



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



**Dissertação de Mestrado**

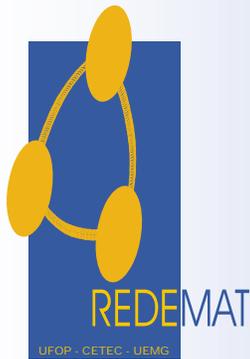
**Análise do processo de fundição de peças de joalheria assistida por software CAD/CAM**



**Henrique Santa Cecília Lana**



**Setembro de 2010**



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Henrique Santa Cecília Lana

**"Análise do processo de fundição de peças de joalheria  
assistida por software CAD/CAM"**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de fabricação  
Orientador: Prof. Jairo José Drummond Câmara

Belo Horizonte, setembro de 2010

1. L243a Lana, Henrique Santa Cecília.  
Análise do processo de fundição de peças de joalheria assistida por software CAD/CAM [manuscrito] / Henrique Santa Cecília Lana – 2010.  
xii, 61 f.: il., color., graf., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jairo José Drummond Câmara.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processo de fabricação.

1. Fundição - Teses. 2. Métodos de simulação - Teses. 3. Prototipagem - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 621.74:671.1

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)



**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**UFOP - CETEC - UEMG**

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



**“Análise do Processo de Fundição de Peças de Joalheria  
Assistida por Software CAD/CAM”**

**Autor(a): Henrique Santa Cecília Lana**

Dissertação defendida e aprovada, em 14 de setembro de 2010, pela banca  
examinadora constituída pelos professores:

Prof. Jairo José Drummond Câmara (Doutor) - Orientador  
Universidade do Estado de Minas Gerais / REDEMAT

Profª Eliane Ayres (Doutora)  
Universidade do Estado de Minas Gerais

Prof. Wilmar Barbosa Ferraz (Doutor)  
CDTN-Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear / CNEN

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Jairo José Drummond Câmara, pelo apoio ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a equipe do Centro de design de Gemas e Jóias da Escola de Design/UEMG pelo apoio e disponibilidade da utilização dos laboratórios para a realização dos experimentos.

Agradeço a Magma, em especial Reinaldo Oliveira, *Key Account Manager*, pela parceria firmada e o grande interesse em colaborar com o projeto, bem como a realização de todas as simulações necessárias para análise.

Agradeço a BQZ, que disponibilizou equipe e equipamentos de fundição para os últimos testes deste trabalho, em especial a Cícero Haddad Giffoni, Felipe Romualdo e Douglas Henrique Soares Santos.

Agradeço a REDEMAT pela oportunidade e apoio no desenvolvimento do trabalho, e também aos membros da banca de avaliação, os professores/doutores Jairo Drummond, Eliane Ayres e Wilmar Ferraz, pela disponibilidade e interesse na conclusão deste trabalho.

Cláudio Marques, que auxiliou na execução do processo de confecção de moldes e fundição das peças.

E aos amigos sempre presentes nos momentos difíceis, Sue Kobata, Daniel Ramos, Thiago Braga e Camila Gonçalves.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>X</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
2.1. Gerais .....	4
2.2. Específicos .....	4
<b>3. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>5</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
4.1. O Processo de Fundição por Cera Perdida .....	6
4.2. Fluidez .....	7
4.3. Molde .....	9
4.4. Solidificação e estrutura .....	11
4.5. Porosidade .....	12
4.6. Encolhimento e contração .....	13
4.7. Defeitos comuns e propriedades da estrutura solidificada .....	16
4.8. Malhas 3D Trianguladas .....	22
4.9. Prototipagem Rápida .....	24
4.9.1. Estereolitografia - <i>Stereolithography Apparatus</i> (SLA) .....	25
4.9.2. Sistema de modelagem multi-jato - <i>Multi-Jet Modeling System</i> (MJM) ...	26
4.10. Rendering .....	27
<b>5. RECURSOS UTILIZADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>28</b>
5.1. Materiais .....	28
5.1.1. Software .....	29
5.1.2. Equipamento .....	32
5.2. Metodologia .....	33
<b>6. EXPERIMENTOS .....</b>	<b>37</b>
6.1. Prototipagens .....	38
6.2. Fundição .....	40
6.2.1. Preparo dos moldes .....	40
6.2.2. Peças fundidas .....	41
6.3. Simulações .....	43
6.3.1. Simulação da árvore 4 .....	46
6.4. Microscopia Ótica .....	48
6.4.1. Resolução das peças prototipadas .....	48
6.5. Defeitos identificados originados nas fundições .....	49
6.5.1. Árvore 1 .....	49
6.5.2. Árvore 2 .....	51
6.5.3. Árvore 3 .....	52
6.5.4. Árvore 4 .....	53
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>54</b>
7.1. Considerações Finais .....	57
<b>8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>58</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. Exemplos de geometrias geradas a partir de modelagem matemática tridimensional .....	3
FIGURA 4.1. Circuito de produção de peças para joalheria pelo processo de cera perdida ...	7
FIGURA 4.2. Exemplos de formação de filmes na superfície do metal. Em (a) tem-se a formação pelo resfriamento natural do metal enquanto escoar; em (b) tem-se a formação pelo encontro de duas frentes com direções diferentes .....	8
FIGURA 4.3. Comportamento do metal (a) puro e (b) com impurezas .....	9
FIGURA 4.4. Preparação do molde para fundição: (a) posicionamento dos modelos em cera; (b) forma que será preenchida com o gesso em solução; (c) câmara de vácuo para remoção de bolhas de ar; (d) comparação entre o primeiro estágio e após a solidificação do gesso; (e) molde pronto, com a cera já incinerada, apresentando apenas as cavidades .....	10
FIGURA 4.5. Representação esquemática do surgimento da porosidade em função do aumento da espessura da seção do metal .....	13
FIGURA 4.6. Exemplo dos três regimes de nucleação em função da porosidade .....	15
FIGURA 4.7. Exemplo de porosidade e inclusões de óxidos em uma amostra polida de alumínio (Microscópio ótico) .....	16
FIGURA 4.8. Exemplo ilustrando a diferença entre as estruturas em NURBS e em MESHES .....	22
FIGURA 4.9. Exemplo de como os softwares 3D tendem a ocultar a triangulação da malha para facilitar a visualização e compreensão da geometria da peça .....	23
FIGURA 4.10. Processo de construção através da tecnologia de SLA .....	25
FIGURA 4.11. Processo de construção da peça através da tecnologia MJM .....	26
FIGURA 4.12. Exemplo da manipulação dos objetos 3D sem o rendering (a) e rendering finalizado com materiais e reflexão (b) .....	27
FIGURA 5.1. Exemplo das análises realizadas pelo software: a) previsão de “rechupes”; b) previsão da microestrutura (somente para ligas de aço-carbono e ferro); simulação da injeção de material no molde e d) comparativo do processo utilizando raios-X .....	30
FIGURA 5.2. Exemplo da simulação animada, demonstrando o preenchimento das cavidades pelo metal e as respectivas temperaturas em cada ponto da peça .....	31
FIGURA 5.3. Esquerda: <i>Invision 3-D Si2®</i> ; direita: peça desenvolvida na <i>Invision</i> com fotopolímero acrílico M100 .....	33
FIGURA 5.4. Modelos obtidos a partir de computação gráfica: (a) render das cinco peças escolhidas inicialmente, simulando cobre; (b) render da árvore de fundição após posicionamento dos canais de injeção; (c) modelo prototipado em resina, ainda coberto pelo material de suporte; (d) modelo prototipado em resina, já sem material de suporte e pronto para confecção do molde de fundição em cera perdida .....	34
FIGURA 5.5. Fluxograma de trabalho .....	35
FIGURA 5.6. (a) renders das três peças selecionadas para a etapa final, simulando latão; (b), (c) e (d) modelos secundários das árvores que foram simulados e fundidos para o trabalho .....	36

FIGURA 6.1. Etapas utilizadas para fundição em cera perdida: (a) criação da peça através de software 3D CAD; (b) montagem da árvore com as peças desejadas e posicionamento dos canais de injeção; (c) prototipagem rápida; (d) peça prototipada ainda com material de suporte; (e) peça prototipada já limpa; (f) fixação da árvore para obtenção do molde de gesso; (g) árvores prontas para inserção no gesso; (h) tubos que receberão o gesso para confecção do molde; (i) molde com o gesso sendo levado ao forno para secagem; (j) fundição das peças em metal .....	37
FIGURA 6.2. Demonstração da relação de gasto de material de suporte em função do posicionamento da peça sobre a bandeja: (a) peça posicionada verticalmente e (b) peça rotacionada a fim de ocupar maior volume horizontalmente .....	38
FIGURA 6.3. Preparação dos moldes: colocação das peças na base para ser posicionada dentro do tubo (esq) e aplicação do vácuo no momento de inclusão do gesso (dir) .....	40
FIGURA 6.4. Primeira árvore fundida em cobre puro .....	41
FIGURA 6.5. Detalhes das falhas das peças .....	41
FIGURA 6.6. Fundição e limpeza das peças fundidas .....	42
Figura 6.7. Geração dos pontos de interação entre metal e molde pelo software .....	43
Figura 6.8. Seqüência obtida com o primeiro teste de simulação .....	44
FIGURA 6.9. Detalhe das partes que apresentaram problemas .....	45
FIGURA 6.10. Simulação da árvore 4 e detalhe de erro previsto: em cinza, as partes que teoricamente não serão preenchidas .....	46
FIGURA 6.11. Possíveis porosidades previstas pelo Magmasoft® .....	47
Figura 6.12. Tempo de resfriamento da peça .....	47
FIGURA 6.13. Detalhes de resolução de prototipagem: (a) modelo obtido pela Invision, e (b) modelo obtido através de estereolitografia .....	48
FIGURA 6.14. Detalhes de porosidade das peças prototipadas com a Invision .....	49
FIGURA 6.15. Detalhes das inclusões observadas na peça fundida em cobre .....	50
FIGURA 6.16. Detalhes de alguns defeitos observados na peça: (a) falha de preenchimento de metal; (b) bolhas provavelmente geradas a partir do aprisionamento de ar no momento da confecção do molde; (c) inclusões de gesso nos poros da peça; (d) rugosidade excessiva da peça, transferida pelo molde devido à peça original prototipada .....	51
FIGURA 6.17. Detalhe de defeito por erro de preenchimento da árvore 3 .....	52
FIGURA 6.18. Detalhes de alguns defeitos observados na peça: (a), (b) e (c) falha de preenchimento de metal; (d) surgimento de “barbatanas” resultantes de trincas no molde ..	53
FIGURA 7.1. Detalhe da redução da malha: à esquerda, a malha original, à direita, a malha reduzida .....	55
FIGURA 7.2. Detalhe de defeito da fundição previsto pelo Magmasoft® .....	56
GRÁFICO 4.1. Comportamento da temperatura através do resfriamento em um molde fundido, mostrando o efeito da adição das resistências térmicas que controlam a taxa de resfriamento .....	11
GRÁFICO 4.2. Comportamento do volume nos três estágios de contração .....	14

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 Exemplos de formas geradas através de equações matemáticas conhecidas ..	14
TABELA 4.2 Encolhimento promovido na solidificação de alguns metais .....	32
TABELA 4.3 Falhas comuns em peças de joalheria .....	34
TABELA 4.4 Exemplos de defeitos e suas soluções no momento da inclusão do gesso .....	37
TABELA 4.5 Exemplos de defeitos originados no momento da retirada do molde .....	38
TABELA 5.1 Especificações gerais da máquina de prototipagem .....	49
TABELA 5.2 Especificações técnicas do material utilizado na prototipagem .....	50
TABELA 6.1 Dados relevantes dos canais e detalhes das peças .....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
MAGMASOFT	Software de simulação de fundição
Sprues	Canais de alimentação das peças na fundição
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Pó de sílica e quartzo.
Relação de Sievert	$[H_{\text{solução}}] = K \{p(\text{H}_2)\}^{1/2}$
MESHES	Malhas em 3D trianguladas
UEMG	Universidade do Estado de Minas Gerais
Invision 3D Si2®	Máquina de prototipagem rápida
EDS	<i>Electron Diffraction Scanner</i>
CaSO <sub>4</sub>	Gipsita
SIO <sub>2</sub> E SIO <sub>4</sub>	Cristobalita E Quartzo
BIFILMS	Filmes Duplos
NURBS	<i>Non Uniform Rational Basis Spline</i>
RP	<i>Rapid Prototyping</i>

## RESUMO

Através de recursos de computação gráfica tridimensional e tecnologia de prototipagem rápida, é possível obter modelos de extrema complexidade formal e apelo visual. Tais modelos podem ser utilizados pela indústria joalheira para criar peças diferenciadas, de alto valor agregado, e com um gasto relativamente reduzido de material, visto que a malha obtida é composta por várias cavidades dado o entrelaçamento da geometria. A geometria destes modelos por sua vez, produz moldes de fundição caracterizados por uma complexa rede de alta capilaridade, o que difere bastante da produção convencional de peças de joalheria. Devido a estas características, percebe-se uma tendência ao aparecimento de problemas na produção destas peças, desde o preparo do molde até a fundição propriamente dita. Assim, ser capaz de antever os problemas pode poupar tempo e custos em sua produção. Uma das maneiras possíveis de se prever possíveis problemas dos modelos é a utilização de softwares CAD/CAM que realizam a simulação do processo de fundição, buscando assim analisar a geometria, constituição de molde, das ligas envolvidas no processo, e desse modo antecipar situações indesejadas que possam causar falhas nas peças prontas. Assim, este trabalho relata um estudo sobre algumas destas técnicas e demonstra que o software *Magmasoft*® é realmente capaz de antever com precisão o comportamento do metal na fundição, durante a injeção, resfriamento, prever a estrutura de grão e resistência mecânica do modelo final.

## ABSTRACT

Through tridimensional computer graphics resources and rapid prototyping technology, is possible to gain formal models of extreme complexity and visual appeal. Such models can be used by jewelry industry to create different pieces, with high value, and with a lower cost of material, since the result mesh is compositing by several cavities given the geometry's interlace. The geometry of those models, produces foundry cast characterized by a high capillarity grid, what differs a lot from conventional production of jewelry pieces. Considering this characteristics, we can realize some tendency to have problems on production of this pieces, since cast preparation to casting. Therefore, being capable of predict the problems must save time and costs on your production. One of many other ways to predict this possible problems of the models is the CAD/CAM software's utilization that perform the casting simulation process, thus seeking analyze the geometry, cast constitution, the leagues involved in the process, and so be able to anticipate unwanted situations that may cause fails on the pieces that are already done. This project is willing to undertake a study of some techniques and demonstrate if the *Magmasoft*® is really capable of predict accurately the metal's behavior on casting, during the injection, cooling, to predict the grain structure and mechanic resistance of final model.

## 1. INTRODUÇÃO

Os softwares de modelagem tridimensional auxiliam significativamente na criação e desenvolvimento de novos produtos para o mercado. O grande avanço, não só dos softwares, mas também dos hardwares dos computadores torna possível criar modelos cada vez mais complexos em geometria e detalhamento.

Tal nível de detalhamento e precisão não se restringe mais a desenhos de representação e detalhamento técnico, mas também é possível obter diretamente de um modelo tridimensional um sólido real gerado a partir de um equipamento de prototipagem, que interpreta as coordenadas do objeto virtual e as transforma em um objeto real, geralmente em resina ou metal, através de máquinas que executam uma “impressão” tridimensional depositando camadas de material, no processo inverso ao da tomografia, ou por meio de vários eixos de fresas, que esculpem o modelo a partir de um bloco de material.

Algumas tecnologias de prototipagem produzem modelos a partir de resinas que por sua vez, podem ser utilizadas como base para a produção de moldes de fundição, possibilitando a confecção destas peças em metal.

Existem ainda softwares que simulam o processo de fundição, possibilitando a visualização do comportamento do metal ao preencher o molde, e ainda levantar uma série de dados relevantes para avaliação do processo, seja para prever falhas ou para implementar melhorias.

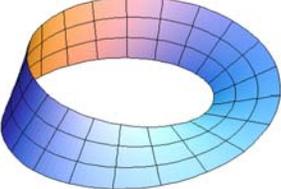
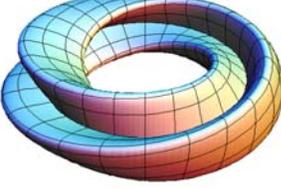
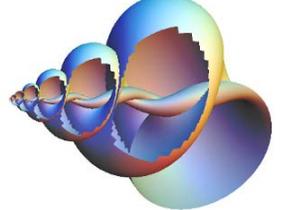
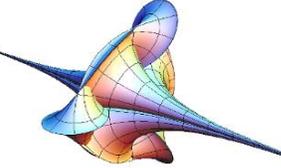
Este trabalho apresenta uma análise sobre a utilização destas tecnologias em duas etapas do processo de produção: a criação de peças por meio de computação gráfica 3D e sua subsequente prototipagem, para obtenção dos modelos utilizados na confecção dos moldes de fundição, e a análise da fundição através de simulação.

A base das peças apresentadas é gerada a partir da manipulação de equações matemáticas, que geram superfícies que são posteriormente trabalhadas para se transformarem em geometrias com volume.

Existem modelos de equações matemáticas cujos gráficos geram figuras tridimensionais quando são atribuídos determinados valores às suas variáveis. Muitos deles geram superfícies complexas o bastante para tornar quase impossível sua modelagem manual em um software convencional. A tabela 1.1 exemplifica alguns desses casos.

TABELA 1.1.

Exemplos de formas geradas através de equações matemáticas conhecidas

<p>Moebius Strip</p> 	<p>Equação:</p> $x = aa * (\cos(v) + u * \cos(v / 2) * \cos(v))$ $y = aa * (\sin(v) + u * \cos(v / 2) * \sin(v))$ $z = aa * u * \sin(v / 2)$
<p>Klein Bottle</p> 	<p>Equação:</p> $x = (aa + \cos(v / 2) * \sin(u) - \sin(v / 2) * \sin(2 * u)) * \cos(v)$ $y = (aa + \cos(v / 2) * \sin(u) - \sin(v / 2) * \sin(2 * u)) * \sin(v)$ $z = \sin(v / 2) * \sin(u) + \cos(v / 2) * \sin(2 * u)$
<p>Snailshell</p> 	<p>Equação:</p> $x := r \cos(vv)$ $z := r \sin(vv)$ $y := dd(1 - s) + s bb \sin(u)$ <p>Variáveis:</p> $vv := v + (v + ee)^2/16$ $s := \exp(-cc vv)$
<p>Breather Surface</p> 	<p>Equação:</p> $q(u,v) := 4 * \arctan((aa / w) * (\sin(w * v)) / (\cosh(aa * u)))$ $w := \sqrt{1 - aa * aa}$

Fonte: <http://vmm.math.uci.edu/3D-XplorMath/Surface>

A partir do desenvolvimento de tais equações é possível incrementar o resultado final, adicionando-lhe maior complexidade, bem como utilizar softwares convencionais para interferir nas geometrias criadas através da modelagem matemática, e assim finalizar detalhes de acabamento, tais como volumes e espessuras desejadas, e dessa forma torna-se possível a criação de peças de grande apelo visual, conforme mostrado nos exemplos da figura 1.1.



FIGURA 1.1. Exemplos de geometrias geradas a partir de modelagem matemática tridimensional  
Fonte: LANA, 2009

Tais modelos, entretanto, apresentam alguns problemas de fundição, já verificados em testes feitos em laboratório. Devido à grande capilaridade e à sua espessura, alguns pontos do molde não são preenchidos totalmente, ou então alguns canais criam comunicações inexistentes no modelo original, provocando falhas nas peças. Em certos casos, pode-se perceber que o problema está relacionado com a confecção do molde, onde nem todos os canais são criados da maneira correta. Em outros, a falha é provocada pelo posicionamento inadequado dos canais de injeção, desfavorecendo assim o escoamento do metal através do molde. A figura 1.2 ilustra os tipos de falhas que podem ocorrer.

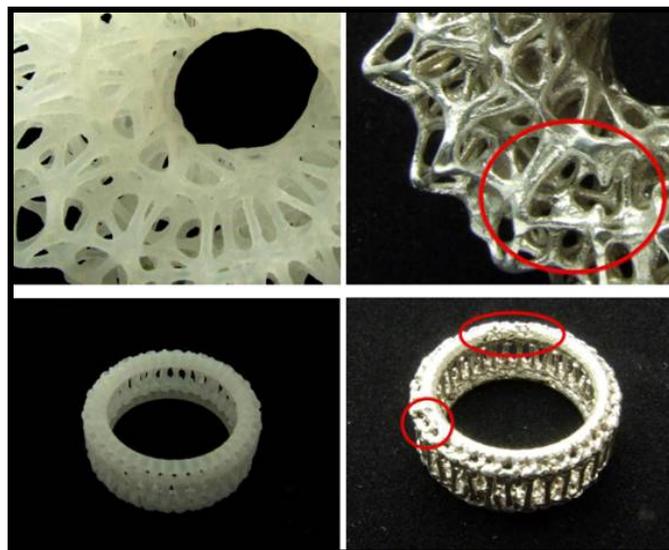


FIGURA 1.2. Exemplos de geometrias geradas a partir de modelagem matemática tridimensional  
Fonte: LANA, 2009

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Gerais**

Demonstrar a possibilidade de se realizar o processo de fundição de peças de joalheria, especialmente aquelas que mostram-se propensas a apresentar problemas, assistido por recursos de computação gráfica, seja na confecção dos modelos para fundição, seja na simulação do processo de fundição, para estimar as dificuldades que possam surgir ao longo da execução do trabalho.

### **2.2. Específicos**

- Levantar informações que possam evidenciar a validade da utilização de software de simulação (em específico o Magmasoft®) de modo a comprovar a eficiência e confiabilidade dos resultados;
- Demonstrar os diversos tipos de análise que o software é capaz de realizar, e enumerar sua contribuição para o processo;
- Com base nos resultados obtidos, demonstrar ou não a necessidade de um estudo mais aprofundado para o desenvolvimento de um modelo para a fundição das peças propostas neste trabalho, e demais que apresentem as mesmas características estruturais.

### 3. JUSTIFICATIVA

As técnicas comuns de modelagem em softwares possuem certas limitações para a criação de peças de grande complexidade, especialmente para as que possuem características orgânicas. Como já fora anteriormente citado, em muitos casos a capacidade mesmo de criação fica dependente diretamente da habilidade e percepção do usuário do software, o que em alguns casos pode impossibilitar a modelagem.

Uma vez que o recurso tecnológico atualmente disponível da prototipagem rápida permite um alto grau de complexidade no desenvolvimento de modelos que sirvam como base para a fundição de peças, objetiva-se explorar ao máximo tal possibilidade, visto que os modelos propostos deverão ser demasiado complexos para sua confecção pelo modo tradicional de produção, onde o ourives esculpe a peça que será fundida.

Também verificou-se uma escassez de bibliografia especificamente direcionada à fundição para joalheria. Encontra-se muito material para fundição e processos industriais, mas para peças de geometria mais detalhada, e especialmente produzidas com ligas de ouro, não se encontrou muitas referências.

Desse modo, o estudo proposto possibilitou apontar as preocupações para delinear o desenvolvimento de um novo método de criação para o setor joalheiro, concebendo peças que se destacariam pelas formas completamente diferentes das comumente vistas no mercado, e com um custo de produção relativamente mais baixo. Uma vez que não requer a mão de obra extremamente especializada, possibilitando ainda a produção em série de peças que de outro modo se apresentariam inviáveis.

A proposta teve como aspectos favoráveis a seu desenvolvimento a existência de um laboratório de prototipagem rápida junto ao CEDGEM (Centro de Estudo de Design de Gemas e Jóias), e um laboratório de pesquisa em Ligas de Ouro AngloGold Ashanti, localizados na Escola de Design da UEMG (Universidade do Estado de Minas Gerais), que possibilitou a aplicação prática do que fora desenvolvido na pesquisa. O projeto também contou com o apoio da empresa BQZ Internacional, fabricante de equipamentos para fundição em joalheria e lapidação de gemas, parceira do CEDGEM.

Também foi imprescindível para a realização da pesquisa o apoio pela empresa MAGMA, desenvolvedora do software Magmasoft®, utilizado para realizar as simulações propostas no trabalho.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Processo de Fundição por Cera Perdida

Segundo Sias (2003), existem cinco passos básicos no processo de fundição:

- a preparação ou criação do modelo do que será reproduzido em metal (em cera e, recentemente, através de prototipagem rápida);
- o posicionamento correto dos canais de injeção, ou *sprues*;
- o revestimento do modelo em gesso; a incineração do modelo de cera, criando assim o molde para fundição;
- a fundição propriamente dita, que se refere à injeção do metal em estado líquido dentro do molde;
- a remoção do molde, limpeza e acabamento da peça.

Estes passos correspondem ao que é utilizado atualmente na produção de peças em joalheria. Muito pouco se altera nas linhas atuais de produção. O que mais se destaca como mudança significativa no processo é a inserção da tecnologia de prototipagem rápida na confecção dos modelos para fundição. Este processo torna a modelagem não somente mais precisa e otimizada na reprodução em série, e, na maioria dos casos, mais rápida e menos onerosa se comparada ao preço praticado pelos ourives no caso de peças mais elaboradas.

Na figura 4.1 tem-se um exemplo do processo de produção de peças por cera perdida. A partir de um desenho, a peça é então modelada em cera. Pode-se então conseguir reproduzir várias outras peças utilizando-se um molde simples em borracha, e assim montar um arranjo com todas estas, de modo a compor uma espécie de árvore que será utilizada como base para a produção do molde de fundição. Essa árvore é então inserida em um cilindro metálico e coberta com uma solução pastosa de gesso (gipsita -  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , pó de sílica e quartzo). O gesso após solidificado é então levado a um forno, onde queima-se a cera utilizada, restando então seu negativo. Em seguida, o molde é então novamente aquecido para receber o metal em estado líquido. Neste ponto, pode-se utilizar simplesmente a gravidade, ou contar com o auxílio de uma centrífuga para auxiliar no escoamento do metal pelos canais do molde. Finalmente, o molde ainda quente é então mergulhado em água à temperatura ambiente, fazendo com que o gesso trinque, removendo assim a árvore fundida. Após o processo, as peças são removidas da árvore por meio de alguma ferramenta de corte (alicate por exemplo) e repassada ao ourives para se

realizar o acabamento das saliências restantes nos pontos que foram cortados, polimento, montagem e outros procedimentos particulares a cada peça.

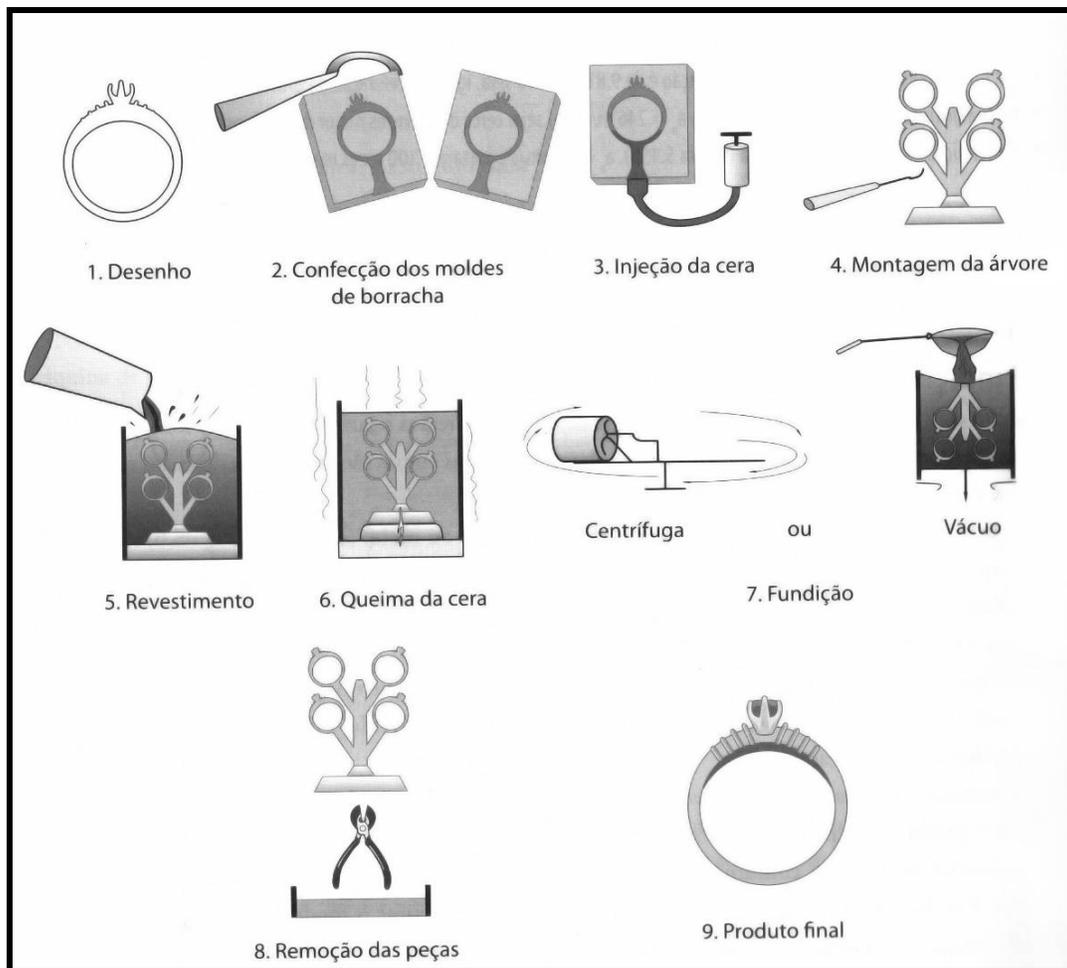


FIGURA 4.1. Circuito de produção de peças para joalheria pelo processo de cera perdida.

Fonte: KLIAUGA; FERRANTE, 2009

## 4.2. Fluidez

Para Campbell (2003), a fluidez é um dos aspectos mais importantes da fundição. Seu comportamento é influenciado diretamente pela superfície do molde, do metal líquido, sua velocidade e pressão. Todos esses fatores determinam até onde o metal é capaz de escoar sem se solidificar, e é o que possibilita que este preencha ou não todas as cavidades do molde. Ainda segundo Campbell (2003), ao escoar através do molde, forma-se uma camada de filme fino à medida que este se resfria, o que afeta drasticamente a resistência

ao escoamento. A tendência é que esta camada torne-se cada vez mais espessa, até que forme uma barreira, especialmente ao encontrar canais mais estreitos, impedindo o que o metal siga seu curso completo.

Este filme é criado devido ao resfriamento do metal mais a sua oxidação natural, decorrente de resíduos de oxigênio ou outros óxidos que se encontram dentro do molde. Ainda que não impeçam a locomoção do metal ao longo do percurso, camadas sucessivas de filme podem formar-se, afetando diretamente a estrutura do metal solidificado, gerando assim alguns defeitos na peça, como a exemplo, a formação de estrias superficiais no metal. A propagação destas ondas de filmes causa um direcionamento dos grãos formados na superfície, e quando este direcionamento é quebrado, também pode acarretar falhas, como por exemplo, o encontro entre duas ondas que vêm em direções diferentes, o que pode ocorrer facilmente em partes onde canais distintos encontram-se em um novo canal comunicante comum. O resultado pode ser a quebra de um dos filmes, geralmente o mais fino, acarretando assim os defeitos de superfície. As figuras 4.2(a) e 4.2(b) exemplificam essa situação.

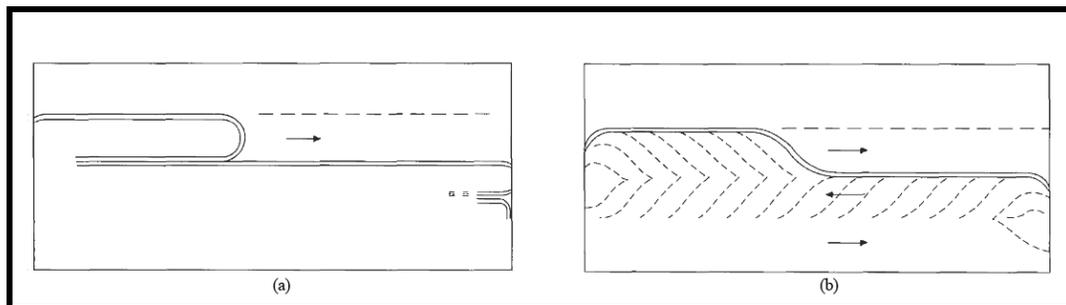


FIGURA 4.2. Exemplos de formação de filmes na superfície do metal. Em (a) tem-se a formação pelo resfriamento natural do metal enquanto escoar; em (b) tem-se a formação pelo encontro de duas frentes com direções diferentes.

Fonte: CAMPBELL, 2003

Ainda é preciso considerar a velocidade em que o material preenche o molde. Quanto mais devagar o metal escoar, maior a possibilidade de resfriamento, e a tendência natural é que o metal perca calor, formando assim as camadas de filme, e então tendendo a reduzir a velocidade, e aumentando assim a chance de ocorrência de estriamentos superficiais. (CAMPBELL, 2003)

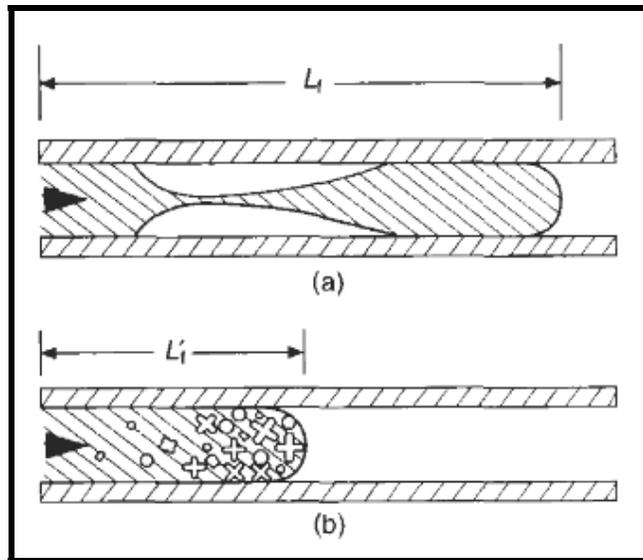


FIGURA 4.3. Comportamento do metal (a) puro e (b) com impurezas

Fonte: CAMPBELL, 2003

Contaminações por outros metais ou impurezas também podem contribuir para a formação dos filmes, pois elementos distintos possuem pontos de solidificação diferentes também, o que pode acarretar com que as impurezas se solidifiquem antes que o metal utilizado propriamente, obstruindo assim a passagem, como exemplificado na figura 4.3 (CAMPBELL, 2003).

### 4.3. Molde

A confecção do molde para a fundição por cera perdida é talvez um dos pontos mais críticos do processo. O molde defeituoso é certeza de peças que apresentarão no mínimo as falhas superficiais do relevo do mesmo, dentre outras que podem ser induzidas pelos mesmos. Trincas, bolhas de ar presas no modelo e rugosidade das paredes dos canais podem gerar problemas para o escoamento de material.

De acordo com Campbell (2003), ao entrar em contato com o metal, o molde reage violentamente. No curto espaço de tempo em que se inicia a fundição, ocorrem ao mesmo tempo o surgimento de chamas, desprendimento de gases, pressão, fissuras, explosões, desintegrações e ataque químico. Assim, é fundamental que haja uma preocupação em garantir que se tenha controle sobre estas reações, para se obter uma fundição com o resultado desejado.

Segundo Hoffman (2002), com os moldes de gesso é possível obter superfícies menos rugosas e maior tolerância dimensional, podendo chegar ao valor de  $\pm 0,005''$ . Estes moldes são normalmente constituídos de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), pó de sílica e quartzo, como já mencionado no item 4.1.

A gipsita também possui baixa condutividade, e desse modo, os moldes em gesso também favorecem o escoamento do metal por resfriarem-se mais lentamente. Entretanto, sua aplicação fica restrita a temperaturas abaixo de  $1176^\circ \text{C}$ , devido ao seu comportamento pouco refratário. (HOFFMAN, 2002)

Os moldes em gesso são feitos com uma solução pastosa feita com o material em pó diluído em água e, utilizando centrífuga e/ou vácuo, remove-se possíveis bolhas de ar que possam ficar aprisionadas na cavidade do modelo de cera ou resina, que poderiam acarretar falhas na fundição. Após esse procedimento, o molde é então levado ao forno e aquecido para incinerar a cera (ou resina), utilizados no modelo inserido no mesmo, e remover a água, solidificando-se completamente. Em geral, logo após este procedimento, realiza-se a fundição, aproveitando assim o calor do molde para facilitar o escoamento do metal através dos canais. No caso de não ser realizada a fundição de imediato, é necessário então o aquecimento do molde mais uma vez. As imagens da Figura 4.4 ilustram o procedimento de obtenção do molde em gesso.

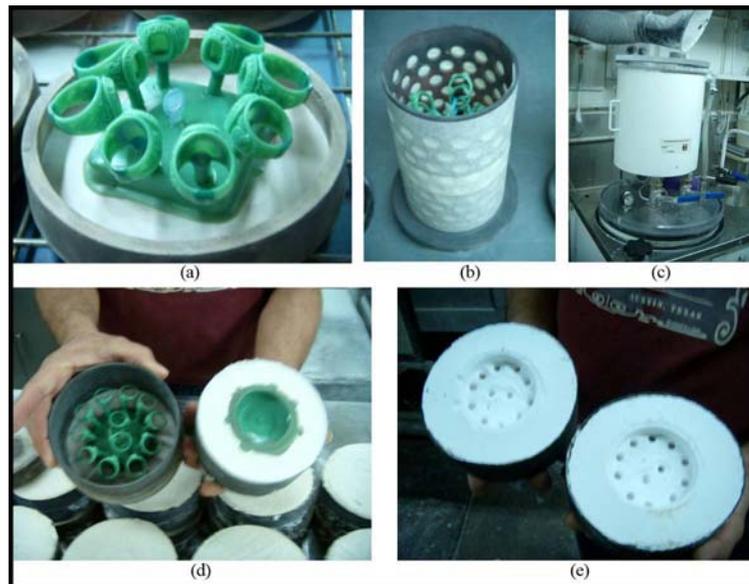


FIGURA 4.4. Preparação do molde para fundição: (a) posicionamento dos modelos em cera; (b) forma que será preenchida com o gesso em solução; (c) câmara de vácuo para remoção de bolhas de ar; (d) comparação entre o primeiro estágio e após a solidificação do gesso; (e) molde pronto, com a cera já incinerada, apresentando apenas as cavidades

Fonte: [https://wikis.nyu.edu/xdesign/mediawiki/index.php/Balfour\\_Class\\_Rings](https://wikis.nyu.edu/xdesign/mediawiki/index.php/Balfour_Class_Rings).



#### 4.5. Porosidade

De acordo com Smallman; Bishop (1999) é de suma importância dar atenção não apenas aos metais envolvidos na fundição, mas sim no comportamento geral dos átomos, que podem ser os intencionalmente inseridos no processo (ligas) e os que eventualmente são absorvidos acidentalmente, considerados como impurezas. A solubilidade de um gás em metal líquido é demonstrada pela relação de Sievert, a qual define que a concentração de um gás dissolvido é proporcional à raiz quadrada da pressão parcial do gás em contato com a atmosfera. Para o hidrogênio, por exemplo, seria expresso como  $[H_{\text{solução}}] = K \{p(H_2)\}^{1/2}$ . A constante K é dependente da temperatura, e faz com que a solubilidade se reduza à medida que o metal se resfria, e assim tende a expelir o gás em forma de bolhas, que por sua vez podem ficar aprisionadas no material ao solidificar-se. Da mesma forma, ao se reduzir a pressão externa, reduz-se a solubilidade, o que é um princípio básico da fundição aplicação de vácuo ao molde, e que possibilita a criação de uma peça fundida de menor porosidade.

O gás dissolvido pode simplesmente formar bolhas inertes dentro do material solidificado (segregação), entretanto em alguns casos, o gás aprisionado pode ser reativo, como no caso do oxigênio, e provocar alterações não desejadas na composição. Para prevenir esse tipo de problema, pode-se adicionar à liga algum elemento que reaja com o gás que possivelmente possa contaminar a peça, como a exemplo do oxigênio, a adição de alumínio, que possui alta afinidade com este, é utilizada para reduzi-lo no caso de fundição em aço, além do que as partículas de alumina resultantes agem como nucleantes, refinando o tamanho do grão final.

Entretanto, é praticamente impossível eliminar totalmente a segregação, e esta pode afetar as propriedades físicas, químicas e mecânicas do material. Por isso, mostra-se de suma importância manter controle da atmosfera do ambiente de fundição, para que se possa tomar as devidas medidas para minimizar tais efeitos.

O exemplo da figura 4.5 ilustra o surgimento da porosidade em seções de espessuras diferentes.

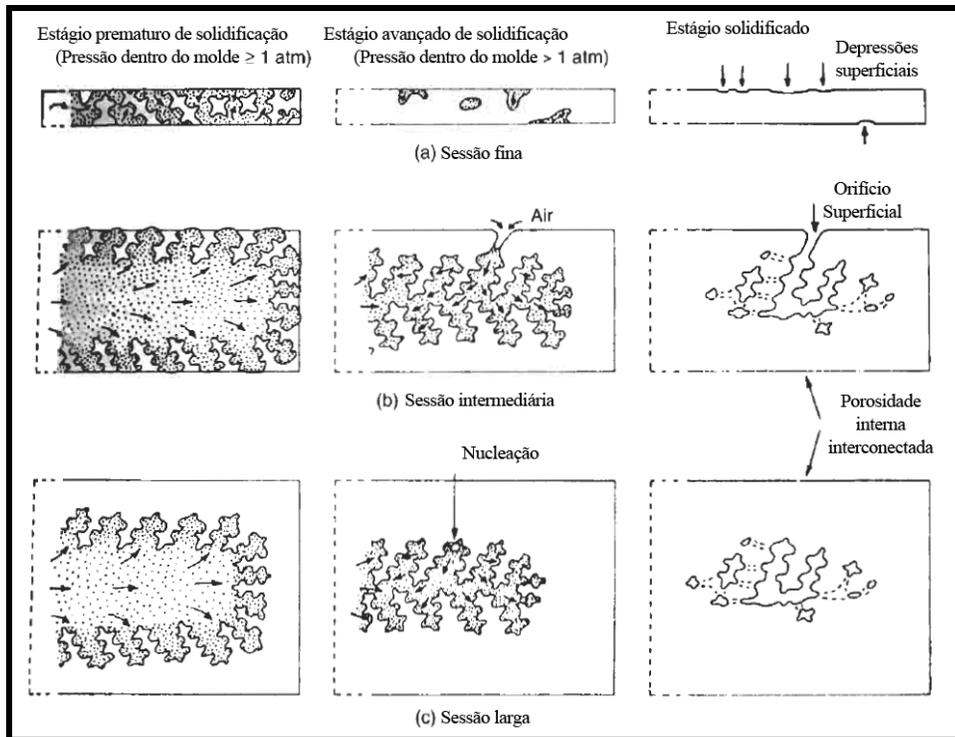


FIGURA 4.5. Representação esquemática do surgimento da porosidade em função do aumento da espessura da sessão do metal

Fonte: SMALLMAN; BISHOP, 1999

#### 4.6. Encolhimento e contração

À medida que o metal se resfria, a reorganização entre os átomos resultante desse processo faz com que ocorram contrações no material, que podem ser chamadas de encolhimento. Campbell (2003) mostra que existem três níveis destas contrações na solidificação, tal como ilustrado no gráfico 4.2.

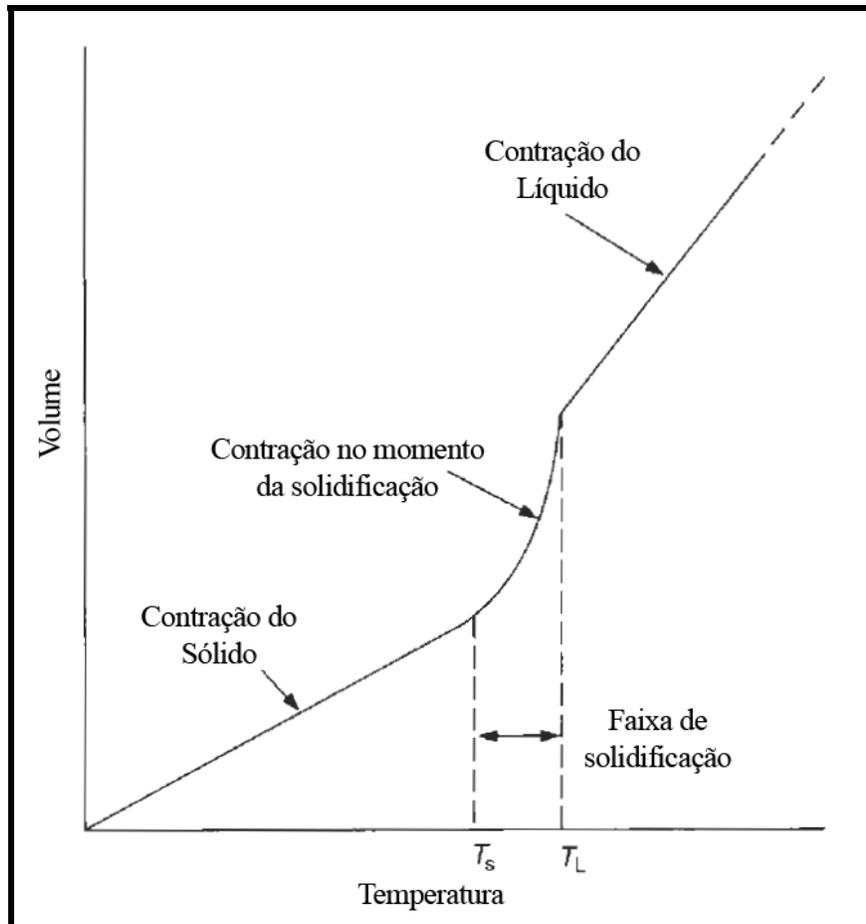


GRÁFICO 4.2. Comportamento do volume nos três estágios de contração

Fonte: CAMPBELL, 2003

Como é possível observar pelo gráfico, as contrações no estado líquido e estado sólido mostram-se lineares, enquanto que na faixa de solidificação, dá-se exponencialmente. Isso se deve ao fato de que, ao solidificar-se, o metal apresenta ainda movimentação grande por convecções, segregação de impurezas conformando porosidades, e tudo isso ocorrendo gradativamente.

A tabela 4.2 apresenta os valores de redução no volume de alguns metais.

TABELA 4.2.

Encolhimento promovido na solidificação de alguns metais

Metal	Estrutura cristalina	Ponto de fusão C	Densidade líquida ( $\text{kgm}^{-3}$ )	Densidade sólida ( $\text{kgm}^{-3}$ )	Varição de volume (%)
Al	fcc	660	2368	2550	7.14
Au	fcc	1063	17 380	18 280	5.47
Co	fcc	1495	7750	8180	5.26
Cu	fcc	1083	7938	8382	5.30
Ni	fcc	1453	7790	8210	5.11
Pb	fcc	327	10 665	11 020	3.22
Fe	bcc	1536	7035	7265	3.16
Li	bcc	181	528	-	2.74
Na	bcc	97	927	-	2.6
K	bcc	64	827	-	2.54
Rb	bcc	303	11 200	-	2.2
Cd	bcp	321	7998	-	4.00
Mg	bcp	651	1590	1655	4.10
Zn	sep	420	6577	-	4.08
Ce	bcp	787	6668	6646	-0.33
In	tel	156	7017	-	1.98
Sn	tetrag	232	6986	7166	2.51
Bi	rbomb	271	10 034	9701	-3.32
Sb	rhomb	631	6493	6535	0.64
Si	diam	1410	2525	-	-2.9

Fonte: CAMPBELL, 2003

A contração do material deve ser levada em conta no momento da confecção do molde, uma vez que ocorre uma redução sensível de volume no objeto. Partes de encaixes com precisão, por exemplo, podem sair com dimensões menores do que o desejado e em alguns casos até mesmo inutilizar a peça. Além disso, também pode provocar falhas nas regiões com maior variação volumétrica, seja provocada por porosidade, ou em função da própria geometria da peça, como ilustrado na figura 4.6.

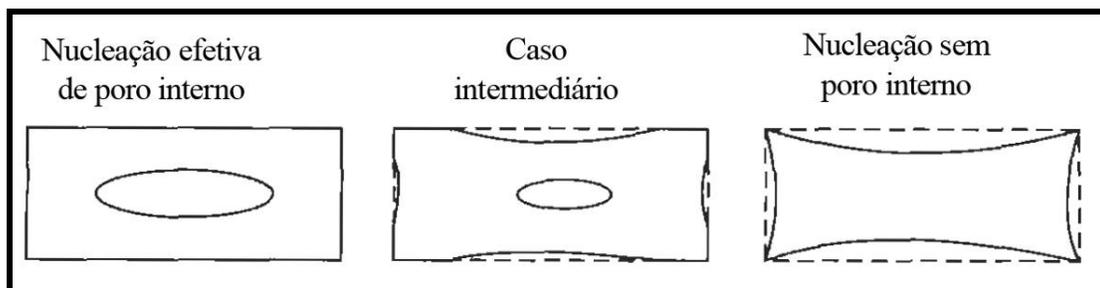


FIGURA 4.6. Exemplo dos três regimes de nucleação em função da porosidade

Fonte: CAMPBELL, 2003

#### 4.7. Defeitos comuns e propriedades da estrutura solidificada

O tamanho do grão resultante da nucleação obtida durante a solidificação, segundo Campbell (2003) é uma característica importante para definir resistência mecânica, resistência à corrosão, tensão de escoamento, tenacidade e ductilidade, resistência à fadiga, redução da porosidade e ainda a facilidade em se trabalhar com o metal para acabamento. Quanto menores os grãos, maior a área de ligação entre estes, e também menor a influência das impurezas presentes sobre as ligações entre os grãos. O controle de seu tamanho pode ser obtido através da velocidade de resfriamento e através da adição de elementos de liga que favoreçam a solidificação como desejado.

O tamanho do espaçamento entre os braços dendríticos que surgem na nucleação também influencia as propriedades mecânicas segundo Campbell (2003). Similar ao tamanho de grão, espaçamentos reduzidos também contribuem para o aumento na resistência mecânica do material.

Campbell (2003) ainda cita como possíveis defeitos o aprisionamento de gases e impurezas na estrutura, como já mencionado anteriormente, defeitos planares, como porosidade excessiva, trincas e fendas, e filmes duplos, ou *bifilms*, que são originários da formação de camadas superficiais de constituição diferente, como óxidos, por exemplo. Na figura 4.7, uma imagem obtida com o auxílio de microscópio ótico evidenciando este tipo de falha.

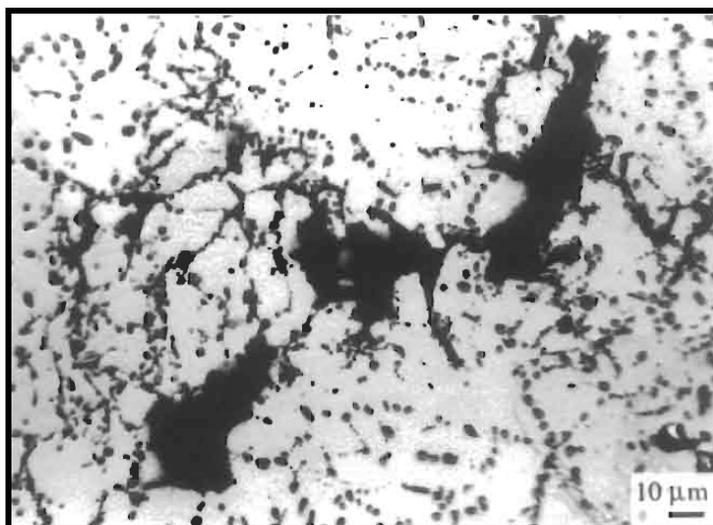


FIGURA 4.7. Exemplo de porosidade e inclusões de óxidos em uma amostra polida de alumínio (Microscópio ótico)

Fonte: CAMPBELL, 2003

Kliauga; Ferrante (2009) ainda enumeram também uma série de variáveis que podem influenciar no aparecimento de defeitos, decorrentes do processo, podem ser: 1 - composição da liga; 2 - traços de elementos de liga ou impurezas; 3 - uso de antioxidantes e refinadores de grão; 4 - intervalo de solidificação da liga proporção de metal novo e metal reciclado; 5 - limpeza dos metais utilizados; 6 - atmosfera da fusão; 7 - umidade relativa do ar; 8 - geometria do cadinho; 9 - composição do cadinho; 10 - fonte de aquecimento; 11 - atmosfera da câmara de fundição; 12 - pressão do gás na atmosfera controlada; 13 - idade do cadinho; 14 - altura de queda do metal líquido; 15 - temperatura do molde cerâmico; 16 - tamanho e tipo de molde contido no cilindro; 17 - temperaturas reais de vazamento; 18 - distribuição de temperatura no cilindro no ato do vazamento; 19 - intervalo de tempo entre: fusão e aceleração angular em processo centrífugo, 20 - fusão e vazamento no processo a vácuo; 21 - tamanho do bocal de vazamento; 22 - velocidade de rotação na centrífuga; 23 - distância entre o cadinho e o molde na centrífuga; 24 - vácuo aplicado durante a fundição; 25 - porosidade do revestimento; 26 - resistência mecânica do revestimento; 27 - tensão superficial do revestimento; 28 - tempo que o cilindro é deixado descansando após a fundição; 29 - método de têmpera após a fundição; 30 - composição do fluxo; 31 - características de contração do metal durante a solidificação; 32 - características de contração do revestimento; 33 - tensão superficial do líquido durante o preenchimento do molde; 34 - condutividade térmica do revestimento; 35 - calor específico da liga; 36 - interação termoquímica entre metal líquido e revestimento; 37 - disposição dos modelos dentro do molde.

Todas estas variáveis, se não controladas, podem contribuir para o surgimento de falhas nas peças, e como são muitos os fatores, é muito comum que estas sejam constantemente presentes no processo de fundição. Kliauga; Ferrante (2009) identificam como falhas mais comuns em joalheria o disposto na tabela 4.3.

TABELA 4.3.

Falhas comuns em peças de joalheria

<b>Tipos de defeitos</b>	<b>Proporção %</b>
Porosidades, cavidades	47
Trincas e fraturas	33
Corrosão e oxidação	20
Trincas de recozimento	10

Fonte: KLIAUGA; FERRANTE, 2009

Segundo Kliauga; Ferrante (2009), os defeitos mais comuns percebidos são:

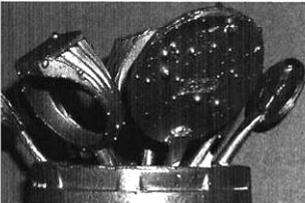
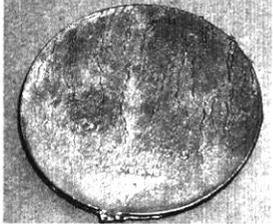
- Inclusões: decorrentes de impurezas, que podem ter como causa a falta de controle do metal utilizado e má limpeza do cadinho e outros objetos de uso na fundição;
- Inclusões superficiais de fluxo durante o vazamento;
- Cavidades superficiais esféricas: podem ocorrer pelo aprisionamento de gases durante o vazamento, ou pela reação de produtos gasosos no momento do preenchimento do molde;
- Trincas de origem mecânica ou térmica: ocorrem em geral em regiões de grande concentração de tensões, podendo ser causadas pelo resfriamento inadequado (excessivamente rápido) do cilindro fundido;
- Trincas a quente: tendem a aparecer sempre em um mesmo local para um mesmo modelo, e são decorrentes da contração do metal no resfriamento;
- Juntas frias: aparecem como uma linha no metal, causada pelo encontro de metal já solidificado com metal líquido. Pode ser causado por resfriamento indesejado do molde no momento da fundição;
- Rechupe: em geral ocorrem pela inserção incorreta dos canais de injeção (em função da geometria da peça), assemelhando-se a poros maiores, e são resultantes da contração do material no momento da solidificação.
- Poros: a porosidade é um termo genérico para pequenas cavidades internas ou que afloram à superfície. Podem ser causados pela contração do metal durante a solidificação, ou pela presença de gases aprisionados. São basicamente, quatro tipos de porosidades:
  - a. Microporosidade gasosa: têm origem na evolução de gás durante a solidificação; localiza-se nas seções mais espessas, é muito fina e de formato esférico;
  - b. Microporosidade de contração: poros de formato irregular, localizados entre as dendritas, e grãos mais grosseiros, em regiões mais espessas da peça;

- c. Macroporosidade gasosa: cavidades grandes e circulares com paredes brilhantes, geralmente localizadas em regiões que se solidificam por último. Estão associadas à presença de gases e vapores, como dióxido de carbono, enxofre, monóxido de carbono, ar, hidrogênio, zinco gasoso, vapor de zinco, oxigênio, ou uma combinação destes;
  - d. Macroporosidade de contração: tem as mesmas causas da porosidade de contração, mas volume maior. São em geral cavidades arredondadas ou irregulares, e em geral podem estar associadas a um colapso da superfície externa da peça. São evidenciadas pelo polimento.
- Poros originados de inclusões: Ocorrem quando um fragmento de grafite proveniente, por exemplo, do cadinho, fica aprisionado no metal líquido. Há reação com o oxigênio dissolvido na liga formando monóxido de carbono e gerando poros na solidificação;
  - Fragilidade: Termo utilizado para caracterizar a incapacidade de deformação do metal sob tensão, o que acarreta quebra de partes da peça no momento de conformação mecânica, como por exemplo, na cravação de peças. Geralmente sua causa está associada à composição da liga ou resfriamento inadequado da peça depois de fundida.

A tabela 4.4 demonstra alguns defeitos comuns que podem ocorrer no momento da inclusão do revestimento no molde, e sugere algumas soluções para evitá-los.

TABELA 4.4.

Exemplos de defeitos e suas soluções no momento da inclusão do gesso

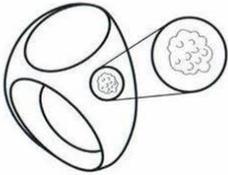
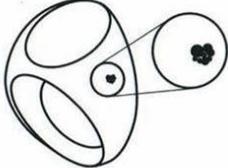
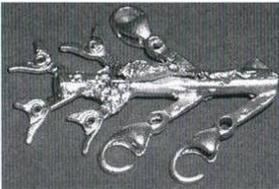
Tipo de defeito	Causa	Solução
<p>Rachaduras no revestimento, que levam à formação de barbatanas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporção incorreta de pó e água (muita água).</li> <li>• O tempo de trabalho do revestimento não está sendo todo usado.</li> <li>• Ciclo muito longo. O revestimento começa a quebrar quando está sob vácuo.</li> <li>• Os tubos foram manuseados antes do término do período de repouso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usar a proporção correta de água, principalmente com máquinas de fundição a vácuo, onde esses problemas são frequentes.</li> <li>• Manter o tempo e a temperatura de trabalho do revestimento recomendados pelo fabricante.</li> <li>• Deixar os tubos em total repouso por no mínimo 1 hora.</li> </ul>
<p>Bolhas, esferas completas e incompletas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revestimento muito grosso ou pouca água ( ou revestimento de baixa qualidade).</li> <li>• Bomba de vácuo insuficiente.</li> <li>• Ciclo de trabalho muito longo. O revestimento começa a endurecer quando ainda está sob vácuo.</li> <li>• Eletricidade estática na cera.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usar a proporção correta de água e pó.</li> <li>• Manutenção ou troca da bomba de vácuo.</li> <li>• Lavar a cera.</li> </ul> <p>Obs.: A cera deverá estar completamente seca para sua utilização.</p>
<p>Marcas d'água</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporção incorreta de pó e água (muita água).</li> <li>• O tempo de preparo do revestimento não é o recomendado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usar a quantidade correta de água (especialmente quando se utiliza máquinas a vácuo).</li> <li>• Manter o tempo e a temperatura de trabalho do revestimento recomendados pelo fabricante.</li> </ul>

Fonte: KLIUGA; FERRANTE, 2009

É possível perceber pelo número de fatores associados à confecção do molde, que este é um processo de extrema importância para o ciclo de fundição, senão o mais crítico. Ainda podem-se enumerar outros problemas decorrentes desta etapa, no momento da eliminação da cera do molde, que pode ser verificado na tabela 4.5.

TABELA 4.5.

Exemplos de defeitos originados no momento da retirada do molde

Tipo de defeito	Origem
<p>Inclusões superficiais com aspecto de ovas de peixe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quando no processo a vapor em pressão atmosférica, o tubo cerâmico resfria abaixo da temperatura de vaporização da cera e a cera residual se expande durante o reaquecimento destacando parte do revestimento.</li> <li>• O mesmo ocorre se no processo por autoclave a pressão diminui muito rapidamente.</li> <li>• Rachaduras no revestimento também ocorrem se o aquecimento, independentemente do equipamento utilizado, for muito rápido.</li> </ul>
<p>Porosidade superficial com aspecto geométrico</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evidência de que houve destacamento do revestimento por existência de resíduos de cera.</li> <li>• Podem ser causados por destacamento do revestimento ou por irregularidades no modelo de cera; por exemplo, má ligação entre canal de ataque e espiga central.</li> </ul>
<p>Inclusões de carbono</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizam-se por inclusões negras cercadas de poros.</li> <li>• Se a partícula de carvão tiver caído, a falha resultante tem superfície brilhante.</li> <li>• Causadas por queima incompleta da cera.</li> </ul>
<p>Barbatanas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Causadas por aquecimento muito rápido ou por re-aquecimento de tubos já frios, que acarreta, assim, trincas no revestimento.</li> </ul>
<p>Poros</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derivados da presença de carbono por queima incompleta.</li> </ul>

Fonte: KLIAUGA; FERRANTE, 2009

#### 4.8. Malhas 3D Trianguladas

No momento em que são mencionadas as técnicas de modelagem tridimensional neste trabalho, fala-se constantemente das malhas em 3D, que são a estrutura matemática interpretada pelo software para gerar os objetos que são utilizados tanto para a criação das peças, bem como as simulações. Estas estruturas possuem algumas características específicas e mostra-se necessário uma breve explicação de como são concebidas.

Basicamente, existem dois tipos de malhas mais utilizadas pelos softwares 3D, malhas trianguladas, comumente chamadas de *MESH*, e malhas *NURBS* (*Non Uniform Rational Basis Spline*), constituídas por superfícies definidas por linhas geradas a partir de pontos de controle de suas tangências. As malhas *NURBS*, devido ao fato de sua construção basear-se em curvas, possuem características bem mais suaves, ou orgânicas, que as malhas em *MESH*. Entretanto, os modelos utilizados para a prototipagem e nas simulações são os triangulados, pois no caso das *NURBS*, para que o sistema processe o objeto, é necessário o cálculo do valor da tangência de cada ponto que define a malha, em função de sua coordenada cartesiana no espaço, enquanto que nas *MESHES*, a informação é imediata, apenas das coordenadas dos pontos no espaço, sem necessidade de cálculos subjacentes.

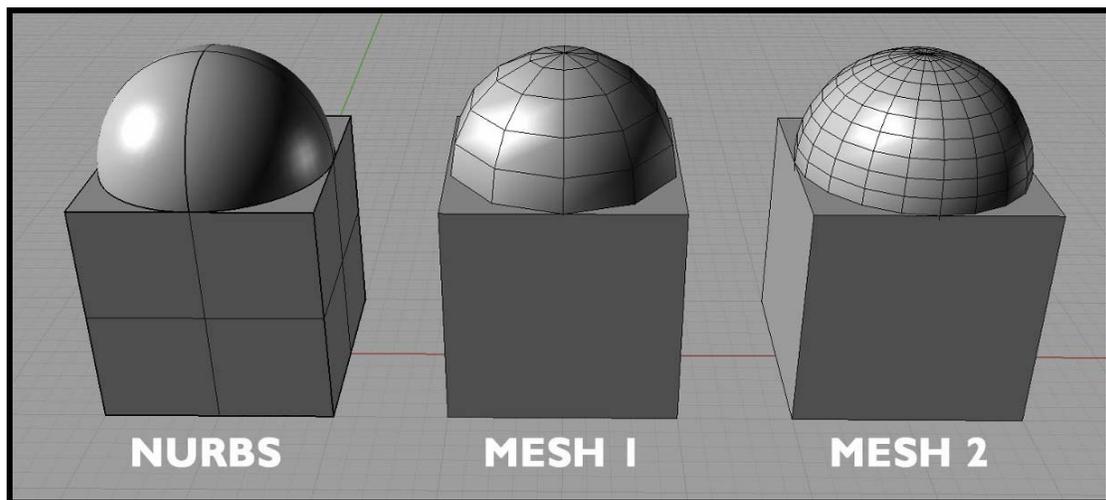


FIGURA 4.8. Exemplo ilustrando a diferença entre as estruturas em NURBS e em MESHES

Fonte: <http://rhinoart.info/?p=107>

A figura 4.8 mostra um comparativo entre os dois tipos de estrutura. Pode-se notar que em *MESH 1*, a malha apresenta-se bem mais grosseira do que em *MESH 2*, que por ter um maior número de subdivisões, torna-se visualmente mais suave. É importante

esclarecer que a maioria dos softwares 3D exibe polígonos de mais de três lados (retângulos no caso) para facilitar a visualização do modelador, entretanto matematicamente a malha é composta por triângulos, como mostrado na figura 4.9.

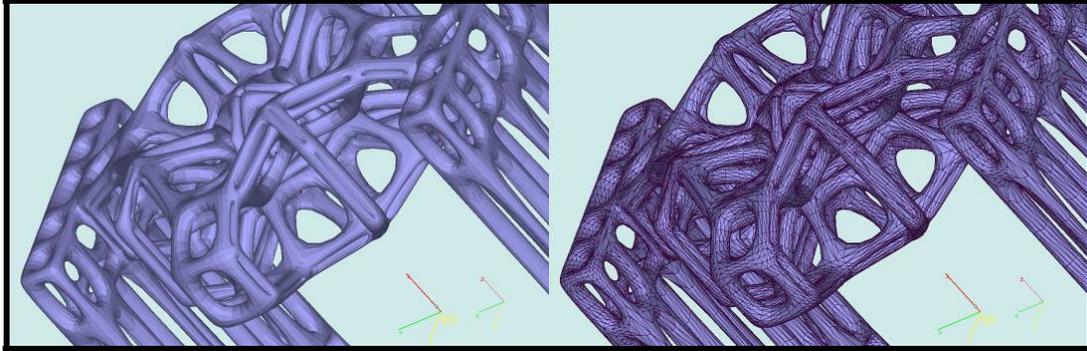


FIGURA 4.9. Exemplo de como os softwares 3D ocultam a triangulação da malha para facilitar a visualização e compreensão da geometria da peça

Segundo Sheffer; Praun; Rose (2006), essas malhas têm como características serem compostas por três elementos básicos: vértices, arestas e triângulos, sendo os vértices a sua menor porção, e determinante principal da malha. Cada vértice possui três coordenadas cartesianas que definem sua posição no espaço. Entre dois vértices tem-se uma aresta interligando-os, e a união de três destes vértices por arestas não colineares formam um triângulo ou face. A junção destes vários triângulos forma então as superfícies que constroem os objetos 3D. Quanto maior o número de triângulos de uma malha, maior a possibilidade de se representar detalhes na mesma, mas também maior a quantidade de informação necessária para o sistema interpretar e gerar a visualização ou manipular o objeto 3D.

## 4.9. Prototipagem Rápida

Segundo Kamrani; Nasr, (2006, p.v), “Prototipagem Rápida é uma técnica de conversão direta de um modelo tridimensional em formato CAD em um protótipo físico”. A RP (*Rapid Prototyping*) permite a construção automática de modelos e tem sido utilizada para reduzir significativamente o tempo do ciclo de desenvolvimento e produção e melhorar a qualidade final do produto final do design.

Existem várias tecnologias de prototipagem, e Chua; Leong; Lim (2003) dividem-nas em três categorias, as que utilizam matéria líquida, sólida e pó. Para cada categoria, têm-se diversas tecnologias dependendo do fabricante das máquinas. A exemplo, citam-se algumas tecnologias:

### I - Matéria líquida:

- Stereolithography Apparatus (SLA) – Mecanismo de estereolitografia;
- Solid Ground Curing (SGC) – Curagem de base sólida;

### II – Matéria sólida:

- Fused Deposition Modeling (FDM) – Modelagem por deposição de material fundido;
- Multi-Jet Modeling System (MJM) – Sistema de modelagem multi-jato;

### III – Matéria em pó:

- Selective Laser Sintering (SLS) – Sinterização seletiva a laser;
- Multiphase Jet Solidification (MJS) – Solidificação multifásica por jato;
- Electron Beam Melting (EBM) – Derretimento por feixe de elétrons.

Dentre as tecnologias listadas, duas são as mais relevantes para o trabalho, por ser as mencionadas e comparadas, a SLA e a MJM.

#### 4.9.1. Estereolitografia - *Stereolithography Apparatus (SLA)*

O processo de SLA, ou estereolitografia, consiste em realizar a cura de uma resina foto-sensível a partir de um laser aplicado sobre superfície do líquido. Um modelo em 3D é submetido à máquina em formato CAD, e este é fatiado em camadas longitudinais, que serão feitas uma a uma na superfície do líquido.

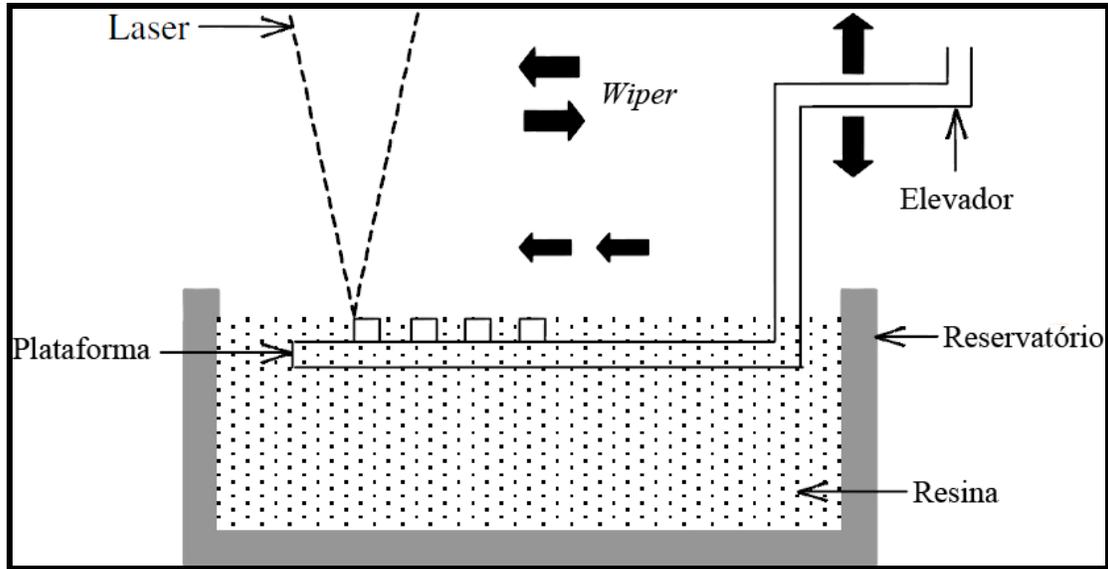


FIGURA 4.10. Processo de construção através da tecnologia de SLA

Fonte: adaptado de CHUA; LEONG; LIM, 2003

A figura 4.10 ilustra o processo: o laser é focado sobre a superfície do líquido, com uma espessura suficiente para que a parte curada possa aderir à plataforma. Esta por sua vez é movida para baixo à medida que as camadas são feitas. Um braço mecânico (chamado *wiper*) acomoda a resina líquida sobre a parte recém construída, para que então uma nova camada seja criada. Existem máquinas em que o processo é feito de modo reverso, sendo que a base da plataforma toca a superfície da resina, e à medida que a peça é construída, esta se move para cima, afastando-se da superfície do líquido, e a peça é confeccionada de cabeça para baixo.

Neste processo, é necessária a colocação de hastes de suporte para sustentação da peça no momento da construção. Após o processo, as hastes podem ser removidas (cortadas), dando-se acabamento posterior à peça.

#### 4.9.2. Sistema de modelagem multi-jato - *Multi-Jet Modeling System* (MJM)

Este processo é muito semelhante ao modo como as impressoras jato de tinta trabalham. Uma plataforma é posicionada sob um cabeçote, que faz a deposição de material sobre esta. A plataforma move-se horizontalmente para adequar a camada que está sendo produzida, permanecendo o cabeçote imóvel. Este cabeçote por sua vez, possui uma série de bicos que aplicam o material sobre a plataforma. Em alguns equipamentos, é feita a deposição da resina que originará a peça, juntamente com outro material de suporte, normalmente uma cera, que dá sustentação para a mesma, e que depois é removido através de calor ou de um solvente. A figura 4.11 apresenta um diagrama de funcionamento do equipamento.

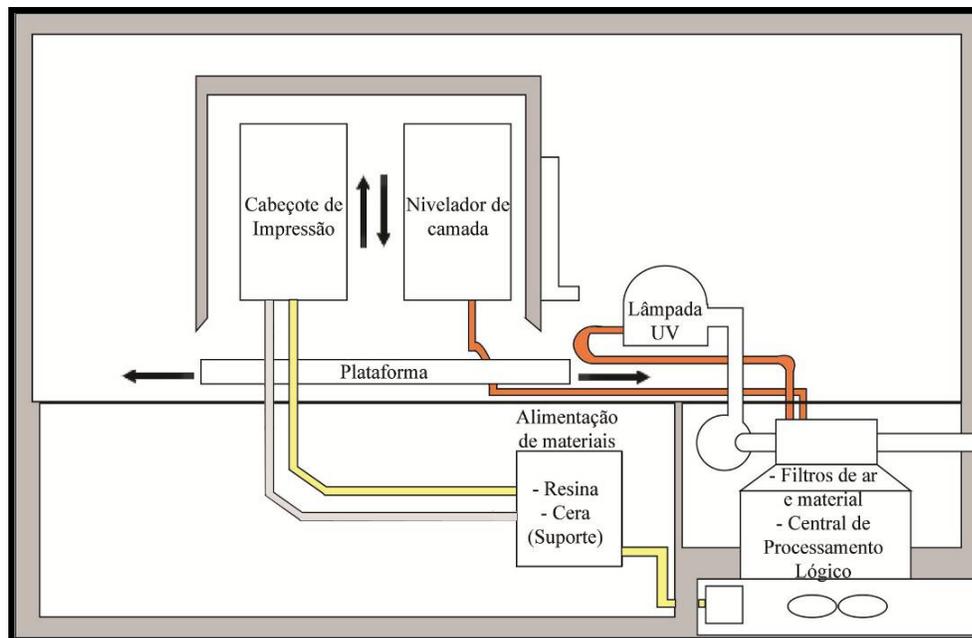


FIGURA 4.11. Processo de construção da peça através da tecnologia MJM

Fonte: adaptado de <http://www.3dsystems.com>.

#### 4.10. Rendering

O rendering consiste na representação visual de um modelo em 3D de maneira a simular condições de iluminação, materiais, texturas, luz e sombra, dando assim um aspecto mais realista aos objetos gerados a partir das ferramentas 3D. em função de limitações de hardware, ao manipular objetos em um software, estes possuem uma visualização simplificada, não apresentando por exemplo reflexões, refrações, e outros efeitos óticos presentes nos materiais normalmente. Após a realização da modelagem, são aplicadas texturas, luzes e outras características óticas aos objetos, de modo que possam representar corretamente aquilo que se deseja.

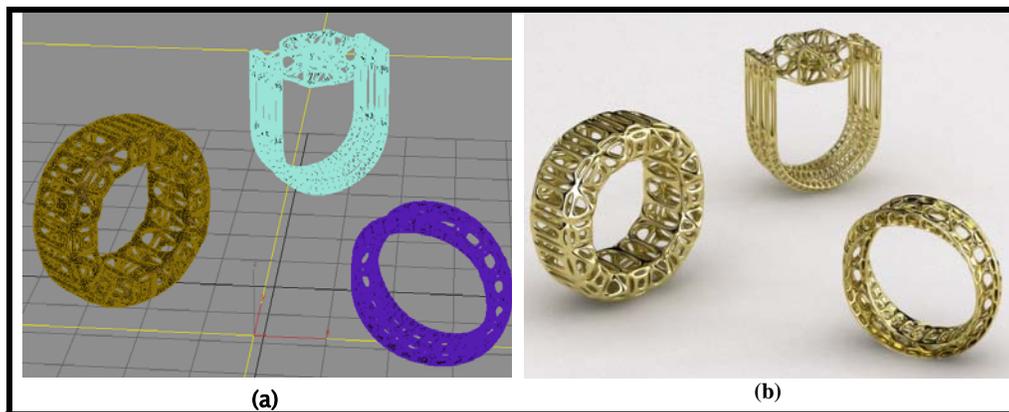


FIGURA 4.12. Exemplo da manipulação dos objetos 3D sem o rendering (a) e rendering finalizado com materiais e reflexão (b)

Fonte: Henrique Lana

## **5. RECURSOS UTILIZADOS E METODOLOGIA**

### **5.1. Materiais**

A base da pesquisa inicialmente concentrava-se na fundição de peças em ligas de ouro para joalheria. Entretanto, devido ao custo elevado do material e pelo software de simulação não possuir nativamente os dados de ligas de ouro e prata os testes foram realizados utilizando-se cobre puro em um primeiro experimento, e nas outras três fundições, latão, que é também uma liga de cobre (Cu 70% + Ni 30%). Uma vez que na prática, a intenção do trabalho é avaliar a capacidade de prever os problemas da fundição através do software, e o cobre e latão mostram-se bem mais problemáticos que o ouro em vários aspectos (escoamento mais difícil, maior teor de impurezas), os resultados obtidos fornecem um comparativo válido para as ligas em ouro.

Para a confecção dos modelos matemáticos, é utilizada a tecnologia de prototipagem rápida. Os modelos são construídos em uma resina acrílica fotossensível, curada em luz ultravioleta, e que possuem ponto de fusão muito próximo da cera utilizada tradicionalmente na joalheria (aprox. 90° C). Os modelos foram confeccionados na própria máquina da Escola de Design, e outros com a empresa também de prototipagem rápida e fundição BQZ Internacional, localizada em Lagoa Santa, e que tem mostrado interesse em trabalhar em parceria com o Centro de Gemas e Jóias, que também realizou algumas fundições.

Na confecção dos moldes, utilizou-se o gesso comercial. Os revestimentos mais comuns usados na joalheria constituem-se de uma mistura de gesso (Gipsita - CaSO<sub>4</sub>) e sílicas (SiO<sub>2</sub> e SiO<sub>4</sub> – cristobalita e quartzo) e são indicados para as ligas metálicas com ponto de fusão de até 1.100 °C.

### 5.1.1. Software

O *MagmaSoft*®, software de análise e simulação de processos de fundição, da empresa Magma, empresa representante do desenvolvedor deste no Brasil, foi adotado como base para a pesquisa após contato com a empresa, que se mostrou extremamente favorável e atenciosa para com o trabalho.

O *MagmaSoft*® permite ao usuário visualizar resultados da geometria real de qualquer direção e cortar em certas áreas para identificar áreas comprometidas da modelagem. Temperaturas na modelagem e moldes podem ser vistos em qualquer etapa do processo. Níveis de porosidade, o padrão de enchimento, assim como o histórico termal podem ser assinalados e vistos como uma animação em raios X. A variedade de critérios ajuda na condensação da informação no enchimento, solidificação ou na formação de uma figura compreensível. Resfriamento de curvas e velocidade ou parcelas de pressão podem ser vistos em qualquer local. A avaliação automática dos resultados também é realizada.

O software também fornece ao usuário as propriedades termofísicas dos materiais necessárias para a simulação. O usuário tem a opção de adicionar ou fazer mudanças nestes dados, configurados para composições diferentes de liga ou materiais e para atribuir a eles diferentes valores em seu banco de dados. Pode prever toda a qualidade da modelagem simulando calor e fluxo de fluido, tensão e fenômenos de formação de microestruturas no processo manufaturado de modelagem. Pode ser aplicado em qualquer modelagem de material, começando de ferro fundido a alumínio fundido na areia, para grandes modelagens em aço, permitindo ao fundidor otimizar moldes, minimizando tempo e prevendo formações defeituosas antes do molde ser cortado. A figura 5.1 ilustra algumas imagens obtidas com o software, inclusive a previsão de microestrutura realizada pelo software e um comparativo da simulação utilizando o recurso de raios-x.

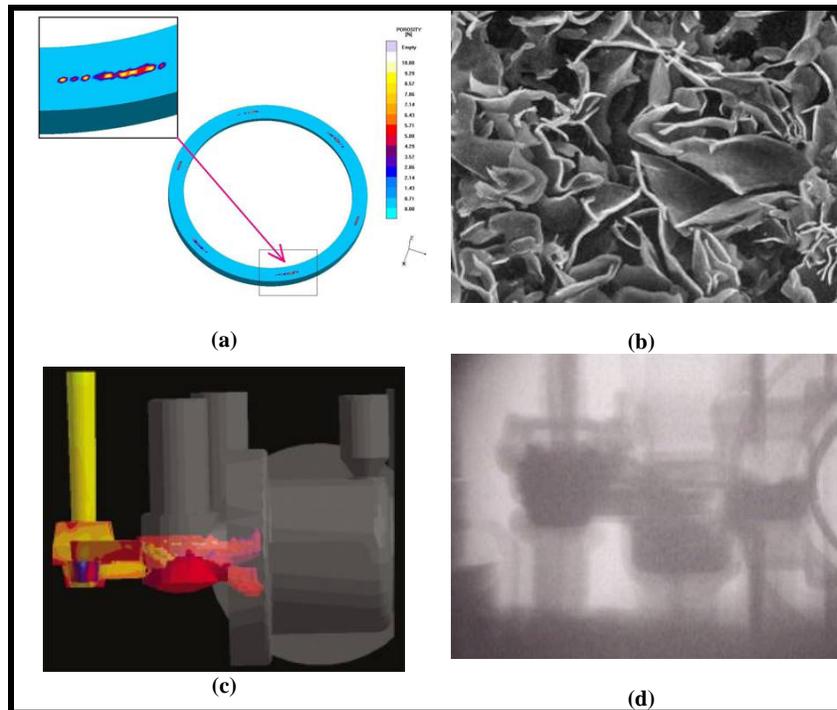


FIGURA 5.1. Exemplo das análises realizadas pelo software: a) previsão de “rechupes”; b) previsão da microestrutura (somente para ligas de aço-carbono e ferro); simulação da injeção de material no molde e d) comparativo do processo utilizando raios-X.

Fonte: adaptado de <http://www.magmaflow.com>, e Ha, J. *et al.*, 2003

A figura 5.2 mostra um exemplo de como o software gera a saída da simulação. Após processar as informações, o software gera então uma animação que torna possível não só visualizar o escoamento do metal em estado líquido através do molde, mas também acompanhar as variações de temperaturas ao longo do processo. A figura apresenta uma seqüência de imagens em função do tempo, da esquerda para a direita e de cima para baixo, onde pode-se perceber o preenchimento do molde e, através das cores, os pontos onde o metal começa a resfriar-se mais rapidamente, como indica a legenda com as temperaturas à direita.

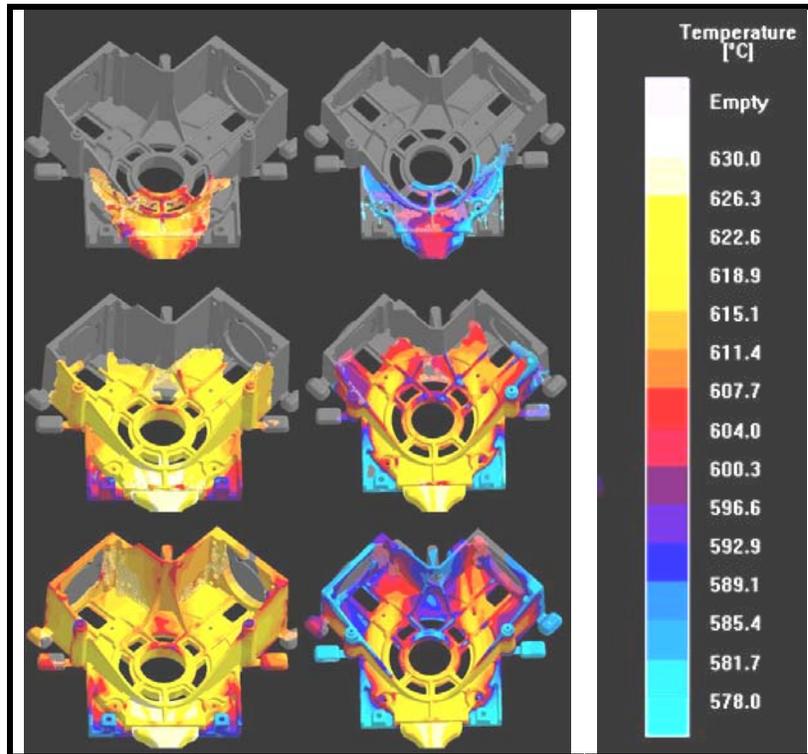


FIGURA 5.2. Exemplo da simulação animada, demonstrando o preenchimento das cavidades pelo metal e as respectivas temperaturas em cada ponto da peça (sequência de imagens em função do tempo de preenchimento).

Fonte: VERRAN; MENDES, 2006

É importante citar que o *MagmaSoft*® foi desenvolvido para aplicação em metalurgia industrial originalmente, portanto as ligas das quais ele dispõe são exatamente as mais utilizadas comercialmente, tais como aço-carbono, alumínio e magnésio. Entretanto, pela maneira com a qual o software foi desenvolvido, é possível utilizar ligas de qualquer metal, desde que suas características sejam inseridas em sua base de dados. Esta inserção por sua vez é feita através de programação, e não simplesmente com a inserção dos dados pelo usuário final. Assim, para a utilização de liga de ouro ou prata, que seria o ideal para este trabalho, não foi possível em função do tempo para desenvolvimento e demandas internas da empresa desenvolvedora. Assim, optou-se pela utilização de um material já existente na base de dados que fosse possível de ser empregado, que no caso foi inicialmente o cobre puro, e nos testes subsequentes à primeira fundição, liga de latão.

### 5.1.2. Equipamento

O laboratório de Prototipagem Rápida da Escola de Design da UEMG conta com uma máquina de prototipagem rápida *Invision 3D Si2®*, que possibilitou transpor os modelos gerados a partir de computação gráfica para protótipos em resina que conseqüentemente foram utilizados para realizar a fundição das peças em metal.

A *Invision 3D Si2®* é um equipamento de prototipagem rápida tridimensional que oferece vantagens fundamentais comparadas a outras tecnologias de prototipagem rápida. O equipamento é capaz de produzir modelos com alta precisão (décimos de mm) e qualidade, utilizando materiais fotopoliméricos duráveis. O acabamento superficial e os níveis de detalhamento obtidos são excepcionais além de ser possível a atenção de modelos extremamente complexos. A tabela 5.1 apresenta algumas características do equipamento de prototipagem, e na tabela 5.2 pode-se observar algumas das propriedades da resina e cera utilizadas na construção da peça. Uma foto de um equipamento semelhante ao utilizado e uma peça confeccionada pelo mesmo são apresentados na figura 5.3.

TABELA 5.1.

Especificações gerais da máquina de prototipagem

ESPECIFICAÇÕES GERAIS	
Tecnologia	Multi-jet-modeling (MJM)
Material	Accura VisiJet SR M100 - Fotopolímero Acrílico por cura UV*.
Resolução	300 x 325 x 625 DPI (xyz)
Tamanho Máx. do Modelo	304 x 185 x 203 mm**
**Relação de proporção para a plataforma do equipamento ( <i>Building</i> ). O modelo poderá ser fragmentado e montado por cola quando suas dimensões ultrapassarem o tamanho máximo permitido de trabalho na plataforma.	

Fonte: <http://www.3dsystems.com>

TABELA 5.2.

Especificações técnicas do material utilizado na prototipagem

*Accura VisiJet SR M100 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS		
DESCRIÇÃO		M100
Composição	Polímero acrílico	
Cor	Natural (opaco/branco translúcido)	
PROPRIEDADES	MÉTODO TESTE	M100
Densidade (@ 80°C)	ASTM D4164	1,01 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	ASTM D638	775 MPa (112 KSI)
Resistência à tração	ASTM D638	24 MPa (3,5 KSI)
Tensão à fratura	ASTM D638	15,6%
Módulo de flexão	ASTM D790	110 MPa (16,0 KSI)
Tensão a flexão	ASTM D638	42 MPa (6,1 KSI)

Fonte: <http://www.3dsystems.com>

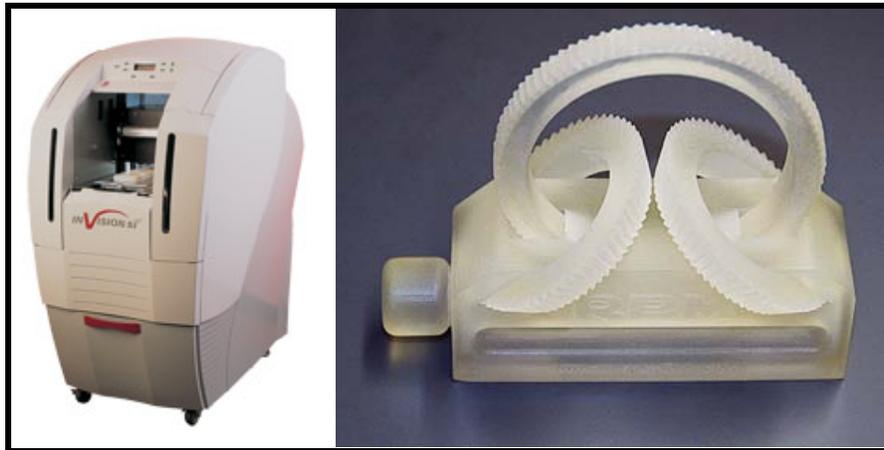


FIGURA 5.3. Esquerda: *Invision 3-D Si2*®; direita: peça desenvolvida na *Invision* com fotopolímero acrílico M100.

Fonte: <http://www.3dsystems.com>

Também foi utilizando um microscópio ótico disponibilizado pelo laboratório de gemas, do Centro de Design de Gemas e Jóias, que possibilitou a análise superficial das peças de prototipagem e fundição.

## 5.2. Metodologia

Cinco peças concebidas a partir das técnicas anteriormente descritas, utilizando-se formas matemáticas como base e com grande capilaridade em suas geometrias, foram escolhidas para os testes. Através de um software CAD/CAM foram então posicionados os canais de injeção às peças, obtendo-se então um modelo de árvore para fundição em 3D. Estes modelos, apresentados na figura 5.4, foram então utilizados em dois processos distintos:

- a) Os modelos foram submetidos à máquina de prototipagem rápida, obtendo-se assim protótipos em resina para serem fundidos através do processo de cera perdida;
- b) Os mesmos modelos foram enviados a Magma para que fossem realizados os testes de simulação.

A figura 5.4 mostra as peças utilizadas no primeiro teste com cobre, apresentando primeiramente dois renderings, primeiro com as peças separadas, e outro com a árvore já montada, com os canais de injeção já devidamente posicionados, e duas fotos da peça prototipada, antes da limpeza da cera e após a sua remoção.

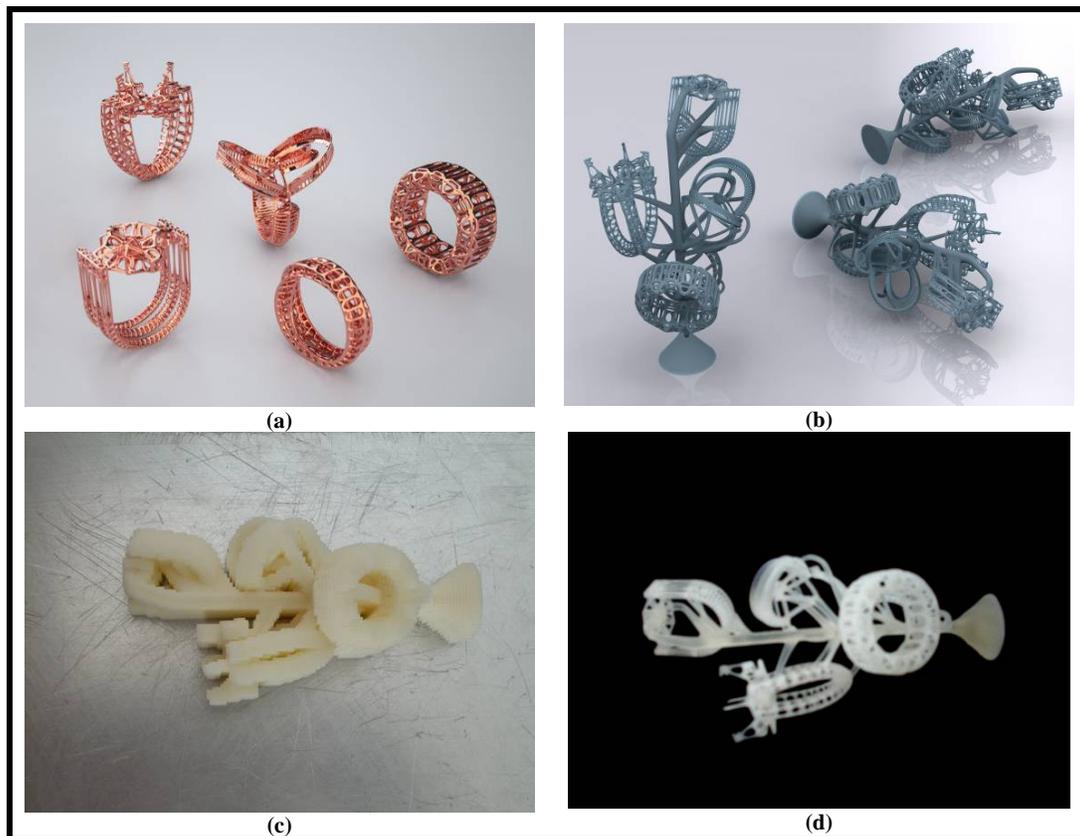


FIGURA 5.4. Modelos obtidos a partir de computação gráfica: (a) rendering das cinco peças escolhidas inicialmente, simulando cobre; (b) rendering da árvore de fundição após posicionamento dos canais de injeção; (c) modelo prototipado em resina, ainda coberto pelo material de suporte; (d) modelo prototipado em resina, já sem material de suporte e pronto para confecção do molde de fundição em cera perdida

Através da simulação, foi possível então perceber os pontos mais falhos que o modelo apresentava, tanto pela geometria das peças confeccionadas, quanto pelo posicionamento dos canais de injeção. Além disso, o software ainda prevê como se dá o resfriamento da peça, em quais pontos resfria-se mais lentamente, em quais pontos resfria-se mais depressa, onde podem ocorrer falhas de superfície, bem como pode ocorrer a nucleação do metal e ainda prevê a estrutura de grão que possivelmente será obtida. Paralelamente, foi realizada a fundição da peça prototipada em metal para observar se o

que fora apresentado pela análise da simulação realmente poderia ocorrer de fato na peça final. A figura 5.5 apresenta o fluxograma de trabalho seguido.

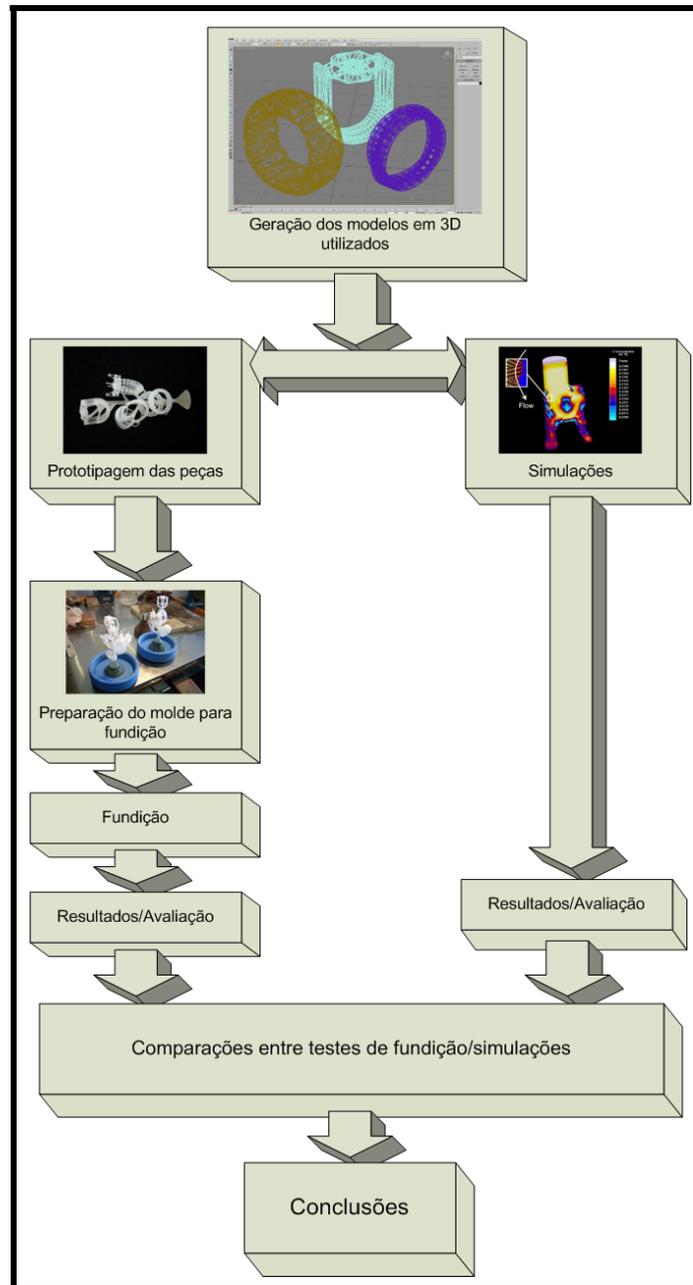


FIGURA 5.5. Fluxograma de trabalho

Desse modo, foram escolhidas três das peças anteriores, apresentadas na figura 5.6, e então se realizaram mais três ensaios de mesmo processo com estas três peças, fazendo-se então novas simulações e conseqüentemente novas fundições, sendo que a cada

problema verificado na simulação, tentou-se fazer um ajuste nos canais de injeção a fim de evitar os mesmos.

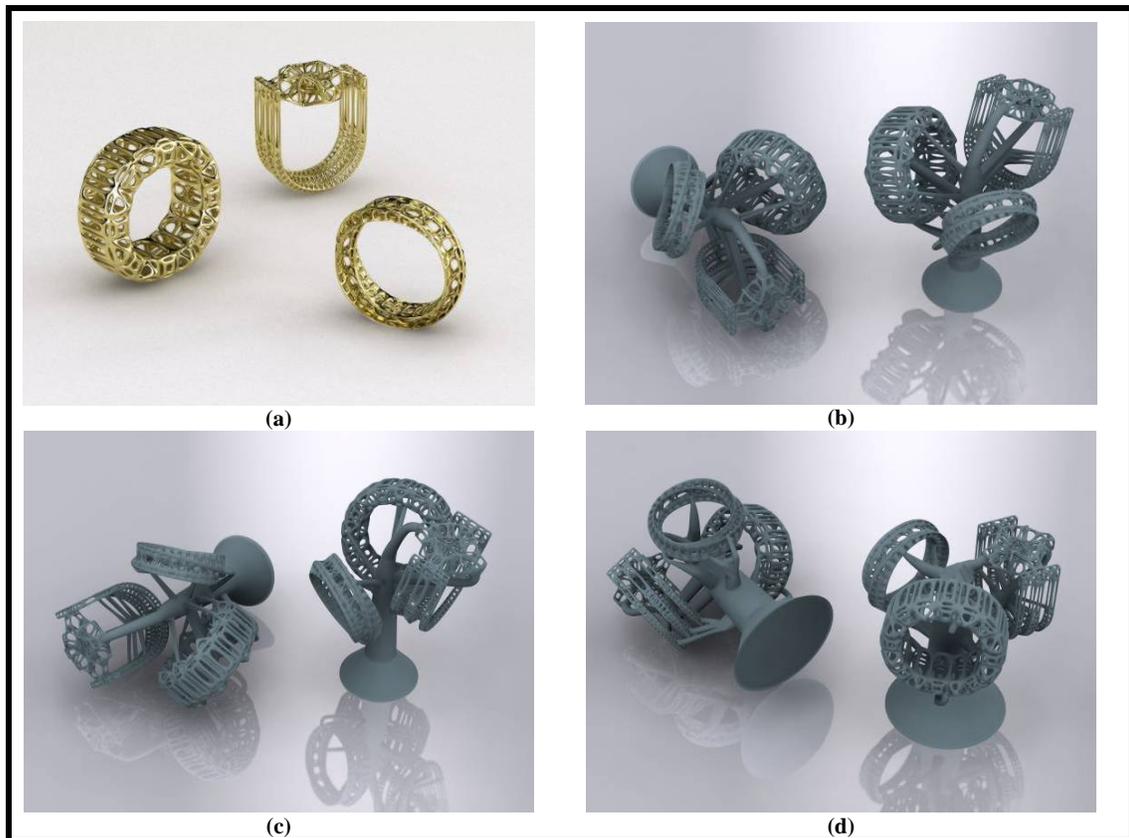


FIGURA 5.6. (a) renders das três peças selecionadas para a etapa final, simulando latão; (b), (c) e (d) modelos das três árvores que foram fundidas para o trabalho

A avaliação das peças obtidas foi feita através da análise com microscópio ótico disponível no Centro de gemas e Jóias, a fim de levantar as características referentes à microestrutura das peças confeccionadas, tais como falhas superficiais e problemas de fluxo de material, e comparadas com os resultados obtidos nas simulações.

## 6. EXPERIMENTOS

Todo o processo de obtenção das peças utilizadas no trabalho foi realizado, desde a modelagem tridimensional até a fundição das peças que seriam comparadas com as simulações. As imagens da figura 6.1 ilustram todas as etapas:



FIGURA 6.1. Etapas utilizadas para fundição em cera perdida: (a) criação da peça através de software 3D CAD; (b) montagem da árvore com as peças desejadas e posicionamento dos canais de injeção; (c) prototipagem rápida; (d) peça prototipada ainda com material de suporte; (e) peça prototipada já limpa; (f) fixação da árvore para obtenção do molde de gesso; (g) árvores prontas para inserção no gesso; (h) tubos que receberão o gesso para confecção do molde; (i) molde com o gesso sendo levado ao forno para secagem; (j) fundição das peças em metal.

## 6.1. Prototipagens

As peças, após a sua criação em software 3D e conseqüentemente a montagem da árvore de fundição, com os canais de injeção devidamente posicionados, foram então prototipadas no equipamento Invision. O processo de prototipagem demanda um tempo que é proporcional a altura da peça. Como a máquina imprime por camadas, quanto mais alta a peça, mais tempo será gasto para o término do trabalho. Por isso, é importante posicionar corretamente as peças, girando-as se necessário, para que fiquem sobre a bandeja de modo a estarem com o volume mais baixo possível.

Também é necessário considerar o gasto com o material de suporte. O suporte é uma cera que a máquina de prototipagem insere junto à peça para dar sustentação enquanto a resina se solidifica, tal como andaimes em uma obra. Sempre que existe uma parte da peça que iniciará sua construção acima da base da bandeja, o espaço entre as duas será preenchido pelo material de suporte. Esse material é por sua vez, descartado posteriormente, pois então após prototipado o modelo, este é levado a uma estufa, e aquecido a uma temperatura de até 85°C, liquefazendo assim a cera de suporte e restando apenas a peça em resina. As figuras abaixo ilustram como o posicionamento da peça influencia no gasto de material (peso em Kg):

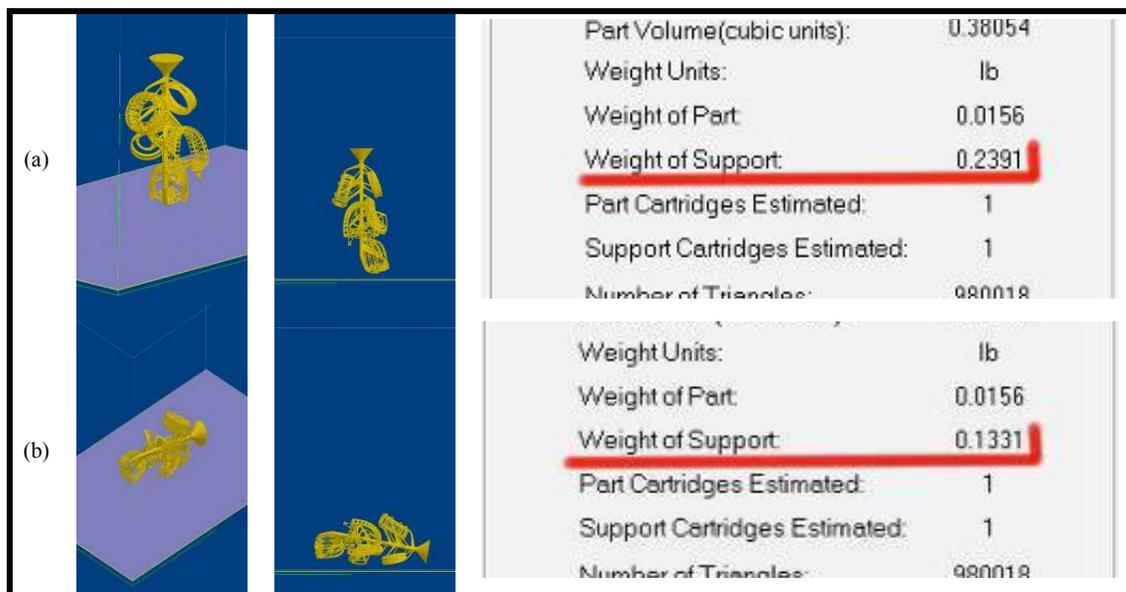


FIGURA 6.2. Demonstração da relação de gasto de material de suporte em função do posicionamento da peça sobre a bandeja: (a) peça posicionada verticalmente e (b) peça rotacionada a fim de ocupar maior volume horizontalmente

As três peças posteriores foram confeccionadas com algumas diferenças entre suas estruturas variando a maneira com a qual seria feita a alimentação no momento da fundição, para assim possibilitar como o software analisaria o comportamento do metal ao escoar pelos canais.

TABELA 6.1.  
Dados relevantes dos canais e detalhes das peças

		Canais de alimentação		Detalhes de peças		Canal central			Volume (mm <sup>3</sup> )	Número de triângulos originais	Número de triângulos após otimização
Peças		min. (mm)	max (mm)	min. (mm)	max. (mm)	Superior (mm)	Inferior (mm)	Extensão (mm)			
1		1	2	0,25	2	5	2	85	6191	980118	180010
2		1	2	0,25	2	8	2	75	6218	549084	115560
3		1	2	0,25	2	8,5	2	52	7263	539728	102422
4		1	2	0,25	2	13	9	37	11557	549286	11314

Os pontos onde apresentam os menores detalhes são os mais críticos no momento da fundição, visto que quanto mais estreita a passagem do canal, maiores as chances de ocorrer um resfriamento mais rápido ou entupimento do canal devido a impurezas e formação de óxidos. A diferenciação mais significativa entre as peças pode ser observada com relação à espessura do canal central de alimentação, onde ocorreu a maior variação de dimensionamento, como mostrado na tabela 6.1. Pode-se também perceber diferenças significativas no número de triângulos de cada malha e no volume das peças.

## 6.2. Fundição

O processo de fundição consiste de duas etapas distintas: a confecção do molde e a injeção de metal no mesmo. A seguir, estas etapas são descritas com mais detalhes.

### 6.2.1. Preparo dos moldes

O preparo dos moldes mostrou-se como uma das partes mais críticas da fundição. As peças são primeiramente posicionadas em uma base de borracha para fixação no tubo onde será incluso o gesso (figura 6.3, esquerda). Em seguida, esta base é então acoplada à extremidade do tubo, o qual é colocado em uma misturadora de gesso a vácuo. O gesso é então inserido em um compartimento que bate a mistura a uma velocidade constante (60 RPM) durante dois minutos (figura 6.3, direita). Após esse tempo, o gesso é despejado sobre o tubo de metal, preenchendo o mesmo. Durante mais dois minutos o molde fica sob pressão do vácuo (35 mm/Hg), submetido também a trepidação, para garantir a eliminação das possíveis bolhas no molde.



FIGURA 6.3. Preparação dos moldes: colocação das peças na base para ser posicionada dentro do tubo (esq) e aplicação do vácuo no momento de inclusão do gesso (dir).

Para as árvores do trabalho, foi preparada uma proporção de 500g de gesso e 180 ml de água.

Após a inclusão do gesso no molde, este descansa por 5 horas, para completo assentamento do material e secagem do gesso. Em seguida, os moldes são levados ao forno, sendo posicionados sobre uma plataforma giratória, que garante os aquecimentos homogêneos, e submetidos a um aumento gradual de temperatura.

### 6.2.2. Peças fundidas

Uma primeira fundição utilizando cobre puro foi realizada no laboratório de ligas de ouro da escola de design com a árvore contendo as cinco peças iniciais. O cobre mostrou-se difícil de trabalhar, pois sua temperatura de fusão em  $1083^{\circ}\text{C}$  é acima da utilizada na joalheria em ligas de ouro 18 Kt (75% Au + 12,5% Ag + 12,5% Cu), que é de  $895^{\circ}\text{C}$  (KLIUGA; FERRANTE, 2009).

Como o limite de temperatura de trabalho do molde de gesso é muito próximo disso ( $1176^{\circ}\text{C}$ ), o resultado apresentou diversos defeitos, não produzindo efetivamente nenhuma das peças da árvore, como mostrado nas figuras 6.4 e 6.5.

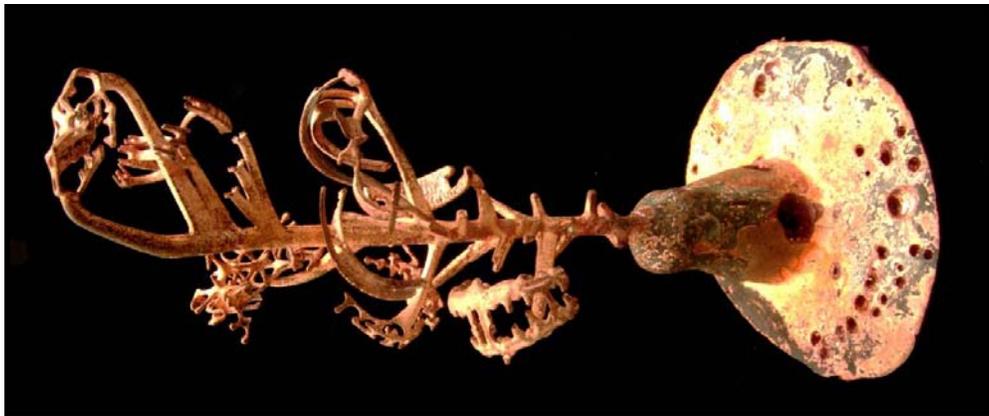


FIGURA 6.4. Primeira árvore fundida em cobre puro

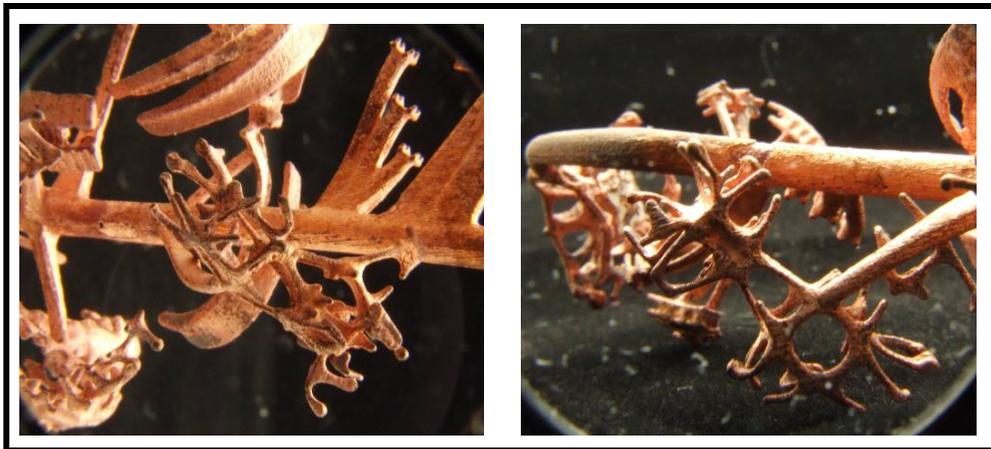


FIGURA 6.5. Detalhes das falhas das peças

Entretanto, para fins de avaliação de resultados, a fundição ainda mostrou-se válida, uma vez que no processo de simulação que será mostrado adiante, pode-se verificar que os erros foram previstos pelo software.

Já as peças que fundidas posteriormente foram feitas utilizando-se liga de latão não apresentaram defeitos grosseiros tais como os da peça em cobre, apenas alguns defeitos de má formação perfeitamente controláveis. As fotos da figura 6.6 mostram a seqüência do procedimento executado na BQZ.

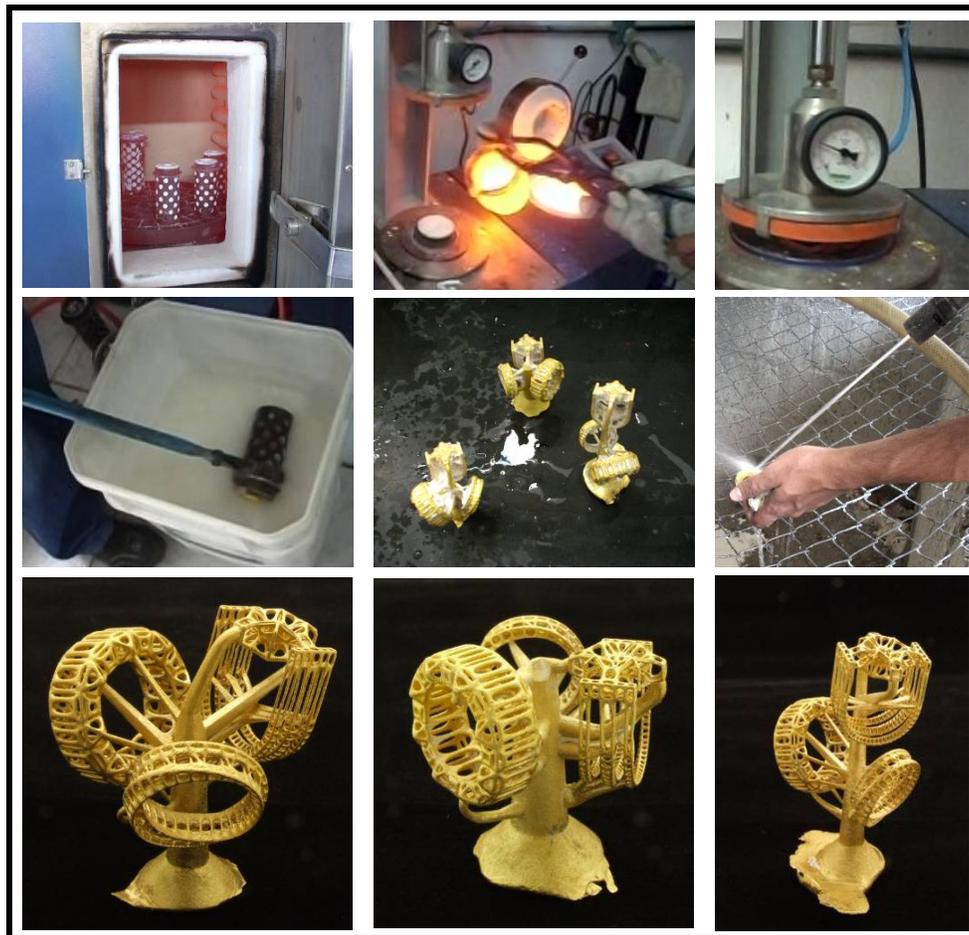


FIGURA 6.6. Fundição e limpeza das peças fundidas

### 6.3. Simulações

As simulações foram realizadas pela *Magmasoft*® diretamente. Os arquivos com as árvores montadas foram encaminhados à empresa, que por sua vez realizou o processamento para gerar as animações e gráficos demonstrando o comportamento do metal ao preencher o molde.

Uma dificuldade observada inicialmente foi a resolução de malha das peças. A mais simples das peças escolhidas possuía 549286 triângulos compondo sua malha. Isso implica em um aumento da informação que deve ser tratada, e torna-se um problema quando alcança o limite de processamento do hardware utilizado. Na primeira tentativa da simulação, o software não foi capaz de realizar o processamento da peça, visto que o número de interações entre o metal e o molde que deveria ser levado em consideração para a simulação era demasiadamente alto. A figura 6.7 mostra os pontos de interação sendo gerados pelo software.

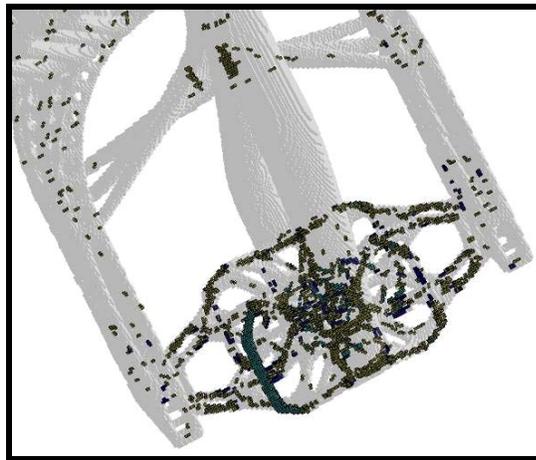


Figura 6.7. Geração dos pontos de interação entre metal e molde pelo software

Assim, foi necessária uma nova intervenção na malha, a fim de reduzir o número de triângulos para um patamar aceitável que tornasse possível o processamento. Desse modo, a peça mais simples, mencionada anteriormente, passou a ser constituída de 111314 triângulos, cerca de cinco vezes menos que a original, possibilitando assim o processamento da simulação.

O primeiro teste realizado demonstrou que algumas partes da malha apresentavam ainda problemas que dificultariam seu completo preenchimento, devido a algumas

cavidades que aparentemente estavam bloqueadas por algum erro na modelagem das peças, como mostram a seqüência da figura 6.8.

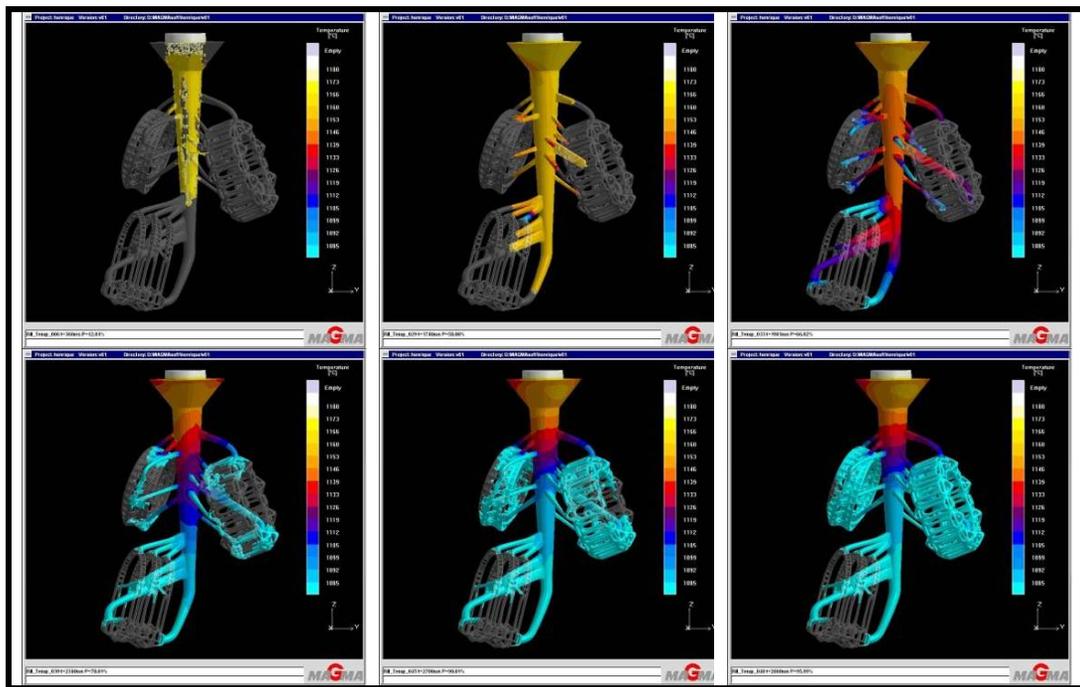


Figura 6.8. Seqüência obtida com o primeiro teste de simulação

A legenda das imagens indica as temperaturas de acordo com as cores exibidas na simulação. Pode-se observar que a peça inferior não pode ser totalmente preenchida, ainda que o metal atingisse seus canais de alimentação bem no início do processo. Isso indica que possivelmente os canais nos pontos onde o metal cessa movimento estão entupidos. Novamente então, foi necessária uma intervenção na modelagem da malha para corrigir o problema. Os detalhes em vermelho da figura 6.9 evidenciam os pontos onde ocorreram as falhas de entupimento.

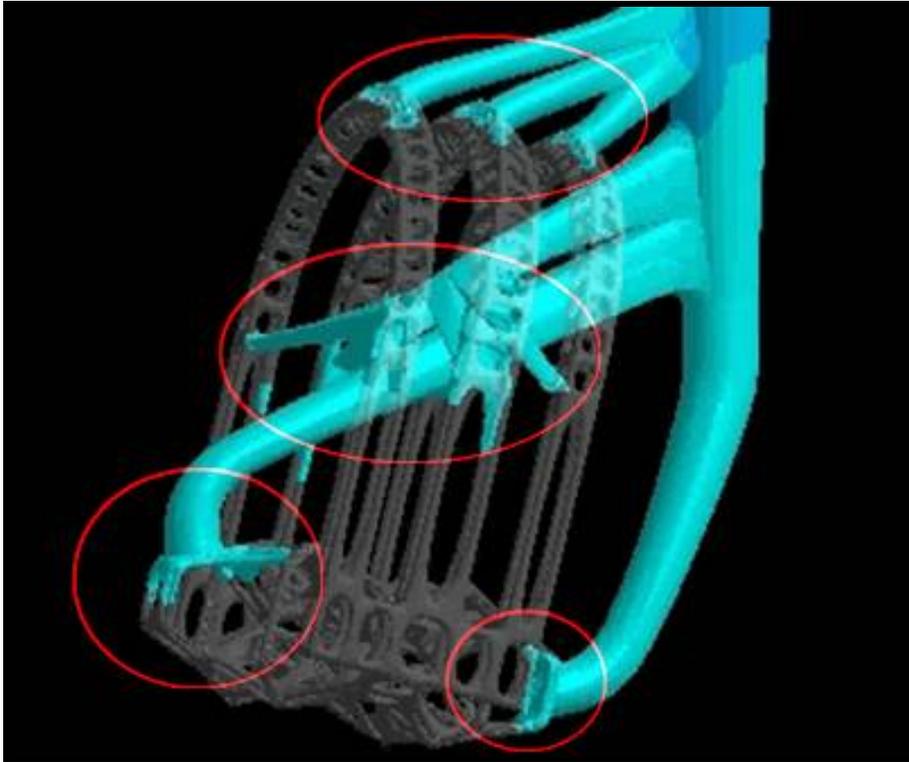


FIGURA 6.9. Detalhe das partes que apresentaram problemas dentro do software de simulação

### 6.3.1. Simulação da árvore 4

A árvore 4 foi a que apresentou um problema mais significativo. Segundo as imagens da animação da fundição, a peça não chegou a se completar em um dos canais, deixando uma haste incompleta. As imagens da figura 6.10, obtidas com o *MagmaSoft*® ilustram a situação.

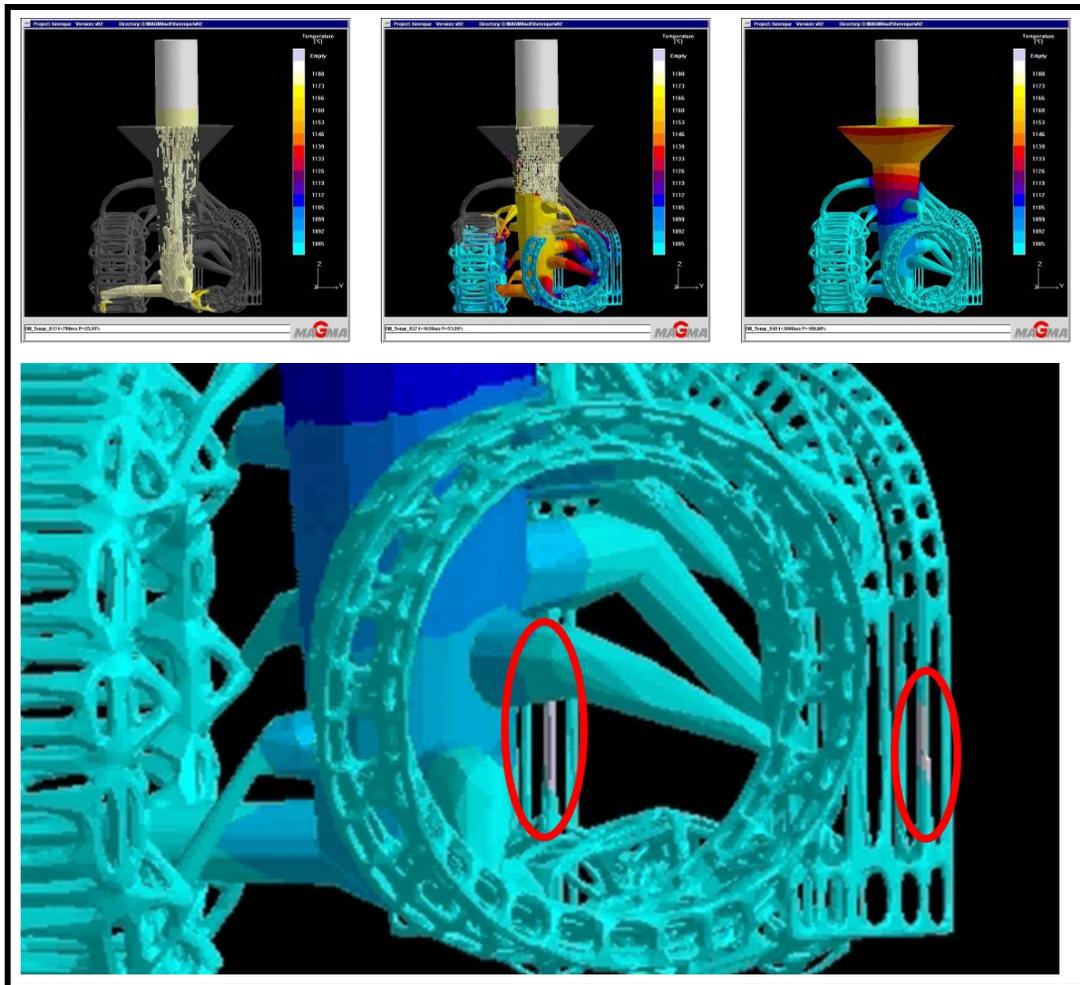


FIGURA 6.10. Simulação da árvore 4 e detalhe de erro previsto: em cinza, as partes que teoricamente não serão preenchidas.

Como se pode observar, o software previu que nestes dois pontos poderia ocorrer o não-preenchimento pelo metal das duas hastes mais finas e longas da peça. Também no ensaio, o software gera imagens prevendo os possíveis pontos de porosidade que possam ocorrer, conforme mostrados na seqüência da figura 6.11.

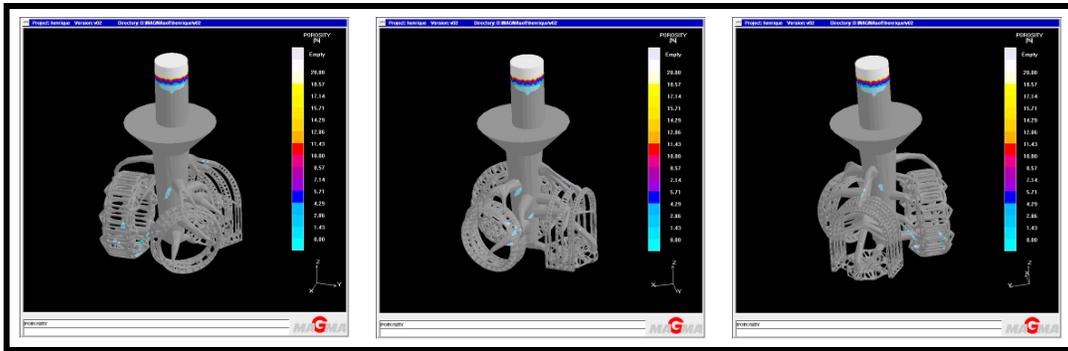


FIGURA 6.11. Possíveis porosidades previstas pelo MagmaSoft®

Também é possível verificar o resfriamento interno da peça, o tempo de solidificação, mostrado na figura 6.12.

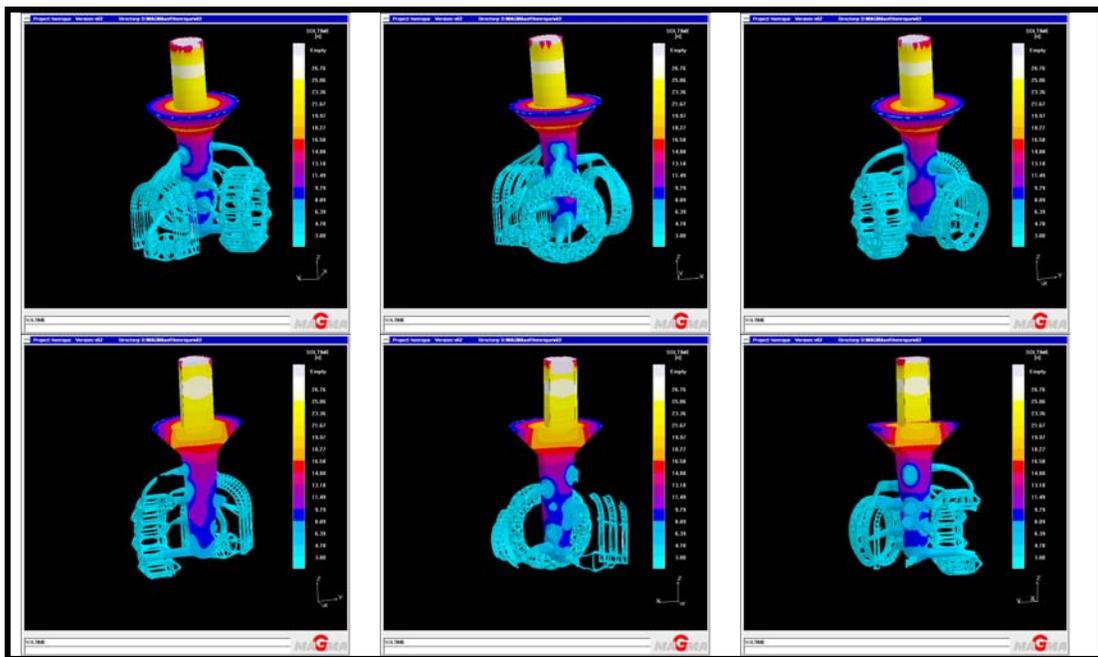


Figura 6.12. Tempo de resfriamento da peça

## 6.4. Microscopia Ótica

A microscopia ótica possibilitou a identificação de alguns defeitos praticamente imperceptíveis a olho nu. Pôde-se perceber que a resolução da prototipagem influenciou drasticamente nas peças, bem como falhas ocorridas na fundição, decorrentes da confecção do molde e problemas de escoamento de material.

### 6.4.1. Resolução das peças prototipadas

As peças prototipadas feitas na Invision para o projeto apresentam uma rugosidade característica de seu processo de construção. Como a resina é depositada em forma pastosa em camadas, e o processo de cura ocorre camada por camada e não da peça como um todo surge uma porosidade própria do material, que impede um acabamento liso, imprimindo assim uma textura rugosa nas peças. Outras tecnologias de prototipagem, tais como a estereolitografia, que consiste na cura de resina ainda líquida por laser, não provoca essa rugosidade excessiva. Como não é foco do projeto a questão de acabamento das peças, não seria um problema relevante. Entretanto, algumas falhas das peças podem ter sido acentuadas por essa característica. As imagens da figura 6.13 ilustram essa rugosidade e também mostram um exemplo da resolução que pode ser obtida pela estereolitografia, como mostrado na figura 6.14.

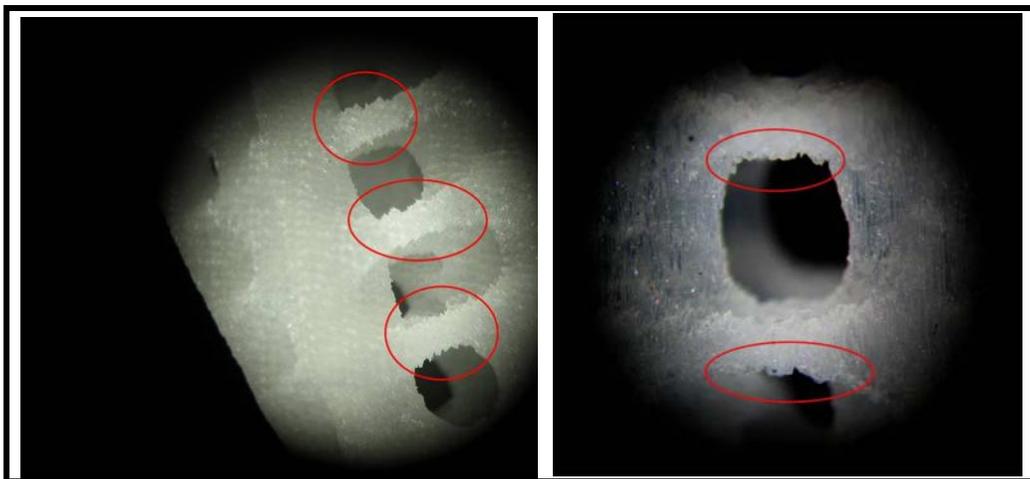


FIGURA 6.13. Detalhes de resolução de prototipagem

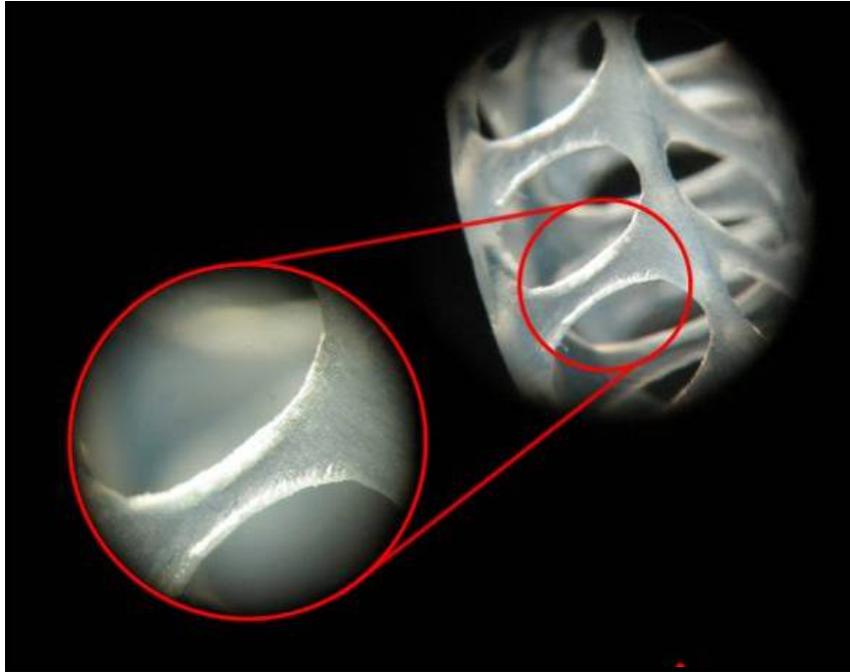


FIGURA 6.14. Detalhes de uma peça obtida através de estereolitografia

## 6.5. Defeitos identificados originados nas fundições

### 6.5.1. Árvore 1

A primeira árvore, fundida em cobre, não produziu nenhuma peça, devido a problemas encontrados com a fundição do metal propriamente, e para análise com a simulação não pode ser considerada com algum resultado significativo. Entretanto, ao observar alguns detalhes na peça em microscópio, pode ser notada uma inclusão de um material vermelho vitrificado que pode ter influenciado no resultado. Pode-se perceber que as inclusões concentraram-se bastante nas extremidades onde o fluxo de metal foi interrompido, provavelmente solidificando-se antes do metal, e impedindo assim a sua passagem. Segundo consulta com profissionais da Manoel Bernardes, indústria de jóias, e da própria BQZ, decidiu-se então realizar as fundições seguintes utilizando latão, pois foi informado que o cobre puro é realmente muito difícil de obter bons resultados, inclusive pela sua elevada temperatura de fusão, e nesse momento então foi abandonada a realização de mais testes com este metal. De qualquer forma, algumas imagens obtidas pela microscopia ótica foram feitas na intenção de esclarecer o porquê do problema, e estas inclusões, que podem ter sido originadas de alguma reação com o gesso do molde, ou impurezas do próprio metal utilizado, pela sua localização, podem ter influenciado

seriamente o resultado. Para esclarecer melhor o ocorrido, seria necessária uma análise utilizando EDS (Electron Diffraction Scanner) para levantar os elementos presentes e assim compreender o que houve realmente, mas como não é o foco do trabalho, isso será avaliado posteriormente. A figura 6.15 apresenta imagens de alguns pontos com estas características.



FIGURA 6.15. Detalhes das inclusões observadas na peça fundida em cobre

### 6.5.2. Árvore 2

A árvore 2 é na verdade a primeira das três fundições em latão. Comparadas à fundição da peça em cobre, estas apresentaram poucos defeitos estruturais, mas podem-se destacar alguns pontos onde não houve fluxo de metal, problemas provenientes de trincas e bolhas, além da questão da baixa resolução da prototipagem obtida, que repassou toda a rugosidade para o metal.

Esta peça apresentou poucos defeitos identificáveis a olho nu e mesmo na microscopia ótica. Entretanto, já foi possível verificar que a rugosidade imposta pelas peças prototipadas fez surgir problemas de inclusão de gesso que não foi totalmente removido na limpeza da peça, como mostrado na figura 6.16.

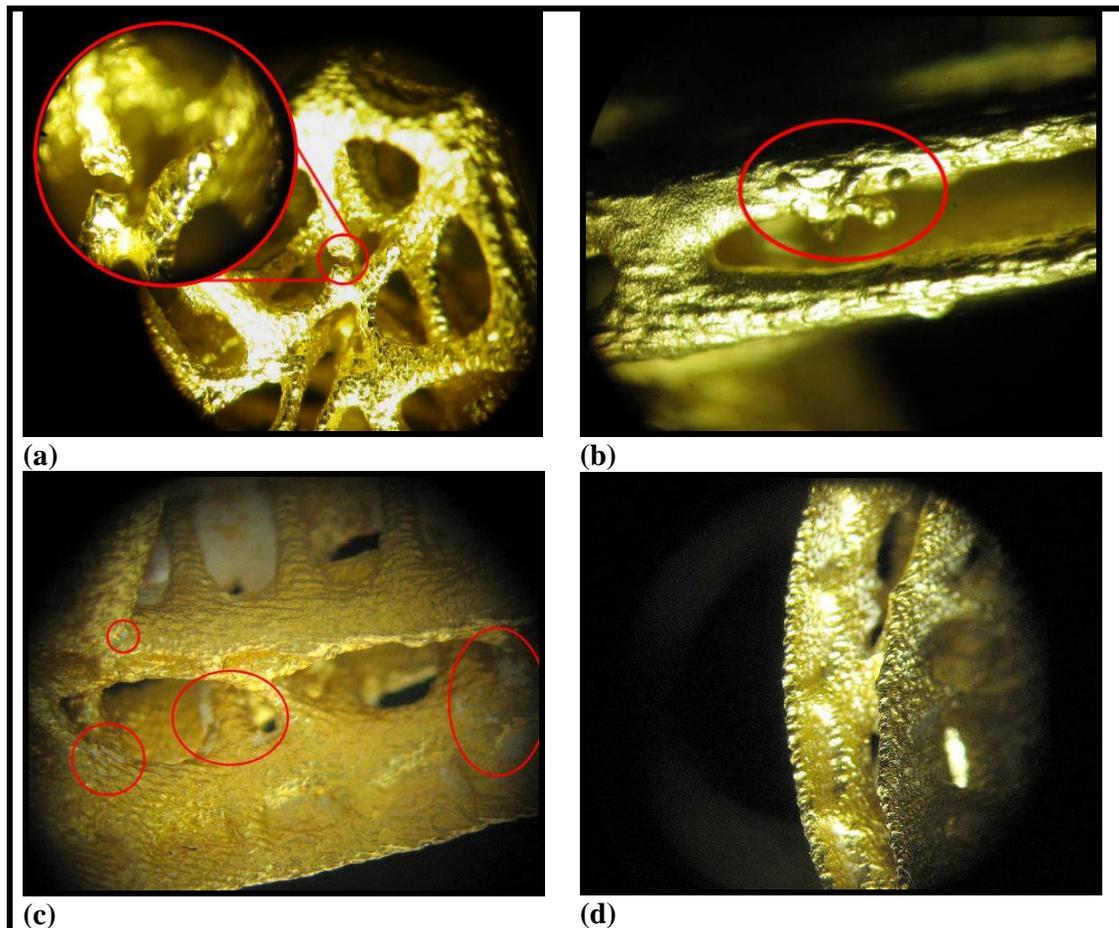


FIGURA 6.16. Detalhes de alguns defeitos observados na peça: (a) falha de preenchimento de metal; (b) bolhas provavelmente geradas a partir do aprisionamento de ar no momento da confecção do molde; (c) inclusões de gesso nos poros da peça; (d) rugosidade excessiva da peça, transferida pelo molde devido à peça original prototipada

### 6.5.3. Árvore 3

Esta peça foi a que apresentou menos problemas visíveis. Apenas o ponto mostrado na figura 6.17 foi identificado com uma falha significativa de não preenchimento de material. Comparando esta peça com as demais, nos mesmos locais onde as outras apresentaram defeitos, não foi observado mais nenhum problema.

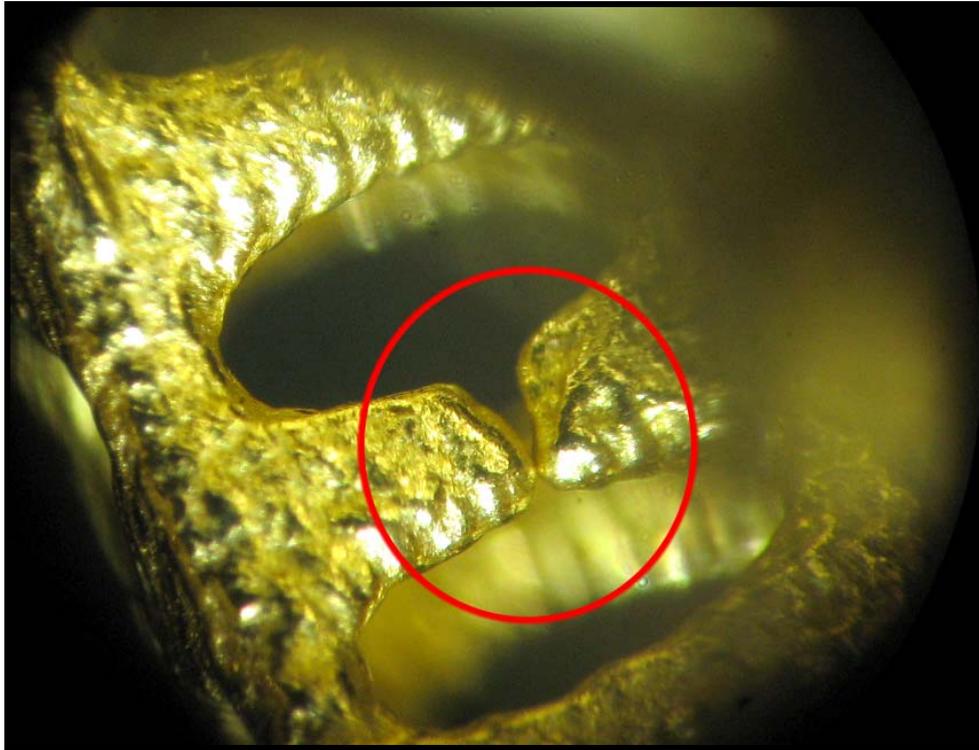


FIGURA 6.17. Detalhe de defeito por erro de preenchimento da árvore 3

#### 6.5.4. Árvore 4

A última árvore fundida foi a que apresentou um maior número de defeitos, e mais perceptíveis que as peças anteriores. O canal central da peça foi construído mais espesso (13mm) e mais curto que os das demais peças (37mm). Desse modo, pode-se observar que a pressão exercida pelo metal líquido no momento da fundição foi menor, provocando o aparecimento de mais pontos onde o fluxo foi interrompido prematuramente, como ilustrado na figura 6.18.

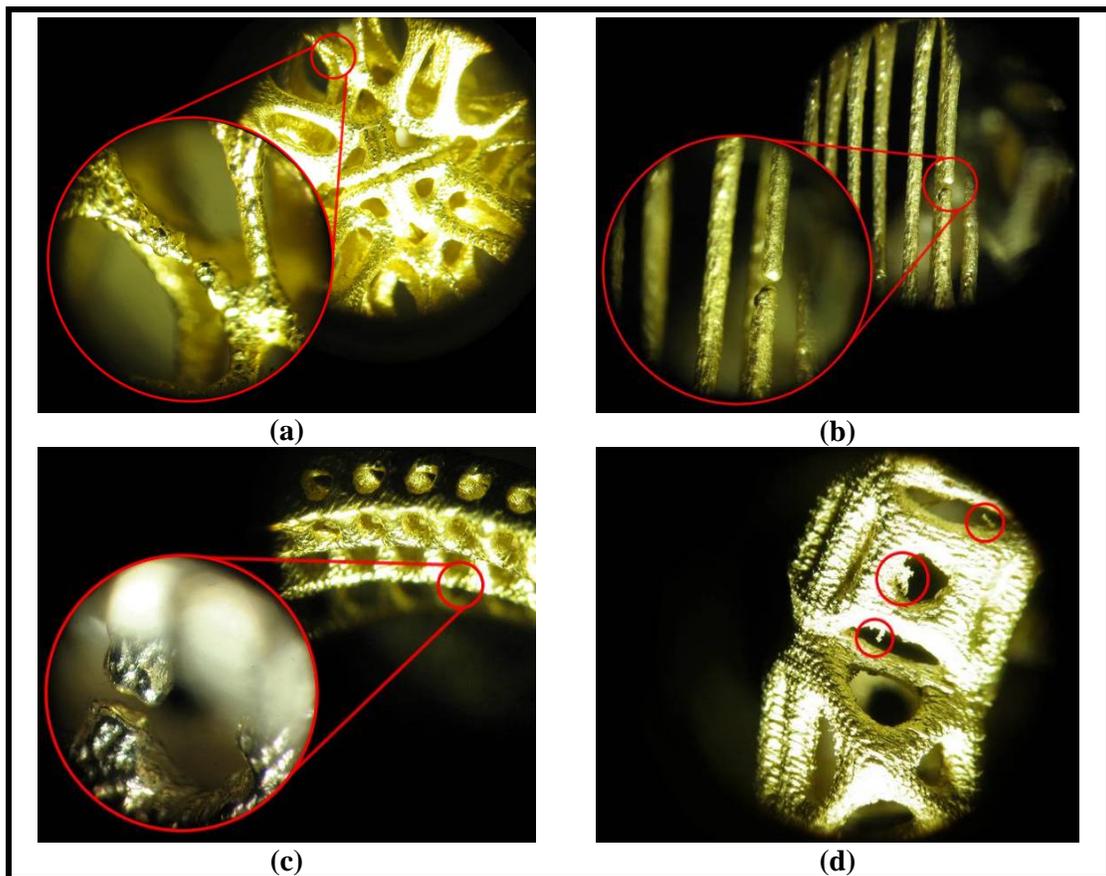


FIGURA 6.18. Detalhes de alguns defeitos observados na peça: (a), (b) e (c) falha de preenchimento de metal; (d) surgimento de “barbatanas” resultantes de trincas no molde

Ainda na figura 6.18 (b), percebe-se que esta peça foi a única que apresentou problemas em uma das partes onde havia maior probabilidade de ocorrência, um canal extremamente fino (1mm) e extenso, que não ocorreu nas outras peças. Também foi a única peça que apresentou “barbatanas” devido a trincas, possivelmente devido ao fato da espessura do canal central ser maior, e este mais curto, distribuindo de maneira menos eficiente a pressão exercida do metal sobre o molde no momento da fundição.

## 7. CONCLUSÕES

Com os dados obtidos ao longo dos experimentos deste trabalho chegou-se seguintes conclusões:

- Resolução obtida na prototipagem: como pode ser observada através das imagens de microscopia ótica, a resolução das peças prototipadas é um fator preocupante para o processo de fabricação. A rugosidade excessiva dos protótipos foi totalmente transferida para o molde, e conseqüentemente, para a fundição. Não obstante, os possíveis problemas que possam ocorrer em função do acabamento necessário das peças, conclui-se também que tal rugosidade muito provavelmente pode afetar o escoamento do metal no momento da fundição. Por questões de custos, as árvores prototipadas foram feitas em tamanho reduzido, contendo apenas três anéis em cada árvore, mas em processo industrial, podem ser confeccionadas árvores com até cinquenta ou sessenta peças, aumentando significativamente as extensões dos canais de alimentação e conseqüentemente fazer com que o metal sofra uma maior ação do atrito e resfriamento do molde;
- A confecção do molde mostrou-se como um dos pontos mais críticos, e com maior possibilidade de ocorrência de erros. Desde a inclusão até a retirada da peça fundida ao quebrar e corroer o gesso, não é possível observar o que está realmente ocorrendo dentro do molde, assim torna-se muito difícil verificar se está ocorrendo o aprisionamento de bolhas de ar nas peças, por exemplo. Também foi observada uma dificuldade para encontrar literatura específica para a fundição de peças de joalheria ou similares;
- Preparo das simulações: Houve certa dificuldade no processamento das geometrias das malhas em 3D no momento de configuração do software de simulação. As malhas originais tinham um número elevado de triângulos, que impossibilitava a pré-análise que o software precisa realizar antes de executar a simulação propriamente dita. Foi necessário reduzir o número de triângulos, simplificando a malha cerca de cinco vezes para se pudesse

executar o procedimento. Isso não implica em uma deficiência de software, mas sim uma limitação na capacidade de hardware para processar o volume excessivo de informações. Também um ponto que deve ser considerado é que, em função da redução do número de triângulos da malha, ocorre uma modificação em sua geometria, deixando algumas partes da peça mais planas do que o modelo original. Desse modo, pode-se obter um resultado diferente do real na simulação, visto que a geometria foi modificada, permitindo inclusive ocorrer a previsão de falhas pelo software que não irão ocorrer na fundição. As imagens da figura 7.1 mostram como a malha otimizada ficou com as curvas menos suaves do que a malha original que foi prototipada. Em função disso, pode ocorrer a mudança em ângulos de canais, acentuar a rugosidade da peça simulada, e até mesmo ocorrer uma espécie de “entupimento” dos canais, pois essa redução pode distorcer partes com muitos detalhes;

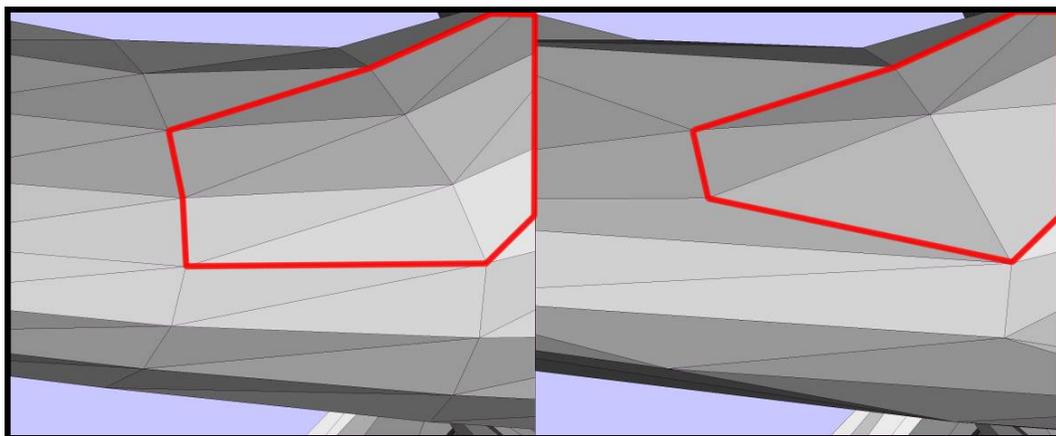


FIGURA 7.1. Detalhe da redução da malha: à esquerda, a malha original, à direita, a malha reduzida

- Fundição em cobre: o cobre mostrou-se problemático para ser trabalhado em processo de fundição convencional por cera perdida. Uma vez que o ponto de fusão do cobre encontra-se muito próximo do limiar de temperatura de trabalho do gesso, surgem novas variáveis que dificultam seriamente sua execução, como comprova-se com o resultado obtido com a peça fundida;

- Prototipagem rápida: este recurso possibilita a criação de modelos para a confecção de moldes extremamente complexos e precisos, entretanto como pôde ser observado, é necessária a cautela ao escolher a tecnologia de prototipagem utilizada, pois a resolução do modelo é repassada diretamente ao molde, fazendo assim com que todos os defeitos resultantes sejam impressos nas peças definitivas;
- Simulações: os resultados obtidos nas análises feitas pelo Magmasoft® foram satisfatórios. A previsão a cerca da parte da peça mais susceptível a erro foi precisa. Na árvore 4, o software indicou uma região que possivelmente não seria preenchida pelo metal, o que de fato aconteceu. Também previu algumas possíveis falhas onde se formariam poros, mas que na prática não ocorreram. Entretanto, o resultado da simulação apresenta os pontos onde podem ocorrer as falhas, assim é perfeitamente aceitável o resultado, uma vez que os pontos indicados foram mínimos. As regiões em cinza destacadas na figura 7.2 seriam as não preenchidas pelo metal (a); e em (b) foto da peça mostrando dois pontos localizados em região muito próxima da indicada pelo software onde não houve preenchimento total pelo metal.

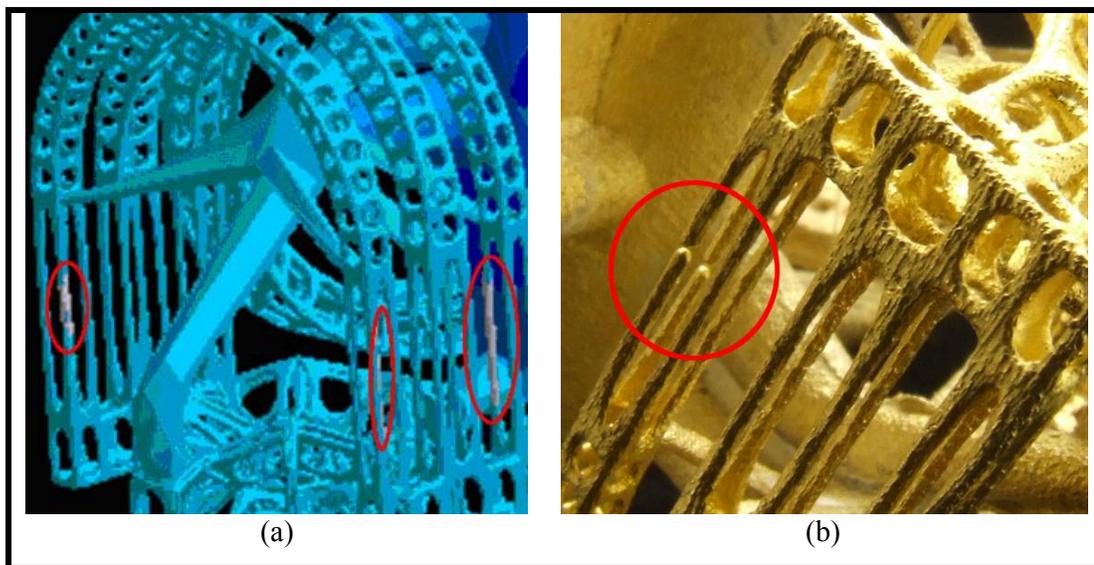


FIGURA 7.2. Detalhe de defeito da fundição previsto pelo Magmasoft®

## 7.1. Considerações Finais

Considerando os resultados obtidos, percebe-se que o *MagmaSoft*® tem capacidade de prever com uma pequena margem de erro o comportamento do metal no momento da fundição. Com base nos artigos pesquisados a respeito das potencialidades do software, e também pelo contato com os representantes do mesmo no Brasil, ficou claro que as peças propostas para os testes apresentaram uma complexidade bem maior do que as peças que geralmente são submetidas aos testes. E apesar de problemas surgidos com as limitações quanto ao hardware descritas neste trabalho, foi possível verificar que o software não só foi capaz de realizar os experimentos, mas também de chegar a resultados muito próximos dos obtidos na fundição de fato, tornando possível então que o projetista ou produtor possa prever algumas falhas como erros nos canais de alimentação das peças, dimensionamento incorreto de partes, distribuição da pressão em função da disposição das peças, e até mesmo questões como temperaturas e materiais envolvidos no processo. Além disso, o momento da fundição propriamente dito não torna possível a visualização do que ocorre dentro do molde, e o software permite assim que se tenha uma demonstração visual de como o metal irá se comportar.

É importante ressaltar que, apesar da complexidade, as árvores montadas para o projeto não traduzem de modo preciso a realidade de um processo produtivo. As árvores de fundição semelhantes para peças de joalheria, não são compostas por apenas três, mas cerca de quinze a até sessenta peças, o que mudaria drasticamente o comportamento da simulação. Entretanto, por questões de custos, as limitações de hardware descritas e até mesmo tempo, não seria possível realizar testes mais profundos para determinar o grau de precisão com o qual o software trabalha, o que pode tornar-se tema de pesquisas futuras.

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os vários problemas apontados e resultados obtidos com os testes, comprova-se que os fatores que influenciam na fundição das peças apresentadas são inúmeros, e buscar a sua solução pode contribuir em muito para a produção não só destas mesmas peças, mas para quaisquer peças produzidas através do método de cera perdida. Com os resultados obtidos e a prática adquirida na execução dos experimentos, verifica-se que alguns passos do processo podem ser analisados mais profundamente, a fim de minimizar a possibilidade de ocorrência de erros e perdas:

- Um estudo acerca da constituição do gesso utilizado no preparo do molde, para garantir melhores propriedades ao moldar-se às peças, para impressão mais refinada de detalhes, e também as questões de temperatura de trabalho especificamente para a área poderia auxiliar em melhorias significativas para a fase de produção;
- Um estudo acerca das tecnologias existentes a fim de se definir melhor padrões de caracterização, para que seja possível determinar qual é o tipo mais adequado para cada processo, pode ser uma fonte de consulta eficiente para profissionais da área de joalheria;
- As questões relativas aos erros encontrados no momento da simulação em função do grande número de triângulos presentes nas malhas podem servir como base tanto para um estudo no sentido de melhorar a capacidade de aproveitamento mais eficaz do hardware pelo software, como também um modo de simplificação da malha de maneira a não gerar distorções significativas na geometria das peças envolvidas no processo;
- Um estudo mais aprofundado acerca da precisão com a qual o software consegue prever os resultados, a fim de se determinar o grau de confiabilidade dos resultados das simulações, para que seja possível tabular até onde seria necessário uma revisão de projeto antes da peça ser realmente submetida à fundição.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, E.; CONCI, A. *Computação gráfica: teoria e prática*. Rio de Janeiro: Campus, 2003.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CAMPBELL, J. *Castings: the new metallurgy of cast metals*. 2. ed. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2003.
- CANTOR, B.(ed.); O'REILLY, K. (ed.) Solidification and casting. In: Oxford-Kobe Materials Seminar, 2., 1999, Bristol, England. Bristol: Institute of Physics Pub., 2003.
- CHOATE, S. *Creative casting: jewelry, silverware, sculpture*. New York: Crown Publishers, [1966].
- CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2. ed.. Singapore: World Scientific, 2003.
- CODINA, C. *The complete book of jewelry making: a full-color introduction to the jeweler's art*. New York: Lark Books, 2006.
- DIAMOND, L. Casting defects from model to finished product. In: Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology, 2., 1987, Santa Fe, New Mexico. *Proceedings* .... Santa Fe, Ed. Met-Chem. Research, 1987.
- EDWARDS, K. *Lost wax casting of jewelry*. Chicago: Regnery, 1975.
- GEORGIEV, G.; IVANOV, G. New interactive and automatic optimization procedures offered of the recent foundry simulation software. Disponível em: < <http://www.nts-bg.ttm.bg/journal/papers/25.pdf>.> . Acesso em 25 maio 2010.
- HA, J. *et al.* SPH, magmasoft and water analogue modellings of die filling of a servo Piston. In: Conference on CFD in the minerals and process industries. 3., 2003, Melbourne. *Proceedings* ... Melbourne: CSIRO, 2003. Disponível em: < [http://www.cfd.com.au/cfd\\_conf03/papers/043Ha.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_conf03/papers/043Ha.pdf).> Acesso em: 8 abr. 2010.
- HABASHI, F. *Alloys: preparation, properties, applications*. New York : Wiley-VCH, 1998.
- KAMRANI, A. K., NASR, E. A. *Rapid prototyping: theory and practice*. London: Springer, 2006.
- KLIAUGA, A. M.. FERRANTE, M., *Metalurgia básica para ourives e designers: do metal à jóia*. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.
- KREYSZIG, E. *Differential geometry*. Mineole: Dover Publ., 1991

- LANA, H. S. C. *Simulação e análise de processos de fundição através de software*. In: Workshop Design e Materiais (4., 2009, Ouro Preto, MG).. Ouro Preto, 2009.
- LIU, F. W. *Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development*. London: CRC Press, 2008.
- MARIOTTO, C. L.; ALBERTINI, E.; FUOCO, R. *Sistemas de enchimento e alimentação de peças fundidas*. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1987.
- MCCLOSKEY, J. C. The application of commercial investment casting principles to jewellery casting. In: Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology,2., 1987, Santa Fe, New Mexico. *Proceedings ....* Santa Fe, Ed. Met-Chem. Research, 1987.
- McREIGHT, T. *Jewelry: fundamentals of metalsmithing*. Madison : Hand Books Press, 1997.
- McGRATH, J. *The encyclopedia of jewelry-making techniques : a comprehensive visual guide to traditional and contemporary techniques*. Philadelphia : Running Press, 1995.
- OTT, D. – Metallurgical and Chemical considerations in Jewellery casting. In: Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology,2., 1987, Santa Fe, New Mexico. *Proceedings ....* Santa Fe, Ed. Met-Chem. Research, 1987.
- PACK, G. *Jewelry making by the lost wax process*. Princeton : Van Nostrand, [1968].
- ROME, R.; YOUNG, H. *Fine art metal casting: an illustrated guide to mould making and lost wax processes*. London: Robert Hale, 2003.
- SIAS, F. R. *Lost-wax casting: old, new, and inexpensive methods*. Pendleton : Woodsmere Press, 2006.
- SMALLMAN, R. E.; BISHOP, R. J. *Modern physical metallurgy and materials engineering: science, process, applications*. 6. ed. Oxford : Butterworth Heinemann, 1999.
- TEIXEIRA, M. B. S. *Novas possibilidades formais, técnicas e tecnológicas no desenvolvimento de linhas de produtos*. Relatório Técnico. Belo Horizonte, 2004. Programa Redes Cooperativas de Pesquisa do Estado de Minas Gerais. UEMG – FAPEMIG.
- UNTRACHT, O. *Jewelry concepts and technology*. New York: Doubleday, 1982.
- VERRAN, G. O.; MENDES, R. P. K. Simulação numérica de DOE aplicados na melhoria do processo de fundição sob pressão de ligas de alumínio. *Estudos Tecnológicos*, São Leopoldo, v. 2, n. 1, p. 13-25, jan./jun. 2006.
- VITIELLO, L. *Oreficeria moderna, técnica e prática*. 5. Ed. Milano : Hoepli, 1995.

<http://vmm.math.uci.edu/3D-XplorMath/Surface>

<http://www.3dsystems.com>

<http://www.magmasoft.com>

[https://wikis.nyu.edu/xdesign/mediawiki/index.php/Balfour\\_Class\\_Rings](https://wikis.nyu.edu/xdesign/mediawiki/index.php/Balfour_Class_Rings)