18,19].

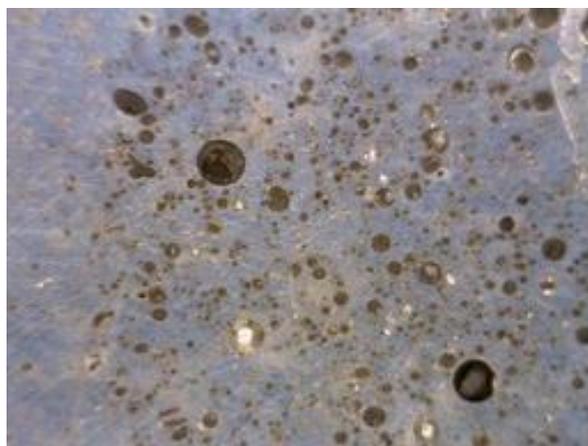


Figura 30 - Exemplo de porosidade, fonte:[156]

## 2.2. UTILIZAÇÃO DE CAD E CAM NA PRODUÇÃO DE JOALHARIA

A Manufatura Aditiva ou Impressão 3D é um tipo de CAM que se baseia a construção de um objeto tridimensional, baseado num modelo CAD, a partir da deposição de material camada a camada que é unido ou solidificado sob controlo informático[21,22]. Manufatura aditiva é utilizada no ramo da joalheria de três maneiras: para a impressão das ceras que depois são utilizadas para fazer um molde, tal como no fabrico tradicional de jóias; para a impressão direta das jóias em metal; para prototipagem[21].

A modelação tridimensional realiza-se do seguinte modo:

1 – Utilizando um computador e um software CAD, cria-se o modelo 3D e depois imprime-se o mesmo em cera ou resina[22,23].

2 – Converte-se o modelo para o formato. STL que utiliza triângulos para descrever a superfície do objeto[22,23].

3 – Aqui os processos dependem da tecnologia e impressora específicas, mas de um modo geral:

3.1 – Os ficheiros .stl contêm alguns erros que são verificados e corrigidos utilizando um software auxiliar[22];

3.2 – Utiliza-se um programa auxiliar chamado de *slicer* para fazer o *slicing* (o corte do modelo em camadas) e o *hatching* (separação de cada linha de impressão dentro de cada camada), convertendo o ficheiro .stl em .g-code ou outros tipos de ficheiro[23,24].

3.3 – Durante estes processos, ou na modelação inicial, criam-se os suportes, alguns programas auxiliam da criação dos mesmos, mas também é possível criá-los manualmente[22,23]. Simultaneamente, utilizando estes programas, também se definem todos os parâmetros relevantes para a impressão[22,23].

3.4 – Insere-se o ficheiro no software associado à impressora e dá-se início à impressão[22,23].



Figura 31 - Impressão de um modelo 3D, fonte:[157]

Os processos de Impressão 3D mais utilizados para imprimir o modelo em resina para joalheria (para depois ser utilizado em fundição por cera perdida) são estereolitografia (SLA) e *digital light processing* (DLP) devido ao seu grau de precisão dimensional[23,25]. Já a impressão 3D direta em metal envolve a sinterização de partículas de pó metálico com um laser, utilizando os processos de *powder bed fusion* e *binder jetting*[25]. A impressão direta tem o seu próprio conjunto de vantagens quando comparada com a fundição a partir de ceras, nomeadamente a não necessidade tanto de suportes como da utilização da fundição por cera perdida, resultando, teoricamente, em tempos e custos de produção inferiores[26]. No entanto, também existem desvantagens, sendo a principal o custo relativamente elevado assim como questões de qualidade superficial e estrutural[27,28]. Sendo assim, considera-se a impressão direta em metal uma tecnologia com enorme potencial para o fabrico direto de joalheria, sendo que necessita de otimização[28].

A utilização de manufatura aditiva e de softwares de CAD permite que se personalize o ficheiro digital em pouco tempo de modo a imprimir outro modelo ou vários modelos diferentes de uma só vez, acelerando drasticamente a criação de modelos distintos e variações do mesmo desenho, permitindo que facilmente se personalize produtos de acordo com as preferências do consumidor[21]. Outra vantagem é que, devido à sua natureza, a manufatura aditiva permite a produção de geometrias que, devido ao seu grau de complexidade geométrica, seriam muito difíceis ou quase impossíveis de produzir tradicionalmente[25,26,28,29,30]. Alguns dos softwares de CAD utilizados para o desenho de joalheria são[31,32,33]: 3Design[34]; Blender[35]; Firestorm CAD[36]; Fusion 360[37]; Jewelry CAD Dream[38]; Maya[39]; Modo[40]; Rhinoceros[41]; MatrixGold[42]; Zbrush[43]; Tinkercad[44]; Mudbox[45], entre outros.

### 2.2.1. ESTEREOLITOGRAFIA

SLA (estereolitografia) utiliza lasers UV (ultravioleta) para solidificar uma resina de foto polímero, criando o modelo desejado camada a camada[23].

Há dois tipos de impressoras SLA: *Top-down* e *Bottom-up*. As impressoras *Top-down* colocam o laser acima do tanque e a peça é construída na orientação projetada[23]. A plataforma de construção começa no topo do tanque de resina e move-se para baixo após cada camada ser polimerizada enquanto um varredor move a resina para garantir a cobertura da base de impressão[23]. As impressoras de *Bottom-up* colocam o laser debaixo do tanque de resina e a peça é construída invertida verticalmente[23]. Após cada camada, a resina curada é separada do fundo do tanque à medida que a plataforma de construção se move para cima e inicia-se a polimerização d aproxima camada, repetindo-se o processo até ao final da impressão[23]. Em ambos os casos, após a impressão o material não está completamente curado, pelo que é necessário um pós-processamento sob luz UV[22,46,47].

Existe uma preferência pela opção *Bottom-up* devido às suas vantagens[48,49,50]. Sem a necessidade de um varredor, cada camada é criada mais rapidamente, reduzindo o tempo de impressão[50]. Outra vantagem é o facto de não necessitar de tanta resina para operar, reduzindo o custo de produção[23,51]. As principais desvantagens da *Bottom-up* é que as forças de atração entre a peça impressa e o fundo do tanque têm de ser ultrapassadas para cada camada[23,52]. Para tal, aplicam-se revestimentos hidrofóbicos à base do tanque[23,52] e altera-se, quando necessário, a orientação da impressão de modo a reduzir o contacto de cada camada com a base[23,53].

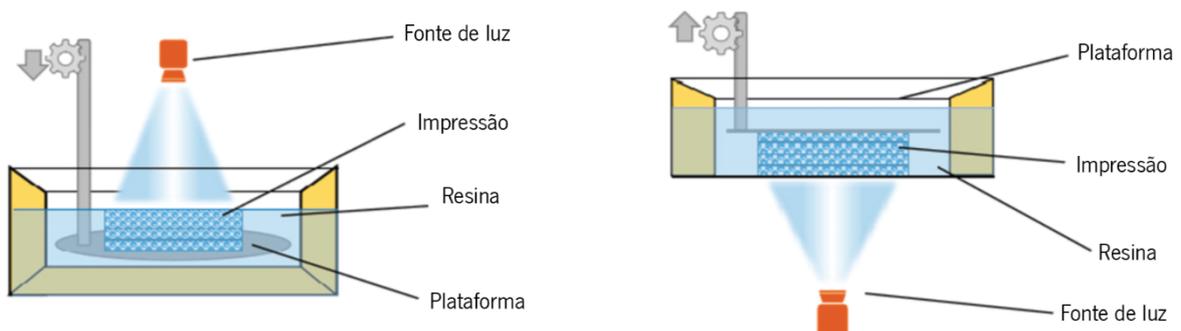


Figura 32 - Diagrama de Impressoras Top-Down e Bottom-Up, adaptado de:[158]

O preço da resina pode variar significativamente consoante a aplicação, sendo que a resina normal custar cerca de 25€/kg[54] e uma resina especializada pode custar por volta de 300€/kg[55]. Para fundição são recomendadas as resinas MoonRay Castable Resin[56], V1s1Jet FTX Cast[57], DWS DC100[58], Accura CastPro[59] que são optimizadas para fundição – isto porque, a resina “normal” entra, em parte, em combustão durante a queima da cera, deixando restos de cinza que depois afetam o resultado da fundição[23,60,61].

A principal vantagem da estereolitografia é o acabamento superficial altamente preciso com alturas de camada a chegar a 0,025mm – 0,1mm, resultando numa impressão detalhada e precisa, tornando esta tecnologia ideal para indústrias onde esta situação é desejável como a indústria da joalheria e dentária[23]. Para além do supracitado, a utilização de uma impressora SLA é relativamente simples visto que o utilizador só tem controlo relativo à orientação e localização do objeto, a altura de camada e o material, o resto dos parâmetros são automaticamente determinados pelo software da impressora[23].



Figura 33 - Impressora DigitalWax 008J, fonte:[132]

### 2.2.2. FUSION DEPOSITION MODELING

A impressão 3D por FDM (*Fused Deposition Modelling*), é um processo de fabrico aditivo no âmbito da extrusão de materiais. Baseia-se na extrusão de um filamento termoplástico através de um bocal onde o filamento é derretido e depositado em caminhos predeterminados numa base pré-aquecida, solidificando e formando uma camada de material[23,62]. Após a impressão de cada camada a base desce a distância da altura de camada e o bocal começa a depositar a próxima camada, repetindo o processo até chegar ao final da impressão[23,62].

Ao contrário da SLA anteriormente explorada, em FDM o utilizador tem controlo sobre muitos parâmetros de impressão, nomeadamente a temperatura do bocal e da cama de impressão, a altura de camada, a velocidade de extrusão e das ventoinhas (que controla o arrefecimento), a percentagem/geometria de enchimento, entre outros, sendo que todos estes parâmetros impactam a qualidade da impressão[23,63,64,65].

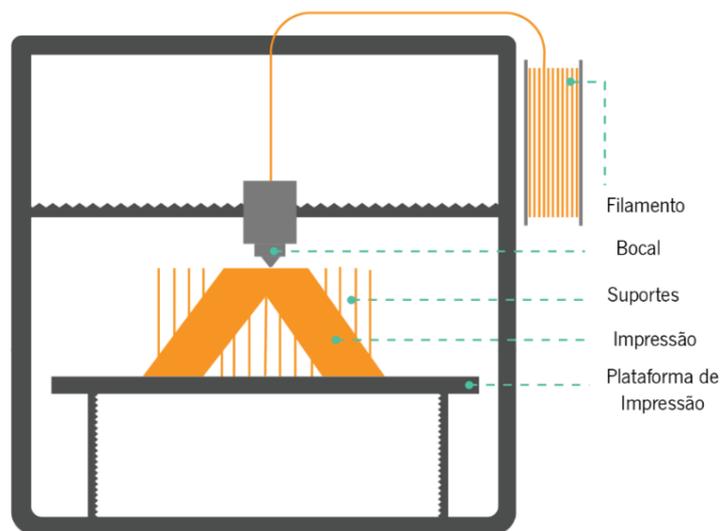


Figura 34 - Diagrama sobre FDM, adaptado de:[159]

Como é visível na Fig. 35, as superfícies verticais de uma impressão em FDM têm sempre entradas e reentradas (chamado efeito “escada” ou “z-seam”) devido à sua natureza de deposição de filamento, isto revela que a altura da camada e o diâmetro do bocal têm um impacto enorme na qualidade superficial da impressão e que um diâmetro de bocal inferior inerentemente resulta numa qualidade superficial superior[23,66,67]. Sendo assim, o diâmetro do bocal é que acaba por determinar a precisão dimensional da impressão, existindo bocais desde os 0,15mm até 1mm[68]. Ao mesmo tempo, como este fenómeno afeta as superfícies laterais, mas não afeta as superfícies paralelas à base de impressão, o objeto terá um comportamento anisotrópico, conclui-se então que a orientação da impressão tem um

grande impacto no comportamento mecânico e no acabamento superficial do objeto impresso[23,69,70]. A percentagem de enchimento e a sua geometria também impacta o comportamento mecânico do objeto, sendo que uma percentagem maior enchimento resulta numa peça mais resistente, aumentando o custo e tempo de impressão[23,71].



Figura 35 - Efeito "escada" nas paredes verticais de uma impressão FDM, fonte:[160]

Os filamentos termoplásticos utilizados nesta tecnologia podem variar de preço desde 40€/kg a 300€/kg dependendo do material e das propriedades desejadas, alguns das matérias disponíveis são o ABS, PLA, PA, PETG, TPU, PEEK, PEI, entre outros[23,72,73,74]. O facto de que existem opções de impressoras e matérias acessíveis economicamente fazem com que seja das tecnologias de manufatura aditiva mais utilizadas a nível mundial e com que seja uma opção competitiva no que toca à produção de protótipos, próstéticos, moldes e componentes variados[23,72,73,75,76].



Figura 36 - Anycubic i3 Mega S/Pro, fonte:[131]

### 2.3. ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

A análise de elementos finitos é um método de CAE que possibilita a construção modelos computacionais que simulam cenários reais, para tal utiliza-se: um modelo CAD representativo do corpo real; as propriedades relevantes dos materiais em questão; e os constrangimentos e cargas aplicados ao corpo[77,78,79]. Faz recurso ao método de elementos finitos que se baseia na divisão do problema numa coleção de subproblemas (chamado de “criação de malha”), sendo que cada subproblema é representado por um conjunto de equações em relação ao problema original[77,78,79]. Recombina-se sistematicamente todos os conjuntos de equações num sistema global de modo a conseguir-se o cálculo final[77,78,79].

Devido à natureza do método, as soluções apresentadas por estas análises nunca correspondem completamente à realidade, pelo que parte da análise é a repetição da mesma com um aumento progressivo no número de elementos de malha (chamado de “refinamento de malha”) até que a diferença entre os resultados de cada análise seja negligível (chamado de “convergência de malha”), considerando-se assim que o resultado é muito próximo do comportamento real[79,80]. Este refinamento de malha pode ser feito manualmente ou recorrendo a métodos de refinamento automático que estão presentes em alguns softwares[80,81,82].

Existem dois parâmetros fundamentais nas análises de método de elementos finitos: se a análise é dinâmica ou estática; linear ou não linear[77,83]. Nas análises dinâmicas considera-se as forças de inercia associadas às acelerações de cada partícula[77]. Nas análises estáticas assume-se que as cargas são constantes ou aplicadas muito lentamente, negligenciando as forças de inercia[77,83]. Nas análises não lineares considera-se que as ações exteriores podem ter um impacto na geometria, conseqüentemente, que a Lei de Hooke pode deixar de se aplicar[77,83]. Nas análises lineares assume-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões e, conseqüentemente, que a Lei de Hooke aplica-se sempre[77,83].

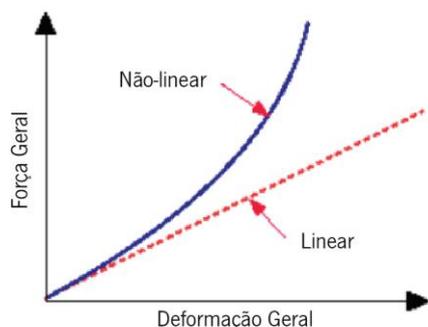


Figura 37 - Análises lineares / não-lineares, adaptado de:[83]

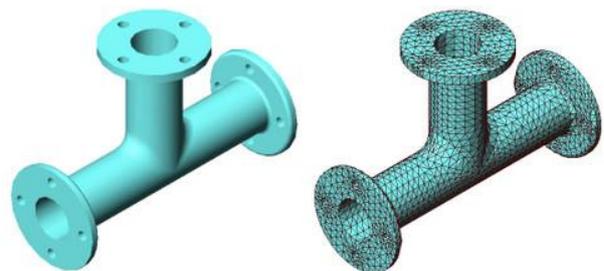


Figura 38 - Criação de malha, fonte:[161]

A Lei de Hooke é uma lei da física desenvolvida por Robert Hooke, e dita que uma mola terá uma deformação  $\Delta l$  quando lhe é aplicada a força  $F$ , sendo  $k$  a rigidez da mola (Eq.2)[84,85].

$$F = k \cdot \Delta l$$

Eq. (1)

No entanto, a mola só se comporta deste modo abaixo de uma força máxima (chamado de “limite de elasticidade”) como é visível na Fig. 39. Se a carga  $F$  estiver abaixo do limite de elasticidade e for removida a mola volta à sua forma original (comportamento elástico) se a carga for superior ao limite de elasticidade e for removida a mola fica permanentemente deformada (comportamento plástico)[84,85].

Ou seja, um material obedece à Lei de Hooke quando a sua deformação é proporcional à força aplicada[84,85], ou como Hooke o punha: *ut tensio, sic vis*, ou “extensão como a força”[86].

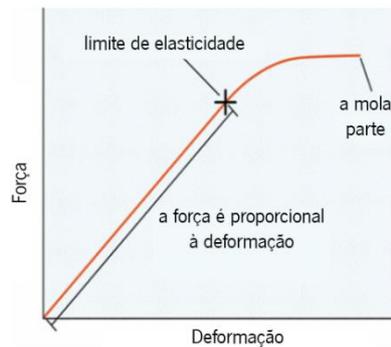


Figura 39 - Gráfico de força/extensão, adaptado de:[162]

Esta lógica é posteriormente aplicada na análise do comportamento de diferentes materiais sob carga. Considere-se um corpo de um material específico ao qual lhe é aplicado uma carga, num gráfico de tensão/deformação (Fig. 40), onde a tensão  $\sigma$  representa a força aplicada  $P$  dividida pela área transversal  $A$  (Eq.2)

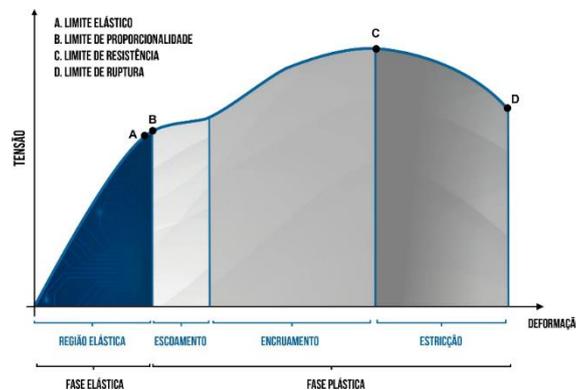


Figura 40 - Gráfico tensão/deformação, fonte:[163]

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

*Eq. (2)*

e a deformação  $\varepsilon$  resulta da divisão da extensão  $\delta$  pelo comprimento original  $L$  (Eq.3)

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

*Eq. (3)*

revela o mesmo comportamento supracitado[84,85]. Nesta situação, a variável  $k$  é uma constante  $E$  para cada material, chamada de Módulo de Young (Eq. 4) em honra do cientista Thomas Young, que, mais uma vez, representa a rigidez do material dentro do limite de elasticidade[84,85].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

*Eq. (4)*

## 2.4. ANÁLISE DE MERCADO

De acordo com a pesquisa de mercado atual conduzida pela Custom Market Insight, o mercado global de joias deve registar um CAGR (*Compound Annual Growth Rate* ou Taxa de Crescimento Anual Composta) de 4,6% de 2023 a 2030, sendo que em 2030, a avaliação do mercado deve chegar a 459 bilhões de euros[87].

A receita no segmento de joalheria europeia chega a 31,13 bilhões de euros em 2023 e espera-se que o mercado europeu cresça anualmente por um CAGR de 2,13% até 2026[88].

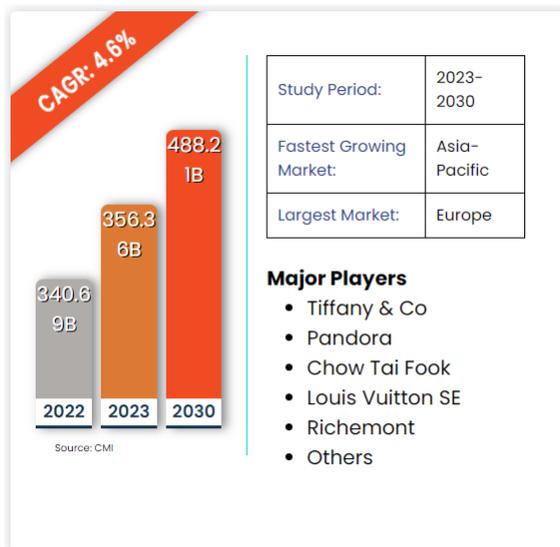


Figura 42 - Estudo de mercado, fonte:[87]

De acordo com o Observatory of Economic Complexity (OCE), em 2019, os três principais exportadores de joias da Europa foram a Suíça (10,9 mil milhões de dólares), a França (7,7 mil milhões de dólares) e a Itália (7,3 mil milhões de dólares), enquanto os 3 principais importadores foram a Suíça (16,6 mil milhões de dólares), o Reino Unido (5,64 mil milhões de dólares) e a França (5,6 mil milhões de dólares)[88]. De acordo com este mesmo estudo, os principais intervenientes no mercado da joalheria incluem marcas de luxo como a Cartier, a Tiffany & Co. e a Harry Winston, bem como marcas de gama média e acessível como a Pandora, a Swarovski, a Alex e a Ani e por um número crescente de designers independentes.

Gerações mais antigas têm um apego muito grande a joalheria patrimonial, isto é, joalheria com significado histórico e familiar, *Millenials* e *Gen-Z* ligam mais às causas e valores associados à joalheria específica, assim como o significado cultural da mesma[1,89].

Durante a pandemia do Covid-19, muitas empresas foram forçadas a utilizar plataformas online de comércio devido ao fecho de muitas lojas físicas, aperceberam-se então que há vários benefícios de se vender a joalheria online, nomeadamente uma facilidade muito maior em exibir o stock sem as

preocupações de uma loja física, nomeadamente limpeza e segurança. Numa entrevista, Arnaud Carrez, o Diretor de Marketing e Comunicação Internacional da Cartier, declarou que, entre 2020 e 2021, as plataformas de comércio eletrónico da empresa registaram um crescimento de três dígitos.[90]

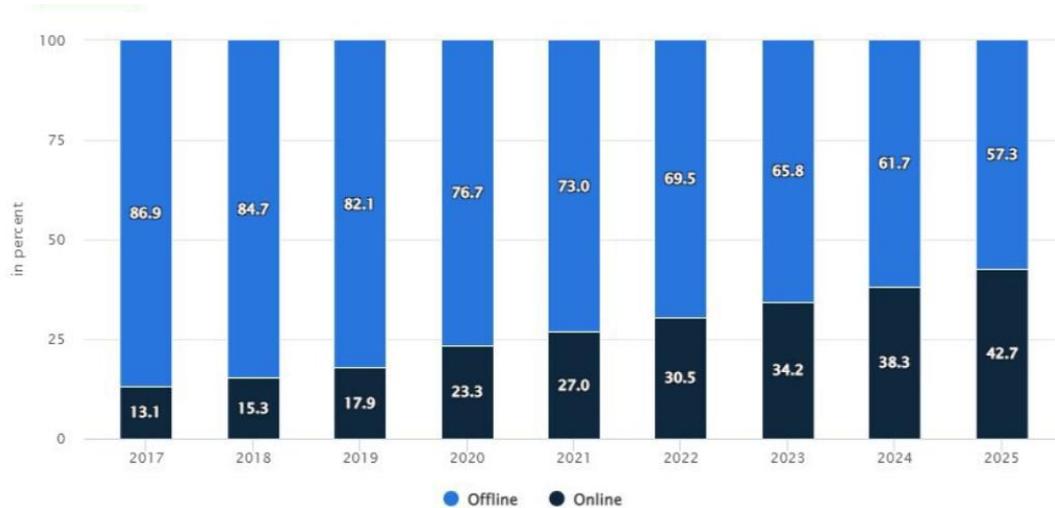


Figura 43 - Percentagem de vendas offline e online, fonte:[88]

A noção de customização no ramo da joalheria foi popularizada pela Pandora devido à sua joalheria modelar[91]. Com a normalização de comércio online e a evolução das tecnologias de Modelação 3D e de Manufatura Aditiva é cada vez mais fácil realizar-se trabalhos costumáveis, sendo a empresa Custom Made um bom exemplo desta realidade[92]. Tradicionalmente, as empresas de joalheria sempre tiveram que lidar com uma demanda de volume de vendas elevada, no entanto cada vez mais existe uma procura por uma resposta rápida, de volume reduzido, sendo que a manufatura aditiva e a modelação 3D facilitam este mesmo processo[1].

Estão-se a criar mercados B2B (Business to Business) que ajudam os retalhistas de joias a ligarem-se a produtores e ateliers, e as marcas europeias estão a tirar partido desta nova oportunidade. Um exemplo nacional é a AORP (Associação de Ourivesaria e Relojoaria de Portugal) que procura promover a ourivesaria portuguesa a nível nacional e internacional[93].

## 2.5. ANÁLISE DA HISTÓRIA DA JOALHARIA

A prática do adorno corporal com joias pode ser rastreada até às primeiras civilizações humanas. No antigo Egito, na Mesopotâmia e no Vale do Indo, as pessoas já faziam joias complexas utilizando materiais como ouro, prata e pedras preciosas. Muitas das tecnologias utilizadas atualmente existem desde os primórdios da humanidade: joias encontradas em sepulturas na Necrópole de Varna – na Bulgária, que foram datados de aproximadamente 8450 AC – terão sido produzidas utilizando fundição por cera perdida[94,95,96]; outros exemplos sendo a escultura de material e a furação de pedras[97].



Figura 45 - Colar egípcio, fonte: [165]



Figura 44 - Jóias indicas diversas, fonte: [164]

Os antigos egípcios são particularmente conhecidos pela sua joalheria característica, utilizando metais preciosos e pedras preciosas para criar peças elaboradas que tinham usualmente um significado simbólico e religioso associado aos deuses e ao culto aos mortos[98,99]. Noutras partes do mundo, como na Grécia Antiga e no Império Romano, as joias serviam tanto para fins decorativos como simbólicos, significando estatuto, riqueza e crenças religiosas. Sendo os motivos do nó de Hércules e da serpente, e as tecnologias de escultura de pedra e da filigrana alguns elementos que se popularizaram nesta altura que predominam ainda hoje[100,101,102].



Figura 47 - Nó de Hércules numa bracelete grega, fonte:[167]



Figura 46 - Pulseira grega que faz recurso à serpente, fonte:[166]

Na Europa medieval, o design das joias foi influenciado pelo cristianismo e pelas culturas germânicas, bizantina e islâmica. O metal trabalhado e as técnicas de esmalte tornaram-se predominantes, assim como a utilização de fíbulas ou broches[103]. O período do Renascimento assistiu a um surgimento do interesse pelos desenhos clássicos (greco-romanos), as pedras preciosas também ganharam popularidade entre a nobreza europeia devido ao estabelecimento de rotas comerciais com a Índia[104]. Houve vários costumes relativos ao uso de joalheria que surgiram nesta altura, por exemplo a decoração elaborada dos cabelos das mulheres com materiais preciosos e o costume de usar roupas com joias[104]. Tanto na era Medieval como no Renascimento popularizou-se muito o uso do anel que tinha um valor simbólico e religioso como também servia de sinal de ofício e de selo[105].



Figura 48 - Fibula visigótica, fonte: [169]



Figura 49 - Camafeu renascentista, fonte:[168]

No final do século XVI há um desenvolvimento das técnicas de lapidação de pedra, resultando numa maior predominância de pedras preciosas nas joias, e um aumento no cultivo de flores, sendo que se começou a popularizar o uso de motivos florestais e vegetais assim como nós, fitas e pergaminhos[105]. Ambas questões resultaram em mudanças estéticas na joalheria utilizada na altura, algo que se chama atualmente de estilo barroco.



Figura 50 - Bracelete barroca, fonte:[170]



Figura 51 - Devant-de-corsage, fonte:[171]

No início do séc. XIX, a Revolução Industrial e a Revolução Francesa alteram o mundo da joalheria. As técnicas de produção em massa tornaram as jóias mais acessíveis a um maior número de pessoas com a consequência de serem produzidas industrialmente[106]. Ligas metálicas tomaram precedente a ouro e prata e a produção de pedras de imitação aumentou em quantidade e qualidade[105]. Este processo resultou em duas realidades: por um lado, na realeza abundava arte revivalista de períodos antigos; por outro lado, para o consumidor comum produziu-se muita joalheria com uma estética resultante da nova realidade industrial[106].



Figura 52 - Anel revivalista de fins do séc. XIX, fonte:[172]



Figura 53 - Broche de fins do séc. XIX, fonte:[106]

Nos finais do séc. XIX, início do séc. XX há uma serie de empresas, atualmente relevantes, que são criadas: Cartier; Tiffany & Co; Van Cleef & Arpels; Bulgari; entre outras. É neste período que se desenvolve o movimento Arte Nova como reação à rigidez de estilo causada pela revolução industrial, aproveitando o romantismo que se desenvolveu neste século[107]. As flores, folhas, animais e o corpo feminino formaram a base para estas composições e passa-se a dar maior ênfase aos materiais e as suas capacidades mecânicas e estéticas[107,108]. Surge também o movimento Arte Déco onde também se dá ênfase às capacidades estéticas do material, desta vez a preferência é dada a superfícies lisas, polidas e acetinadas dos metais preciosos e do aço e a desenhos geométricos.



Figura 54 - Pendente da Arte Nova, fonte:[173]



Figura 55 - Bracelete da Arte Déco, fonte:[174]

Atualmente, a joalheria continua a ser uma parte integrante das respectivas culturas, com diversos estilos e materiais que reflectem os gostos individuais e as tradições. Alguns joalheiros trabalham a partir da história da joalheria, extraindo desenhos e conceitos de uma época e transportando-os para outra, enquanto outros criam joalheria contemporânea. A marca Olithica [109], onde trabalha o famoso joalheiro Chavdar Chuchev, realiza, entre outros trabalhos, a escultura de pedra popularizada pelos romanos e é um exemplo de como trabalhos antigos podem facilmente ser atualizados. Por outro lado, o joalheiro Moritz Glik [110], também reconhecido internacionalmente, desenvolveu o *Kaleidoscope* – método que consiste em prender pedras preciosas dentro de cápsulas de cristal, onde estas se movimentam livremente – que é um elemento fundamental da sua joalheria.



Figura 57 - Anel Solon Hematite Intaglio da Olithica, fonte:[175]      Figura 56 - Anel Apollo de Moritz Glik, fonte:[176]

Um aspeto que se verificou é a recorrência de certos motivos artísticos ao longo das épocas: a natureza é, entre outros, um destes motivos (Fig. 58). É notável que o apogeu da representação da natureza na história da joalheria deu-se na Arte Nova, efetivamente após o período de inovação tecnológica que foi a revolução Industrial, não dissimilar do que se verifica atualmente onde alguns autores olham para a manufatura aditiva como a nova revolução industrial[28], pelo que decidiu-se estudar a Arte Nova mais aprofundadamente.

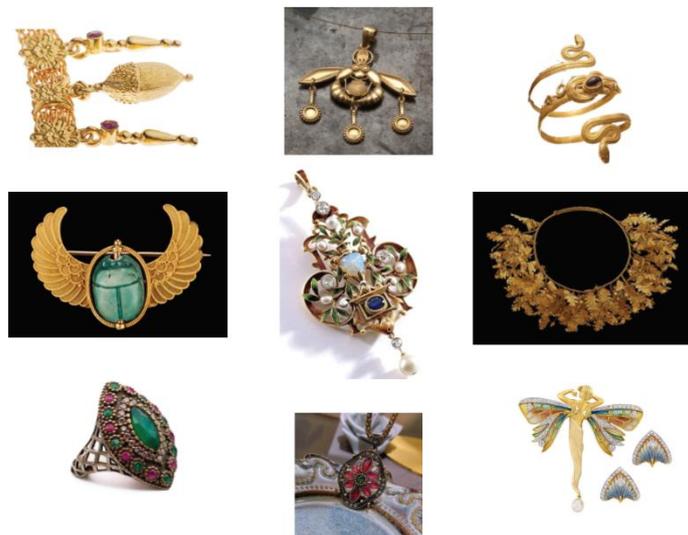


Figura 58 - Coleção de peças de várias épocas que representam a natureza

O trabalho *Art Nouveau: Jewels and Jewelers*[107] por Elise B. Misorowski e Dona M. Dirlam abrange o tema de joalheria da Arte Nova mais aprofundadamente, pelo que se encontra aqui um resumo dos tópicos mais importantes.

*Art Nouveau* ou Arte Nova é um estilo nas áreas da arquitetura, artes e artes aplicadas que se deu nos finais do séc. XIX / inícios do séc. XX na Europa e nos Estados Unidos [107,111]. É a consequência de uma serie de questões [107]:

- Os desenvolvimentos tecnológicos da Revolução Industrial;
- Descobertas arqueológicas;
- Facilidade de comunicação internacional, consequência da globalização.

Como abordado anteriormente, durante a Era Vitoriana, e ainda mais com a Revolução Industrial, desenvolveu-se uma rigidez de estilo supressiva de qualquer instinto criativo [107]. Esta rigidez foi o produto, por um lado, do apego ao revivalismo de peças antigas e, por outro, a falta de design nos produtos produzidos em massa devido às novas tecnologias [107]. Eventualmente, devido a descobertas arqueológicas, encontram-se, entre outras, peças gregas, romanas e etruscas, resultando num certo romantismo histórico[107]. Em simultâneo, na década de 1860, uma serie de exibições artísticas acontecem no Japão que influenciam alguns artistas europeus, algumas das questões influentes na arte japonesa foi: a simplicidade representativa; a linha orgânica como elemento fundamental; a utilização de cor de um modo subtil; o foco na natureza [107]. O resultado destas questões foi uma vontade que quebrar a carga vitoriana e industrial que pesava nas artes, criando-se assim a Arte Nova[107].



Figura 59 - Pendente de Mucha e Fouquet, fonte:[178]



Figura 60 - Pingente/broche de Vever, fonte:[177]

A Arte Nova é a expressão da natureza como fenómeno estético: baseia-se na linha fluida com a qual se constroem obras onde a natureza toma preponderância [107,111]. Dentro deste grande tema há vários subtemas relevantes: o corpo feminino e o seu cabelo; pássaros; insectos; repteis; criaturas marinhas; seres míticos; plantas, flores e vegetação em geral, entre outros [107,111]. Esta base natural acaba por relacionar a Arte Nova com a utilização de cor, nomeadamente cores subtis relacionadas com os ciclos da natureza que se reflete na utilização de esmalte, comum na Arte Nova [107,111]. Existe um maior foco na estética, de modo que a escolha pedras obedecia mais à vontade estética e menos a demonstrações de valor[107,111]. Algumas das pedras mais utilizadas eram: opalas; pedras de lua, calcedónias, peridot, ametistas, águas-marinhas, topázios, e turmalina enquanto diamantes, safiras, rubis e esmeraldas assumiam papéis secundários[107].



Figura 61 - Pingente de Lalique, fonte:[179]



Figura 62 - Ovo Fabergé, fonte:[180]

Sobre a Arte Nova, o crítico de arte John Ruskin disse: "A natureza é um grande livro do qual nos podemos inspirar, e é nesse livro que devemos procurar princípios que, quando encontrados, têm de ser definidos e aplicados pela mente humana de acordo com as necessidades humanas."[112].

Alguns artistas de referência são: René Lalique; Georges Fouquet; Henri Vever; Alphonse Mucha; Louis Comfort Tiffany; e Peter Carl Fabergé[107,111].



Figura 63 - Broche de Tiffany, fonte:[181]

## 2.6. METODOLOGIA DE DESIGN

Visto que uma componente importante do trabalho foi o acto criativo do desenvolvimento de produto e o produto em questão ser joalheria – onde os produtos não têm necessariamente funções mecânicas, ou seja, os “problemas” que devem ser resolvidos são maioritariamente de cariz estético e não-funcional – há que refletir que este processo é, em parte, subjetivo e que muitas decisões são tomadas tendo em base preferências do aluno que dificilmente se explicam de modo concreto e objetivo. No entanto, estas preferências são a consequência de influências, algumas das quais muito concretas, que devem ser referidas. Procurou-se então explorá-las.

John Crogsell, em *Creative Stonesetting*[6] refere uma serie de considerações no que toca ao *Design* de uma peça de joalheria considerando a cravação:

‘Quando se começa a conceber e a fabricar uma cravação, há fatores funcionais e estéticos a considerar.

A principal função de uma boa cravação é segurar e proteger com segurança uma pedra no ambiente para o qual foi concebido. Por exemplo, uma cravação para um pendente não está sujeita ao mesmo desgaste que uma cravação para um anel, pelo que o pendente pode ser concebido com uma estrutura mais delicada. Por outro lado, enterrar uma pedra numa cravação maciça, embora seguro, iria sobrecarregar a pedra. O segundo imperativo de design é o de exibir a pedra de forma vantajosa, realçando a sua beleza. O terceiro elemento é a integração do design da cravação e da peça na qual ele será colocado.

Estas três considerações andam de mãos dadas e devem ser abordadas em simultâneo. Nunca é: "Primeiro, vou fazer a peça de joalheria, a seguir, vou desenhar uma bela cravação, depois, vou descobrir como o tornar seguro, e, finalmente, vou descobrir como juntar as duas coisas". Esforce-se sempre por conceber uma cravação segura e atrativa que se integre e seja um elemento essencial do *design* geral da peça. A aparência visual de uma cravação será determinada pela sua segurança, proteção, exposição e localização.’[Pág. 14].



Figura 64 - Anel por Stuart Cathey, fotografia por Robert Diamante

Ora, entende-se aqui uma abordagem de concepção de uma peça de joalheria aonde a cravação, o corte e tamanho da pedra e o desenho do anel não são visto como diferentes partes de um todo, mas como questões que são indissociáveis umas das outras. Considera-se que o anel demonstrado na Fig. 66 é um exemplo deste princípio sendo que não é possível alterar o método de cravação ou o corte da pedra sem alterar muito o desenho do anel. É um anel bem desenhado exatamente porque cada uma das suas “partes” é indissociável do todo.

Friedrich Nietzsche e a sua filosofia, nomeadamente o livro *O Crepúsculo dos Ídolos*[113], foram muito influentes no trabalho. Sobre o artista, e outras questões, Nietzsche escreve:

‘Um psicólogo nato acautela-se por instinto de ver por ver; o mesmo se diga de um pintor nato. Nunca trabalha “de harmonia com a natureza” – deixa que o seu instinto, a sua “camara escura”, esquadrinhe e expresse o “caso”, a “natureza”, o “vivido” ... Só o *geral* lhe chega à consciência, a conclusão, o resultado: não conhece a caprichosa abstração a partir de um caso singular. (...) A natureza apreciada artisticamente, não é nenhum modelo. Exagera, distorce, deixa lacunas. A natureza é o *acaso*. O estudo “de harmonia com a natureza” parece-me um mau signo: revela sujeição, fraqueza, fatalismo; ajoelhar-se diante dos *petis faits* é indigno de um artista *total*. Ver *o que é* – isso pertence a outro género de espíritos, os *antiartísticos*, os objetivos. Importa saber quem se é...’[Pág. 69].

De acordo com Nietzsche, não é o trabalho do artista retratar ou capturar a realidade como uma espécie de fotógrafo glorificado, mas sim torná-la sua, exprimi-la à sua maneira. Assumindo esta filosofia como base de trabalho, considera-se que as fontes de inspiração (a até as tecnologias) devem ser subordinadas pelo *designer*, sendo a sua vontade a tomar as decisões, procurando utilizar o “real” para criar o “ideal”, tornando a arte indissociável do artista.

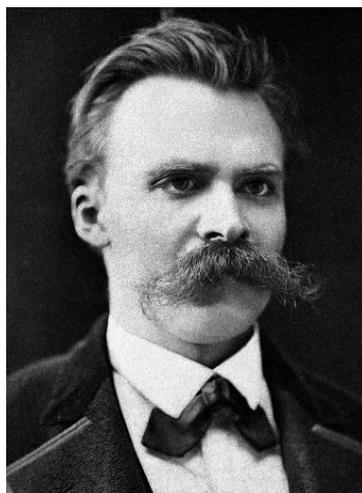


Figura 65 - Friedrich Nietzsche, fonte:[182]

Outra influencia foi o designer italiano Bruno Munari que escreve sobre o *designer* em *Design as Art*[114]:

‘O termo "designer" foi usado pela primeira vez neste sentido na América. Não se refere a um designer industrial, que desenha máquinas ou peças mecânicas, oficinas ou outros edifícios especializados. É, de facto, um engenheiro de design e, se tem uma mota na prancheta, não dá grande importância à estética ou, quando muito, aplica uma ideia pessoal de como deve ser uma mota. Uma vez perguntei a um engenheiro que tinha desenhado uma motorizada porque é que tinha escolhido uma determinada cor, e ele respondeu: porque era a mais barata. Por conseguinte, o designer industrial considera que o aspeto estético do seu trabalho é simplesmente uma questão de acabamento e, embora isso possa ser feito com o maior dos escrúpulos, evita os problemas estéticos ligados à cultura contemporânea, porque essas coisas não são consideradas úteis. Um engenheiro nunca se deve aventurar a escrever poesia. O designer trabalha de forma diferente. Ele dá o peso certo a cada parte do projeto em questão e sabe que a forma final do objeto é psicologicamente vital quando o potencial comprador está a decidir-se. Por conseguinte, tenta dar-lhe uma forma tão adequada quanto possível à sua função, uma forma que se pode dizer que surge espontaneamente da sua função, da mecânica (quando existe), do material mais adequado, das técnicas de produção mais modernas, de um cálculo de custos e de outros fatores psicológicos e estéticos.’[Pág. 29-31].

Mais tarde, em *Fantasia*[115], Bruno Munari acrescenta:

‘(...) considerando o design como modo de projetar, um modo que, sendo embora livre como a fantasia e exato como a invenção, compreende todos os aspetos de um problema, não só a imagem como a fantasia, não só a função como a invenção, mas também o aspeto psicológico, o aspeto social, económico, humano. Pode pensar-se de design como de projetar um objeto, um símbolo, um ambiente, uma nova didática, um método para procurar resolver necessidades coletivas, etc.’[Pág. 24].



Figura 66 - Bruno Munari, fonte:[183]

Acredita-se que Bruno Munari vê o designer como um mediador entre todos os diferentes aspetos pertinentes ao produto, tendo de resolver não só questões relativas à produção e o funcionamento mecânico (dependendo do produto) mas também questões estéticas e culturais, entre muitas outras. Por outras palavras, o paradigma com o qual se aborda o desenvolvimento do produto deve ser holístico (Fig. 69), isto é, deve-se entender o produto como sendo a concretização de várias vontades, como sendo o todo e não as partes.

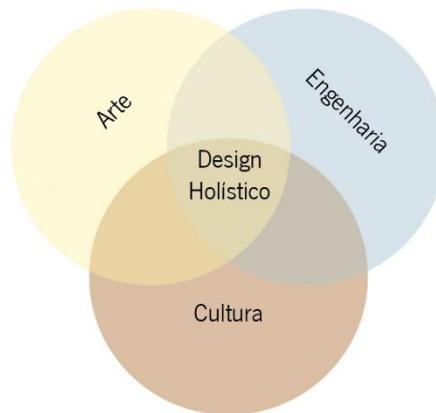


Figura 67 - Esquema representativo de design holístico

Outra questão relevante foi a Proporção Dourada, este tema é abordado extensamente me “*O Código Secreto*” por Priya Hemenway pelo que se ira resumir o essencial.

A Proporção Dourada, também conhecida como Sequencia de Fibonacci ou  $\Phi$ , entre outro nome, é um princípio ou proporção que se repete na natureza e é utilizado na arte e ciência como, entre outras questões, uma diretriz estética. Foi matematicamente postulada por Euclides quando dividiu uma linha em duas secções de modo que “a razão de toda a linha para a parte maior é a mesma que a da parte maior para a parte mais pequena”[Pág. 7], esta proporção é visível na Fig. 70 onde  $AB/AC = AC/CB$ . Calculando esta proporção articulada por Euclides chega-se ao resultado aproximado de 1,61803 que é, exatamente, a Proporção Dourada.

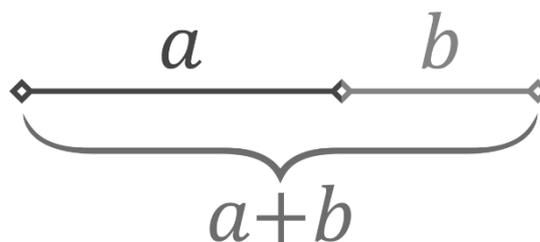


Figura 68 - Divisão de linha de acordo com a Proporção Dourada, fonte:[184]

Esta proporção pode ser encontrada em padrões de sementes, plantas, árvores genealógicas, arquitetura, pintura, corpo humano e muitas outras fontes.



Figura 69 - Exemplos da Proporção Dourada na natureza, fonte:[185]

O psicólogo Gustav Fechner realizou um estudo onde triou medidas a vários objetos retangulares como livros, edifícios e caixas, descobrindo que todos estes objetos retangulares utilizavam, em média, um valor aproximado da proporção dourada[116]. Realizou outro estudo onde mostrou dez retângulos com proporções diferentes a um certo número de pessoas e perguntou-lhes qual dos retângulos elas preferiam, o resultado, como visível na Fig. 72, foi que as pessoas preferiam o retângulo cuja dimensão dos lados obedecesse à Proporção Dourada[117].

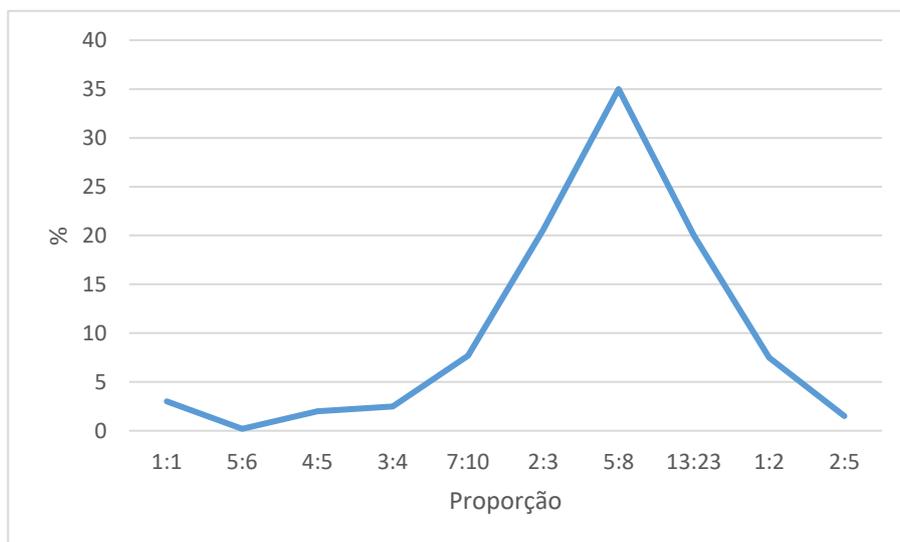


Figura 70 - Resultado da experiência de Fechner

Sobre a Proporção Dourada, a autora afirma: “Aquilo que é mais atraente e que mais pessoas fascina na Proporção Divina provém da referência subliminar da razão a nós próprios, pois o seu aspeto mais profundo é explicitamente evocado quando colocamos o ser humano em equação e percebemos a proporção como uma relação que nos inclui a nós próprios. Ao observarmos o nosso lugar na equação, descobrimos que, variavelmente, somos o todo, somos a maior, e somos a mais pequena das partes – sempre numa razão perfeitamente equilibrada de todo para o maior e do maior para o mais pequeno. (...) Como uma relação de macrocosmo e microcosmo, a proporção divina descreve o maior e o mais pequeno na sua relação mais íntima: não estão separados, estão relacionados. A proporção liga-os de tal forma que há um efeito de espelho que torna possível ver o maior no mais pequeno e o mais pequeno no maior.” [Pág. 8].

Sendo assim, decidiu-se utilizar a Proporção Dourada como referência durante a fase do desenvolvimento de produto, procurando-se criar formas harmónicas.

### **3. DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO**

Com as bases desenvolvidas no Estado de Arte, procurou-se criar conceitos originais com os quais se iria explorar os benefícios da manufatura aditiva. Deu-se então início ao trabalho de desenvolvimento dos conceitos

O trabalho iniciou-se por uma pesquisa informal de fontes de inspiração. De modo a promover a criatividade, não se limitou as fontes de inspiração, bem pelo contrário, quis se explorar temas variados, tendo em consideração o conhecimento obtido no Estado de Arte, nomeadamente da história da joalheria.

Decidiu-se iniciar o trabalho por uma visita ao Museu dos Biscainhos em Braga; de seguida realizou-se a análise de um anel específico; com toda a pesquisa foi possível determinar os temas a explorar, tendo-se posteriormente trabalhado nos mesmos através do desenho; e utilizou-se software CAD para desenvolver formas tridimensionais com as quais se criou dois conceitos de anel.

Posteriormente, realizaram-se análises de elementos finitos relativas a esforços mecânicos, de modo a verificar o funcionamento de um dos anéis, e relativas à fundição dos anéis, de modo a verificar se seria possível fundir os mesmos.

### 3.1. BUSCA POR INSPIRAÇÃO

Como supradito, inicialmente realizou-se uma visita ao Museu dos Biscainhos em Braga, tiraram-se fotografias e desenharam-se elementos estéticos encontrados no museu que poderiam vir a servir de inspiração (desenhos que serão explorados posteriormente). O Museu era originalmente um palácio do séc. XVII que, como tal, apresenta um estilo barroco característico da altura e também expõe artes decorativas do séc. XVII e XVIII. O que chamou mais à atenção neste museu foram os elementos vegetais e floreadis que se encontravam pintados nas paredes, como elementos decorativos de várias construções e também o próprio jardim.



Figura 71 - Fotografias do Museu dos Biscainhos

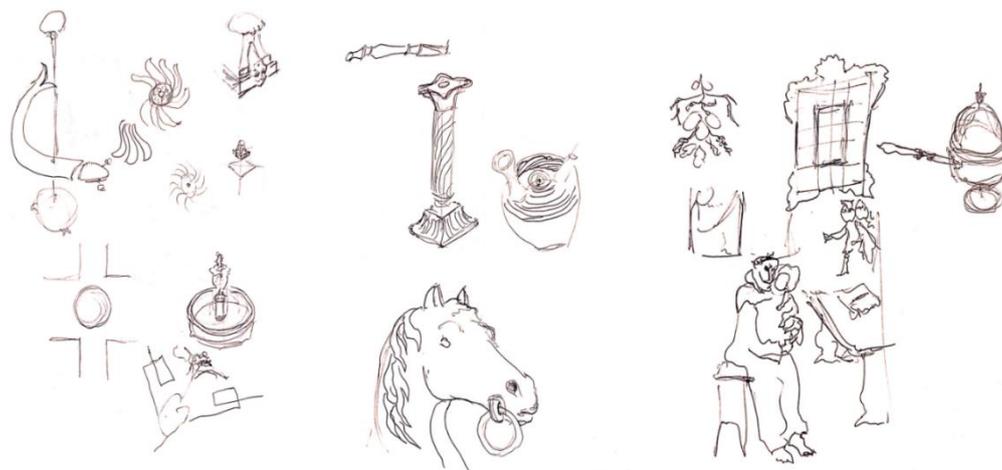


Figura 72 - Esboços realizados na visita

Como supradito, entendeu-se que a Arte Nova seria uma boa fonte de inspiração. Um anel específico que se achou interessante foi um anel de autor desconhecido criado em Moscovo entre 1908 e 1917 que se pode ver na Fig. 73[118]. O anel é claramente um produto da Arte Nova da altura, faz referências à natureza através do corpo do anel que se assemelha a ramos e a referência a folhas utilizando esmalte *plique-à-jour*. As cores utilizadas variam entre o verde, dourado, vermelho e branco, servem como outra referência à natureza uma vez que se trata de cores comuns em vegetação e fruta. Estas variações de cores acontecem em vários pontos da peça: o metal é dourado, que inclui o corpo, garras e a estrutura onde é colocada o esmalte; o esmalte varia de um tom avermelhado no centro até um tom amarelo-esverdeado; o verde sobressai ainda mais devido ao diamante em cor de champanhe que funciona como o ponto central da peça. Existe ainda uma pérola na ponta do anel que simultaneamente funciona como uma referência, neste caso direta, à natureza e como uma variação de cor, fazendo sobressair o branco do diamante.

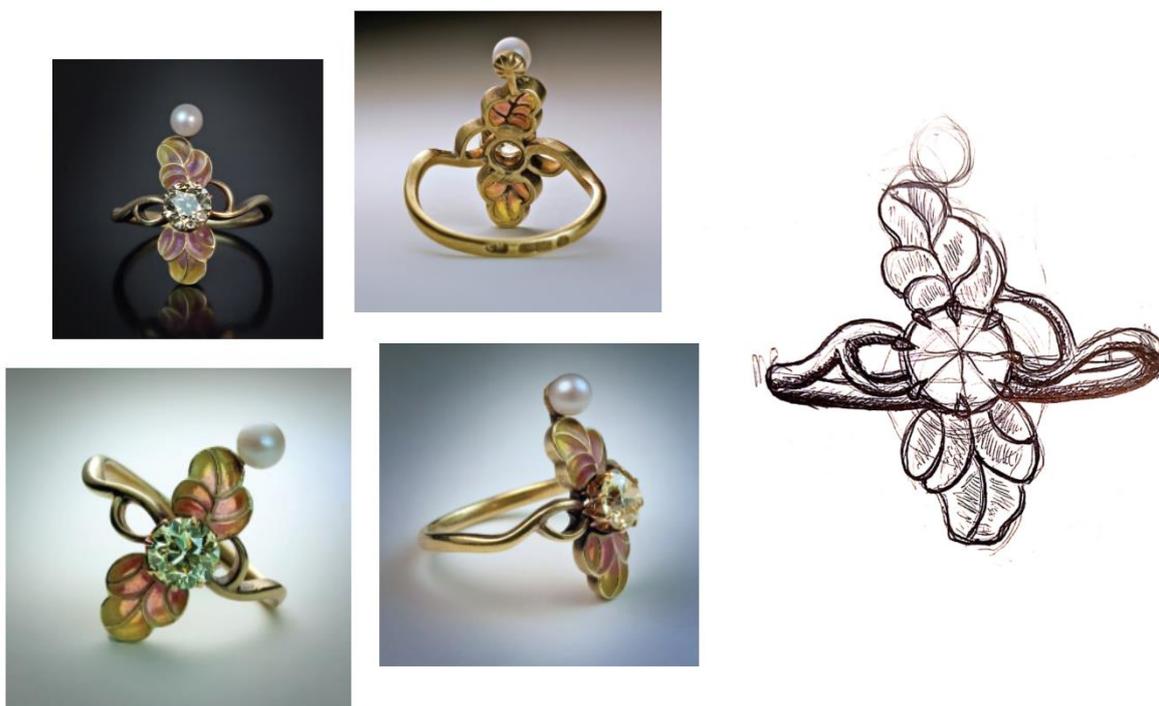


Figura 73 - Fotografias do anel e esboço realizado pelo aluno, fonte das fotografias:[118]

Simultaneamente, realizou-se uma pesquisa de modo a determinar quais seriam os temas específicos que seriam explorados no desenvolvimento dos conceitos. A partir desta pesquisa houve dois temas que, inicialmente, sobressaíram: o fumo e as árvores, são temas que, como se verá, têm algumas semelhanças e algumas diferenças.

O fumo é esteticamente muito variado e orgânico, é uma substância que está em constante movimento, devido a ser um gás, e que possui uma certa transparência, fazendo com que a percepção que se tem do fumo ser também uma consequência do contexto espacial onde o mesmo se encontra: a luz, o fundo, a distância, a própria matéria que está a ser queimada, todas estas características afetam a maneira como o sujeito entende a forma e a estética do fumo.



Figura 74 - Coleção de imagens de fumo

Já a árvore – e por extensão, os ramos e as raízes – também possui uma forma orgânica considerando que é muito mais segmentada, padronizada e rítmica. Assume uma estética que, embora seja mais objetiva, fácil de compreender e sólida também interage com a escala, ou seja, à medida que o observador se aproxima mais de árvores, ramos ou raízes percebe cada vez mais detalhes e formas.



Figura 75 - Coleção de imagens referentes a árvores, raízes e folhas

A semelhança é que ambas partem de uma origem, quer seja o tronco principal ou a chama, esta dinâmica cria uma estética expansiva que tem sempre um grau de movimento associado. A questão do movimento é muito interessante artisticamente visto que o trabalho em questão é uma peça de joalheria, ou seja, um objeto estático. Por estas mesmas razões achou-se que seria interessante explorar a criação de joalheria com inspiração nestes elementos.

### 3.2. CONCEPTUALIZAÇÃO

Durante o processo anterior, durante a pesquisa também se realizaram desenhos que foram relevantes para o desenvolvimento. A certa altura surgiu um desenho aonde se colocou dois ramos, um em oposição ao outro, desta combinação surgiram vários espaços que poderiam posteriormente ser aproveitados para a colocação de outros elementos. Achou-se esta combinação interessante, pelo que seguidamente explorou-se a.

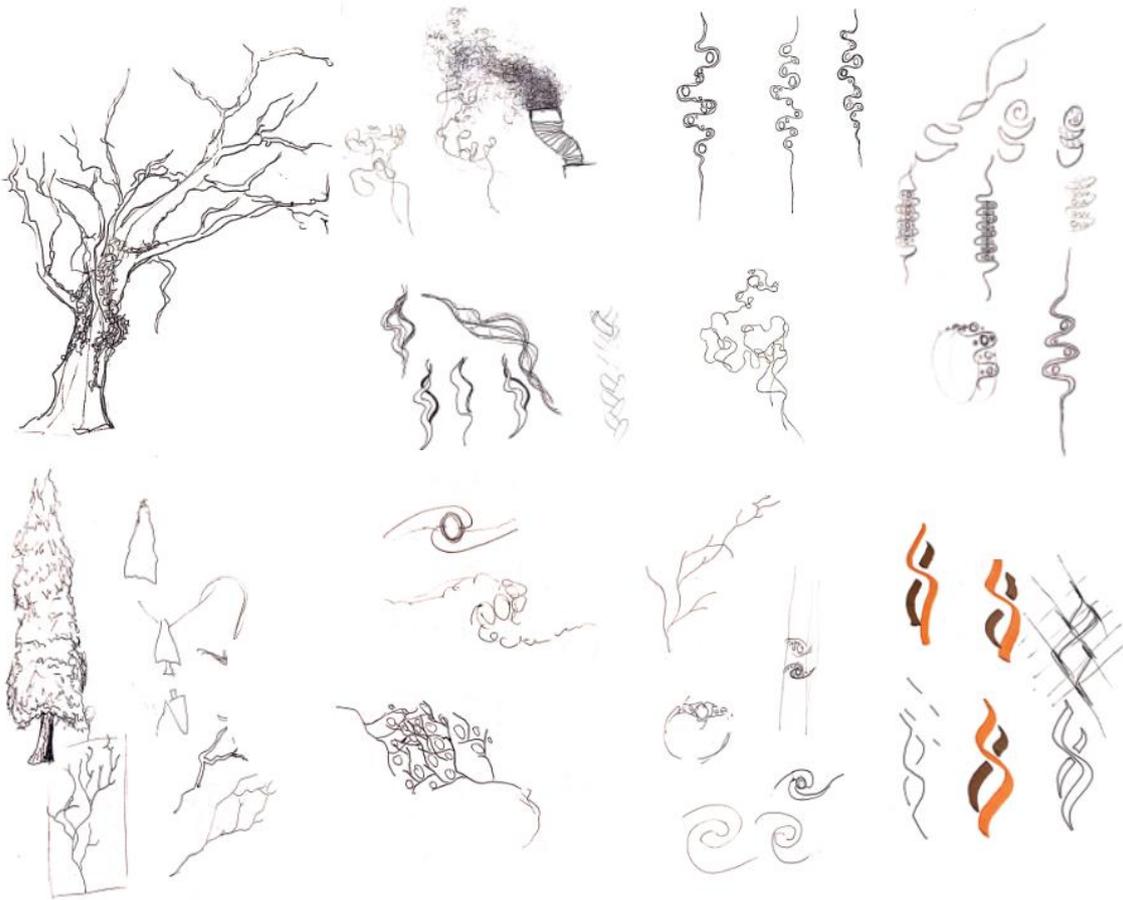


Figura 76 - Desenhos relativos a fumo e ramos

Procedeu-se a um estudo onde se utilizou várias fotografias de ramos, estas imagens foram limpas de fundo no Adobe Photoshop[119] e no Adobe Illustrator[120] foram combinadas umas com as outras. Criaram-se várias imagens aonde se colocou dois ramos em oposição uns aos outros, resultando em oito combinações diferentes.

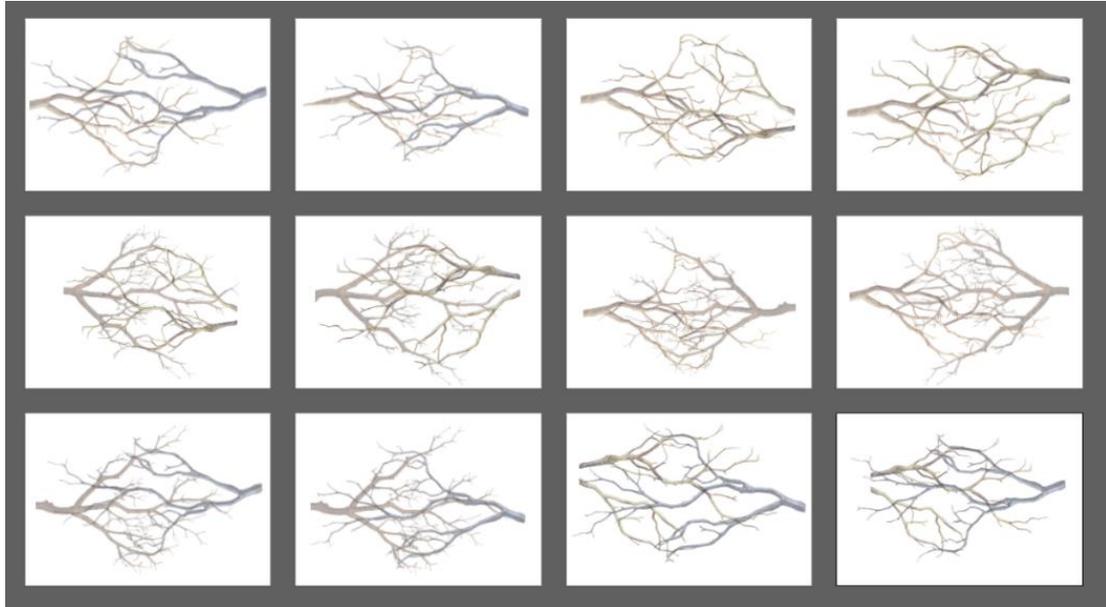


Figura 77 - Combinações de imagens de ramos

De seguida utilizaram-se folhas de papel A4, colocou-se as folhas em cima do ecrã do computador e, com canetas, desenhou-se por cima destas combinações. O objetivo destes desenhos era simplificar as formas, no entanto ainda se mantinham relativamente fiéis à forma original dos ramos. De seguida repetiu-se o processo, simplificando-se ainda mais as formas, resultando em desenhos com um grau elevado de abstração.

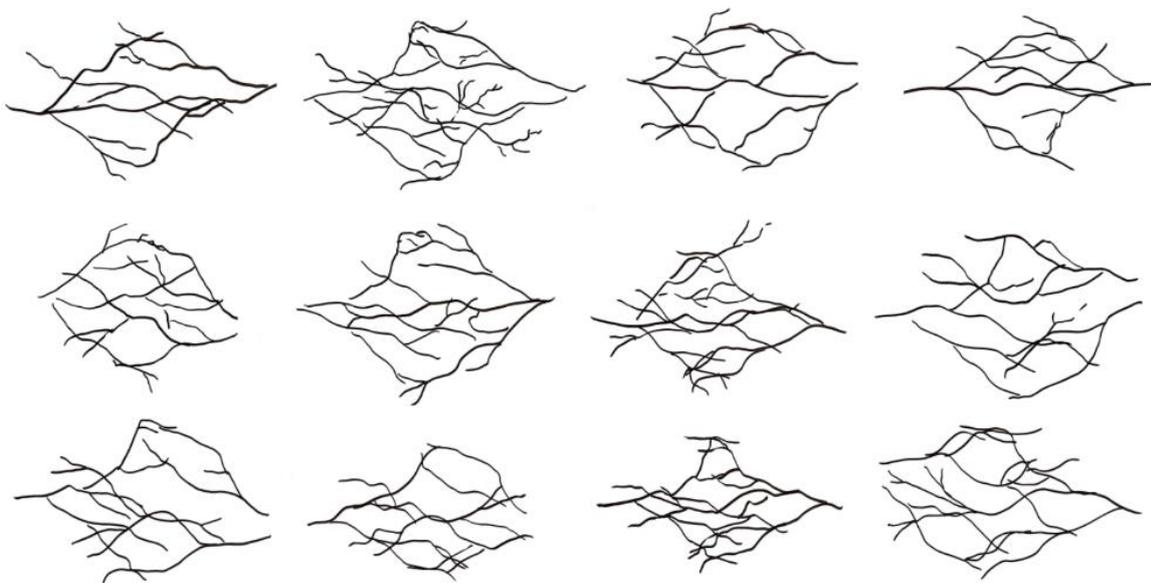


Figura 78 - Simplificação das imagens na Fig. 28

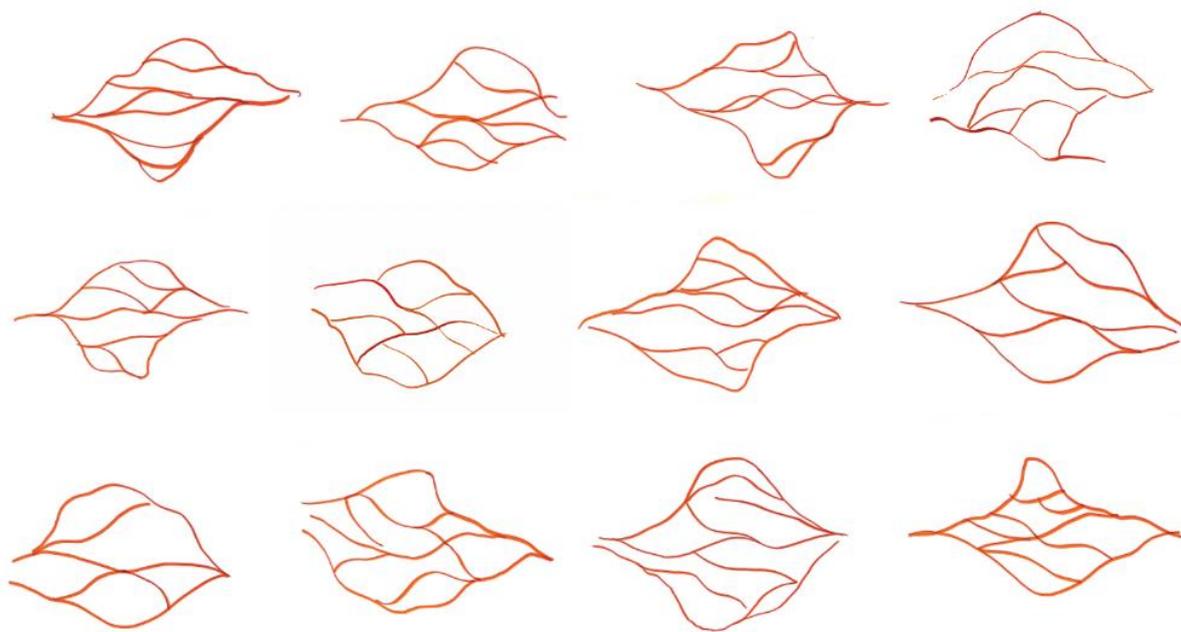


Figura 79 - Simplificação das imagens na Fig.29

Seguidamente, utilizou-se estes desenhos como referência e desenhou-se várias versões dos mesmos onde, através do uso de cores, se procurou explorar os diferentes espaços entre as linhas assim como a forma como as linhas conectavam-se entre si.

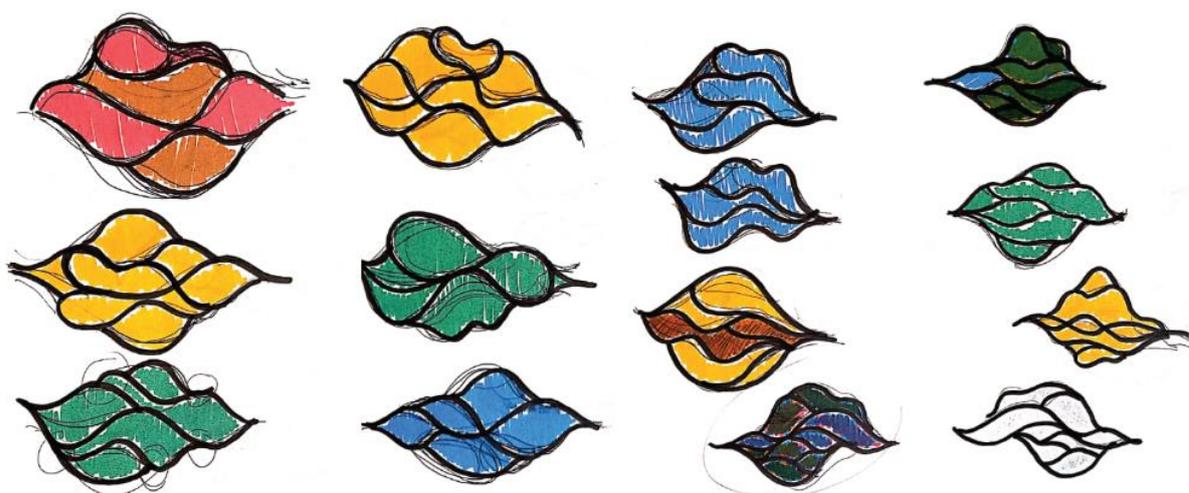


Figura 80 - Desenvolvimentos das ideias na Fig.30

Pretendeu-se também fazer um estudo mais específico das folhas e dos seus veios, para tal realizou-se desenhos em folhas A3 de modo que se conseguisse entender melhor a relação entre os veios primários, secundários e terciários assim como a sua forma.



Figura 81 - Desenhos relativos às folhas e às suas nervuras



Figura 82 - Exploração de movimento numa folha

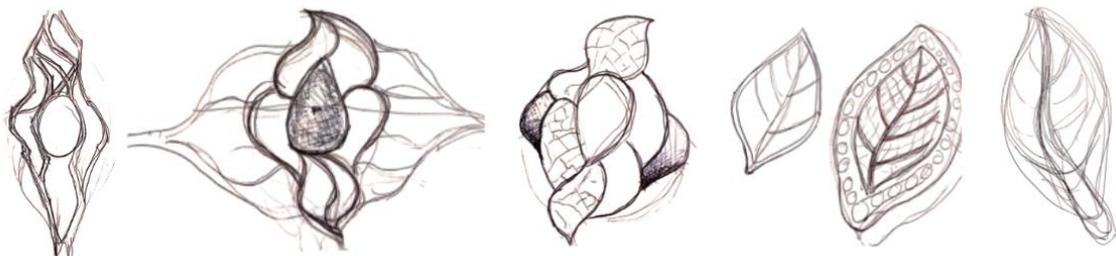


Figura 83 - Esquissos variados

### 3.3. MODELAÇÃO DOS ANÉIS RECORRENDO A CAD

Até este ponto, os trabalhos que tinham sido realizados na folha de papel eram, naturalmente, bidimensionais, passou-se então para a modelação 3D de modo a começar, concretamente, a conceber os anéis. Dos desenhos realizados anteriormente escolheu-se os mais interessantes como base para a criação dos anéis, e, a esta base, foi-se dando altura e profundidade. Com um desenho à base de linhas, formas orgânicas e referências à natureza, sempre tendo em mente a Arte Nova como referência, foi-se explorando diferentes variações de forma; a interação entre as linhas, a sua qualidade representativa e variações de espessura; e a utilização de pedras e de esmalte. Para a realização desta tarefa utilizou-se o programa de modelação Rhino 7 (*Robert McNeel & Associates*) com o plugin Rhinogold que contém funções especializadas para joalheria.

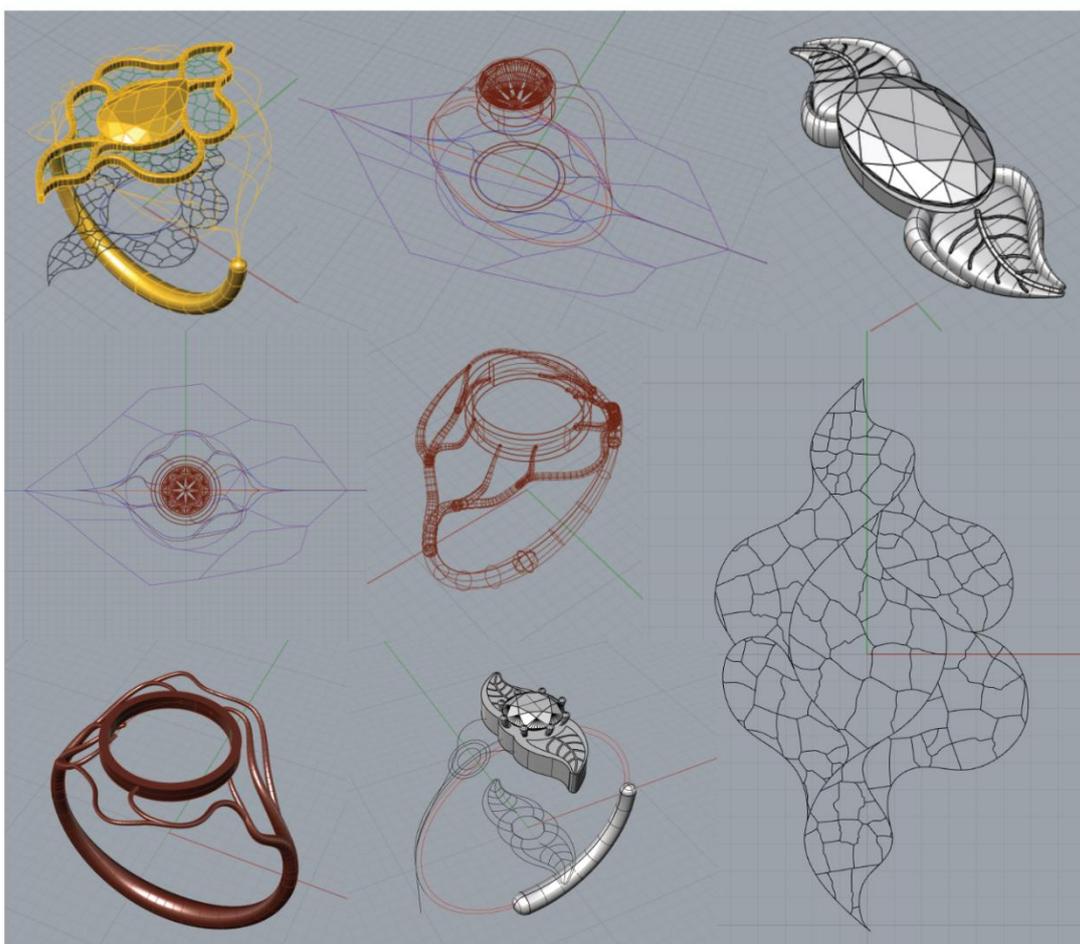


Figura 84 - Modelações conceptuais diversas

O resultado deste trabalho de modelação foram dois conceitos de anel: o Anel\_Pedra e o Anel\_Esmalte.

### 3.1.1. ANEL\_PEDRA

O Anel\_Pedra baseia-se numa vontade de criar um anel com um desenho baseado em linhas, representativas de ramos, onde estas mesmas dão origem às garras que cravam a pedra. Tradicionalmente haveria duas maneiras de realizar este conceito: utilizando garras finas e uma caixa/bisel; ou então com garras mais grossas. Porém, tanto a caixa como a garra grossa iriam contra a vontade estética, sendo que a ideia do anel se baseia na linha orgânica e delicada, característica da Arte Nova. Em ambos os casos, também seria necessário recorrer a um cravador visto ser um serviço especializado. Quis-se utilizar a manufatura aditiva para desenvolver uma geometria, difícil de produzir manualmente, que permitisse que o anel fosse cravado manualmente pelo joalheiro após a sua produção.

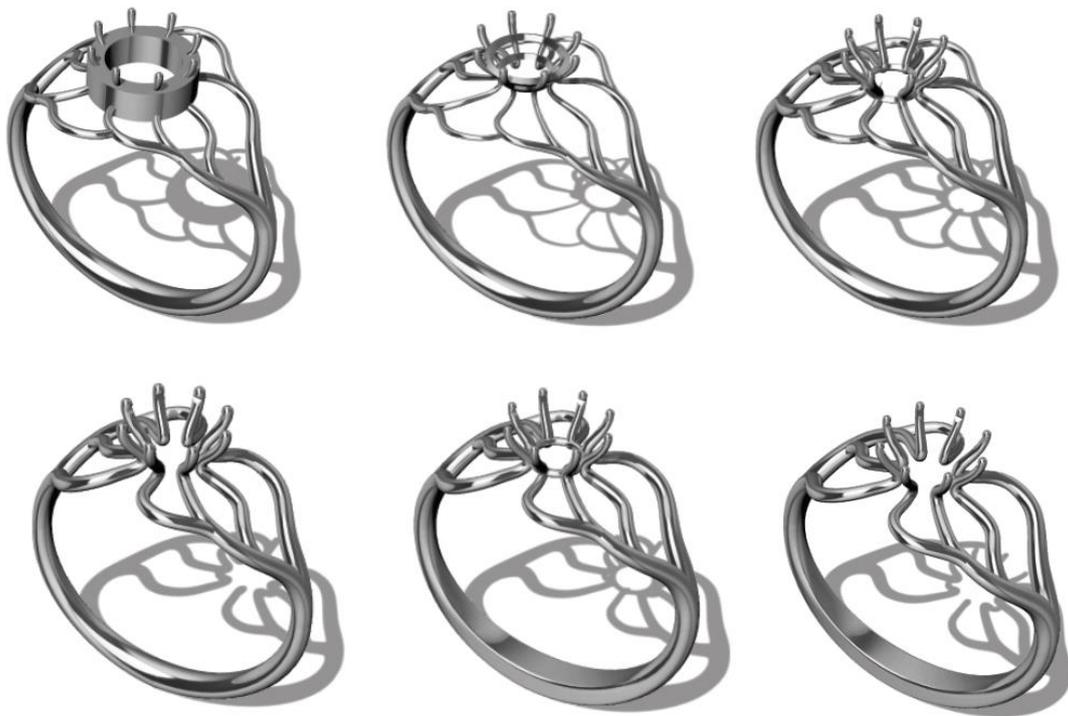


Figura 85 - Evolução do Anel\_Pedra

Sendo assim, acabou por se criar um método de cravação que é uma síntese entre a cravação por garras e por tensão que tira proveito dos benefícios da manufatura aditiva, utilizando uma geometria que seria difícil de produzir manualmente.

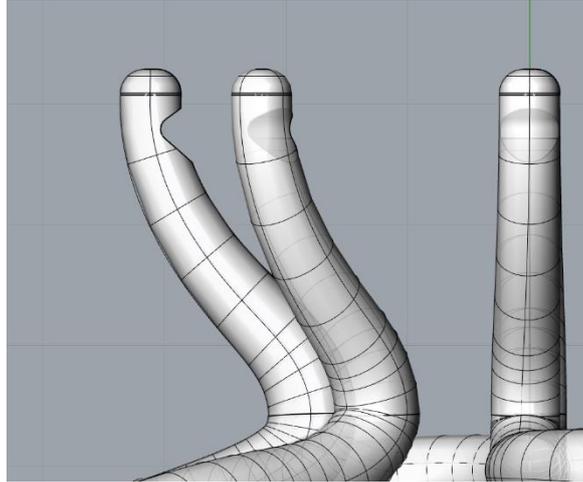


Figura 86 - Vista lateral do anel, foco nas garras

Simultaneamente, quis-se também explorar a variação de espessuras que a manufatura aditiva permite. Neste caso, a banda é mais espessa do que as garras e esta variação de espessura é gradual, baseando-se na Proporção Dourada. Na Fig. 88 estão visíveis as medidas (mm) do diâmetro inferior da banda, diâmetro lateral da banda e diâmetro da garra.

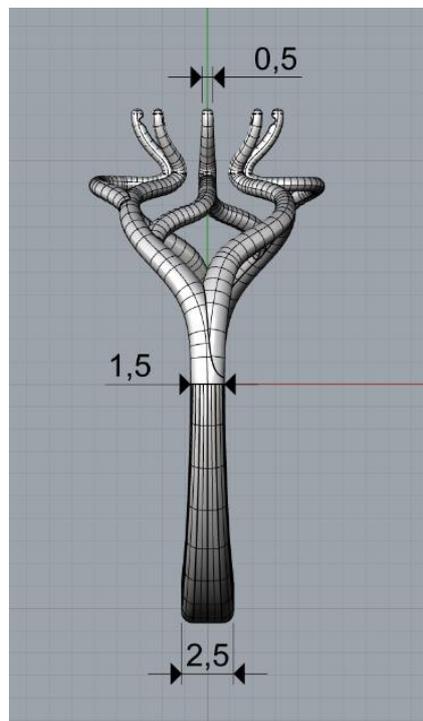


Figura 87 - Medidas de diâmetros do Anel\_Pedra, medidas em mm

Aplicou-se a mesma lógica à escolha do tamanho da pedra que teve em consideração o comprimento do anel. O corte da pedra acaba por ser simultaneamente um desejo de explorar a cravação e uma referência ao anel explorado anteriormente no Capítulo 3.1.

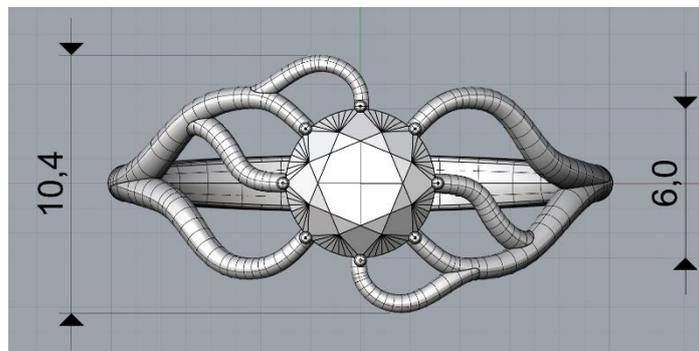


Figura 88 - Comprimento do anel e diâmetro da pedra, medidas em mm

Comparativamente ao anel inicial, o anel final é o resultado de um completo redesenho. Removeram-se uns ramos das laterais que, embora criassem mais estabilidade, engrossavam muito o desenho do anel, tornando-o assim mais elegante, mas aumentando a sua fragilidade. Simultaneamente considerou-se a espessura das garras e a existência de uma argola central de modo a facilitar a cravação da pedra e/ou a assegurar que a cravação seria bem realizada, questões estas que foram abordadas posteriormente num estudo mais aprofundado.



Figura 89 - Render do Anel\_Pedra

### 3.1.2. ANEL\_ESMALTE

Com o Anel\_Esmalte quis-se utilizar o detalhe e o controlo dimensional da manufatura aditiva para, com o auxílio de esmalte, representar uma folha. A evolução do trabalho representa uma reavaliação de como esta representação deveria ser realizada: Inicialmente, o Anel\_Esmalte teria uma banda que se separava em ramos que segurariam a estrutura principal onde se colocaria o esmalte, esta estrutura também teria desenhos de veios. No entanto, considerou-se o desenho do anel demasiado abstrato, fugindo demasiado à Arte Nova, visto ser um estilo mais representativo e menos abstraído. Também se achou que havia uma segmentação estética entre a parte superior e a banda do anel, visto que um era mais abstraído e o outro mais representativo, preferiu-se que o desenho fosse mais coeso. Simultaneamente, devido à existência de vários separadores – que seriam para a separação de diferentes aglomerados de esmalte – não existiria espaço suficiente para explorar o detalhe dos veios.



Figura 90 - Evolução do Anel\_Esmalte

Reduziu-se no nível de abstração e começou-se a explorar outras questões: a robustez; a separação do esmalte; e o detalhe dos veios. Ora, sendo o anel mais representativo de uma folha surgiu a questão do como unir a banda à zona superior, experimentou-se diferentes opções que tornariam o anel mais robusto ou mais delicado. Experimentou-se com diferentes separadores: em alguns casos não se utilizou nenhuns; noutros utilizou-se o veio principal e secundário como separador; noutros trabalhou-se com variações de altura nos separadores, fazendo com que uma parte dos mesmos estivesse emersa no esmalte. Os veios foram sendo geridos de acordo com o espaço que cada opção proporcionava, tentando-se sempre atingir um balanço entre ter detalhe suficiente para que a superfície fosse interessante entendendo que a existência de demasiados veios iria dificultar a sua visualização.



Figura 91 - Render do Anel\_Esmalte

Como no anel anterior, a sequência de Fibonacci foi tida como referência para o desenvolvimento das geometrias tanto para a diferença nas espessuras dos veios, como também para as dimensões da folha. Os veios – que existem em três tipos: principais; secundários; e terciários – têm, inicialmente três espessuras diferentes, 0,4mm, 0,2mm e 0,1mm, respectivamente, já a folha tem uma largura de 8,5mm e um comprimento de 14mm.

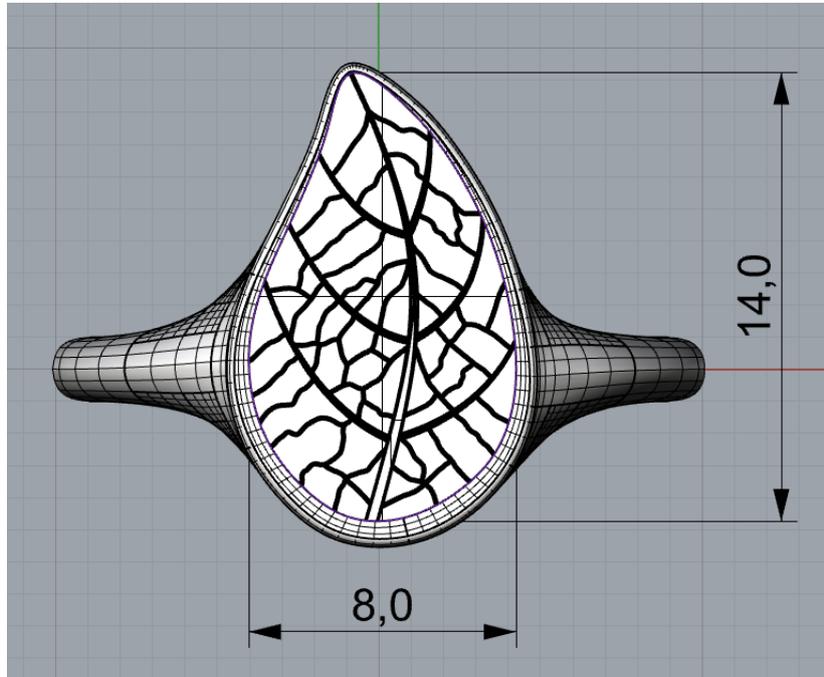


Figura 92 - Vista superior do Anel\_Esmalte

Decidiu-se também criar outro anel idêntico com o padrão invertido para testar o impacto que teria no esmalte. Neste caso, em vez de se acrescentar os desenhos à superfície, removeu-se os da mesma.

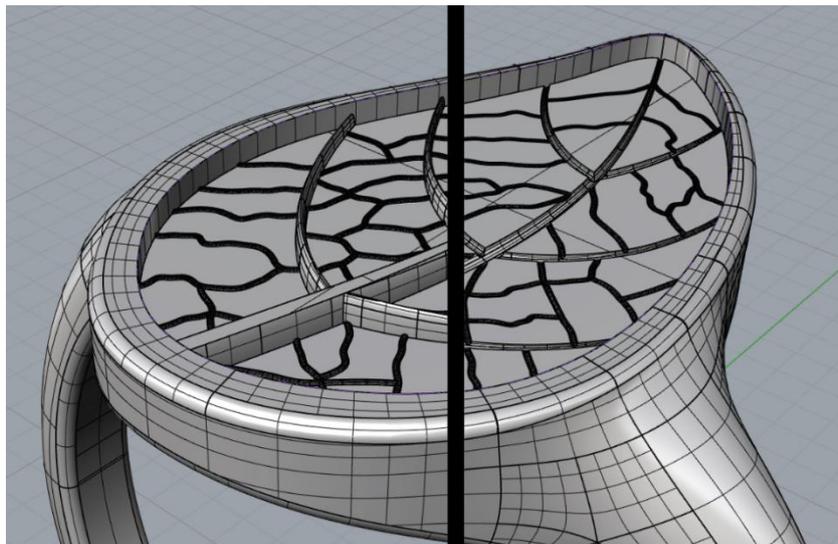


Figura 93 - Comparação entre as duas versões do anel

### 3.4. ANÁLISE DA CRAVAÇÃO REALIZADA COM CAE

Como o pretendido para o Anel\_Pedra era que se realizasse a cravação da pedra simplesmente pressionando a pedra como demonstrado na Fig. 95, decidiu-se realizar uma análise de elementos finitos de modo a determinar se: seria possível cravar a pedra deste modo; não sendo, que alteração na geometria do anel se poderia fazer de modo que fosse. Para a realização desta análise utilizou-se o SolidWorks (*Dassault Systèmes*) que permitiu a realização dos testes e a modelação das geometrias desejadas.

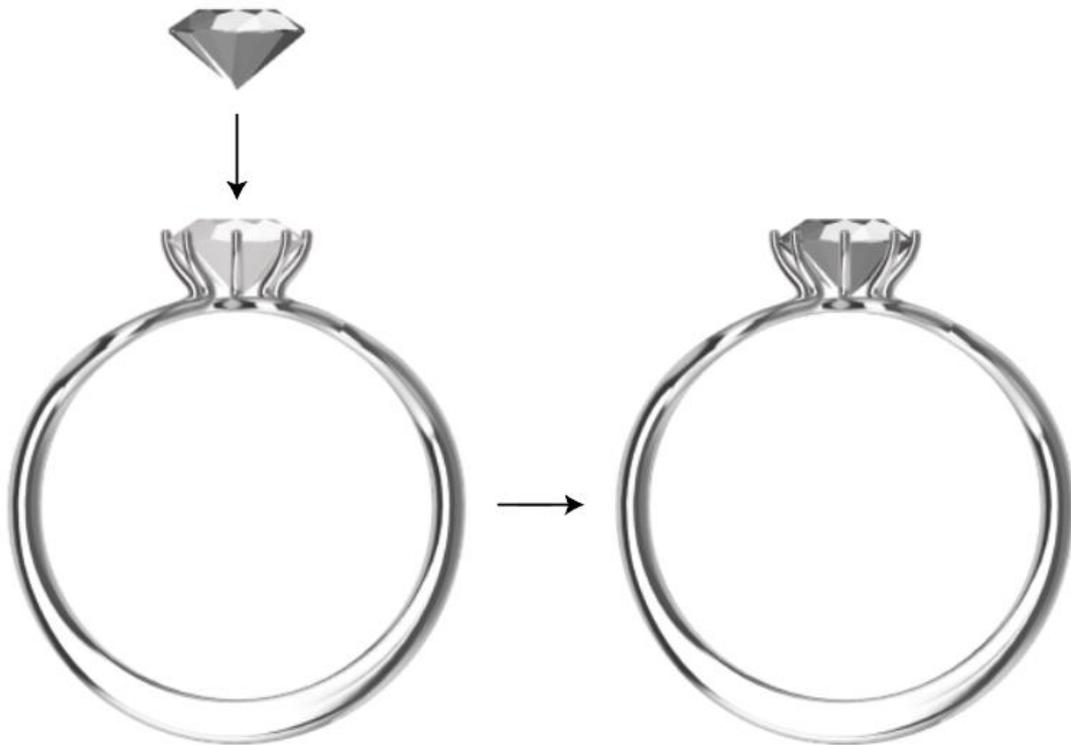


Figura 94 - Movimento pretendido para a cravação da pedra

### 3.4.1. PARÂMETROS

Visto que o propósito desta análise era verificar a possibilidade de cravar a pedra meramente forçando-a na direção de encaixe, o sucesso da cravação basear-se-ia na posição das garras após esta aplicação de força. Como tal, e tendo em base a Lei de Hooke supracitada, quis-se verificar se a garra retornaria à posição original após se aplicar o movimento necessário para que a pedra encaixe.

Decidiu-se então utilizar geometrias representativas da garra lateral e da garra frontal (o anel é simétrico), nestas geometrias, na sua superfície superior, aplicou-se um movimento de 0,135mm (Fig. 96) que se verificou como sendo o movimento necessário para o encaixe da pedra e selecionou-se o fim da garra como ponto de fixação.

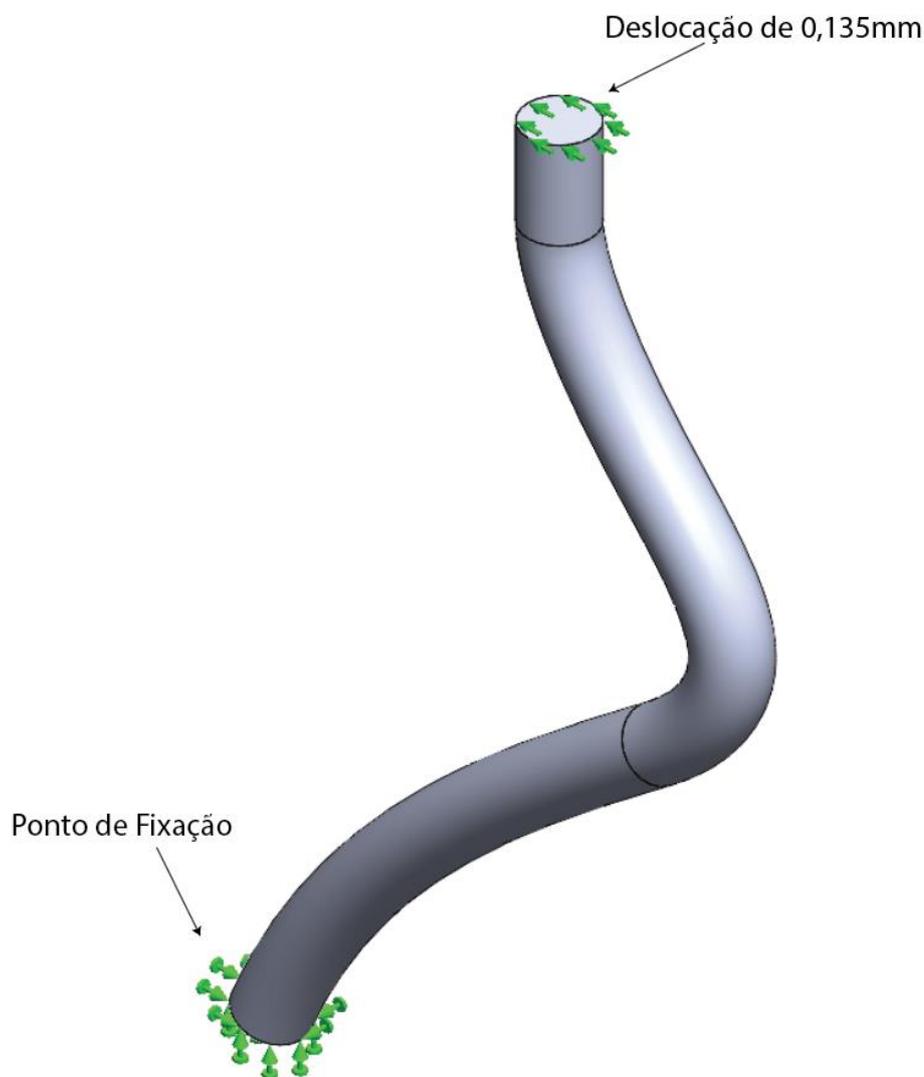


Figura 95 - Ponto de fixação e deslocação do Teste 1

Neste contexto, houve três questões que se quis testar: a espessura das garras; a utilização de uma argola que unisse todas as garras e tornasse a cravação mais segura; e eventuais recortes que se poderia fazer na geometria que poderiam tornar as garras mais flexíveis. A Tabela 1 representa, para melhor visualização, todos os testes realizados.

Tabela 1 - Testes de cravação

	Sem Argola / sem Cortes	Com Argola / sem Cortes	Sem Argola / com Cortes	Com Argola / com Cortes
Garra Lateral com 0,5mm	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Garra Lateral com 0,7mm	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
Garra Frontal com 0,5mm	Teste 9	Teste 10	Teste 11	Teste 12
Garra Frontal com 0,7mm	Teste 13	Teste 14	Teste 15	Teste 16

Para testar a espessura das garras utilizou-se dois valores de referência, considerou-se que espessuras entre os 0,5mm e 0,7mm estariam de acordo com o desenho pretendido. Para testar os recortes, realizaram-se os cortes visíveis na Fig. 97 em cada uma das geometrias. Finalmente, para testar a argola criou-se uma geometria representativa da mesma e alterou-se o ponto de fixação para as laterais da mesma (Fig. 98).

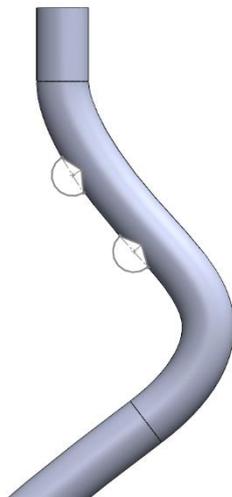


Figura 96 - Recortes, Teste 3

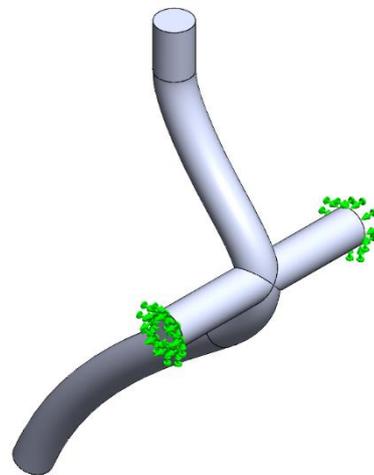


Figura 97 - Novos pontos de fixação, Teste 2

Inicialmente tentou-se realizar o refinamento de malha manualmente, no entanto não se conseguiu reduzir o tamanho de malha muito mais do que a malha pré-definida sem que resultasse em erro computacional e mesmo assim os valores eram inconsistentes ao longo dos diferentes testes. Sendo assim, decidiu-se aplicar a malha geral pré-definida e depois aplicar o *h-adaptive*[82,121] que é um tipo de refinamento de malha automático que sistema repete o teste, aumentando a precisão da malha em zonas onde estima existirem erros até que a diferença entre resultados seja inferior a um valor percentual específico – neste caso, especificou-se 2%. Para além disso, aplicou-se *mesh coarsening* que faz o oposto, reduz a precisão da malha nas zonas onde os resultados são satisfatórios[121].

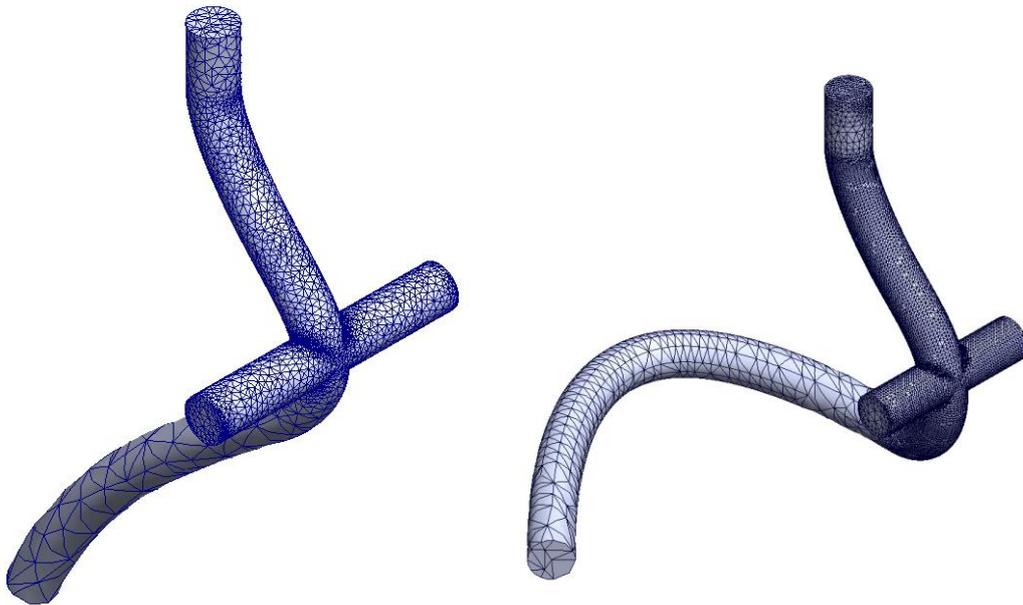


Figura 98 - Malha, Teste 2 e Teste 10, respetivamente

O material que se queria utilizar não constava na lista de materiais do Solidworks. No entanto, o programa permite adicionar materiais, como tal, criou-se um material que tivesse as mesmas propriedades que a prata 925[122].

Tabela 2 - Propriedades da Prata 925

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade	7,1e+10	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0,37	
Densidade	10360	N/m <sup>2</sup>
Limite de Escoamento	124	MPa

### 3.4.2. RESULTADOS

Seguem-se os resultados dos testes, zonas onde a carga é superior ao limite de escoamento estão a vermelho.

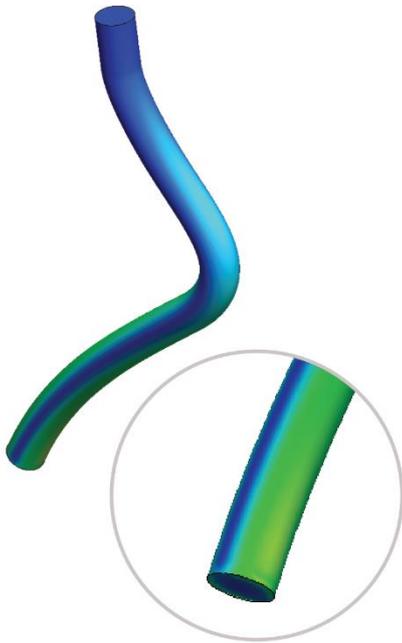


Figura 100 - Teste 1

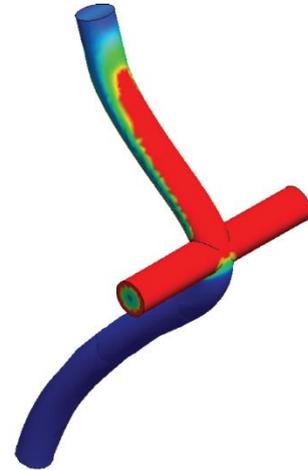


Figura 99 - Teste 2

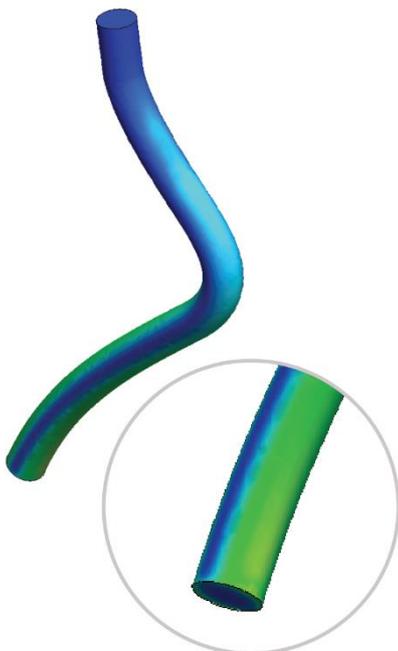


Figura 102 - Teste 3

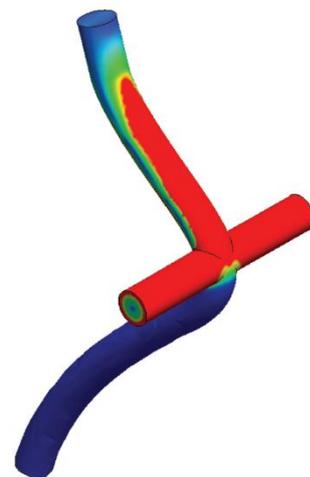


Figura 101 - Teste 4

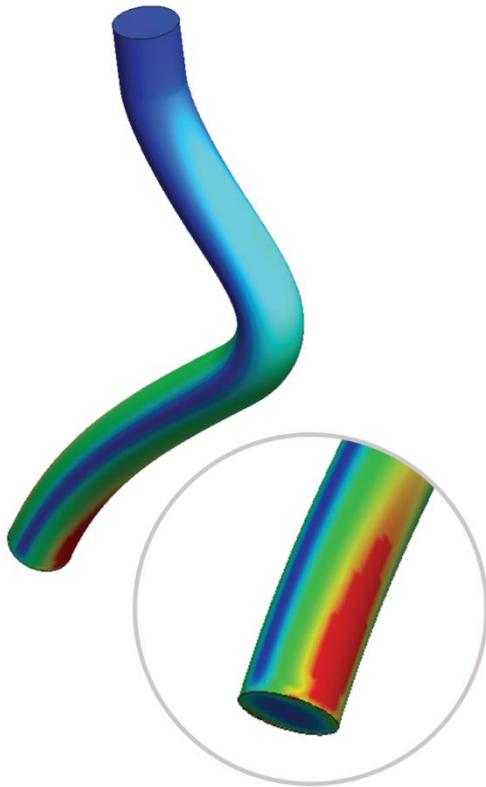


Figura 104 - Teste 5

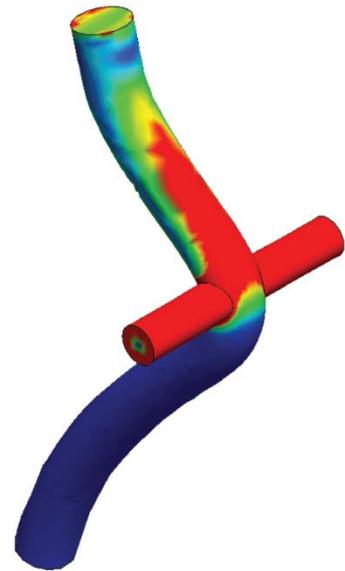


Figura 103 - Teste 6

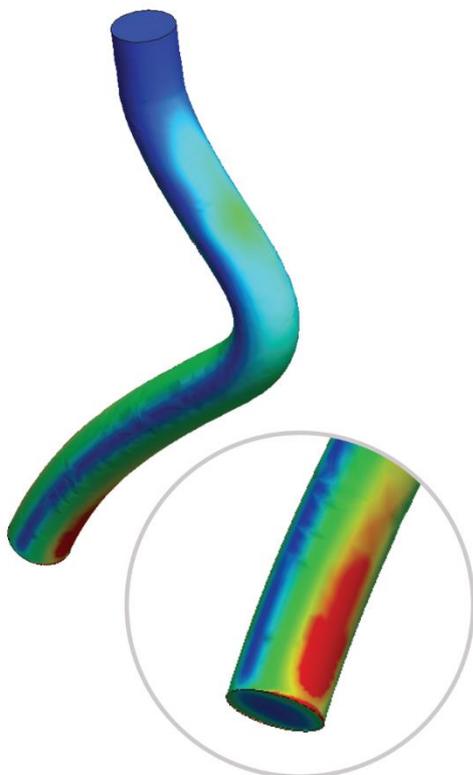


Figura 106 - Teste 7

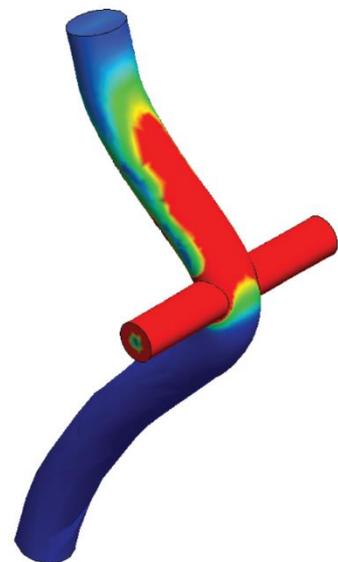


Figura 105 - Teste 8

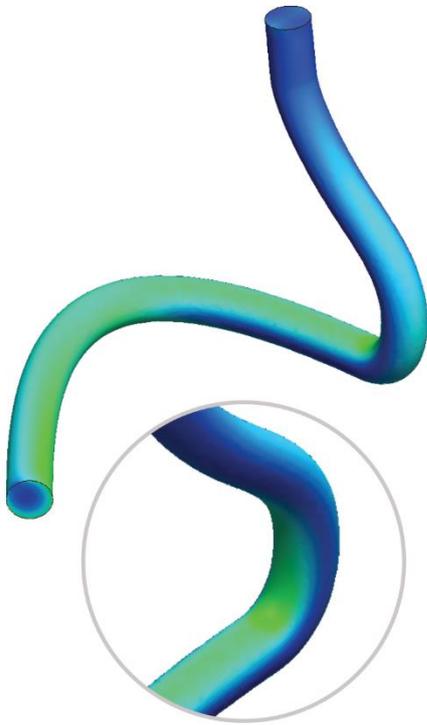


Figura 108 - Teste 9

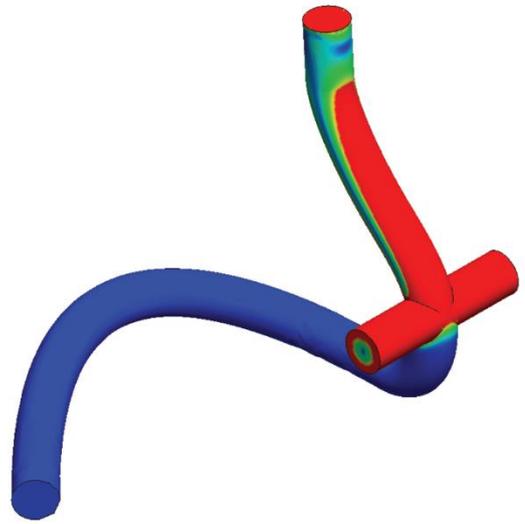


Figura 107 - Teste 10

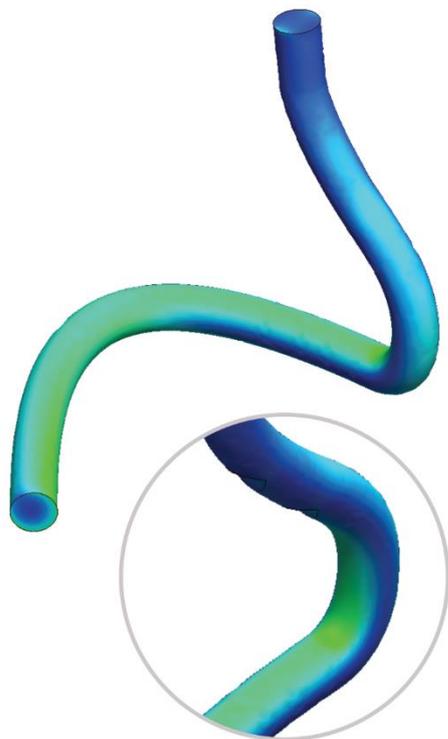


Figura 110 - Teste 11

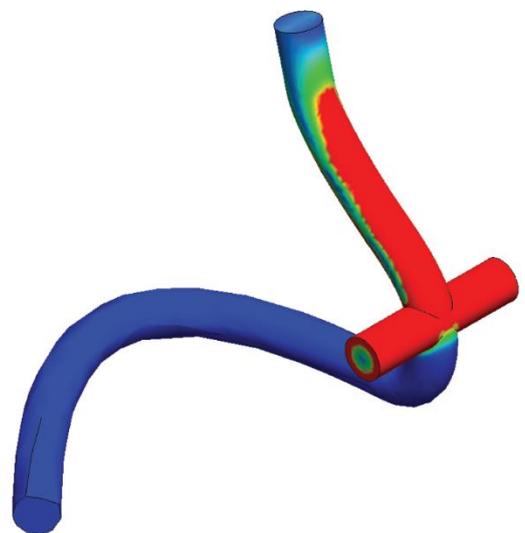


Figura 109 - Teste 12



Figura 111 - Teste 13

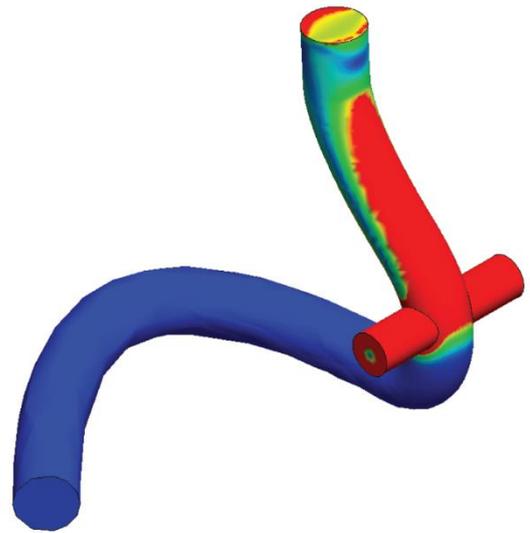


Figura 112 - Teste 14



Figura 114 - Teste 15

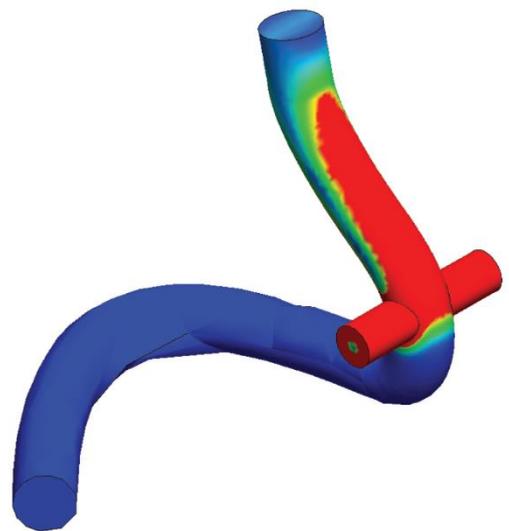


Figura 113 - Teste 16

Na Tabela 3 encontra-se uma análise simplificada dos resultados onde se atribuiu uma cor correspondente ao grau de sucesso, sendo que nos testes 1,3,9 e 11 o comportamento das garras foi completamente elástico (verde), nos testes 5,7,13 e 15 certas zonas muito específicas tiveram um comportamento plástico (amarelo) e nos testes 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 boa parte das garras teve comportamento plástico (vermelho). Ou seja, os cortes não tiveram impacto significativo nos resultados, e as opções de 0,5mm sem argola foram as que tiveram o melhor desempenho, determinou-se então que o Anel\_Pedra teria estas mesmas características.

Tabela 3 - Resultado dos testes de cravação

	Sem Argola / sem Cortes	Com Argola / sem Cortes	Sem Argola / com Cortes	Com Argola / com Cortes
Garra Lateral com 0,5mm	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Garra Lateral com 0,7mm	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
Garra Frontal com 0,5mm	Teste 9	Teste 10	Teste 11	Teste 12
Garra Frontal com 0,7mm	Teste 13	Teste 14	Teste 15	Teste 16

### 3.5. Análise de Fundição Realizada com CAE

Procedeu-se à realização de uma análise de elementos finitos relativa à fundição dos anéis para verificar se seria possível fundir ambos. Para tal, utilizou-se o programa NovaFlow & Solid CV 4.3r6 (*Novacast*) que permite realizar simulações de fundição. O programa permitiu ter uma ideia geral sobre quais são os parâmetros relevantes, nomeadamente o desenho do molde, os materiais e as temperaturas dos mesmos. Também tem as suas desvantagens, nomeadamente a impossibilidade de adicionar materiais à lista, lista esta que não continha Prata 925.

#### 3.5.1. PARÂMETROS

Utilizou-se o guia do utilizador do programa como referência sobre a realização dos testes[123]. Como material, utilizou-se um metal composto por 60% Cobre e 40% Zinco como referência, devido a ser o material com as propriedades mais semelhantes (tem uma temperatura de fusão de 898,13°C, comparativamente à prata 925 que tem uma temperatura de fusão de 893°C[124,125,126,127]). Utilizou-se 1380°C como temperatura do metal, 20°C para a areia de sílica (o material do molde) e para o ar durante a fundição, sendo estes os valores pré-definidos do programa.

Para ambos os anéis, visto se tratar de uma simulação de fundição por cera perdida, ou seja, os anéis serão colocados numa árvore, criou-se uma geometria auxiliar representativa da árvore e o jito de modo a simular mais corretamente o caso real.

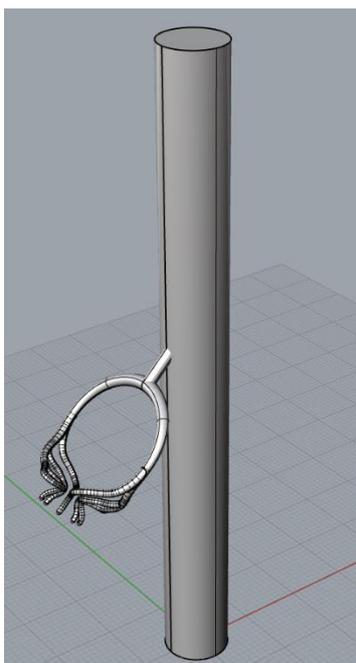


Figura 115 - Geometria utilizada para o Teste 1

Relativamente à malha, seguiu-se a recomendação do guia de utilizador e criou-se uma malha com 500 000 elementos como base. Realizou-se um estudo de convergência de malha onde se realizou aumentos de 500 000 elementos até ao valor máximo permitido no programa. Como é visível na Fig. 117 não houve convergência de malha, isto pode ser o resultado da malha já ter convergido antes dos 500 000 elementos. Visto que o guia recomenda que se utilize 500 000 elementos decidiu-se realizar o teste com esta resolução de malha.

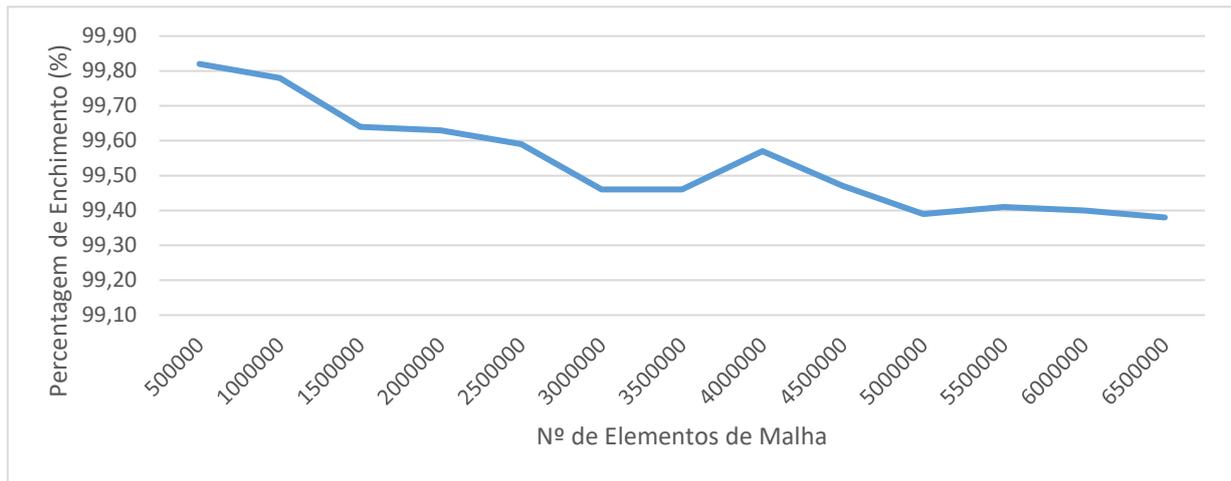


Figura 116 - Estudo de convergência de malha

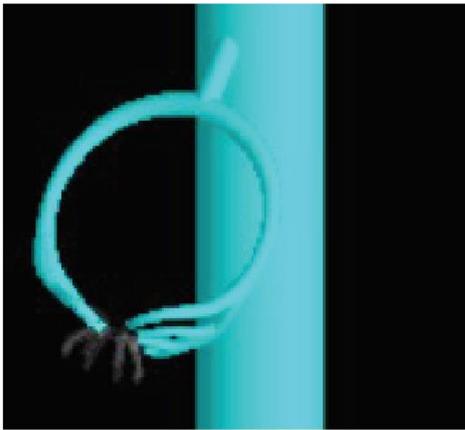
O parâmetro que se quis verificar nos testes foi a percentagem de enchimento do molde. Os testes, visíveis na Tabela 4, iniciaram-se com o primeiro teste que se fez para cada geometria foi um teste com uma geometria base, idêntica ao que existiria na fundição real, no caso destes testes não resultarem testou-se: aumentar a largura do gito (criando uma geometria afunilada onde a parte com maior diâmetro está conectada à arvore); aumentou-se a temperatura do molde e do ar , ambos para 100°C, para simular um aumento de temperatura do forno; aumentou-se a temperatura do metal para 1500°C; e, finalmente, testou-se ambos dos dois pontos anteriores em simultâneo.

Tabela 4 - Testes de fundição

	Base	Gito	Temp. Forno	Temp. Mat.	Ambos
Anel_Pedra	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Anel_Esmalte	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10

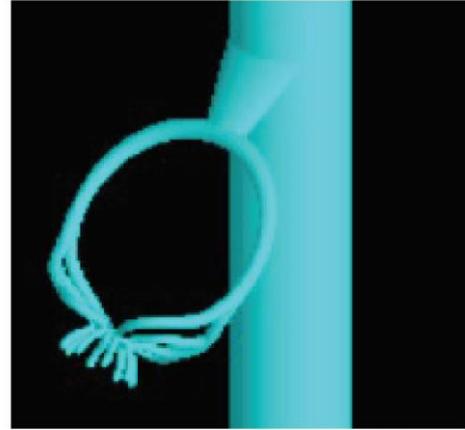
### 3.5.2. RESULTADOS

Seguem-se os resultados dos testes com a percentagem de enchimento do molde.



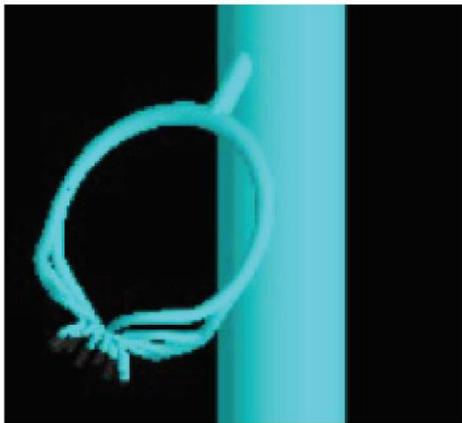
Filled volume, % 99.78

Figura 117 - Teste 1



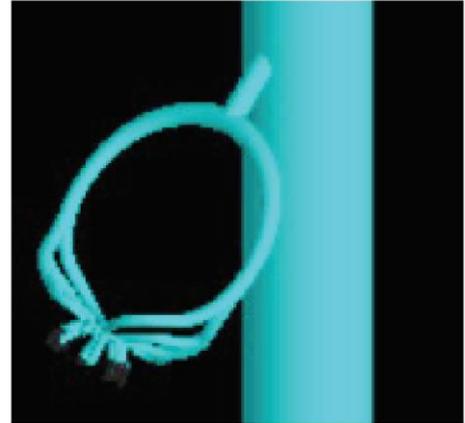
Filled volume, % 100.00

Figura 118 - Teste 2



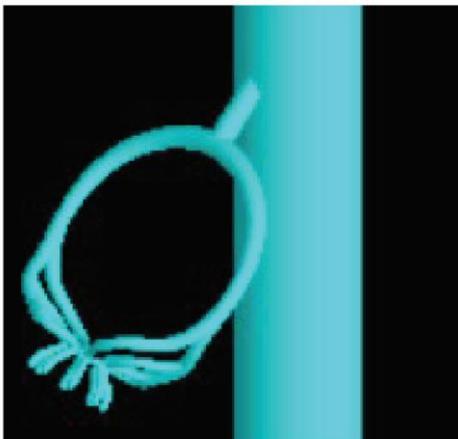
Filled volume, % 99.95

Figura 119 - Teste 3



Filled volume, % 99.88

Figura 120 - Teste 6



Filled volume, % 100.00

Figura 122 - Teste 3



Filled volume, % 100.00

Figura 121 - Teste 4

Como é possível ver nas Fig. 119 a 123, no primeiro teste não foi possível fundir o anel por completo. No segundo já foi, mesmo assim decidiu-se realizar os outros testes para verificar se seria possível fundir sem recorrer à personalização do gito. Como é visível, só aumentando as temperaturas do forno e do metal é que foi possível fundir o anel. No caso do Anel\_Esmalte, não foi necessário a realização de mais testes. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 5, sendo que a verde estão os resultados com 100% de preenchimento e a laranja estão aqueles onde o enchimento não chegou a 100%.

Tabela 5 - Resultados dos testes de fundição

	Base	Gito	Temp. Forno	Temp. Met.	Ambos
Anel_Pedra	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Anel_Esmalte	Teste 6	/	/	/	/

Finalizando-se os testes, concluiu-se que seria, efetivamente, possível fundir os anéis, nem que, no caso do Anel\_Pedra, fosse necessário realizar algumas das alterações testadas, nomeadamente aumentar a temperatura no forno, do metal em estado líquido, ou utilizar um gito personalizado.

## 4. PRODUÇÃO DOS ANÉIS

Estando as geometrias dos anéis determinadas, seguiu-se para a fase da produção. Antes de ser possível produzir os anéis – visto que o método de produção que se irá utilizar é a fundição por cera perdida – foi necessário imprimir os anéis em resina. Uma vez que as tecnologias de manufatura aditiva disponíveis no CMEMS durante a realização do trabalho eram FDM e SLA, considerou-se as propriedades previamente estudadas no Capítulo 2.2. e entendeu-se que se iria iniciar o trabalho com o desenho dos suportes, para tal, utilizou-se a tecnologia FDM com a qual se determinou a geometria e, após ter a geometria dos suportes determinada, imprimiu-se os anéis com resina recorrendo a SLA. Considerou-se que o Anel\_Pedra seria mais difícil de suportar durante a impressão do que o Anel\_Esmalte devido às suas diferenças geométricas, utilizou-se então o Anel\_Pedra como referência.

Tendo as ceras dos anéis, recorreu-se à ASP – Joias de Autor[128] que realizou a fundição, após a realização da mesma aplicou-se os processos de acabamento superficial, chegando-se assim ao resultado pretendido.

Tanto após a impressão como após a fundição analisou-se o resultado de ambos os processos e identificou-se alguns erros/defeitos/diferenças relativas ao que tinha sido desenhado originalmente, nos quais se procurou identificar causas e oportunidades.

#### 4.1. DESENVOLVIMENTO DOS SUPORTES COM FDM

Como supradito, o foco na impressão em FDM foi conceber uma geometria de suporte para depois de imprimir os anéis. Utilizou-se o programa UltiMaker Cura[129] onde se fez o *slicing* dos modelos, adaptou-se os mesmos à impressora e estudou-se alguns dos parâmetros de modo a melhorar a qualidade da impressão. Toda a impressão em FDM foi realizada com filamento PLA.

Inicialmente utilizou-se a impressora Anycubic 4Max[130], no entanto houve algumas dificuldades devido a problemas técnicos com a impressora. A base apresentava um certo grau de desgaste e o eixo-z da máquina não estava devidamente acertado, isto dificultou na adesão da impressão à base, mas também à adesão entre camadas. Para resolver este problema tomaram-se as seguintes medidas: criou-se um *brim* (Fig. 125) que é um acrescento de polímero à volta de primeira camada de impressão que ajuda na adesão à base com um gasto mínimo de polímero; limpou-se a base com álcool; diminuiu-se o arrefecimento da impressão de 50% para 30%, fazendo com que cada camada demorasse mais tempo a arrefecer e aderisse mais facilmente à camada anterior. Outra possível solução seria reduzir a *layer height* (altura da camada) que é o movimento no eixo-Z realizado pelo bocal antes de imprimir a próxima camada, no entanto esta solução seria menos ideal pois iria afectar a altura da impressão e deformar a sua forma que era exactamente aquilo que se estava a conceber.

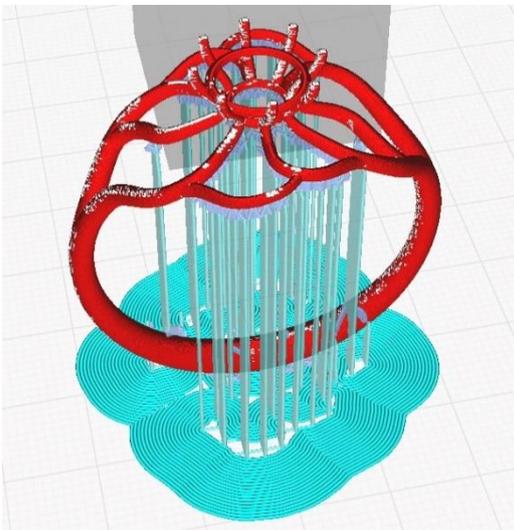


Figura 123 - Anel no Cura (brim em azul)

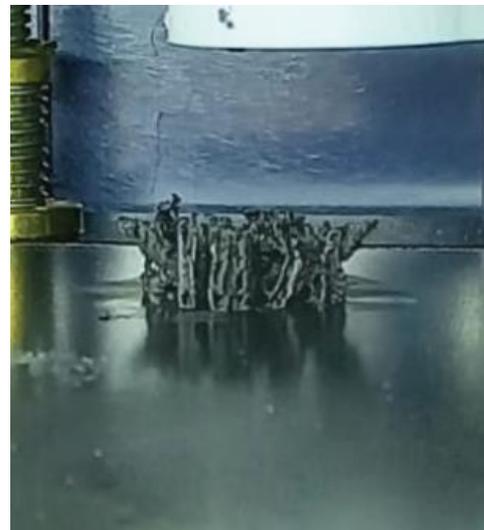


Figura 124 - Impressão falhada

Devido a estas dificuldades, e por uma questão de praticidade e de gestão de tempo, optou-se por imprimir noutra máquina, uma Anyucubic i3 Mega S/Pro[131], desta vez as impressões foram bem-sucedidas e permitiram uma análise dos resultados.

Inicialmente procurou-se experimentar a inclinação e a possibilidade de cortar a peça, concluiu-se que são irrelevantes pois não reduzem necessariamente a quantidade de suporte e acrescentavam outras dificuldades. Simultaneamente reparou-se que, ao ter a peça inclinada, o *z-seam* da mesma também terá essa inclinação em vez de ter a mesma orientação que a peça, resultando numa textura desalinhada algo que poderia dificultar o acabamento. Outra dificuldade é que a zona que entra em contacto com o suporte fica sempre com um acabamento pior do que as zonas sem suporte, estando a peça inclinada há um lado da mesma que entra em contacto com o suporte muito mais do que o outro, causando, outra vez, uma assimetria superficial ao longo da peça que poderia dificultar o acabamento.

Simultaneamente, experimentou-se separar a peça em diferentes partes, no entanto reparou-se que as zonas mais indicadas para separar a peça são as que menos necessitam de suporte, logo, não há nenhum benefício em fazê-lo. Para além disto, o trabalho minucioso que seria necessário para depois unir a peça faz com que o corte da mesma não compense, sendo o que se separou foram as garras do resto do corpo.

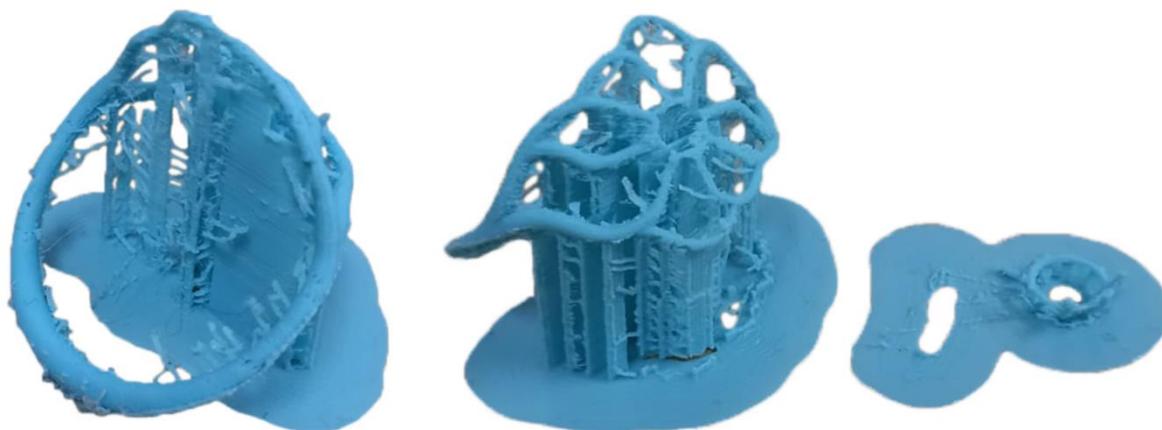


Figura 125 - Impressão com o anel inclinado e as garras impressas separadamente

Simultaneamente, experimentou-se diferentes percentagens de densidade de suporte (entre 20% e 30%) tanto com suporte em linhas e grelha. O suporte em grelha mostrou-se como sendo o melhor, tanto a 20% como a 30% o anel foi impresso, já em linha só foi possível imprimir o anel com 30% de

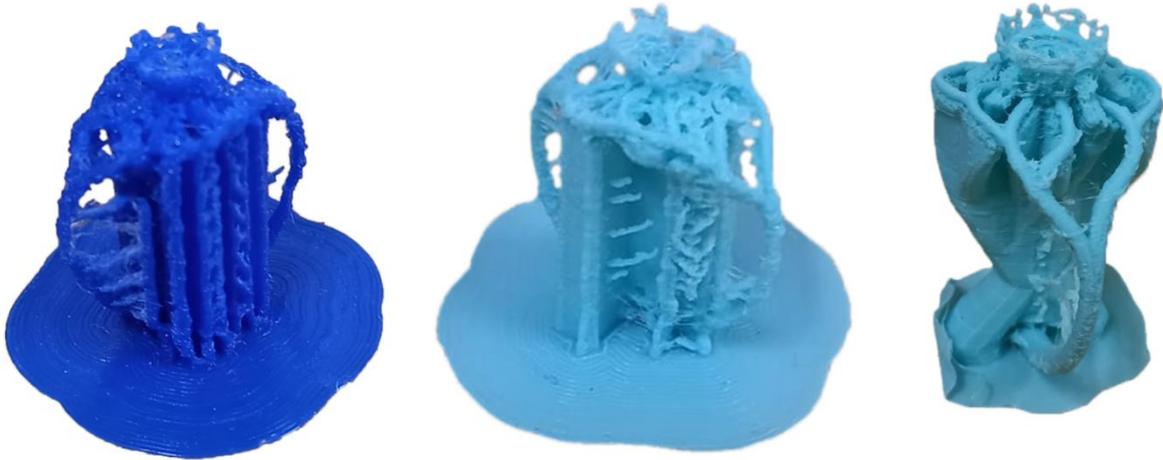


Figura 126 - Suportes automáticos

Chegou-se à conclusão de que, independentemente do tipo de suporte, a dificuldade é sempre em remover o suporte da zona do anel que assenta em cima do dedo (Fig. 128). Esta zona no anel tem espessuras bastante reduzidas, o mínimo sendo 0,6 mm, sendo uma zona relativamente frágil, no entanto, é a zona que mais necessita de suporte devido à sua geometria. Sendo assim, concluiu-se que o principal objetivo seria criar um suporte que apoiasse esta zona, mas fosse fácil de remover.

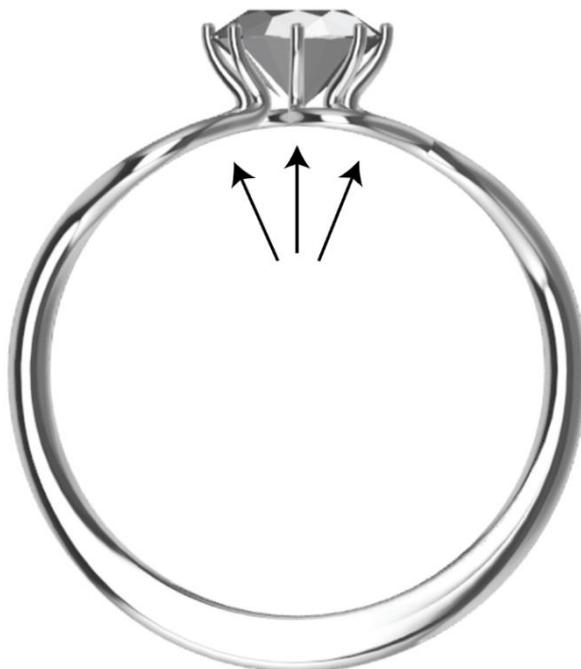


Figura 127 - Zona de maior necessidade de suporte

Decidiu-se experimentar com a criação manual de suportes. Inicialmente, criou-se uma base que fosse uma espécie de ponte por cima da zona inferior do anel e suportasse as zonas superiores com suportes semelhantes aos previamente estudados. O benefício desta solução é que o suporte não interage com a zona inferior do anel, visto que esta zona não necessita de suporte, no entanto continua com o mesmo problema das tentativas anteriores que é a difícil de remoção dos suportes nas zonas superiores. Ao mesmo tempo, embora a ideia da ponte fosse interessante, considerou-se que a sua forma presente nesta solução era muito robusta, na qual se iria gastar muito material ao imprimir.



Figura 128 - Primeira tentativa de suporte manual

Experimentou-se então com outro suporte manual, desta vez o foco foi reduzir o material utilizado na ponte, mantendo o mínimo de integridade física de modo que conseguisse suportar os suportes. Para tal, aumentou-se a largura desta ponte de modo que houvesse área suficiente em cima para os suportes da zona superior do anel, também se criaram linhas transversais para suportar a zona superior do anel. Foi-se trabalhando nesta ideia, variando o número de linhas de suporte e a forma da ponte.



Figura 129 - Suportes manuais

Eventualmente, achou-se que seria interessante experimentar pinos cónicos de apoio em vez de linhas transversais, a ideia sendo que os pinos seriam mais fáceis de remover do que as linhas.



Figura 131 - Impressão com o suporte final

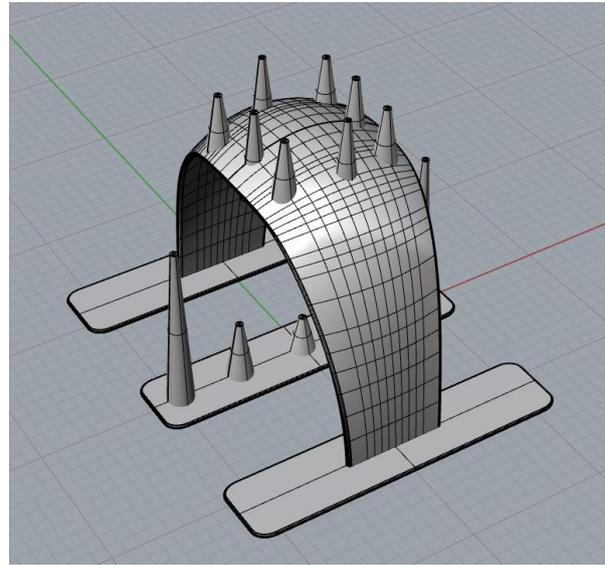


Figura 130 - Modelação do suporte final

Uma questão que se tinha ignorado até agora era a zona inferior do anel que, embora não necessite de suporte para ser impressa, a não utilização de suporte na mesma resulta nesta mesma zona ser facetada de modo a ser utilizada como base de impressão, fenómeno este visível na Fig. 133.

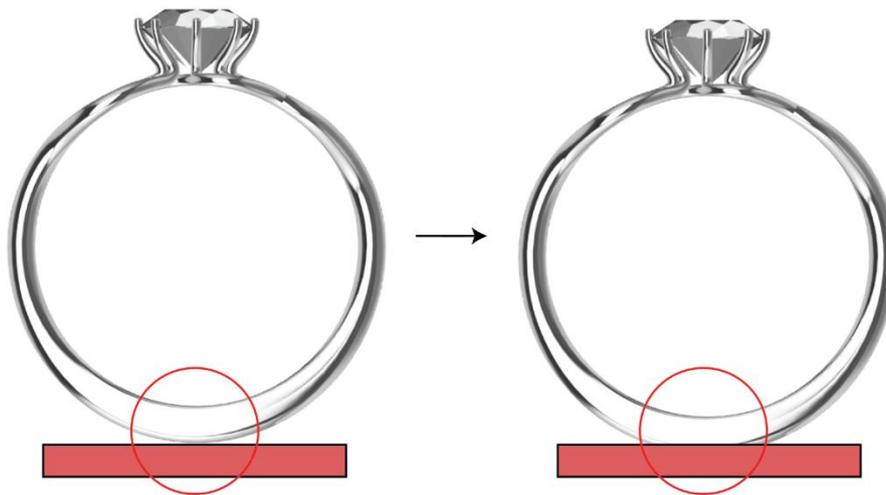


Figura 132 - Diferença entre a impressão projetada (esquerda) e a real (direita)

Concluiu-se que este método de suporte fosse o ideal a ser utilizado na impressão final dos anéis e começou-se a trabalhar em SLA.

## 4.2. IMPRESSÃO DOS MODELOS COM SLA E ANÁLISE

Realizou-se a impressão em SLA com a impressora DigitalWax 008J[132] e a resina DC 550[133]. Utilizou-se o Materialise Magics para fazer o *slicing* e o programa DigitalWax File Generator que converte os ficheiros .slc criados do Magics em ficheiros .dwg, realizando o *hatching*, permitindo que o *firmware* da máquina entenda. Após a impressão, decidiu-se analisar os modelos em resina, comparando-os aos modelos tridimensionais no que toca a certas medidas importantes. Para tal, utilizou-se um microscópio Leica EZ4HD que permitiu que se tirassem medidas.

Como explorado anteriormente no Capítulo 2.2., a tecnologia SLA tem um grau de precisão dimensional bastante superior – e, conseqüentemente, um acabamento superficial bastante superior – ao FDM, sendo que permite a análise dos modelos à escala real, possibilitando assim a tomada de decisões respetivas aos mesmos.

No que toca ao Anel\_Esmalte, como supradito, entendeu-se que seria interessante produzir duas versões, uma com os desenhos dos veios salientes (Fig. 135) e a outra com os desenhos côncavos (Fig. 1). Reparou-se que as impressões têm espessuras de veios diferentes e decidiu-se analisar esta diferença. Achou-se este aumento de espessura dos veios interessante pelo que se decidiu fundir ambas as versões.



Figura 134 - Impressão do Anel\_Esmalte, (desenhos salientes)



Figura 133 - Impressão do Anel\_Esmalte, (desenhos côncavos)

Para analisar esta variação utilizou-se três medidas no veio principal como referência – sendo que as medidas originais eram de 0,4mm, 0,35mm e 0,27mm. O anel com os desenhos salientes (Fig. 136) apresenta um aumento significativo nas espessuras dos veios, sendo que os veios impressos apresentam espessuras 2,5 vezes maior que as medidas originais.

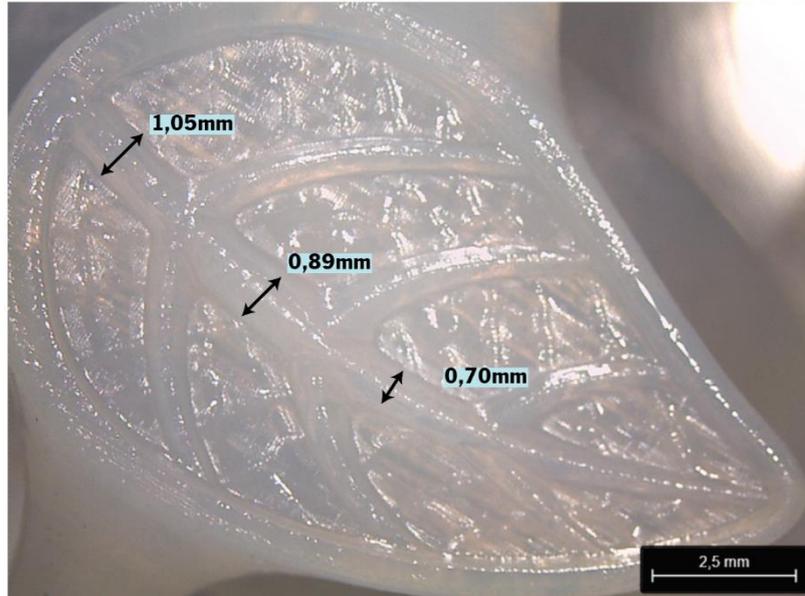


Figura 135 - Medidas do Anel\_Esmalte (desenhos salientes)

Por outro lado, na versão que tem os desenhos côncavos (Fig. 137) verificou-se que as medidas são quase idênticas à modelação, no entanto os veios mais finos de 0,1mm são quase invisíveis.

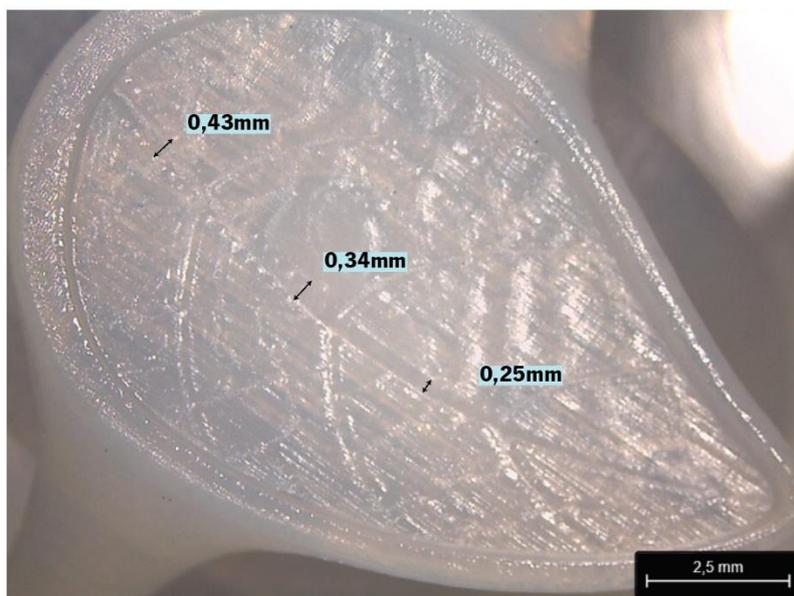


Figura 136 - Medidas do Anel\_Esmalte (desenhos côncavos)

Relativo ao Anel\_Pedra, tinha-se compreendido que a melhor opção seria produzir o anel sem argola (Capítulo 3.4.). No entanto, já que se iria produzir duas versões do Anel\_Esmalte decidiu-se fazer o mesmo com o Anel\_Pedra e imprimiu-se uma versão sem argola e outra com argola.



Figura 137 - Impressão de Anel\_Pedra sem argola



Figura 138 - Impressão do Anel\_Pedra com argola

Analisou-se as duas impressões e mediu-se os diâmetros internos das garras (5,75mm na modelação). Verificou-se que na versão sem argola (Fig. 140) a distância entre as garras não era sempre a mesma. Acredita-se que este fenómeno se deva à falta de estabilidade que a geometria sem a argola tem.

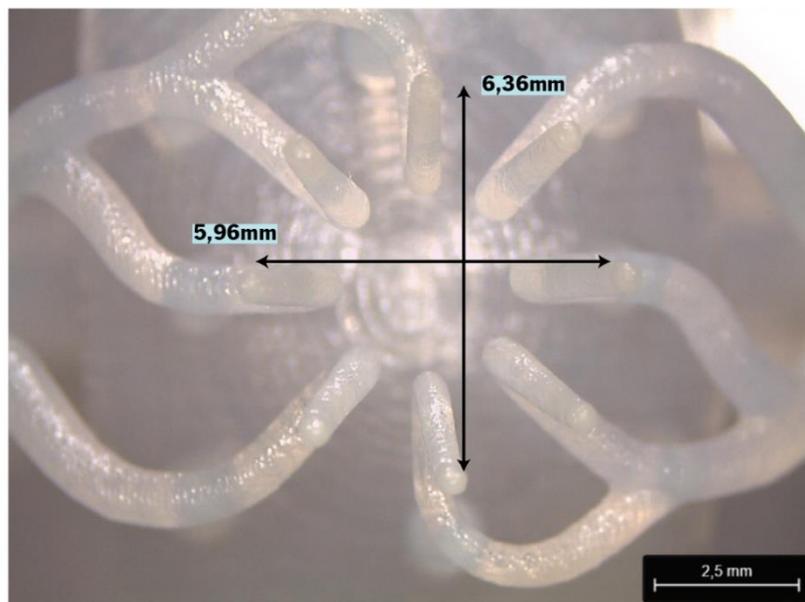


Figura 139 - Medidas do Anel\_Pedra sem argola

Já a versão com argola (Fig. 141) teve resultados mais precisos com um diâmetro interno muito aproximado da modelação

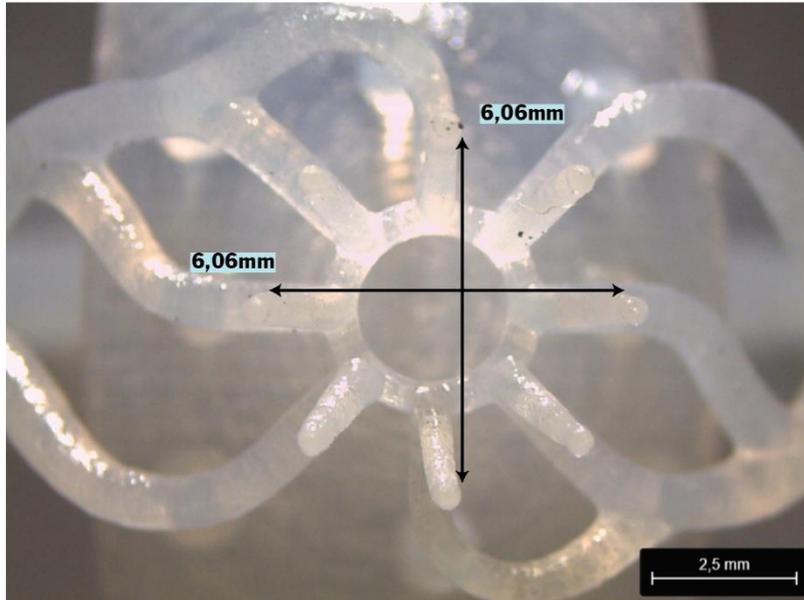


Figura 140 - Medidas do Anel\_Perda com argola

Estando realizada a impressão dos anéis, procedeu-se para a fundição.

### 4.3. FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA DOS ANÉIS

A produção dos anéis foi realizada recorrendo ao serviço da ASP – Joias de Autor[128], como o serviço foi realizado pela empresa os parâmetros do procedimento foram deixados a critério da empresa.

Realizou-se então a fundição por cera perdida com recurso a uma máquina de vácuo, seguem-se os passos realizados:

- As diferentes peças em resina foram juntas através de jitos a uma estrutura de modo a formar a árvore;

- Misturou-se pó de gesso com água e utilizou-se a máquina de vácuo na mistura;

- Colocou-se a árvore dentro de um cilindro metálico. Este cilindro tem furos, auxiliares do vácuo, que foram tapados com fita cola;

- Verteu-se o gesso para dentro do cilindro, utilizou-se a máquina de vácuo no cilindro. Passado algum tempo o gesso solidificou, tornando-se no molde/revestimento;

- Colocou-se o cilindro no forno, iniciou-se um processo de aquecimento onde se aqueceu o forno durante 1 hora até uma temperatura desejada e manteve-se essa temperatura durante 1 hora, repetiu-se este processo para todas as temperaturas pretendidas, sendo estas: 150°C; 300°C; 450°C; 750°C. Por volta dos 450°C a árvore derreteu, restando assim as concavidades no molde;

- Derreteu-se o metal;

- Tirou-se o cilindro do forno e colocou-se na máquina de vácuo;

- Verteu-se o metal para dentro do molde e utilizou-se a o vácuo para auxiliar no preenchimento do molde e na remoção do ar do seu interior;

- Removeu-se o cilindro e deixou-se arrefecer durante 20/30 minutos à temperatura ambiente;

- Removeu-se a árvore do cilindro e do molde e cortou-se as peças;

- Utilizou-se uma pistola de água para limpar as peças;

- Colocou-se as peças no branqueamento para remover quais queres impurezas ainda existentes;

Seguem-se imagens da fundição.



Figura 141 - Criação da árvore



Figura 142 - Colocação do molde no forno



Figura 143 - Fundição do metal



Figura 144 - Colocação do molde no vácuo



Figura 145 - Vazamento do metal no molde

De seguida, analisou-se os resultados da fundição.

#### 4.3.1. ANÁLISE DOS ANÉIS ANTES DO ACABAMENTO

Em geral, a geometria dos anéis era muito próxima da geometria das ceras.

Como é visível nas Figuras 147 e 148, ambas as versões do Anel\_Pedra fundiram corretamente, sendo que os únicos defeitos devem-se a algumas partes dos suportes não terem sido completamente removidas antes da fundição. Estes erros não são problemáticos pois resultam em matéria em excesso que é facilmente removida utilizando os processos de acabamento superficial, no entanto, idealmente, ter-se-ia mais atenção ao remover os suportes antes de se fundir.



Figura 146 - Anel\_Pedra com argola após a fundição



Figura 147 - Anel\_Pedra sem argola após a fundição

No entanto, ambas as versões do Anel\_Esmalte revelam defeitos mais graves. Olhando para as Fig. 149 3 150, é visível que os defeitos são: excesso de material na face inferior; e falta de material em algumas superfícies na face superior.

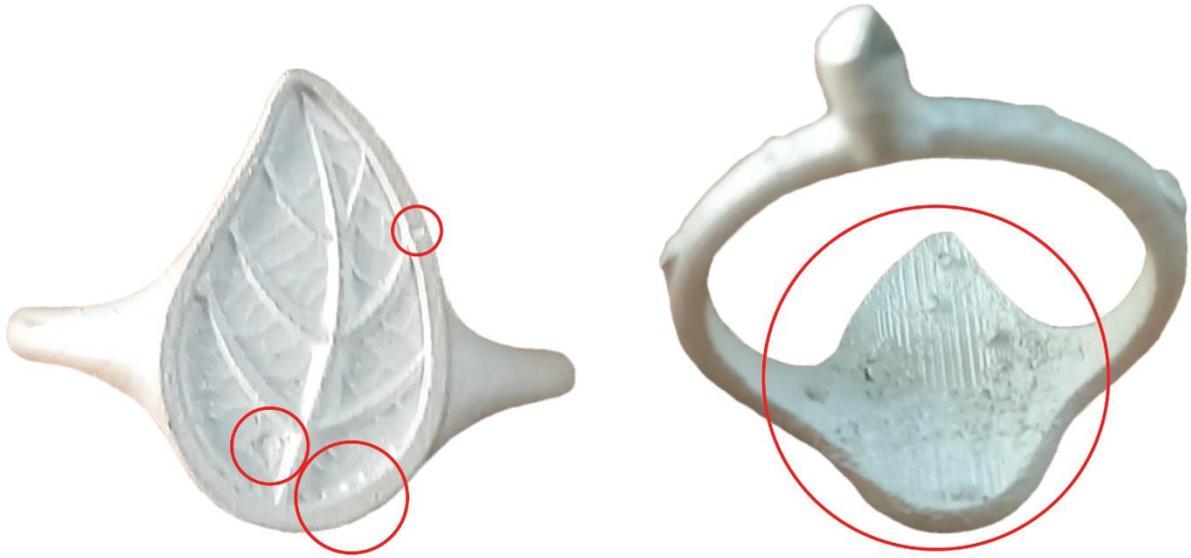


Figura 148 - Anel\_Esmalte (desenhos salientes) após fundição

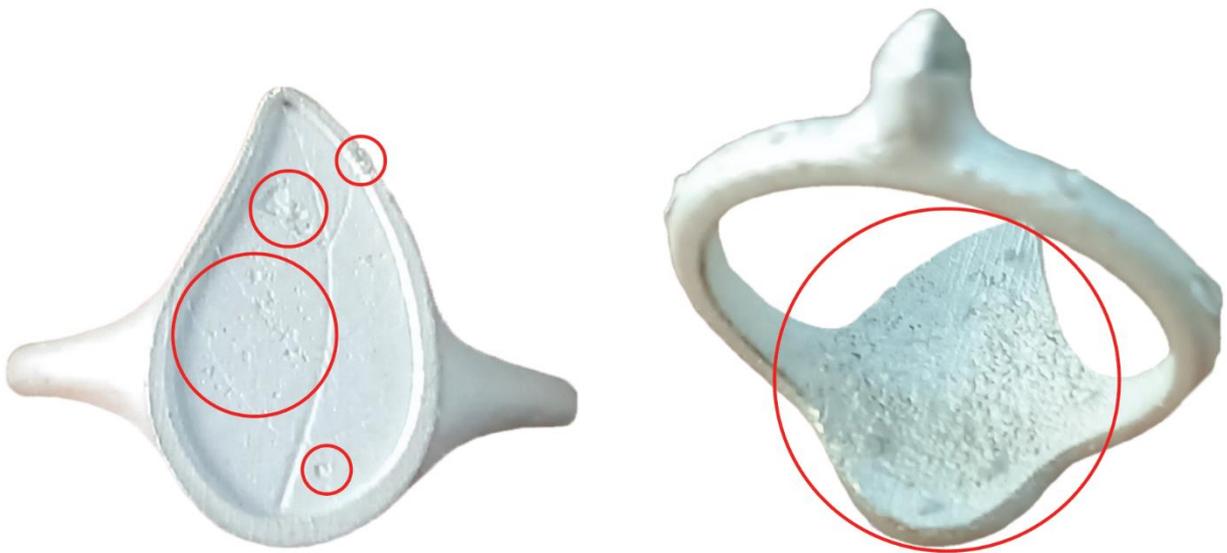


Figura 149 - Anel\_Esmalte (desenhos côncavos) após fundição

No que toca à face inferior, era nesta zona onde os pinos suportavam o anel, sendo assim normal que haja alguns defeitos relativos a estes mesmos, no entanto estes defeitos também se podem dever à uma má queima da resina. Para além disto existem linhas verticais que se poderão dever a alguma contração que tenha acontecido no arrefecimento.

No que toca à face superior, devido à diferença superficial entre as partes corretamente fundidas e as defeituosas, acredita-se que seja um caso de porosidade superficial, mais uma vez, resultante de contração. Esta hipótese faz ainda mais sentido quando se considera que boa parte da massa do anel está centrada na zona superior (na folha) e, portanto, que o anel estaria propício a que isto acontecesse.

Em ambos casos, também é possível que a causa dos defeitos seja outra questão como o armazenamento correto dos materiais; a inclinação do molde aquando do vazamento; e o cumprimento da temperatura adequada de vazamento, entre outros. No entanto, como não se teve controlo sobre estes parâmetros, não é possível verificar se algum se aplica.

Assumindo que o defeito deve-se efetivamente à contração, e que uma das soluções abordadas no Capítulo 2.1.3. é a conceção de um jito adequado, concebeu-se o jito visível na Fig. 151, devendo este ser usado aquando da fundição, em conjunto com o normal para reduzir o impacto da contração.

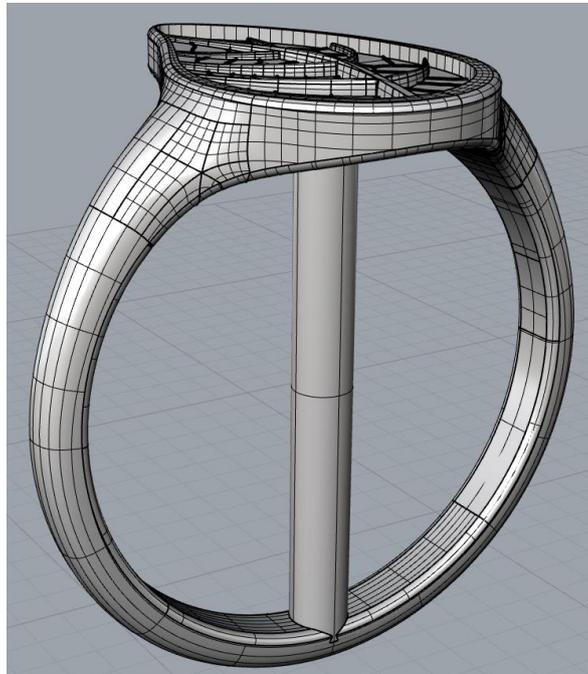


Figura 150 - Jito concebido de modo a reduzir os defeitos de fundição

Foi possível realizar-se uma nova fundição onde se experimentou a alteração no gito proposta no Capítulo 4.3.1. Como visível nas Fig. 167 e 168, continuaram a existir defeitos semelhantes aos anteriores. Conclui-se então que os defeitos não são contração e que se poderão dever a alguma incompatibilidade entre a resina utilizada e o gesso utilizado.



Figura 151 - Novos Anel\_Esmalte (desenhos salientes) após fundição

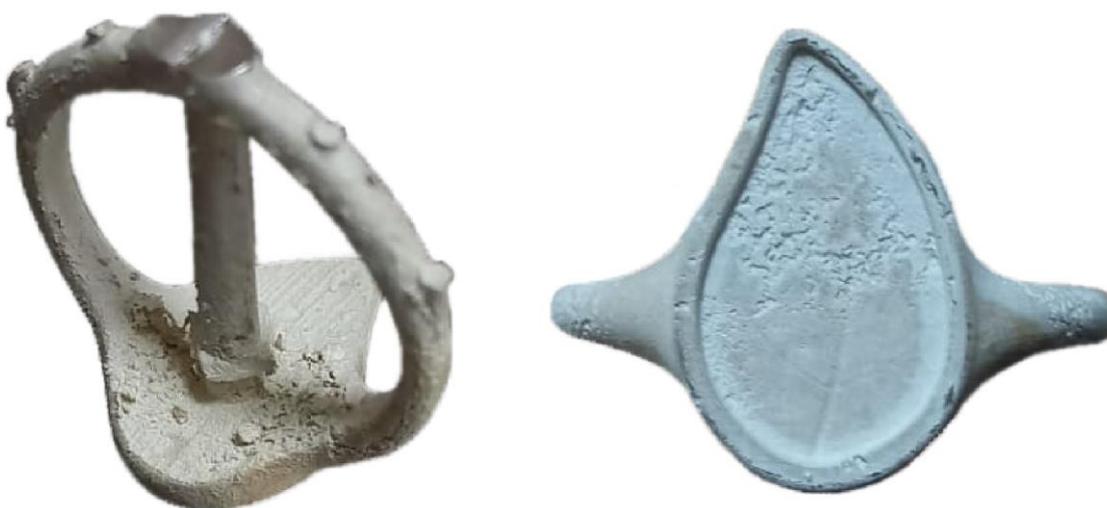


Figura 152 - Novos Anel\_Esmalte (desenhos côncavos) após fundição

Estando realizada a análise, seguiu-se para o acabamento superficial.

#### 4.3.2. ACABAMENTO SUPERFICIAL

Seguem-se imagens referentes ao acabamento superficial. Embora este passo tenha sido realizado imediatamente após a fundição e antes da análise, colocou-se aqui a utilização do branqueamento devido a, tradicionalmente, ser um passo que faz parte do pós-processamento.



Figura 153 - Utilização do branqueamento

De seguida utilizou-se uma máquina de agulhas para dar um acabamento superficial geral, acelerando os processos que se seguem.



Figura 154 - Utilização de uma máquina de agulhas

No seguimento do passo anterior, utilizou-se lixas num motor para remover material excessivo de um modo mais minucioso e preciso.



Figura 155 - Utilização de lixas

E utilizou-se uma polidora para dar o acabamento superficial final.



Figura 156 - Utilização de uma polidora

Finalmente, utilizou-se uma máquina de limpeza ultra-sónica para remover quaisquer gorduras resultantes do processo anterior.



Figura 157 - Utilização de limpeza ultra-sónica nos anéis

Estando realizado o acabamento dos anéis, procedeu-se para uma análise do resultado.

#### 4.3.3. ANÁLISE DOS ANÉIS APÓS O ACABAMENTO

No que toca ao Anel\_Pedra, verificou-se que ambas as versões têm medidas, geralmente, bastante próximas das impressões. No entanto, verificou-se que a versão sem argola (Fig. 157) continua com distâncias entre argolas dispares ao contrário da versão com argola (Fig. 158).

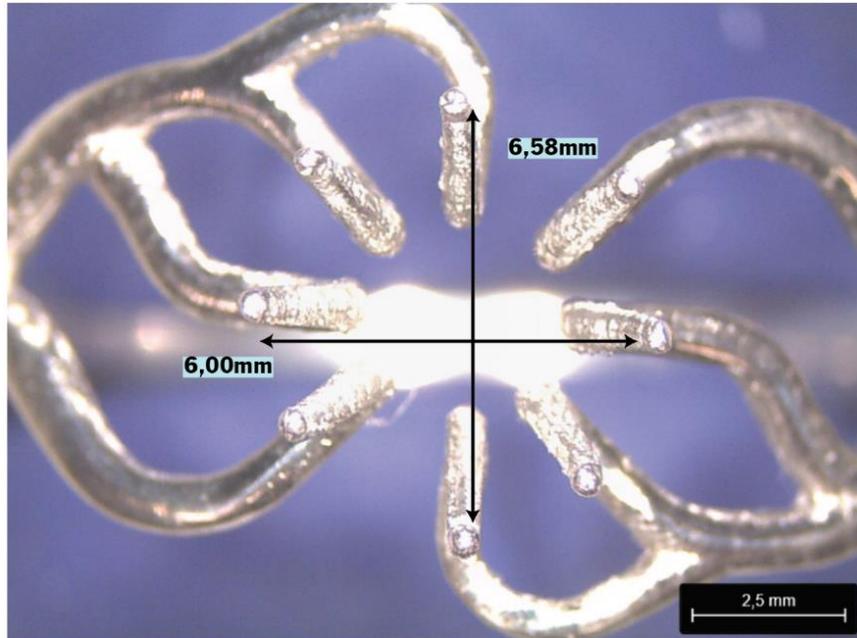


Figura 158 - Medidas do Anel\_Pedra sem argola

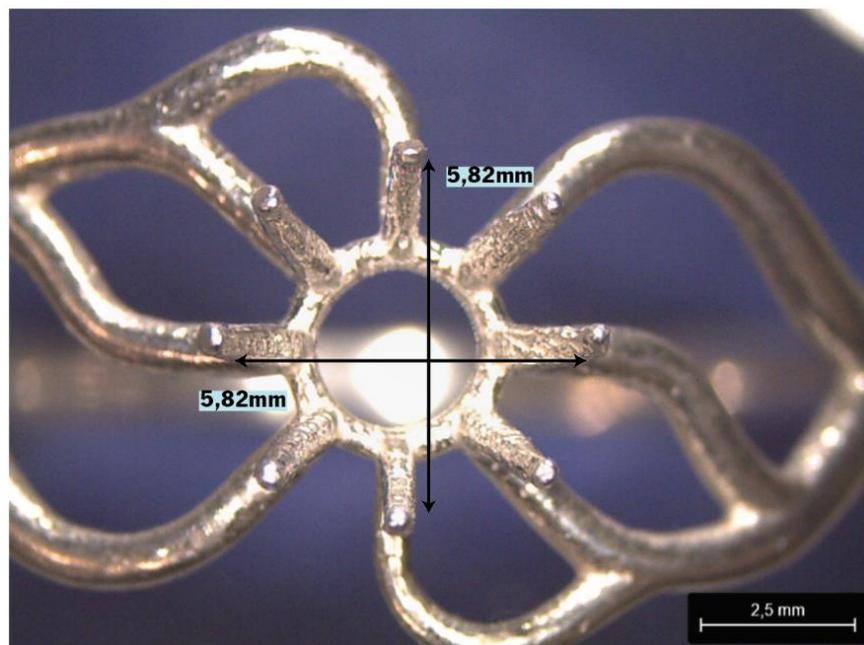


Figura 159 - Medidas do Anel\_Pedra com argola

Posteriormente, tentou-se cravar a pedra. Aplicou-se então o método que tinha sido pensado aquando das simulações (Capítulo 3.4) aonde se colocou a pedra virada ao contrário numa mesa, centrou-se o anel e forçou-se o em direção à pedra (Fig. 159). O trabalho foi todo realizado manualmente.

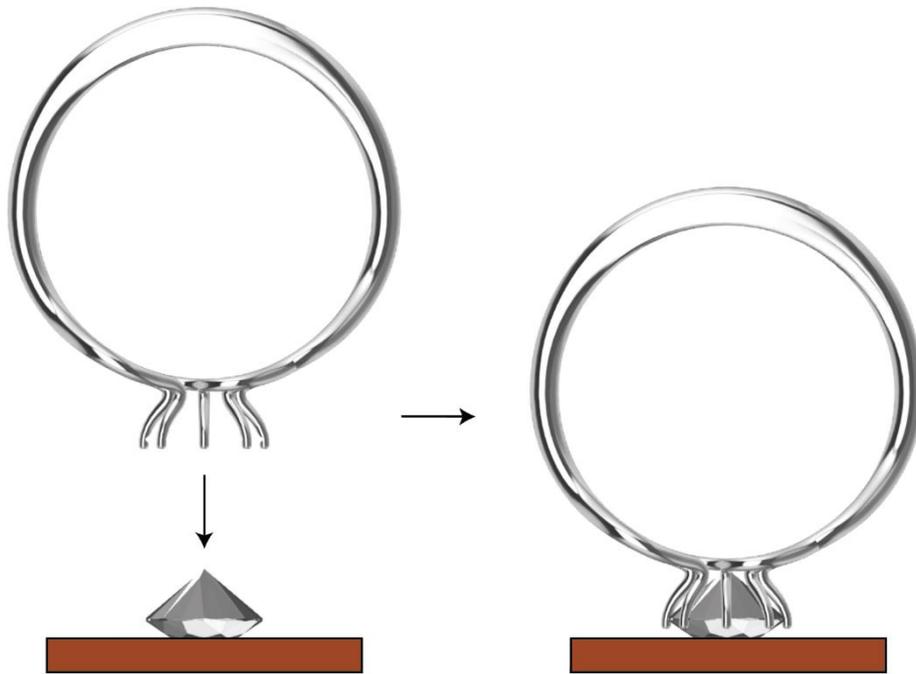


Figura 160 - Método utilizado para cravar a pedra

Verificou-se que não foi possível cravar a pedra no anel sem argola devido às garras ficarem demasiado distantes (Fig. 160). Utilizou-se um calcador e um alicate de modo a juntar as garras e cravar a pedra, mas qualquer força que se aplicasse às garras, das duas a uma: era uma força demasiado baixa que não resultava em nenhuma alteração significativa; era demasiado alta e resultava na deslocação da pedra e/ou na deformação completa do anel.

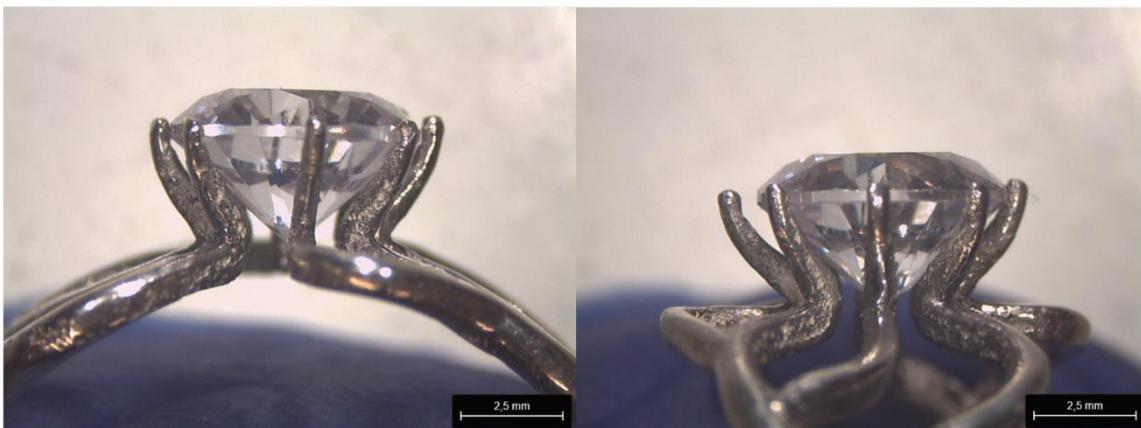


Figura 161 - Vistas do Anel\_Pedra com argola após a cravação

No que toca à versão sem argola, foi, efetivamente, possível cravar a pedra (Fig. 161). O resultado difere ligeiramente da modelação: o que sobressai à primeira vista é a cintura da pedra real ser mais alto do que da modelação da pedra que se usou como referência, sendo que a pedra real tem uma cintura com 0,35mm de altura e a que foi utilizado como referência na modelação tinha 0,15mm de altura.

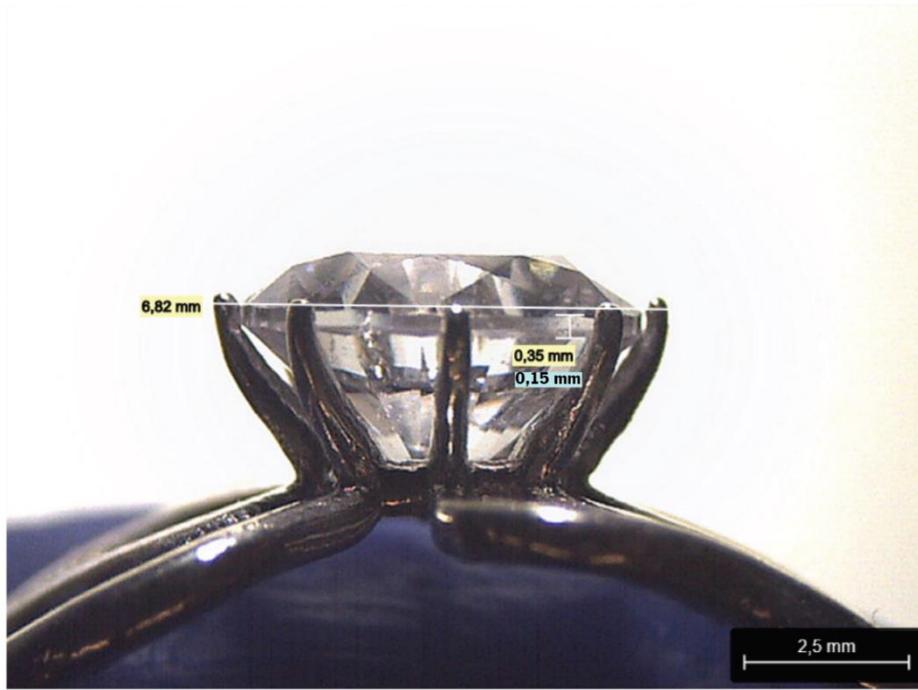


Figura 162 - Comparação de medidas da pedra

Mesmo assim, é visível que a cravação continua imperfeita, de modo que se decidiu forçar as garras com um calcador e polir a sua zona superior (Fig. 162).

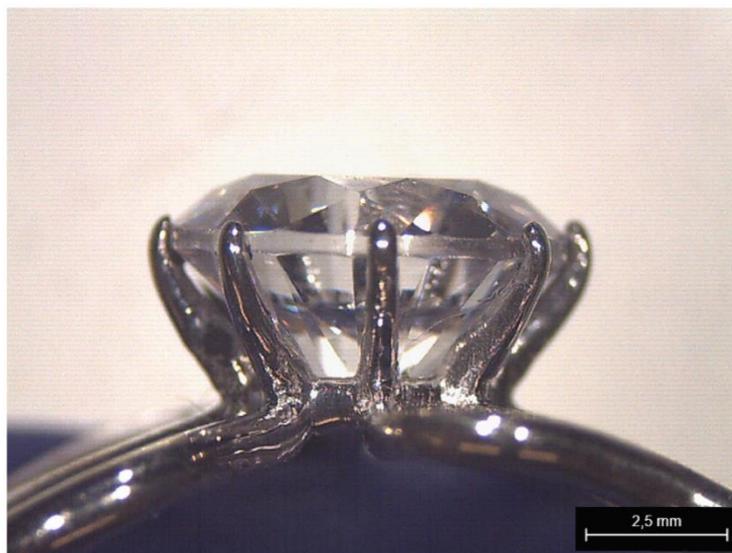


Figura 163 - Anel\_Pedra após arredondamento das garras

Relativamente às versões do Anel\_Esmalte, como se pode ver nas Fig. 163 e 164, ainda se vêm alguns dos defeitos deletados anteriormente. Isto porque qualquer processo de acabamento nesta zona tinha de ser aplicado com cuidado senão iria remover os veios mais finos.

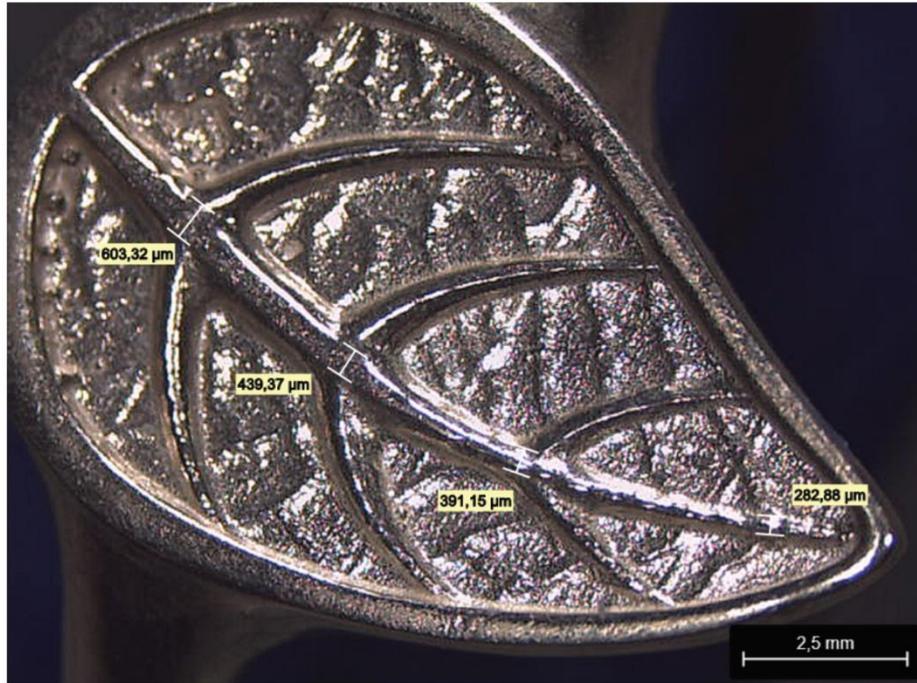


Figura 164 - Comparação de medidas do Anel\_Esmalte (desenhos salientes)

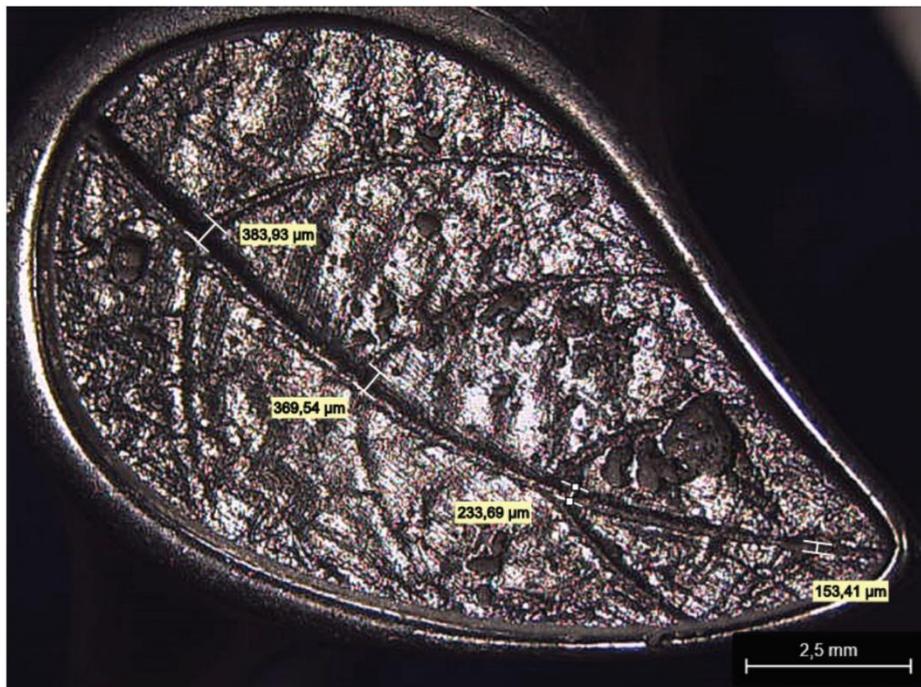


Figura 165 - Comparação de medidas do Anel\_Esmalte (desenhos côncavos)

Já na face inferior dos anéis, os defeitos que existiam originalmente são, agora, insignificantes. Isto revela que defeitos que resultam em material a mais são mais fáceis de resolver, e preferíveis, aos que removem material, e estes dois anéis são exemplos claros disso. Mesmo assim, não se quis remover demasiado material de modo a não afetar o outro lado do anel onde iria ficar o esmalte.

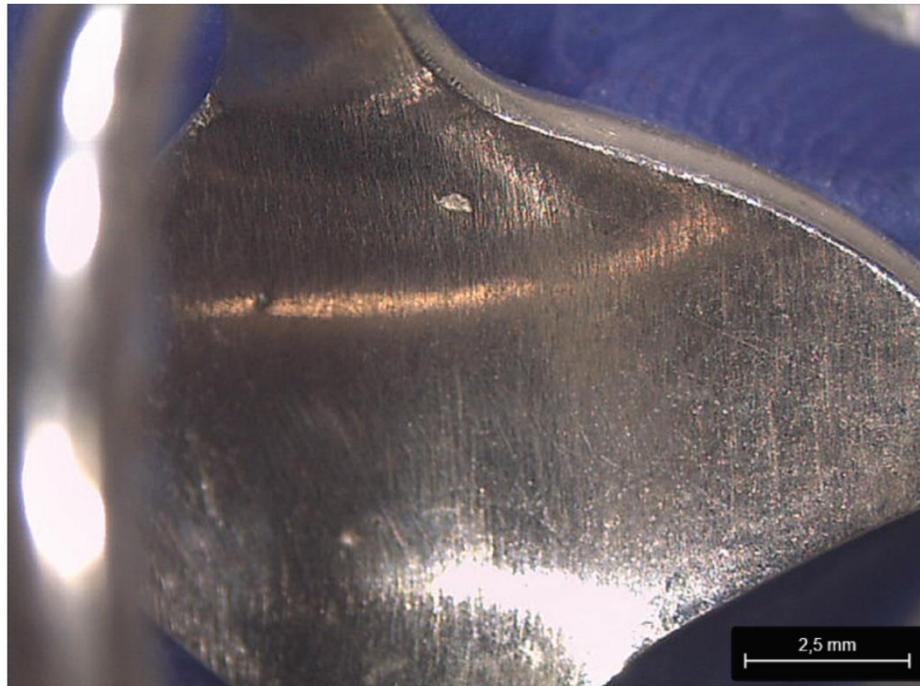


Figura 166 - Face interior do Anel\_Esmalte (desenhos salientes)

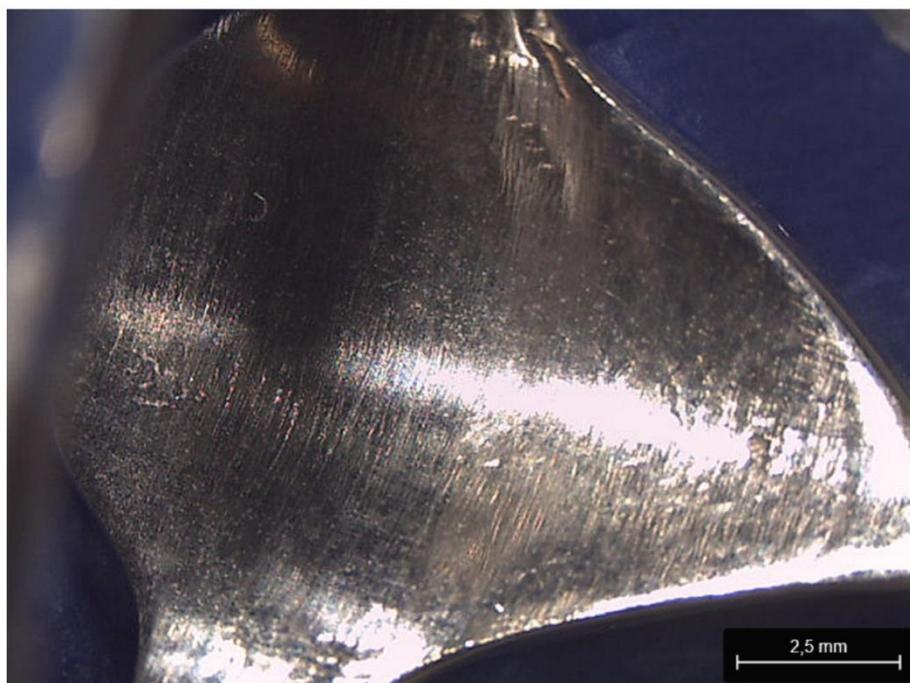


Figura 167 - Face interior do Anel\_Esmalte (desenhos côncavos)

#### 4.3.4. ANÉIS FINAIS



Figura 168 - Anel\_Pedra (argola)



Figura 169 - Anel\_Esmalte (desenhos salientes)



Figura 170 - Anel\_Esmalte (desenhos côncavos)

Devido às circunstâncias do trabalho não foi possível trabalhar com esmalte verdadeiro, sendo que se utilizou uma resina epóxi usualmente utilizada para simular esmalte[134].

## 5. CONCLUSÕES

Verifica-se que o trabalho foi bem conseguido principalmente porque se cumpriu com o propósito inicial, o de explorar os benefícios da utilização de CAD, CAM e CAE na produção de joalheria. Para além disto desenvolveram-se peças originais: um anel com um tipo de cravação novo, síntese entre a cravação com garras e por tensão que dispensa de um cravador; e anéis esmaltados que dispensam de todo o trabalho tradicionalmente associado à criação de peças com esmalte. Também se desenvolveu uma geometria de suporte que tanto pode ser utilizado para qualquer anel como qualquer impressão que, aos olhos do utilizador, tire proveito desta geometria de suporte,

Verificou-se que a utilização de CAD e CAM permite: um controlo dimensional enorme sobre as geometrias desenvolvidas; a produção de geometrias com espessuras relativamente reduzidas; a fácil exploração de diferentes ideias durante o desenvolvimento sem grande investimento em protótipos; e, em conjunto com CAE, a solução de problemas relativos ao funcionamento mecânico e à produção antes de se produzir os produtos.

O trabalho permitiu que o aluno interagisse com o ciclo de produção completo de uma jóia, desde as fases iniciais do desenvolvimento do produto até à sua produção. Também permitiu ao aluno fazer um cruzamento de disciplinas (artes e engenharias) resultando numa experiência altamente proveitosa academicamente.

### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto que a presente dissertação se baseou na realização de sínteses entre áreas/esferas aparentemente distintas (como a arte e a engenharia), acredita-se que esta dissertação serve como desafio no sentido de transcender diferenças superficiais entre áreas, determinando o desenvolvimento e produção de bons produtos como sendo a questão essencial sobre a qual as outras se vergam.

Devido ao tempo limitado estabelecido para realizar o trabalho, existe uma série de questões que ficaram por resolver que poderão servir de inspiração para trabalhos futuros, nomeadamente a variação entre as medidas desenhadas e impressas que se verificou no Capítulo 4.2. e uma eventual otimização dos suportes que se utilizou para imprimir as ceras. Idealmente, este trabalho também teria sido realizado com um programa de simulação de fundição mais adequado, neste caso, que tivesse Prata 925.

Finalmente, acredita-se que uma análise aprofundada de comparação entre a utilização de CAD e CAM e outros métodos de produção de joalheria incluiria uma análise comparativa de custos, de

qualidade dos produtos, de tempo de produção e da capacidade de produzir diferentes produtos em diferentes quantidades. Devido aos constrangimentos, não foi possível realizar tal análise, pelo que fica ainda este desafio.

## 6. REFERÊNCIAS

1. Cooper F. Sintering and additive manufacturing: The new paradigm for the jewellery manufacturer. *Johnson Matthey Technology Review* 59 2015 233–242.
2. Muttitt LM. *Making Silver Jewellery*. .
3. Sampson Olen, Needham Ariel. *Know all about jewelry making, jewelry designing and metal working*. Academic Pages, 2012.
4. *Professional Jewelry Making* Alan Revere BRYNMORGEN PRESS. .
5. Rose AF, Cirino A. *Jewelry Making and Design*. Quarta edição New York: Dover Publications, Inc, 1967.
6. Cogswell JE. *Creative stonemasonry*. Brynmorgen Press, 2008.
7. Vitreous Enamel 101: Definition, Process, & How To Learn. <https://www.thecrucible.org/guides/enameling-6/vitreous/> (22 September 2023, date last accessed).
8. Paul DeGarmo T Black Ronald A Kohser Solutions Manual by Barney E Klamecki EJ. *Solutions Manual to Accompany MATERIALS AND PROCESS IN MANUFACTURING* Ninth Edition. 2003.
9. About Metalcasting | American Foundry Society. <https://www.afsinc.org/about-metalcasting> (15 October 2023, date last accessed).
10. Lost Wax Casting: Everything You Need to Know. <https://www.deangroup-int.co.uk/lost-wax-casting-everything-you-need-to-know/> (6 October 2023, date last accessed).
11. Feinberg W. *Lost Wax Casting - A Practitioner's Manual*. Intermediate Technology Publications Ltd., 1983.
12. Abisuga OA, Doran K, de Beer D. Study of Investment Casting Process For 3D Printed Jewellery Design. *MATEC Web of Conferences* 2022; 370: 04002.
13. Sopcak JE. *Lost Wax or Investment Casting*. Gem Guides Book Co., 1986.
14. ScholarWorks C, Matthew Marta J. *Lost-Wax Casting in Contemporary Jewelry*. .
15. Vacuum Casting vs Centrifugal - What's the Difference. <https://blog.thepipingmart.com/other/vacuum-casting-vs-centrifugal-whats-the-difference/> (22 September 2023, date last accessed).
16. Vacuum Casting VS. Centrifugal Casting – Katway. <https://www.katway.com/blogs/my-blogs/vacuum-casting-vs-centrifugal-casting> (25 December 2023, date last accessed).
17. ScholarWorks C, Matthew Marta J. *Lost-Wax Casting in Contemporary Jewelry*. .
18. Lost Wax Casting and Its Common Defects - Lost Wax Casting - Steel Casting Company | Stainless Steel Foundry | Investment Casting Foundry. <https://rinborn.com/article/lost-wax-casting-and-its-common-defects.html> (25 December 2023, date last accessed).

- 19.** Guide to Cast Top Quality Jewelry: Problems and Solutions - SuperbMelt. <https://www.superbmelt.com/guide-to-cast-top-quality-jewelry-problems-and-solutions/> (25 December 2023, date last accessed).
- 20.** Common Casting Defects and Discontinuities | Casting Services. <https://www.reliance-foundry.com/blog/casting-defects> (25 December 2023, date last accessed).
- 21.** Lohwongwatana B, Aliyu AA, Puncreobutr C. Digital Manufacturing of Precious Metals: Possibilities, Benefits, Guidelines and Limitations in Jewelry Making. 2022.
- 22.** Wannarumon S, Bohez ELJ. Rapid Prototyping and Tooling Technology in Jewelry CAD. *Comput Aided Des Appl* 2004; 1: 569–575.
- 23.** Redwood B, Schöffner F, Garret B. *The 3D Printing Handbook Technologies, design and applications*. 3D Hubs B.V., 2017.
- 24.** Zettel D, Willmann R, Nicolay P, Breikopf P. Chapter Three - Process-dependent material characteristics of DMLS-manufactured specimens. In: Kadkhodapour J, Schmauder S, Sajadi F, editors. *Quality Analysis of Additively Manufactured Metals*. Elsevier, 2023: 73–118.
- 25.** 3D Printing Jewelry – The Ultimate Guide | All3DP Pro. <https://all3dp.com/1/3d-printing-jewelry-the-ultimate-guide/> (28 December 2023, date last accessed).
- 26.** Ferreira T, Almeida HA, Campbell I, Bartolo PJ. *Additive Manufacturing and Design Strategies for Customized Jewellery Production*. .
- 27.** Additive Manufacturing in the Jewelry Scene - Ganoksin Jewelry Making Community. <https://www.ganoksin.com/article/additive-manufacturing-jewelry-scene/> (28 December 2023, date last accessed).
- 28.** Hopkinson N (Neil), Hague RJM, Dickens PM. *Rapid manufacturing : an industrial revolution for the digital age*. John Wiley, 2005.
- 29.** Leong KF, Chua CK. *Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1997.
- 30.** Dmytro V, Oleh P, Volodymyr K. VYNNYCHUK MARIIA Academy of Design and Technology (DTA) THE FEASIBILITY OF USING MODERN SOFTWARE FOR THREE-DIMENSIONAL MODELING IN THE JEWELRY INDUSTRY. .
- 31.** How to Choose the Best Jewelry Design CAD Software | Formlabs. <https://formlabs.com/eu/blog/jewelry-design-cad-software/> (28 December 2023, date last accessed).
- 32.** Top 17 of the best jewelry design software in 2023. <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-software/best-jewelry-design-software/> (28 December 2023, date last accessed).

- 33.** Jewelry CAD Software: Great Tools to 3D Design Jewelry | All3DP. <https://all3dp.com/2/jewelry-cad-software-3d-design-jewelry/> (28 December 2023, date last accessed).
- 34.** 3D Jewelry design software - 3DESIGN. <https://3design.com/en/> (28 December 2023, date last accessed).
- 35.** blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software. <https://www.blender.org/> (28 December 2023, date last accessed).
- 36.** Firestorm CAD | www3dspaceprocom. <https://www.3dspaceproinc.com/blog-ch2w> (28 December 2023, date last accessed).
- 37.** Fusion 360 | 3D CAD, CAM, CAE, & PCB Cloud-Based Software | Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (28 December 2023, date last accessed).
- 38.** Jewelry CAD Design | Jewelry CAD Dream | 3D Jewelry Design. <https://jewelrycaddream.com/> (28 December 2023, date last accessed).
- 39.** Software Maya | Obter preços e comprar o Maya 2024 oficial. <https://www.autodesk.pt/products/maya/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (28 December 2023, date last accessed).
- 40.** Modo: 3D Modeling, Animation, and Rendering Tools | Foundry. <https://www.foundry.com/products/modo> (28 December 2023, date last accessed).
- 41.** Rhino - Rhinoceros 3D - Design, Model, Present, Analyze, Realize... <https://www.rhino3d.com/> (28 December 2023, date last accessed).
- 42.** MatrixGold, 3D CAD Software for Jewelry Design | Gemvision. <https://gemvision.com/matrixgold> (28 December 2023, date last accessed).
- 43.** ZBrush. <https://www.maxon.net/en/zbrush> (28 December 2023, date last accessed).
- 44.** Tinkercad | Crie projetos digitais 3D com o CAD online. <https://www.tinkercad.com/> (28 December 2023, date last accessed).
- 45.** Software Autodesk Mudbox | Obter preços e comprar o Mudbox 2024 | Autodesk. <https://www.autodesk.pt/products/mudbox/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (28 December 2023, date last accessed).
- 46.** An Introduction to Post-Curing SLA 3D Prints | Formlabs. <https://formlabs.com/eu/blog/introduction-post-curing-sla-3d-prints/> (27 December 2023, date last accessed).
- 47.** Kim H-C, Lee S-H. Reduction of post-processing for stereolithography systems by fabrication-direction optimization. *Computer-Aided Design* 2005; 37: 711–725.

- 48.** Waheed S, Cabot JM, Macdonald NP *et al.* 3D printed microfluidic devices: Enablers and barriers. *Lab on a Chip* 16 2016 1993–2013.
- 49.** Huang YM, Kuriyama S, Jiang CP. Fundamental study and theoretical analysis in a constrained-surface stereolithography system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2004; 24: 361–369.
- 50.** Pan Y, Zhou C, Chen Y. A Fast Mask Projection Stereolithography Process for Fabricating Digital Models in Minutes. *J Manuf Sci Eng* 2012; 134.
- 51.** Han LH, Mapili G, Chen S, Roy K. Projection microfabrication of three-dimensional scaffolds for tissue engineering. *J Manuf Sci Eng* 2008; 130: 0210051–0210054.
- 52.** Huang YM, Jiang CP. On-line force monitoring of platform ascending rapid prototyping system. *J Mater Process Technol* 2005; 159: 257–264.
- 53.** Schwentenwein M, Homa J. Additive manufacturing of dense alumina ceramics. *Int J Appl Ceram Technol* 2015; 12: 1–7.
- 54.** SUNLU Standard Resin, 405nm UV luz de cura resina, SLA resina impressora 3D resina fotopolímero, LCD 3D Printing Resin, baixo encolhimento e cura rápida, resina 1000 G sólida cinzenta : Amazon.es: Industrial e Científico. [https://www.amazon.es/dp/B08Y6YF6YS/ref=asc\\_df\\_B08Y6YF6YS/?tag=ptgogshpadde-21&linkCode=df0&hvadid=633483805116&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=6816726468174132437&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmnd=&hvlocint=&hvlocphy=1011714&hvtargid=pla-1463787262268&language=pt\\_PT&mcid=adf61440c2203dec913daa32bf3dba11&th=1](https://www.amazon.es/dp/B08Y6YF6YS/ref=asc_df_B08Y6YF6YS/?tag=ptgogshpadde-21&linkCode=df0&hvadid=633483805116&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=6816726468174132437&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmnd=&hvlocint=&hvlocphy=1011714&hvtargid=pla-1463787262268&language=pt_PT&mcid=adf61440c2203dec913daa32bf3dba11&th=1) (28 December 2023, date last accessed).
- 55.** SLA - Casting 3D Printer Resin for SLA 3D Printer - Formlabs & DWS – powerresins. <https://powerresins.com/products/powercast-sla-castable-resin-sla> (28 December 2023, date last accessed).
- 56.** MoonRay S Castable Resin | MatterHackers. <https://www.matterhackers.com/store/3d-printer-resins/moonray-s-castable-resin> (28 December 2023, date last accessed).
- 57.** VisiJet® FTX Cast - Protocom s.r.o. <http://www.protocom3dp.com/visijet-ftx-cast> (28 December 2023, date last accessed).
- 58.** DC100 Casting Resin - 3D Compare Materials. <https://3dcompare.com/materials/product/dc100-casting-resin/> (28 December 2023, date last accessed).
- 59.** Accura CastPro (SLA) | 3D Systems. <https://www.3dsystems.com/materials/accura-castpro> (28 December 2023, date last accessed).

- 60.** What's the right resin for SLA? 3D printing materials compared | Hubs. <https://www.hubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared/> (28 December 2023, date last accessed).
- 61.** Eliminating Ash Residue Defects - Ganoksin Jewelry Making Community. <https://www.ganoksin.com/article/eliminating-ash-residue-defects/> (28 December 2023, date last accessed).
- 62.** Mallikarjuna B, Bhargav P, Hiremath S, Jayachristiyan KG, Jayanth N. A review on the melt extrusion-based fused deposition modeling (FDM): background, materials, process parameters and military applications. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 2023.
- 63.** Jayanth N, Jaswanthraj K, Sandeep S, Mallaya NH, Siddharth SR. Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA. *J Mech Behav Biomed Mater* 2021; 123: 104764.
- 64.** Liu Z, Wang Y, Wu B, Cui C, Guo Y, Yan C. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102 2019 2877–2889.
- 65.** Reddy Bathula IrS. 3D Printing for Foot. *MOJ Proteom Bioinform* 2017; 5.
- 66.** Krajangsawasdi N, Blok LG, Hamerton I, Longana ML, Woods BKS, Ivanov DS. Fused deposition modelling of fibre reinforced polymer composites: A parametric review. *Journal of Composites Science* 5 2021.
- 67.** Ayrilmis N. Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament. *Polym Test* 2018; 71: 163–166.
- 68.** Buj-Corral I, Bagheri A, Dominguez-Fernández A, Casado-López R. Influence of infill and nozzle diameter on porosity of FDM printed parts with rectilinear grid pattern. *Procedia Manuf* 2019; 41: 288–295.
- 69.** Venuvinod PK, Ma W. *Rapid Prototyping*. Boston, MA: Springer US, 2004.
- 70.** Jiang S, Liao G, Xu D *et al*. Mechanical properties analysis of polyetherimide parts fabricated by fused deposition modeling. *High Perform Polym* 2019; 31: 97–106.
- 71.** Dave HK, Patadiya NH, Prajapati AR, Rajpurohit SR. Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed poly-lactic acid part. *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci* 2019; 235: 1811–1827.
- 72.** Kumar P, Ahuja I, Singh R. Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting - A review. *Int J of Materials Engineering Innovation* 2012; 3: 204–227.
- 73.** Kristiawan RB, Imaduddin F, Ariawan D, Ubaidillah, Arifin Z. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering* 11 2021 639–649.

- 74.** Shah V, Kumar R, Chohan JS. A Review on surface enhancement approaches for thermoplastics developed through Fused Deposition Modeling. .
- 75.** Ramu M, Ananthasubramanian M, Kumaresan T, Gandhinathan R, Jothi S. Optimization of the configuration of porous bone scaffolds made of Polyamide/Hydroxyapatite composites using Selective Laser Sintering for tissue engineering applications. *Biomed Mater Eng* 2018; 29: 739–755.
- 76.** Daminabo SC, Goel S, Grammatikos SA, Nezhad HY, Thakur VK. Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems. *Mater Today Chem* 2020; 16: 100248.
- 77.** Azevedo ÁFM. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. 2003.
- 78.** Basic Concepts of Analysis - 2021 - SOLIDWORKS Help. [https://help.solidworks.com/2021/english/SolidWorks/cworks/c\\_Basic\\_Concepts\\_of\\_Analysis.htm](https://help.solidworks.com/2021/english/SolidWorks/cworks/c_Basic_Concepts_of_Analysis.htm) (31 December 2023, date last accessed).
- 79.** Seshu P. Textbook of finite element analysis. Prentice Hall, 2003.
- 80.** Kittur MG, Huston RL. Mesh Refinement in Finite Element Analysis by Minimization of the Stiffness Matrix Trace. 1989.
- 81.** Staten ML, Jones NL. Engineering Computers Local Refinement of Three-Dimensional Finite Element Meshes. Debye, 1997.
- 82.** Adaptive Methods - 2021 - SOLIDWORKS Help. [https://help.solidworks.com/2021/english/SolidWorks/cworks/c\\_adaptive\\_methods.htm](https://help.solidworks.com/2021/english/SolidWorks/cworks/c_adaptive_methods.htm) (2 January 2024, date last accessed).
- 83.** Linear Static Analysis - 2021 - SOLIDWORKS Help. [https://help.solidworks.com/2021/english/SolidWorks/cworks/c\\_Linear\\_Static\\_Analysis.htm?id=fde35cba903c4b909968136dbe6b4b23#Pg0](https://help.solidworks.com/2021/english/SolidWorks/cworks/c_Linear_Static_Analysis.htm?id=fde35cba903c4b909968136dbe6b4b23#Pg0) (14 October 2023, date last accessed).
- 84.** Sang D, Jones G, Chadha G, Woodside R. Cambridge International AS and A Level Physics Coursebook. Second Edition University Printing House, 2014.
- 85.** ESTIG-Mecânica Aplicada 2 Introdução à Mecânica dos Materiais Introdução à Mecânica dos Materiais. .
- 86.** Hooke R. De Potentia Restitutiva, or of Spring. Explaining the Power of Springing Bodies. London, 1678.
- 87.** Global Jewelry Market Size, Trends, Share, Forecast To 2030. <https://www.custommarketinsights.com/report/jewelry-market/> (22 September 2023, date last accessed).

- 88.** Jewelry - Europe | Statista Market Forecast. <https://www.statista.com/outlook/cmo/accessories/watches-jewelry/jewelry/europe> (22 September 2023, date last accessed).
- 89.** The European Jewelry market: Digital tools shaping the purchasing experience | Apviz.io. <https://apviz.io/blog/european-jewelry-market/> (22 September 2023, date last accessed).
- 90.** Five Reasons Behind Cartier's Enduring Success | Watchonista. <https://www.watchonista.com/articles/interviews/five-reasons-behind-cartiers-enduring-success> (22 September 2023, date last accessed).
- 91.** Pandora PT | Promoção: 1 pulseira + 2 contas por 99€. <https://pt.pandora.net/> (27 December 2023, date last accessed).
- 92.** Custom Jewelry | Design Your Own Jewelry | CustomMade.com. <https://www.custommade.com/custom-jewelry/> (22 September 2023, date last accessed).
- 93.** AORP. <https://www.aorp.pt/aorp> (22 September 2023, date last accessed).
- 94.** World's Oldest Gold Object May Have Just Been Unearthed in Bulgaria | Smart News | Smithsonian Magazine. <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/oldest-gold-object-unearthed-bulgaria-180960093/> (22 September 2023, date last accessed).
- 95.** Mystery of the Varna Gold: What Caused These Ancient Societies to Disappear? | Travel | Smithsonian Magazine. <https://www.smithsonianmag.com/travel/varna-bulgaria-gold-graves-social-hierarchy-prehistoric-archaeology-smithsonian-journeys-travel-quarterly-180958733/> (22 September 2023, date last accessed).
- 96.** Leusch V, Armbruster B, Pernicka E, Slavčev V. On the Invention of Gold Metallurgy: The Gold Objects from the Varna I Cemetery (Bulgaria)—Technological Consequence and Inventive Creativity. *Cambridge Archaeological Journal* 2015; 25: 353–376.
- 97.** Ancient Jewelry – Antique Jewelry University. <https://www.langantiques.com/university/ancient-jewelry/> (29 October 2023, date last accessed).
- 98.** Egyptian Jewelry – Antique Jewelry University. <https://www.langantiques.com/university/egyptian-jewelry/> (29 October 2023, date last accessed).
- 99.** Jewelry - Egyptian, Craftsmanship, Precious Metals | Britannica. <https://www.britannica.com/art/jewelry/Egyptian> (29 October 2023, date last accessed).
- 100.** Jewelry - Etruscan, Ancient, Craftsmanship | Britannica. <https://www.britannica.com/art/jewelry/Etruscan#ref14083> (29 October 2023, date last accessed).

- 101.** Greek Jewelry – Antique Jewelry University. <https://www.langantiques.com/university/greek-jewelry/> (29 October 2023, date last accessed).
- 102.** Roman Jewelry – Antique Jewelry University. <https://www.langantiques.com/university/roman-jewelry/> (29 October 2023, date last accessed).
- 103.** Jewelry - Medieval, Craftsmanship, Adornment | Britannica. <https://www.britannica.com/art/jewelry/Middle-Ages#ref14086> (29 October 2023, date last accessed).
- 104.** Renaissance Jewelry – Antique Jewelry University. <https://www.langantiques.com/university/renaissance-jewelry/> (29 October 2023, date last accessed).
- 105.** Jewelry - Craftsmanship, Materials, Design | Britannica. <https://www.britannica.com/art/jewelry/Renaissance-to-modern> (29 October 2023, date last accessed).
- 106.** Industrialization and Jewelry, Influences of the Machine | Cooper Hewitt, Smithsonian Design Museum. <https://www.cooperhewitt.org/2018/07/12/industrialization-and-jewelry-influences-of-the-machine/> (30 October 2023, date last accessed).
- 107.** Elise Misorowski BB, Dirlam DM, Becker V *et al.* ART NOUVEAU: JEWELS AND JEWELERS. .
- 108.** Jewelry - 18th Century, Craftsmanship, Adornment | Britannica. <https://www.britannica.com/art/jewelry/18th-century> (29 October 2023, date last accessed).
- 109.** Olithica | Gem carvers, gold shapers and silversmiths. <https://olithica.com/> (15 December 2023, date last accessed).
- 110.** Moritz Glik - The Original Kaleidoscope Shaker™ Jewelry. <https://moritzglik.com/> (15 December 2023, date last accessed).
- 111.** Art Nouveau Jewelry – Antique Jewelry University. <https://www.langantiques.com/university/art-nouveau-jewelry/> (29 October 2023, date last accessed).
- 112.** Grady J. Nature and the art nouveau. *Art Bull* 1955; 37: 187–192.
- 113.** Nietzsche F, Morão A. *O Crepúsculo dos Ídolos*. Edições 70, 1985.
- 114.** Munari B, Creagh P. *Design as Art*. Penguin Books Ltd, 1971.
- 115.** Munari B, Leitão L, Bastos AF. *Fantasia*. Editorial Presença / Martins Fontes.
- 116.** Fechner GT. *Vorschule der aesthetik* (Vol. 1). Leipzig: Breitkopf & Hartel, 1876.
- 117.** Fechner GT. *Zurexperimentalen Aesthetik*. Leipzig: S. Hirzel, 1871.
- 118.** Art Nouveau Jewelry | Art Nouveau Rings | Enamel Jewelry - Antique Jewelry | Vintage Rings | Faberge EggsAntique Jewelry | Vintage Rings | Faberge Eggs. <https://romanovrussia.com/antique/antique-art-nouveau-enamel-ring/> (2 January 2024, date last accessed).

- 119.** Adobe Photoshop oficial: principal software de foto e design de IA. <https://www.adobe.com/pt/products/photoshop.html> (19 January 2024, date last accessed).
- 120.** Adobe Illustrator — Software de gráficos vetoriais líder do setor. <https://www.adobe.com/pt/products/illustrator.html> (19 January 2024, date last accessed).
- 121.** Adaptive Meshing in SOLIDWORKS Simulation. <https://hawkridgesys.com/blog/simulation-adaptive-meshing> (2 January 2024, date last accessed).
- 122.** Silver - Sterling - ESPI Metals. <https://www.espimetals.com/index.php/technical-data/81-Silver%20-%20Sterling> (15 October 2023, date last accessed).
- 123.** Quick user guide Quick user guide Quick user guide Quick user guide 2013-05-30 © Novacast Systems AB Content Content Content Content. .
- 124.** Chart - Melting Points of Metals - Fire Mountain Gems and Beads. <https://www.firemountaingems.com/resources/encyclobeadia/charts/g120> (3 January 2024, date last accessed).
- 125.** The Different Ways To Work With Silver | The Bench. <https://www.cooksongold.com/blog/learn/how-to-melt-silver-to-make-jewellery/> (3 January 2024, date last accessed).
- 126.** Hauser & Miller - Specific Gravity & Melting Point. <http://www.hauserandmiller.com/reference/melting.html> (3 January 2024, date last accessed).
- 127.** Melting Points of Metals | OnlineMetals.com®. <https://www.onlinemetals.com/en/melting-points> (3 January 2024, date last accessed).
- 128.** Home. <https://www.aspjoiasdeautor.com/> (3 January 2024, date last accessed).
- 129.** UltiMaker Cura - UltiMaker. <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/> (3 January 2024, date last accessed).
- 130.** Anycubic 4Max Pro 2.0 - High Quality Enclosed 3D Printer – ANYCUBIC-US. <https://www.anycubic.com/products/4max-pro-2-0> (29 December 2023, date last accessed).
- 131.** Anycubic i3 Mega S - Simple, Smart & High-Quality FDM 3D Printer – ANYCUBIC-US. <https://www.anycubic.com/products/anycubic-i3-mega-s> (29 December 2023, date last accessed).
- 132.** DWS DigitalWax 008J review - Industrial 3D printer. <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/dws-digitalwax-008j/> (28 December 2023, date last accessed).
- 133.** DIGITALWAX® para DWS Systems | Prospector UL. <https://www.ulprospector.com/plastics/pt/datasheet/253467/digitalwax-dc-550> (15 January 2024, date last accessed).

- 134.** Resina Epoxi | ORPHEU. <https://www.orpheu.pt/product/resina-epoxi> (19 January 2024, date last accessed).
- 135.** 225 Banca - Maferm. <https://maferm.com/product/225-banca/> (15 December 2023, date last accessed).
- 136.** Joalheria Artesanal: Ferramentas básicas para Joalheria. <https://ajalheria.blogspot.com/2008/05/algumas-ferramentas-bsicas-para.html> (15 December 2023, date last accessed).
- 137.** Jewelry-Making Tips for Beginners: Tammy's Top 4 Tips for Beginning Metalsmiths | Jewelry | Interweave. <https://www.interweave.com/article/jewelry/jewelry-making-tips-beginners-metalsmiths/> (15 December 2023, date last accessed).
- 138.** Cape Tools & Jewellery Supplies | 6 Pickling Steps for Soldering Jewellery. <https://www.capewatch.co.za/6-pickling-steps-soldering-jewellery/> (15 December 2023, date last accessed).
- 139.** Jewelry Polishing Los Angeles - Hollywood Pawn Shop. <https://hollywoodpawncstars.com/services/jewelry-repair/jewelry-polishing/> (15 December 2023, date last accessed).
- 140.** Juvelisto School | Lost Wax Casting Technique & Jewelry Making | YVR - Juvelisto | Jewellery Design Studio and School of Metal Arts. <https://juvelisto.com/products/lost-wax-casting-technique> (15 December 2023, date last accessed).
- 141.** Your Guide To Jewellery Stone Setting Types - BIRON® Gems. <https://biron-gems.com/jewellery-stone-settings/> (22 September 2023, date last accessed).
- 142.** What is a Flush Setting? A Quick Guide (With Examples). <https://www.jewelryshoppingguide.com/what-is-a-flush-setting-ring/> (22 September 2023, date last accessed).
- 143.** What Is an Illusion Setting? Diamond jewellery that's both beautiful and clever. <https://news.thediamondstore.co.uk/general-jewellery-learning/jewellery/what-is-illusion-setting-jewellery-diamond/> (22 September 2023, date last accessed).
- 144.** Tension-Set Engagement Rings: The Complete Guide. <https://www.brides.com/tension-setting-5025042> (22 September 2023, date last accessed).
- 145.** Pinterest. <https://www.pinterest.pt/pin/700591285781450207/> (22 September 2023, date last accessed).
- 146.** Champlevé - Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Champlev%C3%A9> (22 September 2023, date last accessed).

- 147.** Dunstable Swan brooch. [https://www.danegeld.co.uk/store/p148/Dunstable\\_Swan\\_brooch.html](https://www.danegeld.co.uk/store/p148/Dunstable_Swan_brooch.html) (22 September 2023, date last accessed).
- 148.** Art Nouveau Plique A Jour Enamel Jewellery. <https://milysmarvels.com/n/art-nouveau-plique-a-jour-enamel-jewellery-cat-brooch> (22 September 2023, date last accessed).
- 149.** Investment Casting Services by Xometry. <https://www.xometry.com/capabilities/investment-casting/> (24 December 2023, date last accessed).
- 150.** Lost Wax Casting: What Is It? How Does It Work? Parts, Metal. <https://www.iqsdirectory.com/articles/investment-casting/lost-wax-casting.html> (6 October 2023, date last accessed).
- 151.** Casting machine - Lost wax casting Jewelry casting, Jewelry Making Supplies, Rosenthal. <https://www.jewelerstoystore.com/Vacuum-Casting-Machine-p/c29.htm> (24 December 2023, date last accessed).
- 152.** Centrifugal Casting Machine, Vacuum Jewelry Lost Wax Casting Machine. <https://www.superbmelt.com/centrifugal-casting-machine/> (24 December 2023, date last accessed).
- 153.** Defects -. <https://61746c6173.investmentcasting.org/wax/defect/air-bubbles/index.html> (14 October 2023, date last accessed).
- 154.** A carbon steel casting exhibiting wrinkles caused by a solid, slightly... | Download Scientific Diagram. [https://www.researchgate.net/figure/A-carbon-steel-casting-exhibiting-wrinkles-caused-by-a-solid-slightly-rigid-oxide-film\\_fig3\\_303040560](https://www.researchgate.net/figure/A-carbon-steel-casting-exhibiting-wrinkles-caused-by-a-solid-slightly-rigid-oxide-film_fig3_303040560) (14 October 2023, date last accessed).
- 155.** An example of a cold shut defect brake caliper casting produced during... | Download Scientific Diagram. [https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-a-cold-shut-defect-brake-caliper-casting-produced-during-trials-with-the\\_fig2\\_50283618](https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-a-cold-shut-defect-brake-caliper-casting-produced-during-trials-with-the_fig2_50283618) (14 October 2023, date last accessed).
- 156.** Defect Diagnosis - HotFlo! <https://www.hotflo.com/defect-diagnosis/index.html> (14 October 2023, date last accessed).
- 157.** How to Prepare Your Model for 3D Printing. <https://www.lifewire.com/how-to-prepare-your-model-for-3d-printing-2109> (28 December 2023, date last accessed).
- 158.** Mao Y, Miyazaki T, Sakai K, Gong J, Zhu M, Ito H. A 3D printable thermal energy storage crystalline gel using mask-projection stereolithography. *Polymers (Basel)* 2018; 10.
- 159.** 3D Printing: FDM | UNSW Making. <https://www.making.unsw.edu.au/learn/3d-printing-with-fdm-and-thermoplastics/> (22 September 2023, date last accessed).

- 160.** What are the optimal shell and infill parameters for FDM 3D printing? | Hubs. <https://www.hubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing/> (29 December 2023, date last accessed).
- 161.** Top 10 Tips for a High-Quality Mesh in Finite Element Analysis. <https://www.linkedin.com/pulse/top-10-tips-high-quality-mesh-finite-element-analysis-kuusisto-p-e> (3 January 2024, date last accessed).
- 162.** 1.23 know the the initial linear region of a force-extension graph is associated with Hooke's law - TutorMyself Chemistry. <https://www.tutormyself.com/1-23-know-the-the-initial-linear-region-of-a-force-extension-graph-is-associated-with-hookes-law/> (1 January 2024, date last accessed).
- 163.** diagrama tensão deformação | Principais conceitos. <https://biopdi.com.br/artigos/diagrama-tensao-deformacao/> (14 October 2023, date last accessed).
- 164.** What can we learn from Indus Valley artefacts? - BBC Bitesize. <https://www.bbc.co.uk/bitesize/topics/zxn3r82/articles/zcsbr82> (28 October 2023, date last accessed).
- 165.** All That Glitters: Gold Jewelry in Ancient Egypt | DailyArt Magazine. <https://www.dailyartmagazine.com/gold-jewelry-ancient-egypt/> (28 October 2023, date last accessed).
- 166.** Gold bracelet in the form of a snake | Greek, Ptolemaic | Early Hellenistic | The Metropolitan Museum of Art. <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/255898> (28 October 2023, date last accessed).
- 167.** Gold armband with Herakles knot | Greek | Hellenistic | The Metropolitan Museum of Art. <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/256970> (28 October 2023, date last accessed).
- 168.** Spencer Alley: Renaissance and Baroque Cameos from Italy. <https://spenceralley.blogspot.com/2017/02/renaissance-and-baroque-cameos-from.html> (28 October 2023, date last accessed).
- 169.** Visigothic Fibula (Illustration) - World History Encyclopedia. <https://www.worldhistory.org/image/3137/visigothic-fibula/> (28 October 2023, date last accessed).
- 170.** Baroque Pierced Metalwork Flexible Link Bracelet - The Jewelry Stylist. <https://thejewelystylist.com/product/baroque-pierced-metalwork-flexible-link-bracelet/> (29 October 2023, date last accessed).
- 171.** Antique Baroque pendant collar stomacher 19k gold pearls Venetian c168 – Brenda Ginsberg Antique Jewelry. <https://www.brendaginsberg.com/products/antique-baroque-pendant-collar-stomacher-22k-gold-pearls-venetian-c1680-7282> (28 October 2023, date last accessed).

- 172.** Grand Period: 1860-1885 – Antique Jewelry University. <https://www.langantiques.com/university/grand-period-1860-1885-2/> (1 January 2024, date last accessed).
- 173.** Art Nouveau Jewelry: A Guide to Motifs, Materials and Makers. <https://www.invaluable.com/blog/art-nouveau-jewelry/> (28 October 2023, date last accessed).
- 174.** What is Art Deco Jewelry? <https://www.thesprucecrafts.com/what-is-art-deco-jewelry-2042934> (28 October 2023, date last accessed).
- 175.** (5) Pinterest. <https://br.pinterest.com/olithica/> (29 October 2023, date last accessed).
- 176.** The MORITZ GLIK Ring with fragments of diamonds moving inside: most jeweled and must have! | Theeyeofjewelry.com. <https://theeyeofjewelry.com/moritz-glik/moritz-glik-jewelry/moritz-glik-ring-fragments-of-diamonds-moving/> (29 October 2023, date last accessed).
- 177.** AN ART NOUVEAU PEARL AND ENAMEL PENDANT/BROOCH, BY HENRI VEVER. <https://www.christies.com/lot/an-art-nouveau-pearl-and-enamel-pendantbrooch-6091593/?intObjectID=6091593&lid=1> (2 January 2024, date last accessed).
- 178.** When Fouquet and Mucha Created a Butterf... | Gazette Drouot. <https://www.gazette-drouot.com/en/article/when-fouquet-and-mucha-created-a-butterfly/24489> (2 January 2024, date last accessed).
- 179.** Joalheria, pingente de René Lalique (1860-1945). <https://www.meisterdrucke.pt/impressoes-artisticas-sofisticadas/Rene-Jules-Lalique/1022695/Joalheria%2C-pingente-de-Ren%C3%A9-Lalique-%281860-1945%29.html> (2 January 2024, date last accessed).
- 180.** The History of Fabergé Eggs. <https://www.astleyclarke.com/blog/the-history-of-faberge-eggs> (2 January 2024, date last accessed).
- 181.** The exotic jewels of Louis Comfort Tiffany | Christie's. <https://www.christies.com/en/stories/louis-comfort-tiffany-jewels-74ef60299187466fb58fa0b25d34a4cd> (2 January 2024, date last accessed).
- 182.** Friedrich Nietzsche – Wikipédia, a enciclopédia livre. [https://pt.wikipedia.org/wiki/Friedrich\\_Nietzsche](https://pt.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Nietzsche) (14 January 2024, date last accessed).
- 183.** Bruno Munari – Wikipédia, a enciclopédia livre. [https://pt.wikipedia.org/wiki/Bruno\\_Munari](https://pt.wikipedia.org/wiki/Bruno_Munari) (14 January 2024, date last accessed).
- 184.** Golden Ratio Calculator. <https://www.omnicalculator.com/math/golden-ratio> (14 January 2024, date last accessed).
- 185.** How to Use the Golden Ratio in Design (with Examples). <https://www.companyfolders.com/blog/golden-ratio-design-examples> (14 January 2024, date last accessed).