



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
FACULDADE DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

TESE DE DOUTORADO

# **A BIOMIMÉTICA APLICADA PARA O APERFEIÇOAMENTO DA TÉCNICA ÁRVORE DE FUNDIÇÃO NA JOALHERIA**

FELIPE ANDRÉ SCHWAB

PORTO ALEGRE

2021

FELIPE ANDRÉ SCHWAB

# **A BIOMIMÉTICA APLICADA PARA O APERFEIÇOAMENTO DA TÉCNICA ÁRVORE DE FUNDIÇÃO NA JOALHERIA**

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Design com ênfase em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Design.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Branca Freitas de Oliveira

PORTO ALEGRE

2021

### CIP - Catalogação na Publicação

Schwab, Felipe André  
A Biomimética Aplicada para o Aperfeiçoamento da  
Técnica Árvore de Fundição na Joalheria / Felipe André  
Schwab. -- 2021.  
116 f.  
Orientadora: Branca Freitas de Oliveira.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Joias. 2. Biomimética. 3. Árvore de Fundição. 4.  
Análise Estrutural. I. de Oliveira, Branca Freitas,  
orient. II. Título.

Felipe André Schwab

# A BIOMIMÉTICA APLICADA PARA O APERFEIÇOAMENTO DA TÉCNICA ÁRVORE DE FUNDIÇÃO NA JOALHERIA

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de Doutor em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 29 de outubro de 2021.

---

Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design / UFRGS

**Banca Examinadora:**

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Branca Freitas de Oliveira (Orientadora)

Programa de Pós-Graduação em Design / UFRGS

---

Prof. Dr. Adriano Aguiar Mol

Universidade do Estado de Minas Gerais / UEMG

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Jocelise Jacques de Jacques

Programa de Pós-Graduação em Design / UFRGS

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mariana Kuhl Cidade

Departamento de Desenho Industrial / UFSM

---

Prof. Dr. Pedro Luiz Juchem

Departamento de Mineralogia e Petrologia / UFRGS

# AGRADECIMENTOS

---

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, incentivo e confiança nesta e em outras jornadas.

À minha orientadora, professora Branca Freitas de Oliveira, pela dedicação com a qual me guiou neste caminho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Design pela oportunidade de realização deste trabalho.

Aos professores membros da banca, pelas contribuições fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos demais professores com quem tive a honra de ter aula durante minha trajetória acadêmica.

Aos colegas da UFRGS que apoiaram e contribuíram para com este trabalho.

À fundação CAPES, CNPq e à Propeq-UFRGS, pelo contínuo suporte ao Programa de Pós-Graduação em Design.

A todos que, da sua forma, acompanharam essa jornada e contribuíram, seja com conhecimento ou com apoio nas horas difíceis.

# RESUMO

---

Dos objetos de adorno feitos a partir de ossos, conchas, sementes e demais materiais rudimentares ao metal nobre, o desenvolvimento da joalheria acompanha a evolução da humanidade desde a pré-história. Em milênios de existência, técnicas construtivas no desenvolvimento de joias foram aprimoradas, porém os métodos produtivos ainda hoje possuem forte caráter empírico de desenvolvimento. Nesse contexto, a presente pesquisa explora como a biomimética pode contribuir com melhorias na etapa produtiva conhecida como fundição por cera perdida, quando princípios naturais são aplicados na estruturação que alimenta o fluxo de metal durante o processo. Busca-se como o aprimoramento estrutural inspirado em sistemas naturais de fluxo e crescimento pode otimizar a utilização dos materiais no processo, facilitar o preenchimento de peças pelo metal na forma fluída e reduzir problemas como preenchimento incompleto e porosidade. Para isso tem-se a criação de estruturas de alimentação para fundição, geradas em modelagem virtual, através do *software Rhino3D*<sup>®</sup>. As diferentes estruturas são analisadas em diversos aspectos de preenchimento e solidificação no *software Click2Cast*<sup>®</sup>. A estrutura com resultados promissores foi fundida em latão para averiguação de melhorias obtidas e viabilidade produtiva. Os resultados obtidos indicam que a biomimética aplicada no desenvolvimento de joias pode proporcionar resultados significativos, sendo um método analítico promissor que pode ser expandido para mais etapas do ciclo produtivo. A abordagem atua como uma ferramenta que pode reduzir a taxa de retrabalhos e de desperdício de materiais gerando economia de tempo e dinheiro.

**Palavras-chaves:** joias, biomimética, análise estrutural, árvore de fundição.

# ABSTRACT

---

From the adornment objects made of bones, shells, seeds and other rudimentary materials to noble metal, the development of jewelery follows the evolution of humanity since prehistory. In millennia of existence, constructive techniques in development of jewelry have been improved, but the productive methods have a strong empirical character of development, still today. In this context, the present research explores how biomimetics can contribute with improvements in the productive stage known as lost wax casting, when natural principles are applied in the structure that feeds the metal flow during the process. It is a research about how the structural improvement inspired by natural system of flow and growth can optimize the use of materials, making easier the filling of pieces by the metal and to reduce casting defects such incomplete filling and porosity. For this, system structures for casting are generated by virtual modeling, through the Rhino3D® software. The different structures are analyzed in several aspects of filing and solidification by the Click2Cast® software. Structure with better results were cast in brass to verify improvements and production feasibility. Results point out that the applied biomimetics in the development of jewelry provides significant results, a promising analytical method that can be expanded to more stages of the productive cycle. The approach acts as a tool that reduces the rate of rework and wastage of materials, saving time and money.

**Keywords:** jewels, biomimetic, structure analysis, casting tree.

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 – Contas de colar egípcio em formato de uvas e folhas de palmeiras, restauradas, datadas de 1550 a 1069 A.C.....	17
Figura 2 – Árvore de fundição.....	18
Figura 3 – Estrutura de fundição por cera perdida feita em liga de cobre-arsênio, datada do período cerca de 3.200 A.C.....	21
Figura 4 – Fractais clássicos gerados por auto similaridade exata.....	25
Figura 5 – A similaridade na composição dos objetos fractais.....	26
Figura 6 – Cálculo da dimensão fractal da curva de Koch e do triângulo de Sierpinski com base na primeira e segunda iteração. ....	27
Figura 7 – A sequência Fibonacci na composição de diferentes estruturas.....	29
Figura 8 – Similaridade dos arranjos espirais dos tublins com os presentes nos gomos do abacaxi...30	
Figura 9 – Analogia entre as árvores de Leonardo da Vinci e Elloy.....	32
Figura 10 – Análise das árvores quanto a morfologia. ....	33
Figura 11 – Filotaxia, arranjos de folhas ao longo do eixo caulinar.....	34
Figura 12 – Configuração do caule quanto à forma, acima visualizados em corte transversal. ....	35
Figura 13 – Características morfológicas referentes às bases dos troncos. ....	36
Figura 14 – Mix de produtos de ramo joalheiro no Brasil.....	37
Figura 15 – Processos de fabricação envolvidos na indústria joalheira, da matéria prima aos três macro processos de confecção de jóias .....	43
Figura 16 – Matriz em aço temperado .....	44
Figura 17 – Processo de trefilagem.....	45
Figura 18 – Ciclo do processo de fundição por cera perdida.....	46
Figura 19 – Processos na fundição por cera perdida.....	49
Figura 20 – Porcentagens dos defeitos recorrentes na fundição da indústria joalheira no ano 2006 – 2008.....	51
Figura 21 – Defeitos de fundição por cera perdida, recorrentes na indústria joalheira.....	51
Figura 22 – Estudo para melhor alocação do canal de ataque uma peça de joalheria.....	55
Figura 23 – Estudo quanto aos canais de ataque.....	56
Figura 24 – Partes que compõem a árvore de fundição e detalhes estruturais que contribuem para uma boa fundição.....	57

Figura 25 – Configuração da árvore de fundição de acordo com a estrutura convencional, cônica e do redesenho proposto por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013).....	59
Figura 26 – Dimensionamento das amostras fixadas na árvore de fundição, utilizadas na pesquisa realizada por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013).....	60
Figura 27 – Estrutura convencional da árvore de fundição, utilizada como corpo de prova nesta pesquisa, obtida por modelagem em mm no software Rhino3D®.....	67
Figura 28 – Configuração da análise no software Click2Cast®. ....	69
Figura 29 – Propriedades físicas configuradas no software Click2Cast®. ....	69
Figura 30 – Resultados da análise exploratória na estrutura convencional da árvore de fundição, obtidos no software Click2Cast®. ....	71
Figura 31 – Geração de alternativas inspirada pela geometria fractal, série Fibonacci e morfologia das árvores.....	75
Figura 32 – Amostras virtuais modeladas no software Rhino3D®, configuração da base da árvore de fundição inspirada na morfologia das bases dos troncos das árvores. ....	76
Figura 33 – Amostras virtuais modeladas no software Rhino3D®, configuração do canal de alimentação da árvore de fundição inspirado na morfologia dos caules das árvores. ....	77
Figura 34 – Amostras virtuais modeladas no software Rhino3D®, configuração do canal de alimentação da árvore de fundição inspirado na geometria fractal e na espiral fibonacci.....	77
Figura 35 – Amostras virtuais modeladas no software Rhino3D®, configuração dos canais de ataque da árvore de fundição inspirada na filotaxia. ....	78
Figura 36 – Desenho técnico das amostras virtuais modeladas no software Rhino3D®, configuração da base da árvore de fundição inspirada na morfologia das bases dos troncos das árvores.....	78
Figura 37 – Desenho técnico das amostras virtuais modeladas no software Rhino3D®, configuração do canal de alimentação da árvore de fundição inspirado na morfologia dos caules das árvores. ....	79
Figura 38 – Desenho técnico das amostras virtuais modeladas no software Rhino3D®, configuração dos canais de ataque da árvore de fundição inspirada na inspirado na geometria fractal, na espiral fibonacci.e na filotaxia. ....	79
Figura 39 – Índices qualitativos referentes a junta fria, fração líquida, macro porosidade e porosidade na amostra convencional AV1, amostra cônica AV5 e na amostra fractal e fibonacci AV13, resultados obtidos no software Click2Cast®. ....	84
Figura 40 – Amostra convencional AV1, amostra Thammachot ATH e amostras finais AF1 e AF2, modeladas no software Rhino3D®. ....	85
Figura 41 – Desenho técnico da amostra final, AF2, modelada no software Rhino3D®.....	86
Figura 42 – Resultados da análise com aproveitamento máximo de canais de ataque quanto à frente de preenchimento, obtidos no software Click2Cast®. ....	88
Figura 43 – Resultados da análise com aproveitamento máximo de canais de ataque quanto as áreas com junta fria, áreas com aprisionamento de ar, fração líquida e pressão, obtidos no software Click2Cast®. ....	89

Figura 44 – Resultados da análise com aproveitamento máximo de canais de ataque quanto a velocidade, tempo de preenchimento, macro porosidade e porosidade, obtidos no software Click2Cast®. ....	90
Figura 45 – Corpos de prova laminar e pino de brinco modelados no software Rhino3D® .....	94
Figura 46 – Configuração utilizada no software VisCAM RP 5.0 .....	95
Figura 47 – Desenvolvimento dos corpos de prova, mais canais de ataque .....	96
Figura 48 – Configuração utilizada no software ArtCAM Jewel Smith 9.126.....	97
Figura 49 – Fresagem das estruturas que compõem as bases e os canais de alimentação das amostras AV15, ATH e AF2.....	97
Figura 50 – Amostras AV15, ATH e AF2 com corpos de prova laminar e corpos de prova pino de brinco fixados, prontas para fundição. ....	98
Figura 51 – Amostras AV15, ATH e AF2 com corpos de prova laminar fundidas em latão. ....	100
Figura 52 – Amostra AV15, com corpos de prova pino de brinco fundidas em latão.....	102
Figura 53 – Amostra ATH, com corpos de prova pino de brinco fundidas em latão.. ....	103
Figura 54 – Amostra AF2, com corpos de prova pino de brinco fundidas em latão.....	104

# LISTA DE QUADROS

---

Quadro 1 – Algumas propriedades dos metais puros: ouro, prata, cobre e zinco. Dureza Mohs é a mais usada em mineralogia, varia de 1 a 10, sendo a dureza da unha 2,5 e a do diamante 10. .39	
Quadro 2 – Dados anuais de reservas mundiais e brasileira, produção mundial e brasileira, maior produtor mundial, uso e reciclagem nos Estados Unidos dos metais: ouro, prata, cobre e zinco, amplamente utilizados no ramo joalheiro. ....40	
Quadro 3 – Defeitos recorrentes na indústria joalheira no processo de fundição por cera perdida, suas possíveis causas e soluções. ....52	
Quadro 4 – Resultados da análise exploratória, obtidos através do <i>software Click2Cast®</i> . Os índices destacam a variação da velocidade de fluxo do metal líquido, a ocorrência de aprisionamento de ar na base, no topo e nos canais de ataque, o tempo de preenchimento da estrutura, diferença de tempo entre o preenchimento dos canais de ataque próximos ao topo para os próximos a base, a variação dos índices máximos e mínimos de pressão e a macro porosidade na base, no canal de alimentação e nos canais de ataque.....70	
Quadro 5 – Variação do tempo de preenchimento e de análise em função do refinamento de malha na amostra AV1, índice de refinamento de malha em 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm. ....75	
Quadro 6 – Resultados da análise de geração de alternativas com foco na base das árvores de fundição, obtidos através do <i>software Click2Cast®</i> . As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada. ....80	
Quadro 7 – Resultados da análise de geração de alternativas com foco no canal de alimentação das árvores de fundição, obtidos através do <i>software Click2Cast®</i> . As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada. ....80	
Quadro 8 – Resultados da análise de geração de alternativas com foco nos canais de ataque das árvores de fundição, obtidos através do <i>software Click2Cast</i> . As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada. ....81	
Quadro 9 – Resultados da análise do refinamento estrutural com foco na base e no canal de alimentação das árvores de fundição, obtidos através do <i>software Click2Cast®</i> . As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada. ....86	
Quadro 10 – Resultados da análise do refinamento estrutural com foco na base e no canal de alimentação das árvores de fundição, realizadas com o material latão, obtidos através do	

<i>software Click2Cast</i> <sup>®</sup> . As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada. ....	87
Quadro 11 – Resultados da análise com aproveitamento máximo de canais de ataque, obtidos através do <i>software Click2Cast</i> <sup>®</sup> . As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada. ....	91
Quadro 12 – Resultados da análise das estruturas AV15, ATH e AF2 com corpos de prova laminares, fundidos em latão. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada.....	101
Quadro 13 – Somatório dos problemas pontuais identificados em cada patamar da estrutura AV15, ATH e AF2 com corpos de prova laminares, fundidos em latão. O 1º patamar é o mais próximo a base da árvore de fundição e assim sucede até o 6º patamar, mais próximo ao topo da árvore de fundição. As células com fundo na cor rosa enfatizam os patamares onde foram identificados mais problemas, por estrutura. ....	101
Quadro 14 – Resultados da análise das estruturas AV15, ATH e AF2 com corpos de prova pino de brinco, fundidos em latão.. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada. ....	105
Quadro 15 – Somatório dos problemas pontuais identificados em cada patamar da estrutura AV15, ATH e AF2 com corpos de prova pino de brinco, fundidos em latão. O 1º patamar é o mais próximo a base da árvore de fundição e assim sucede até o 6º patamar, mais próximo ao topo da árvore de fundição. As células com fundo na cor rosa enfatizam os patamares onde foram identificados mais problemas, por estrutura. ....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

A.C.	Antes de Cristo
Ag	Prata
ASM	Sociedade Americana de Metais
Au	Ouro
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Controle Numérico Computadorizado
Cu	Cobre
°C	Graus Celsius
°C/h	Graus Celsius por Hora
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por Centímetro Cúbico
h	Hora
HB	Número Brinell de Dureza
IBGM	Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos
k	Quilate (do inglês, Karat)
kg	Kilograma
mg/kg	Miligrama por Kilograma
min	Minuto
mm	Milímetro
mm <sup>3</sup>	Milímetro Cúbico
MPa	Mega Pascal
m/s	Metros por Segundo
Pa	Pascal
RPM	Rotações por Minuto
s	Segundos
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
t	Tonelada
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Zn	Zinco

# SUMÁRIO

---

Agradecimentos .....	5
Resumo .....	6
Abstract .....	7
Lista de Figuras .....	8
Lista de Quadros.....	11
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	13
Sumário .....	14
Capítulo 1 .....	16
Introdução.....	16
1.1. Delimitação do Tema e Definição do Problema.....	19
1.2. Objetivo Geral .....	20
1.2.1 Objetivos Específicos.....	20
1.3. Justificativa.....	20
Capítulo 2 .....	24
Fundamentação Teórica .....	24
2.1. Geometria Fractal.....	24
2.2. Série Fibonacci.....	28
2.3. Morfologia das Árvores.....	30
2.4. Propriedades do Ouro, da Prata e do Latão.....	37
2.5. Dados e Impactos na Extração dos Metais Utilizados .....	39
2.6. Processos Produtivos da Indústria Joalheira.....	42
2.6.1 Fundição por Cera Perdida .....	46
2.6.2 Problemas na fundição e a árvore de fundição.....	50
2.7. Sistemas CAD/CAM para a Joalheria .....	61
2.8. Simulação do processo de fundição por elementos finitos.....	62
2.9. Considerações .....	64
Capítulo 3 .....	65
Metodologia de Pesquisa .....	65
3.1. Preparando a Amostra.....	66
3.2. Configurando a análise.....	67

3.3. Resultados Preliminares .....	70
3.4. Considerações Preliminares .....	72
Capítulo 4 .....	74
Aplicação das Análises .....	74
4.1. Estudo de Convergência de Malha .....	74
4.2. Geração de Alternativas e Análises Virtuais.....	75
4.3. Refinamento das Árvores de Fundição .....	83
4.4. Análise com Aproveitamento Máximo dos Canais de Ataque .....	88
4.5. COsiderações.....	92
Capítulo 5 .....	93
Análises em Fundição Real.....	93
5.1. Definindo os Corpos de Prova .....	93
5.2. Confecção das Estruturas Reais AV15, ATH e AF2 com os Corpos de Prova Fixados.....	95
5.3. Os Resultados das Estruturas Fundidas .....	99
5.4. Considerações .....	106
Capítulo 6 .....	107
Referências Bibliográficas .....	110

# INTRODUÇÃO

---

O estudo da natureza para fins projetuais está cada vez mais presente em diversas linhas de pesquisa. Entender como organismos adaptam formas, sistemas e estratégias para sobreviver às condições impostas pela natureza é de grande valia. “Ao contrário do ser humano que tem uma curta existência para criar, a natureza possui milhões de anos de experiência, na criação e adequação de formas.” (RAMOS, 1993, p. 1). Seja de modo direto ou indireto, o ser humano ao longo de sua história utiliza a natureza como fonte de inspiração. A palavra biomimética, do grego bios(vida) e mimesis(imitação), utilizada para designar esse método de análise, é mais recente. Harkness (2002), destaca que o conceito de biomimética foi utilizado pela primeira vez em 1957, por Otto H. Schmitt, para nomear o método de busca de soluções na natureza para resolução de problemas diversos de engenharia. O termo biomimética, utilizado desde os anos 50, inicialmente tinha o direcionamento a estudos mecânicos e comumente chamado de biônica (HARKNESS, 2002).

Diversos ramos industriais têm adotado a biomimética como um importante meio de pesquisa e aprimoramento aplicado nas várias etapas do ciclo produtivo. Lacerda *et al.* (2012) corrobora que a imitação de espécies e sistemas naturais auxiliam na resolução de problemas em diversas áreas, como saúde, engenharias e mesmo em sistemas de organização humana. Na joalheria os princípios biomiméticos em grande parte são direcionados para aspectos formais, quase que exclusivamente para fins ornamentais. Em joias do antigo Egito é possível observar tal inspiração, uso e representação dos elementos naturais para fins ornamentais (Figura 1).

Figura 1 – Contas de colar egípcio em formato de uvas e folhas de palmeiras, restauradas, datadas de 1550 a 1069 A.C. Acervo do Field Museum of Natural History em New Kingdom, Chicago.



Fonte: Cifarelli (2010).

Jóias em ouro e prata bem como as peças folheadas, compostas pela liga latão, quando produzidas pelo processo denominado fundição por cera perdida, compõem em uma etapa do ciclo, uma estrutura chamada árvore de fundição (Figura 2). “Trata-se do resultado da montagem de um conjunto de peças injetadas em cera, ligadas a um tronco também de cera” (SANTOS, 2013, p.173). Nessa estrutura as jóias ainda em cera são dispostas através de canais, as quais são derretidas posteriormente. O espaço antes ocupado pela cera forma a cavidade oca do molde, onde o metal é vertido pelo processo de fundição e por essa razão o nome é fundição por cera perdida. Apesar da nomenclatura, entender o quão essa estrutura busca de fato uma relação com o sistema de distribuição, crescimento e otimização no uso de energias e materiais empregado na natureza, pelas árvores, requer um estudo aprofundado. Kliauga e Ferrante (2009) ressaltam, que o modelo em árvore é o mais utilizado no Brasil e na Europa, enquanto que na Ásia há preferência pela montagem de uma estrutura em camadas sobrepostas.

Figura 2 – Árvore de fundição. Estrutura composta por diversas joias em cera, as quais servem como molde a serem preenchidos pelo metal no processo de fundição.



Fonte: IJM (2018).

Rian e Sassone (2014) destacam que arquitetos e construtores há muito tempo estudam as formas das árvores em aspectos estruturais e mecânicos, os quais comumente resultam no desenvolvimento e aplicação de conceitos matemáticos. Enfatiza-se o período do século XIX, denominado Art Nouveau como o ápice na criação e aplicação de formas naturais nos elementos construtivos. Foi um período no qual o desenvolvimento nas habilidades para trabalhar o ferro fundido possibilitou aplicações das formas naturais além dos aspectos estéticos, direcionando também para fins estruturais. No entanto, foi através da geometria fractal, termo cunhado por Mandelbrot em 1975, que o homem passou a ter um maior entendimento matemático do modo como a natureza desenvolve padrões construtivos. Isso permitiu o desenvolvimento e a compreensão de sistemas até então imensuráveis pela clássica geometria euclidiana.

O mesmo direcionamento analítico pode vir a contribuir quando empregado à joalheria, área nos quais os conhecimentos de certo modo são direcionados em demasia pela função estética. Quando entendemos o padrão, sistemas e mesmo detalhes como as estruturas naturais similares se desenvolvem, compreende-se quais melhorias podem ser empregadas na estrutura conhecida como árvore de fundição. Contudo, o entendimento sobre quais pontos a abordagem biomimética voltada à

estrutura árvore de fundição pode contribuir, só pode ser compreendido perante a delimitação clara da pesquisa a ser abordada, da qual se origina o problema de pesquisa deste estudo.

## 1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O tema desta pesquisa é delimitado em explorar a biomimética aplicada a estrutura árvore de fundição, a qual é utilizada no processo denominado fundição por cera perdida, na fabricação de joias e folheados. Por joia entende-se o artefato ornamental fabricado em metais nobres, a exemplo do ouro e da prata. O termo folheado é uma derivação comercial para bijuterias fabricadas, comumente, com o metal base latão, o qual é recoberto por metais nobres pelo processo de galvanoplastia. Além de compor em etapa produtiva o objeto de estudo da pesquisa, a árvore de fundição, joias e folheados correspondem a grande parte do nicho de mercado atendido pelos polos joalheiros de Limeira em São Paulo e Guaporé, no Rio Grande do Sul.

A abordagem biomimética aproxima a joalheria de áreas do conhecimento pouco exploradas no seu nicho e que em muito desenvolve-se de modo empírico. Nesse contexto, o levantamento informacional necessário tem o intuito de buscar soluções, arranjos estruturais utilizados pelas árvores na natureza para otimização do uso de materiais e energias.

Almeja-se com a pesquisa, a produção de conhecimento visando a melhoria do sistema atual de estruturação das árvores de fundição. Espera-se que esses conhecimentos auxiliem na otimização no uso dos materiais, diminuição das energias despendidas durante o processo de fundição, menor índice de retração por peça e melhoria do acabamento superficial pós solidificação do metal. Nesse ponto o *software Click2Cast®*, através da análise por elementos finitos, auxilia a identificação de pontos em que a estrutura da árvore de fundição atua de modo a facilitar ou dificultar a fundição, conseqüentemente distinguindo as áreas que devem ser trabalhadas na busca por uma estrutura que reduza a quantidade de material necessário e ao mesmo tempo facilite o fluxo de metal, sem que isso prejudique a qualidade da superfície obtida após a solidificação do mesmo ou acarrete em retrações do material.

Com os resultados almeja-se a otimização e conseqüente aprimoramento da estrutura árvore de fundição, vindo a melhorar a qualidade dos resultados obtidos no processo de fundição por cera perdida. Porém, para que as análises propostas sejam válidas e eficazes, o estudo busca a resolução do seguinte problema de pesquisa:

Como a biomimética, direcionada para a produção de joias e folheados, pode auxiliar no aprimoramento das árvores de fundição?

## **1.2. OBJETIVO GERAL**

Pesquisar como a biomimética pode auxiliar no aprimoramento das árvores de fundição no ramo joalheiro.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- Compreender conceitos biomiméticos para a identificação de sistemas e padrões naturais aplicáveis as árvores de fundição;
- Verificar o processo atual de estruturação e montagem das árvores de fundição;
- Simular para entender como a estrutura atual da árvore de fundição conduz o metal líquido e como influencia em sua solidificação;
- Entender como a análise estrutural por meio de sistemas e padrões naturais podem otimizar processos e o uso de materiais no ramo joalheiro;
- Identificar quais os principais materiais utilizados para a fundição de joias, verificando suas propriedades de fusão e solidificação;
- Validar a biomimética como método na busca do desenvolvimento de uma estrutura de fundição eficaz, acurando o uso necessário de metal, reduzindo problemas de fundição, tais como o preenchimento parcial ou incompleto, a porosidade, melhorando o acabamento superficial;
- Direcionar a pesquisa de modo que ela possa contribuir com os polos joalheiros no Brasil, com ênfase a Limeira em São Paulo e Guaporé, no Rio Grande do Sul;

## **1.3. JUSTIFICATIVA**

O ramo joalheiro possui forte caráter empírico de desenvolvimento e produção. Santos (2013) ressalta que o próprio conhecimento da joalheria até bem pouco tempo atrás era algo restrito, passado de pai para filho e que demais interessados tinham dificuldades em obter informações sobre o ofício. Nesse sistema fechado e de forte caráter artesanal que grande parte da joalheria teve seu desenvolvimento ao longo da sua existência. A experimentação prática, ainda hoje é um dos principais métodos pelo qual se desenvolve, principalmente o nicho da joalheria autoral, no qual o processo de criação do artista ocorre principalmente a partir do contato direto com o material, segundo o mesmo autor (SANTOS, 2013).

Obviamente que os avanços tecnológicos, a exemplo dos sistemas CAD/CAM (desenho e manufatura, assistidos por computador), foram incorporados ao meio produtivo joalheiro. Wong e Hernandez (2012) destacam a importância desses para a redução do custo, interação humana e consequente redução do ciclo do produto em si. Nesse contexto, o desenvolvimento tecnológico na joalheria, em muito direciona esforços ao aprimoramento dos processos que envolvem a modelagem 3D e posterior prototipagem das peças. Porém, ao analisarmos etapas do ciclo produtivo, a exemplo da montagem das árvores para a fundição, percebemos que o processo depende em demasia de métodos artesanais e conhecimentos empíricos que são norteados apenas por premissas básicas. A própria estrutura de montagem das árvores pouco foi alterada em relação a estruturas utilizadas há cerca de 3.200 A.C. (Hunt, 1980), Figura 3.

Figura 3 – Estrutura de fundição por cera perdida feita em liga de cobre-arsênio, datada do período cerca de 3.200 A.C., encontrada em 1961, em uma caverna as margens do mar Morto em Israel. Acervo do Israel Museum, Jerusalem.



Fonte: Hunt (1980).

De fato, existem pesquisas acerca da relação entre a estruturação da árvore de fundição com a porosidade das peças pós fundição, a exemplo de Zhang *et al.* (1995) e mesmo mais recentes, com o uso de *softwares* de simulação por Heiss *et al.* (2015). Thammachot *et al.* (2013) fazem uso dos *softwares* de simulação para entender como modificações dimensionais na estrutura da árvore podem facilitar o fluxo do metal, corrigindo defeitos como peças não totalmente preenchidas pelo mesmo. Existem tecnologias que automatizam em sua totalidade o processo de injeção e montagem das árvores para fundição, a exemplo do MPI Technology Center em Nova Iorque, destinadas principalmente à indústria aeroespacial, médica e automotiva. Entretanto, a abordagem de uma reestruturação inspirada no fluxo do crescimento de elementos naturais, a exemplo das árvores, através da geometria fractal e série Fibonacci é nova.

A análise para o entendimento do fluxo natural de crescimento, além de nova, busca o aprimoramento de processo produtivo na indústria joalheira, otimizando o uso de metais nobres como o ouro e a prata. O alto custo dessas matérias primas, a exemplo do ouro, forçam o uso acurado e margens mínimas de desperdício no processo produtivo, caso a empresa queira permanecer e crescer nesse ramo. A busca pelo uso assertivo do latão, liga à base de cobre e zinco, também é foco da pesquisa, visto que o latão constitui a base para o nicho joalheiro o qual o IBGM classifica como folheado. Polos brasileiros da indústria de joias, a exemplo de Limeira, em São Paulo e Guaporé, no Rio Grande do Sul, atuam fortemente na produção de folheados.

Destaca-se ainda que o estudo voltado ao aprimoramento em processos produtivos almeja o uso consciente de matérias primas que demandam grandes gastos energéticos de extração e que resultam em impactos ambientais significativos. É a busca constante pelo melhor aproveitamento de recursos não renováveis, necessária, frente a práticas industriais que em muito pecam pela falta de ações sustentáveis, bem como o mercado consumidor que alimenta esse ciclo. Nesse contexto, entender como organismos naturais adaptaram estruturas para acurar o uso de energia, é aproximar o desenvolvimento industrial ao ciclo natural de evolução do planeta.

A busca pela melhoria nas diversas esferas do ciclo produtivo deve ser constante, trazendo novas possibilidades e métodos a processos, que a exemplo da estruturação e montagem das árvores para fundição, dependem ainda, em excesso, dos aspectos artesanais e empíricos. Nesse entendimento, o aprimoramento da estrutura árvore de fundição ajuda a evitar processos posteriores de manutenção ou mesmo a perda da peça. Thammachot *et al.* (2013) destacam como a estrutura convencional utilizada pode contribuir para o não preenchimento de peças pelo metal durante a fundição. Heiss *et al.* (2015) reforçam como uma configuração incorreta da estrutura pode atuar de modo a maximizar incidência de porosidade nas peças. Altas porcentagens de retrabalho, resultam na perda de tempo e dinheiro para ambos os lados, cliente e empresa. Segundo Lahndt (1999), análises nos diversos ramos industriais mostram que os custos diretos e indiretos associados aos problemas de qualidade excedem os investimentos em sua melhoria e dentre as razões podem ser citadas:

- Retrabalhos e correção de erros e problema em campo;

- Responder a reclamações de clientes;
- Aumento de auditorias e inspeção;
- Perda da confiança de seus clientes;
- Efeitos negativos do boca a boca dos clientes;
- Aumento dos custos de marketing;
- Perda de participação de mercado;
- Desperdício de materiais.

Nesse contexto, justifica-se a análise biomimética através da geometria fractal, série Fibonacci e morfologia das árvores naturais aplicada na reestruturação das árvores para fundição, visto que: Pode contribuir com o desenvolvimento, até então fundamentado em demasia pelo empirismo; Possibilita a redução de peças não preenchidas, redução da porosidade e melhoria do acabamento superficial pós fundição; Beneficia a acurácia no uso de matérias primas que possuem custos crescentes de extração e conseqüente processamento; Reduz gastos com processos de manutenção ou perdas ao longo do ciclo de produção do produto.

## Capítulo 2

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

O presente capítulo tem como objetivo fazer o levantamento bibliográfico de assuntos e dados que contribuam para o entendimento da pesquisa em si, explorando o universo de informações necessárias para o embasamento que o estudo requer. Os assuntos abordados contemplam a geometria fractal, a série Fibonacci, a morfologia das árvores, as propriedades do latão, da prata e do ouro, os dados e impactos acerca da extração dos metais utilizados, os processos produtivos da indústria joalheira com foco em fundição por cera perdida, os sistemas CAD/CAM para a joalheria e a simulação do processo de fundição por elementos finitos.

## 2.1. GEOMETRIA FRACTAL

“Nuvens não são esferas, montanhas não são cones, os litorais não são círculos, a casca das árvores não é lisa e tampouco a luz viaja em linha reta” (MANDELBROT, 1977, p.1). A conhecida afirmação do polonês, criador da geometria fractal, faz contraponto à lógica euclidiana, essa última segundo Boyer (1996) considerada a linguagem da natureza, por Galileu Galilei, no século XVII. Mandelbrot (1977) destaca que muitos padrões da natureza são tão irregulares e fragmentados que comparados com a geometria euclidiana, a natureza exhibe não simplesmente um alto grau, mas um completo diferente nível de complexidade.

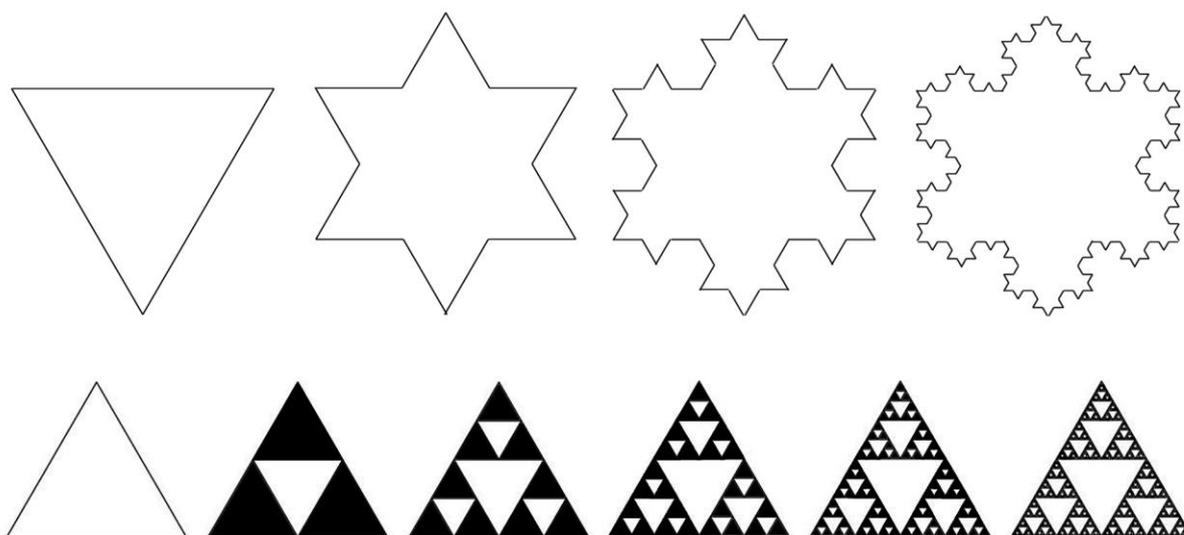
Mandelbrot (1977) destaca que os estudos das configurações abstratas desenvolvidos por diversos matemáticos em meados de 1970 foram caracterizados pela auto-similaridade e crescimento recursivo. Kpalma (1994) reforça que os objetos fractais são o resultado de um processo iterativo de auto similaridade e podem ser definidos recursivamente. Rian e Sassone (2014) afirmam que de um modo geral os objetos fractais possuem propriedades sendo de forma exata ou próxima ao mesmo em cada progressão de escala.

Bovill (1996) salienta que por definição matemática, nenhum objeto natural é puramente fractal, mas podem ser chamados de “aproximadamente fractais” ou “estatisticamente fractais” os quais apresentam auto similaridade ou auto afinidade em extensas, mas finitas variações de escalas.

Taylor (2003) observa que existem dois tipos de auto similaridade, a exata e a estatística. Na primeira as partes são cópias exatas dos padrões em diferentes ampliações, enquanto que na segunda os padrões não se repetem com exatidão, suas qualidades estatísticas é que se diferem. Falconer (2005) reforça que por vezes a semelhança dos fractais podem ser mais fracas que a similaridade geométrica, aproximando-se da similaridade estatística.

A auto similaridade exata é a forma mais evidente de um fractal. Resulta em figuras idênticas, porem em diferentes escalas, as quais podem ser geradas por um sistema de funções iteradas, ou seja, possuem uma regra fixa de substituição geométrica. De acordo com Rian e Sassone (2014) o sistema de funções iteradas é um processo automatizado que possibilita gerar fractais através das propriedades matemáticas como a iteração, recursão e subdivisão. O triângulo de Sierpinski e o floco de neve de Koch, são exemplos de fractais clássicos de auto similaridade exata (Figura 4). No floco de neve de Koch, cada segmento de reta é dividido em três partes iguais, o segmento central é apagado, porém serve como base para um triângulo equilátero. O processo de construção segue de modo recursivo ao infinito, sendo que esse limite foi denominado por Maldebrodt (1977) como “infinito interno”. Enquanto que no triângulo de Sierpinski a figura original é dividida em quatro novos triângulos idênticos, tendo como vértices os pontos médios do triângulo de origem. O procedimento segue de modo recursivo, no qual o triângulo central não pertence ao fractal.

Figura 4 – Fractais clássicos gerados por auto similaridade exata. Acima a construção do floco de neve de Koch, abaixo a construção do triângulo de Sierpinski.



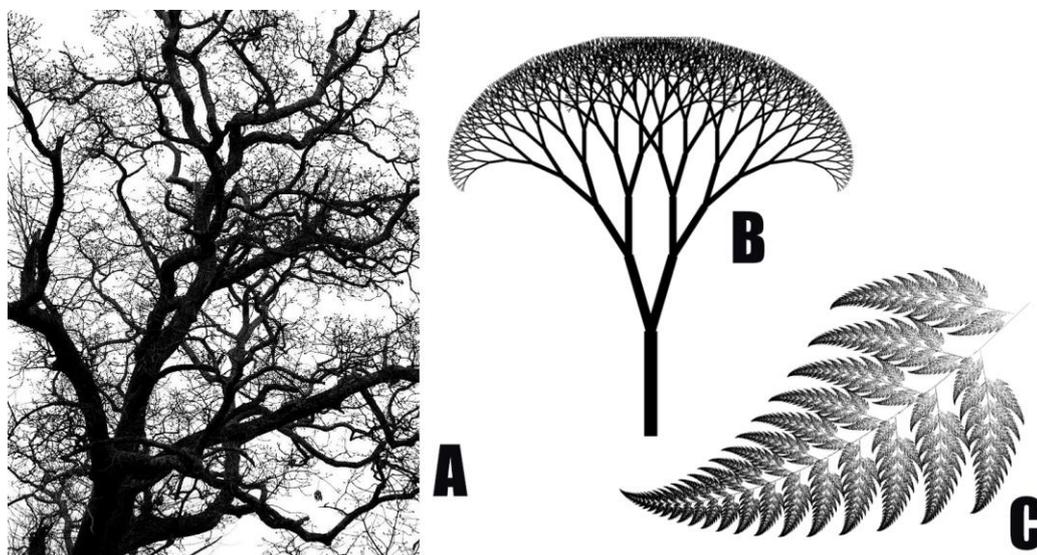
Fonte: Adaptado de Maldebrodt (1977).

Formas próximas às encontradas na natureza também podem ser geradas por auto similaridade exata, sendo a samambaia de Barnsley um bom exemplo.

A importância da samambaia de Barnsley para o desenvolvimento do assunto é que esta imagem é parecida com uma samambaia, mas encontra-se na mesma categoria de construções como a curva de Koch... Em outras palavras, aquela categoria que não contém monstros extremos da matemática que parecem estar muito distantes da natureza, mas também inclui estruturas a formações naturais e que são obtidas pela simples modificação dos monstros. (PEITGEN, 1992)

Carvalho (2005) complementa que mesmo intuitiva, a auto similaridade pode gerar figuras mais complexas que se encaixam, retorcem, espremem, obedecendo somente algumas regras iniciais. Nunes (2006) explica que para as formas da natureza a noção de auto similaridade deve ser vista com cuidado, já que parte dos objetos têm a mesma estrutura ou distribuição, mas não são réplicas exatas, ou seja, são objetos auto similares estatísticos. Se observarmos uma árvore, notamos a semelhança quanto a distribuição de galhos a partir do tronco central. Se focarmos em cada um desses galhos, percebemos a semelhança na distribuição de suas ramificações. A Figura 5 evidencia a diferença da auto similaridade estatística presente nas árvores naturais para com os fractais auto similares exatos que lembram árvores bem como destaca a proximidade do fractal auto similar exato samambaia de Barnsley com os fractais naturais.

Figura 5 – A similaridade na composição dos objetos fractais. (A) Auto similaridade estatística da árvore natural; (B) Fractal que lembra uma árvore gerado por auto similaridade exata; (C) Samambaia de Barnsley, gerada por processo de auto similaridade exata.



Fonte: Adaptada de Bradshaw (2012), Woongkeemin (2015) e Barnsley (1993).

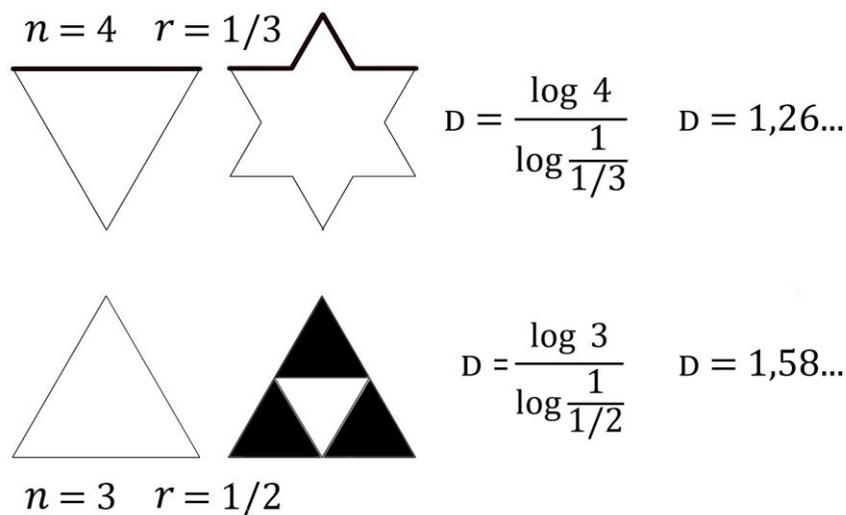
Silva e Souza (2010) enfatizam a complexidade e dimensão fracionada como características dos objetos fractais. A complexidade significa que nunca se pode representar completamente um fractal, já que seus detalhes são infinitos e variam conforme a escala de

referência. Miranda *et al.* (2008) destacam que a complexidade infinita, refere-se ao fato da geração de uma figura fractal ser recursiva, o que significa que quando se executa um determinado procedimento, no decorrer da mesma encontra-se como sub-procedimento o próprio procedimento anterior executado. Já a dimensão fractal, de acordo com Miranda *et al* (2008) é uma quantidade fracionária a qual representa o grau de ocupação da estrutura no espaço que a contém. Gleick (1989) salienta a dimensão fractal como uma maneira de medir propriedades que não têm definição clara, tais como o grau de aspereza, de fragmentação ou de irregularidade de um objeto. Bovil (1996) destaca a dimensão fractal como uma das propriedades mais importantes da geometria fractal, pois possibilita mensurar o grau de complexidade da irregularidade dos objetos fractais, os quais não possuem dimensões inteiras, a exemplo da geometria euclidiana. Peitegen (1992) reitera que na geometria euclidiana o ponto tem dimensão zero, a linha possui uma dimensão, a superfície contém duas dimensões e o volume três. No cálculo da dimensão fractal, Miranda *et al.* (2008) observam que devido ao infinito detalhamento de uma curva, ela “ocupa mais espaço” que a curva convencional euclidiana, logo seu valor é maior que 1. Quanto mais próximo ao número 2 for a dimensão fractal de uma curva, mais densa será sua ocupação, ou seja, mais tenderá para uma superfície. Para calcular a dimensão fractal aplica-se a equação (1)

$$D = \frac{\log n}{\log \frac{1}{r}} \quad (1)$$

No qual n corresponde ao número de partes iguais obtidas e r corresponde ao coeficiente de redução em relação ao tamanho da iteração anterior. Observamos abaixo o cálculo da dimensão fractal para o floco de neve de Koch e o triângulo de Sierpinski (Figura 6).

Figura 6 – Cálculo da dimensão fractal da curva de Koch e do triângulo de Sierpinski com base na primeira e segunda iteração.



Fonte: Adaptado de Maldebrot (1977).

Assim, a aplicação da geometria fractal inspirada nas árvores naturais para compor a árvore de fundição pode contribuir para o melhor aproveitamento e fluxo do material utilizado. As estruturas que possuem uma dimensão fractal próxima a 1 serão menos densas, logo utilizarão menos material. Obviamente que deve-se atentar para que a menor quantidade de material utilizado não prejudique o fluxo do material no processo de fundição bem como a qualidade das peças obtidas.

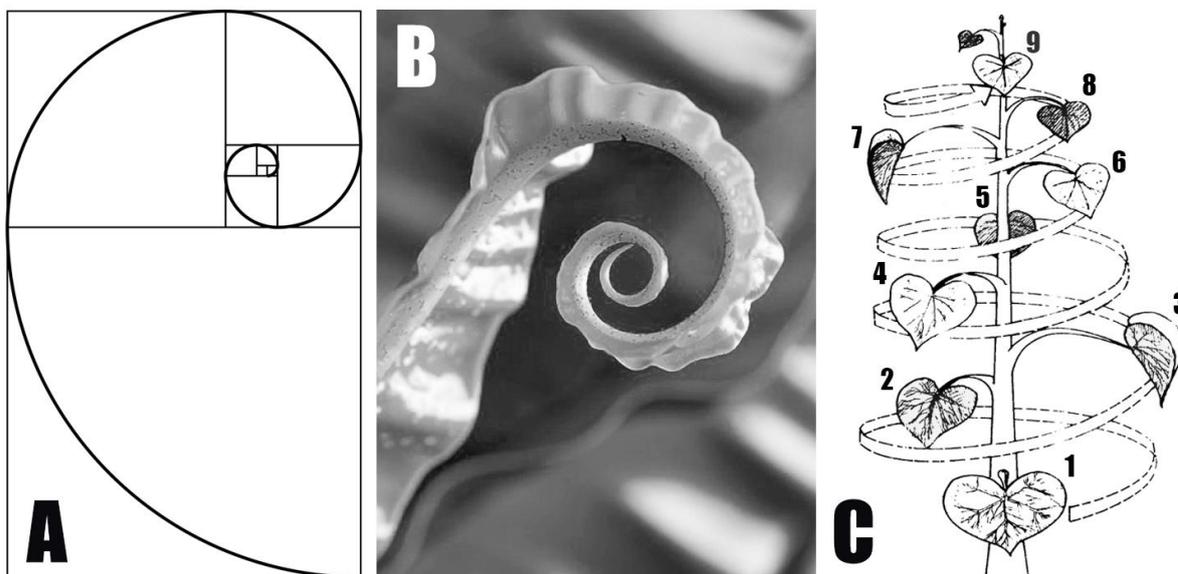
## 2.2. SÉRIE FIBONACCI

A primeira ocorrência conhecida da série Fibonacci data em torno de 200 A.C., a qual de acordo com Singh (1985), consta em um tratado indiano intitulado Chandaḥśāstra do autor Piṅgala. Ghosh e Khan (2015) explicam que o nome Fibonacci é dado em referência ao matemático Leonardo de Pisa, popularmente conhecido como Fibonacci (1170 – 1250), o qual após viagem à África e Ásia retorna à Europa e publica o Liber Abaci. Seu livro retrata problemas algébricos de comerciantes e mercadores da época, entre os quais aborda a progressão de uma população de coelhos, a qual faz uso da sequência de números Fibonacci. Hare e Saunders (2018) destacam que a sequência Fibonacci é recursivamente definida por  $f_1 = f_2 = 1$  e  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$  para todo  $n \geq 3$ , logo obtemos 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55... Baxter (2000) enfatiza que a sequência continua ao infinito e que quando os termos dessa sequência atingem a casa dos milhares, surge um padrão consistente, na qual a razão entre dois termos consecutivos torna-se constante. Esse padrão, mensurado em 1,618 é chamado de razão áurea ou número de ouro.

Luca e Patel (2018) reforçam que desde o século XII os números Fibonacci têm destaque sendo amplamente estudados por sua intrínseca identidade com a beleza, bem como diversas aplicações a exemplo do retângulo áureo utilizado nas artes, arquitetura e na natureza. O retângulo áureo é aquele cuja razão na divisão da base pela altura resulta em 1,618. Seccionando esse retângulo internamente, para que gere um quadrado e um novo retângulo e seguindo esse processo sucessivamente com os retângulos resultantes, teremos retângulos cada vez menores que convergem para um ponto, formando uma espiral, chamada de espiral logarítmica. Baxter (2000) destaca que as folhas se distribuem ao longo do caule segundo essa espiral logarítmica, no qual a série Fibonacci também descreve a quantidade bem como o tamanho relativo das folhas consecutivas entre si. Nelson (2004) corrobora que quanto às plantas, a rotação em frações Fibonacci é o modo que a natureza encontrou para permitir que cada folha absorva o máximo de luz solar possível. Nessa lógica as folhas se distribuem de modo a ocuparem todos os ângulos de rotação em torno do caule de modo que a folha posicionada no mesmo ângulo da anterior esteja no maior espaçamento possível, bloqueando o mínimo possível de luz. Skorny, Śledziowski e Czajkowski (2016) enfatizam que a sequência Fibonacci aparece em diversos conjuntos biológicos, tais como a ramificação das árvores,

os arranjos das folhas, a florescência de um abacaxi, no crescimento da samambaia e arranjo de uma pinha (Figura 7).

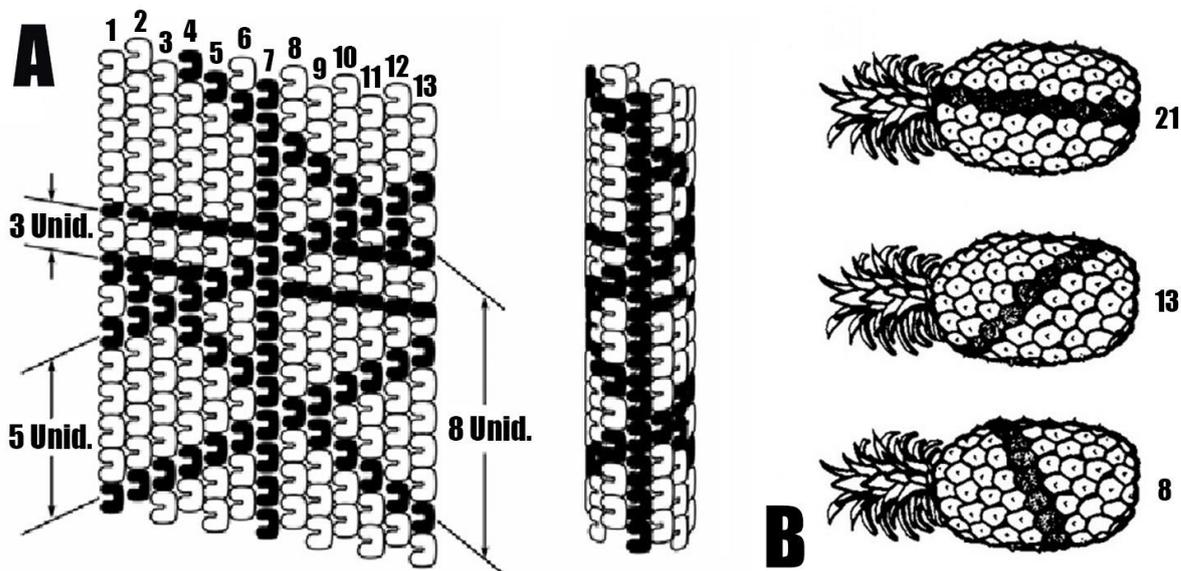
Figura 7 – A sequência Fibonacci na composição de diferentes estruturas (A) Retângulo áureo com sucessivas seções áureas, gerando a espiral logarítmica; (B) Espiral logarítmica no crescimento dos vegetais; (C) Rotações das folhas em frações Fibonacci.



Fonte: Adaptada de Lewis (2016) e Nelson (2004).

Diferentemente da distribuição das folhas em frações Fibonacci para melhor aproveitamento de luz, Alencar (2004) salienta que há presença da espiral característica em situações vegetais onde a explicação não é tão evidente, a exemplo do abacaxi. Ghosh e Khan (2015) explicam que devido à sua superfície distribuídas por hexágonos, espirais em três sentidos podem ser observados. A contagem do número de espirais que compõem o abacaxi, em cada um desses três sentidos, resultará em números pertencentes à sequência Fibonacci, tais como 8, 13 e 21. A presença dos números de Fibonacci nos microtúbulos, estruturas proteicas que fazem parte do citoesqueleto nas células é outro bom exemplo onde a aplicação não é óbvia e situa-se no campo da especulação. Hameroff (2012) explica que os microtúbulos são formados, usualmente, por 13 colunas de tubulins e que a cada 3, 5, 8 e 13 unidades o padrão de relação entre os tublins se repetem. Koruga (1974) argumenta que a relação com os números de Fibonacci na estrutura poderia promover vantagens em funções como o fluxo no processamento de informações. Alencar (2004) observa a similaridade dos arranjos espirais dos tublins com os presentes nos gomos do abacaxi (Figura 8).

Figura 8 – Similaridade dos arranjos espirais dos tublins com os presentes nos gomos do abacaxi. (A) Estrutura do microtúbulo constituída por tubulins os quais repetem padrões em intervalos Fibonacci; (B) Contagem do número de espirais nos três sentidos, as quais compõem o abacaxi, resultam em números Fibonacci.



Fonte: Adaptada de Srivastava *et al.* (2016) e <https://hubpages.com/education/Article09/> (2018)

As aplicações das proporções Fibonacci abrangem os mais variados ramos científicos, tais como o aprimoramento na projeção de mapas (Basselga, 2018), previsão de tornados (Sparrow e Mercer, 2016), composições musicais a exemplo da quinta sinfonia de Beethoven (Haylock, 1978), fachada do Partenon, de Atenas, a obra do pintor Michelângelo sobre a Criação de Adão, na Capela Sistina (Baxter, 2000). Direcionando para o estudo e aplicação na árvore de fundição, o entendimento da distribuição do sistema de alimentação das peças em espiral, conforme o padrão Fibonacci, poderia auxiliar para melhorar o fluxo do metal fundido no preenchimento das peças. Talvez a continuidade morfológica da forma espiral possa reduzir o fluxo turbulento do metal, suavizando-o e assim evitando pontos de aprisionamento de ar e porosidade.

### 2.3. MORFOLOGIA DAS ÁRVORES

Na botânica, a constituição geral de uma planta, incluindo o conjunto das suas características fisionômicas, morfológicas e sua forma de crescimento, é chamado de hábito. Assim a palavra árvore designa um tipo de hábito (hábito arbóreo), entre outros, como herbáceo, arbustivo (BATISTA, COUTO e FILHO, 2014). Cortez, Silva e Chaves (2016) definem o porte arbóreo como aquele observado em plantas de caule lenhoso, resistente, ramificado no ápice e que possuem um

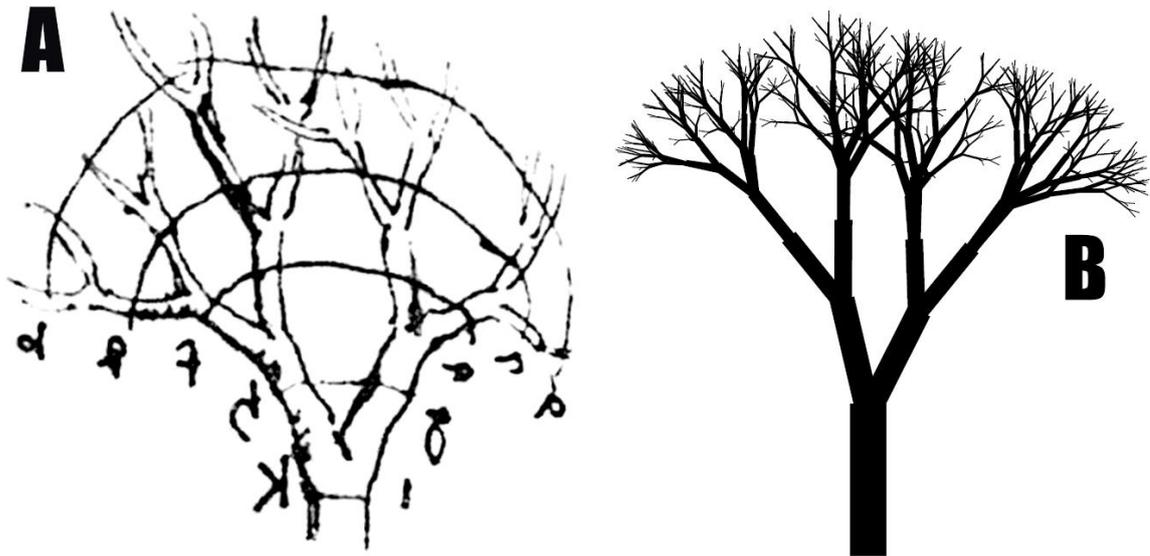
eixo principal evidente. De acordo com Shipunov (2018) a competição por recursos, como água e luz solar, sempre conduziram a evolução das plantas, no qual o crescimento estrutural é o meio mais lógico de se sobressair. Martinková *et al.* (2014) explicam que organismos com hábito arbóreo, com no mínimo 4 metros de altura e 7,5 cm de diâmetro surgiram a partir da metade do período Devoniano, há 350 milhões de anos atrás. As estruturas arbóreas oferecem vantagens bioclimáticas com a copa protegida das flutuações de temperatura próximas ao solo e com o tronco funcionando como um reservatório de água e demais substâncias. Batista, Couto e Filho (2014) destacam que as estruturas das copas são uma herança hereditária, mas que sofrem adaptações ao longo do crescimento das árvores, seja por eventos de ocorrência natural bem como antrópicos. Craine e Dybzinski (2013) reforçam que além da altura das árvores, tamanho de folha para otimizar a captação bem como distribuição horizontal das folhas para barrar o crescimento de árvores próximas, são algumas estratégias empregadas pelas árvores para se sobressair às demais em seu desenvolvimento. Ford (2014) agrupa em duas ideias centrais quanto os efeitos da arquitetura das plantas na competição:

- A competição por luz ocorre a nível da copa, nas folhas e ramificações. O crescimento das plantas ocorre através do desenvolvimento modular de galhos e repetição de ramificações;
- A competição é determinada pela interação entre o esforço de dominância, particularmente através da aquisição de recursos e reação ao sombreamento, modificando formas e características fisiológicas.

Richter (1970) observa que, Leonardo da Vinci considerava que as ramificações e arquitetura das árvores eram influenciadas pela hidrologia a qual determinava padrões em divisões matemáticas nos diâmetros de tronco e galhos, nas quais todas as áreas eram conservadas e replicadas. Leonardo da Vinci reportou que a área total das seções transversais de todos os galhos, em qualquer altura, era igual a área da seção transversal do tronco. Elloy (2018) ao criar árvores por divisões fractais, percebeu que o dimensionamento da estrutura das árvores que obtinham melhores resultados sob a ação de ventos naturalmente segue a regra de Leonardo da Vinci (Figura 9).

Landsberg (1986) enfatiza que o desenvolvimento dos vegetais superiores possui estreita relação com suas copas, através da síntese de carboidratos. Tendo a dinâmica de crescimento como resultado de complexas interações entre infinidade de fatores que podem ser relativos ao indivíduo ou à natureza do ambiente. Como exemplo de adaptação aos diversos fatores, Florence (2004) salienta, que em uma mesma árvore, as folhas que se desenvolvem sob sombra possuem maior eficiência quando sombreadas e as que se desenvolvem sob sol são mais eficientes quanto submetidas a alta luminosidade.

Figura 9 – Analogia entre as árvores de Leonardo da Vinci e Elloy. (A) Árvore de Leonardo da Vinci, área total das seções transversais preservadas em todas as alturas de distribuição de galhos ou tronco; (B) Árvore fractal de Elloy, dimensionamento estrutural otimizado para obter melhores resultados sob a ação de ventos.

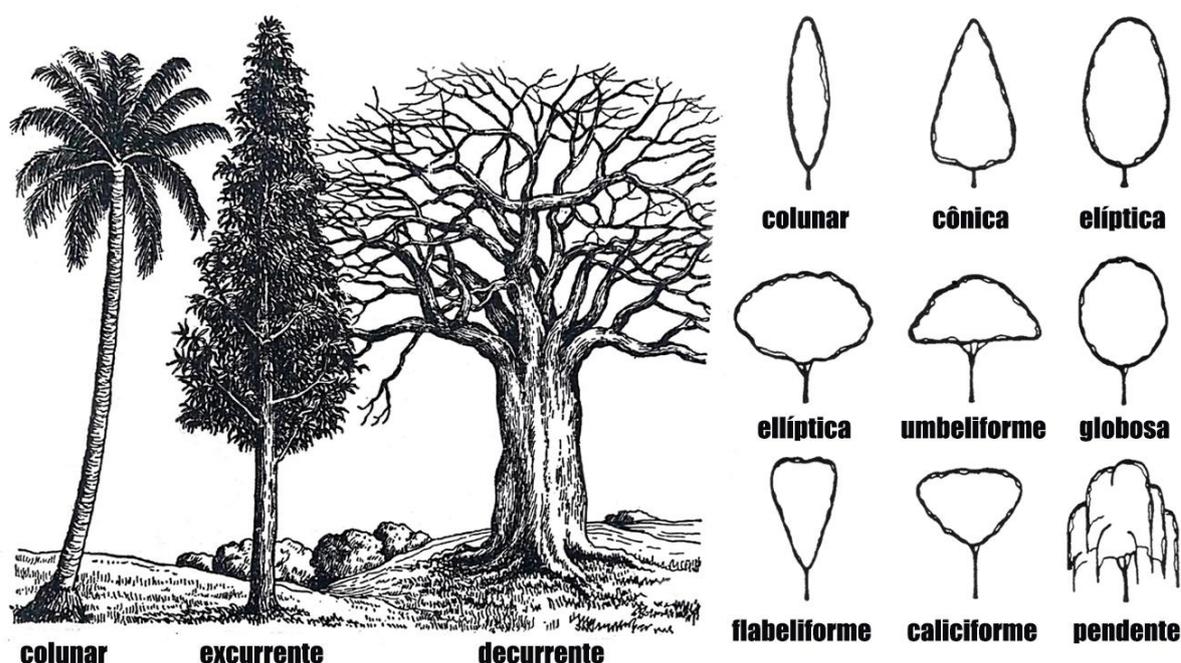


Fonte: Adaptada de Richter (1970) e Elloy (2018).

Apesar das variadas dinâmicas de crescimento, Halle, Olderman e Tomlinson (1978) identificam três padrões básicos de forma de árvore, nas quais a forma da copa e o processo de crescimento do tronco são inseparáveis, são elas: colunar, excurrente e decurrente. De acordo com Batista, Couto e Filho (2014) copas colunares têm como característica o crescimento do lenho concentrado no tronco principal, normalmente único, nos quais se desenvolvem ramos primários que geralmente não se ramificam. Enquanto as árvores de copa excurrente caracterizam-se pelo crescimento ereto do tronco principal com ramos secundários, terciários e sucessivos a desenvolver-se afastando-se lateralmente do troco principal, conferindo o formato cônico característico. Cortez, Silva e Chaves (2016) destacam que tal padrão de ramificação é denominado monopodial, quando uma única gema é responsável pelo crescimento, originando um eixo principal, geralmente com formato piramidal. Vidal e Vidal (2003) destacam que a gema terminal principal tem predomínio sobre os ramos laterais que surgem abaixo da extremidade. Zimmerman e Brown (1971) explicam que árvores com copas excurrentes podem transformar em decurrentes em função da idade, bem como relacionado a fatores do ambiente, tais como solo com baixa fertilidade, baixa disponibilidade de água e alterações no ambiente luminoso. Por fim as árvores de copa decurrente são identificadas pelas ramificações do tronco principal em mais caules, os quais competem entre si no crescimento em altura. Segundo Cortez, Silva e Chaves (2016) esse padrão de ramificação também é classificado

como simpodial, no qual muitas gemas são responsáveis pelo crescimento, originando vários eixos, normalmente com formato difuso. Martinková *et al.* destacam que o eixo principal é o menor e as ramificações laterais são maiores. Halle, Olderman e Tomlinson (1978) ressaltam que o traço marcante do padrão é impossibilitar a identificação nítida, a partir de certa altura do tronco principal. Vidal e Vidal (2003) explicam que essa característica ocorre, pois, o eixo principal da planta é formado por tecidos originados das diversas gemas que se substituem paulatinamente. A macroclassificação colunar, excurrente e decurrente pode ser desmembrada em formas variadas, sendo algumas das mais comumente identificadas, relacionadas por Milano (1987) na Figura 10.

Figura 10 – Análise das árvores quanto a morfologia. À esquerda os três padrões básicos formais das árvores e à direita formas variadas derivadas dos padrões básicos.



Fonte: Adaptada de Gitte (2017) e Milano (1987).

Thirakul (1998) reforça que o arranjo dos galhos, ramificações e folhas, resultados de características genéticas e modificadas até certo ponto por fatores do ambiente, determinam a forma das copas das árvores. Outro fator importante é ângulo de inserção dos ramos no caule, distinguidos por Thirakul (1998) em:

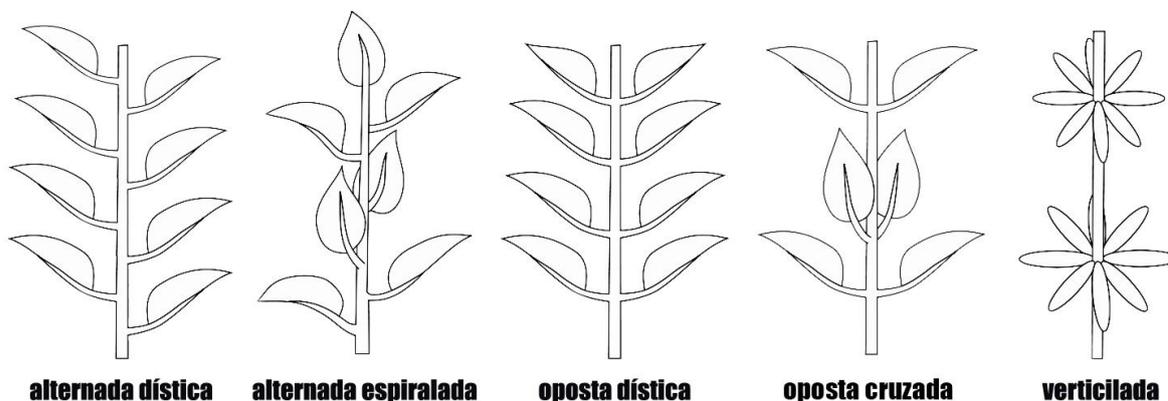
- Muito oblíquo (menos de 45°);
- Oblíquo (entre 45° e 75°);
- Perpendicular (entre 75° e 90°);
- Obtuso (mais de 90°).

Gonçalves e Lorenzi (2007) salientam que o arranjo das folhas ao longo do eixo caulinar tende a minimizar o sombreamento de uma folha por outra. Apesar de algumas poucas espécies

possuírem filotaxia variável, é uma característica bem estabelecida em grupos taxonômicos. A esse arranjo Silva *et al.* (2014) explicam que é dado o nome de filotaxia, a qual pode ser dividida em grupos (Figura 11):

- Alternada dística, uma folha inserida em cada nó e as folhas de nós consecutivos encontram-se num mesmo plano;
- Alternada espiralada, uma folha inserida em cada nó e as folhas consecutivas encontram-se em vários planos, formando uma espiral concêntrica ao eixo;
- Oposta dística, duas folhas inseridas em cada nó e as folhas dos próximos nós encontram-se no mesmo plano;
- Oposta cruzada, duas folhas inseridas em cada nó e as folhas dos próximos nós posicionam-se perpendicularmente as anteriores;
- Verticilada, mais de duas folhas inseridas no mesmo nó;
- Fasciculadas, mais de duas folhas inseridas num mesmo ponto do nó, reunidas em feixes;
- Rosulada, quando os entrenós são muito curtos.

Figura 11 – Filotaxia, arranjos de folhas ao longo do eixo caulinar.

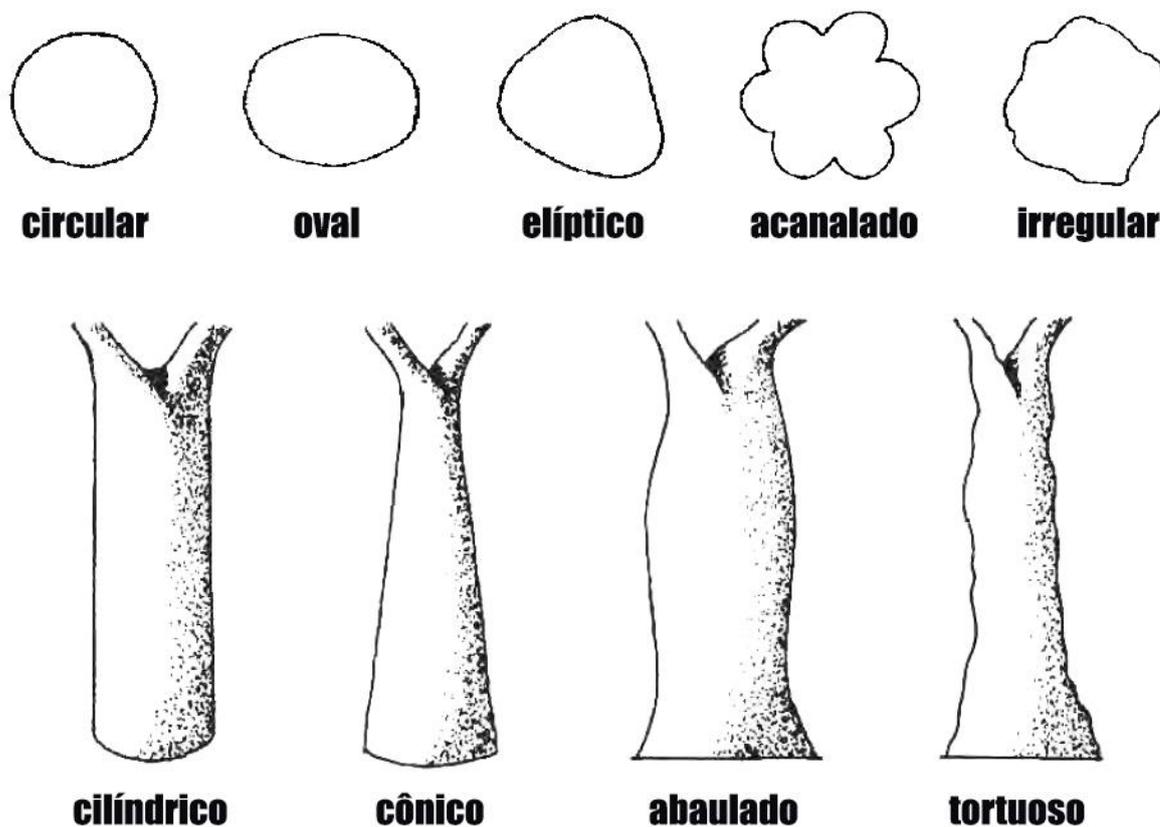


Fonte: Adaptada de Shipunov (2018).

A distribuição das folhas nos diversos arranjos é estruturada pelo caule, o qual Henriques *et al.* (2010) corroboram que, além de sustentar os órgãos aéreos, é responsável pela comunicação e condução dos nutrientes entre raízes e folhas, atuando diretamente no melhor posicionamento das folhas para a absorção de energia solar. Cortez, Silva e Chaves (2016) explicam que os caules apresentam características morfológicas conforme o ambiente em que se desenvolvem e que podem ser classificados, também, quanto à função que desempenham. Vidal e Vidal (2003) salientam que tronco é a nomenclatura utilizada para caules de habitat aéreo, lenhoso, resistente e ramificado, o qual ocorre em árvores e arbustos. Thirakul (1998) observa que os troncos podem ser descritos por seu diâmetro, medido a 1,3 metros acima do solo, no qual através de corte transversal

podem ser observadas formas circulares, ovais, elípticas, acanaladas e irregulares. Observados no eixo longitudinal Alencar (1998) adiciona a essa classificação as formas cilíndricas, cônicas, abauladas e tortuosas (Figura 12).

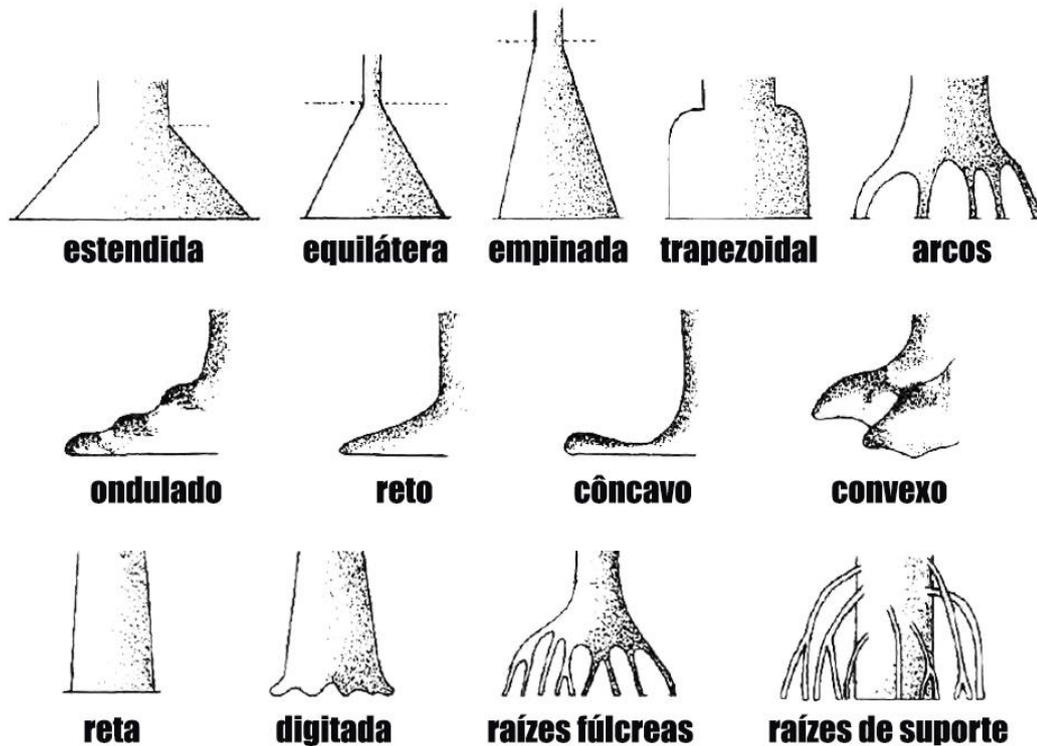
Figura 12 – Configuração do caule quanto à forma, acima visualizados em corte transversal.



Fonte: Adaptada de Thirakul (1998) e Alencar (1998).

Quanto à base dos troncos, Thirakul (1998) reforça a relação da idade, na qual certas características são mais evidentes em árvores adultas e particulares a certas espécies. Dentre tais características, evidenciam-se a presença de sapopemas, as quais são variações de raízes de suporte com ramos radiculares originando-se na base do caule, que além de aumentar a resistência e a sustentação do tronco, aumentam a superfície para aeração. Alencar (1998) agrupa as sapopemas em: estendida, equilátera, empinada, trapezoidal e arcas, as quais podem ter lombro ondulado, reto, côncavo ou convexo. Silva et al. (2014) destacam que a base do tronco pode ser reta, digitada, com garras, possuir raízes fúlcreas e raízes de suporte (Figura 13).

Figura 13 – Características morfológicas referentes às bases dos troncos.



Fonte: Adaptada de Alencar (1998).

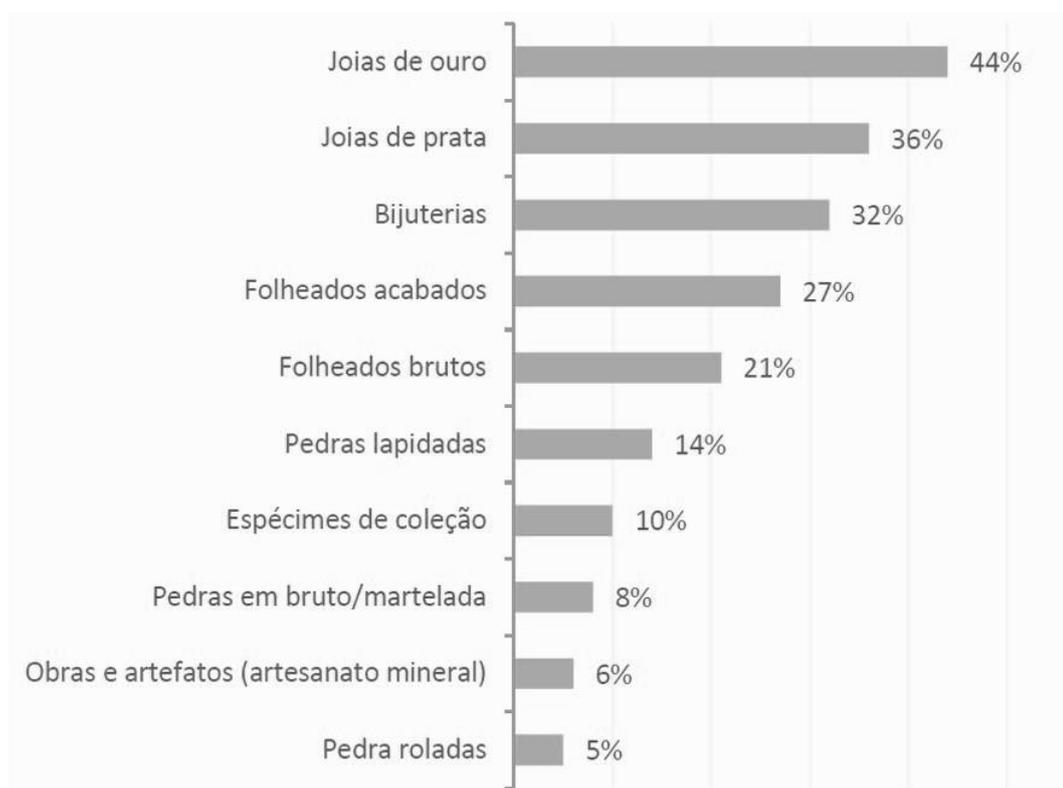
Analisando a morfologia das árvores naturais, percebe-se que diversos podem ser os pontos reconfigurados em uma árvore de fundição. Mesmo que, a função competição por luz e sombreamento das árvores naturais não correlacionem com os motivos pelos quais as árvores de fundição se estruturam, aspectos como o fluxo hidrostático proposto por Leonardo da Vinci e detalhes morfológicos das estruturas arbóreas, as quais otimizam o uso de materiais há milhões de anos, em muito podem contribuir para o fluxo de metal e otimização estrutural da árvore de fundição. Obviamente que, pontos de possíveis melhorias estruturais precisam ser testados para entender se podem contribuir para a otimização da estrutura em si, dentre os quais:

- Configurar a base da árvore de fundição semelhante aos sapopemas;
- Distribuição dos canais de ataque das peças similar aos arranjos de folhas ao longo do eixo caulinar;
- Organização da estrutura como um todo configurada de acordo com os diferentes tipos de copas;
- Configurar a área da seção transversal do canal de alimentação para corresponder ao somatório das áreas da seção transversal dos canais de ataque.

## 2.4. PROPRIEDADES DO OURO, DA PRATA E DO LATÃO

Pavanati (2010) define materiais como substâncias que possuem propriedades que os tornam úteis na construção de máquinas, estruturas, dispositivos e produtos. Classifica os materiais sólidos, baseado em sua estrutura atômica e ligações químicas predominantes, dentro de quatro grupos principais: os metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos. No ramo joalheiro, ouro e prata, pertencentes ao grupo dos metais nobres, tem destaque como materiais mais utilizados. Segundo dados do IBGM/SEBRAE (2013), nas indústrias brasileiras de joias, peças em ouro corresponderam a 44% do mix de produtos (Figura 14). Esse índice é seguido pela prata com 36% e bijuterias (peças compostas, por ligas de zinco, ligas de estanho, às quais podem utilizar componentes plásticos, miçangas e demais materiais de baixo valor em sua composição) com 32%. Folheados acabados (peças, comumente em latão, composto por cobre e zinco, as quais já passaram por todo processo de acabamento, incluindo a galvanoplastia, o qual faz o recobrimento por eletrólise da peça com uma camada de metal nobre, a exemplo do ouro e da prata) correspondem a 27% e folheados brutos (peças compostas principalmente por ligas de cobre e zinco, a exemplo do latão e ligas de estanho, as quais ainda não passaram pelo processo de galvanoplastia) 21%

Figura 14 – Mix de produtos de ramo joalheiro no Brasil, a partir de pesquisa em 208 que assinalaram mais de uma opção, por isso os valores superam os 100%.



Fonte: IBGM/SEBRAE (2013).

O ouro é um metal nobre de cor amarela, representado quimicamente e no meio joalheiro pela sigla Au (Quadro 1), extraído da natureza na maioria das vezes no estado nativo. A origem da sigla vem do latim, onde ouro é chamado de *aurum*. Kliauga e Ferrante (2009) destacam que o metal possui temperatura de fusão de 1063 °C e que devido a sua alta conformabilidade é possível produzir lâminas de 0,001mm ou mesmo trefilar um fio de 2 km de extensão a partir de 1 grama do metal. Resistente ao oxigênio, à água, às bases, e à maioria dos ácidos, e por isso é um metal muito valioso para a joalheria. O ouro puro, denominado ouro 1000 ou 24k (quilates), pode se deformar facilmente colocando em risco a forma e a beleza da joia. Kliauga e Ferrante (2009) enfatizam que o ouro é normalmente ligado a prata e ao cobre para aumentar a resistência mecânica, a dureza e baixar sua temperatura de fusão, bem como modificar a cor e reduzir o preço dos produtos deste metal. Nas joias, é muito utilizado o ouro 750, na qual se tem a liga com 75% de ouro puro e 25% de outros metais, usualmente 12,5% de prata e 12,5% de cobre, também chamada de 18k, 18 partes de ouro e 6 partes de outros metais. A temperatura de fusão do ouro 18k é de 1022 °C. No caso do ouro branco, comumente é substituído os 12,5% de cobre por paládio, Veloso (2003) reforça que frequentemente é dado um banho de ródio no final do processo, o que confere um brilho maior e mais claro à joia.

A prata é um metal nobre branco representado quimicamente e no meio joalheiro pela sigla Ag, oriundo do latim, onde prata é chamado de *argentum* (Quadro 1). É extraída da natureza na maioria das vezes no estado nativo Santos (2013) explica que, a prata pura ou 1000 é muito maleável e por isso pode ser laminada e trefilada em chapas e fios bem finos. Nas joias, frequentemente é utilizada em ligas com 7,5% de cobre e 92,5% de prata, chamada de prata 925. A prata pura possui temperatura de fusão de 960,5°C, enquanto que na liga 925 a temperatura de fusão é de 893 °C. É suscetível à oxidação, e de acordo com Sartori *et al.* (2008), em muitos casos, essa oxidação ocorre pelo contato com oxigênio e compostos contendo enxofre. A poluição atmosférica contém grande quantidade desses compostos, chamados sulfurados que podem ocasionar o escurecimento da prata.

O latão é uma liga metálica de cor amarela (pálida), constituída, geralmente, por mais de 50% de cobre (Cu) e 5% a 45% de zinco (Zn) (Quadro 1). Manfron *et al* (2016), identificaram em 4 amostras oriundas de São Paulo e 11 amostras de diferentes fabricantes de Guaporé, a utilização média da proporção de 70% de cobre e 30% de zinco. Ligas com percentuais acima de 36% de zinco, de acordo com Pohlmann (2012), são utilizadas na forma de chapa em processos de estampagem. As ligas de latão possuem pontos de fusão relativamente baixos e que variam conforme a proporção dos metais constituintes, entre 900° C a 940° C. Alzamora (2005) ressalta as qualidades para o uso na joalheria, tais como o baixo custo, elevada resistência à tração, pode ser submetido a processos galvanoplásticos, de fácil acabamento industrial e obtém brilho com facilidade. O principal minério do qual o zinco é extraído é a esfalerita (Zn,Fe)S composto por sulfeto de zinco com ferro, enquanto que o cobre pode ser extraído da natureza no estado nativo ou de minerais sulfetados, como a calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), e a bornita (Cu<sub>2</sub>S). de óxidos, como a cuprita (Cu<sub>2</sub>O) e de carbonatos, como a malaquita (CuCO<sub>3</sub>.Cu(OH)<sub>2</sub>) e a azurita (2CuCO<sub>3</sub>2Cu(OH)<sub>2</sub>).

Quadro 1 – Algumas propriedades dos metais puros: ouro, prata, cobre e zinco. Dureza Mohs é a mais usada em mineralogia, varia de 1 a 10, sendo a dureza da unha 2,5 e a do diamante 10.

	<b>Ouro</b>	<b>Prata</b>	<b>Cobre</b>	<b>Zinco</b>
Símbolo	Au	Ag	Cu	Zn
Sistema Cristalino	Cúbico	Cúbico	Cúbico	Hexagonal
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	19,3	10,5	8,96	7,13
Temperatura de fusão (°C)	1063	960,5	1083	419,5
Dureza Brinell (HB) recozido	18,5	26	45	43
Dureza (Mohs)	2,5	2,5	3	2,5
Limite de resistência (MPa)	131	137	221	35

Fonte: Adaptado de Kliauga e Ferrante (2009).

## 2.5. DADOS E IMPACTOS NA EXTRAÇÃO DOS METAIS UTILIZADOS

Os dados de extração dos metais: ouro, prata, cobre e zinco podem ser observados no Quadro 1, com a mensuração das reservas mundiais e brasileira, produção mundial e brasileira, maior produtor de cada metal, o uso e os índices de reciclagem (esses dois últimos dados referentes aos Estados Unidos). Esse levantamento informacional pertence ao relatório anual de 2020, desenvolvido pela U.S. Geological Survey, com base nos dados colhidos ao longo do ano de 2019. Os dados acerca das reservas e produção brasileira foram obtidos no boletim do setor mineral brasileiro de 2020, desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia e pela Secretaria de Geologia Mineração e Transformação Mineral. Combinados no Quadro 2, os relatórios permitem a compreensão acerca dos índices de produção frente às reservas mundiais. Percebe-se o quão elevado é a demanda anual por esses metais, para os mais variados setores da economia, dentre os quais se situa o joalheiro, principalmente na demanda por ouro e prata. Esse fator ressalta a importância do uso consciente dessas matérias primas não renováveis, que apesar de possuir índice expressivo de reciclagem no ouro, não é acompanhado pelos demais metais.

Quadro 2 – Dados anuais de reservas mundiais e brasileira, produção mundial e brasileira, maior produtor mundial, uso e reciclagem nos Estados Unidos dos metais: ouro, prata, cobre e zinco, amplamente utilizados no ramo joalheiro.

<b>Metal</b>	<b>Reservas Mundiais / Brasil</b>	<b>Produção Mundial / Brasil</b>	<b>Maior produtor</b>	<b>Uso nos Estados Unidos</b>	<b>Reciclagem nos Estados Unidos</b>
Ouro	50.000 t 2.400 t	3.300 t 75 t	China 420 t	50% joias 37% elétrica e eletrônica 8% moedas oficiais 5% outros	130 t Cerca de 87% do consumo.
Prata	560.000 t 3.800 t	27.000 t -	México 6.300 t	30% elétrica e eletrônica 26% joias e talheres 12% moedas e medalhas 3% fotografia 29% outros	1.100 t Cerca de 17% do consumo.
Cobre	870.000.000 t 11.212.000 t	20.000.000 t 363.300 t	Chile 5.800.000 t	43% construção 20% equip. de transporte 20% elétrica e eletrônica 10% produtos em geral 7% equip. industriais	160.000 t de sucata velha, aproximadamente 9% do consumo e 710.000 ton. de sucata nova
Zinco	250.000.000 t 2.464.000 t	13.000.000 t 163.400 t	China 4.300.000 t	1º galvanização 2º latão e bronze 3º ligas a base de zinco 4º outros	32.000 t cerca de 25% do produzido no ano

Fonte: Adaptado de USGS - U.S. Geological Survey (2020) e MME, SGM (2020).

O uso consciente dos metais é necessário, já que o nível de impacto ambiental gerado pelas atividades de extração é extremamente grande.

O elenco de efeitos nocivos originários da mineração sobre o ar, a água e o solo está bem documentado há bastante tempo, incluindo: drenagem de águas servidas, assoreamento, drenagem ácida e metais pesados em cursos d'água; gases ácidos ou contaminados com chumbo e outros gases nocivos ou de odores desagradáveis no ar; explosão e desmonte de rocha; nuvens de poeira oriundas dos caminhões, frente de lavra e bacias de rejeito; desmoronamento de bancadas das frentes de lavra em tiras a céu aberto e cicatrizes em outras formas de estocagem do capeamento ou

estéril; subsidência; e, talvez o mais deprimente de tudo, a decadência das cidades mineiras. (SOUZA, 1999).

Percebe-se que os impactos resultantes da extração estão presentes em diversas esferas, o que torna complexo a mensuração dos efeitos negativos gerados pela atividade. O caso do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana – Minas Gerais em novembro de 2015 é um exemplo do que a falta de cuidado com os dejetos de mineração pode acarretar. De acordo com Brito (2015), no incidente foram lançados cerca de 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos na bacia hidrográfica local, os quais apontam para um quadro desolador de impactos à flora, à fauna, à qualidade da água de abastecimento, além das repercussões socioambientais das comunidades que dependem das atividades locais.

Outro exemplo é a atividade de extração do ouro, a qual, de acordo com Caheté (1998), geralmente ocorre por garimpagem ou pela mineração industrial. Kliauga e Ferrante (2009) destacam que, a principal técnica de extração do ouro, no garimpo, é a amalgamação, a qual causa um aumento considerável no teor de mercúrio no ambiente. O mercúrio é um metal extremamente tóxico de efeito acumulativo no organismo humano, onde a parte que não forma amálgama com as partículas do ouro presentes para a sua captura, é perdida no ambiente. O mesmo ocorre posteriormente com a parcela amalgamada durante o processo de queima desta liga para purificar o ouro. Esse processo ocorre tanto nos garimpos legais quanto informais e ilegais, e a diferença é que no primeiro há uma série de normas que devem ser cumpridas, medições e compensações dos impactos ambientais. Segundo Wanderley (2015) pelo menos 90% dos garimpos na Amazônia atuam na informalidade e na ilegalidade. Esse último além de não cumprir parcialmente as regulamentações, desenvolve atividades em áreas proibidas.

De acordo com Barbosa e Souza (2000), cerca de 3 mil toneladas de mercúrio utilizados ao longo dos últimos 20 anos estão contaminando as águas e sedimentos nos rios da Amazônia. Os resultados nas populações ribeirinhas é um índice alarmante de 1,4 mg/kg do mercúrio presente por indivíduo, quando a máxima permitida pela Organização Mundial da Saúde é de 0,5 mg/kg. Esse índice já contribui para um desenvolvimento anormal das crianças, beirando o 1,5 mg/kg no qual já aparecem sintomas sub-clínicos.

No setor formal, tem-se o uso predominante do cianeto de sódio (NaCN) para a exploração do ouro. De acordo com Caheté (1998), para cada tonelada de minério é consumido 250 gramas de cianeto além de outras substâncias, tais como soda cáustica, ácido clorídrico, cal virgem, necessárias para a dissolução do ouro. É um processo que envolve uma série de reações químicas complexas e exige um rigoroso controle, pois ao contrário do mercúrio, o cianeto não atua como processo acumulativo crônico nos tecidos do organismo, podendo matar de forma mais imediata se não for manuseado dentro dos rigores técnicos. O principal meio atingido pelos contaminantes são os corpos d'água, que já ameaçados pela infiltração de combustíveis fósseis, água de esgotos, agrotóxicos, fertilizantes e outros compostos químicos tem o cianeto como um novo risco em expansão.

Destaca-se que não foram levados em consideração os índices de gastos energéticos, consumo hídrico para o processamento do material, entre tantos outros fatores que a exploração em si acarreta. Mas com essa análise específica, sobre a exploração do ouro, percebe-se o quão impactante é a extração, mesmo que voltada a uma esfera de atuação, no caso os dejetos.

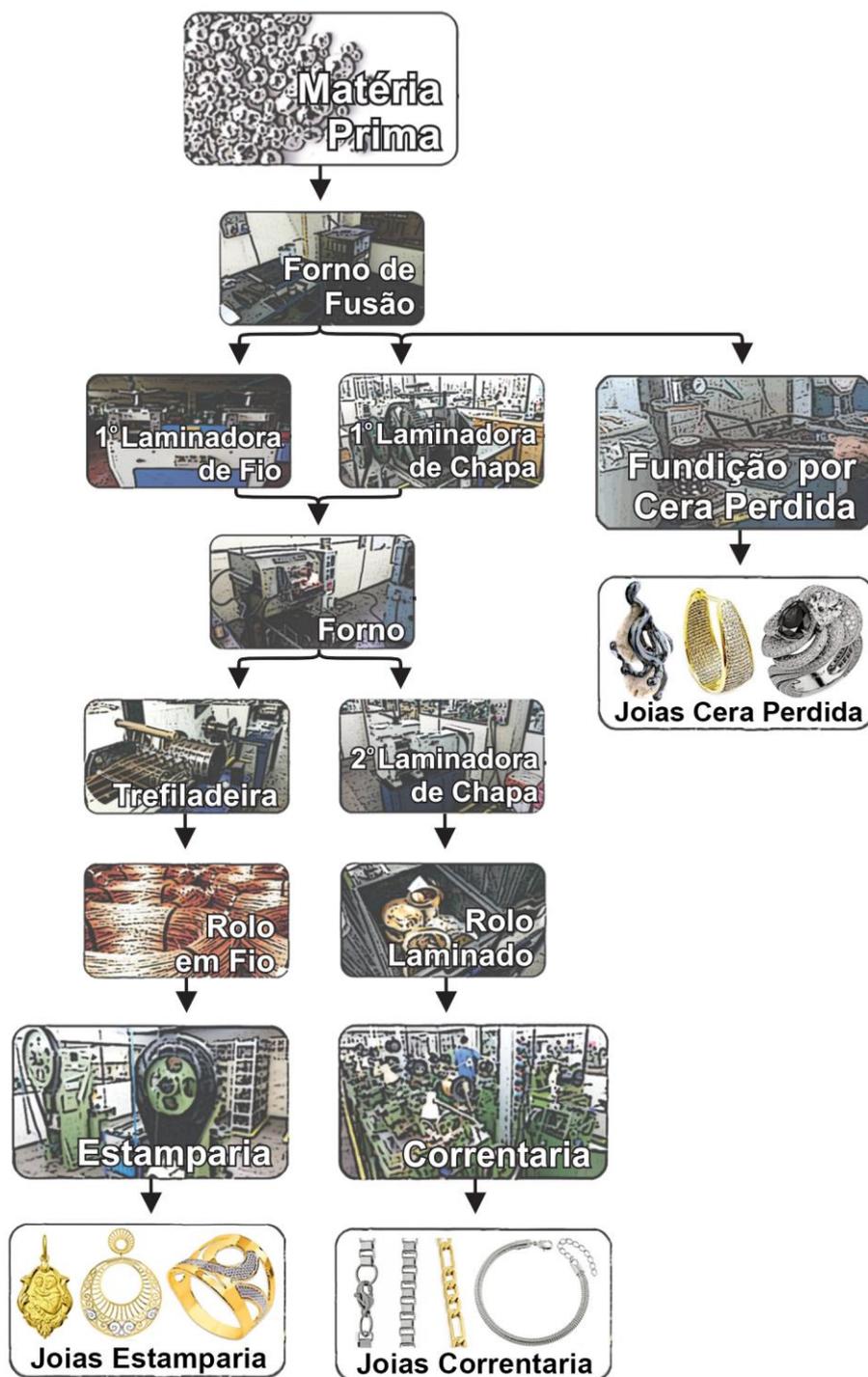
Os dados levantados nesse tópico reforçam os meios pelos quais esta pesquisa se justifica. Pois esses reforçam o quão importante são os avanços de estudos que possam fundamentar a redução e o uso responsável dos metais envolvidos na fabricação de joias. Importante destacar que, pelo alto valor de aquisição da matéria-prima, indústrias e designers buscam purificar o ouro, reciclando-o e reutilizando-o. Entretanto Veloso (2003) salienta que a purificação e reutilização da prata só é viável economicamente, a partir de média e grande quantidade.

## **2.6. PROCESSOS PRODUTIVOS DA INDÚSTRIA JOALHEIRA**

A história das joias tem sua origem no processo artesanal, dos objetos de adornos confeccionados a partir de ossos e pedras na pré-história, aos profissionais da ourivesaria, sendo que a habilidade manual na confecção das peças sempre foi fundamental. O caráter artesanal persiste, e Guilgen e Ferro (2015) reforçam que é o mais utilizado na fabricação de joias exclusivas, as quais ocupam em grande parte um nicho de mercado de alto valor, a exemplo das desenvolvidas por marcas de renome e suas linhas de alta joalheria como Boucheron, Cartier e Van Cleef & Arpels.

Já o ramo industrial, das joias produzidas em grande escala, desenvolve-se de modo a não depender tanto da capacidade técnica de um ourives, segmentando o conhecimento em processos que possam ser desenvolvidos cada vez mais por máquinas. Souza *et al.* (2012) ressalta que o desenvolvimento de novos instrumentos de produção é necessidade constante do sistema capitalista, na busca da maximização da produção e minimização do tempo gasto para produção. As máquinas possibilitaram a produção em larga escala, a transição do artesanal e manufaturado para o maquinofatura, atuando ao longo de grande parte da cadeia produtiva. Os níveis de mecanização variam muito dentro das empresas e que alguns setores possuem trabalho com caráter mais artesanal e manufaturado do que maquinofaturado. Para entender o sistema de produção, tem-se como exemplo uma indústria de pequeno a médio porte, onde comumente podem ser encontrados produtos oriundos de três macroprocessos: correntaria, estamparia e fundição por cera perdida. A Figura 15 exemplifica os principais processos envolvidos e maquinários utilizados até essas três etapas, onde a partir dessas, cada produto seguirá padrões específicos de soldagem, acabamento, montagem e banho, conforme cada projeto necessitar.

Figura 15 – Processos de fabricação envolvidos na indústria joalheira, da matéria prima aos três macro processos de confecção de jóias, a correntaria, a estamparia e a fundição por cera perdida,



Fonte: Autor.

No forno de fusão a matéria-prima é transformada, de metal em estado sólido para estado líquido, através de alta temperatura, a qual varia conforme o metal e a liga utilizada. O metal fundido pode ser vertido em moldes de sulfato de cálcio para o processo de fundição por cera perdida ou vertido em moldes de ferro fundido chamados de lingoteiras, que dão forma a blocos de perfil retangular ou barras.

Os blocos de metal de perfil retangular são laminados sucessivas vezes, por uma laminadora de chapa, denominada assim por possuir dois cilindros com corpos totalmente paralelos entre si. O metal é forçado a passar por esses cilindros, regulados para que a cada passada fiquem mais próximos entre si e com a diminuição da espessura do metal tem-se o aumento do comprimento e da largura da chapa. Durante as laminações, são intercalados processos de recozimento do metal no forno. É comum que haja duas máquinas laminadoras, a primeira para as placas de maior espessura e a segunda para os processos de laminação final, produzindo os rolos laminados de espessuras variadas que podem chegar a 0,3mm, dimensão essa bastante utilizada nas joias estampadas. Findo o processo de laminação os rolos de metal laminado são encaminhados às máquinas de estamperia, onde são estampados por prensas hidráulicas de acordo com a matriz, feita em aço temperado, de cada projeto, processo denominado por Fonseca (2006) como formativo (Figura 16).

Figura 16 – Matriz em aço temperado, serve como molde para o metal laminado que é encaminhado ao processo de estamperia. À direita, em detalhe, a matriz da medalha de Nossa Senhora Aparecida, utilizada na confecção de escapulários em metal.



Fonte: Autor.

As barras são encaminhadas para laminadora de fios, a qual possui cilindros com entradas semicirculares, dando a pré-forma aos fios. Laminados por várias vezes, intercala-se o processo de recozimento no forno, a exemplo da laminação de chapas. Após serem pré-formatados, os fios são encaminhados à trefiladeira, máquina que permite a adaptação de fieiras, possibilitando a redução do diâmetro do fio a medidas muito pequenas como 0.26mm. Essas fieiras são moldes em aço, com aberturas cônicas que diminuem gradativamente seu diâmetro, pelas quais o metal é forçado a passar (Figura 17). Ao final do processo os rolos de metal em fio são encaminhados para a correntaria, onde máquinas transformam o fio em corrente, seccionando, moldando e fechando, elo por elo.

Figura 17 – Processo de trefilagem. Cinco fieiras adaptadas na máquina para a redução gradual da espessura do fio de metal.



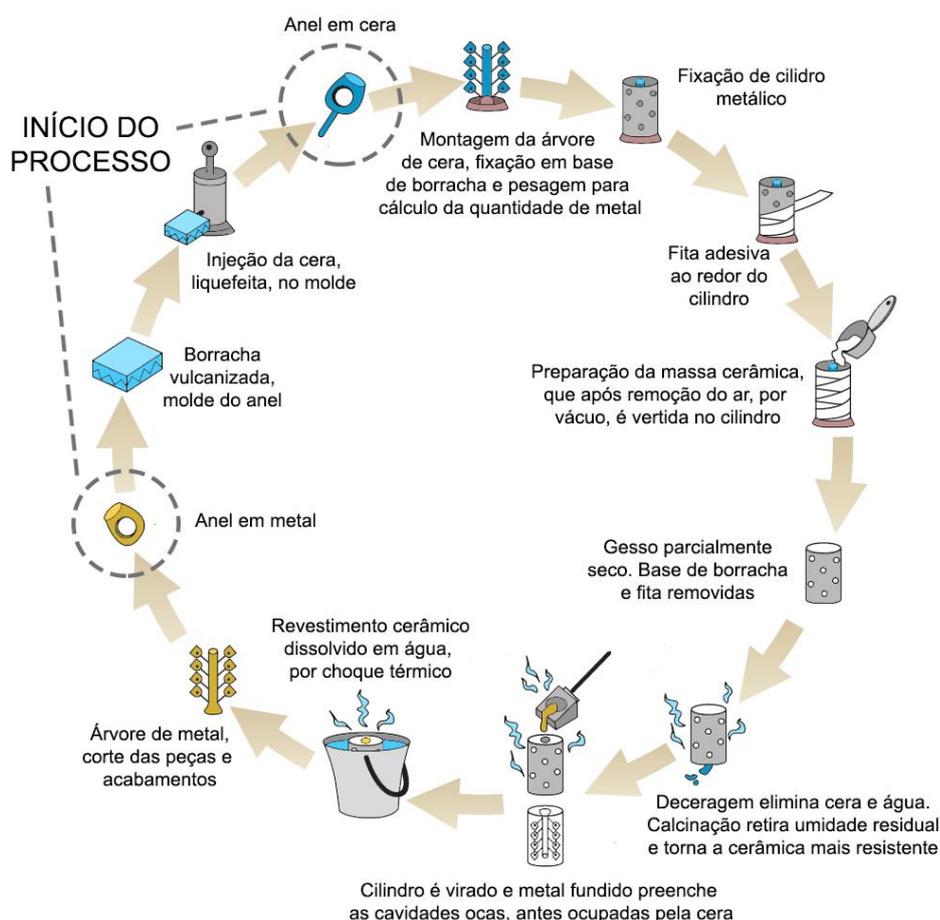
Fonte: Autor.

Com a compreensão dos principais pontos acerca do processo produtivo, o levantamento informacional tem foco no detalhamento do processo de fundição por cera perdida, etapa que faz uso das árvores de fundição para o desenvolvimento das joias. Como a fundição por cera perdida é um processo produtivo em expansão, segundo Guilgen e Ferro (2015), a produção seriada de modelos em cera tem sido cada vez mais utilizada na prática da joalheria contemporânea.

## 2.6.1 Fundição por Cera Perdida

A fundição por cera perdida, também chamada de microfundição, de acordo Kliauga e Ferrante (2009), é o processo mais utilizado no setor de joalheria, principalmente pela capacidade de reprodução de detalhes, além de ser muito rápido o que possibilita a produção de modelos variados com a velocidade que o mercado consumidor exige (Figura 18). De acordo com Giuliano (2008), a técnica consiste na aplicação de um revestimento cerâmico sobre uma matriz de cera, formando um molde; em seguida a cera é eliminada do interior deixando o vazio no molde cerâmico, no qual é vertido o metal em estado líquido. “O processo é simples em essência, mas está longe de ser uma ciência exata, pois é feito com muitos detalhes que requerem atenção, prática e experimentação”. (SANTOS, 2013, p.166). Rosseti (2011) afirma que a fundição por cera perdida é o mais completo, eficiente e utilizado processo de produção, possibilitando a produção de modelos de todas as formas e tipos.

Figura 18 – Ciclo do processo de fundição por cera perdida.



Fonte: Adaptado de Pompei (2005).

O processo é cíclico, e começa com o desenvolvimento da matriz, a qual pode ser confeccionada diretamente no metal, em cera ou resina. Para o entendimento do ciclo de fundição por cera perdida, nesta tese, são adotados os dois primeiros casos: matrizes em metal e cera. Caso comece com a matriz em metal, o processo fará um ciclo e terminará com as cópias em metal. Se começar com a matriz em cera, seguirá o processo até que a mesma seja fundida em metal e após completará um ciclo terminando com as cópias em metal.

Para a descrição a seguir, considera-se o início do processo na matriz em metal, confeccionada normalmente em latão, a partir da qual são geradas as cópias. A matriz é fixada a um fio de metal, com diâmetros variados, formando o canal de ataque, chamado na indústria de "jito". De acordo com Ferrante e Walter (2010) a espessura da parede dos metais injetados no processo de fundição por cera perdida admite a margem de 1mm a 75mm. Na prática, sabe-se que podem ser trabalhados com o limite mínimo de espessuras em 0.6mm a 0.5mm, necessários principalmente em áreas onde há maior fluxo de material, tanto para cera como posteriormente para o metal. Dependendo da complexidade da peça podem ser adicionados mais de um canal de ataque para auxiliar na saída da cera e posterior entrada do metal. A matriz é então envolta por uma borracha, normalmente à base de silicone. Kliauga e Ferrante (2009) enfatizam que, trata-se de um polímero composto de cadeias de silício, oxigênio e hidrogênio. Esse material possui grande capacidade de reprodução de detalhes, resistência ao calor e ao rasgamento. A borracha é então encaminhada à vulcanizadora, equipamento no qual é colocado sob pressão entre duas chapas quentes, no qual ocorre a cura do material a 180°C e 2 minutos para cada milímetro de espessura (Kliauga e Ferrante, 2009). Santos (2013) salienta que borrachas de vulcanização a quente, amplamente utilizadas, podem sofrer reduções que variam de 2% a 10%, pois ao ser aquecido o mesmo expande-se e quando resfriado contrai-se. O próximo processo é o corte da borracha, realizado nas laterais de maneira que após a retirada da matriz as duas partes do molde encaixem-se novamente. O corte é feito manualmente, com auxílio de um bisturi, recomendando-se que, na ausência de pinos-guia, seja feito em ziguezague. Esse tipo de corte forma dentes na borracha o que auxilia na precisão do encaixe posterior e reduz problemas com rebarbas na injeção da cera. Com a borracha finalizada tem-se o processo de injeção (Figura 19), processo em que Kliauga e Ferrante (2009) reforçam que a injetora aquece a cera a aproximadamente 70°C, e dependendo do equipamento, exerce pressão que varia de 0,5 bar a 10 bar. Líquida, a cera é então inserida no orifício, antes ocupado pela matriz de metal. Muitas injetoras trabalham com sistema a vácuo sugando o ar do interior da borracha e após injetando a cera, reduzindo problemas com peças parcialmente preenchidas. As ceras para fundição disponíveis no mercado variam quanto à temperatura de injeção, penetrabilidade, flexibilidade, mas de acordo com Pohlmann (2012), são típicos materiais termoplásticos, alternando do estado sólido rígido para o fluido quando submetidas ao calor. Salem (2002) reitera que para a escolha da cera devem ser observados: a plasticidade, flexibilidade para desmolde; memória, propriedade de ser deformada durante o desmolde e voltar à forma original; armazenamento, tempo de permanência de suas propriedades após injeção; leitura, fidelidade de cópia de detalhes; retração, característica

importante em superfícies amplas. Retirado da borracha, o modelo em cera sólida é submetido ao processo manual de retirada de rebarbas que possam ter ficado entre os encaixes das borrachas e para isso é comum à utilização de um bisturi (Figura 19). Findo o processo de rebarba, modelo por modelo é fixado manualmente em um cilindro central de cera, o canal de alimentação que corresponde ao caule da árvore. Normalmente com o auxílio de um ferro de solda ou pirógrafo, a cera é aquecida nos canais de ataque, agora em cera, para que após o resfriamento fixe-se ao canal de alimentação, formando a rede de canais que alimentará as peças, resultando na estrutura conhecida como árvore de fundição (Figura 19). Kliauga e Ferrante (2009) acrescentam que o dimensionamento do canal de alimentação, comumente, varia de 12mm a 16mm de diâmetro e 80mm a 220mm de altura. Quanto ao posicionamento, as peças devem ficar inclinadas em relação ao canal de alimentação, sendo reforçado por Santos (2013) o ângulo de 45°, para que se tenha um bom processo de deceragem e posterior injeção do metal. GoldStar (2017) explica que com o ângulo adequado o metal líquido pode fluir, quando o metal que está solidificando estiver encolhendo. A árvore é fixada a uma base de borracha e lavada a seco para retirar partículas de sujeira que possam contaminar o molde, após é pesada, para que se calcule a necessidade de metal a ser vertido. Posteriormente é encaixada em um cilindro metálico, em aço carbono ou aço inoxidável, com furos laterais. Com a vedação desses furos, usualmente por fita adesiva, é vertido sulfato de cálcio, previamente preparado com água, no interior do cilindro (Figura 19). De acordo com Kliauga e Ferrante (2009), tal massa cerâmica é composta essencialmente de: 60% a 80% sílica, 20% a 40% gesso e 1% aditivos.

Lana (2010) reforça que após esse processo o cilindro é colocado em uma centrífuga e/ou vácuo para remover possíveis bolhas de ar que possam ficar aprisionadas no molde, acarretando em falhas. Com a secagem parcial do sulfato de cálcio, aproximadamente duas horas, o adesivo e a base de borracha são retirados. Na próxima etapa chamada de deceragem, o cilindro é aquecido em forno, em temperaturas entre 100 e 200°C, com isso a cera é liquefeita e escorre para fora do molde, esvaziando as cavidades, além de eliminar a água. Findo a deceragem, o cilindro é levado a fornos, capazes de atingir 1000 °C, processo, chamado de calcinação, que retira a umidade residual e torna a cerâmica mais resistente a pressão hidrostática do metal líquido (Kliauga e Ferrante, 2009). Santos (2013) destaca que o aquecimento deve ser feito de forma gradual, começando com temperatura baixa em 150°C, atingindo 730°C, no qual permanece por duas horas e por fim reduzindo a 660°C, onde permanecendo por uma hora. GoldStar (2019) ressalta que em joias onde haja cravação de gemas ainda na cera, não deve ser excedida a temperatura de 630°C. Com a queima completa o cilindro é resfriado até atingir a temperatura de vazamento a qual varia conforme o metal a ser fundido, Kliauga e Ferrante (2009) reiteram que a temperatura de vazamento pode ser calculada pela equação, na qual  $T_{\text{liquidus}}$  é a temperatura em que se inicia a solidificação, (2)

$$T_{\text{CILINDRO}} = \frac{T_{\text{LIQUIDUS}}}{2} + 50^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

Figura 19 – Processos na fundição por cera perdida. (A) Injeção da cera e retirada do modelo, da borracha; (B) Retirada das rebarbas com auxílio de bisturi; (C) Montagem da árvore de fundição com auxílio do pirógrafo; (D) Da direita para esquerda, as bases de borracha na qual as árvores são fixadas, árvores já alocadas nos cilindros vedados, cilindros com sulfato de cálcio parcialmente seco; (E) forno fundindo o metal a ser vertido; (F) forno com cilindros em temperatura de vazamento; (G) da esquerda para direita, os cilindros sendo acoplados nas câmaras de vácuo e pressão, o metal vertido manualmente.



Fonte: Autor.

Com a temperatura adequada do cilindro, o metal fundido, comumente em fornos de indução eletromagnética, é vertido, escoando através dos canais e preenchendo as cavidades (Figura 19). Nessa etapa do processo é comum fazer uso do vácuo e pressão, através de câmaras acopladas ao forno, ou uso do processo de centrifugação, resultando em um melhor fluxo do metal e conseqüente preenchimento completo das formas e detalhes. Terminado o processo de fundição, o cilindro é retirado do forno. Santos (2013) afirma, que o cilindro deve descansar por aproximadamente 10 minutos para então ser mergulhado num tanque com água, o qual, com o choque térmico, dissolve o sulfato de cálcio. Resíduos permanentes do revestimento podem ser retirados em lavagem com jato de água sob pressão. Em alguns casos, nos quais se tenham gemas frágeis já cravadas no modelo em cera, para evitar que trinquem por choque térmico, pode se optar por abrir o molde de modo

manual e mecânico. Kliauga e Ferrante (2009) destacam que, dependendo do método de fundição, as peças podem estar parcialmente oxidadas, sendo necessário um banho ácido de limpeza e posterior imersão em solução alcalina para então serem lavadas em água corrente. Por fim tem-se a árvore em metal, da qual os modelos são cortados com auxílio de alicates, seguindo o processo de acabamento superficial para a finalização do produto.

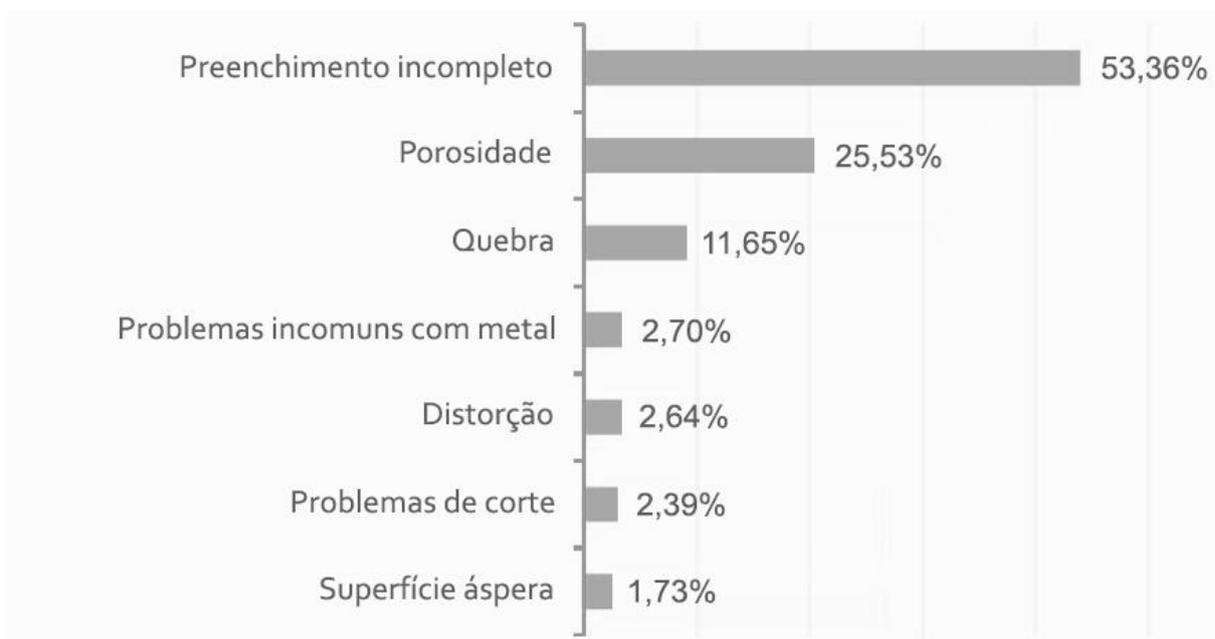
## **2.6.2 Problemas na fundição e a árvore de fundição**

Os defeitos de peças fundidas são um problema recorrente nas indústrias de diversos ramos, as quais fazem uso da técnica no desenvolvimento de seus produtos. Siekanski e Borkowski (2003) ressaltam que as não conformidades no processo de fundição são influenciadas geralmente pela negligência ou não cumprimento das recomendações por parte dos trabalhadores. Pandit *et al.* (2012) reiteram que, mesmo em um processo completamente controlado, os defeitos de fundição são observados e conseqüentemente o processo de fundição é conhecido por suas incertezas as quais desafiam explicações acerca de tais defeitos. Castro e Junqueira (1996) destacam que para normalizar a caracterização dos defeitos, o Comité Internacional das Associações Técnicas de Fundição (CIATF), elencou-os nas seguintes categorias:

- Excrecências metálicas;
- Cavidade;
- Soluções de continuidade;
- Defeitos de superfície;
- Formas incompletas;
- Dimensões ou formas incorretas;
- Inclusões e anomalias estruturais.

Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013) identificaram e quantificaram, com base no total de defeitos encontrados no processo de fundição em uma fábrica de joias, qual porcentagem cada categoria ocupa (Figura 20).

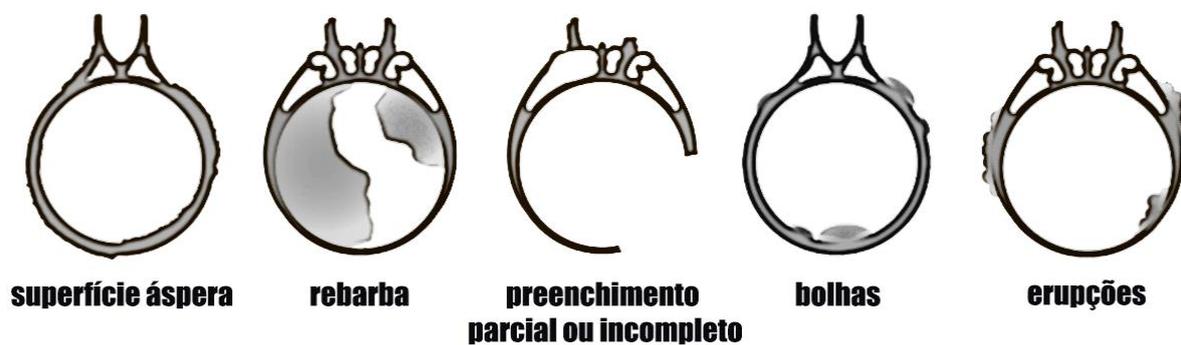
Figura 20 – Porcentagens dos defeitos recorrentes na fundição da indústria joalheira no ano 2006 – 2008.



Fonte: Adaptado de Tammachot (2013).

GoldStar (2019) elencou os cinco defeitos recorrentes na fundição de peças, direcionados para a indústria joalheira, em: superfície áspera; rebarba; preenchimento parcial ou incompleto, bolhas e erupções (Figura 21). O Quadro 3 compila os defeitos elencados por GoldStar (2019) ressaltando as possíveis causas e quais soluções podem ser empregadas.

Figura 21 – Defeitos de fundição por cera perdida, recorrentes na indústria joalheira.



Fonte: Adaptado de GoldStar Powder (2019).

Quadro 3 – Defeitos recorrentes na indústria joalheira no processo de fundição por cera perdida, suas possíveis causas e soluções.

<b>Defeito</b>	<b>Possível Causa</b>	<b>Solução</b>
Superfície áspera	Superaquecer cilindro durante a queima.	Assegurar que o ganho de temperatura do forno não exceda 250°C/h. Manter a temperatura do primeiro ciclo da queima entre 220°C e 250°C e mantê-la por no mínimo 4h 30min horas. Se o problema persistir, aumentar o tempo.
	Poeira na cera ou nas árvores de cera.	Assegurar que as peças em cera e as árvores de cera após finalizadas sejam acondicionadas em uma atmosfera seca, limpa e livre de poeira.
	Temperatura incorreta de metal.	Reduzir ou aumentar a temperatura do metal.
	Cera áspera.	Não utilizar o talco que facilita a retirada das peças de cera do molde de forma excessiva.
	Queima de cilindros muito rápida	Após o preenchimento dos cilindros, aguardar o mínimo de 90 minutos para a queima.
	Preparo incorreto da solução de sulfato de cálcio	Atentar para proporção correta entre as partes, atingir a temperatura de 21°C para a mistura, utilizar água limpa e deionizada, água deve ser a primeira a entrar na mistura.
	Deceragem por tempo muito longo	Deceragem deve ser de no máximo 60 minutos em pressão atmosférica. A partir de 90 minutos o vapor gerado no processo começa a erodir a superfície. Não realizar a deceragem em compartimento fechado.
Rebarbas	Incorreta proporção entre água e sulfato de cálcio.	Assegurar proporção correta, sulfato de cálcio:água. Mistura convencional - 40:100 Mistura à vácuo - 38:100
	Ciclo de queima incorreto.	Assegurar que o ganho de temperatura do ciclo não ultrapasse os 250°C/h Manter a temperatura do primeiro estágio da queima entre 220°C e 250°C mantendo-a assim pelo mínimo de 4h 30min. Se o problema persistir aumentar o tempo.
	Forças excessivas na fundição.	Diminuir o torque e as rotações por minuto na fundição por centrífuga ou reduzir pressão na fundição por vácuo.
	Distúrbios nos cilindros durante a secagem.	Após verter o sulfato de cálcio preparado, não mover o cilindro, retirar a base ou remover a fita por no mínimo 90 minutos.
	Preenchimento com trabalho em demasia.	Assegurar que os cilindros metálicos estejam preenchidos de sulfato de cálcio, retirados do vácuo e colocados em repouso em no máximo 9 minutos após o início da mistura.

(Continua)

<b>Defeito</b>	<b>Possível Causa</b>	<b>Solução</b>
Rebarbas	Ceras muito próximas.	Modelos de cera muito próximos criam uma camada muito fina de revestimento de sulfato de cálcio. Assegurar o mínimo de 5mm de espaço entre o topo e a lateral do cilindro com os modelos.
	Solução de água e sulfato de cálcio muito quente ou fria.	Ajustar a solução para 21°C com tolerância de 1°C, controlando a temperatura da água.
	Molde seco antes da queima.	Se os moldes permanecerem em repouso mais de 4 horas antes da queima, colocar uma toalha úmida sobre os mesmos para que não sequem.
	Cilindro com vazamento pela base durante preenchimento.	Assegurar boa vedação entre a base da árvore de fundição e a base de borracha. Recomenda-se que seja selada com cera derretida.
Preenchimento parcial ou incompleto	Temperatura de metal incorreta.	Elevar a temperatura do metal primeiro, antes de elevar a temperatura dos cilindros.
	Temperatura de cilindro incorreta.	Aumentar a temperatura do cilindro.
	Sistema de alimentação incorreto.	A alimentação deve ser fixada na parte mais espessa da peça a ser fundida e deve corresponder a no mínimo 25% da espessura da peça.
	Força centrífuga insuficiente.	Aumentar primeiramente o torque e após as rotações por minuto. O aumento deve ser em pequenas proporções, 5% a cada vez.
	Pouco vácuo durante a fundição.	Trocar o óleo da bomba regularmente. Checar a vedação e bloqueios nos tubos de vácuo.
	Pressão insuficiente.	Aumentar a pressão em pequenas proporções, 5% a cada vez.
Bolhas, esferas completas e incompletas	Problema com vácuo	Mudar o óleo da bomba, checar por defeitos nos canos e câmaras de vácuo.
	Poeira na cera ou nas árvores de cera.	Assegurar que após as peças em cera e as árvores de cera após finalizadas sejam acondicionadas em uma atmosfera seca, limpa e livre de poeira.
	Cera áspera.	Não utilizar o talco que facilita a retirada das peças de cera do molde de forma excessiva.
	Preparo incorreto da solução de sulfato de cálcio	Atentar para proporção correta entre as partes, atingir a temperatura de 21°C para a mistura, utilizar água limpa e deionizada, água deve ser a primeira a entrar na mistura.
	Não realizar vácuo nos cilindros após verter o metal	Assegurar que o vácuo atue por 1 minuto, após o metal ser vertido nos cilindros.

(Conclusão)

<b>Defeito</b>	<b>Possível Causa</b>	<b>Solução</b>
Erupções	Primeiro estágio de queima muito curto.	Assegurar que o primeiro estágio de queima a 220°C seja de 4h 30min. Se o problema persistir, aumentar para 5h 30min.
	Cilindro metálico em temperatura muito elevada na deceragem.	Assegurar que a temperatura do primeiro estágio de queima mantenha-se entre 220°C e 250°C.
	Cilindro metálico colocado no forno muito cedo, após preenchimento do sulfato de cálcio.	Aguardar o mínimo de uma hora após o preenchimento do sulfato de cálcio para realizar a queima.
	Cilindros dispostos muito próximos no forno.	Manter o mínimo de 50mm de espaço entre os cilindros durante a queima.

Fonte: Adaptado de GoldStar (2019)

De acordo com ASM (1988) muitos defeitos, tais com porosidade e retração dependem do modo como a liga metálica é solidificada no molde, no qual a composição da liga e as condições de temperatura para o fluxo do metal atuam diretamente na solidificação das microestruturas. Kliauga e Ferrante (2009) explicam, que a porosidade pode ser causada pela contração do metal durante a solidificação ou pela presença de gases aprisionados, essa última chamada de cavidades superficiais esféricas. Kliauga e Ferrante (2009) enfatizam que, tais cavidades podem ainda ser originados por inclusões, a exemplo de fragmentos de grafite provenientes do cadinho de fusão, o que chamam de poros originados por inclusões. Entre os problemas recorrentes na fundição por cera perdida elencados por GoldStar (2019), grande parte ocorre em variáveis como: temperatura, tempo, proporção e vácuo. Aqueles direcionados para a morfologia da árvore de fundição apontam para a necessidade do acondicionamento do espaçamento mínimo entre as peças, o qual deve corresponder ao mínimo de 5mm em relação ao topo e lateral do cilindro. Kliauga e Ferrante (2009) reforçam que o espaçamento de 4mm a 5mm também deve ser respeitado entre os modelos e que a distância entre o topo do molde cerâmico e os modelos no topo da árvore de fundição deve corresponder ao mínimo de 20mm para que o revestimento não quebre. Demais problemas relacionados a morfologia da árvore estão, a indicação de que o canal de ataque deve ser fixado no ponto mais espesso de cada peça, correspondendo a 25% de espessura da mesma. O posicionamento do canal de ataque no ponto mais espesso da peça, em muitos casos não pode ser realizado. Devem ser ponderados para a correta alocação do canal de ataque individual de cada joia: o posicionamento da geometria da peça em relação ao canal de alimentação para a facilitação da deceragem e o local de fácil retirada das marcas do canal de ataque individual de cada peça pelo processo de acabamento. Na Figura 22 observamos o estudo para o sistema de alimentação de um anel, o da esquerda com o canal de ataque alocado na porção mais fina terá porosidade no topo espesso após a fundição. O anel central não terá problemas de porosidade, o canal de ataque bipartido alocado na porção mais espessa

garante uma boa fundição, entretanto há um trabalho maior no acabamento para a retirada de duas marcas as quais estão na posição de destaque da peça o que requer um cuidado ainda maior. O anel da direita apresenta um modo inteligente de resolver o problema, com o redesenho da peça que passa a ser oca, evita a porosidade no topo do anel e com o canal de ataque alocado em apenas um ponto o qual facilita processo posterior de acabamento. Vale ressaltar que a redução no uso do material com a manutenção o aspecto formal, no modelo da direita, deve ocorrer respeitando os limites de espessura necessários para o preenchimento da peça, atentando para não fragilizar a estrutura em demasia e que aspectos ergonômicos podem ser prejudicados em função dessa reconfiguração. Obviamente que tais parâmetros requerem uma análise mais aprofundada, na qual a tomada de decisão é direcionada de acordo com o nicho de mercado e público alvo que cada empresa pretende atingir.

Figura 22 – Estudo para melhor alocação do canal de ataque uma peça de joalheria.



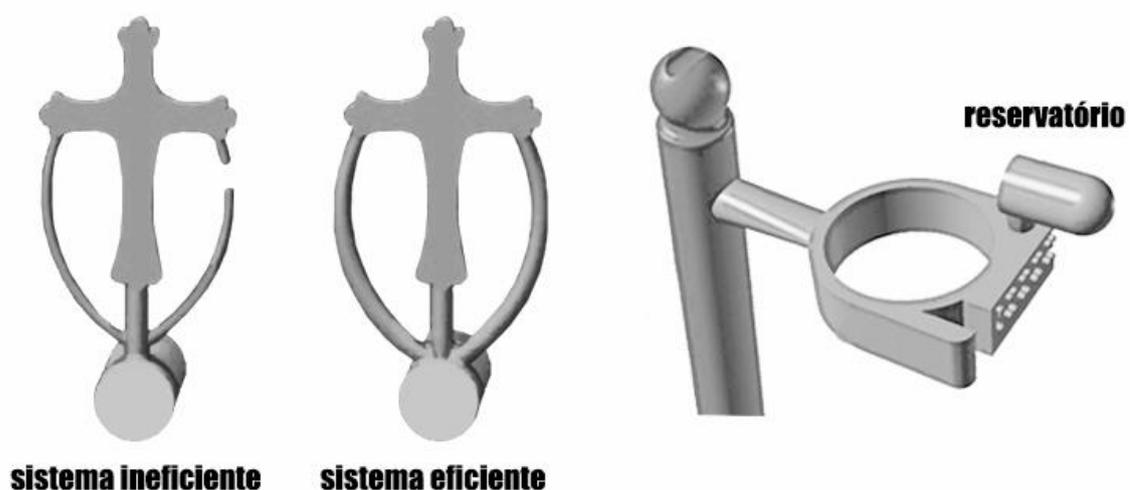
Fonte: Adaptado de Bell (2019).

Bell (2019) reitera que grande parte dos defeitos de fundição podem ser atribuídos a um desenho inadequado da estrutura de alimentação, mas que as regras para uma boa prática não estão bem definidas. Teague (2019) enfatiza que para reduzir os gases que geram porosidade o metal deve preencher a peça o mais rápido possível com o mínimo de turbulência e para tanto agrupa as seguintes dicas:

- Alimentação da peça pelo ponto mais espesso;
- Reduzir a turbulência facilitando o fluxo pelas cavidades do molde;

- Evitar formas com cantos vivos, elas geram turbulências, podendo quebrar pedaços do revestimento do molde;
- Utilizar o mínimo possível de canais de ataque para preencher a peça. Caso necessário a utilização de mais canais, Bell (2019) enfatiza o cuidado com o posicionamento bem como o diâmetro correto dos canais de ataque para que o sistema seja balanceado e funcional. Na Figura 23 observa-se um sistema ineficiente de alimentação na qual os canais de ataque laterais com secção transversal muito pequena sequer chegam a completar. Por seu diâmetro muito pequeno, a peça depende basicamente do canal de ataque central, o que pode acarretar o preenchimento incompleto de pontos como os braços da cruz. Já no sistema eficiente, além de ter o aumento necessário do diâmetro dos canais de ataque para facilitar o fluxo do metal, o posicionamento da base é modificado, alocando-se próxima ao canal de alimentação da árvore para assim suprir o metal necessário;
- Assegurar que o canal de ataque tenha secção transversal inicial maior do que a secção transversal em contato com a peça, pelo menos 1.25 vezes
- Áreas espessas que não podem ser alimentadas pelo canal de ataque, tão pouco ocadas, devem possuir outro método, como um reservatório de metal a subir, alocado na parte (Figura 23). Tal reservatório além de fornecer metal líquido conforme a peça esfria, redirecionará para si a porosidade que ficaria concentrada na peça.

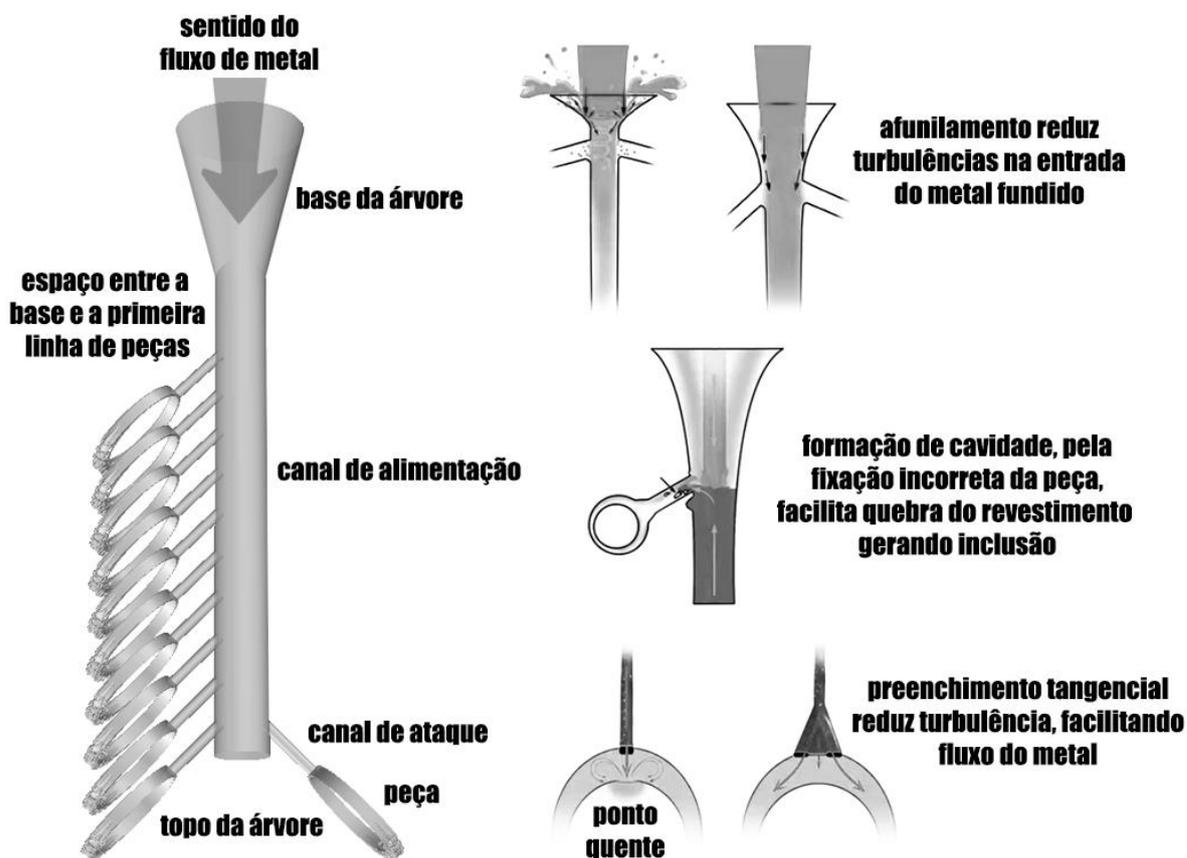
Figura 23 – Estudo quanto aos canais de ataque. À esquerda a diferenciação de um sistema de alimentação ineficiente para um eficiente e à direita o reservatório de metal, indicado para peças na qual o canal de ataque não pode ser posicionado no ponto mais espesso da peça.



Fonte: Adaptado de Bell (2019) e Teague (2019).

Teague (2019) destaca que proporcionar maior volume na estrutura de alimentação, principalmente na base da árvore, acreditando que isso aumenta a pressão exercida nas peças e consequentemente facilita seu preenchimento, na verdade é apenas desperdício de metal uma vez que a pressão é relativa à profundidade e não ao volume de metal. Nesse entendimento o pesquisador indica a utilização de uma estrutura de alimentação alongada com forma afunilada, para um bom preenchimento. Entretanto, Kliauga e Ferrante (2009) enfatizam que o canal de alimentação não pode ser muito fino, pois funciona como reservatório de metal líquido enquanto as peças se solidificam, compensando as contrações. GoldStar (2017) reforça a eficácia do sistema de afunilamento para a redução de turbulências, o que evita a ruptura do revestimento (Figura 24).

Figura 24 – Partes que compõem a árvore de fundição e detalhes estruturais que contribuem para uma boa fundição.



Fonte: Adaptado de Goldstar (2017).

Specialist Refractory Services (2019) explica que o canal de alimentação da árvore de fundição serve como reservatório de metal fundido e sua estrutura deve ser eficiente de modo a alimentar as peças enquanto elas solidificam para evitar problemas como a retração de metal. Bell

(2019) reforça que as formas arredondadas são as melhores geometrias para a estrutura de alimentação por conduzir o metal com o mínimo de perda de temperatura, se comparadas às demais formas com o mesmo peso. Specialist Refractory Services (2019) agrupou diversos pontos para uma boa árvore de fundição, dentre os quais:

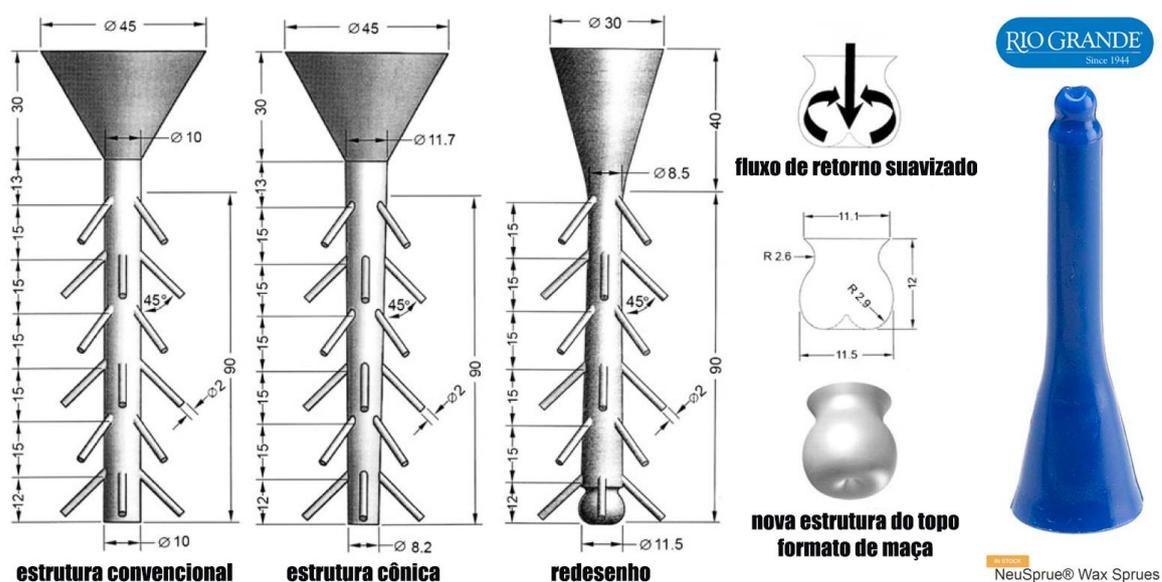
- Tamanho dos canais de ataque devem ser proporcionais às peças, evitando formas que afinem demais e curvas com cantos vivos. GoldStar (2017) explica a importância do ponto de contato com a peça possuir geometria de modo a fornecer o preenchimento tangencial da peça, o qual comparado com o canal de ataque convencional gera menos turbulência, facilitando o fluxo e evitando a formação de ponto quente (Figura 24);
- O canal de alimentação deve ser composto por cera com temperatura de fusão menor do que a que compõem as peças, facilitando a saída da cera do molde sem a ebulição que pode acarretar na erosão do molde.
- Evitar fundir peças leves e pesadas na mesma árvore de fundição, uma vez que peças leves e detalhadas requerem uma temperatura de metal maior. Caso seja necessário, GoldStar (2017) indica posicionar as peças maiores e mais pesadas na parte de baixo da árvore e as mais finas e leve no topo. Quando o metal começa a ser vertido na árvore, sua temperatura está maior, o que facilita o preenchimento das peças finas e detalhadas no topo e quando as peças maiores da base começarem a ser preenchidas o metal estará mais frio, solidificando mais rápido e reduzindo a porosidade;
- Ao fixar os canais de ataque ao canal de alimentação evitar a formação de depressões ou cavidades as quais podem se soltar durante a fundição gerando inclusões no metal (Figura 24);
- Deixar um espaço entre a base da árvore de fundição e a primeira linha de peças fixadas, pois esta área concentra a maior porcentagem de retração do metal e porosidade (Figura 24).

Bell (2019) aponta para diversos fatores que auxiliam uma boa estruturação da árvore de fundição, dos quais podem ser salientados:

- No canal de ataque duplo para as peças, comumente utiliza-se o formato “Y”. Deve-se atentar para isto, pois a base da letra torna-se o canal primário, logo, é necessário que tenha área seccional suficiente para alimentar os dois canais secundários. Recomenda-se cortar a base da letra para que o canal forme um “V” o qual proporciona menos perda de temperatura, pois é um caminho mais curto e menos tortuoso;
- Atentar para que a estrutura de alimentação proporcione o melhor balanço formal, já que o metal líquido escorre pelo caminho de menor resistência.

A pesquisa acerca do redesenho da árvore de fundição proposta por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013) apresentaram resultados significativos na melhora do fluxo de metal bem como proporcionando o fluxo suave do retorno do metal ao atingir o topo da árvore. Das três estruturas analisadas (Figura 25), a configurada de modo convencional obteve 8,33% e 35,12% de peças com preenchimento incompleto nos dois tipos de amostras analisadas, enquanto que a configuração cônica obteve 12,50% e 48,81%, já para o redesenho proposto 0 e 11,91%. Observa-se que estrutura similar a proposta pelos autores é fabricada e disponibilizada atualmente no meio comercial pela Rio Grande, empresa de renome mundial na oferta de insumos, equipamentos e suprimentos para o ramo joalheiro.

Figura 25 – Configuração da árvore de fundição de acordo com a estrutura convencional, cônica e do redesenho proposto por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013). Estrutura similar ao redesenho proposto pelos autores, fabricada e disponibilizada no meio comercial pela Rio Grande, à direita (2021).



Fonte: Adaptado de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013) e Rio Grande (2021)

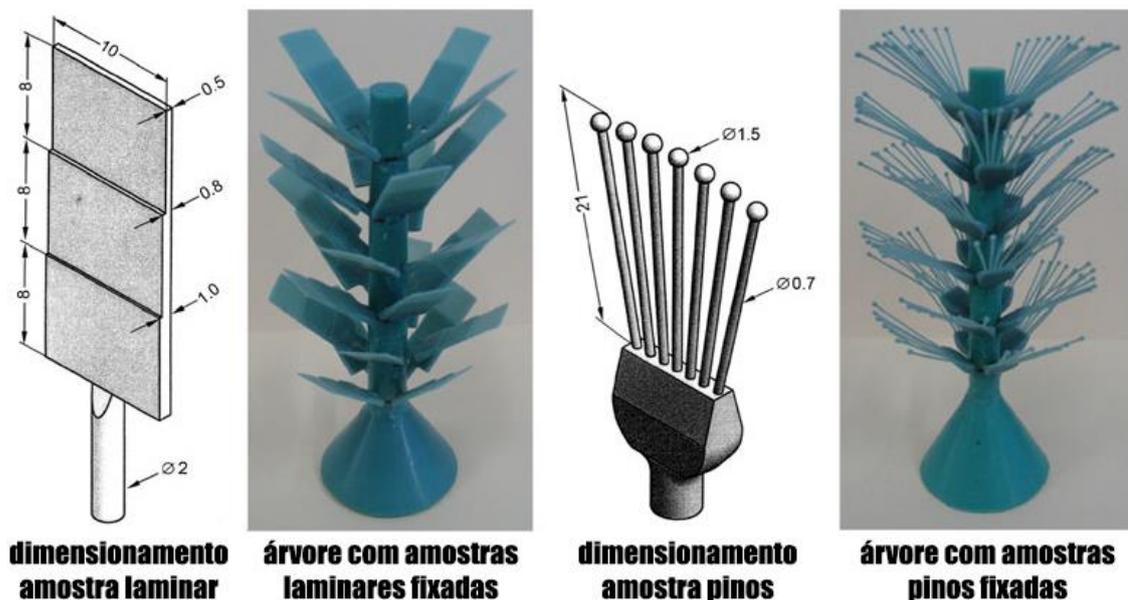
As amostras analisadas contemplaram o limite dimensional para a injeção da cera no molde em um corpo de prova laminar bem como uma amostra de pino de brinco que frequentemente apresenta preenchimento incompleto devido a sua forma de dimensionamento pequeno e alongado (Figura 26). Como considerações a sua pesquisa, Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013) enfatizam 4 pontos a serem buscados para o aprimoramento da estrutura:

- Em um preenchimento ideal o metal fundido deve escoar pelos canais de ataque ao mesmo tempo, evitando a perda de calor. A impossibilidade prática, devido as diferentes alturas em que os canais de ataque são dispostos, faz necessário

diminuir ao máximo a diferença de tempo em que os canais próximos ao topo e à base da árvore começam a ser preenchidos;

- A diferença de velocidade de fluxo nos diversos patamares em que os canais de ataque estão dispostos deve ser pequena. O preenchimento deve ser o mais rápido possível para evitar a perda de calor, porém alta velocidade produzirá maior erosão no molde. Assim a velocidade compatível é aquela que possibilita o preenchimento total do molde antes que a solidificação comece;
- A diferença de velocidade de fluxo deve ser mínima durante o estágio de estabilização do metal. A velocidade do metal tende a diminuir significativamente após o mesmo verter por um tempo tornando-se constante quando atinge o estágio de estabilização. Esse fenômeno é determinado pela pressão do metal, pressão atmosférica e viscosidade;
- A flutuação da velocidade de fluxo no estágio de estabilização deve ser mínima. A aceleração gerada pelo orifício do recipiente em que o metal é fundido, o qual possui por padrão 8mm de diâmetro e a energia de retorno após o metal atingir o topo da árvore geram a variação na velocidade. Flutuações maiores geram maior turbulência no fluxo.

Figura 26 – Dimensionamento das amostras fixadas na árvore de fundição, utilizadas na pesquisa realizada por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013).



Fonte: Adaptado de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013).

## 2.7. SISTEMAS CAD/CAM PARA A JOALHERIA

A evolução dos maquinários e novas tecnologias continuam a beneficiar o processo de desenvolvimento joalheiro nos diversos setores de produção, dentre os quais está o setor diretamente ligado à criação, no qual é feita a modelagem das novas peças a serem produzidas. Antigamente produzidas em sua totalidade por meios artesanais, são agora desenvolvidas, em grande parte, por métodos computacionais que permitem a interação direta entre desenho e modelo 3D virtual com o sistema de manufatura de produção para o desenvolvimento da peça real, também conhecidos como sistemas CAD/CAM, desenho assistido por computador e manufatura assistida por computador. Thornton (1998) destaca que os sistemas CAD/CAM tornaram possível o desenho computadorizado em três dimensões, possibilitando a conversão do mesmo em cera, a qual pode ser fundida e produzidas em massa, gerando uma grande economia de tempo para as indústrias. Rocha *et al.* (2011) enfatizam que a modelagem no sistema CAD permite a simulação de um modelo tridimensional e exame de formas e tamanhos como se já tivesse sido produzida fisicamente, possibilitando a avaliação prévia, o que evita interpretações equivocadas e minimiza erros de produção.

Dentre os programas CAD, o *Rhino3D*<sup>®</sup> é um dos mais utilizados para a modelagem virtual de joias, conta com *plug-ins* específicos, desenvolvidos para a área, a exemplo do *MatrixGold*<sup>®</sup>. Rosetti (2011) ressalta que o *software* possui recursos que possibilitam a modelagem em três dimensões das mais complexas formas orgânicas e geométricas com extrema precisão, além de possibilitar a renderização, processo que gera imagens realistas através dos modelos virtuais simulando luz, materiais e texturas. Destaca também a grande capacidade de importar e exportar arquivos, atuando como uma espécie de conversor para outros *softwares*, sendo compatível com todas as máquinas de impressão 3D do mercado. Com a precisão de medidas, fornecidas pelo *software Rhino3D*<sup>®</sup>, pode-se avaliar mecanismos de encaixe, fixação dos modelos difíceis de serem feitas pelo processo convencional de modelagem. Tais pontos justificam a escolha desse *software*, destacando o uso difundido do mesmo no meio joalheiro. Logo se utiliza a mesma ferramenta de modelagem empregada pela grande maioria das empresas joalheiras. Assim, os benefícios que esta pesquisa possa proporcionar, no que diz respeito à modelagem, vão ao encontro dos métodos utilizados no meio industrial, não necessitando mudanças ou treinamentos para novos *softwares*.

De acordo com Pohlmann (2012), os benefícios obtidos com a utilização do sistema CAD são melhor aproveitados quando utilizados juntamente com o sistema CAM, o qual faz uso de equipamentos de prototipagem para a produção automatizada dos modelos. Fonseca (2006), divide a produção automatizada dos modelos em quatro processos fundamentais:

- Subtrativos, caracterizados pela retirada de material de um bloco inicial de matéria-prima em processos de usinagem, a exemplo dos equipamentos automatizados denominados de Computer Numerical Control (CNC);

- Aditivos, caracterizados pela adição sucessiva de camadas de material até formar o objeto projetado, a exemplo de impressoras 3D e máquinas de estereolitografia;
- Formativos, caracterizados pelo emprego de forças mecânicas para a conformação dos modelos através de ferramentas pré-definidoras, a exemplo das máquinas de estamparia;
- Híbridos, caracterizados pela combinação entre dois ou mais processos de natureza subtrativa, aditiva e/ou formativa.

Rocha *et al.* (2011), reforçam o grande avanço no desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente pelos processos aditivos, onde novos equipamentos e técnicas surgem, necessitando a especialização dos profissionais em conhecimentos que são constantemente renovados. Nesse intuito, bibliografias como Rosetti (2011), *Desenhando Joias com Rhino3D®*, proporcionam informações técnicas à modelagem virtual de joias, abordando o processo, indicando tamanhos, espessuras para posterior processamento em sistema CAM, o que contribui em muito para esse nicho tecnológico em crescimento. Com o avanço tecnológico e inovações recentes, destaca-se a importância do desenvolvimento de mais bibliografias e pesquisas de auxílio, já que ao contrário de outros setores tecnológicos, não existem normas técnicas estabelecidas que direcionem e auxiliem o desenvolvimento de novos projetos.

## 2.8. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

A simulação do processo de fundição utiliza o método dos elementos finitos. Para tanto o modelo geométrico gerado no *software Rhino3D®* necessita ser convertido para modelo discreto, no qual o modelo contínuo é dividido em partes menores. “O domínio de definição do modelo matemático é dividido em um número discreto de subdomínios ou elementos de dimensões finitas denominados elementos finitos, interligados por meio de um número reduzido de pontos denominados nodais” (SORIANO, 2003, p.4). Soriano (2003) reforça que o método dos elementos finitos substitui o número infinito de pontos do domínio do modelo matemático com incógnitas pelo conjunto finito de pontos nodais da malha de elementos com número discreto de incógnitas.

Nesse entendimento, a utilização integrada entre o *software Rhino3D®* e o *Click2Cast®*, esse último amplamente utilizado em áreas da engenharia para simular o processo de fundição, pode auxiliar tanto para a reconfiguração de modelos de joias quanto para o sistema de alimentação das peças. O *software Click2Cast®* trabalha com um volume único, o qual flui como um sólido fechado, possuindo uma interface amigável e intuitiva, o que possibilita a rápida assimilação de uso,

fundamental para a implementação na indústria. Bosch, Ford, Mercedes-Benz e Toyota são exemplos de marcas mundialmente conhecidas onde o *software* é utilizado. A simulação do processo de fundição no *Click2Cast*<sup>®</sup> é configurada em 5 passos: importação da geometria; definição da área de alimentação da peça e conversão do modelo geométrico para modelo discreto; definição dos parâmetros de processo; cálculo da análise; finalizando com a observação dos resultados. Importante ressaltar que o mesmo dispõe de uma biblioteca onde os principais materiais utilizados na indústria de joias estão com as propriedades físicas configuradas, prontas para uso, a exemplo do ouro 18k, da prata 1000 e do latão (60% cobre e 40% zinco). Do mesmo modo, o *software* oferece uma série de materiais já configurados para compor o molde, a exemplo dos cerâmicos e a base de areia, possibilitando determinar em que temperatura o molde estará durante o processo bem como a espessura do mesmo. Além disso, é possível determinar se o processo de fundição ocorrerá por gravidade ou com uso de baixa ou alta pressão, possibilitando configurar aspectos como a taxa de fluxo e a altura do recipiente que contém o montante do metal a ser vertido.

Com as variáveis definidas e o problema discretizado, o *software Click2Cast*<sup>®</sup> monta as matrizes de cálculo e com suas equações constitutivas resolve o problema através do *solver* chamado Kratos. O Kratos possui código aberto, e por isso tem o auxílio da comunidade de pesquisadores e desenvolvedores de todo mundo. Quantech (2019) destaca que, quanto ao cálculo da dinâmica de fluido durante o escoamento, o Kratos possui equações 2D e 3D de Navier-Stokes considerando fluidos compressíveis e incompressíveis em regime laminar ou turbulento, além de formulação Euleriana, Lagrangiana, Lagrangiana-Euleriana, análises transientes e técnicas de estabilização. Chiumenti et al. (2005) detalham as equações constitutivas para materiais fundidos, utilizadas pelo Kratos, em seu trabalho intitulado *Constitutive Modeling and Numerical Simulation of Casting Materials*.

Os resultados da simulação gerados no *Click2Cast*<sup>®</sup> permitem avaliar diversos aspectos tais como o fluxo de metal, a velocidade de preenchimento e solidificação, as temperaturas obtidas durante o processo, pontos de resfriamento antes do preenchimento da peça, porosidade, retração do metal e pontos de aprisionamento de ar. Todos esses fatores auxiliam na avaliação e reestruturação da árvore de fundição, de modo a otimizar os resultados e reduzir ao máximo os problemas que podem ser obtidos durante o processo.

O *software Click2Cast*<sup>®</sup> trabalha com análise térmica: “Grupo de técnicas nas quais se acompanham as variações em uma propriedade física de uma amostra e/ou de seus produtos de reação, enquanto a mesma é submetida a uma programação de temperatura” (MACKENZIE, 1979). Dentre as quais, podem ser observadas as variações nas propriedades relacionadas a: temperatura (análise térmica diferencial) e gases (análise de gás envolvido).

As análises geradas no *Click2Cast*<sup>®</sup> possuem relação direta com a dinâmica dos fluidos. Brunetti (2005) explica que fluido é uma substância, líquida ou gasosa, que não tem uma forma própria, assumindo a forma do recipiente que o contém. Alé (2011) reforça que as leis que envolvem problemas de mecânica dos fluidos são: a conservação de massa; a segunda lei do movimento de

Newton; o princípio do momento da quantidade de movimento; a primeira e segunda lei da termodinâmica.

Importante ressaltar que, essa tese não tem como escopo aprofundar os conceitos e formulações relacionados com análise térmica ou dinâmica dos fluídos. Porém, é válido verificar quais as propriedades físicas foram alimentadas no software para o material utilizado e como o mesmo se comporta perante o sistema estabelecido. Tal abordagem facilita uma aplicação direta e simplificada para melhoria do processo industrial com o qual essa pesquisa busca contribuir.

## **2.9. CONSIDERAÇÕES**

O levantamento informacional acerca das diversas esferas do conhecimento que envolvem o projeto, a exemplo do processo de fundição por cera perdida e da biomimética abordados nesse capítulo, auxiliam na elaboração do método de pesquisa. Esses contribuem com conhecimentos necessários, norteando a evolução da pesquisa, mesclando áreas que abordam: (i) a geometria fractal; (ii) a série Fibonacci; (iii) a morfologia das árvores; (iv) as propriedades do latão, da prata e do ouro; (v) os dados e impactos acerca da extração dos metais utilizados; (vi) os processos produtivos da indústria joalheira com foco em fundição por cera perdida; (vii) sistemas CAD/CAM para a joalheria; (viii) a simulação do processo de fundição por elementos finitos.

## Capítulo 3

# METODOLOGIA DE PESQUISA

---

A metodologia utilizada na pesquisa faz uso do estudo exploratório inicial, fase em que são abordados conceitos que abrangem o ponto central da pesquisa, a aplicação do *software Click2Cast®*, versão 4.1, para simulação de fluxo de fluido em estruturas utilizadas no ramo joalheiro, gerados no *software Rhino3D®*, versão 5 SR8. Testa-se a viabilidade de aplicação, e compatibilidade entre os sistemas e *softwares* a serem utilizados em uma análise de caráter puramente exploratório e direto. De acordo com Gil (2010), a pesquisa exploratória objetiva proporcionar familiaridade com o problema, com o intuito de torná-lo mais explícito.

Comprovada a factibilidade da pesquisa, a etapa seguinte busca a contextualização do estudo, abordando questões introdutórias, temáticas, problemáticas, objetivas e justificativas. Nesse ponto a contextualização é facilitada e enriquecida quando são postas questões do tipo “o que”, “porque” e “como”.

Após ser contextualizada, a pesquisa avança para a etapa de verificação. Essa compreende o levantamento bibliográfico pertinente aos conceitos que auxiliem no desenvolvimento direto ou indiretos das análises posteriores. Gil (2010) ressalta que a vantagem da pesquisa bibliográfica é que permite ao pesquisador a abordagem de fenômenos de modo muito mais amplo do que aquela que poderia pesquisar diretamente. Nesse entendimento, o levantamento bibliográfico aborda tópicos que contemplam a geometria fractal, série fibonacci, morfologia das árvores, as propriedades dos materiais amplamente utilizados no meio joalheiro, os dados e impactos sobre extração dos metais utilizados, os processos produtivos utilizados no setor em questão, o foco no processo de fundição por cera perdida, as árvores de cera, os principais problemas encontrados no processo de fundição e os sistemas CAD/CAM utilizados na produção de joias.

A próxima etapa compreende a análise laboratorial preliminar, na qual são identificados os métodos e as técnicas a serem empregadas no processo de modelagem virtual do objeto de estudo, através do *software Rhino3D®* e da simulação virtual da fundição pelo *software Click2Cast®*. No *software Click2Cast®*, estabelece-se qual o metal a ser utilizado para a simulação da fundição, bem como o material que constitui o molde pelo qual o metal é vertido. Determinam-se quais os parâmetros, como área de alimentação do metal na estrutura, temperatura utilizada na fundição, a espessura do molde, a altura da coluna de metal no recipiente de fundição a ser vertido no molde.

Com o entendimento obtido na análise laboratorial preliminar, define-se qual o melhor refinamento de malha a ser utilizado nesta pesquisa. Com base no estudo exploratório são geradas as alternativas para as estruturas árvore de fundição através do *software Rhino3D®*, as quais são submetidas a novas análises virtuais pelo *software Click2Cast®*. Com os resultados obtidos, alternativas promissoras são refinadas na busca daquela a ser proposta por esta pesquisa. Definida a estrutura da pesquisa, a mesma é submetida a análise e verificação em contraponto a convencionalmente utilizada no ramo joalheiro e com a otimizada da pesquisa de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013).

A etapa subsequente busca verificar a viabilidade produtiva da estrutura proposta bem como analisar os problemas de fundição em testes de fundição real. Para tanto, tem-se a delimitação dos corpos de prova a serem fixados na estrutura, a confecção dos corpos de prova e da estrutura em si e a posterior fundição. Os corpos de prova, bem como as estruturas são modelados no *software Rhino3D®*. A fabricação dos corpos de prova com canal de ataque já fixado inicia com a matriz, produzida em resina, através do processo de estereolitografia, com intermédio do *software VisCAM RP 5.0*. e da máquina 028J da marca DWS. Com o molde da matriz, as réplicas dos corpos de prova são obtidas em cera via injetora modelo D-VWI da marca Yasui. O restante da estrutura, base e canal de alimentação é fabricado em cera por usinagem CNC, com intermédio do *software ArtCAM Jewel Smith 9.126* e da máquina EGX-300 da marca Roland. A fundição das estruturas é realizada na empresa Sulune Joias, localizada em Guaporé, no Rio Grande do Sul.

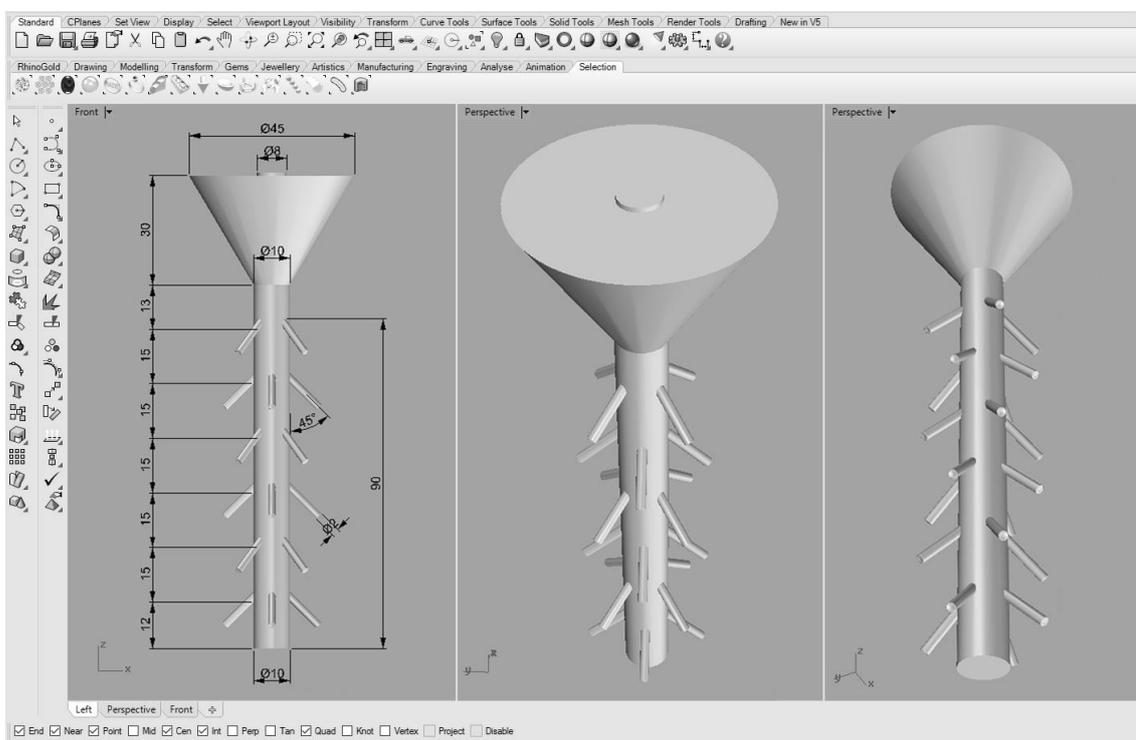
Findo o processo, tem-se a etapa de documentação, a qual abrange as considerações finais acerca da pesquisa e o fechamento da tese. Espera-se que os resultados identifiquem pontos de melhoria nas estruturas das árvores de fundição, otimizando o processo através do uso acurado dos metais, e reduzindo problemas de fundição, como, preenchimento parcial ou incompleto, superfície áspera, rebarbas, bolhas e erupções.

Os itens 3.1 e 3.2 descritos a seguir abordam como ocorre o processo de preparação de uma amostra e a configuração da análise.

### **3.1. PREPARANDO A AMOSTRA**

O estudo exploratório utilizou como amostra, a estrutura convencional da árvore de fundição utilizada no meio joalheiro, indicada por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013), nomeado como amostra virtual 1, AV1, o qual foi modelado no *software Rhino3D®* (Figura 27). Como método de exportação utilizou-se pela extensão *STL (\*.stl)* com margem de tolerância entre a dimensão real e do sólido exportado configurado em 0.01mm e formato binário.

Figura 27 – Estrutura convencional da árvore de fundição, utilizada como corpo de prova nesta pesquisa, obtida por modelagem em mm no *software Rhino3D®*.



Fonte: Autor.

### 3.2. CONFIGURANDO A ANÁLISE

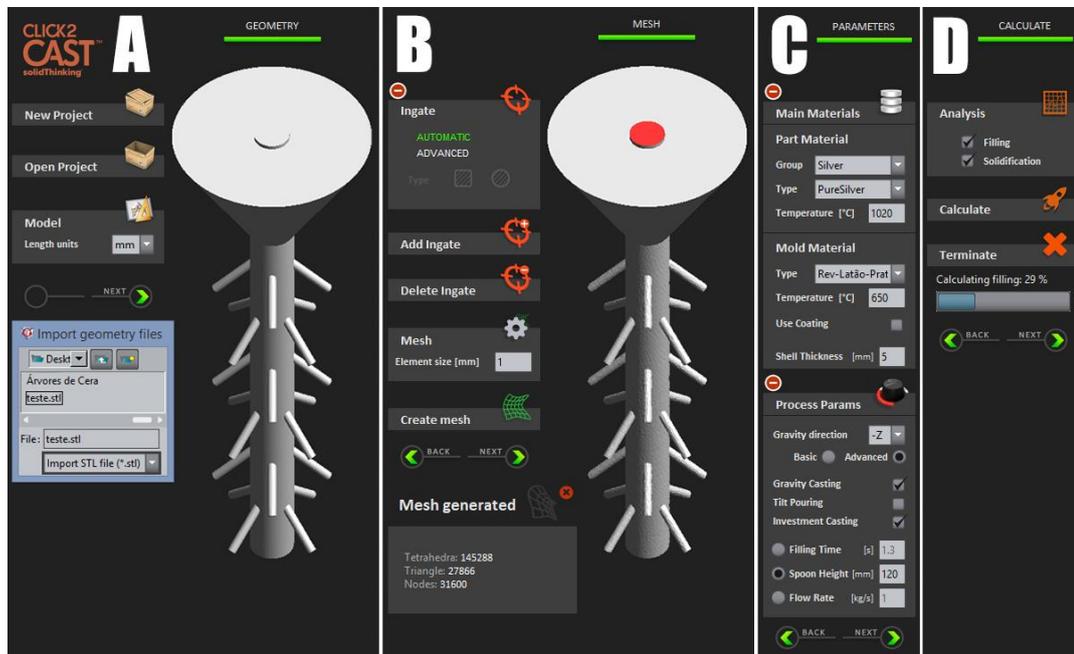
O processo de simular a fundição vertendo metal nas estruturas das árvores, requerer alguns passos, requisitos que precisam ser fornecidos ao *software Click2Cast®*, (Figura 28):

- O primeiro passo consiste na simples importação do arquivo em extensão STL (\*.stl) para o *software*. Nesse processo o *software* realizará possíveis reparos, fechando de modo automático caso haja buracos na estrutura que compõem o sólido. Outra verificação realizada é quantidade de sólidos importados. Como o *software* trabalha com sólidos únicos caso identifique mais que um, pedirá para excluir os demais até que reste somente aquele a ser trabalhado. Nesse ponto recomenda-se o uso do comando *boolean union* no *software Rhino3D®* para garantir que todas as partes que compõem a estrutura estejam conectadas;
- No segundo passo, é estabelecido por qual face do modelo 3d o metal será vertido. Adota-se a circunferência de 8mm de diâmetro, utilizada por Romanoff (2019) como abertura inferior do cadinho de fusão, recipiente em que o metal é

fundido e posteriormente vertido pela estrutura da árvore de fundição. Essa circunferência fica alocada, centralizada na base da árvore de fundição. Em muitas indústrias o metal é vertido manualmente, podendo escoar pelas bordas do recipiente, o que torna essa mensuração variável, intrínseca a habilidade do fundidor. Entretanto, para esta pesquisa, nas análises virtuais, é adotada a mensuração do sistema automatizado e preciso, indicado por Romanoff (2019). Ainda na segunda etapa é realizada a conversão da modelagem computacional em malha, realizando o processo de discretização, ou seja, resulta no modelo discretizado. O *software* utiliza os elementos tetragonais para a construção da malha e possibilita maior ou menor refinamento, conforme a necessidade de cada projeto. Opta-se pelo uso da resolução de 1mm para o corpo de prova do estudo exploratório, já que os menores detalhes da estrutura estão na grandeza de 2mm;

- No terceiro passo são definidos os parâmetros em que a fundição ocorrerá. Para o metal e molde são tomados como referência parâmetros similares aos utilizados por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013), ou seja, a prata pura em 1020 °C de temperatura a verter pela estrutura e o molde em 650°C de temperatura. O molde é configurado com espessura de 5mm, o qual, de acordo com GoldStar (2019) é o mínimo de espessura a ser assegurado. Quanto a composição do molde, para alinhar ao especificado por Kliauga e Ferrante (2009), um novo material é criado no *software Click2Cast*<sup>®</sup>, nomeado de revestimento para latão e prata, mescla 60% das propriedades da sílica e 40% das propriedades do gesso, desconsiderando o 1% dos aditivos como o cloreto de sódio, sulfeto de potássio, carboneto de potássio e bórax (Figura 29). O material criado segue as características do revestimento indicado para latão, prata e ouro até 14 quilates, fornecido pela Gold Star Brasil, o qual é utilizado na indústria em que as amostras finais serão fundidas. As propriedades físicas do latão (60% cobre e 40% zinco) configuradas no *software Click2Cast*<sup>®</sup> também constam na Figura 29, pois uma das análises posterior fará uso desse material. No terceiro passo, ainda, determina-se o processo a ocorrer por gravidade atuando no eixo -Z com altura da coluna de metal a ser vertido em 120mm, a qual é uma configuração recorrente nos recipientes em que o metal é fundido antes de ser vertido. Nesse ponto também é selecionada a opção que define que o processo ocorre por fundição por cera perdida, não optando pela fundição centrífuga;
- O quarto passo realiza os cálculos com base nos parâmetros definidos anteriormente. Opta-se por obter os resultados de simulação em preenchimento bem como solidificação.

Figura 28 – Configuração da análise no software Click2Cast®. (A) Importação da geometria; (B) Configuração da área por onde o metal é vertido e geração da malha; (C) Aplicação dos parâmetros de fundição; (D) Realização do cálculo.



Fonte: Autor.

Figura 29 – Propriedades físicas configuradas no software Click2Cast®. Prata pura e revestimento para latão e prata, metal escolhido para fundição e material definido para o molde, respectivamente.

PRATA PURA		LATÃO (60% COBRE E 40% ZINCO)		REVESTIMENTO PARA LATÃO E PRATA	
Propriedade	Valor	Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
Calor latente	1.042E+5	Calor latente	136000	Convecção CTC	400.0
Temperatura Líquida	971	Temperatura Líquida	906	Condução CTC	1000.0
Temperatura Sólida	951	Temperatura Sólida	882		
Encolhimento	3.6	Encolhimento	5.5		
Temp °C	Viscosidade dinâmica N*s/m <sup>2</sup>	Temp °C	Viscosidade dinâmica N*s/m <sup>2</sup>	Temp °C	Densidade Kg/m <sup>3</sup>
18	17e-3	1100	0.0037	300	1229
22	14e-3	1150	0.00345	350	1220
29	11e-3	1250	0.003	450	1211
35	9e-3	1350	0.0027	550	1206
40	7e-3	1400	0.0026	600	1202
Temp °C	Densidade Kg/m <sup>3</sup>	Temp °C	Densidade Kg/m <sup>3</sup>	Temp °C	Calor específico J/(Kg*K)
20	10490	20	8630	100	835
960	9320	435	8415	150	876
Temp °C	Calor específico J/(Kg*K)	Temp °C	Calor específico J/(Kg*K)	250	943
25	0.235e3	955	7800	350	985
127	0.239e3	1000	7750	450	1025
527	0.262e3	550	1056	550	1056
961	0.297e3	650	1086	650	1086
2227	0.310e3	750	1116	750	1116
Temp °C	Conductividade W/(m*K)	Temp °C	Conductividade W/(m*K)	850	1141
20	428	850	486.5	950	1164
450	356	910	489	1000	1187
Temp °C	Conductividade W/(m*K)	Temp °C	Conductividade W/(m*K)	Temp °C	Conductividade W/(m*K)
971	0.0	20	125	100	0.60
951	1.0	1000	125	350	0.58
		Temp °C	Fração sólida	500	0.59
		882	1.0	750	0.63
		906	0.0	850	0.68
				900	0.69

Fonte: Autor.

### 3.3. RESULTADOS PRELIMINARES

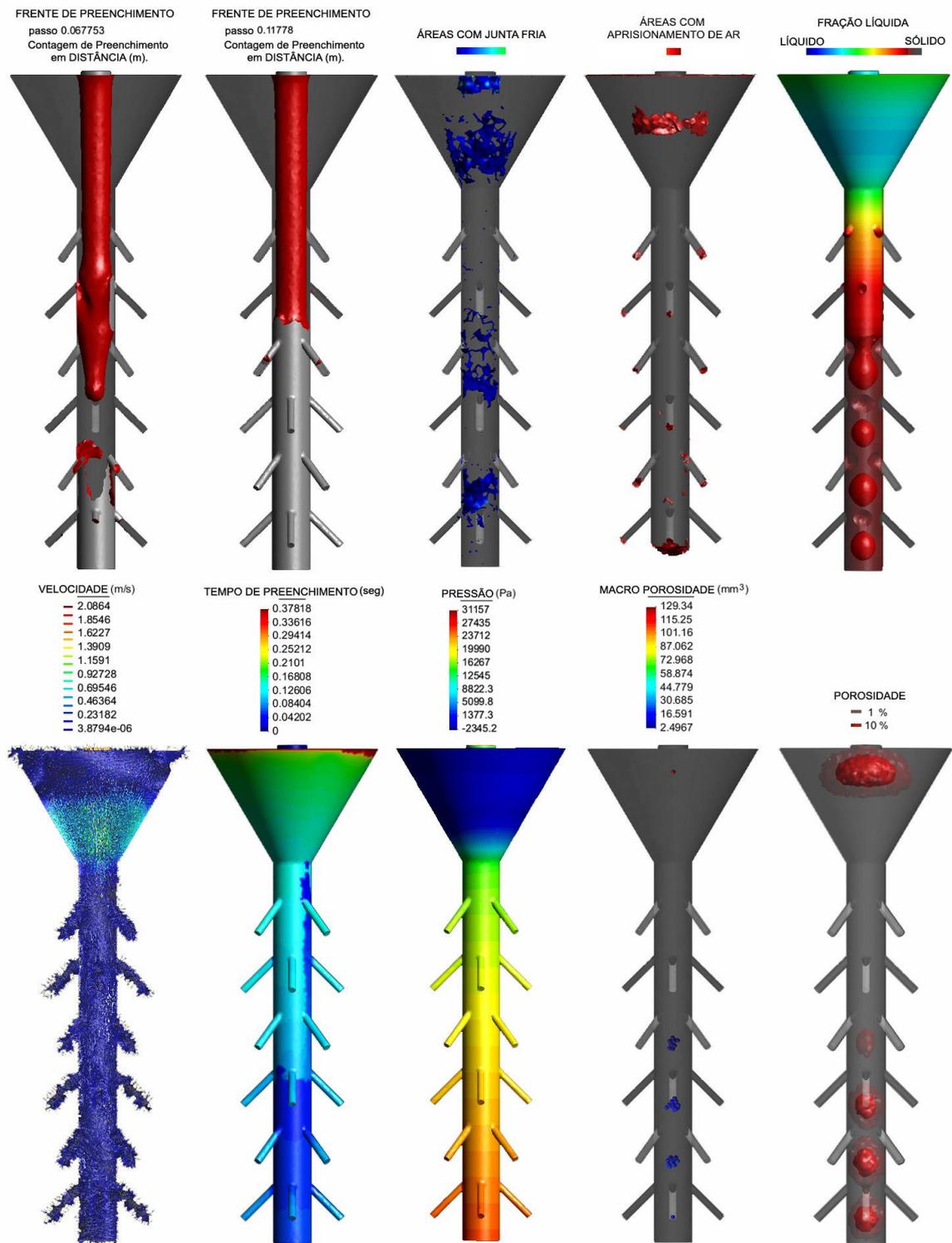
Com a amostra da análise exploratória submetido aos testes, com as configurações destacadas anteriormente, foram obtidas 10 imagens pelas quais foram mensuradas: a frente de preenchimento; a velocidade no fluxo do metal; áreas acometidas por junta fria; ponto de aprisionamento de ar; tempo de preenchimento do metal; pressão exercida pelo metal; dimensionamento das porosidades e áreas com maior concentração; e por fim o comportamento do metal durante o seu resfriamento na estrutura (Figura 30). Importante destacar que o resultado de resfriamento do software não considera o choque térmico ao qual a estrutura é acometida durante a remoção do molde. Dentre as análises, 6 índices resultaram em mensurações quantitativas, essas agrupadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados da análise exploratória, obtidos através do *software Click2Cast®*. Os índices destacam a variação da velocidade de fluxo do metal líquido, a ocorrência de aprisionamento de ar na base, no topo e nos canais de ataque, o tempo de preenchimento da estrutura, diferença de tempo entre o preenchimento dos canais de ataque próximos ao topo para os próximos a base, a variação dos índices máximos e mínimos de pressão e a macro porosidade na base, no canal de alimentação e nos canais de ataque.

	<b>Varição Vel. Fluxo (m/s)</b>	<b>Aprisionamento de Ar</b>	<b>Preenc. Estrutura (s)</b>	<b>Preenc. Canais At. (s)</b>	<b>Press. (Pa)</b>	<b>Macro Poros. (mm<sup>3</sup>)</b>
<b>AV1</b>	3,87x10 <sup>-6</sup> a 2,08	base/sim topo/sim canais/sim 24/24	0,37	0,053	- 2345 a 31157	base 129,34 canal al. 2,49 canais at. 0

Fonte: Autor.

Figura 30 – Resultados da análise exploratória na estrutura convencional da árvore de fundição, obtidos no software Click2Cast®.



Fonte: Autor.

### 3.4. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Com a simulação tem-se as seguintes constatações:

- A velocidade de fluxo do metal tem suas maiores variações na área da base da árvore, próximo à região de afunilamento do material, com velocidades de  $3,87 \times 10^{-6}$  m/s a 2,08 m/s. Essa maior flutuação na velocidade gera o aumento na turbulência, o que acarreta na maior produção de gases que resultam em porosidade, bem como facilita a quebra de partes do revestimento. Percebe-se que nas áreas próximas aos canais de ataque há uma redução na variação da velocidade de fluxo, onde há predominância de regiões com  $3,87 \times 10^{-6}$  m/s e alguns pontos que atingem 0,7 m/s;
- Os pontos de ocorrência de juntas frias concentram-se principalmente na região da base da árvore de fundição bem como ao longo do canal de alimentação, próximo aos canais de ataque. O aprimoramento da estrutura deve buscar reduzir ao máximo a ocorrência de juntas frias as quais além da junção incompleta do metal deixam marcas visíveis;
- O aprisionamento de ar na estrutura incidiu principalmente nas extremidades, sendo constatado nos 24 canais de ataque, no topo da árvore e tendo sua maior concentração próximo à área de maior turbulência, a região da base. A estrutura ideal busca a redução nos pontos de aprisionamento de ar, principalmente nos canais de ataque, pois ao direcionar o aprisionamento de ar para as peças, pode acarretar no preenchimento incompleto e buracos;
- O tempo de preenchimento da estrutura é de 0,37 segundos. Um preenchimento rápido evita o resfriamento do material, facilitando o fluxo de metal por todas as peças. Enfatiza-se a busca pela menor diferença de tempo entre o preenchimento dos canais de ataque próximos ao topo para aqueles próximos à base, diferença nessa estrutura mensurada em 0,053 segundos;
- As áreas de pressão máxima na estrutura estão no topo da árvore bem como nos canais dessa região, nas quais o valor atingido é de 31157 Pa. Os pontos onde há maior pressão facilita o preenchimento das peças e, como esperado, percebe-se que nos canais de ataque próximos à base a pressão diminui, assumindo o valor de 16267 Pa. Como Teague (2019) ratifica, a pressão é relativa à profundidade e não ao volume de metal. Esse fator impossibilita praticamente que os canais próximos à base tenham uma pressão próxima àqueles alocados no topo;
- As regiões com maior concentração de macro porosidade estão próximas ao ponto de alimentação da estrutura, na base da árvore, onde é mensurado  $129,34\text{mm}^3$  de porosidade. O canal de alimentação, próximo aos canais de ataque, possui

áreas com  $2,49\text{mm}^3$  de macro porosidade, enquanto que os canais de ataque permanecem livres. Percebe-se que a região acometida por 1% de porosidade ocupa quase 1/3 da base da árvore e por 10% aproximadamente 1/7 da mesma. Com a mesma relação, pontos afetados em 1% de porosidade correspondem a aproximadamente 1/3 do canal de alimentação e em 10% aproximadamente a 1/6 do mesmo;

- A fração líquida da estrutura se comporta de modo eficiente. O canal de alimentação permanece completamente líquido até que todos os canais de ataque se solidifiquem. Esse fator é importante, pois com a redução do volume de metal durante o processo de solidificação, é fundamental que o metal líquido possa escoar pelos canais de ataque e assim proporcionar o preenchimento completo da peça, até que a mesma esteja completamente solidificada.

Os resultados preliminares comprovam que o método utilizado possibilita a simulação da fundição na estrutura da árvore, possibilitando a análise de diversos aspectos. A continuidade do estudo simulou e analisou estruturas que façam uso de abordagens biomiméticas, tais como a geometria fractal, série Fibonacci e a morfologia das árvores da natureza na busca por:

- Diminuição da variação da velocidade de fluxo;
- Redução das áreas acometidas por junta fria, aprisionamento de ar e porosidade;
- Redução do tempo de preenchimento da estrutura bem como na diferença de tempo entre os canais próximos ao topo e a base;
- Manutenção do bom sistema de alimentação das peças durante o processo de solidificação do metal.

A estrutura a ser desenvolvida nesta tese fará análise comparativa com a idealizada por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013), sendo que essa última obteve resultados significativos no aprimoramento na qualidade das peças fundidas. A fundição real da estrutura verificará a factibilidade dos resultados obtidos pelo *software Click2Cast*<sup>®</sup>.

## Capítulo 4

# APLICAÇÃO DAS ANÁLISES

---

O capítulo 4 tem como objetivo gerar as alternativas para as amostras de árvores de fundição com inspiração no embasamento teórico abordado no capítulo 2. Essas novas amostras são submetidas a análises virtuais, de acordo com a configuração destacada no capítulo 3. Busca-se a identificação de padrões de melhorias, os quais vão orientar a composição da estrutura da árvore de fundição proposta por esta pesquisa. Os resultados virtuais obtidos na estrutura proposta são comparados com os obtidos pela estrutura convencionalmente utilizada no ramo joalheiro e com os obtidos pela estrutura otimizada da pesquisa de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013).

### 4.1. ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

Para determinar o índice adequado para o espaçamento entre os pontos que formam a malha aplicada às estruturas analisadas nesta pesquisa, foi verificada a amostra AV1 com 3 refinamentos diferentes de malha, 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm. Vale ressaltar que quanto menor o valor mais próximo estão os pontos que compõem a malha, logo maior o refinamento. Dentre os índices obtidos, o tempo de preenchimento foi utilizada para gerar o Quadro 4. O quadro gerado a partir dos resultados dos diferentes refinamentos de malha mostra que não há grandes discrepâncias nos tempos de preenchimento obtidos. Considerando que a malha mais refinada, de 0,5mm apresenta um tempo de análise elevado, opta-se pela utilização do refinamento 1,0mm como o índice a ser aplicado na análise para todas as amostras. Vale ressaltar que a geometria das estruturas possuem os menores detalhes na grandeza de 2mm, o que faz com que o tamanho dos elementos finitos precisem ser definidos em função desses pontos.

Quadro 5 – Variação do tempo de preenchimento e de análise em função do refinamento de malha na amostra AV1, índice de refinamento de malha em 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm.

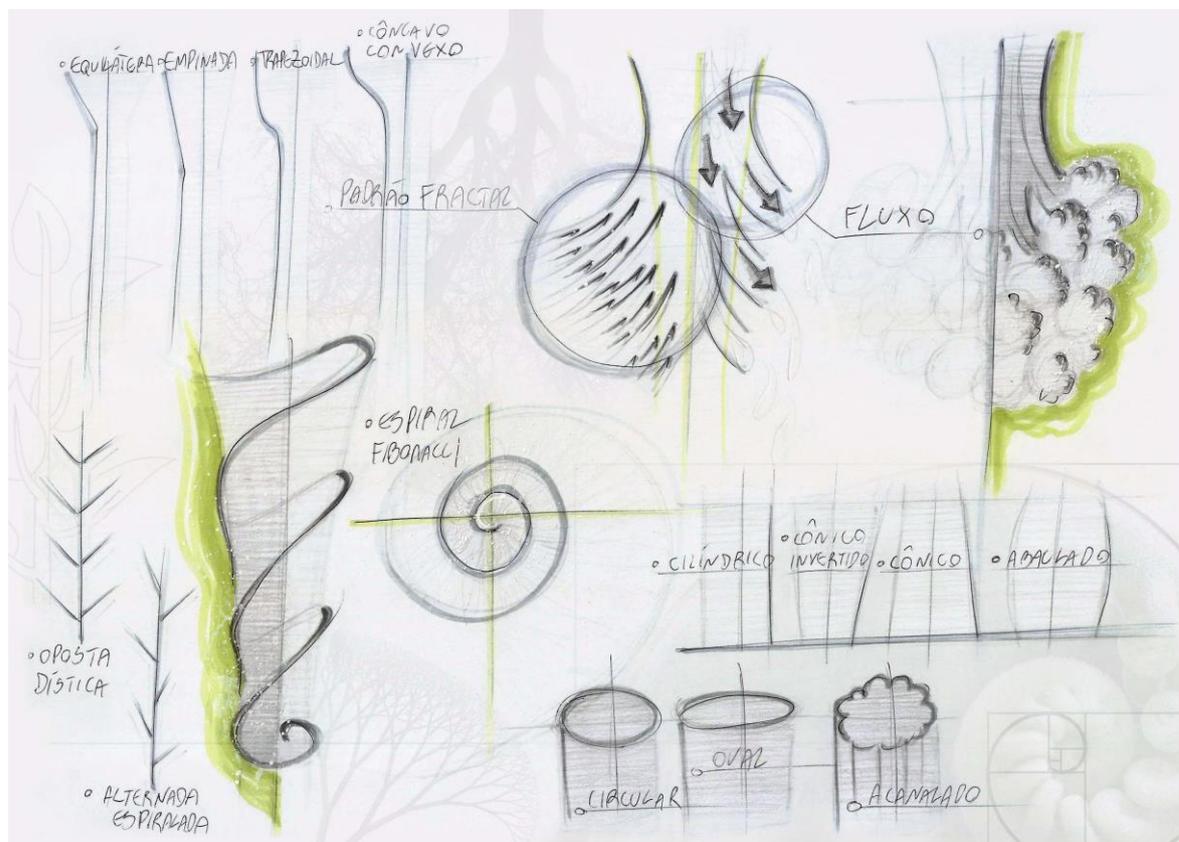
Índice de Refinamento de Malha	Tempo de Preenchimento	Tempo de Análise
0,5 mm	0,376 segundos	303 minutos
1,0 mm	0,378 segundos	22 minutos
1,5 mm	0,380 segundos	7 minutos

Fonte: Autor.

## 4.2. GERAÇÃO DE ALTERNATIVAS E ANÁLISES VIRTUAIS

Os conceitos acerca da geometria fractal, padrão Fibonacci e morfologia das árvores norteiam os elementos formais para geração de alternativas (Figura 31).

Figura 31 – Geração de alternativas inspirada pela geometria fractal, série Fibonacci e morfologia das árvores.



Fonte: Autor.

Com a especulação de configurações que possam resultar em melhorias estruturais, tais premissas são aplicadas nas árvores de fundição, as quais compõem as amostras virtuais, AV, modeladas no *software Rhino3D®* (Figura 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38). A preparação das amostras virtuais, a serem exportadas e analisadas no *software Click2Cast®*, seguiu as especificações determinadas no capítulo 3.1. Tais amostras foram agrupadas, de modo a focar a análise, primeiramente, na base da árvore de fundição, posteriormente no canal de alimentação e por fim nos canais de ataque das estruturas. Já o processo de análise no *software Click2Cast®* seguiu os parâmetros determinados no capítulo 3.2. Enquanto que o refinamento de malha utilizado nas análises é o determinado no capítulo 4.1. Os resultados obtidos foram compilados nos Quadros 6, 7 e 8, os quais estão igualmente agrupados com o foco na análise da base, do canal de alimentação e dos canais de ataque, nessa ordem.

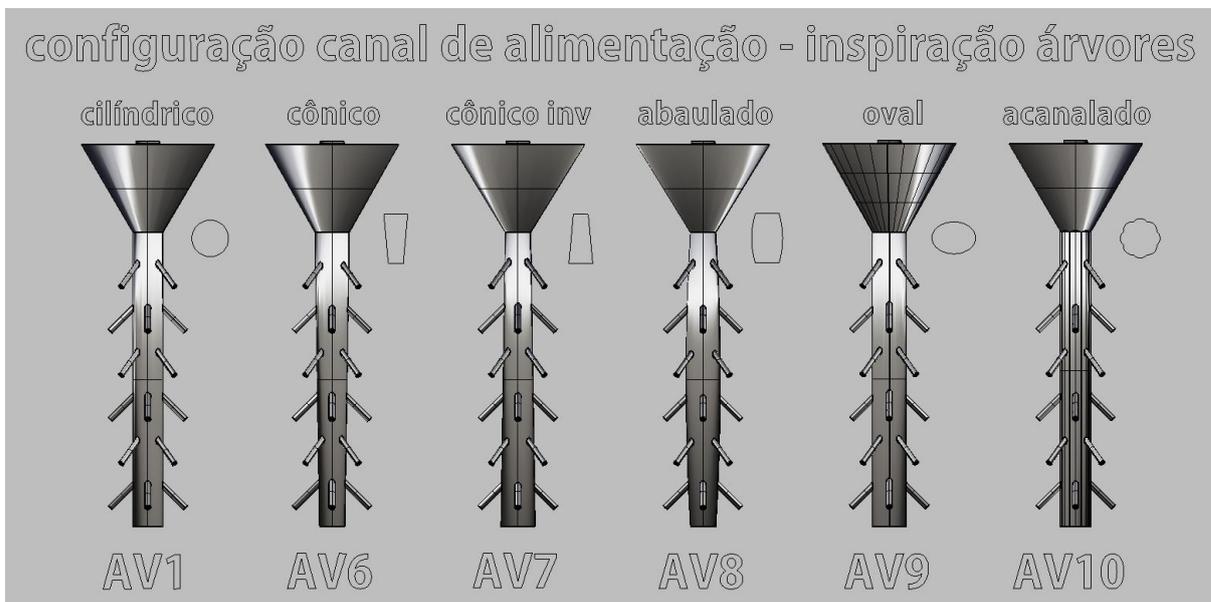
Importante destacar que os índices referentes a junta fria, porosidade e fração líquida não foram abordados na geração de alternativas. O *software Click2Cast®* disponibiliza tais resultados em caráter qualitativo, o que dificulta a comparação em larga escala com as diversas amostras virtuais. Entretanto, o comportamento das amostras virtuais para os três parâmetros foi observado, de modo a evitar que uma estrutura que tivesse um desempenho nitidamente inferior pudesse seguir no decorrer da pesquisa. Os resultados para junta fria, porosidade e fração líquida serão abordados posteriormente, o comparativo de imagens será aplicado nas amostras promissoras, aquelas selecionadas na geração de alternativa para posterior refinamento da estrutura. O comparativo por imagens é fundamental mesmo para índices quantitativos, a exemplo da mensuração da macro porosidade, pois mais vale um índice maior de macro porosidade alocado em áreas longe dos canais de ataque do que índices menores de macro porosidade alocados em regiões próximas aos canais de ataque.

Figura 32 – Amostras virtuais modeladas no *software Rhino3D®*, configuração da base da árvore de fundição inspirada na morfologia das bases dos troncos das árvores.



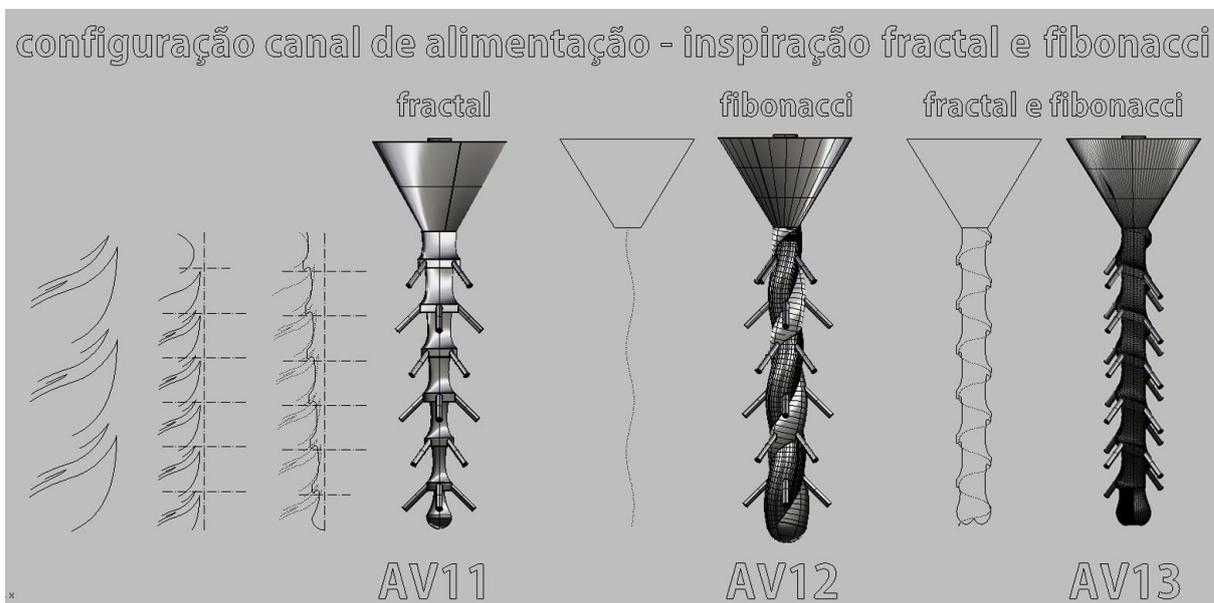
Fonte: Autor.

Figura 33 – Amostras virtuais modeladas no *software Rhino3D®*, configuração do canal de alimentação da árvore de fundição inspirado na morfologia dos caules das árvores.



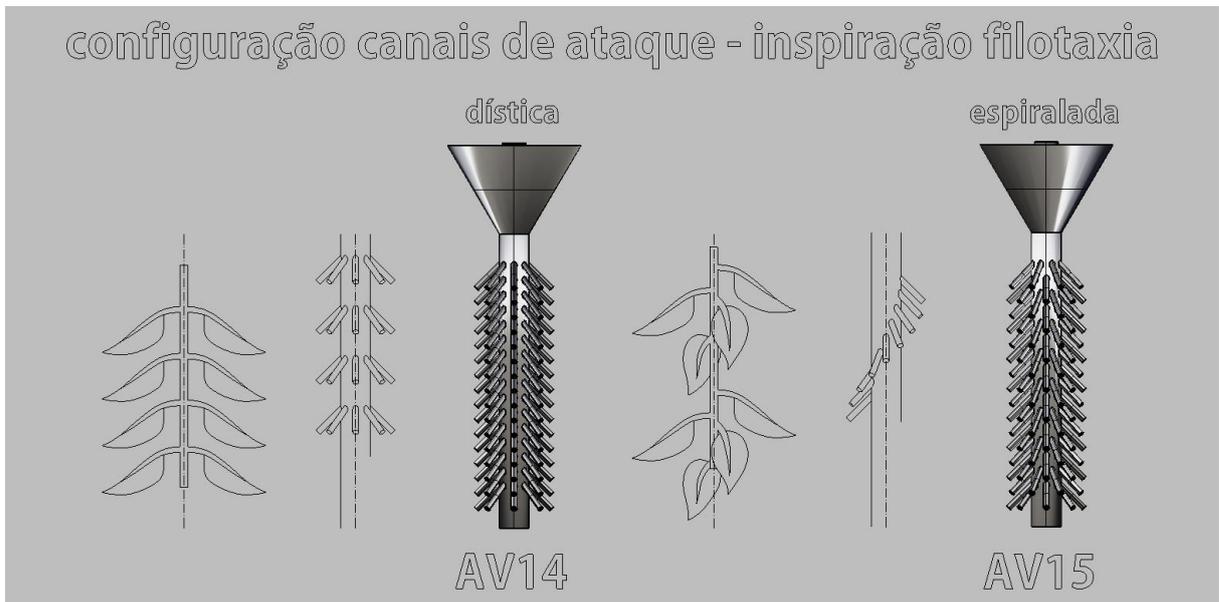
Fonte: Autor.

Figura 34 – Amostras virtuais modeladas no *software Rhino3D®*, configuração do canal de alimentação da árvore de fundição inspirado na geometria fractal e na espiral fibonacci.



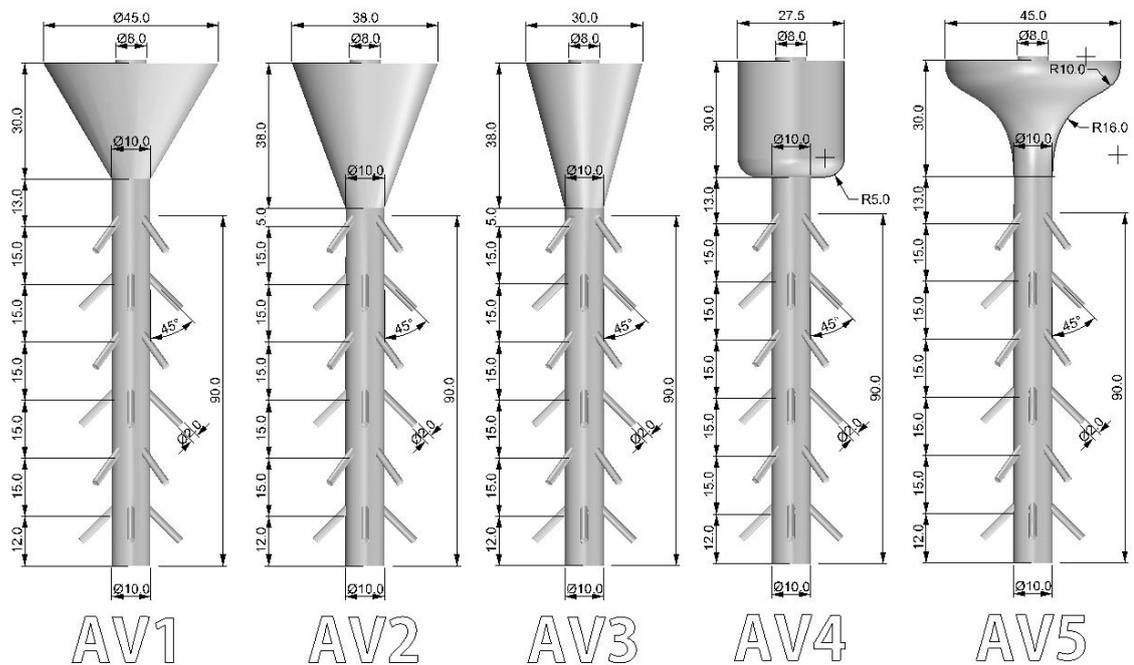
Fonte: Autor.

Figura 35 – Amostras virtuais modeladas no *software Rhino3D®*, configuração dos canais de ataque da árvore de fundição inspirada na filotaxia.



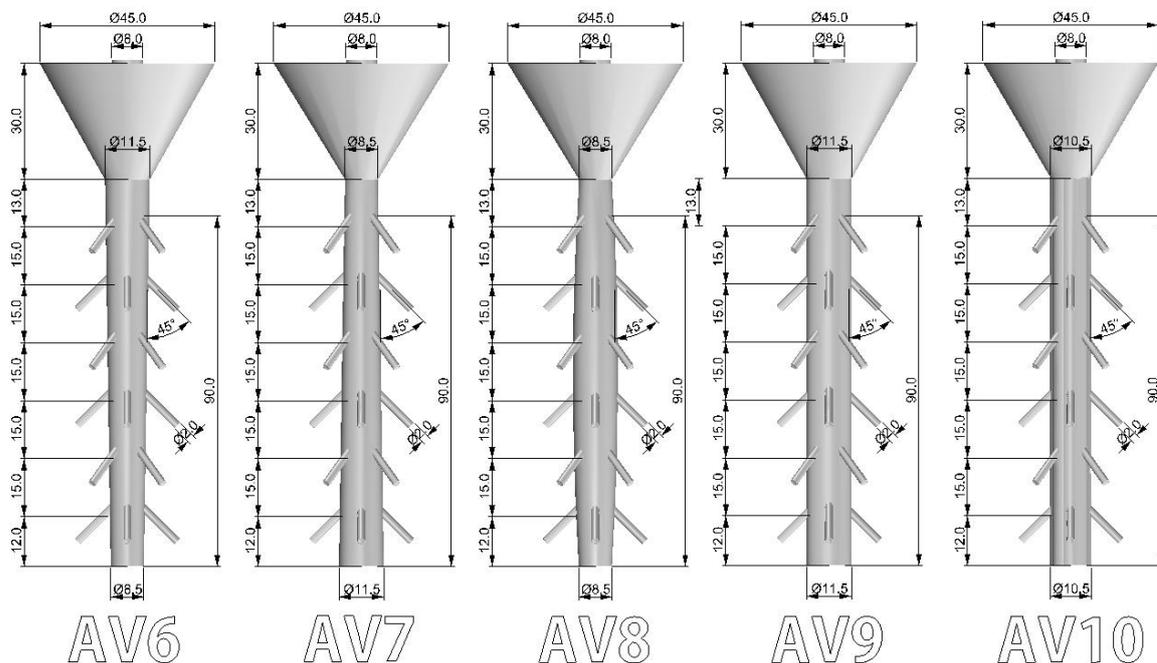
Fonte: Autor.

Figura 36 – Desenho técnico das amostras virtuais modeladas no *software Rhino3D®*, configuração da base da árvore de fundição inspirada na morfologia das bases dos troncos das árvores.



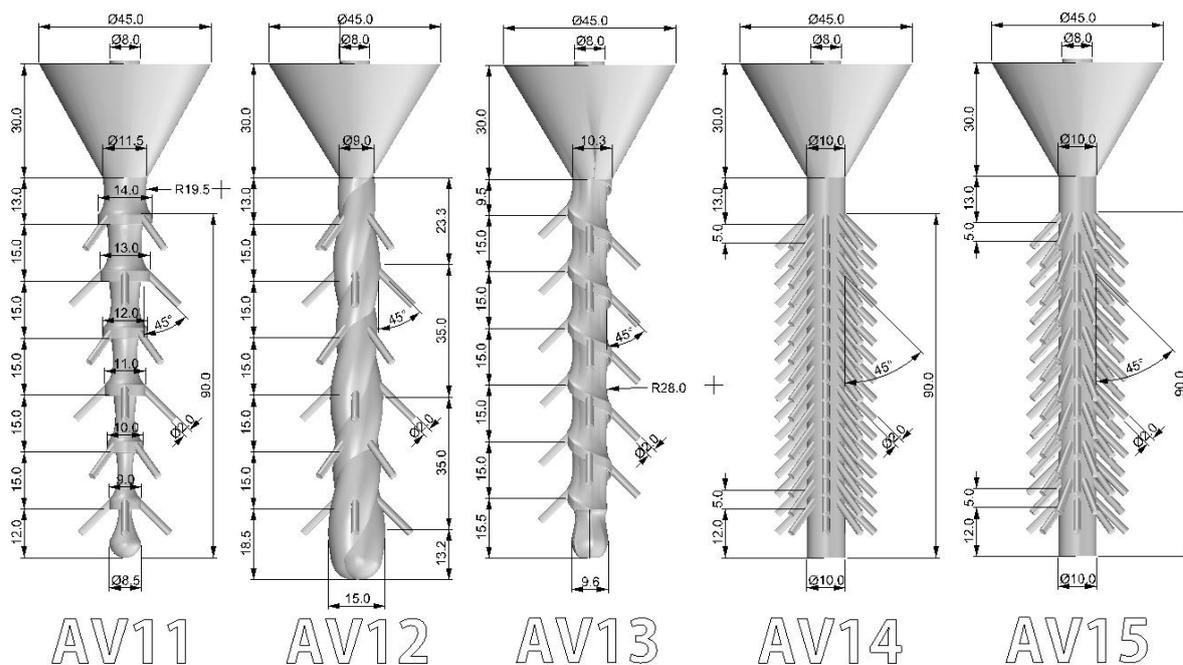
Fonte: Autor.

Figura 37 – Desenho técnico das amostras virtuais modeladas no software *Rhino3D*®, configuração do canal de alimentação da árvore de fundição inspirado na morfologia dos caules das árvores.



Fonte: Autor.

Figura 38 – Desenho técnico das amostras virtuais modeladas no software *Rhino3D*®, configuração dos canais de ataque da árvore de fundição inspirado na geometria fractal, na espiral fibonacci e na filotaxia.



Fonte: Autor.

Quadro 6 – Resultados da análise de geração de alternativas com foco na base das árvores de fundição, obtidos através do *software Click2Cast*<sup>®</sup>. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada.

	<b>Variação Vel. Fluxo (m/s)</b>	<b>Aprisionamento de Ar</b>	<b>Preenc. Estrutura (s)</b>	<b>Preenc. Canais At. (s)</b>	<b>Press. (Pa)</b>	<b>Macro Poros. (mm<sup>3</sup>)</b>
<b>AV1</b>	3,87x10 <sup>-6</sup> a 2,08	base/sim topo/sim canais/sim 24/24	0,37	0,053	- 2345 a 31157	base 129,34 canal al. 2,49 canais at. 0
<b>AV2</b>	3,90x10 <sup>-6</sup> a 7,97	base/sim topo/não canais/sim 24/24	0,34	0,042	- 2033 a 38959	base 192,48 canal al. 10,20 canais at. 0
<b>AV3</b>	2,32x10 <sup>-6</sup> a 2,15	base/sim topo/não canais/sim 24/24	0,27	0,040	- 1,60 a 37653	base 181,85 canal al. 1,91 canais at. 0
<b>AV4</b>	2,54x10 <sup>-6</sup> a 2,13	base/sim topo/sim canais/sim 24/24	0,34	0,042	- 741 a 35805	base 166,49 canal al. 1,94 canais at. 0
<b>AV5</b>	1,27x10 <sup>-6</sup> a 2,15	base/sim topo/não canais/sim 24/24	0,33	0,038	2625,3 a 42822	base 87,13 canal al. 7,70 canais at. 0

Fonte: Autor.

Quadro 7 – Resultados da análise de geração de alternativas com foco no canal de alimentação das árvores de fundição, obtidos através do *software Click2Cast*<sup>®</sup>. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada.

	<b>Variação Vel. Fluxo (m/s)</b>	<b>Aprisionamento de Ar</b>	<b>Preenc. Estrutura (s)</b>	<b>Preenc. Canais At. (s)</b>	<b>Press. (Pa)</b>	<b>Macro Poros. (mm<sup>3</sup>)</b>
<b>AV1</b>	3,87x10 <sup>-6</sup> a 2,08	base/sim topo/sim canais/sim 24/24	0,37	0,053	- 2345 a 31157	base 129,34 canal al. 2,49 canais at. 0
<b>AV6</b>	3,07x10 <sup>-6</sup> a 2,16	base/sim topo/sim canais/sim 24/24	0,38	0,052	- 3217 a 33336	base 178,97 canal al.0 canais at. 0
<b>AV7</b>	1,05x10 <sup>-5</sup> a 2,07	base/sim topo/não canais/sim 24/24	0,36	0,020	- 4362 a 33754	base 145,21 canal al. 0,70 canais at. 0
<b>AV8</b>	2,06x10 <sup>-6</sup> a 2,09	base/sim topo/não canais/sim 24/24	0,37	0,039	- 1654 a 32090	base 163,51 canal al. 4,42 canais at. 0
<b>AV9</b>	5,00x10 <sup>-6</sup> a 3,00	base/sim topo/sim canais/sim 24/24	0,37	0,038	- 2,67 a 35115	base 126,6 canal al. 7,29 canais at. 0

(Continua)

(Conclusão)

	Varição Vel. Fluxo (m/s)	Aprisionamento de Ar	Preenc. Estrutura (s)	Preenc. Canais At. (s)	Press. (Pa)	Macro Poros. (mm <sup>3</sup> )
AV10	1,07x10 <sup>-5</sup> a 2,11	base/sim topo/não canais/sim 24/24	0,38	0,046	- 1729,5 a 31452	base 151,52 canal al. 2,06 canais at. 0
AV11	2,11x10 <sup>-6</sup> a 2,28	base/sim topo/sim canais/sim 24/24	0,35	0,023	- 8173,3 a 423650	base 89,82 canal al. 1,88 canais at. 0
AV12	5,41x10 <sup>-7</sup> a 2,12	base/sim topo/não canais/sim 24/24	0,41	0,103	- 13270 a 30681	base 160,45 canal al. 0,27 canais at. 0
AV13	6,63x10 <sup>-6</sup> a 2,09	base/sim topo/não canais/sim 21/21	0,35	0,015	- 1,88 a 38600	base 114,44 canal al. 2,09 canais at. 0

Fonte: Autor.

Quadro 8 – Resultados da análise de geração de alternativas com foco nos canais de ataque das árvores de fundição, obtidos através do *software Click2Cast*. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada.

	Varição Vel. Fluxo (m/s)	Aprisionamento de Ar	Preenc. Estrutura (s)	Preenc. Canais At. (s)	Press. (Pa)	Macro Poros. (mm <sup>3</sup> )
AV14	3,55x10 <sup>-6</sup> a 2,16	base/sim topo/sim canais/sim 128/128	0,42	0,086	- 1746,3 a 28772	base 37,43 canal al. 0,03 canais at. 0
AV15	4,88x10 <sup>-6</sup> a 2,14	base/sim topo/sim canais/sim 128/128	0,42	0,068	- 4024,8 a 29970	base 25,36 canal al. 0,08 canais at. 0

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos nas amostras virtuais na etapa de geração de alternativa permitem observar que:

- Das amostras virtuais com foco no redesenho da base da árvore de fundição, (Figura 32) e Quadro 6, AV5 se destacou, obtendo os melhores resultados no somatório dos índices avaliados. A menor variação na velocidade de fluxo do metal foi constatada em AV1 com mensuração de 3,87x10<sup>-6</sup> m/s a 2,08 m/s. Quanto ao aprisionamento de ar, todas estruturas tiveram aprisionamento em sua base e nos 24 canais de ataque presentes em cada uma, entretanto em AV2, AV3 e AV5 o topo da árvore de fundição ficou livre do aprisionamento de ar. Obviamente que o foco está na eliminação ou redução do aprisionamento de

ar nos canais de ataque, pois esses conduzem o metal para as peças a serem fundidas. Entretanto a ausência de ar aprisionado no topo de AV2, AV3 e AV5 é algo a ser considerado. O menor tempo de preenchimento da estrutura é de AV3, em 0,27 segundos. Entretanto, destaca-se, a maior preocupação em obter a menor diferença do tempo de preenchimento dos canais de ataque alocados no topo da árvore para com os próximos a base. Nesse caso, AV5 possui um desempenho um pouco melhor que os demais, com a diferença de tempo de 0,038 segundos. Observa-se que, apesar do tempo de preenchimento entre os diversos patamares para todas estruturas ser rápido, abaixo da casa dos segundos, pequenas variações poderão resultar em mensurações significativas quando estiverem sendo avaliadas estruturas com capacidade máxima de canais de ataque e peças fixadas. Quanto a pressão, AV5 obteve os maiores índices, tanto nas áreas de baixa pressão, mensurado em 2625,3 Pa, quanto de alta pressão, mensurado em 42822 Pa, o que facilita o preenchimento das peças. Já os melhores resultados para macro porosidade pertencem a AV3 com a mensuração mínima no canal de alimentação, em  $1,91\text{mm}^3$  e AV5 com o índice mínimo na base,  $87,13\text{mm}^3$ . Importante destacar que, em todas amostras não foram encontrados índices de macro porosidade nos canais de ataque, as quais são as regiões de maior interesse;

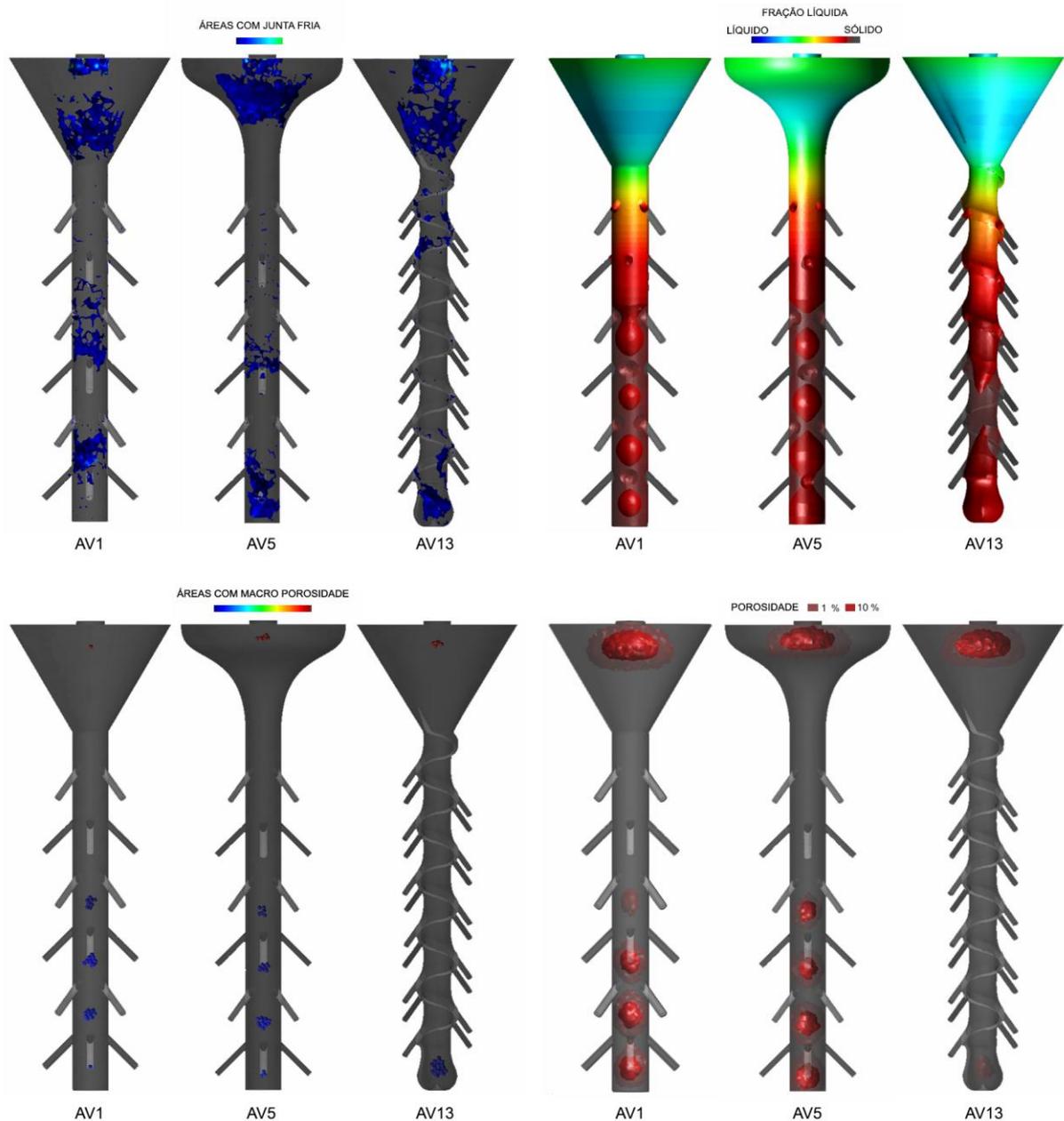
- Das amostras virtuais voltadas para a reconfiguração do canal de alimentação, (Figura 33 e 34) e Quadro 7, pode se destacar AV13, a qual obteve melhor resultado quanto ao aprisionamento de ar, no tempo de preenchimento da estrutura, na diferença de tempo entre o preenchimento dos canais de ataque e no índice mínimo de pressão. A variação mais baixa na velocidade de fluxo do metal foi verificada em AV7, de  $1,05 \times 10^{-5}\text{ m/s}$  a  $2,07\text{ m/s}$ . Na questão referente ao aprisionamento de ar, todas estruturas tiveram aprisionamento em sua base, bem como nas extremidades dos canais de ataque, mas em AV7, AV8, AV10 e AV13 o topo da estrutura ficou livre. O menor tempo de preenchimento da estrutura é de AV11 e AV13, em 0,35 segundos. Porém, evidencia-se a diferença de 0,015 segundos, mensurada em AV13, no tempo de preenchimento dos canais de ataque situados no topo da árvore para com os próximos a base. Esse índice proporciona um preenchimento muito próximo ao simultâneo, entre os diversos patamares dos canais de ataque. Referente a pressão, AV13 obteve o maior índice nas áreas de baixa pressão, mensurado em  $-1,88\text{ Pa}$  e AV11 o maior valor nas áreas de alta pressão, mensurado em  $423650\text{ Pa}$ . Quanto a macro porosidade, não foram identificados em AV6 a ocorrência no canal de alimentação. Já o menor índice de macro porosidade na base, de  $89,82\text{mm}^3$  foi constatado em AV11;

- Das amostras virtuais com estudo no rearranjo dos canais de ataque, (Figura 35) e Quadro 8, AV15 se destaca, com menor variação na velocidade de fluxo, menor diferença de tempo entre o preenchimento dos canais de ataque, maior índice máximo de pressão e menor acometimento por macro porosidade na base. A menor variação da velocidade de fluxo foi mensurada em AV15, com índice de  $4,88 \times 10^{-6}$  m/s a 2,14 m/s. AV14 e AV15 obtiveram os mesmos índices para aprisionamento de ar, o qual foi identificado na base, no topo bem, como nos 128 canais de ataque. Ambas amostras virtuais possuem o mesmo tempo de preenchimento da estrutura, 0,42 segundos. Porém, a diferença do tempo de preenchimento dos canais de ataque localizados no topo da árvore em relação aos próximos a base é um pouco menor em AV15, 0,068 segundos. Quanto a pressão, AV14 tem o maior índice nas áreas de baixa pressão, mensurado em -1746,3 Pa e AV15 o maior índice nas áreas de alta pressão, mensurado em 29970 Pa. Por fim, na avaliação da macro porosidade, AV15 tem o menor índice na região da base,  $25,36 \text{mm}^3$ , enquanto que AV14 o menor índice no canal de alimentação,  $0,03 \text{mm}^3$ , e em ambas amostras virtuais não há ocorrência de macro porosidade nos canais de ataque.

### **4.3. REFINAMENTO DAS ÁRVORES DE FUNDIÇÃO**

A estrutura que configura a amostra final AF1 resulta da mescla e refinamento da base côncava de AV5 a qual obteve resultados superiores para com as demais analisadas. Já a composição do canal de ataque, é norteadada pela inspiração fractal e fibonacci de AV13 a qual se mostrou próxima ao preenchimento simultâneo dos canais de ataque, além de um preenchimento mais rápido da estrutura e bom desempenho quanto ao aprisionamento de ar e mesmo quanto as áreas de baixa pressão (Figura 41). Ressalta-se que, AV3 também possui ótimos índices no comparativo da base, entretanto, por ela ser semelhante a base da estrutura proposta por de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013), opta-se por AV5, buscando assim novas possibilidades. As amostras promissoras AV5 e AV13, as quais são utilizadas como base para compor as amostras finais desta pesquisa, foram verificadas nos índices qualitativos como junta fria, fração líquida, bem como as áreas acometidas por porosidade e macro porosidade (Figura 39 e 40).

Figura 39 – Índices qualitativos referentes a junta fria, fração líquida, macro porosidade e porosidade na amostra convencional AV1, amostra côncava AV5 e na amostra fractal e fibonacci AV13, resultados obtidos no software *Click2Cast*®.



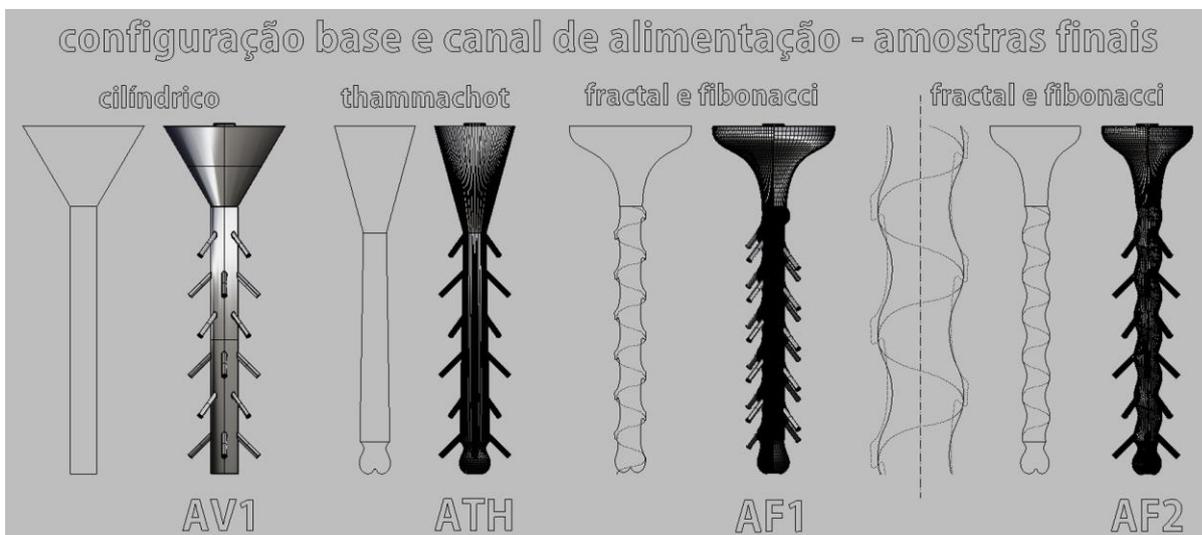
Fonte: Autor.

A análise dos dados qualitativos possibilita verificar que AV5 possui um comportamento bastante similar a AV1, quanto as áreas acometidas pelos índices verificados. Quanto a AV13, percebe-se um aumento das áreas de junta fria na base da estrutura em contraponto a diminuição das mesmas no canal de alimentação. Esse comportamento é positivo, pois quanto mais afastado dos canais de ataque e conseqüentemente das peças, melhor. Os resultados de fração líquida

indicam que as três estruturas oferecem um bom sistema de alimentação durante o processo de solidificação do metal. Quanto a macro porosidade, nota-se uma melhora, pois está alocada somente na base e no topo da estrutura e não mais ao longo do canal de alimentação. Resultado da porcentagem de porosidade reforça esse ponto, além da diminuição da área acometida na base, no topo é identificada uma área acometida, mas com índices de 1% de porosidade e o canal de alimentação permanece livre de porosidade.

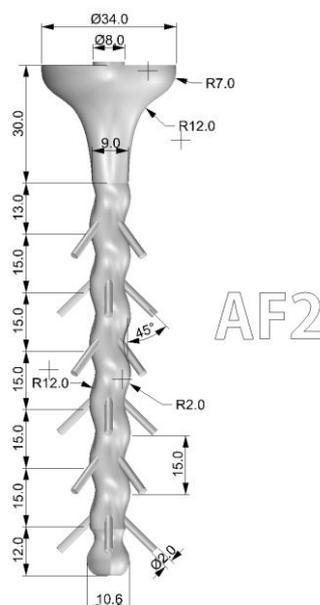
Validado os índices qualitativos de AV5 e AV13, uma nova amostra AF2 é desenvolvida com base em AF1. Em AF2 tem-se a diminuição do diâmetro da base, alinhando com a estrutura de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013). Outro aspecto importante para o desenvolvimento de AF2, é que AF1 limitava as regiões onde canais de ataque poderiam ser alocados. Assim AF2 foi gerado a partir da suavização das saliências que caracterizam a morfologia de AF1 (Figura 40). Na Figura 41 tem-se o dimensionamento técnico que compõe a amostra AF2. Determinado tais pontos, verifica-se o desempenho das amostras finais AF1 e AF2 em comparativo com a amostra que compõe a estrutura convencionalmente utilizada no ramo joalheiro AV1 e a amostra ATH, proposta por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013), estando os resultados agrupados no Quadro 9.

Figura 40 – Amostra convencional AV1, amostra Thammachot ATH e amostras finais AF1 e AF2, modeladas no software *Rhino3D*®. Reconfiguração da base e do canal de alimentação para gerar as amostras finais.



Fonte: Autor.

Figura 41 – Desenho técnico da amostra final, AF2, modelada no software *Rhino3D*®.



Fonte: Autor.

Quadro 9 – Resultados da análise do refinamento estrutural com foco na base e no canal de alimentação das árvores de fundição, obtidos através do software *Click2Cast*®. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada.

	Varição Vel. Fluxo (m/s)	Aprisionamento de Ar	Preenc. Estrutura (s)	Preenc. Canais At. (s)	Press. (Pa)	Macro Poros. (mm <sup>3</sup> )
<b>AV1</b>	3,87x10 <sup>-6</sup> a 2,08	base/sim topo/sim canais/sim 24/24	0,37	0,053	- 2345 a 31157	base 129,34 canal al. 2,49 canais at. 0
<b>ATH</b>	3,05x10 <sup>-6</sup> a 2,10	base/sim topo/não canais/sim 24/24	0,26	0,024	- 33,95 a 34818	base 160,07 canal al. 0,23 canais at. 0
<b>AF1</b>	2,32x10 <sup>-6</sup> a 10,57	base/sim topo/não canais/sim 21/21	0,33	0,017	-331,6 a 41555	base 83,74 canal al. 10,39 canais at. 0
<b>AF2</b>	1,42x10 <sup>-5</sup> a 2,06	base/sim topo/não canais/sim 21/21	0,22	0,002	-3,91 a 36915	base 89,53 canal al. 0,12 canais at. 0

Fonte: Autor.

Os resultados das amostras na etapa de refinamento destacam o desempenho de AF2. Com menor variação na velocidade de fluxo, a estrutura obteve o índice de 1,42x10<sup>-5</sup> m/s a 2,06 m/s. ATH, AF1 e AF2 possuem comportamento semelhante quanto ao aprisionamento de ar, sendo constatado na base e em todos canais de alimentação, porém com topo livre. Quanto ao preenchimento, AF2 além de ter o menor tempo, de 0,22 segundos para a estrutura em si, atingiu o

preenchimento praticamente simultâneo dos canais de ataque nos diversos patamares. Nesse último índice, a diferença foi mensurada em 0,002 segundos no preenchimento de todos os canais de ataque alocados próximo ao topo para com os próximos a base. Na avaliação da pressão AF2 tem o maior índice nas áreas de baixa pressão, mensurado em -3,91 Pa, enquanto que AF1 possui o maior índice nas áreas de alta pressão, 41555 Pa. Já os melhores resultados para macro porosidade são de AF2 com a mensuração mínima no canal de alimentação, em 0,12mm<sup>3</sup> e AF1 com o índice mínimo na base, 83,74 mm<sup>3</sup>.

Com base nos resultados obtidos nas análises de refinamento, adota-se a amostra AF2 como aquela proposta por esta pesquisa. Para alinhar com a fundição real, detalhada no tópico 5.3 e verificar os índices mensurados nas simulações pelo *software Click2Cast*<sup>®</sup> a análise do refinamento estrutural com foco na base e canal de alimentação é feita também utilizando o material latão (60% cobre e 40% zinco), resultados compilados no Quadro 10.

Quadro 10 – Resultados da análise do refinamento estrutural com foco na base e no canal de alimentação das árvores de fundição, realizadas com o material latão, obtidos através do *software Click2Cast*<sup>®</sup>. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada.

	Varição Vel. Fluxo (m/s)	Aprisionamento de Ar	Preenc. Estrutura (s)	Preenc. Canais At. (s)	Press. (Pa)	Macro Poros. (mm <sup>3</sup> )
<b>AV1</b>	6,57x10 <sup>-6</sup> a 2,10	base/sim topo/sim canais/sim 24/24	0,37	0,049	- 1,87 a 27938	base 351,47 canal al. 7,11 canais at. 0
<b>ATH</b>	8,22x10 <sup>-6</sup> a 2,40	base/sim topo/não canais/sim 24/24	0,26	0,024	- 2529 a 51249	base 297,47 canal al. 11,454 canais at. 0
<b>AF2</b>	2,45x10 <sup>-5</sup> a 2,15	base/sim topo/não canais/sim 21/21	0,25	0,011	3,22 a 38026	base 72,44 canal al. 0,22 canais at. 0

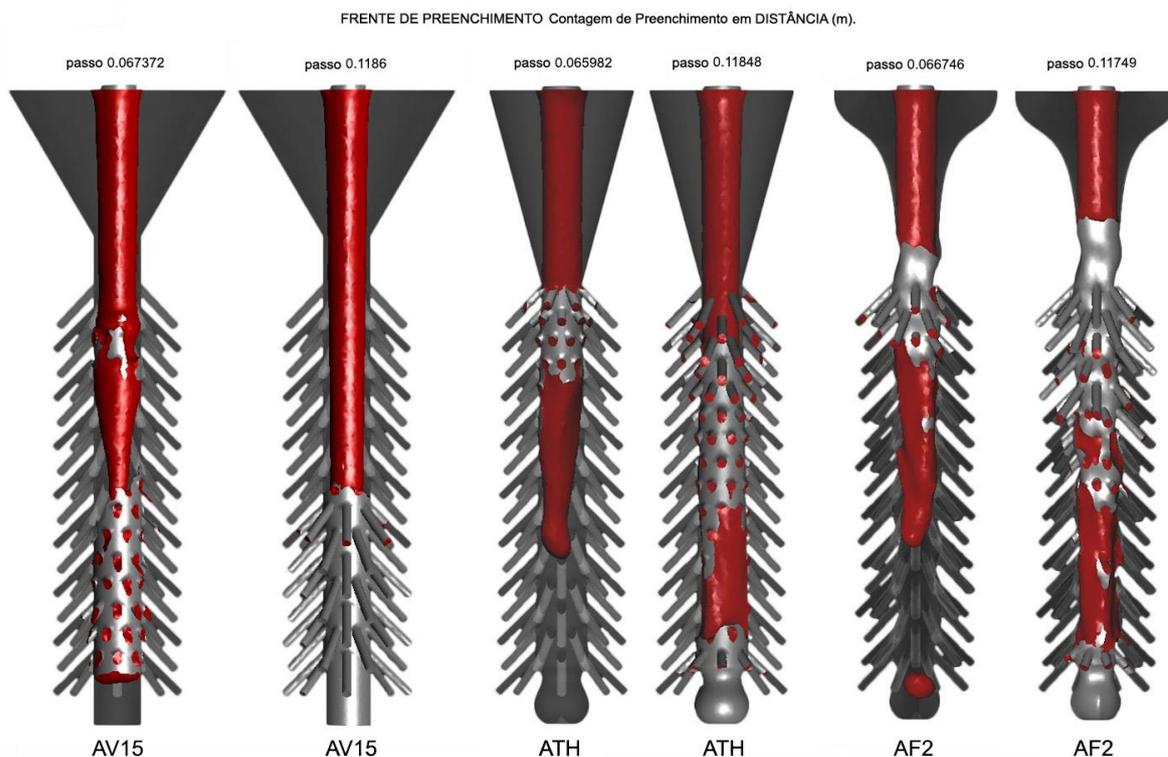
Fonte: Autor.

Os resultados das amostras na etapa de refinamento em latão (60% cobre e 40% zinco) se assemelham aos obtidos na prata pura. As variações dos índices ainda mantem AF2 com o melhor desempenho e validam a utilização do latão nas análises de fundição real realizadas no tópico 5.3.

#### 4.4. ANÁLISE COM APROVEITAMENTO MÁXIMO DOS CANAIS DE ATAQUE

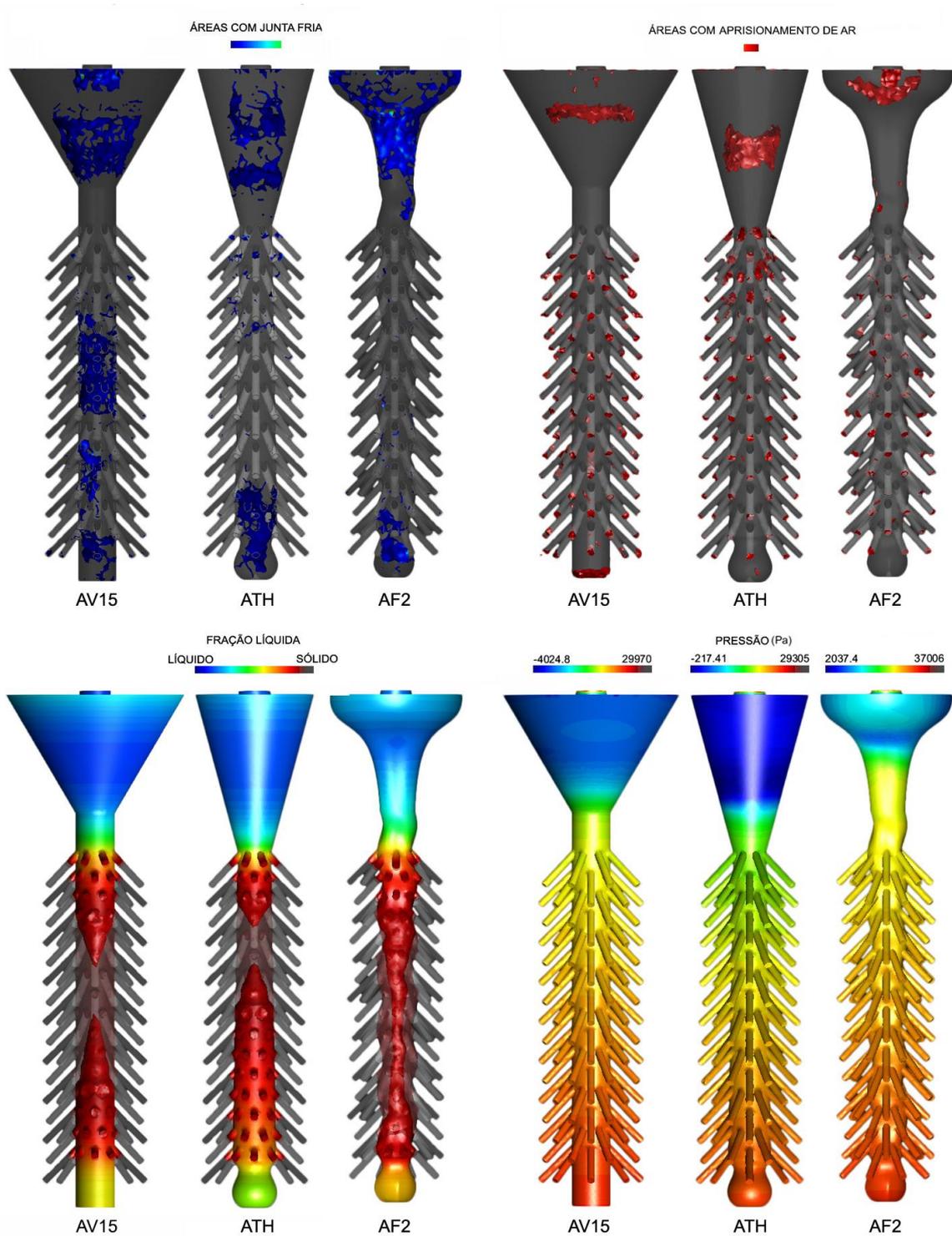
A indústria joalheira opera de modo a ter o máximo de aproveitamento de cada árvore de fundição. Nesse entendimento, esta etapa simula uma linha de produção, verificando o que ocorre quando as estruturas estiverem com aproveitamento máximo de canais de ataque fixados (Figura 42, 43 e 44). Para tanto foram analisadas AV15, a qual é a estrutura convencionalmente utilizada no meio joalheiro, ATH, estrutura proposta por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013) e AF2, estrutura proposta por esta pesquisa. Os resultados foram agrupados no Quadro 11.

Figura 42 – Resultados da análise com aproveitamento máximo de canais de ataque quanto à frente de preenchimento, obtidos no software Click2Cast®.



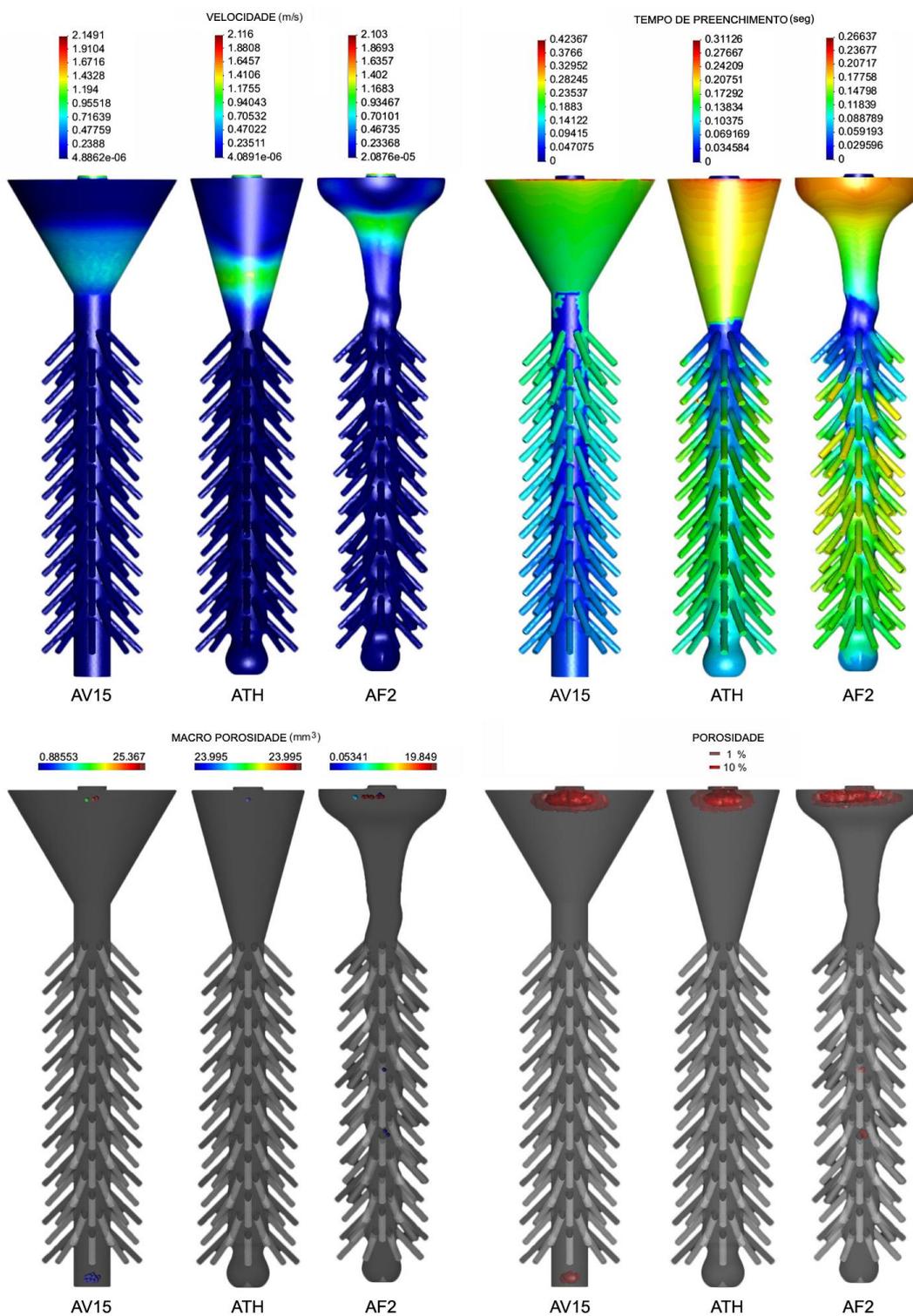
Fonte: Autor.

Figura 43 – Resultados da análise com aproveitamento máximo de canais de ataque quanto as áreas com junta fria, áreas com aprisionamento de ar, fração líquida e pressão, obtidos no software *Click2Cast*®.



Fonte: Autor.

Figura 44 – Resultados da análise com aproveitamento máximo de canais de ataque quanto a velocidade, tempo de preenchimento, macro porosidade e porosidade, obtidos no software *Click2Cast*®.



Fonte: Autor.

Quadro 11 – Resultados da análise com aproveitamento máximo de canais de ataque, obtidos através do *software Click2Cast®*. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada.

	Varição Vel. Fluxo (m/s)	Aprisionam. de Ar	Preenc. Estrutura (s)	Preenc. Canais At. (s)	Press. (Pa)	Macro Poros. (mm <sup>3</sup> )	Volume (mm <sup>3</sup> )
<b>AV15</b>	4,88x10 <sup>-6</sup> a 2,14	base/sim topo/sim canais/sim 128/128	0,42	0,068	- 4024,8 a 29970	base 25,36 canal al. 0,08 canais at. 0	32557,8
<b>ATH</b>	4,08x10 <sup>-6</sup> a 2,11	base/sim topo/não canais/sim 128/128	0,31	0,057	- 217,41 a 29305	base 23,99 canal al. 0 canais at. 0	24080,2
<b>AF2</b>	2,08x10 <sup>-5</sup> a 2,10	base/sim topo/não canais/sim 128/128	0,26	0,037	2037,4 a 37006	base 19,84 canal al. 0,05 canais at. 0	20579,4

Fonte: Autor.

Os resultados das amostras, quanto a simulação de capacidade máxima de canais de alimentação, destacam o desempenho de AF2. A estrutura obteve a menor variação na velocidade de fluxo, mensurado em 2,08x10<sup>-5</sup> m/s a 2,10 m/s. AV15, ATH e AF2 possuem resultados semelhantes quanto ao aprisionamento de ar, sendo identificado na base e em todos canais de alimentação, porém com topo livre. Quanto ao preenchimento, AF2 além de ter o menor tempo, de 0,26 segundos para a estrutura em si, tem a menor diferença de tempo entre o preenchimento dos canais de ataque alocados no topo da estrutura para com os próximos a base, auferido em 0,037 segundos. Na avaliação da pressão AF2 tem o maior índice nas áreas de baixa pressão, mensurado em 2037,4 Pa, e maior índice nas áreas de alta pressão, 37006 Pa. Já os melhores resultados para macro porosidade são de ATH no qual não foram identificadas no canal de alimentação e AF2 com o índice mínimo na base, 19,84 mm<sup>3</sup>.

Quanto aos índices qualitativos, enfatiza-se que, quanto mais próximo aos canais de ataque, maior o interesse pela otimização dos resultados nas partes que compõe a estrutura, ou seja, a prioridade pela melhoria segue a ordem, da maior para a menor: canais de ataque, canal de alimentação, base da árvore. Para junta fria, observa-se que há redução ao longo do canal de alimentação em ATH e AF2, comparadas com AV15. AF2 possui uma maior incidência na base que ATH, porém AF2 tem menos áreas acometidas ao longo do canal de alimentação. No que se refere ao aprisionamento de ar, AF2 possui menos áreas acometidas ao longo do canal de alimentação, quando comparado com ATH. Nos resultados de fração líquida para AV15, ATH e AF2, verifica-se que as três estruturas se comportam de modo eficiente, nos quais, o canal de alimentação permanece com metal líquido até que todos os canais de ataque estejam preenchidos e com metal solidificado. Em AF2 é verificado que a solidificação do canal de alimentação se distribui de modo mais homogêneo ao longo do seu eixo vertical, enquanto que em AV15 e ATH a solidificação

acontece primeiramente na região central e após se distribui para as extremidades. Os resultados quanto a porcentagem de porosidade ratifica os resultados de macro porosidade, no qual ATH teve melhor desempenho, pois o canal de alimentação está livre da presença de porosidade mesmo nos menores índices de medição, em 1%.

Nessa última análise virtual realizada com AV15, ATH e AF2, adicionou-se o cálculo de volume da estrutura, realizado pelo *software Rhino3D®*. Alinhado a um dos objetivos desta pesquisa, AF2 faz o uso mais otimizado de material, com o volume de 20579,4 mm<sup>3</sup>. Para elucidar, estimando na prata, AF2 pesaria aproximadamente 205 gramas, seguido por ATH com aproximadamente 240 gramas e AV15 com aproximadamente 325 gramas.

#### **4.5. CONSIDERAÇÕES**

Os resultados obtidos pelas análises virtuais indicam o aprimoramento da árvore de fundição em AF2. No que se refere aos resultados quantitativos, AF2 obteve a menor variação na velocidade de fluxo do metal, menor tempo de preenchimento da estrutura, menor diferença no tempo de preenchimento dos canais próximos ao topo para os da base da árvore, maiores índices de pressão tanto nas áreas de alta como nas áreas de baixa pressão, menor índice de macro porosidade da base e menor uso de metal necessário na estrutura.

No que tange os resultados qualitativos, percebe-se o aumento das áreas de junta fria na base de AF2, entretanto há redução das mesmas ao longo do canal de alimentação, quando comparadas com AV15 e ATH. AF2 possui pequenas áreas acometidas por porosidade no canal de alimentação, nesse ponto ATH obteve um melhor resultado, não sendo identificado porosidade. Quanto a fração líquida, as três estruturas oferecem um bom sistema de alimentação durante o processo de solidificação do metal. Especula-se que a distribuição mais homogênea da solidificação do canal de alimentação no eixo vertical, em AF2, possa resultar em um melhor preenchimento e reduzir a porosidade.

Quantitativo ou qualitativo, muitos dos resultados obtidos em AF2 alinham com os almejados e citados no tópico 3.4: Diminuição da variação da velocidade de fluxo; Redução do tempo de preenchimento da estrutura bem como na diferença de tempo entre os canais próximos ao topo e a base; Manutenção do bom sistema de alimentação das peças durante o processo de solidificação do metal.

# ANÁLISES EM FUNDIÇÃO REAL

---

O capítulo 5 tem por objetivo verificar a factibilidade produtiva da estrutura proposta por esta pesquisa. Para tanto, define quais são os corpos de prova a serem fixados na estrutura, elucida como ocorre a fabricação desses corpos de prova, bem como da estrutura em si. As amostras finais: estrutura proposta por esta pesquisa, estrutura convencional e estrutura proposta por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013), são fundidas no polo joalheiro de Guaporé, para verificação dos resultados em cunho real.

## 5.1. DEFININDO OS CORPOS DE PROVA

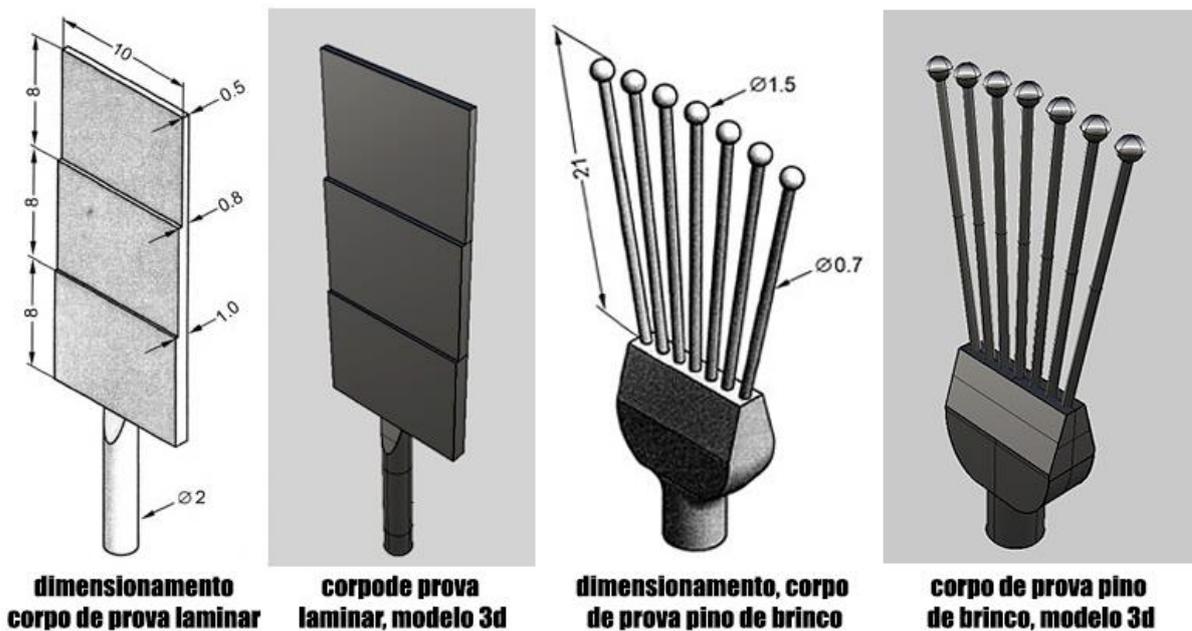
O processo de fundição por cera perdida é utilizado para fabricar joias com os mais variados aspectos morfológicos. Assim, ao definir qual a configuração do corpo de prova para a pesquisa, fica evidente que nem todas as possíveis variáveis podem ser analisadas. Entretanto, é possível tomar como base dois aspectos morfológicos para a avaliação, pois ambos trabalham no limiar do que o processo de fundição possibilita como bom resultado e por isso desenvolvidos por processos de estamparia e trefilagem. Por trabalhar no limite do que o processo possibilita, ficará evidente os erros e somente boas estruturas de alimentação poderão suprir os parâmetros que tais peças precisam para serem produzidas. Tais corpos de prova são os mesmos adotados na pesquisa de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013), pois, além de contemplar os limites da viabilidade no desenvolvimento via fundição por cera perdida, possibilitarão um comparativo entre os obtidos pelas estruturas desta pesquisa para com a dos autores anteriormente citados. Os corpos de prova são classificados em:

- Corpo de prova pino de brinco, semelhante a um fio, possui diâmetro de 0,7mm, o qual está muito próximo do limite mínimo para que a peça seja preenchida no processo de injeção de cera no molde. A ponta de cada fio possui uma esfera de 1,5mm de diâmetro, essa atua como reservatório de metal enquanto a estrutura se solidifica, bem como redireciona para si a porosidade que ficaria concentrada na peça, funcionalidade destacada anteriormente na Figura 23. A produção de

pinos de brinco é fabricada pelo processo de trefilação, o qual confere propriedades mecânicas e acabamento superficial superior. Devido ao pequeno diâmetro e alongado perfil, é uma peça que, fabricado em fundição por cera perdida, tem maior probabilidade de resultar em preenchimentos incompletos do metal e por isso interessante como amostra para esta pesquisa (Figura 45);

- Corpo de prova laminar, peças com essa configuração estrutural, são preferencialmente fabricadas pelo processo de estamparia, o qual além de proporcionar um acabamento superficial superior evita a retração do metal. Entretanto, é a dificuldade de obter um bom acabamento superficial bem como uma provável retração nesse tipo de estrutura, que a faz interessante como amostra para a pesquisa. A amostra possui em sua parte mais espessa 1mm, reduzindo para 0.8mm e chegando na porção mais fina com 0,5mm, esse último, parâmetro limite para a injeção de cera no molde (Figura 45).

Figura 45 – Corpos de prova laminar e pino de brinco modelados no *software Rhino3D®*, dimensionamento gerado a partir da pesquisa de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013).

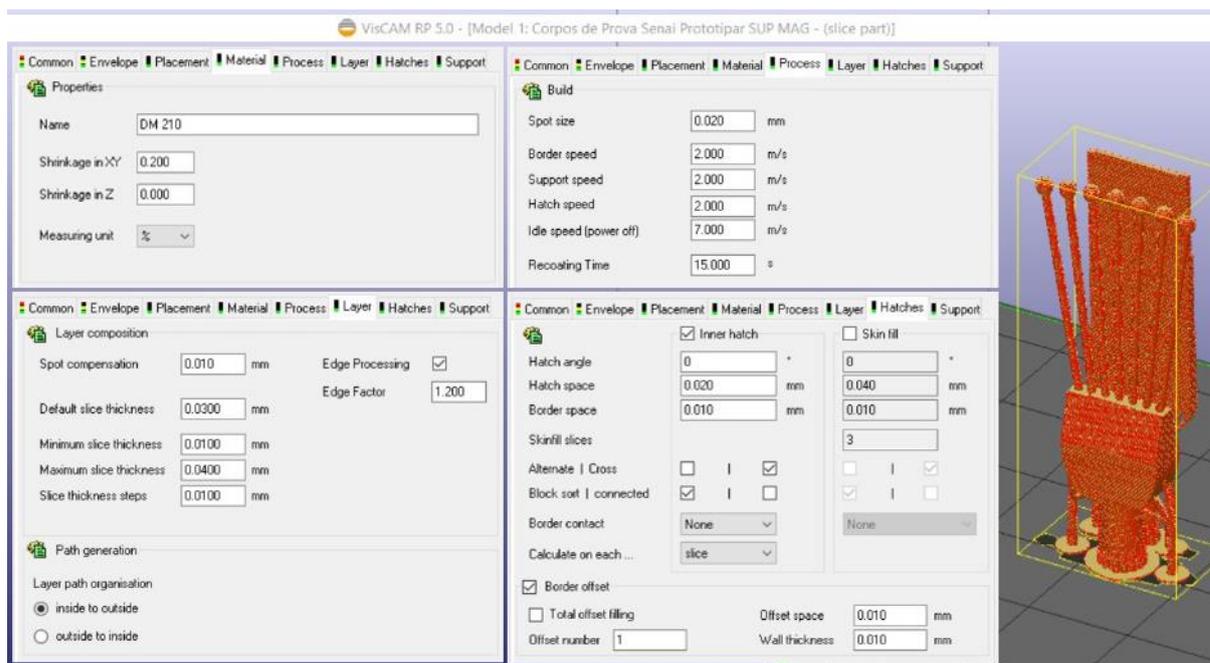


Fonte: Adaptado de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013) e Schwab, F. (2020).

## 5.2. CONFECÇÃO DAS ESTRUTURAS REAIS AV15, ATH E AF2 COM OS CORPOS DE PROVA FIXADOS

A produção das estruturas reais, para a realização das análises, fez uso de dois processos distintos, a estereolitografia e a fresagem CNC. Os dois corpos de prova, laminar e pino de brinco, mais canal de ataque, modelados no *software Rhino3D®*, foram exportados no formato stl, binário, com tolerância de 0,01mm e processados no *software VisCAM RP 5.0*. Nesse, foram determinados os parâmetros para a produção dos modelos pelo processo aditivo de estereolitografia (Figura 46). Para tanto, foi utilizada a máquina 028J e da resina Therma DM210, ambas da marca DWS. Destaca-se o uso da espessura de camada em 0,03 mm, a qual oferece uma boa relação entre tempo de produção e a resolução dos corpos de prova. Essa etapa produtiva foi realizada em parceria com o SENAI, localizado em Guaporé (Figura 47).

Figura 46 – Configuração utilizada no *software VisCAM RP 5.0*, para o processo aditivo de construção dos corpos de prova laminar e pino de brinco mais canais de ataque.

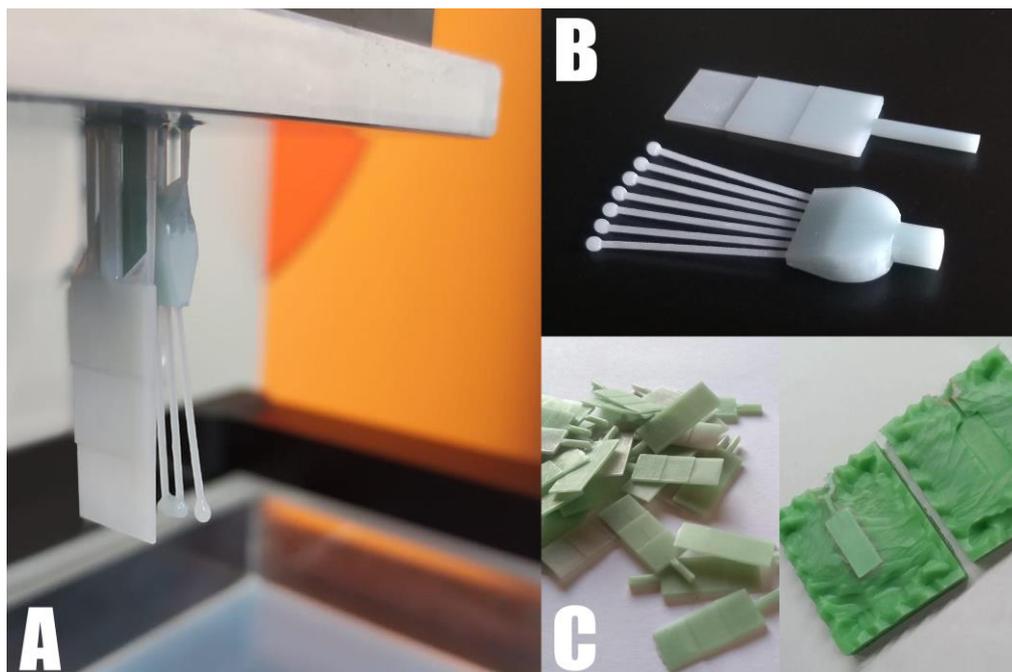


Fonte: Autor.

Findo o processo aditivo, é necessário remover os suportes que ajudam a estruturar a peça enquanto é fabricada, para isso utiliza-se um bisturi e eventualmente uma lixa de granulometria 600, para remover eventuais marcas. Os dois corpos de prova e seus respectivos canais de ataque, em resina, foram utilizados como matriz, ou seja, a partir deles foram produzidos dois moldes com a borracha de silicone VD 80°C da marca Silbras. Os moldes foram vulcanizados a 70°C, por cerca de 1 hora e 40 minutos. Com os moldes finalizados, os corpos de prova foram replicados em cera do tipo

verde água, recomendada para peças intrincadas, também da marca Silbras (Figura 47). As réplicas foram produzidas pelo processo de injeção, em uma máquina da marca Yasui, modelo D-VWI, com a cera em temperatura de 74°C e pressurização aproximada em 1,7 bar. Essa segunda etapa produtiva foi realizada em parceria com a empresa Sulune Joias, localizada em Guaporé

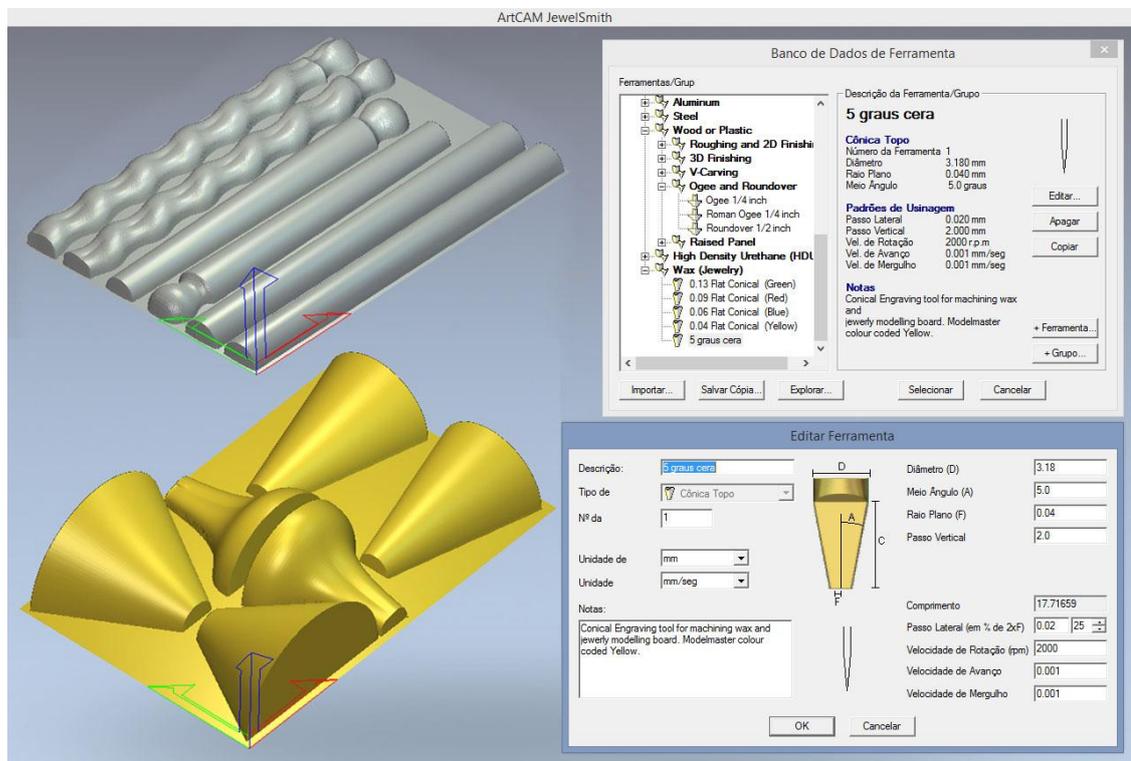
Figura 47 – Desenvolvimento dos corpos de prova, mais canais de ataque. (A) O processo aditivo de estereolitografia; (B) Os corpos de prova e canais de ataque matriz, prontos para serem replicados; (C) As réplicas geradas no molde pelo processo de injeção.



Fonte: Autor.

As estruturas que compõem as bases e os canais de alimentação das amostras AV15, ATH e AF2 foram fabricadas através da usinagem CNC em uma máquina da marca Roland, modelo EGX-300. O processo fez uso dos modelos virtuais desenvolvidos no *software Rhino3D®*, os quais foram exportados para o *software ArtCAM Jewel Smith 9.126* no formato stl, binário, com tolerância de 0,01mm. No *software ArtCAM Jewel Smith 9.126* foram determinados os parâmetros de fresagem (Figura 48), dos quais, a velocidade de avanço no eixo x e y foram ajustados diretamente na máquina, para 8mm/s, e o giro da fresa para aproximadamente 11.000 RPM. As estruturas foram divididas em seu eixo central, longitudinalmente, por ser o modo mais prático e possível de viabilizar a fresagem das peças, pois a máquina CNC utilizada trabalha em apenas três eixos de subtração do material. As estruturas foram novamente divididas, de modo a agrupar as bases em um único arquivo para fresagem e os canais de alimentação em outro. Optou-se por essa nova divisão para agrupar os pontos mais volumosos das estruturas próximos, desse modo otimizou-se o uso dos blocos de cera (Figura 49). A cera utilizada é a azul da marca Ferris, específica para modelos em joalheria.

Figura 48 – Configuração utilizada no software ArtCAM Jewel Smith 9.126, para a fresagem das estruturas que compõem as bases e os canais de alimentação das amostras AV15, ATH e AF2.



Fonte: Autor.

Figura 49 – Fresagem das estruturas que compõem as bases e os canais de alimentação das amostras AV15, ATH e AF2. (A) Canais de alimentação; (B) Bases; (C) Estruturas pós fresagem.



Fonte: Autor.

As estruturas, fresadas, foram destacadas do remanescente de cera do bloco e com o uso de um pirógrafo, modelo OK-01, da marca Center TI, foram unidas de acordo com a configuração projetada das amostras AV15, ATH e AF2. O pirógrafo liquefaz a cera, temperatura utilizada próxima a 115°C e com o resfriamento a cera solidifica-se, unindo as partes e também preenchendo falhas oriundas do processo de fresagem. Para retirar marcas do processo de fresagem e dar acabamento, pós montagem das estruturas, fez-se uso de limas do tipo murça da marca Gut, específicas para joalheria. Posteriormente, as réplicas dos corpos de prova laminar e pino de brinco, mais canais de ataque, foram fixadas nas estruturas com o auxílio do pirógrafo, seguindo o mesmo processo da montagem das estruturas. Para fixar os corpos de prova nas estruturas foi utilizado um gabarito, vista frontal das estruturas, gerada através da modelagem virtual no *software Rhino3D®* e impresso em escala 1:1. Finalizadas, as amostras AV15, ATH e AF2, compõem duas árvores de fundição de cada, ou seja, possuem a versão com os corpos de prova laminar fixados bem como com os corpos de prova brinco de pino (Figura 50).

Figura 50 – Amostras AV15, ATH e AF2 com corpos de prova laminar e corpos de prova pino de brinco fixados, prontas para fundição. À direita o pirógrafo utilizado para a montagem das estruturas, abaixo o gabarito utilizado para orientar a montagem. A estrutura ATH laminar já posicionada sobre a base de borracha utilizada no processo de fundição por cera perdida.



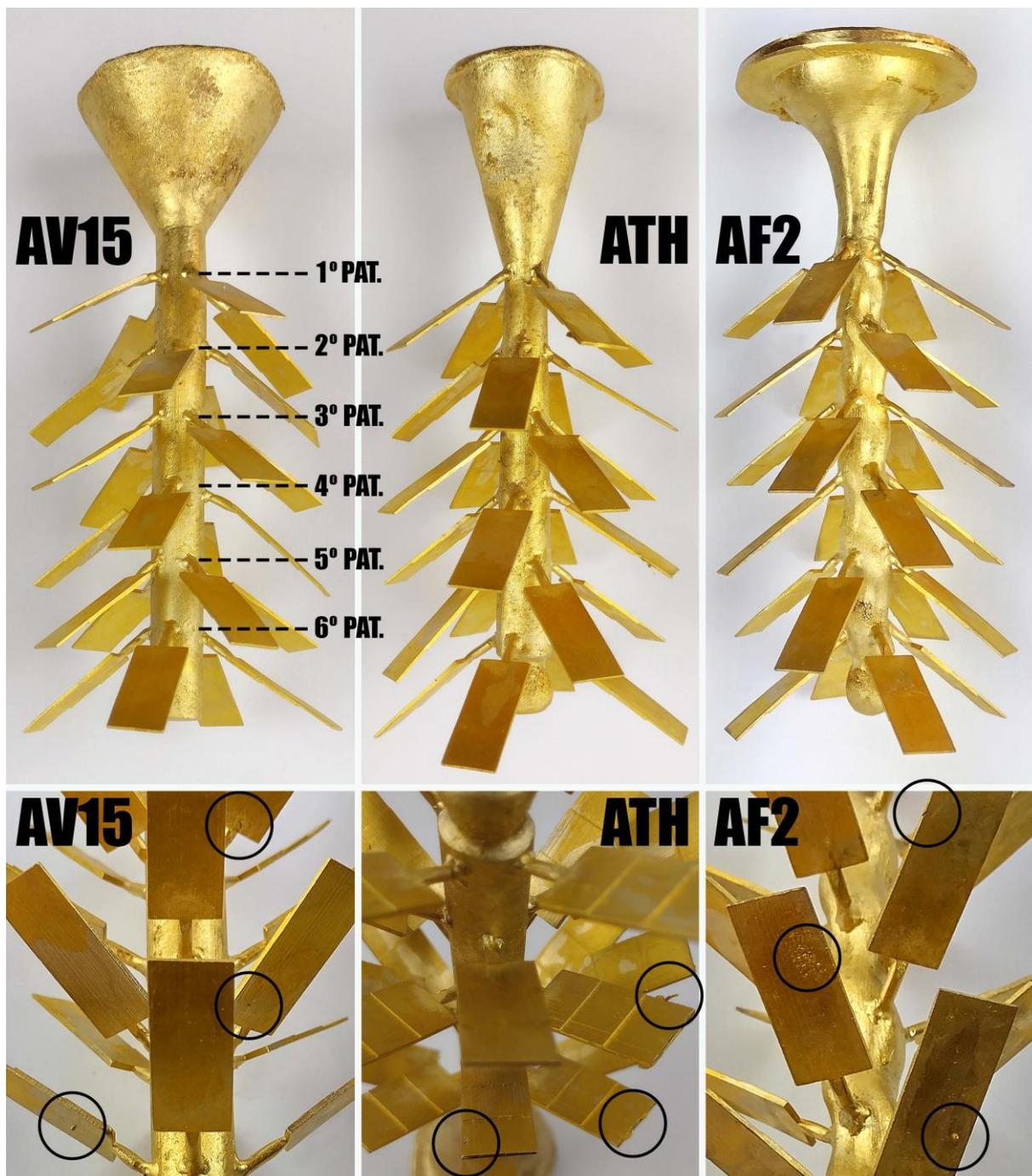
Fonte: Autor.

### 5.3. OS RESULTADOS DAS ESTRUTURAS FUNDIDAS

As estruturas AV15, ATH e AF2, com os corpos de prova laminares e corpos de prova pino de brinco, foram fundidas em latão, o qual é amplamente utilizado na indústria joalheira. Essa etapa produtiva foi realizada em parceria com a empresa Sulune Joias, localizada em Guaporé (Figura 53, 54, 55 e 56). A escolha de material diferente da prata utilizada nas análises virtuais se deve ao custo inferior, viabilizando assim a realização da fundição, pois a pesquisa não teve fomento para sua realização. Entende-se que não há como mensurar nas estruturas reais os parâmetros mensurados nas análises virtuais, a exemplo da variação da velocidade de fluxo do metal líquido ou os índices de macro porosidade, logo não é imprescindível utilizar o mesmo metal para comparativo. Vale ressaltar que, o processo de fundição mescla etapas realizadas por máquinas com aquelas realizadas por pessoas, a exemplo da etapa em que o metal é vertido pela cavidade do molde, feito de modo manual pela empresa. Variável também é tempo de descanso de cada molde até seu preenchimento, ainda que mínimo, pois não são preparados e preenchidos de modo simultâneo para uma idêntica aferição. Outras variáveis, como, manuseio e regulagem dos equipamentos devem ser consideradas e com isso entende-se que, o comparativo assume aqui, um caráter muito mais qualitativo do que quantitativo. Esses fatores dificultam também um comparativo direto com os resultados obtidos nas análises virtuais para com os obtidos nas estruturas fundidas.

Com base nos pressupostos citados no início desse capítulo, analisa-se os resultados obtidos nas estruturas reais, com os quais pode-se considerar que AV15, ATH e AF2 foram eficientes em dar forma aos corpos de prova laminares e corpos de prova pino de brinco, não havendo problemas de preenchimento. Alguns corpos de prova contêm pequenos problemas pontuais, grande parte deles facilmente solucionáveis no processo posterior de acabamento. Os problemas pontuais das estruturas com corpos de prova laminares e corpos de prova pino de brinco foram agrupados nos Quadros 12 e 13, respectivamente. O somatório de problemas observados em cada patamar da estrutura com corpos de prova laminar e corpos de prova pino de brinco, podem ser observados nos Quadros 13 e 15, respectivamente. Vale ressaltar que todos corpos de prova passaram pelo processo de retirada de rebarbas na cera, ou seja, as rebarbas mensuradas nos Quadros 12 e 14 são decorrentes do processo de fundição. As cavidades superficiais englobam o que Kliauga e Ferrante (2009) classificam como cavidades superficiais esféricas e poros originados de inclusões, o que pode ser visto no tópico 2.6.2.

Figura 51 – Amostras AV15, ATH e AF2 com corpos de prova laminar fundidas em latão. Nos detalhes circulados em preto defeitos pontuais de fundição, identificados como: rebarbas, áreas com porosidade, esferas completas e cavidades superficiais. À esquerda, a identificação dos 6 patamares em que os corpos de prova foram alocados.



Fonte: Autor.

Quadro 12 – Resultados da análise das estruturas AV15, ATH e AF2 com corpos de prova laminares, fundidos em latão. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada.

	Rebarbas	Áreas com Porosidade	Bolhas/ Esferas completas	Cavidades Superficiais
AV15	2	9	7	34
ATH	3	5	4	31
AF2	0	10	3	38

Fonte: Autor.

Quadro 13 – Somatório dos problemas pontuais identificados em cada patamar da estrutura AV15, ATH e AF2 com corpos de prova laminares, fundidos em latão. O 1º patamar é o mais próximo a base da árvore de fundição e assim sucede até o 6º patamar, mais próximo ao topo da árvore de fundição. As células com fundo na cor rosa enfatizam os patamares onde foram identificados mais problemas, por estrutura.

	Número de Problemas de Fundição por Patamar					
	1º Pat.	2º Pat.	3º Pat.	4º Pat.	5º Pat.	6º Pat.
AV15	11	7	13	8	6	7
ATH	9	9	6	8	3	8
AF2	8	11	9	7	6	10

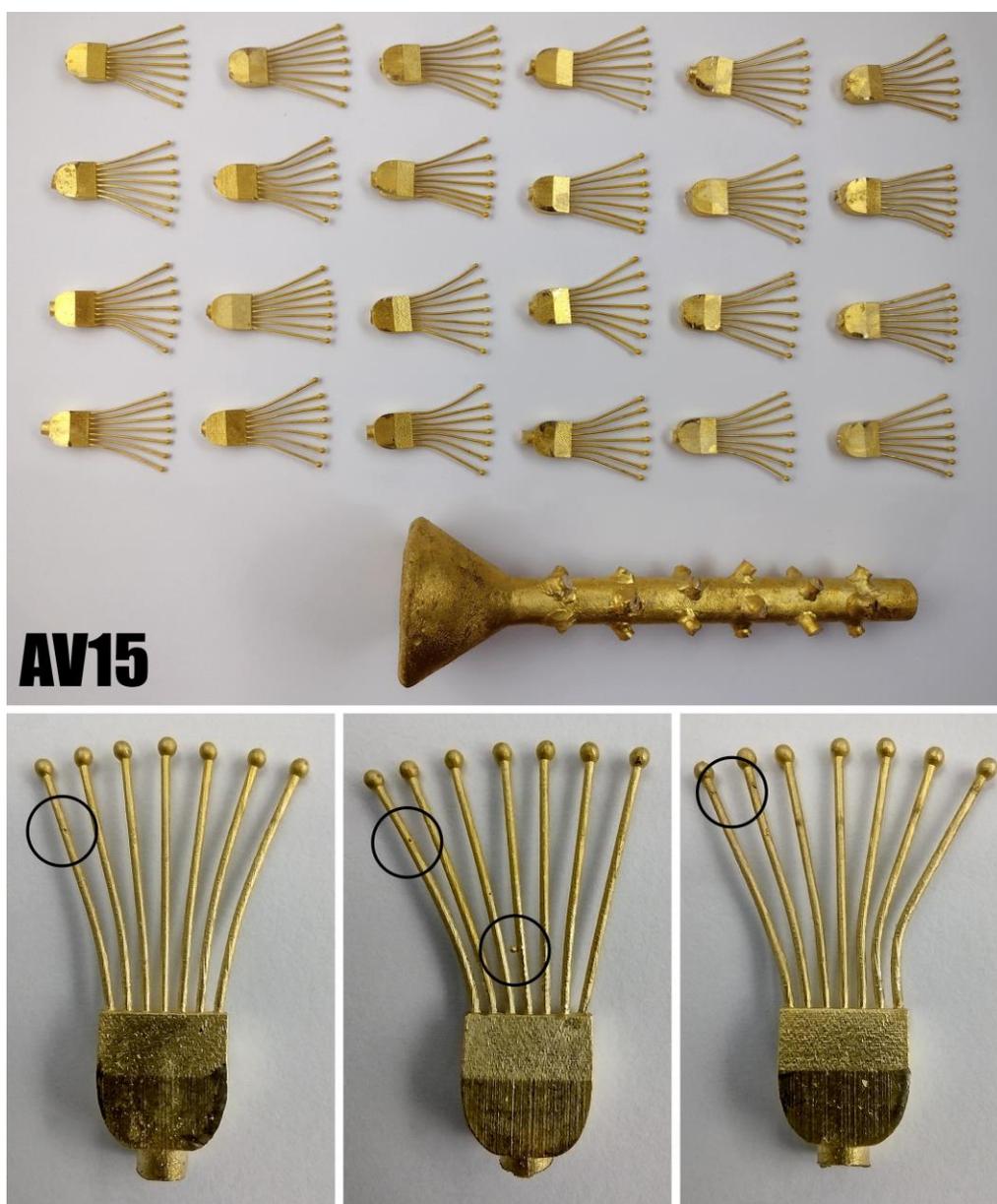
Fonte: Autor.

Os índices obtidos para as amostras AV15, ATH e AF2 com corpos de prova laminar, quantos aos problemas pontuais, mostram um melhor desempenho de ATH e AF2 (Quadro 11):

- ATH com menos áreas acometidas por porosidade e cavidades superficiais;
- AF2 não teve incidência de rebarbas e apresenta poucas bolhas/esferas completas na superfície dos corpos de prova.

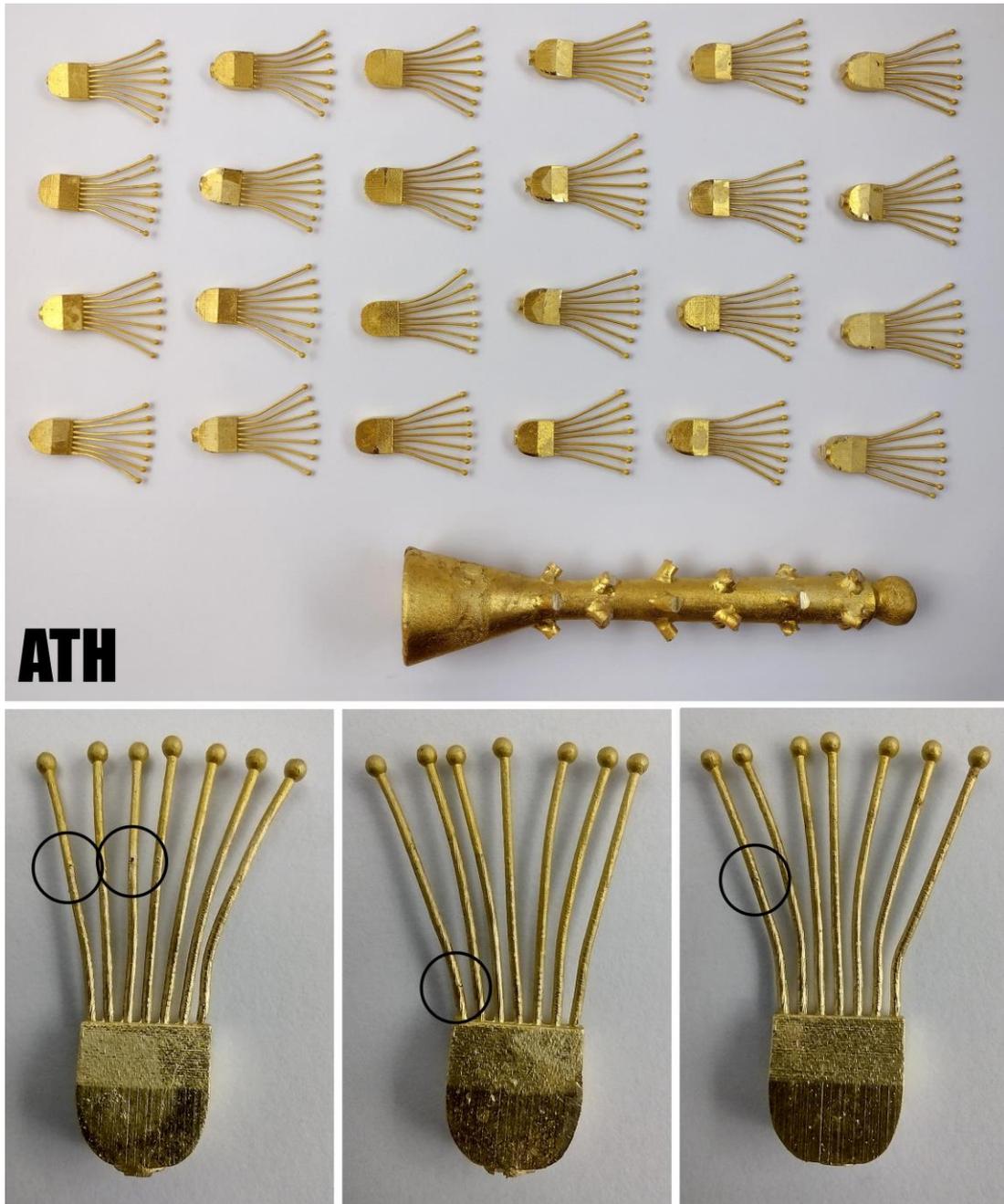
O Quadro 13, corrobora com Specialist Refractory Services (2019) que destaca a área próxima à base da árvore como a mais acometida por problemas oriundos da retração do metal e porosidade. O retorno do metal ao atingir o topo da árvore também pode ser turbulento, ocasionando problemas, recordando aqui o topo em formato de maçã, proposto por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013) como melhoria nessa questão. No Quadro 13, percebe-se que, de fato, a região de topo é ligeiramente mais acometida pelos problemas pontuais.

Figura 52 – Amostra AV15, com corpos de prova pino de brinco fundidas em latão. Nenhum dos 24 corpos de prova apresentaram falhas de preenchimento. Nos detalhes circulado em preto defeitos pontuais de fundição, identificados como: áreas com porosidade, esferas completas e cavidades superficiais.



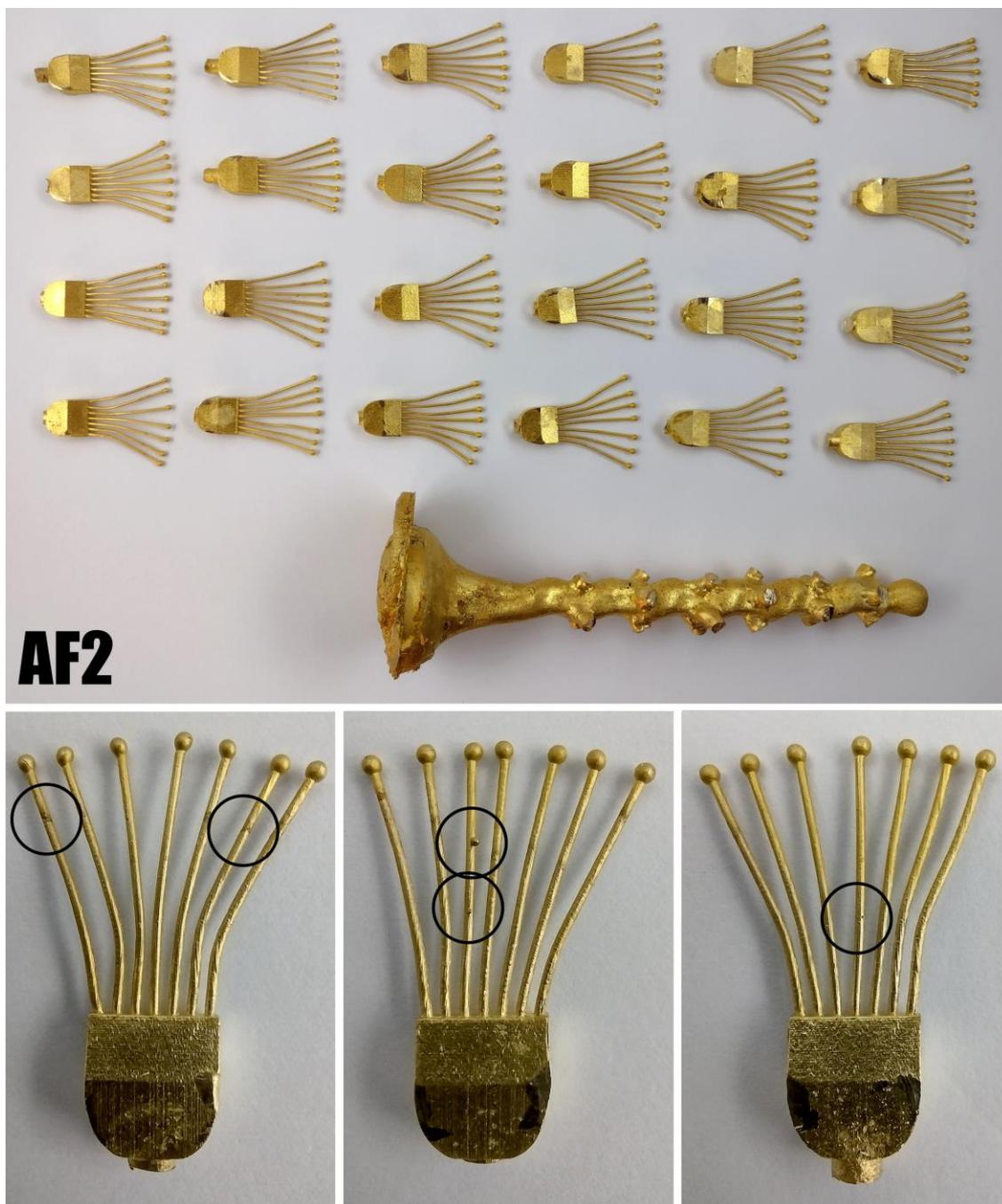
Fonte: Autor.

Figura 53 – Amostra ATH, com corpos de prova pino de brinco fundidas em latão. Nenhum dos 24 corpos de prova apresentaram falhas de preenchimento. Nos detalhes circulosados em preto defeitos pontuais de fundição, identificados como: áreas com porosidade, esferas completas e cavidades superficiais.



Fonte: Autor.

Figura 54 – Amostra AF2, com corpos de prova pino de brinco fundidas em latão. Nenhum dos 24 corpos de prova apresentou falha de preenchimento. Nos detalhes circulosados em preto defeitos pontuais de fundição, identificados como: áreas com porosidade, esferas completas e cavidades superficiais.



Fonte: Autor.

Quadro 14 – Resultados da análise das estruturas AV15, ATH e AF2 com corpos de prova pino de brinco, fundidos em latão.. As células com fundo na cor cinza enfatizam os melhores índices para cada variável analisada.

	Rebarbas	Áreas com Porosidade	Bolhas/ Esferas completas	Cavidades Superficiais
AV15	0	9	9	4
ATH	0	7	2	11
AF2	0	7	3	7

Fonte: Autor.

Quadro 15 – Somatório dos problemas pontuais identificados em cada patamar da estrutura AV15, ATH e AF2 com corpos de prova pino de brinco, fundidos em latão. O 1º patamar é o mais próximo a base da árvore de fundição e assim sucede até o 6º patamar, mais próximo ao topo da árvore de fundição. As células com fundo na cor rosa enfatizam os patamares onde foram identificados mais problemas, por estrutura.

	Número de Problemas de Fundição por Patamar					
	1º Pat.	2º Pat.	3º Pat.	4º Pat.	5º Pat.	6º Pat.
AV15	5	5	1	0	1	1
ATH	4	0	1	1	2	2
AF2	3	2	1	0	0	1

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos para as amostras AV15, ATH e AF2 com corpos de prova pino de brinco, quanto aos problemas pontuais, mostra um desempenho mais equilibrado entre as três estruturas (Quadro 14):

- Em nenhuma estrutura foi constatado rebarba;
- ATH e AF2 com menos áreas acometidas por porosidade;
- ATH com menor incidência de bolhas e esferas completas;
- AV15 com menos cavidades superficiais.

Os resultados obtidos no Quadro 15 é similar ao Quadro 13, reafirmando a área próxima à base da árvore como problemática seguida pelo topo da mesma.

#### **5.4. CONSIDERAÇÕES**

Os resultados obtidos pelas análises de fundição real, ainda que não possam ser comparados com os obtidos nas análises virtuais corroboram a viabilidade produtiva da estrutura proposta por esta pesquisa. Importante destacar que todo processo de desenvolvimento da estrutura AF2 fez uso dos mesmos equipamentos e tecnologia já utilizados nos polos fabris a que se destina, Guaporé e Limeira, facilitando a implementação das otimizações propostas neste estudo pelo meio produtivo.

As estruturas fundidas em latão evidenciam os problemas pontuais que podem ocorrer na fundição, muitos dos quais decorrentes das diversas variáveis do processo produtivo em si. Esse ponto auxilia no entendimento da importância de pesquisas que busquem sistematizar e automatizar o máximo de etapas produtivas possíveis na fundição por cera perdida, quando a busca é direcionada para obtenção mínima de defeitos nas peças resultantes do processo. Entretanto, novamente é enfatizado que AV15, ATH e AF2 foram eficientes em dar forma aos corpos de prova e que grande parte dos problemas pontuais são facilmente solucionáveis no processo posterior de acabamento.

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

Esta pesquisa une conhecimentos de áreas como matemática, biologia e design, mesclando conceitos biomiméticos ao redesenho da estrutura árvore de fundição para a fabricação de joias. Essa abordagem resulta em um processo criativo, o qual, intermediado pelo uso da análise por elementos finitos, obteve resultados promissores na otimização da produção joalheira. A utilização da biomimética no processo criativo, através da geometria fractal, da série fibonacci, da morfologia das árvores naturais trouxe o desafio de transpor conceitos a um objeto de estudo já implementado em um meio produtivo. Nesse entendimento, adequar ideias no redesenho da árvore de fundição, que tem suas limitações no que tange técnica e dimensionamento é complexo, mas de grande valia dadas as possíveis vantagens que essa abordagem inovadora pode contribuir. Com isso, destaca-se que essa tese ajuda a elucidar a importância e explicita um, entre tantos modos de como pode ocorrer a inserção do profissional do Design no âmbito produtivo. Um novo olhar, aliado a criatividade pode trazer resultados promissores a problemas existentes.

Nas análises virtuais por elementos finitos pode se perceber com maior clareza o aprimoramento que o redesenho da estrutura, AF2, obteve em diversos índices mensurados, tais como a diminuição da variação na velocidade de fluxo do metal, menor tempo de preenchimento da estrutura, menor diferença no tempo de preenchimento dos canais próximos ao topo para os da base da árvore, maiores índices de pressão tanto nas áreas de alta como nas áreas de baixa pressão, menor índice de macro porosidade da base e menor uso de metal necessário na estrutura. Muitos desses estão alinhados com o que Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013) enfatizam nos pontos a serem buscados para o aprimoramento da estrutura da árvore de fundição, citados no tópico 2.6.2. Entre os aprimoramentos da estrutura proposta por esta pesquisa, a diminuição do volume deve ser enfatizada, tem-se a redução de 37% do metal utilizado na estrutura convencional e de 15% do metal utilizado na estrutura proposta por Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013). A menor utilização de metal na estrutura, ainda que esse metal seja reaproveitado pela indústria, sendo refundido, significa uma melhor otimização do material utilizado, do processo e da energia gasta para a transformação do mesmo.

As análises de fundição real corroboram a viabilidade produtiva da estrutura proposta, a qual faz uso dos mesmos equipamentos e tecnologia já empregados nos polos fabris a que se

destina, o que facilita a implementação das otimizações obtidas nesta pesquisa no meio produtivo. Nessas análises, observa-se que AV15, ATH e AF2 foram eficazes no preenchimento dos corpos de prova e evidencia-se problemas pontuais que podem ocorrer na fundição, muitos dos quais decorrentes das diversas variáveis do processo produtivo em si. A observação dos problemas pontuais, os quais podem ser decorrentes de diversos fatores ao longo do processo produtivo e não só da estrutura em si, não elucidam uma grande diferenciação e ou melhoria de AF2. Entretanto, é de valia por corroborar com a necessidade da continua sistematização e automação do processo para a obtenção mínima de defeitos de fundição. Enfatizando que, grande parte dos problemas pontuais encontrados são facilmente solucionáveis no processo posterior de acabamento.

A compreensão da estruturação das árvores de fundição, do processo de fundição por cera perdida e da estrutura fabril possibilita o entendimento das limitações técnicas nas quais a otimização estrutural proposta por esta pesquisa esbarra. Auxilia por evidenciar a necessidade da busca de se ter um processo cada vez mais controlado e automatizado para a melhoria do mesmo. Nesse entendimento caminha alinhada a evolução do próprio setor joalheiro, bastante empírico, porém cada vez mais fazendo uso de ferramentas virtuais para projetar, simular e identificar erros. Maior exemplo a essas mudanças é a diminuição do profissional ourives dentro das fábricas em contraponto o aumento no número de modelistas com domínio principalmente no uso do *software Rhino3D®*.

As análises estruturais das árvores de fundição conferiram uma visão analítica sobre como a morfologia atua diretamente nos resultados obtidos. Podem ser identificados quais aspectos formais propiciam melhorias nos parâmetros analisados. A própria identificação dos parâmetros a serem verificados e o levantamento informacional acerca dos defeitos de fabricação dão a esta pesquisa um caráter elucidativo que o ramo joalheiro necessita no seu desenvolvimento e aprimoramento.

Para a continuidade da pesquisa, como possibilidades a futuros estudos, segere-se ampliar o número de estruturas fundidas a fim de quantificar e sistematizar de forma mais precisa os resultados obtidos nas análises físicas. Com os recursos financeiros necessários, poderia se fazer uso da prata nessa nova fundição, desse modo utiliza-se o mesmo metal empregado na fundição realizada na pesquisa Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013). Com mesmas propriedades físicas, a exemplo da viscosidade, pode ser que sejam observados problemas de preenchimento nas estruturas, como observado na pesquisa de Thammachot, Dulyapraphant e Bohez (2013). O prosseguimento do estudo auxiliará na sistematização, oferecendo um caminho a ser utilizado na melhoria contínua da técnica fundição por cera perdida.

Ressalta-se ainda, a importância da pesquisa na identificação dos principais materiais utilizados na confecção de joias e suas reservas mundiais, o que reforça a necessidade do uso consciente da matéria prima, dos insumos e energia despendida para transformá-la em produto. Os dados levantados corroboram a importância da aplicação da análise estrutural por elementos finitos como método que auxilia na otimização do processo produtivo. A percepção que grande parte do

nicho joalheiro está conectado com a efemeridade do mercado da moda e seu acelerado desenvolvimento faz com que, simular para otimizar cada etapa produtiva seja vital. Esse entendimento é importante para tornar menos impactante a transformação da matéria-prima à joia, bem como para o empreendedor ter um processo produtivo mais eficaz e assertivo.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALÉ, J. A. V.; **Mecânica dos Flúidos**. 2011 Disponível em: [https://www.academia.edu/4542936/APOSTILA\\_MECANICA\\_DOS\\_FLUIDOS\\_2011](https://www.academia.edu/4542936/APOSTILA_MECANICA_DOS_FLUIDOS_2011) Acesso: 2 abr. 2020.
- ALENCAR, J. DA C. **Identificação Botânica de Árvores de Floresta Tropical Úmida da Amazônia por Meio de Computador**. Acta Amazônica, 28(1), 3-30, 1998.
- ALENCAR, M. E. G. **O Número  $\Phi$  e a Sequência de Fibonacci**. Revista Física na Escola, v.5, n. 2, 2004.
- ALZAMORA, P. **Curso de Tecnologia de Materiais**. Instituto Europeo di Design. São Paulo, 2005. 33p.
- ASM HANDBOOK. **Volume 15: Casting**. D.M. Stefanescu ed. ASM International, v. 15, 1992.
- BARBOSA, A.; SOUZA, J. **Contaminação por Mercúrio e o Caso da Amazônia** Química Nova na Escola. n. 12, p. 3-7, 2000.
- BARNESLEY, M.. **Fractals Eveywhere** 2. ed. Cambridge: Academic Press. 1993. 548 p.
- BASSELGA, S. **Fibonacci lattices for the evaluation and optimization of map projections**. Computers and Geosciences, 117, 1-8, 2018.
- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. DO; FILHO, D. F. DA S. **Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas**. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- BAXTER, M. R. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. Tradução Itiro Lida. 2. Ed. São Paulo: Blucher, 2000.
- BELL, E. **The Sprue System Design**. Disponível em: <https://www.ganoksin.com/article/sprue-system-design/> Acesso: 26 fev. 2019.
- BOVILL, C. **Fractal Geometry in Architecture and Design**. Birkhauser, Boston. 1996.
- BOYER, C. B. **História da Matemática** 2. ed. S. Paulo: Editora Edgard Blücher, Ltda. 1996.
- BRADSHAW, V. **Winter Tree Silhouette**. 2012. Disponível em: <https://fineartamerica.com/featured/winter-tree-silhouette-valia-bradshaw.html> Acesso: 07 nov. 2018.
- BRITO, C. **Da Lama ao Caos, do Caos à Lama**. Disponível em: <https://zerohora.atavist.com/mariana> Acesso: 02 fev. 2016
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Flúidos** 1. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

CAHETÉ, F. **A Extração do Ouro na Amazônia e Implicações para o Meio Ambiente.** Novos Cadernos NAEA. v. 1, n. 2, 1998.

CARVALHO, C. C. **Gemometria Fractal:** Perspectivas e possibilidades no ensino de Matemática 2005. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências e Matemática) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2005. 101 p.

CASTRO, F. P.; JUNQUEIRA, J. M. **Latões para fundição.** Barcelos: CETEM – Centro Técnico de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e de Materiais, 1996.

CHIUMENTI, M.; AGELET DE SARACIBAR, C.; CERVERA, M.; OÑATE, E.; DUFFETT, G. **Constitutive Modeling and Numerical Simulation of Casting Materials.** European Conference on Computational Mechanics, 2001.

CIFARELLI, M. **Adornment, Identity, and Authenticity:** Ancient Jewelry In and Out of Context. American Journal of Archaeology Online Museum Review: Archaeological Institute of America. Issue 114.1, 2010.

CORTEZ, P. A.; SILVA, D. DA C. CHAVES, A. L. F. **Manual prático de morfologia e anatomia vegetal.** Ilhéus, BA: Editus, 2016. 92 p.

CRAINE, J. M.; DYBZINSKI, R. **Mechanisms of plant competition for nutrientes, water and light.** Functional Ecology, 27, 833-840, 2013.

ELLOY, C. **Leonardo's rule, self-similarity and wind-induced stresses in trees.** Physical Review Letters, 107, 2011.

FALCONER, K. **Fractal Geometry:** Mathematical Foundations and Applications. 2. ed. John Wiley & Sons. 2003. 329 p.

FERRANTE, M.; WALTER, Y. **A Materialização da Ideia:** Noções de Materiais para Design de Produto. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 199 p.

FONSECA, J. **A prototipagem rápida como proposta para solução de problemas técnicos na produção de joias no Rio de Janeiro.** 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2006. 105 p.

FORD, E. D. **The dynamic relationship between plant architecture and competition.** Frontiers in Plant Science, 275, v. 5, 2014.

GHOSH, C. K.; KHAN, A. C. **Exploring the Fibonacci Sequence.** Dream 2047, v. 17, n. 7, 2015.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 184 p.

GITTE, T. **Trees:** Interesting Terms. 2017. Disponível em: <https://tagbotany2016.blogspot.com/2017/10/trees-interesting-terms.html> Acesso: 02 dez. 2018.

GIULIANO, J. **Os processos de fundição, como ferramenta na obtenção de esculturas em metal.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. 136 p.

GLEICK, J. **Caos:** A Criação de uma Nova Ciência (Trad). Rio de Janeiro: Editora Campus, 1989.

GOLDSTAR. **Casting Problems.** 2019. Disponível em: <https://www.goldstarpowders.com/technical-help/casting-problems/flashing> Acesso: 12 fev. 2019.

GOLDSTAR. **Dicas – Construção da Árvore de Cera**. 2017. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=vJOHZEaCvH4&t=233s> Acesso: 26 fev. 2019.

GONÇALVES, E. G.; LORENZI, H. **Morfologia vegetal**: organografia e dicionário ilustrado de morfologia de vegetais. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2007. 416 p.

GUILGEN, C. A.; FERRO, S. G. **Design de Joias**: Cerâmica Avançada e a Prototipagem Rápida na Joalheria. Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial. Especial Design, p. 141-156, 2015.

HALLE, F.; OLDERMAN, R. A. A.; TOMLINSON, P. B. **Tropical trees and forests**: architectural analysis. 1. Ed. Berlin: Springer-Verlag, 1978.

HAMEROFF, S. **How quantum brain biology can rescue conscious free will**. Frontiers in Integrative Neuroscience, 93, v. 6, 2012.

HARE, K. G.; SAUNDERS, J. C. **On (a,b) pairs in random Fibonacci sequences**. Journal of Number Theory, 190, 352-366, 2018.

HARKNESS, J. M. **The Lifetime of Connections** – Otto Herbert Schmitt, 1913 - 1998. Physics in Perspective, v. 4, p. 456-490, 2002.

HAYLOCK, D. **The Golden Section and Beethoven's Fifth**. Mathematics Teaching, v. 84, 56-57, 1978.

HEISS, T.; KLOTZ, U. E.; TIBERTO, D. **Platinum Investment Casting, Part I**: Simulation and Experimental Study of the Casting Process. Johnson Matthey Technology Review, vol 59, n. 2, 95-108, 2015.

HENRIQUES, A. B.; CALLADO, C. H.; RIZZINI, C. M.; REINERT, F.; DA CUNHA, M.; VALENTIN, Y. Y. **Botânica I**. Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2010. 240 p.

HUNT, L. B. **The Long History of Lost Wax Casting**: Over Five Thousand Years of Art and Craftsmanship. Gold Bulletin, vol 13, 63-79, 1980.

IBGM/SEBRAE. **Pesquisa da Indústria**: Outubro 2013. Disponível em: <http://novo.infojoia.com.br/uploads/arquivos/file/8abde-IBGM-Pesquisa-ind--stria---2013cor.pdf>. Acesso em: 03 set. 2015.

IJM. **Manufacturing Process**. Disponível em: <https://www.ijm.asia/partners/manufacturing-process/> Acesso em: 05 out. 2018.

KLIAUGA, A. M.; FERRANTE, M. **Metalurgia Básica para ourives e designers**: do metal à joia. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

KORUGA, D. **Microtubule screw symmetry**: packing of spheres as a latent bioinformation code. Ann NY Acad. Sci, 466, 953-955, 1974.

KPALMA, K. **Caractérisation de textures par l'anisotropie de la dimension frac-tale**. 2e Colloque africain sur la recherche en informatique (CARI). Skilling J, editor. Burkina Faso: Ouagadougou, 1994.

LACERDA, C.; SORANSO, P.; FANGUEIRO, R. **O Contexto Biomimético Aplicado ao Design de Superfícies Têxteis**. Redige, v. 3, n. 03, 2012.

LAHNNDT, Leslie. **TQM tools for the construction industry**. Engineering Management Journal. Rolla, v. 11, n. 2, p. 23-27, 1999.

- LANDSBERG, J. J. **Physiological ecology of forest production**. London: Academic Press, 1986. 198 p.
- LEWIS, R. **Inside the Golden Ratio** 2016. Disponível em: <http://randylewiscreative.com/the-golden-ratio/> Acesso: 08 nov. 2018.
- LUCA, F.; PATEL, V. **On perfect powers that are sums of two Fibonacci numbers**. Journal of Number Theory, 189, 90-96, 2018.
- MACKENZIE, R. C.; **Nomenclature in thermal analysis**, part IV. Thermochemica Acta, 28, 1-6, 1979.
- MANDELBROT, B. B. **The Fractal Geometry of Nature** New York: W. H. Freeman and Company, Rev. Ed. of: Fractals c1977. 468 p.
- MANFRON, M.; GOBBI, D.L.G.; MISTURA, C. M. ISRAEL, C. L. **Análise Química de Ligas Metálicas Utilizadas em Joias e Bijuterias na Região de Passo Fundo**. In: 56º Congresso Brasileiro de Química, 2016, Belém.
- MARTINKOVÁ, M.; ČERMÁK, M.; GEBAUER, R.; ŠPINLEROVÁ, Z. **Plant Botany: An introduction to plant anatomy, morphology and physiology**. Translated from the Czech edition "Kolařík *et al.* (2010) Péče o dřeviny rostoucí mimo
- MILANO, M. S. **O planejamento da arborização, as necessidades de manejo e tratamentos culturais das árvores de ruas de Curitiba-PR**. v.17, n.1/2, Floresta. Curitiba, 1987. p 15-21.
- MIRANDA, J. G. V.; ASSIS, T. A.; MOTA, F. B.; ANDRADE, R. F. S.; CASTILHO, C. M. C **Geometria Fractal: Propriedades e Características de Fractais Ideais**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 2, 2008.
- MME; SGM. **Boletim do Setor Mineral 2020**. 6. ed. Brasília. 2020. 28 p. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes/boletim-do-setor-mineral> Acesso: 10 nov. 2021.
- NELSON, D. **Sussex Botanical Recording Society**. Newsletter, n. 58, 3-4, 2004.
- NUNES, R. S. R. **Gemometria Fractal e Aplicações**. 2006. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal, 2006. 78 p.
- PANDIT, H. C.; SATA, A.; MANE, V. V.; DABADE, U. A. **A Novel Web-based System for Casting Defect Analysis** 60<sup>th</sup> Indian Foundry Congress, Bangalore, pp 535-544, 2012.
- PAVANATI, H. **Introdução à Tecnologia dos Materiais**. Florianópolis: Técnico de Mecânica Industrial – Instituto Federal de Santa Catarina 2010. 164 p. Apostila.
- PEITGEN, H. O.; JÜRGENS, H.; SAUPE, D. **Fractals for the Classroom: Part one, Introduction to Fractals and Chaos**. New York: Springer-Verlag, 1992.
- POHLMANN, M. **Contribuição ao estudo de materiais, processos e modelos utilizados na fabricação de joias em larga escala**. 2012. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 100 p.
- POMPEI, M. **Técnica & Arte: Modelagem em Cera**. Revista BR&J. p. 52, 2005.
- QUANTECH. **Engineering Software Solutions**. 2019. Disponível em: <https://quantech.es/> Acesso: 10 mar. 2020.

RAMOS, Jaime. **A biônica aplicada ao projeto de produtos**. Florianópolis, 1993. Dissertação, (Mestrado em Engenharia) Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.

RIAN, L.; SASSONE, M. **Tree-inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture: A brief historical overview**. Journal of Frontiers of Architectural Research: Elsevier Ltd. 3, 298–323, 2014.

RICHTER, J. P. **The notebooks of Leonardo da Vinci**. Dover: New York, 1970.

RIO GRANDE. **NeuSprue Wax Sprues**. Disponível em: <https://www.riogrande.com/product/neusprue-wax-sprues/71089630gp> Acesso: 09 nov. 2021.

ROCHA, V.; RUBIO, J.; ROMEIRO FILHO, E. **Aplicações CAD/CAM para integração entre projeto e produção na indústria de joias: um estudo de caso em Minas Gerais**. In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, Caxias do Sul.

ROMANOFF. **Indutherm VC600,650V 78mm Gold Crucible**. Disponível em: <https://www.romanoff.com/indutherm-vc200-x-vc650v-graphite-casting-crucible-8mm-hole-usa.html/> Acesso: 20 jun. 2019.

ROSETTI, E. **Desenhando Joias com Rhinoceros**. 1. ed. São Paulo: Editora Leon, 2011.

SANTOS, R. **Joias: fundamentos, processos e técnicas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Senac Nacional, 2013. 296 p.

SARTORI, E.; BATISTA, E.; FILHO, O. **Escurecimento e Limpeza de Objetos de Prata**. Revista Química Nova na Escola. n. 30, p. 61-65, 2008.

SHIPUNOV, A. **Introduction to Botany**. Disponível em: [http://ashipunov.info/shipunov/school/biol\\_154/](http://ashipunov.info/shipunov/school/biol_154/) Acesso: 10 out. 2018.

SIEKAŃSKI, K.; BORKOWSKI, S. **Analysis of Foundry Defects and Preventive Activities for Quality Improvement of Castings**. Scientific journal of Croatia, Metallurgy, v. 42 n. 1, 2003.

SILVA, M. M.; SOUZA, W. A. **Dimensão Fractal**. Revista Eletrônica de Matemática, n. 2, 2010.

SILVA, R. C. V. M.; SILVA, A. S. L.; FERNANDES, M. M.; MARGALHO, L. F. **Noções Morfológicas e Taxonômicas para Identificação Botânica**. 1.ed. Brasília: Embrapa, 2014. 111 p.

SINGH, P. **The so-called Fibonacci numbers in ancient and medieval India**. Historia Math. 12, 229–244, 1985.

SKORNY, G. P.; ŚLEDZIEWSKI, J.; CZAJKOWSKI, A. A. **Interpretation of Fibonacci Numbers in Botany in the Cross-sections and Leafage of Selected Vegetables**. Problems of Applied Sciences, v. 4, 225-232, 2016.

SORIANO, H. L. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 2003. 580 p.

SOUZA, O. M.; GOMES, R. W. F.; PEREIRA MELO, J. J. **Da Manufatura à Maquinaria Moderna: A Subsunção Real do Trabalho ao Capital**. Revista Labor, v. 7; p. 65-78, 2012

SOUZA, P. **Impacto Econômico da Questão Ambiental no Processo Decisório do Investimento em Mineração**. 1999. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1999. 268 p.

SPARROW, K. H.; MERCER, A. E. **Predictability of US tornado outbreak seasons using ENSO and northern hemisphere geopotential height variability.** Geoscience Frontiers 7 (1), 21–31, 2016.

SPECIALIST REFRACTORY SERVICES. **Helpful Hints:** Sprueing. Disponível em: [http://www.srs-ltd.co.uk/technical/hints\\_sprueing.html](http://www.srs-ltd.co.uk/technical/hints_sprueing.html) Acesso: 25 fev. 2019.

SRIVASTAVA, D. P.; SAHNI, V.; SATSANGI, P. S. **Modelling microtubules in the brain as n-qudit quantum Hopfield network and beyond** Computers and Geosciences, 117, 1-8, 2018.

TAYLOR, R. P. **Ordem no Cão de Jackson Pollock.** In: Scientific American Brasil, n. 8, 84-89, 2003

TEAGUE, J. T. **Fill 'Em Up:** Unconventional tips to ensure complete fills and quality castings. 2019 Disponível em: [https://mjsa.org/publicationsmedia/article\\_and\\_video\\_library/casting/fill\\_em\\_up/](https://mjsa.org/publicationsmedia/article_and_video_library/casting/fill_em_up/) Acesso: 25 fev. 2019.

THAMMACHOT, N.; DULYAPRAPHANT, P.; BOHEZ, E. L. J. **Optimal gating system design for investment casting of sterling silver by computer-assisted simulation.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67, 1-4, 2013.

THIRKAUL, S. **Manual de dendrologia para 146 especies forestales del litoral atlântico de Honduras.** 2. Ed. Honduras: Escuela Nacional de Ciencias Forestales 1998.

THORNTON, J. **The Case for CAD/CAM.** AJM, v. 43, n. 1, p 62-65, 1998.

USGS. **Mineral Commodity Summaries.** Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/> Acesso: 24 mai. 2020.

VELOSO, P. **Manual do Ourives:** Fazenda Joias. 3. Ed. São Paulo: Ed. JAC, 2003. 128 p.

VIDAL, W. N.; VIDAL, M. R. R. **Botânica – Organografia:** quadros sinóticos ilustrados de fanerógamos. 4. Ed. rev. ampl. Viçosa: UFV, 2003. 124 p.

WANDERLEY, L. **Geografia do Ouro na Amazônia Brasileira:** uma Análise a Partir da Porção Meridional. 2015. 302 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, São Paulo, 2015.

WONG K.; HERNANDEZ A. **A Review of Additive Manufacturing.** ISRN Mechanical Engineering, v. 2012, p. 1-10, 2012.

WOONGKEEMIN. **The History of Art and Technology:** Fractals. 2015. Disponível em: <https://ucsdvis159.wordpress.com/2015/03/03/week-8-2/> Acesso: 08 nov. 2018.

ZHANG, X. J.; TONG, K. K.; CHAN, R.; TAN, M. **Gold Jewellery Casting:** Technology Design and Defects Elimination. Journal of Materials Processing Technology, 48, 603-609, 1995.

ZIMMERMANN, M. H.; BROWN, C. L. **Trees** Structure and Function. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1971. 336 p.