

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

Mariana Pohlmann de Oliveira

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE MATERIAIS, PROCESSOS E MODELOS  
UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE JOIAS EM LARGA ESCALA**

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Design  
com ênfase em Design e Tecnologia

Porto Alegre

2012

Mariana Pohlmann de Oliveira

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE MATERIAIS, PROCESSOS E MODELOS  
UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE JOIAS EM LARGA ESCALA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design como requisito para obtenção do título de Mestre em Design com ênfase em Design e Tecnologia, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Profa. Dra. Lauren da Cunha Duarte

Coorientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Porto Alegre

2012

Esta dissertação foi julgada aprovada para obtenção do título de Mestre em Design, área de concentração Materiais e Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pela Orientadora, pelo Coorientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientadora:

Profa. Dra. Lauren da Cunha Duarte  
Programa de Pós-Graduação em Design – PGDESIGN/UFRGS  
Departamento de Materiais – DEMAT/UFRGS

Coorientador:

Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior  
Programa de Pós-Graduação em Design – PGDESIGN/UFRGS  
Departamento de Materiais – DEMAT/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Juliano Tonezer da Silva  
Instituto de Ciências Exatas e Geociências – ICEG/UPF

Dr. Eng. Carlos Raimundo Frick Ferreira  
Laboratório de Fundição/Centro de Tecnologia – LAFUN/CT  
Escola de Engenharia – EEng/UFRGS

Profa. Dra. Liane Roldo  
Programa de Pós-Graduação em Design – PGDESIGN/UFRGS  
Departamento de Materiais – DEMAT/UFRGS

## AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial aos meus pais, Angela e João, aos meus avós, Anna e João Paulo, e as minhas irmãs, Carolina e Luíza, pelo apoio e dedicação incondicionais.

Aos meus orientadores, professora Lauren Duarte e professor Wilson Kindlein Jr., que me mostraram caminhos que vão além do trabalho e cujos ensinamentos levarei pra a vida toda.

A toda equipe do LdSM/UFRGS, especialmente Andrei Valins, Cristine Raseira, Lara Elena, Rodolfo Dalla Costa, Sidnei Pedrotti, Tatiana Lago e Wagner Rossi. Ao professor Fábio Pinto pelo assessoramento nas etapas de usinagem e de digitalização tridimensional.

A Rudinei Toldo, Everson Santos e Robson Coleraus, da empresa Portal Joias, e a Vera Herrmann, da empresa Antonio Bernardo, por acreditarem na pesquisa, por fornecerem informações sobre a produção de joias, bem como materiais para a realização desta pesquisa.

Aos designers de joias Mariana Cidade, Átila Ferreira e Rachel Basegio pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Juliano Tonezer, a Edmundo Ipar e a Rafael Bisinella, do CT Pedras, pela confecção dos moldes.

Ao professor Jaime Alvares Spim Jr. (*in memoriam*) por incentivar a realização desta pesquisa e por promover o estreitamento dos laços de cooperação entre a UFRGS e a Uniandes (Bogotá, Colômbia).

Ao professor Jairo Escobar, a Nohora Bustamante e a Javier Suárez, da Uniandes, por disponibilizar o modelo virtual do *hombre murciélagos* e pelas informações sobre a arqueometalurgia colombiana.

À CAPES e ao CNPq, pelos auxílios concedidos, sem os quais seria inviável a realização deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para tornar esta pesquisa possível.

## RESUMO

Tendo em vista ganhos expressivos na inovação e na competitividade, o setor joalheiro nacional busca constantemente incorporar novos recursos a fim de eliminar erros e agilizar a fabricação de modelos. Dentre as diversas tecnologias passíveis de serem empregadas na produção de joias, a usinagem CNC, é amplamente utilizada por empresas de todos os portes. A usinagem, associada à microfusão, aprimora o processo de produção de joias em larga escala, pois reduz o índice de retrabalho, de perda de material e garante maior qualidade e produtividade mantendo a expressividade formal da peça original. O presente trabalho propõe um estudo acerca das tecnologias de modelagem do setor joalheiro, dando foco aos processos de fresamento. Com o auxílio da digitalização tridimensional, foi feita uma análise comparativa das etapas envolvidas no processo de fabricação de joias. Foi possível verificar, pelos resultados obtidos, que a influência da velocidade de avanço no acabamento das peças: velocidades mais baixas resultaram em superfícies com menor rugosidade aparente e permitiram a obtenção de seções mais estreitas. Além disso, os ensaios possibilitaram a definição das velocidades adequadas para a relação produtividade versus acabamento. Foram ainda determinadas relações entre as propriedades mecânicas do material e os parâmetros testados, comprovando-se que, dentre as ceras estudadas, aquela de maior dureza (63 na escala Shore D) resulta em melhores condições de acabamento. Este trabalho indica a viabilidade de otimização do processo de fabricação de joias, pois avalia as condições de usinagem em relação ao tempo, bem como a possibilidade de redução das operações de acabamento realizadas após obtenção dos modelos por usinagem. Análises realizadas por digitalização tridimensional indicam que o principal ponto de perda dimensional é a etapa de confecção dos moldes de borracha de silicone e injeção de cera, seguido pela usinagem dos modelos. Entretanto, se esse significativo desvio resultante da produção dos moldes e da injeção for corrigido, a qualidade superficial dos modelos obtidos por usinagem CNC passa a ser fundamental. Esses processos devem, portanto, ser reavaliados, a fim de reduzir os erros gerados nas etapas intermediárias da produção de joias em larga escala.

**Palavras-chave:** fabricação de joias; usinagem CNC; digitalização tridimensional a laser.

## ABSTRACT

*Given significant gains in innovation and competitiveness, the national jewelry sector constantly seeks to incorporate new features, in order to eliminate errors and streamline the manufacturing of models. Among the various technologies that can be used to produce jewelry, CNC machining, is widely used by businesses of all sizes. Machining process associated with casting, improves the large-scale production of jewelry, because it reduces the rework rate, material loss and ensures higher quality and productivity while maintaining the formal expressiveness of the original part. This research proposes a study about modeling technologies of the jewelry industry, giving focus to milling processes. Aided by three-dimensional scanning, it was performed a comparative analysis of the involved steps in the manufacturing process of jewelry. Based on obtained results, it was possible to verify the influence of feed speed in the finishing of parts: lower feed speeds resulted in surfaces with roughness less apparent and allowed to obtain narrower sections. Moreover, the tests enabled the definition of appropriated feed speeds to the ratio productivity versus finishing. Relationship between mechanical properties and tested parameters was determined, proving that among the studied waxes, the hardest one (63 in Shore D scale) results in better finish. This study indicates the optimization feasibility of jewelry manufacturing process, once it evaluates the machining conditions in relation to time, as well as the possibility of reducing the finishing operations carried out after obtaining models by machining. Analyses performed by three-dimensional scanning indicate that the greater dimensional loss is in the steps of silicon rubber mold production and wax injection, followed by the machining process of models. However, if this significant deviation from production of molds and injection is corrected, the surface quality of models obtained by CNC machining becomes crucial. Therefore, these processes must be reevaluated in order to reduce errors generated in intermediate stages on large-scale production of jewelry.*

**Key words:** *jewelry manufacturing; CNC machining; tree-dimensional laser scanning.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Objetos de adorno utilizados pelos índios brasileiros, produzidos com penas e fibras naturais.....	18
Figura 2 – Objetos típicos da joalheria brasileira no período colonial.....	19
Figura 3 – Pulseira de prata com fios de algodão.....	20
Figura 4 – Mapa dos APLs e Polos de Joias no Brasil.....	21
Figura 5 – Gráfico da relação entre segmento e porte empresarial. ....	22
Figura 6 – Projeto de joia: desenho técnico completo.....	26
Figura 7 – Algumas ferramentas utilizadas pelo modelista.....	27
Figura 8 – Tela de software CAD que possibilita a visualização de peça modelada em várias vistas.....	28
Figura 9 – <i>Rendering</i> de peças simulando a utilização de diferentes gemas e ligas metálicas. ....	29
Figura 10 – Representação gráfica do processo e os parâmetros de usinagem. ....	30
Figura 11 – Classificação do fresamento de acordo com o sentido de corte.....	31
Figura 12 – Relação entre a tenacidade e a dureza entre os materiais aplicados em ferramenta de corte. ....	32
Figura 13 – Objeto articulado produzido por ourives pré-colombiano entre 200 d.C. e 1000 d.C.....	33
Figura 14 – Método direto em molde perdido.....	35
Figura 15 – Método indireto de molde permanente. ....	35
Figura 16 – Processo de microfusão na joalheria.....	36
Figura 17 – Representação do volume financeiro gerado pelo setor de minérios metálicos do Brasil. ....	43
Figura 18 – Cores das ligas do diagrama ternário Au-Ag-Cu. ....	44
Figura 19 – Efeito da adição gradual de cobre nas propriedades mecânicas de ligas Ag-Cu.....	45
Figura 20 – Cores do cobre e suas principais ligas. ....	46
Figura 21 – Representação gráfica do sistema de operação por Holografia Conoscópica.....	48
Figura 22 – Imagens geradas pelo <i>software</i> Geomagic Qualify, os quais apontam os erros dimensionais dos protótipos fabricados por diferentes processos. ....	49
Figura 23– Organização das etapas contempladas neste trabalho. ....	50
Figura 24 – Ceras para modelagem utilizadas pela indústria joalheira. ....	51

Figura 25 – Sistema de usinagem CNC e digitalização tridimensional Digimill 3D, LdSM/UFRGS. ....	52
Figura 26 – Fresa cônica de 0,2 mm utilizada. ....	53
Figura 27 – Padrão geométrico usinado e, em destaque, seção representativa da peça onde são apontados os aspectos analisados. ....	54
Figura 28 – Equipamento de microscopia estereoscópica utilizado para aquisição das imagens das amostras. ....	54
Figura 29 – Modelos utilizados para avaliação dos processos de prototipagem em estudo. ....	55
Figura 30 – Fresa de topo esférico de 1,5 mm utilizada. ....	55
Figura 31 – Diferença de espessuras no <i>hombre murciélag</i> (unidades em mm). ....	56
Figura 32 – Fresa de topo reto 6 mm utilizada. ....	56
Figura 33 – Métodos de fixação dos blocos de cera utilizados para usinagem do modelo do <i>hombre murciélag</i> . ....	57
Figura 34 – Fixação dos blocos de cera para usinagem da medalha. ....	57
Figura 35 – Fase inicial do processo de microfusão. ....	58
Figura 36 – Ciclo de calcinação aplicado para completa cura do material cerâmico. ....	59
Figura 37 – Fase final do processo de microfusão. ....	59
Figura 38 – Processo de acabamento das peças após retirá-las da árvore de modelos. ....	60
Figura 39 – Processo de obtenção do molde de silicone. ....	60
Figura 40 – Processo de injeção de cera nos moldes de borracha de silicone. ....	61
Figura 41 – Montagem da árvore de modelos com peças de cera para injeção. ....	61
Figura 42 – Digitalização dos modelos, recobertos pelo pó revelador, com o escâner Digimill 3D, LdSM/UFRGS. ....	63
Figura 43 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera azul. ....	65
Figura 44 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera roxa. ....	66
Figura 45 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera verde. ....	67
Figura 46 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera <i>gold</i> . ....	67
Figura 47 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera <i>wizard</i> . ....	68
Figura 48 – Simulação de usinagens com diferentes ajustes de penetração de trabalho ( $a_e$ ). ....	71
Figura 49 – Influência do sentido de corte nas amostras de cera para modelagem. ....	71
Figura 50 – Resultados obtidos a partir de diferentes maneiras de fixação das amostras. ....	72



Figura 51 – Cavaco aderido à peça: nas regiões em destaque, observa-se o material na região da cabeça do <i>hombre murciélago</i> . .....	73
Figura 52 – Processo de limpeza manual dos modelos. ....	74
Figura 53 – Modelos produzidos pela usinagem CNC de cera para modelagem.....	74
Figura 54 – Peças piloto produzidas em latão pelo processo de microfusão. ....	75
Figura 55 – Avaliação dos resultados da obtenção das peças piloto quanto ao acabamento superficial. ....	76
Figura 56 – Peças piloto em estado bruto e após receber polimento.....	76
Figura 57 – Bolhas na superfície do modelo do <i>hombre murciélago</i> .....	77
Figura 58 – Peças finais produzidas em latão.....	78
Figura 59 – Análise dimensional da usinagem CNC dos modelos do <i>hombre Murciélago</i> .....	79
Figura 60 – Análise dimensional da usinagem CNC dos modelos da medalha. ....	80
Figura 61 – Análise dimensional da microfusão das peças piloto do modelo do <i>hombre murciélago</i> . ....	81
Figura 62 – Análise dimensional da microfusão das peças piloto do modelo da medalha. ....	82
Figura 63 – Sobreposição virtual mostrando a diminuição do tamanho das peças. ....	83
Figura 64 – Análise dimensional da injeção de cera para obtenção dos modelos do <i>hombre murciélago</i> .....	84
Figura 65 – Análise dimensional da injeção de cera para obtenção dos modelos da medalha.....	85
Figura 66 – Análise dimensional das peças finais do <i>hombre murciélago</i> obtidas por microfusão. ....	86
Figura 67 – Análise dimensional da microfusão para obtenção das peças finais da medalha.....	87
Figura 68 – Erros dimensionais ocorridos em função dos processos de produção dos modelos do <i>hombre murciélago</i> e da medalha. ....	89

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Indicação dos melhores e piores acabamentos obtidos com a variação da velocidade de avanço na usinagem de ceras para modelagem de joias.....	69
Quadro 2 – Indicação dos melhores acabamentos obtidos para cada velocidade de avanço ensaiada. ....	69
Quadro 3 – Indicação dos melhores acabamentos obtidos na usinagem das ceras disponíveis no Brasil. ....	70
Quadro 4 – Resultado dos cortes gerados nas ceras para modelagem em diferentes velocidades de avanço. Em destaque os melhores resultados. ....	100
Tabela 1 – Comparação entre os processos de preenchimento do molde. ....	38
Tabela 2 – Comparação entre os sistemas de digitalização tridimensional sem contato e as respectivas precisões. ....	48
Tabela 3 – Especificações das ceras para modelagem. ....	51
Tabela 4 – Velocidades de avanço ensaiadas nas ceras.....	53
Tabela 5 – Características de Lentes Optimet (em mm) passíveis de serem utilizadas em equipamento de digitalização tridimensional a laser (LdSM/UFRGS). ....	62
Tabela 6 – Temperaturas registradas por termômetro infravermelho durante as operações de usinagem das amostras previamente aquecidas e resfriadas. ....	64
Tabela 7 – Valores médios e desvios padrões das diferenças captadas pela digitalização tridimensional em cada etapa da produção dos modelos do <i>hombre murciélagó</i> (unidades em mm). ....	88
Tabela 8 – Valores médios e desvios padrões das diferenças captadas pela digitalização tridimensional em cada etapa da produção dos modelos da medalha (unidades em mm).. ....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>a<sub>e</sub></b>	Penetração de trabalho (em mm)
<b>AFS</b>	<i>American Foundry Society</i>
<b>a<sub>p</sub></b>	Profundidade de corte (em mm)
<b>APL</b>	Arranjo Produtivo Local
<b>CAD</b>	Projeto Assistido por Computador (do inglês, <i>Computer Aided Design</i> )
<b>CAE</b>	Engenharia Assistida por Computador (do inglês, <i>Computer Aided Engineering</i> )
<b>CAM</b>	Manufatura Assistida por Computador (do inglês, <i>Computer Aided Manufacturing</i> )
<b>CBN</b>	Nitreto de Boro Cúbico
<b>CCD</b>	Dispositivo de Carga Acoplada (do inglês, <i>Charge-Coupled Device</i> )
<b>CERMET</b>	Cerâmica mista (a sigla deriva da aglutinação das palavras “cerâmica” e “metal”)
<b>CNC</b>	Comando Numérico Computadorizado
<b>CT Pedras</b>	Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul
<b>EVA</b>	Etileno-Acetato de Vinila (do inglês, <i>Ethylene-Vinyl Acetate</i> )
<b>FIESP</b>	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
<b>FINEP</b>	Financiadora de Estudos e Projetos
<b>FNDCT</b>	Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
<b>IBGM</b>	Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos
<b>k</b>	Quilate (do inglês, <i>Karat</i> )
<b>kgf</b>	Quilograma-força

<b>kW</b>	Quilowatt
<b>LAFUN</b>	Laboratório de Fundição
<b>LdSM</b>	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
<b>MDIC</b>	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
<b>min</b>	Minutos
<b>n</b>	Velocidade de Rotação (em rpm)
<b>PCD</b>	Diamante policristalino
<b>rpm</b>	rotações por minuto
<b>SEBRAE</b>	Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
<b>UFRGS</b>	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
<b>Uniandes</b>	Universidad de los Andes
<b>V<sub>f</sub></b>	Velocidade de Avanço (em mm/min)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Proposta da Pesquisa .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 Objetivo.....</b>	<b>17</b>
1.2.1 Objetivos Específicos.....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Breve histórico da produção de joias no Brasil.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Panorama do setor joalheiro no Brasil.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 O designer no setor joalheiro .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 A modelagem no setor joalheiro .....</b>	<b>24</b>
2.4.1 Modelagem manual.....	25
2.4.2 Os sistemas de modelagem tridimensional CAD/CAM.....	28
<b>2.5 Usinagem CNC .....</b>	<b>30</b>
<b>2.6 A fundição como processo de obtenção das peças finais .....</b>	<b>33</b>
2.6.1 Microfusão ou cera perdida.....	34
2.6.2 Deceragem.....	37
2.6.3 Vazamento.....	37
<b>2.7 Materiais utilizados na obtenção de modelos .....</b>	<b>38</b>
2.7.1 As ceras para modelagem.....	38
2.7.2 As ceras para fundição .....	39
<b>2.8 Materiais utilizados para obtenção de moldes.....</b>	<b>39</b>
2.8.1 Massa Refratária.....	40
2.8.2 Borracha .....	40
<b>2.9 Ligas metálicas para obtenção do produto final .....</b>	<b>41</b>
2.9.1 O ouro e suas ligas .....	42
2.9.2 A prata e sua utilização com o cobre .....	44
2.9.3 O cobre e a indústria de folheados .....	46
<b>2.10 A digitalização tridimensional como método comparativo .....</b>	<b>47</b>

<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Ceras para modelagem .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2 Obtenção de modelos via usinagem CNC .....</b>	<b>52</b>
3.2.1 Ensaios preliminares .....	52
3.2.2 Execução dos modelos .....	55
3.2.2.1 <i>Hombre murciélagos</i> .....	56
3.2.2.2 Medalha.....	57
<b>3.3 Obtenção de peças piloto via microfusão.....</b>	<b>58</b>
<b>3.4 Obtenção de modelos via injeção de cera.....</b>	<b>60</b>
<b>3.5 Obtenção das peças finais via microfusão.....</b>	<b>62</b>
<b>3.6 Análise dimensional .....</b>	<b>62</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>4.1 Obtenção de modelos via usinagem CNC .....</b>	<b>64</b>
4.1.1 Ensaios preliminares .....	64
4.1.2 Execução dos modelos .....	70
<b>4.2 Obtenção de peças piloto via microfusão.....</b>	<b>75</b>
<b>4.3 Obtenção de modelos via injeção de cera.....</b>	<b>77</b>
<b>4.4 Obtenção das peças finais via microfusão.....</b>	<b>78</b>
<b>4.5 Análise dimensional .....</b>	<b>78</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>99</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria joalheira nacional teve início na segunda metade da década de 1940 com empresas especializadas em mineração, lapidação e comércio de gemas brasileiras. Ourives, lapidários e cravadores de gemas brasileiros copiavam e adaptavam o design das joias europeias e norte-americanas. No final dos anos 50, oficinas de ourivesaria se transformaram em fábricas e novos joalheiros se tornaram destaque nos principais centros urbanos do país. Com o desenvolvimento industrial brasileiro, o setor joalheiro passou a ter identidade própria manifestada em seu design. Nesta época, a mecanização da produção era ainda incipiente e a produção em série era garantida pela divisão do trabalho entre artesãos (IBGM, 2005).

O crescimento do consumo interno no país e o incentivo de importação de equipamentos, nos anos 90, favoreceram o desenvolvimento e a diversificação da produção da indústria joalheira, bem como a criação de novas fábricas. Os designers de joias, nesta mesma época, passaram a competir em concursos internacionais, atentos à possibilidade de despertar atenção para um produto marcado por referências culturais brasileiras. Tornou-se um grande desafio ao designer de joias a elaboração de produtos resultantes de um processo industrial (COSTA e SILVA, 2008).

O desenvolvimento tecnológico impulsiona a criação de novas possibilidades nas áreas de fabricação de produtos. Mesmo não utilizando todos os recursos tecnológicos disponíveis em nível mundial, é esperada a inserção da indústria joalheira nacional neste ambiente atualizado, estando mais capacitada a concorrer no mercado internacional (WINKLER, 2008).

Para melhorar e tornar mais ágil o processo de construção e detalhamento de peças, o setor joalheiro nacional vem incorporando novos recursos. É importante ressaltar que o uso dessas tecnologias deve ter um caráter complementar às atividades de concepção e fabricação tradicionais para que o projeto se torne inovador, uma vez que ocorre principalmente pela interferência humana direta no ato de criação (SANTOS *et. al.*, 2003).

Ferramentas de apoio ao saber tradicional, como *softwares* de modelagem tridimensional, vêm sendo difundidos entre os profissionais do setor joalheiro (SANTOS *et. al.*, 2003; BENZ, 2009). Além disso, para tornar a tecnologia mais acessível aos pequenos empresários, melhorias técnicas, como a criação de dispositivos menores e mais baratos, estão sendo feitas nos equipamentos de usinagem e prototipagem rápida para a obtenção de modelos (BENZ, 2009).

Nesta pesquisa, a obtenção destes modelos foi realizada por meio da usinagem CNC. Esse processo confere às peças, através da remoção do material, formas, dimensões, acabamento, ou até mesmo uma combinação desses três itens (FERRARESI, 1998). Na usinagem, um dos processos mais utilizados é o fresamento, o qual remove o material através de uma ferramenta giratória com múltiplos gumes cortantes (SILVA, 2006).

Para a obtenção das peças finais, o processo de microfusão (ou fundição por cera perdida) ainda é considerada mais adequada, pois possibilita total liberdade de forma na construção da matriz. Além disso, a associação desses processos possibilita a otimização da produção de joias em larga escala, já que reduz o índice de retrabalho, de perda de material e garante maior qualidade e produtividade mantendo a expressividade formal da peça original (RICK, 2006; REBELLO, 2007; GIULIANO, 2008).

Outro recurso tecnológico passível de ser utilizado para o aperfeiçoamento da produção é a digitalização tridimensional. Desde seu surgimento, nos anos 1980, essa tecnologia vem evoluindo constantemente, permitindo aplicações antes inimagináveis devido a sua associação com outros processos (FONSECA, 2006). Na presente pesquisa, este recurso será utilizado como método para comparação entre as etapas da produção de peças metálicas.

Posto este cenário, esta pesquisa se justifica, uma vez que investiga acerca dos materiais, das técnicas e da qualidade envolvidos no processo de fabricação de joias em larga escala. Para maior compreensão do tema, foram abordados, no Referencial Teórico, conceitos que abrangem o setor joalheiro no Brasil, sistemas para modelagem de peças, bem como sobre os processos empregados na confecção de joias. Nos Materiais e Métodos foram detalhados os procedimentos experimentais, incluindo os materiais e os métodos de validação utilizados para a realização desta pesquisa. No capítulo de Resultados e Discussão foram expostos os modelos produzidos por fresamento e as imagens geradas pela digitalização



tridimensional que possibilitaram o estudo das etapas de fabricação de joias. Por fim, as Conclusões foram discutidas com base nos resultados obtidos e nas perspectivas de prosseguimento desta pesquisa.

## **1.1 Proposta da Pesquisa**

O presente trabalho propõe uma contribuição ao estudo dos materiais e dos processos empregados na confecção de joias, dando foco a obtenção de modelos por fresamento. Com o auxílio da tecnologia da digitalização tridimensional, será feita uma análise comparativa das etapas envolvidas na fabricação de joias em larga escala.

## **1.2 Objetivo**

Avaliar, visando à fabricação em larga escala de joias, as características de acabamento e de precisão de peças obtidas pelos processos de fresamento por meio da digitalização tridimensional a laser.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- Verificar a qualidade superficial obtida em função da variação de parâmetros de usinagem CNC em diferentes tipos de ceras utilizadas para modelagem que estão disponíveis comercialmente;
- Avaliar os processos envolvidos na fabricação de joias em larga escala por meio da digitalização tridimensional a laser, a fim de mapear a produção apontando os pontos de perda de resolução das peças e indicando os processos que necessitam estudo aprofundado.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Breve histórico da produção de joias no Brasil

Para a Europa, a descoberta das Américas, no final do século XV, favoreceu, além da significativa expansão das fronteiras geográficas, o aumento das riquezas materiais e do universo cultural. Os portugueses, quando chegaram ao Brasil, encontraram povos autóctones<sup>1</sup> cuja sociedade se estabelecia em uma organização tribal com caçadores, coletores e agricultores nômades. As diferentes tribos eram identificáveis pelos objetos e adornos usados em rituais e cerimônias (GOLA, 2008).

Apesar de serem considerados valiosos pelos índios, foi grande a desilusão dos portugueses ao perceberem que os objetos de adorno eram produzidos com penas (Figura 1), ossos, dentes, conchas e rochas, pois nada disso indicava o conhecimento de jazidas de metais preciosos (GOLA, 2008).

Figura 1 – Objetos de adorno utilizados pelos índios brasileiros, produzidos com penas e fibras naturais.



(a) cocar, tribo bororó; (b) par de brincos, tribo carajás, (c) colar, tribo kaapor.

Modificado de GOLA (2008).

Jazidas de ouro foram descobertas somente no final do século XVI, impulsionando o crescimento de vilas e cidades no interior do Brasil. Com as expedições das Bandeiras ao sertão, em 1699, 514 kg de ouro encontrados no Rio das Velhas, Minas Gerais, foram enviados a Portugal, dando início ao Ciclo do Ouro no Brasil (MAGTAZ, 2008).

<sup>1</sup> A palavra *autóctone* refere-se aquele que é natural de um país; ao habitante primitivo de uma terra (LUFT, 1984).

Foi percebido, então, um vertiginoso crescimento da joalheria brasileira: a capital da Colônia, no início do século XVII, contava com cinco ou sete ourives; no final deste mesmo século, já eram registrados trabalhos de 25 profissionais diferentes. Joalheiros e lapidários acompanharam a vinda da Corte Portuguesa, em 1808, contribuindo para o desenvolvimento do comércio de joias no Brasil. Por mais de cem anos, o mercado joalheiro nacional foi representado por 50% de ourives luso-brasileiros. Com a chegada de joalheiros franceses, ingleses e alemães, essa representação caiu para cerca de 10% (GOLA, 2008; MAGTAZ, 2008).

No período colonial, as joias produzidas eram utilizadas por abastados senhores de engenhos, burgueses enriquecidos e para adornar imagens de santos em procissões religiosas. Durante muito tempo, a joalheria brasileira foi cópia do que se criava na Europa (GOLA, 2008). Quando a ourivesaria no Brasil se viu servida de artesãos cujas raízes mergulhavam em outras culturas, como a negra e a indígena, a cópia deixou de ser uma prática constante. As novas criações inspiravam-se em objetos típicos da joalheria local (Figura 2): balangandãs, cuias e bombas de chimarrão, cabos de rebenque, estribos, sinete, cabos de facas ou punhais (GOLA, 2008; MAGTAZ, 2008).

Figura 2 – Objetos típicos da joalheria brasileira no período colonial.



(a) penca de prata com berloques; (b) estribo sapata, em prata; (c) sinete, em prata; (d) faca, em ouro e prata.

Modificado de GOLA (2008).

Segundo Magtaz (2008), a partir da segunda metade do século XX, rompendo com o padrão tradicional europeu, a joia passa a traduzir o estilo e a ousadia de seu criador, modificando o conceito da joia brasileira. Nas décadas de 1970 e 1980, os designers exprimiam seu traço criativo com novas ideias, novos conceitos e novos materiais (Figura 3).

Figura 3 – Pulseira de prata com fios de algodão.



Fonte: Magtaz (2008).

Segundo o IBGM (2005), enquanto o ouro prosperava como opção de investimento, no final dos anos 1980, as incertezas políticas e econômicas prejudicaram o consumo de joias nacional e internacionalmente. Somente na década de 1990, com o crescimento do consumo interno no país e com o incentivo de importação de equipamentos, a indústria joalheira brasileira se desenvolveu e diversificou a produção com a criação de novas fábricas.

Nesta época, a rápida abertura econômica expôs a indústria joalheira nacional à concorrência externa. Como consequência, além do rápido reposicionamento dos joalheiros nacionais para aumentar sua competitividade, houve uma grande invasão de joias importadas e/ou contrabandeadas elevando substancialmente o consumo da população (IBGM, 2005).

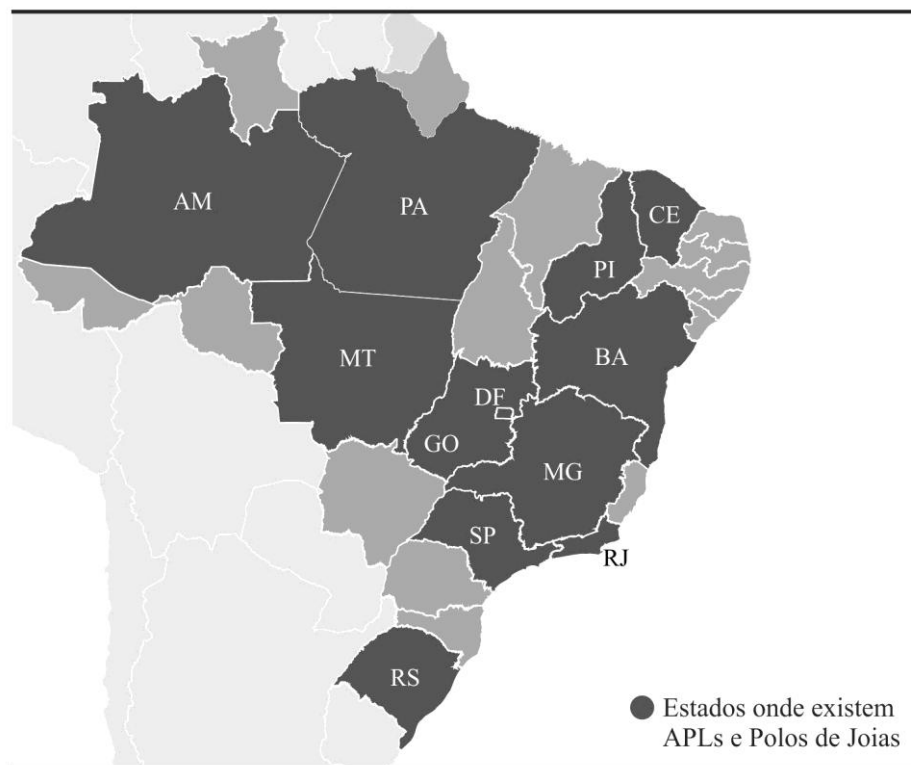
## **2.2 Panorama do setor joalheiro no Brasil**

Com o intuito de mobilizar esforços entre empresários, acadêmicos e trabalhadores, em 2004, foi fundado, em uma parceria entre o Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM) e o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), o Fórum de Competitividade da Cadeia Produtiva de Gemas, Joias e Afins. Essa organização visa desenvolver e aperfeiçoar políticas, diretrizes e ações que resultem na melhoria dos padrões de competitividade através da geração de empregos, do desenvolvimento regional, do aumento das exportações e da melhoria da capacitação tecnológica das empresas.

Além da criação de novas empresas, de incentivos à exportação, da promoção de pesquisas acerca da indústria e do comércio de joias, outro fato importante para o setor joalheiro nacional foi a incorporação do modelo de Arranjo Produtivo Local (APL), que levou incentivo a pequenas regiões de produtores de joias em todo país. Numa ação da Federação das Indústrias de São Paulo (FIESP) e do Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas de São Paulo (SEBRAE-SP), foram lançados os primeiros polos/APLs de Gemas e Joias em São José do Rio Preto, em 2002, e em Limeira, em 2003 (BENZ, 2009). O último levantamento realizado pelo IBGM, em 2005, aponta mais de 20 polos e APLs, já formados ou em processo de formação, em 11 estados brasileiros (Figura 4).

No estado do Rio Grande do Sul, este arranjo contou com o apoio do Fundo Nacional de Desenvolvimento de Ciência e Tecnologia (FNDCT/FINEP) e teve início em 2004. O objetivo global do Programa, especificamente no RS, é o aumento da competitividade do setor de gemas e joias abrangendo a pesquisa mineral, a lavra, o beneficiamento e a industrialização. Como estratégia para execução do APL, a infraestrutura de universidades vem sendo utilizada para apoio tecnológico (IBGM, 2005).

Figura 4 – Mapa dos APLs e Polos de Joias no Brasil.



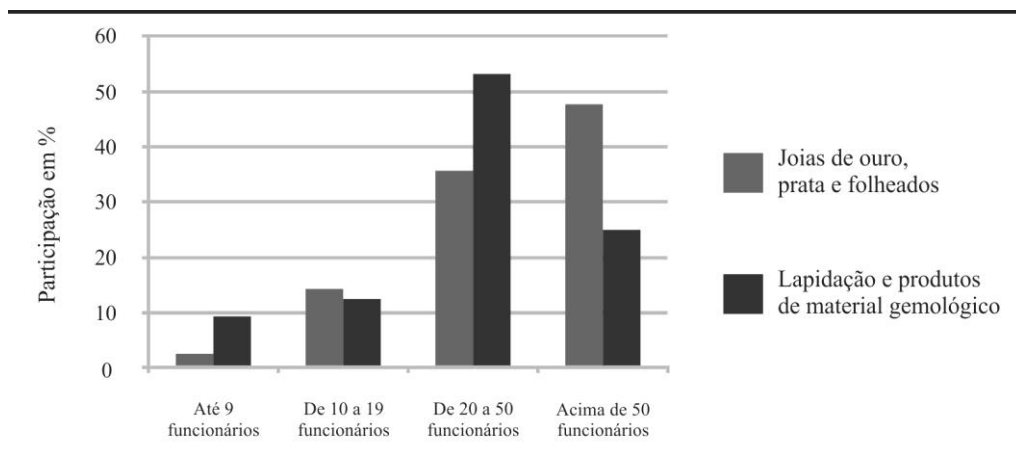
Modificado de IBGM (2005).

Abrigando mais de 180 empresas de diferentes portes, Soledade é a cidade polo do RS. O município destaca-se pela industrialização, comercialização e exportação de gemas, mas atua, também, na lapidação de materiais gemológicos. A Governança do APL no estado é composta por mais de 10 entidades entre associações, sindicatos e órgãos públicos, como a Universidade de Passo Fundo (UPF) e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Prefeitura Municipal de Soledade (AGDI, 2012).

Conforme dados do IBGM (2008), o Parque Industrial brasileiro apresenta grande diversidade. Empresas de lapidação, de joalheria, de folheados e de artefatos de material gemológico localizam-se, principalmente, em São Paulo, no Rio Grande do Sul, em Minas Gerais e no Rio de Janeiro.

Ainda segundo dados apurados pelo IBGM (2005), o setor joalheiro é constituído, basicamente, por micro e pequenas empresas (até 50 funcionários), as quais somam 52,4%. A participação de empresas de menor porte no segmento de lapidação e confecção de artefatos com material gemológico é de 75% (Figura 5).

Figura 5 – Gráfico da relação entre segmento e porte empresarial.



Modificado de IBGM (2005).

Acerca da produção de joias, a grande maioria das empresas do setor terceiriza alguma etapa do processo produtivo. Aquelas responsáveis pela manufatura de joias e folheados apresentam-se relativamente atualizadas no que diz respeito a equipamentos. Entretanto, ainda é considerado um agravante a falta de mão de obra especializada. Com essas informações, é possível constatar que há investimento na aquisição de maquinário, mas não há investimento na capacitação de funcionários para utilizá-lo (IBGM 2005).

O Fórum de Competitividade da Cadeia Produtiva de Gemas e Joias ainda identificou os seguintes gargalos no segmento joalheiro: (a) inadequação tributária; (b) insuficiente capacidade de gestão; (c) deficiência no processo produtivo; e (d) inadequação tecnológica. De acordo com o IBGM (2005), diferentes processos de produção vêm sendo utilizados com distintos graus de eficiência, a qual depende da boa ou má utilização da tecnologia disponível, do maquinário e das ferramentas empregadas. E para atingir níveis internacionais de competitividade, matérias-primas e insumos de melhor qualidade – tais como pré-ligas, refratários, ceras, borrachas e silicones – precisam ser amplamente utilizados pela indústria joalheira nacional.

### **2.3 O designer no setor joalheiro**

O setor joalheiro – principalmente empresas de pequeno porte, que, de uma maneira geral, apresentam falta de qualificação técnica e profissional – necessita de uma estratégia eficaz para responder prontamente aos problemas e à dinâmica do mercado. No Brasil, são vistos tanto o modo de produção artesanal quanto o industrial nos segmentos de joias com materiais nobres, de joias folheadas e de bijuterias (REBELLO, 2007).

O design vem se mostrando uma excelente ferramenta de competitividade às empresas de todos os setores (RICK, 2006). Além de ser o profissional responsável pela criação enquanto arte, o designer é, atualmente, o responsável pela criação considerando o posicionamento da joia, enquanto produto, e as relações com o usuário, enquanto consumidor. No que tange a fabricação de joias em larga escala, o designer deve conhecer todo o processo envolvido na produção das peças: ourivesaria, cravação, gravação, esmaltação e polimento. Noções de gemologia e de metalurgia também são importantes. Desta forma o profissional tem subsídios para um efetivo trabalho de criação e detalhamento das peças. Na concepção de joias, o designer trabalha sob grande demanda de fluxo criativo. Para supri-lo, o conhecimento acerca de práticas específicas torna-se imprescindível. O treinamento de técnicas de desenho artístico e de criatividade propicia maior fluência no desenvolvimento das ideias criativas (REBELLO, 2007).

A demanda por peças com estilo e personalidade vem crescendo vertiginosamente no mercado. Para Costa (2008) o designer deve reconhecer os parâmetros específicos de cada

segmento para direcionar o desenvolvimento da peça. Além disso, a oferta padronizada e em grande quantidade – no caso da produção industrial – exige constante renovação de peças capazes de satisfazer essa necessidade por novidade.

A indústria, de uma maneira geral, necessita de profissionais com habilidade e talento para a criação de novos produtos, mas também que correspondam às solicitações do mercado. Por isso, novas tecnologias de desenho e modelagem digitais vêm sendo incorporadas como ferramentas de auxílio por designers e empresas com o intuito de racionalizar a produção e de reduzir os custos finais da peça. Programas de modelagem tridimensional, que permitem a rápida manufatura de modelos, reduzem o tempo e melhoram a qualidade das peças reproduzidas (COSTA, 2008).

#### **2.4 A modelagem no setor joalheiro**

Modelos e protótipos são utilizados desde a Antiguidade, quando a humanidade confeccionava armas e ferramentas. Por tentativa e erro, esses artefatos eram produzidos e testados no uso e, se não atendiam às necessidades, eram aprimorados ou substituídos (FONSECA, 2006; CARVALHO e VOLPATO, 2007).

Os protótipos são a primeira versão concreta de produtos idealizados. Conforme Chua *et. al.* (2003), dentre as finalidades para as quais a produção de protótipos está voltada, pode-se citar: a experimentação e a aprendizagem (possibilidade de melhoria no projeto); ensaios e apresentação (avaliação de esforços de utilização e funcionamento); comunicação e interação (estimulação da sinergia entre equipes de desenvolvimento, produção, divulgação e venda do produto); e demarcação das etapas de desenvolvimento e/ou criação (chamados comumente de *milestones*, permitem o estabelecimento/acompanhamento de metas tangíveis). A modelagem e a prototipagem passaram por notáveis evoluções. Na fase atual, a modelagem de sólidos é feita tridimensionalmente em computadores e tem como fonte o desenho em CAD. A prototipagem é realizada em equipamentos especiais e este processo faz uso de sistemas CAM (FONSECA, 2006).

Para obtenção de um modelo, podem ser utilizadas diferentes técnicas de construção e uma ampla gama de materiais. De maneira geral, os modelos podem ser classificados como



perdidos ou permanentes, e a escolha do processo a ser empregado se dá em função da geometria da peça e o número de réplicas a serem obtidas (FERREIRA, 1999). Os modelos perdidos são destruídos quando removidos do interior do molde e os materiais mais comumente utilizados são a argila, a massa plástica, cera e poliestireno expandido (comercialmente conhecido como isopor). Já os permanentes, são construídos em materiais que resistam aos processos de moldagem sem se deformar. Para este fim, usualmente esses materiais são madeira, ligas metálicas, gesso e resinas sintéticas (GIULIANO, 2008).

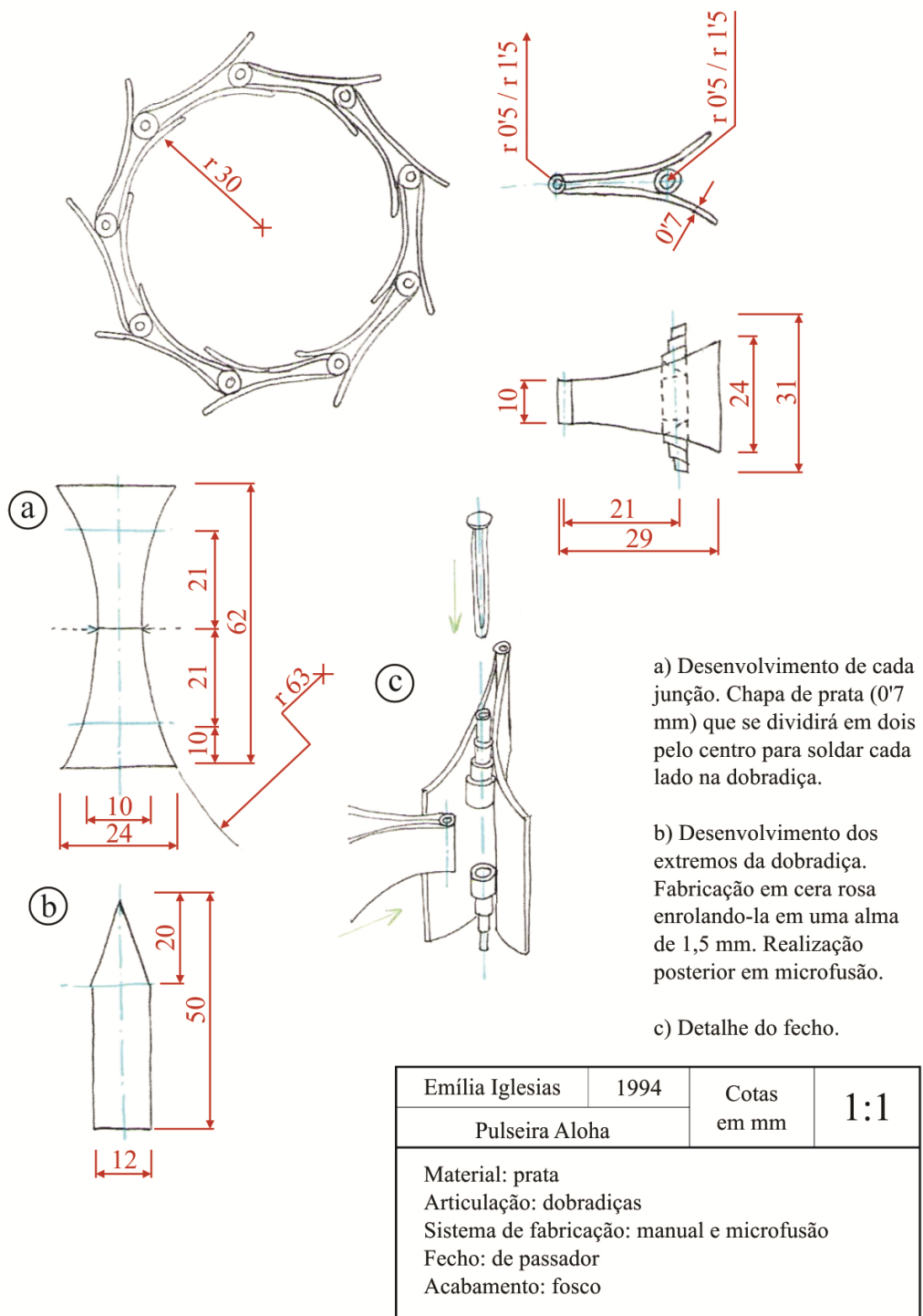
Atualmente, é possível projetar o modelo em programas computacionais e, a partir do arquivo gerado, as formas são materializadas por meio de equipamentos de prototipagem. O acabamento da peça depende da qualidade do modelo, pois defeitos existentes serão copiados e reproduzidos (GIULIANO, 2008).

#### **2.4.1 Modelagem manual**

Parte da história da joalheria no Brasil é marcada pela produção artesanal, na qual todas as etapas do desenvolvimento de um produto estão sob a tutela de um mesmo profissional (COSTA, 2008). Enquanto que na Itália, por exemplo, o artesão é respeitado por sua maestria no domínio de uma técnica, no Brasil o conceito de artesanato referencia a criação de objetos de menor valor (BO BARDI, 1994). Na joalheria artesanal, o produto não é necessariamente reconhecido como artesanato, mas sim, *artesanaria*, conceito em que a manualidade é a forma de obtenção de produtos, da técnica e do domínio do processo produtivo pelo mesmo indivíduo (COSTA, 2008).

A apresentação formal da joia (Figura 6), na prática, nem sempre é realizada. Os projetos são entregues ao ourives com representações parciais ou alternativas (com técnicas improvisadas pelo designer). Este projeto é, então, enviado ao modelista para que um modelo físico da peça seja produzido. Em um processo semelhante à escultura, o modelista vai dando ao material a forma desejada com o auxílio de ferramental próprio (Figura 7). Dependendo das técnicas necessárias para a confecção do modelo, a produção pode ser feita diretamente no metal ou em ceras próprias para a modelagem (WINKLER, 2008; ROCHA *et. al.*, 2011).

Figura 6 – Projeto de joia: desenho técnico completo.



Modificado de CANAL (2006).

Figura 7 – Algumas ferramentas utilizadas pelo modelista.



(a) conjunto de lima agulha; (b) conjunto de limas com cabo; (c) martelo de forja; (d) martelo de bola; (e) martelo de chifre; (f) alicate meia cana; (g) cortador de charneira (h) alicate de bico chato; (i) alicate paralelo; (j) alicate com ponta de nylon; (l) arco de serra; (m) régua de aço; (n) riscador e; (o) compasso.

Modificado de DOUGHTY (2009).

Como esta etapa é de natureza artesanal, o resultado final depende fundamentalmente da habilidade do modelista. Além disso, grandes problemas para a indústria joalheira são ocasionados devido à deficiência no processo de transferência entre a concepção e a produção das peças. Essa dificuldade pode acarretar uma série de problemas no produto final, provocando retrabalho, aumento dos custos operacionais e atrasos na entrega (WINKLER, 2008; ROCHA *et. al.*, 2011).

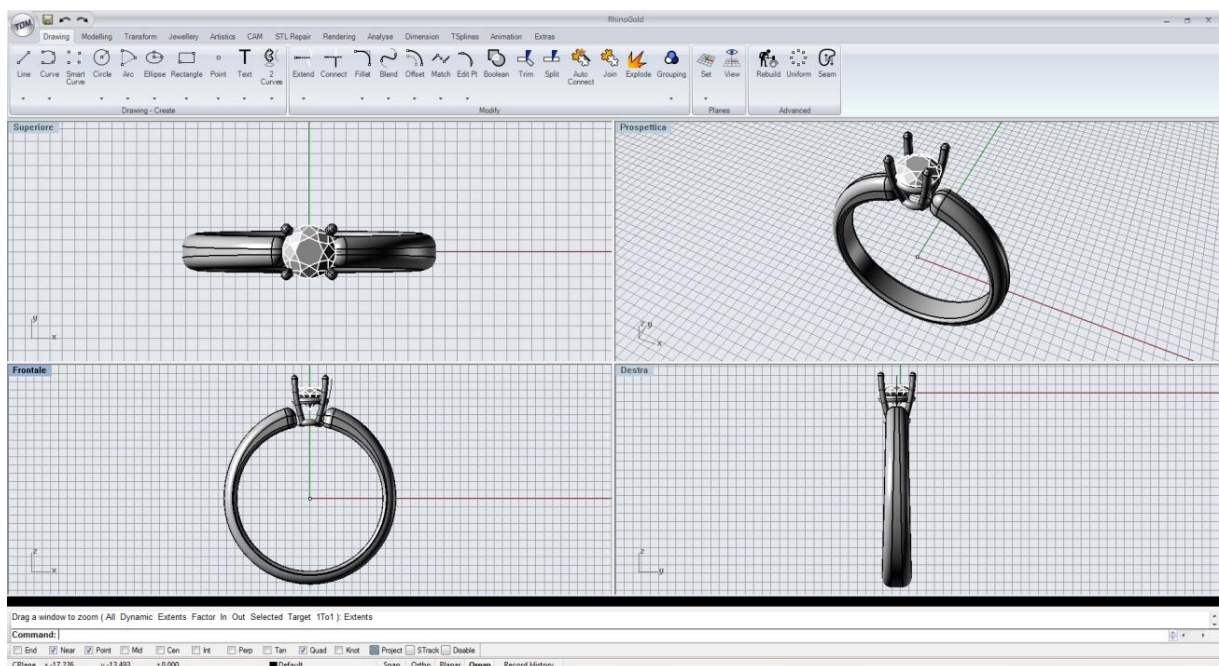
A criação das peças, muitas vezes, é feita por um profissional que desconhece os processos produtivos e, então, movimentos, sistemas de encaixe, volume e peso nem sempre são considerados no processo de desenho convencional. Como resultado dessas limitações, o ourives modelista acaba modificando certas características do projeto para evitar problemas no modelo final. As mudanças podem tanto respeitar o projeto – quando são feitas apenas adaptações em espessura ou adequação de medidas e encaixe – quanto alterar características importantes da peça – seja pela inviabilidade de confecção ou, até mesmo, pela interpretação errônea do projeto (WINKLER, 2008; ROCHA *et. al.*, 2011).

## 2.4.2 Os sistemas de modelagem tridimensional CAD/CAM

Com as exigências dos consumidores e a busca por melhor posicionamento no mercado, as empresas joalheiras vêm introduzindo recursos como o CAD/CAM. Esses sistemas, desde as décadas de 1980 e 1990, possibilitam maior precisão, rapidez e integração entre os setores de produção (REBELLO, 2007; ROCHA *et. al.*, 2011).

Quando modelado virtualmente em um sistema CAD, a forma e o tamanho de um modelo tridimensional podem ser examinados como se este tivesse sido produzido fisicamente (Figura 8). Ao visualizar o modelo durante a etapa de concepção, suas características podem ser avaliadas, evitando interpretações equivocadas e minimizando possibilidades de erros na produção (ROCHA *et. al.*, 2011).

Figura 8 – Tela de software CAD que possibilita a visualização de peça modelada em várias vistas.



Com um *rendering*, a aparência final do modelo também pode ser simulada permitindo a visualização dos resultados de superfície que serão obtidos com os materiais (como ligas metálicas e gemas) a serem empregados. Esta técnica possibilita a criação de diferentes versões do mesmo modelo (Figura 9) sem a necessidade da confecção real das peças (ROCHA *et. al.*, 2011).

Figura 9 – *Rendering* de peças simulando a utilização de diferentes gemas e ligas metálicas.



Outro recurso oferecido por sistemas CAD é a fundição simulada. Neste processo, informações termodinâmicas dos materiais são utilizadas na representação virtual da solidificação de metais. Desta forma, alterações, como o ajuste fino da temperatura de fundição ou o melhor posicionamento dos canais de ataque, são feitas antes da produção em si trazendo redução de custos e melhoria na qualidade de peças fundidas (REBELLO, 2007).

Os benefícios obtidos com o sistema CAD são mais bem aproveitados quando este é utilizado juntamente com o sistema CAM, o qual faz uso de equipamentos de prototipagem para a produção automatizada dos modelos. Com esse sistema, os resultados serão fiéis ao projeto executado no CAD e, não obstante, a precisão de acabamento e a possibilidade de construção de geometrias complexas (inviáveis em processos artesanais) apresentam-se como outras vantagens dos sistemas CAM (ROCHA *et. al.*, 2011). O primeiro modelo é a referência para todo ciclo de produção e para o resultado final do produto. Os sistemas CAD e CAM contribuem de forma relevante no sentido de garantir que o produto atingirá as metas de qualidades estabelecidas no projeto (ROCHA *et. al.*, 2011).

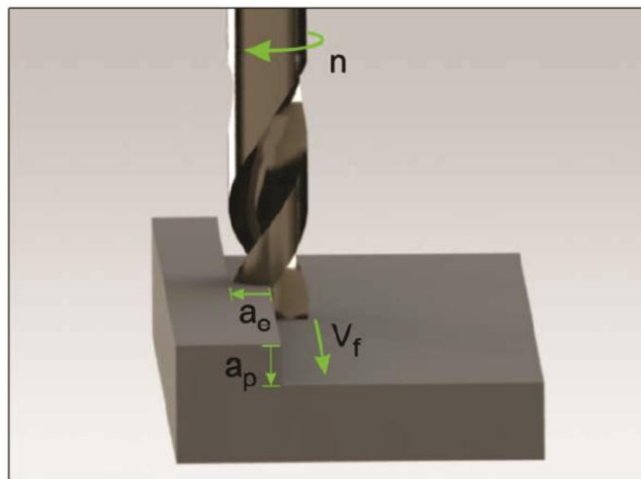
Segundo Fonseca (2006) e Carvalho e Volpato (2007), modelos e protótipos são passíveis de serem produzidos por meio de quatro processos fundamentais: (i) processos subtrativos, os quais são caracterizados pela retirada de material; (ii) processos aditivos, em que a forma final do objeto é adquirida pela sucessiva sobreposição de camadas de material; (iii) processos conformativos, no quais a moldagem da peça é obtida por ferramentas pré-definidoras de formatos; e (iv) processos híbridos, cuja produção é resultado da combinação entre dois ou mais processos. Esta pesquisa de mestrado utilizou-se da produção pelo método de natureza subtrativa: a usinagem CNC.

## 2.5 Usinagem CNC

As operações de usinagem são aquelas que conferem à peça a forma, as dimensões e o acabamento desejado por meio da remoção de material (FERRARESI, 1998). A usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado) refere-se à automação deste processo, ou seja, quando é controlado por computador (FERRARESI, 1998; DINIZ *et. al.*, 2008; SILVA, 2011). Dentre os processos realizados pela usinagem, destaca-se o fresamento, no qual uma ferramenta cortante (fresa) faz movimentos de rotação e de translação sobre a peça (FERRARESI, 1998).

Na usinagem (Figura 10), são realizadas operações de desbaste – para obter dimensões próximas às finais – e de acabamento – para dar o acabamento especificado (FERRARESI, 1998). De acordo com Silva (2011), o parâmetro que diferencia estas duas operações é a profundidade de corte ( $a_p$ ), isto é, a profundidade que a ferramenta entra na peça. Além disso, devem ser considerados os parâmetros de velocidade rotação da ferramenta ( $n$ ), de penetração de trabalho ( $a_e$ ) e de velocidade de avanço ( $V_f$ ).

Figura 10 – Representação gráfica do processo e os parâmetros de usinagem.



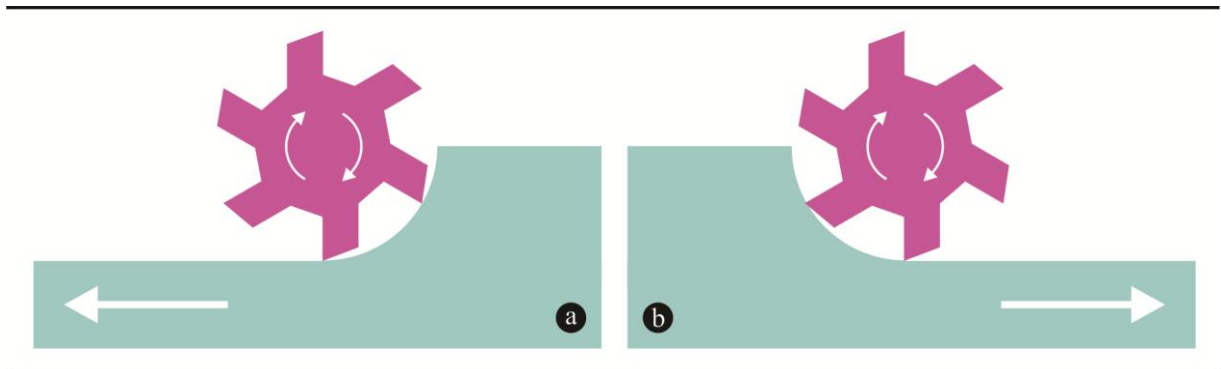
Velocidade de rotação ( $n$ ), velocidade de avanço ( $V_f$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e penetração de trabalho ( $a_e$ ).

Fonte: Silva (2011)

Esses parâmetros influenciam significativamente nos custos e no acabamento da peça usinada. Se, por exemplo, a velocidade de corte não estiver de acordo com a velocidade de avanço e profundidade de corte, o esforço gerado sobre a ferramenta pode acarretar erros na superfície usinada (WRUBLAK *et. al.* 2008).

O sentido de corte também exerce grande influência na usinagem. Diniz *et. al.* (2008) e Silva (2011) descrevem dois tipos de fresamento (Figura 11): o discordante, no qual o sentido do movimento da peça é contrário ao movimento rotatório da fresa; e o concordante, em que o sentido do movimento de avanço da peça e o de rotação da fresa é o mesmo.

Figura 11 – Classificação do fresamento de acordo com o sentido de corte<sup>2</sup>.



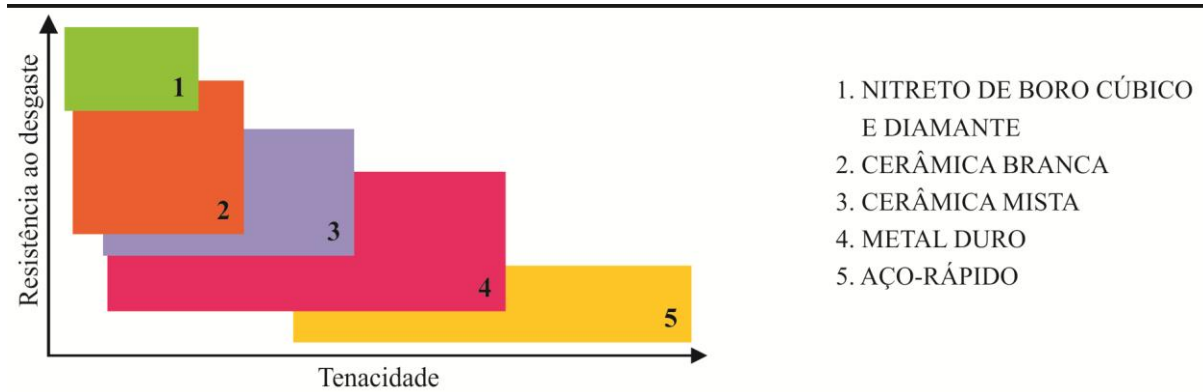
Fresamento concordante (a) e discordante (b).

Modificado de Diniz *et. al.* (2008).

Outra variável é a seleção adequada da ferramenta de corte, tendo em vista que o material que a constitui deve ser mais duro e mecanicamente mais resistente que o da peça. A pesquisa acerca de materiais e de ligas estruturais contribuiu para o desenvolvimento de ferramentais com elevada dureza, mais resistentes para as operações de usinagem, ou com tenacidade suficiente, capazes de suportar os choques e impactos inerentes ao processo. Em geral, a dureza e a tenacidade são propriedades antagônicas e o equilíbrio dessas características nos materiais das ferramentas de corte se tornou um desafio (Figura 12). A conciliação destas propriedades é possível com o controle dos processos de fabricação e do tratamento térmico, conferindo aos materiais das ferramentas graus compatíveis de pureza e qualidade (SOUZA, 2011).

<sup>2</sup> Animações de diversos processos de fabricação podem ser conferidas em [www.ndsm.ufrgs.br](http://www.ndsm.ufrgs.br).

Figura 12 – Relação entre a tenacidade e a dureza entre os materiais aplicados em ferramenta de corte.



Modificado de Souza (2011).

Souza (2011) ressalta que, dentre as diversas propriedades desejadas em um material para ferramentas de corte, as principais são: alta dureza; suficiente tenacidade para evitar falha por fratura; alta resistência ao desgaste abrasivo, à compressão e ao cisalhamento; boas propriedades térmicas e mecânicas em altas temperaturas; alta resistência ao choque térmico; alta resistência ao impacto; e ser quimicamente inerte. Para as operações convencionais de usinagem o aço-rápido e o metal-duro detêm 90% das aplicações na indústria moderna. As demais aplicações integram outros materiais mais avançados, tais como o nitreto de boro cúbico (CBN), o diamante (PCD), a cerâmica branca e a cerâmica mista (CERMET).

Além dos parâmetros citados, destaca-se a importância das propriedades físicas, químicas e mecânicas do material a ser usinado. Assim, a usinabilidade dos materiais, expressa por meio de um valor numérico comparativo, uma série de propriedades em relação a outro material tomado como padrão, ou seja, indica o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. A dureza e a resistência mecânica, a ductilidade, a condutividade térmica e a taxa de encruamento são algumas características dos materiais que podem influenciar na usinabilidade (SOUZA, 2011).

É correto afirmar que a usinagem é um dos processos de fabricação mais populares de que se tem conhecimento. Entretanto, a usinagem CNC possui algumas restrições geométricas: este processo permite a remoção somente do material que pode ser alcançado pela ferramenta, alguns cantos internos não podem ser alcançados e é difícil a fixação de peças com paredes delgadas. Essas restrições têm feito com que o potencial de manufatura advindo das tecnologias de fabricação por camadas se sobressaia quando comparadas à usinagem CNC (VOLPATO, 2007; SOUZA, 2011).



## 2.6 A fundição como processo de obtenção das peças finais

A fundição teve início na era do bronze – por volta de 4000 a 3000 a.C. – quando o homem utilizou metais, como o cobre, o estanho e o chumbo, na produção de objetos. As primeiras peças fabricadas por cera perdida de que se tem conhecimento são originárias da antiga Mesopotâmia (atual Iraque) e datam de 3200 a.C. Na Índia, onde os cadinhos para fundição foram desenvolvidos em 3000 a.C., são encontrados os primeiros textos que mencionam as técnicas de extração, fusão e fundição de metais. No Irã e na China, as técnicas de fundição de metais alcançaram altos níveis de perfeição entre 2100 a.C. e 500 a.C (GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Por volta de 2000 a.C., as técnicas de fundição foram difundidas na Europa. Entretanto, eram utilizados moldes de barro cavados em orifícios no solo, até 150 d.C., quando os portugueses trouxeram de suas viagens às Índias (China, Japão e Índia) as técnicas lá existentes. Quando os europeus chegaram à América do Sul pré-colombiana, a metalurgia do ferro ainda não havia sido iniciada, mas foram encontradas peças fundidas em cobre, em ouro (Figura 13) e em prata cuja datação é do século I (PIAZAS e LONDOÑO, 2006; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Figura 13 – Objeto articulado produzido por ourives pré-colombiano entre 200 d.C. e 1000 d.C.



(a) Ave, com cabeça e rabo articulados, produzida com diferentes ligas metálicas; (b) desenho esquemático das partes independentes que compõem o objeto; e (c) a gamagrafia (radiografia obtida por raios gama) revela a disposição das partes no interior do objeto.

Modificado de Piazas e Londoño (2006) e Museo del Oro (2012).

Atualmente, diversos processos de fundição são utilizados para a manufatura de peças em larga escala e podem ser classificados de acordo com o material do molde, com o método de vazamento do metal e com a pressão aplicada sobre o molde durante o preenchimento. Os processos de fundição mais difundidos são por molde de areia, em molde permanente por gravidade, sob pressão e por cera perdida (KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

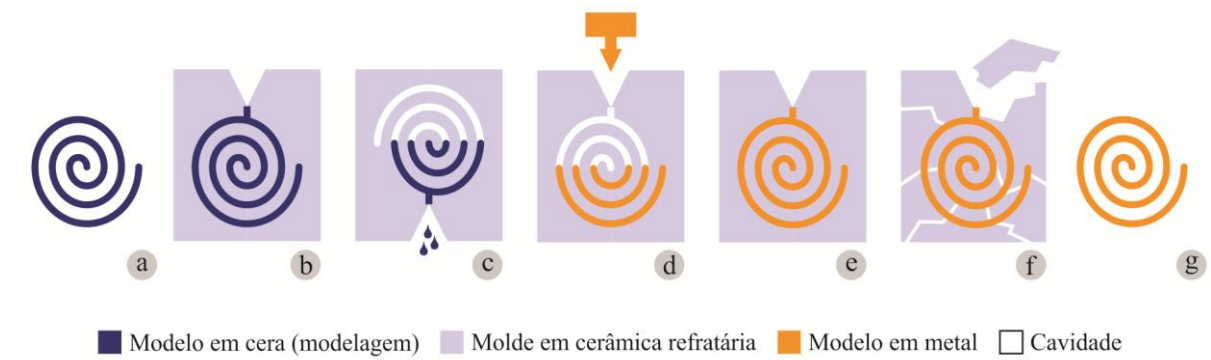
No presente trabalho, as peças metálicas foram obtidas pela técnica da microfusão, também denominada de fundição de precisão ou cera perdida. De acordo com Fonseca (2006), Rebello (2007) e Kliauga e Ferrante (2009), este processo é considerado o mais adequado à industrialização de joias, uma vez que permite a produção de peças com maior complexidade geométrica.

### **2.6.1 Microfusão ou cera perdida**

Basicamente, na microfusão um modelo produzido em cera origina uma réplica em metal. Para tanto, um revestimento de cerâmica refratária à base de gesso ou silicato é aplicado sobre o modelo em cera e, após um determinado tempo de aquecimento em forno, a cera é fundida, sendo eliminada do interior do molde. Obtém-se, então, em seu interior, um vazio com o formato do modelo, onde será introduzido (vazado) o metal em estado líquido (RICK, 2006; GIULIANO, 2008). Essa técnica pode ser obtida por meio de dois métodos distintos: o direto e o indireto.

No método direto (Figura 14), o modelo é confeccionado em cera e, sobre ele, é construído um molde em material refratário. Depois de o molde estar curado, o modelo de cera é removido de seu interior por fusão, formando assim, a cavidade com a forma do modelo em negativo. O metal em estado líquido é vazado no interior do molde e, ao se solidificar, forma a peça em positivo. O molde é, então, destruído para a remoção da peça fundida. Neste método, os modelos e os moldes são perdidos ao longo do processo de fundição. Deste modo, um único modelo gera uma única peça final, não permitindo, portanto, a seriação de uma peça. (MIDGLEY, 1986).

Figura 14 – Método direto em molde perdido.

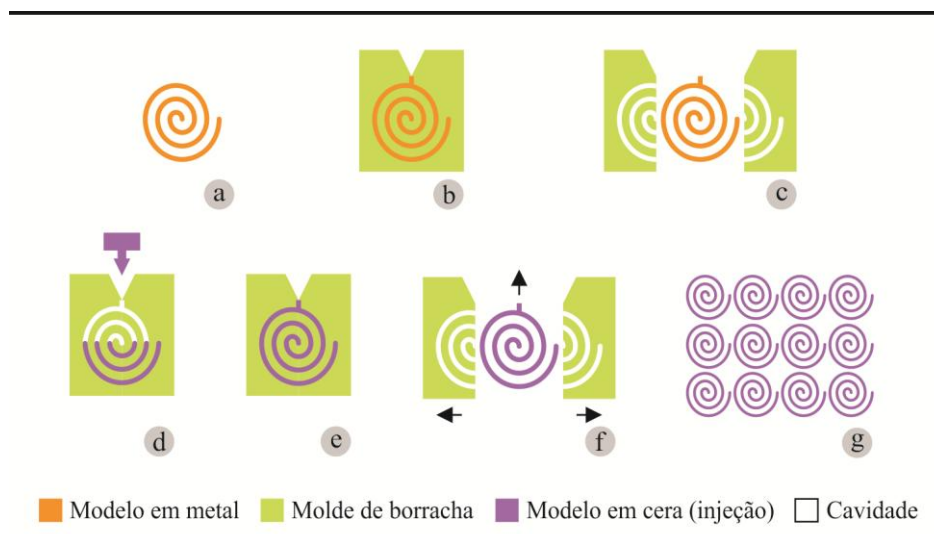


(a) Modelo; (b) Construção do molde; (c) Remoção do modelo do interior do molde; (d) Preenchimento da cavidade do molde; (e) Solidificação do material vazado; (f) Remoção do molde; e (g) Obtenção da peça final.

Modificado de Giuliano (2008).

Já o método indireto (Figura 15), consiste na construção de um molde permanente, constituído de várias partes com ângulos que permitem a sua desmontagem e a remoção do modelo de seu interior. Ao remontar as partes do molde, obtém-se novamente a cavidade vazia na qual a cera é injetada, dando forma a um novo modelo. Desta forma, torna-se possível a geração de tantos modelos em cera quantos forem desejados, ou o molde permitir. Na joalheria, são utilizados moldes flexíveis de borracha de silicone. Este método é denominado indireto, pois não gera a peça final em metal diretamente, mas sim, uma peça intermediária em cera (MIDGLEY, 1986; GIULIANO, 2008).

Figura 15 – Método indireto de molde permanente.



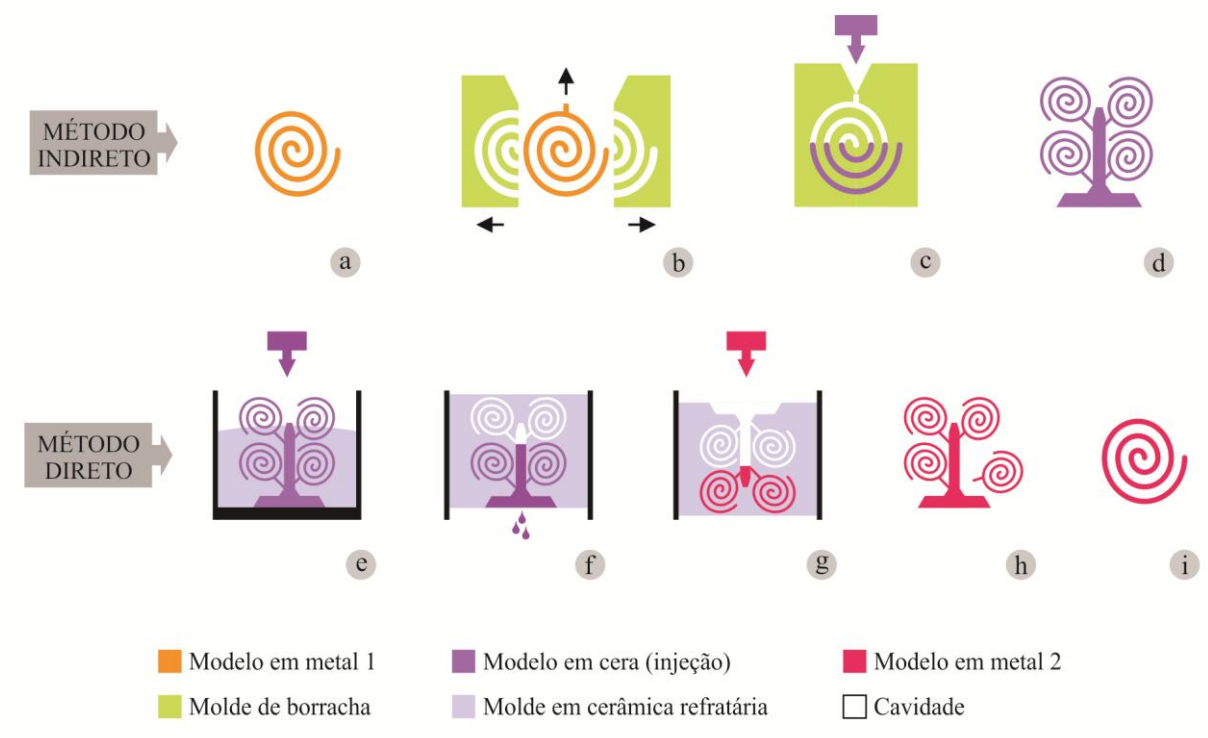
(a) Modelo; (b) Construção de molde permanente; (c) Abertura do molde e remoção do modelo; (d) Preenchimento do molde com cera; (e) Solidificação da cera; (f) Abertura do molde para remoção da peça em cera solidificada; e (g) Os múltiplos em cera formados a partir de um molde permanente.

Modificado de Giuliano (2008).

Na fabricação de joias, ambos os processos – direto e indireto (Figura 16) – são utilizados. Neste caso, a produção tem início com um modelo em cera para modelagem ou em metal (Figura 16a). Quando em cera, é necessário realizar a microfusão da peça para que o molde de borracha seja produzido. Esta borracha é vulcanizada, o molde é cortado (Figura 16b) e o modelo em metal é retirado, restando uma cavidade a qual será preenchida por cera de injeção (Figura 16c). Com este molde em borracha, é possível reproduzir os modelos inúmeras vezes (KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Em um bastão de cera é montada a árvore de modelos (Figura 16d) que, depois de finalizada, é inserida em um cilindro de aço onde a massa de revestimento cerâmico é vertida (Figura 16e). Depois da completa secagem desta massa, o conjunto é aquecido para a remoção da cera (Figura 16f). Neste novo molde cerâmico, o metal líquido é vazado (Figura 16g) e, quando solidificado, dissolve-se a massa refratária restando apenas as peças em metal. Essas são cortadas do sistema de alimentação (Figura 16h) e seguem para o processo de acabamento superficial para finalização do produto (KLIAUGA E FERRANTE, 2009).

Figura 16 – Processo de microfusão na joalheria.



(a) Modelo em metal; (b) Confecção dos moldes em borracha; (c) Injeção da cera; (d) Montagem da árvore de modelos; (e) Revestimento em cerâmica refratária; (f) Deceragem; (g) Vazamento do metal; (h) Remoção das peças do sistema de alimentação; e (i) Produto finalizado.

Modificado de Kliauga e Ferrante (2009).

### 2.6.2 Deceragem

Segundo Giuliano (2008); Kliauga e Ferrante (2009) e Grimwade (2009), a etapa da deceragem (Figura 16f) ocorre depois que o molde está completamente seco. Este processo é realizado em fornos elétricos com resistência, em estufas com vapor d'água ou em autoclaves que, ao aquecer, volatilizam a cera contida no interior do molde. Independente do equipamento a ser utilizado, este aquecimento deve, necessariamente, ser gradual até atingir 150 °C. Desta forma, evita-se a vaporização intensa, a qual prejudica a estabilidade mecânica do revestimento cerâmico.

### 2.6.3 Vazamento

Os processos de fundição comumente utilizados são classificados conforme o método de preenchimento do molde: por vácuo ou por centrifugação (KONDIK, 1973).

Quando utilizados equipamentos para fundição centrífuga, as velocidades de rotação variam entre 500 e 1200 rpm e a aceleração experimentada pelo metal em estado líquido atinge de 10 a 100 vezes a da gravidade. A rotação segue até que todo o metal esteja solidificado (cerca de 1 a 1,5 segundos). Este equipamento é provido de uma câmara de vácuo que auxilia na remoção do ar do metal vazado minimizando, assim, a oxidação e a porosidade (KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

O sistema de fundição a vácuo consiste, basicamente, em um recipiente metálico com um orifício onde o cilindro do molde cerâmico é posicionado. O vácuo é feito durante o procedimento de vazamento do metal, aumentando a pressão hidrostática dentro do molde e, conseqüentemente, melhorando o preenchimento (KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Quando comparados (Tabela 1), pode-se constatar que o preenchimento por centrifugação permite a obtenção de formas mais complexas e tem maior velocidade de operação, em contrapartida, promove um fluxo turbulento, com alta probabilidade de oxidação, além de não ser adequada para a fundição de grandes volumes de material (KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Tabela 1 – Comparação entre os processos de preenchimento do molde.

Característica	Centrífuga	A vácuo
Controle da temperatura do metal	•••	•••
Automação	••	•••••
Fluxo do metal	••	••••
Controle de oxidação	•	•••••
Preenchimento completo das formas	•••••	••••
Reprodução dos detalhes	••••	••
Produtividade	••••	••

• Deficiente •• Regular ••• Bom •••• Muito bom ••••• Excelente

Modificado de Kliauga e Ferrante (2009).

## 2.7 Materiais utilizados na obtenção de modelos

Um modelo pode ser definido como a forma inicial a partir da qual a obtenção de um molde torna-se possível. Muitas vezes, um modelo deriva de uma ideia e é desenvolvido para atender uma determinada necessidade ou função. Assim, com base em um projeto, é construído em material apropriado para facilitar a seu processamento em função da tecnologia de produção disponível (GIULIANO, 2008).

### 2.7.1 As ceras para modelagem

Normalmente, as ceras para modelagem são formuladas a partir de cera de abelha, cera microcristalina, parafina, breu e etil vinil acetato (EVA). Além dessas, já são conhecidas ceras com 47 diferentes composições. Essa diferenciação varia de acordo com as propriedades desejadas e da técnica a ser empregada na produção do modelo em cera (GIULIANO, 2008).

O desempenho das ceras para modelagem é avaliado conforme seu comportamento frente às etapas do processo de microfusão (PIWONKA *et. al.*, 2000; ADRIAN e VISWANATHAN, 2003; PRASAD e YARLAGADDA, 2003; TASCLOGLU *et. al.*, 2004; REZAVAND e BEHRAVESH, 2007).

Na joalheria, blocos de cera são comercializados em diferentes formatos e propriedades. Cores específicas foram adotadas para facilitar a identificação (GIULIANO, 2008). De acordo com Salem (2002), a “cera azul” apresenta menor dureza e alta flexibilidade; mantém-se viscosa ao fundir (115,5 °C); é ideal para seções com paredes finas. A “cera roxa” possui dureza intermediária e alguma flexibilidade; ao atingir o ponto de fusão (110 °C), se liquefaz. A “cera verde” é a mais dura entre as três e não pode ser flexionada; Torna-se imediatamente líquida ao atingir seu ponto de fusão (104,4 °C). Todas as três possibilitam a usinagem e o polimento (SALEM, 2002).

### **2.7.2 As ceras para fundição**

De uma maneira geral, as ceras de fundição devem fluir para dentro do molde completa e facilmente, se solidificar de maneira uniforme, bem como formar um modelo suficientemente duro a fim de completar a cura do molde, mas não devem ser frágeis para evitar que se quebrem (PIWONKA *et. al.*, 2000). Esse material é composto por cera natural ou sintética, resina natural ou sintética, cargas orgânicas sólidas, e até mesmo água (HORTON, 1983). As ceras para fundição são típicos materiais termoplásticos, pois podem ser transformadas de um sólido rígido para um fluido quando submetidas ao calor.

Segundo Fielder (1998) e Piwonka *et. al.* (2000), há poucos estudos em nível molecular para caracterização das ceras para fundição e os que estão sendo feitos, normalmente, se restringem à expansividade e a viscosidade em relação da temperatura.

## **2.8 Materiais utilizados para obtenção de moldes**

A utilização de moldes iniciou na Antiguidade e teve grande impulso nos séculos XVIII e XIX, com a Revolução Industrial. É possível afirmar que a produção de peças a partir de um molde é uma das possibilidades mais práticas, rápidas e economicamente viáveis de produzir objetos em larga escala. De uma maneira geral, para que cumpram sua função, além de possuir resistência mecânica suficiente para suportar e manter a forma, os moldes devem apresentar estanqueidade, desmoldabilidade e colapsibilidade (GIULIANO, 2008).

### 2.8.1 Massa Refratária

O material refratário utilizado para cobrir a árvore de modelos deve suportar a pressão hidrostática do metal em estado líquido que será vazado. Essencialmente, essa massa cerâmica é composta de sílica (mistura de cristobalita e quartzo; proporciona resistência a altas temperaturas), gesso (sulfato de cálcio semi-hidratado; age como aglomerante; dá ao revestimento a permeabilidade necessária no processo) e aditivos (controle do tempo de secagem e da expansão). O tempo de cura do revestimento é de cerca de 10 minutos e após a moldagem, os cilindros devem permanecer em descanso durante 1 a 2 horas para o endurecimento do gesso e evaporação de parte da água contida nele (KLIUGA e FERRANTE, 2009).

### 2.8.2 Borracha

Segundo Kliuga e Ferrante (2009), os moldes feitos a partir de borracha podem tanto servir para fundição de ligas de baixo ponto de fusão (estanho e antimônio ou estanho e chumbo), quanto para a reprodução de moldes de cera. Como características fundamentais as borrachas apresentam grande capacidade de reprodução de detalhes, baixa aderência, resistência ao envelhecimento, ao rasgamento e ao calor. Na joalheria, são utilizados, basicamente, a borracha natural (látex), a borracha de silicone e a borracha de cura a frio.

A borracha natural (látex) é proveniente da seiva da seringueira (*Hevea brasiliensis*) na qual são adicionados enxofre e outros componentes químicos que lhe conferem maior resistência mecânica através do processo de microfusão que ocorre sob pressão e calor. A borracha natural utilizada em moldes vulcaniza entre 160 a 170 °C e este processo tem duração de 40 a 90 minutos (ARAÚJO, 1993; KLIUGA e FERRANTE, 2009).

A borracha de silicone é composta por cloretos orgânicos e silicone (polímero composto de cadeias de silício, oxigênio e hidrogênio). O silicone tem como agentes vulcanizadores o enxofre e o óxido de zinco. Para cura, este material necessita de 180 °C e os moldes produzidos podem ser utilizados para a reprodução de modelos em cera e para fundição de ligas de estanho, chumbo e bismuto (SANTOS, 2007).



Feitas a base de silicone ou de poliuretano, as borrachas de cura a frio têm como maior vantagem a estabilidade volumétrica durante a cura, oferecendo, portanto, uma reprodução mais precisa. Geralmente, o processo de vulcanização leva 24 horas, mas já existem borrachas de cura a frio que curam em duas horas (KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

## **2.9 Ligas metálicas para obtenção do produto final**

O conhecimento de técnicas e de materiais aliado à possibilidade de simulação por softwares permitem a obtenção de diversas formas com propriedades específicas. Atualmente, 109 elementos químicos são conhecidos e, entre eles, 88 são metais. Apenas um terço deles possui significado prático, ou seja, são utilizados como material para fabricação. A escolha do metal a ser utilizado se dá em função de suas propriedades (GIULIANO, 2008; GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

A densidade é uma das grandezas que dependem apenas dos primeiros princípios dos materiais (massa atômica e volume da célula unitária). Portanto, a densidade do metal varia conforme a composição da liga metálica devido à quantidade dos diferentes átomos presentes no seu interior. Ao trabalhar com peças metálicas, é possível saber a quantidade de material em massa que será necessária para a fabricação de uma peça (GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Outra propriedade importante dos metais utilizados na joalheria é o brilho e a cor. Os metais, por natureza, são opacos, isto é, refletem uma parte da luz incidente e absorvem o restante sem que ela os atravesse. A alta porcentagem de refletância é responsável pelo brilho característico, denominado brilho especular. A intensidade da refletância é diretamente influenciada pelo acabamento superficial, tais como jateamento de areia, lixamento e polimento (GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

As propriedades térmicas estão relacionadas exclusivamente com a força de ligação atômica e estabelecem correlações lineares. Basicamente, quase todo metal aumenta de volume quando aquecido e contrai quando resfriado. Desta forma, aqueles metais com menor ponto de fusão – tais como o zinco e o chumbo – se alongam mais do que aqueles com alto ponto de fusão – como a platina e o paládio (GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Essas propriedades são de fundamental importância quando se trabalha com peças metálicas, principalmente se forem submetidas a esforço de trabalho. Em síntese, a adição de qualquer elemento de liga a um metal puro resulta em mudanças nas propriedades físicas deste material, uma vez que a rede atômica é alterada, reconfigurando a estrutura das ligações entre os átomos (GIULIANO, 2008).

### **2.9.1 O ouro e suas ligas**

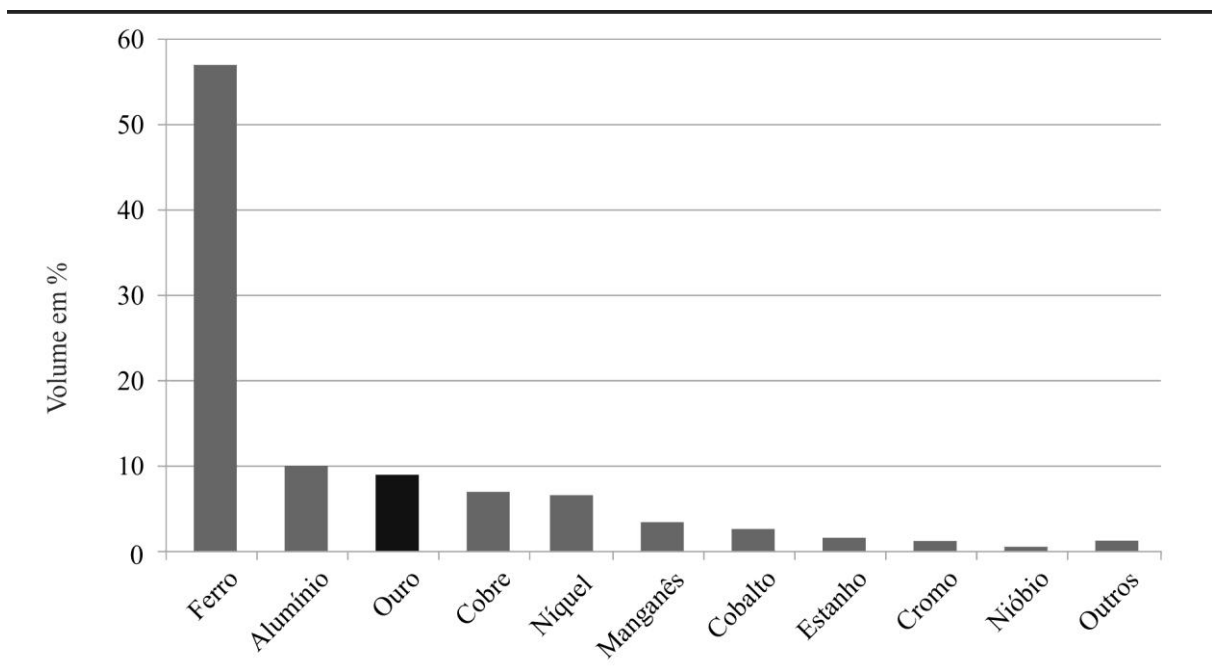
Desde a Antiguidade, quando começou a ser utilizado, poucos materiais naturais fascinaram tanto a humanidade como o ouro. Este material pode ser facilmente polido, de forma que uma superfície altamente refletora é produzida. As suas condutividades, térmica e elétrica, são menores do que as da prata e do cobre, também é soldado facilmente e possui baixa resistência de contato (RICK, 2006; AMORIM e TEIXEIRA, 2007; GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

De acordo com Rick (2006); Amorim e Teixeira (2007); Grimwade (2009); Kliauga e Ferrante (2009), as jazidas mais antigas já descobertas, estão localizadas em Transvaal e no Estado Livre de Orange, na África do Sul. A ocorrência de ouro nesta área está, normalmente, a mais de 1,6 km de profundidade, sendo que a mais profunda mina já explorada chegou a 3.900 m. Durante grande parte do século XX, a África do Sul foi o maior produtor de ouro e nos anos 1980, era responsável por 50% da produção mundial. Embora continue sendo o maior produtor, em 2006, este número baixou para 24%, estando na frente dos Estados Unidos (12%), da Austrália (10%), da China (10%) e da Rússia (7%).

No Brasil, a primeira evidência de ouro foi descoberta em 1590, na região do Pico do Jaraguá, na então capitania de São Vicente. Somente em 1695, quando foi descoberto no atual

estado de Minas Gerais, a exploração começou efetivamente. No início do século XIX, esgotaram-se os depósitos de superfície e a mineração brasileira passou por um colapso uma vez que não havia tecnologia para explorar ouro nas camadas em profundidade. Com o aprimoramento tecnológico, no século XX, o Brasil voltou a figurar entre os grandes fornecedores mundiais (AMORIM e TEIXEIRA, 2007; MAGTAZ, 2008). Segundo Kliauga e Ferrante (2009), em 2004, o Brasil produziu 42 toneladas e, em 2005, a produção representou cerca de 9% do volume financeiro gerado pelo setor de minérios metálicos (Figura 17).

Figura 17 – Representação do volume financeiro gerado pelo setor de minérios metálicos do Brasil.

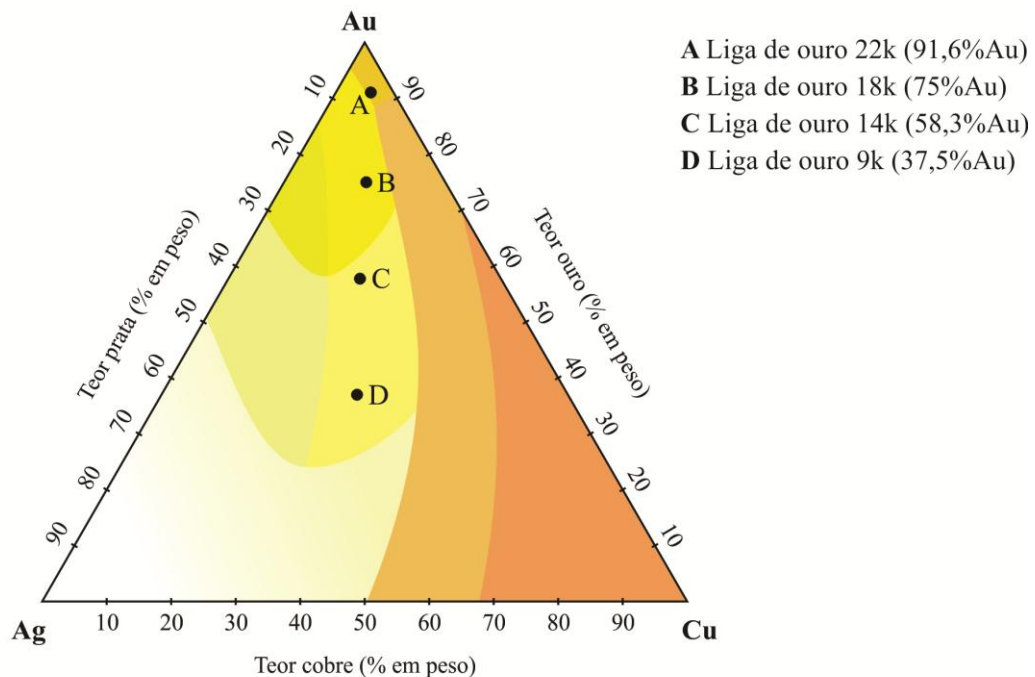


Modificado de Kliauga e Ferrante (2009).

Nobre, porém de baixa dureza, o ouro necessita de outros elementos para poder ser utilizado na confecção de produtos. O ouro puro é denominado ouro de 1000 pontos ou 24 quilates (24k). O mais utilizado na joalheria é o ouro 18k, o qual tem o teor de pureza de 75% e equivale a 750 pontos. No Brasil, De acordo com a norma NBR8000, o ouro refinado é classificado como classe I (teor mínimo de 99,5%), classe II (teor mínimo de 99,95%), classe III (teor mínimo de 99,99%) e classe IV (teor mínimo de 99,995%). Normalmente, o ouro é ligado ao cobre e à prata. Desta forma, aumenta-se a resistência e a dureza, seu ponto de fusão diminui e torna-se possível a obtenção de diversas cores (RICK, 2006; GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

As ligas do sistema Au-Ag-Cu mais utilizadas são as de cor amarela (Figura 18). Quando o cobre é substituído pela prata, obtém-se uma coloração esverdeada. No contrário, a tonalidade adquire tons de rosa e avermelhado. Neste sistema, as ligas de tonalidade branca possuem alto teor de prata e, por isso, estão fora da paleta de ligas de ouro comerciais. Para se conseguir esta tonalidade, são utilizados outros elementos, tais como níquel, zinco e paládio (GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Figura 18 – Cores das ligas do diagrama ternário Au-Ag-Cu.



Os pontos A, B, C e D sinalizam a localização de algumas ligas Au-Ag-Cu no diagrama ternário.

Modificado de Carpenter (1986).

### 2.9.2 A prata e sua utilização com o cobre

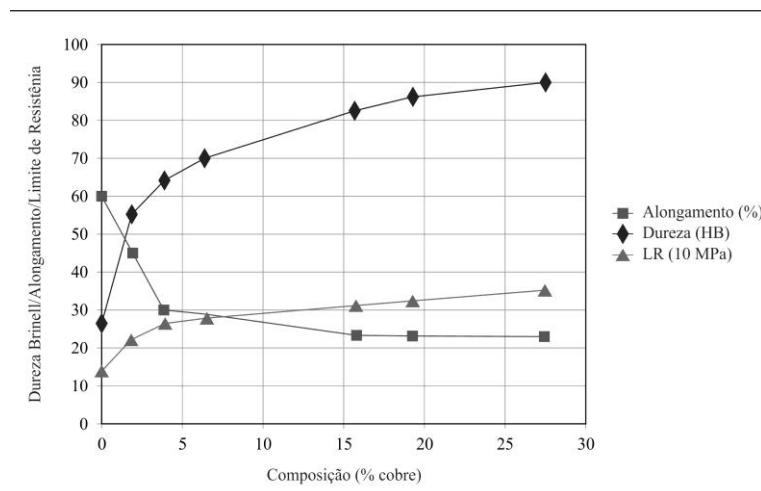
No início da colonização do Brasil, a prata era utilizada por ornamentar casas e igrejas. Como não existem jazidas de prata no país, este metal era trazido do México, da Espanha e do Peru. A cidade de Salvador foi o principal centro brasileiro de comércio de prata, onde era trocada por tecido, açúcar e escravos (MAGTAZ, 2008).

A prata, no seu estado natural, é branca e possui brilho metálico. Seu símbolo químico, Ag, deriva de argentum (prata, em latim). Este elemento é dúctil, maleável, de fácil manipulação química e mecânica. Em contato com o ar, não oxida e, quando polida, possui excelente capacidade de reflexão. Mais dura que o ouro e mais mole que o cobre, este metal é amplamente empregado nas artes e na indústria. É utilizada na produção de objetos de decoração e uso doméstico, e na fabricação de joias, medalhas e moedas. A partir da prata são produzidos sais para aplicação em análises químicas, fotografia e radiografia (CODINA, 2000).

Para a confecção de objetos, normalmente, não utiliza-se a prata em seu estado natural. Nos últimos anos, novas ligas de prata têm surgido no mercado com o objetivo de reduzir manchas e aumentar o brilho deste material. Durante muitos séculos, a liga mais utilizada foi a de prata e cobre. A prata pura é comercialmente denominada como de teor 1000. No Brasil, em oficinas de ourivesaria, a liga mais utilizada para confeccionar joias de prata é a Ag950, ou seja, 950 partes de prata e 50 partes de cobre (GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

A dureza e a resistência mecânica aumentam significativamente com o aumento do teor de cobre (Figura 19). As ligas comerciais têm, aproximadamente, o dobro de dureza da prata pura, mas, ainda assim, permitem a conformação mecânica e apresentam resistência mecânica razoável durante o trabalho (GRIMWADE, 2009; KLIAUGA e FERRANTE, 2009).

Figura 19 – Efeito da adição gradual de cobre nas propriedades mecânicas de ligas Ag-Cu.



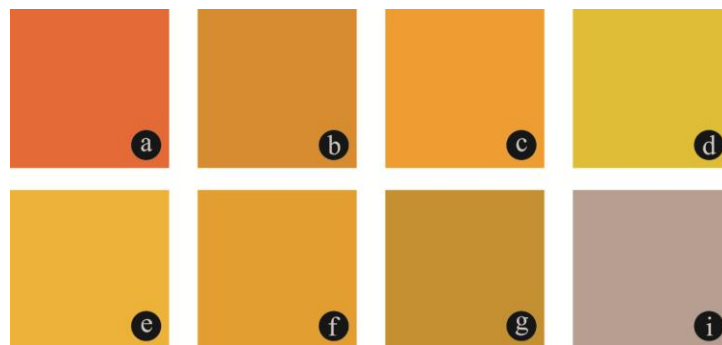
Modificado de Kliauga e Ferrante (2009).

### 2.9.3 O cobre e a indústria de folheados

De acordo com Santos *et. al.* (2005), o setor de bijuterias é formado por empresas que produzem as joias folheadas, na qual peças metálicas (geralmente formadas por ligas de zinco, estanho e cobre) são recobertas por finas camadas de metais nobres, como prata e ouro. No Brasil, em 2005, este mercado faturou cerca de R\$ 570 milhões e gerou mais de 7 mil empregos. As empresas estão concentradas nos estados de São Paulo (56%), do Rio Grande do Sul (21%), de Minas Gerais (16%) e no Rio de Janeiro (7%).

Dentre os principais substratos para a produção de bijuterias e folheados, utiliza-se amplamente o cobre e suas ligas (Figura 20). Dentre elas, destaca-se o latão: liga de cobre e zinco, na qual a proporção, em peso, de zinco varia entre 5 e 50%. Conforme se aumenta a quantidade de zinco na liga, há considerável diminuição da resistência à corrosão, bem como um aumento da resistência à tração (SALEM, 2000).

Figura 20 – Cores do cobre e suas principais ligas.



(a) C11000, cobre; (b) C22000, bronze comercial; (c) C23000, latão vermelho; (d) C26000, latão cartucho; (e) C28000, metal Muntz; (f) C36500, bronze bobina; (g) 65500, bronze de silicone; e (h) 70600, cobre-níquel.

Modificado de Copper Development Association Inc. (2012).

Em linhas gerais, é correto afirmar que o latão com até 36% de zinco é passível de ser utilizado na produção de objetos ornamentais, ferragens, cartuchos de armas, carcaças de extintor de incêndio, roscas de lâmpadas, etc. Para a indústria de joias e de bijuterias, essa liga é empregada na confecção de componentes de brincos, anéis, pulseiras e broches. Assim que a proporção de zinco ultrapassa 36%, o latão é usado sob forma de chapa para estampagem. Ainda, é possível a obtenção de latão com adição de chumbo. Neste caso, o material é de alta usinabilidade, sendo utilizado na produção de pequenas peças como tarraxas, garras e arrebites (SALEM, 2000).

## 2.10 A digitalização tridimensional como método comparativo

A digitalização tridimensional possibilita a captura *in loco* do tamanho exato e da forma de objetos físicos. Esta tecnologia é ideal para captar superfícies contornadas e geometrias complexas que requerem grande quantidade de informação para uma apurada descrição. Neste sentido, os métodos tradicionais de mapeamento mostram-se pouco eficazes. Os crescentes avanços na computação gráfica, a possibilidade de design e os sistemas CAD/CAM, impulsionaram o desenvolvimento e a utilização de técnicas de digitalização tridimensional (FREITAS, 2006; BERTOL, 2008; SILVA, 2011).

De acordo com Freitas (2006) e Silva (2011) a digitalização tridimensional pode ser classificada, da maneira geral, em duas categorias: digitalização com contato físico com a forma e sem contato físico. Aqueles que necessitam do contato para obtenção de dados, são modelos do tipo braço mecânico; triangulação ultrassônica; triangulação eletromagnética; apalpamento em máquina de fresamento e apalpamento em máquinas de medição por coordenadas. Dentre os sistemas sem contato, podem ser citadas: a digitalização a laser por holografia conoscópica, a digitalização a laser por triangulação, a digitalização com luz branca e a digitalização baseada em fotografia.

Nesta pesquisa, a aquisição de dados com alta precisão é um fator determinante para a seleção do equipamento adequado a ser utilizado. Neste sentido, o trabalho comparativo realizado por Silva (2011) apresenta a tecnologia de digitalização a laser por holografia conoscópica (no caso, o equipamento Tecnodrill Digimill 3D<sup>®</sup>) como o processo com maior precisão associada à maior resolução, apesar de mais lento, sendo capaz de capturar inclusive a textura do objeto digitalizado (Tabela 2).

Este método traz maior automação na aquisição dos dados. Mais rápida e mais precisa que os sistemas de digitalização por contato, a digitalização tridimensional a laser ainda depende de alguns fatores como a opacidade e a cor da superfície a ser capturada. Esta tecnologia é adequada para objetos ricos em detalhes e independe da dureza do material, uma vez que não há contato entre o equipamento e o objeto (FERREIRA, 2003; BERTOL, 2008).

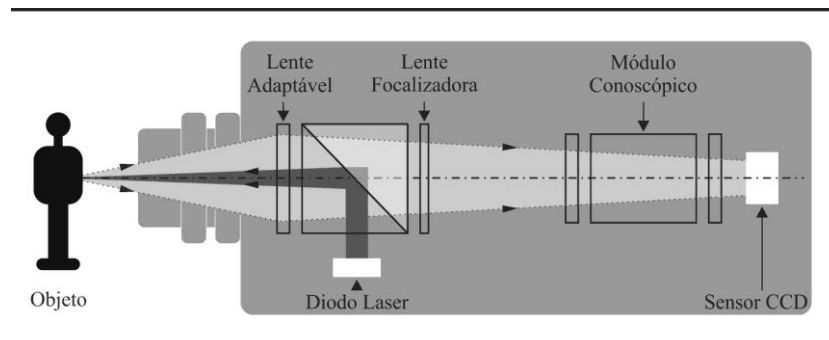
Tabela 2 – Comparação entre os sistemas de digitalização tridimensional sem contato e as respectivas precisões.

Sistema de Digitalização	Precisão nominal (mm)
Digimill 3D	<0,035
Vivid 9i	0,032
VIUscan	0,050
Artec MHT	0,100
DAVID	0,400

Modificado de Silva (2011).

Esse sistema tem como princípio a emissão, através de um diodo, de um feixe de laser. Este é refletido por um divisor de feixe e incide pontualmente sobre o objeto a ser medido. A luz dispersada que retorna da peça e atravessa o módulo conoscópico (composto por um cristal birrefringente) é detectada pelo sensor CCD conforme mostrado na Figura 21 (FREITAS, 2006; SILVA, 2011).

Figura 21 – Representação gráfica do sistema de operação por Holografia Conoscópica.



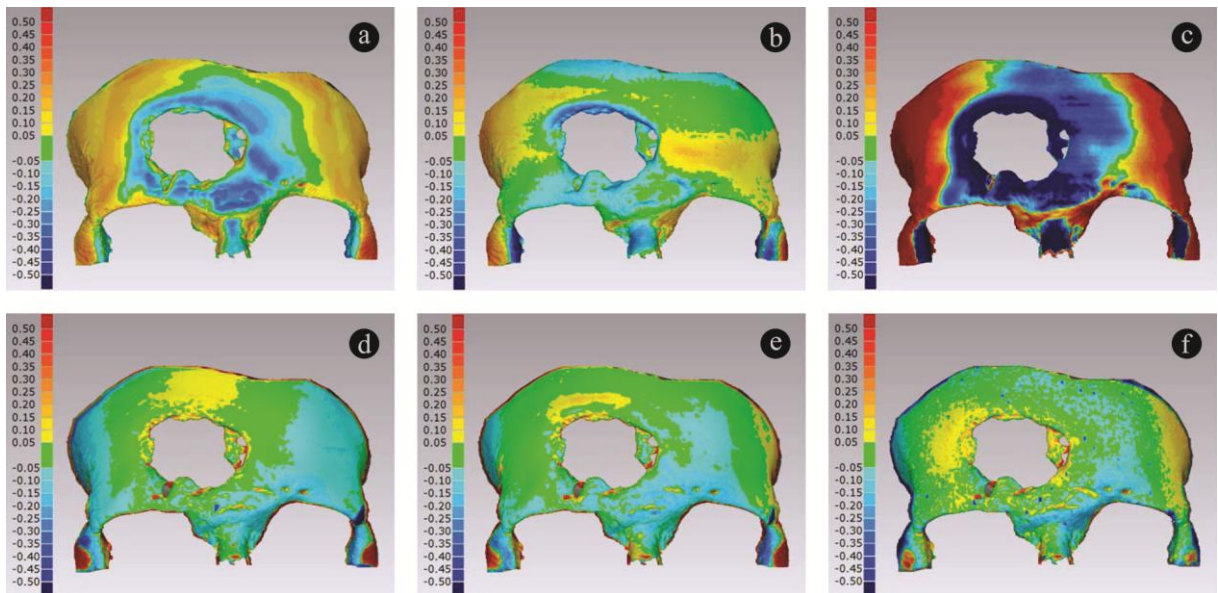
Modificado de Freitas (2006).

Os dados capturados são processados como um conjunto de coordenadas (x, y, z) da superfície no espaço tridimensional. De acordo com as dimensões da área analisada e a precisão requerida, uma varredura superficial pode retornar milhares de pontos (nuvem de pontos). A manipulação computacional permite gerar curvas, malhas, superfícies e sólidos tridimensionais compatíveis com os sistemas CAD/CAE/CAM. Este processo de obtenção de modelos virtuais a partir de modelos físicos ocorre em um processo inverso à engenharia convencional, na qual o virtual gera o físico (FREITAS, 2006; BERTOL, 2008; SILVA, 2011).



Dentre as possíveis aplicações, a digitalização tridimensional a laser pode ser utilizada como instrumento de análise dimensional de objetos. Pode-se citar o trabalho de Rockenbach *et. al.* (2009), no qual foram verificadas as diferenças entre protótipos de biomodelos de crânios fabricados por diferentes processos e materiais (Figura 22). O autor conclui que os processos de prototipagem rápida apresentam melhor definição em regiões mais detalhadas, nas quais ferramentas convencionais de usinagem CNC não alcançam. Podem ser utilizadas, então, ferramentas menores, perdendo-se, entretanto, a vantagem do menor tempo apresentada pela usinagem.

Figura 22 – Imagens geradas pelo *software* Geomagic Qualify, os quais apontam os erros dimensionais dos protótipos fabricados por diferentes processos.



(a) Impressão a jato de tinta – PolyJet; (b) Sinterização seletiva a laser; (c) Impressão 3D; (d) Usinagem CNC em Nylon; (e) Usinagem CNC em MDF; (f) Usinagem CNC em PU.

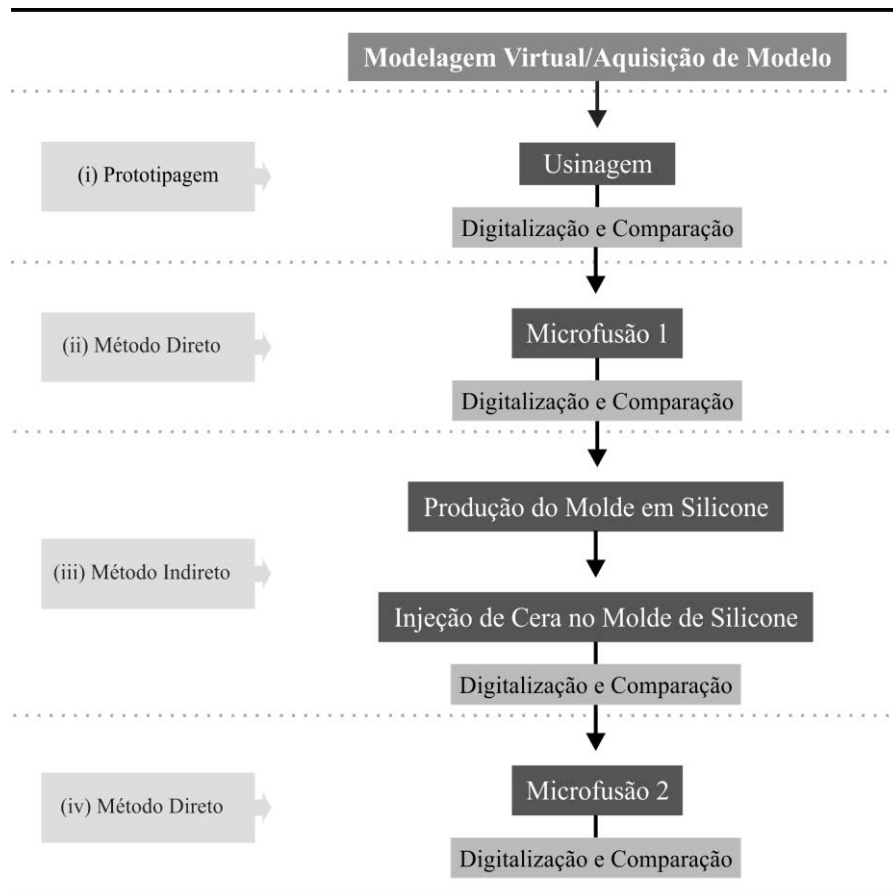
Modificado de Rockenbach *et. al.* (2009).

Diante desses dados, a digitalização tridimensional a laser mostrou-se como a ferramenta adequada para auxiliar nas análises dimensionais necessárias para a realização da presente pesquisa.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem como intuito contribuir à produção do setor joalheiro, principalmente, no que tange à reprodutibilidade de peças confeccionadas em materiais metálicos, tais como as ligas de cobre. Para tanto, o método de obtenção das peças foi dividido em quatro etapas (Figura 23): (i) prototipagem dos modelos por usinagem CNC; (ii) microfusão para obtenção das peças piloto – método direto; (iii) produção do molde e injeção de cera – método indireto; e (iv) microfusão para obtenção das peças finais – método direto.

Figura 23– Organização das etapas contempladas neste trabalho.

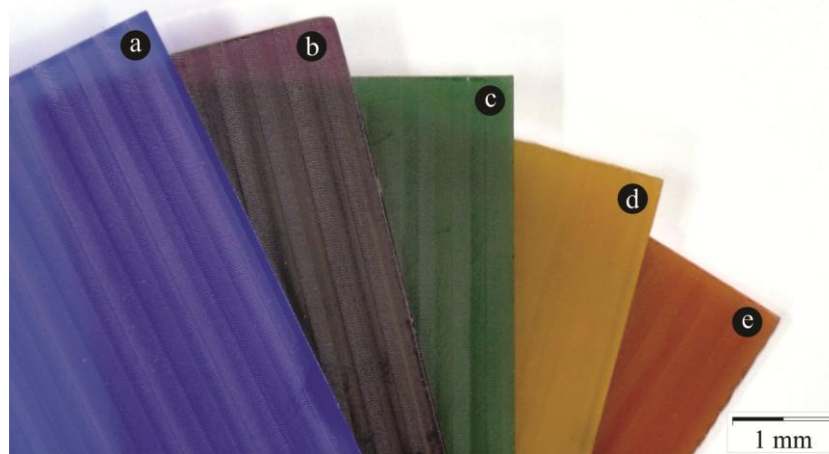


Cabe ressaltar que a principal ferramenta analítica utilizada como método de comparação entre as etapas de investigação foi a digitalização tridimensional a laser. A seguir, é dada a descrição detalhada de cada técnica, bem como dos materiais que foram utilizados.

### 3.1 Ceras para modelagem

Nesta pesquisa foram utilizadas cinco ceras da linha Ferris® File-a-wax®, da empresa Freeman (Figura 24). Conforme apresentado previamente no item 2.6.1, as ceras para modelagem são identificáveis por sua coloração, uma vez que apresentam diferentes propriedades. Dentre essas características, destaca-se a dureza tendo em vista sua relevância nas operações de usinagem: a cera azul possui dureza Shore D 52; a roxa e a verde, dureza 55, a *gold*, dureza 58; e a *wizard*, dureza 63. Destaca-se que, atualmente, apenas as três primeiras são comercializadas por representantes no Brasil, a *gold* (coloração amarelada) e a *wizard* (coloração alaranjada) foram adquiridas através de representantes internacionais. Outras especificações encontram-se na Tabela 3.

Figura 24 – Ceras para modelagem utilizadas pela indústria joalheira.



Amostras de coloração (a) azul, (b) roxa, (c) verde, (d) *gold* e (e) *wizard*.

Tabela 3 – Especificações das ceras para modelagem.

Cor de Referência	Dureza (Shore D)	Viscosidade a 150 °C (cPs)	Ponto de Fusão (°C)
Azul	52	3650	108
Roxa	55	3350	108
Verde	55	1560	109
<i>Gold</i>	58	2030	121
<i>Wizard</i>	63	3550	121

Modificado de FREEMAN (2012).

### 3.2 Obtenção de modelos via usinagem CNC

Todos os procedimentos de usinagem foram realizados no equipamento Digimill 3D, marca Tecnodrill® (Figura 25), localizado nas dependências do Laboratório de Design e Seleção de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LdSM/UFRGS). Este equipamento é composto por um cabeçote de fresamento, o qual é comandado por CNC na mesma máquina que realiza digitalização a laser. O sistema tem potência de 1.1 kW, avanço máximo de 4.000 mm/min e rotação máxima de 24.000 rpm. Para a realização deste trabalho, mantiveram-se constantes a velocidade de rotação, em 6.000 rpm, e a precisão de cálculo, de 0,01 mm.

Figura 25 – Sistema de usinagem CNC e digitalização tridimensional Digimill 3D, LdSM/UFRGS.

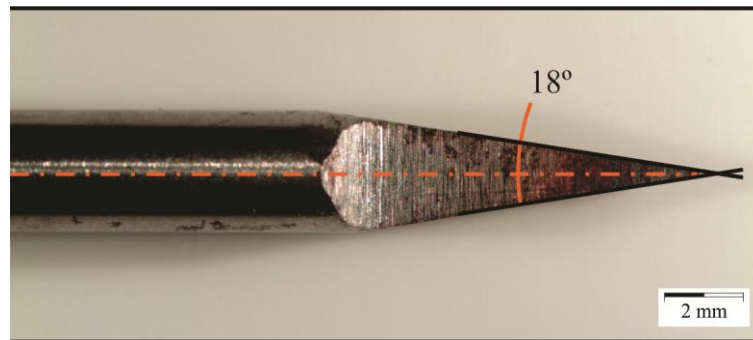


(a) Visão geral do equipamento e, (b) em destaque, os cabeçotes.

#### 3.2.1 Ensaios preliminares

A fim de avaliar o acabamento obtido no processo de usinagem CNC nas ceras para modelagem, foram realizados ensaios preliminares os quais possibilitaram a sistematização das operações subsequentes. Estabeleceu-se, então, um padrão geométrico com dimensões totais de 20 x 10 x 0,7 mm. Visando aproximar as dimensões delgadas utilizadas em peças de joalheria, foram determinadas seções que variam de 0,1 a 1 mm de espessura, fixando-se uma distância de 0,5 mm entre elas. Os ensaios foram realizados com uma fresa cônica com ângulo de 18°, diâmetro da haste de 3 mm e ponta reta de 0,2 mm (Figura 26). As operações de usinagem foram executadas com penetração de trabalho de 2,5% do diâmetro da haste e profundidade de corte de 0,35 mm.

Figura 26 – Fresa cônica de 0,2 mm utilizada.



O primeiro ensaio teve como principal objetivo verificar se a temperatura das amostras influenciaria na aderência do cavaco durante as operações de usinagem. Para tanto, selecionou-se a cera de coloração azul, por apresentar baixo ponto de fusão (108 °C). Durante um período de 72 horas, manteve-se uma amostra em estufa a uma temperatura de 35 °C e outra amostra refrigerada a -5 °C. A variação da temperatura durante este ensaio foi medida pelo termômetro infravermelho Minipa<sup>®</sup>, modelo MT-395.

Inicialmente, arbitrou-se uma ampla faixa de velocidades de avanço, partiu-se de 500 mm/min, parâmetro utilizado atualmente na indústria, a qual foi incrementada em duas, três e quatro vezes. Assim, para operação do equipamento, definiu-se 2000 mm/min como 100% da velocidade de avanço ensaiada, sendo as demais ajustadas proporcionalmente, conforme a Tabela 4.

Ao descartar-se a influência da temperatura das amostras na aderência do cavaco, repetiram-se os ensaios de usinabilidade com as cinco ceras para modelagem, desta vez, em temperatura ambiente (23 °C). Observado um melhor acabamento entre as velocidades de avanço de 500 e 1000 mm/min, quatro velocidades intermediárias foram acrescentadas (600, 700, 800 e 900 mm/min), totalizando oito ensaios de avanço em cinco materiais diferentes (Tabela 4).

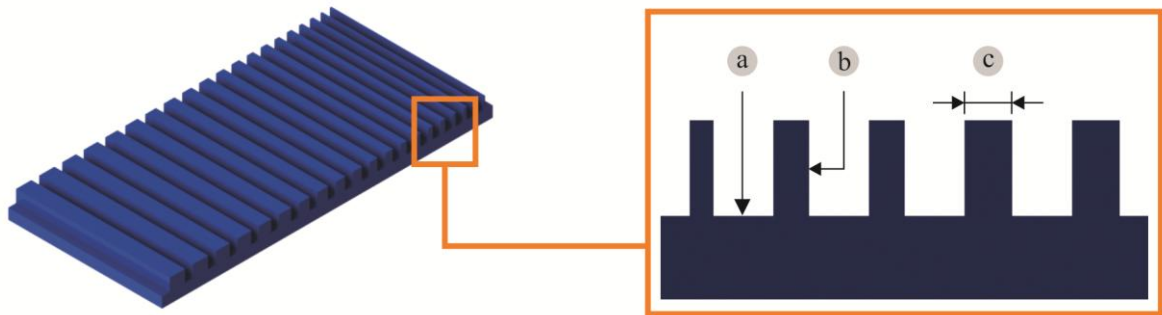
Tabela 4 – Velocidades de avanço ensaiadas nas ceras.

Avanço (%)	25	30*	35*	40*	45*	50	75	100
Avanço (mm/min)	500	600*	700*	800*	900*	1000	1500	2000

\*Velocidades intermediárias acrescentadas.

Os resultados foram avaliados quanto ao acabamento: na superfície inferior (Figura 27a) e nas superfícies laterais (Figura 27b), em função das marcas deixadas pela ferramenta; e nas seções do padrão geométrico (Figura 27c), em função de trincas e quebras decorrentes do processo de usinagem.

Figura 27 – Padrão geométrico usinado e, em destaque, seção representativa da peça onde são apontados os aspectos analisados.



Quanto ao acabamento das peças, analisou-se (a) a superfície inferior, (b) as superfícies laterais e (c) as seções do padrão usinado.

Para análise dos resultados, imagens das amostras ampliadas em sete vezes foram adquiridas com o microscópio estereoscópico modelo SZX16, marca Olympus® (Figura 28), no LdSM/UFRGS.

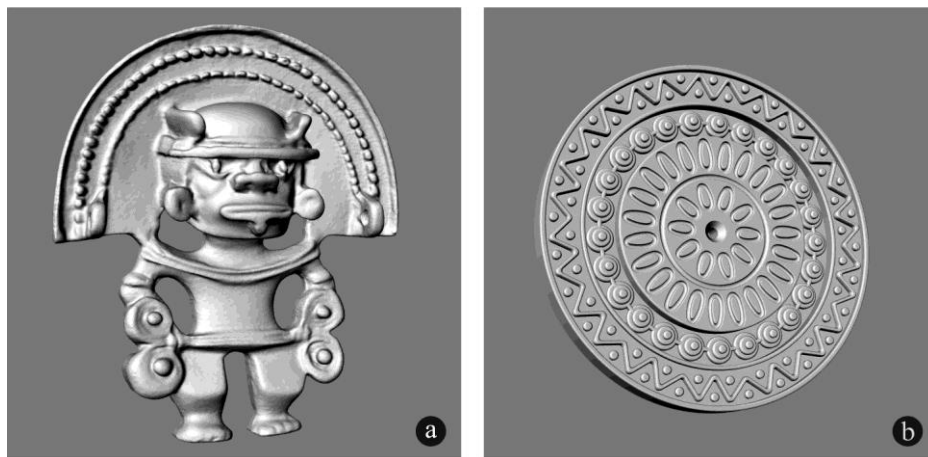
Figura 28 – Equipamento de microscopia estereoscópica utilizado para aquisição das imagens das amostras.



### 3.2.2 Execução dos modelos

Foram selecionados como casos a serem estudados nesta pesquisa os modelos virtuais de uma peça histórica, a réplica do “*hombre murciélago*”<sup>3</sup> (Figura 29a), e de uma peça atual, uma medalha<sup>4</sup> (Figura 29b). Os modelos virtuais tridimensionais das peças foram, então, exportados para o *software* EdgeCAM para elaboração da estratégia de usinagem.

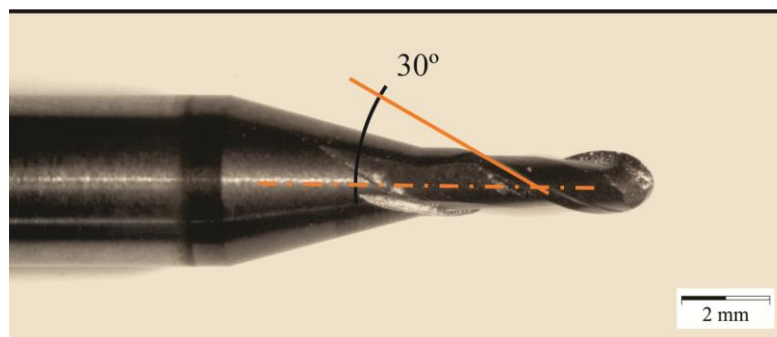
Figura 29 – Modelos utilizados para avaliação dos processos de prototipagem em estudo.



(a) Modelo real convertido em modelo virtual por digitalização tridimensional a laser e (b) modelo virtual de peça elaborada diretamente em *software* CAD.

Para execução dos modelos, o desbaste foi realizado por uma fresa de topo esférico com 1,5 mm de diâmetro de ponta e ângulo de corte de 30° (Figura 30). Para o acabamento, foi utilizada a fresa cônica com diâmetro de ponta 0,2 mm e ângulo de 18° (Figura 26).

Figura 30 – Fresa de topo esférico de 1,5 mm utilizada.



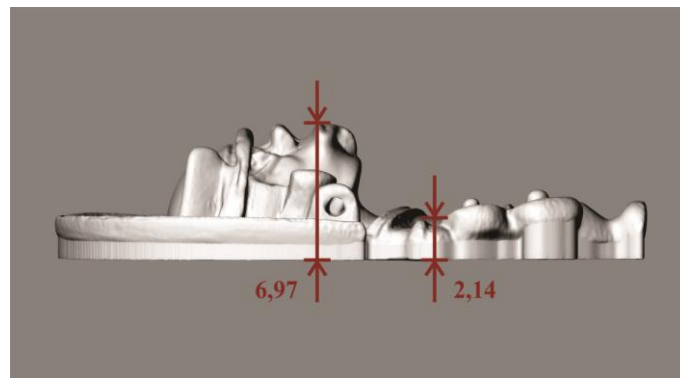
<sup>3</sup> Modelos obtidos pelo LdSM/LAFUN para realização do trabalho de Javier Suárez (Uniandes) em intercâmbio na UFRGS pelo Convênio Marco de Cooperação (processo nº 23078.022366/11-02).

<sup>4</sup> Desenvolvido pelo designer Átila Ferreira.

### 3.2.2.1 *Hombre murciélag*

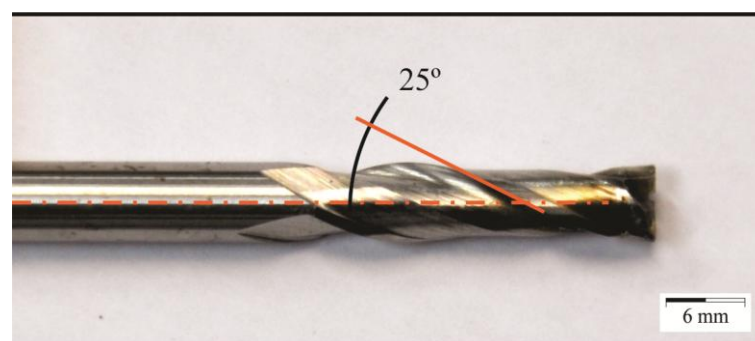
No caso específico deste modelo, observou-se que a diferença de material entre a região mais estreita e a mais espessa (Figura 31a) poderia ocasionar defeitos de fundição na peça piloto. Definiu-se, portanto, que a porção posterior da peça seria usinada para remoção do material sobressalente, resultando em uma peça mais leve e de espessura mais homogênea. Sendo necessária a realização de operações em duas faces opostas dos blocos de cera, adaptou-se um esquadro alinhado aos eixos x e y do equipamento, o qual permitiu esta intercambialidade sem que as coordenadas de referência para usinagem do modelo fossem perdidas.

Figura 31 – Diferença de espessuras no *hombre murciélag* (unidades em mm).



A execução do modelo do *hombre murciélag* teve início com a usinagem da parte posterior. O excesso de material foi removido com a utilização de uma microfresa de topo reto com 0,5 mm de diâmetro e ângulo de 30° e penetração de trabalho de 20%; já o recorte da peça foi feito com uma fresa de topo reto, com 6 mm de diâmetro e ângulo de 25° (Figura 32).

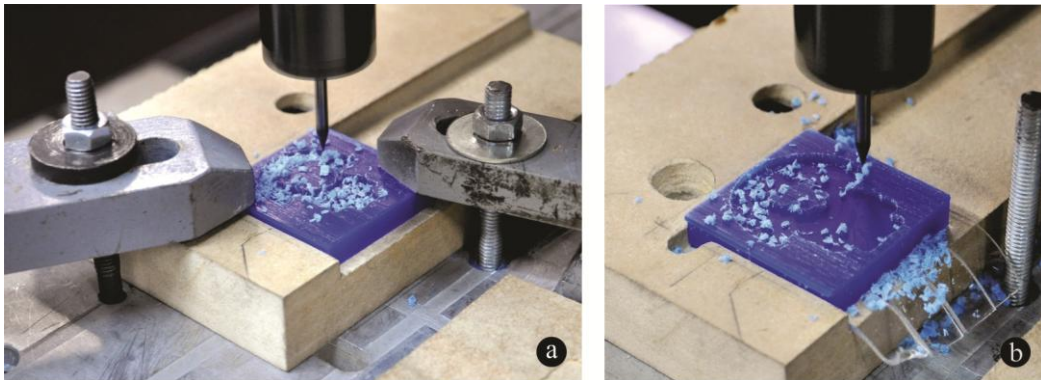
Figura 32 – Fresa de topo reto 6 mm utilizada.





Para a realização dos procedimentos seguintes, o bloco foi rotacionado 180° em torno do eixo x para ser corretamente posicionado no esquadro e duas possibilidades de fixação foram verificadas: por grampos sobre a peça (Figura 33a) e por fita dupla-face de alto desempenho sob a peça (Figura 33b). Para o desbaste utilizou-se 20% de penetração de trabalho. O acabamento, que anteriormente era configurado para operar em 40% do diâmetro da ponta, foi ajustado para 1% devido à geometria da ferramenta.

Figura 33 – Métodos de fixação dos blocos de cera utilizados para usinagem do modelo do *hombre murciélag*.

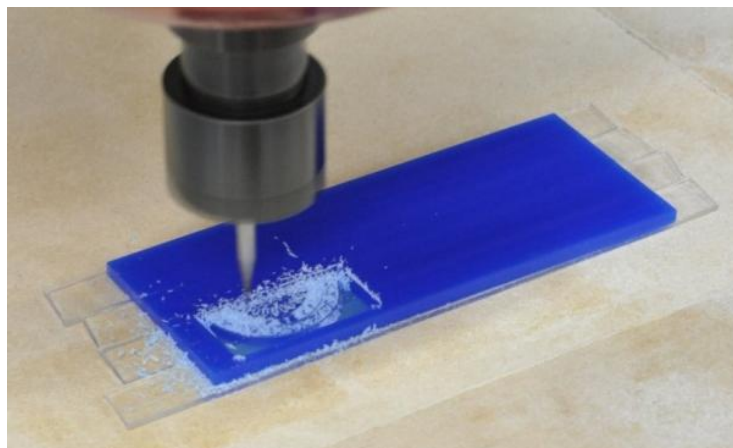


(a) fixação por parafusos e grampos; (b) fixação por fita dupla-face de alto desempenho.

### 3.2.2.2 Medalha

As operações de usinagem deste modelo foram realizadas em apenas uma das faces do bloco de cera para modelagem. Para fixação do material sobre a mesa de usinagem fez-se uso de fita dupla-face de alto desempenho (Figura 34). Assim como na execução do modelo do *hombre murciélag*, a penetração de trabalho foi de 20% para o desbaste e de 1% para o acabamento.

Figura 34 – Fixação dos blocos de cera para usinagem da medalha.



### 3.3 Obtenção de peças piloto via microfusão

A obtenção das peças piloto em material metálico se deu pelo método direto, ou seja, a partir dos modelos executados em cera, ao final da microfusão, obtêm-se as réplicas em metal. Esta etapa da pesquisa foi realizada na empresa Portal Joias, no município de Soledade.

Os modelos usinados em cera foram unidos por meio de um bastão do mesmo material (canal de alimentação), configurando a árvore de modelos (Figura 35a). Para obtenção do molde cerâmico, essa árvore foi imersa em material refratário Master, da marca Pasom (Figura 35b), o qual foi preparado com 60% do peso em água. Com o gesso parcialmente curado, foi realizada a deceragem em forno elétrico modelo Vulcano 8T, marca BQZ (Figura 35c).

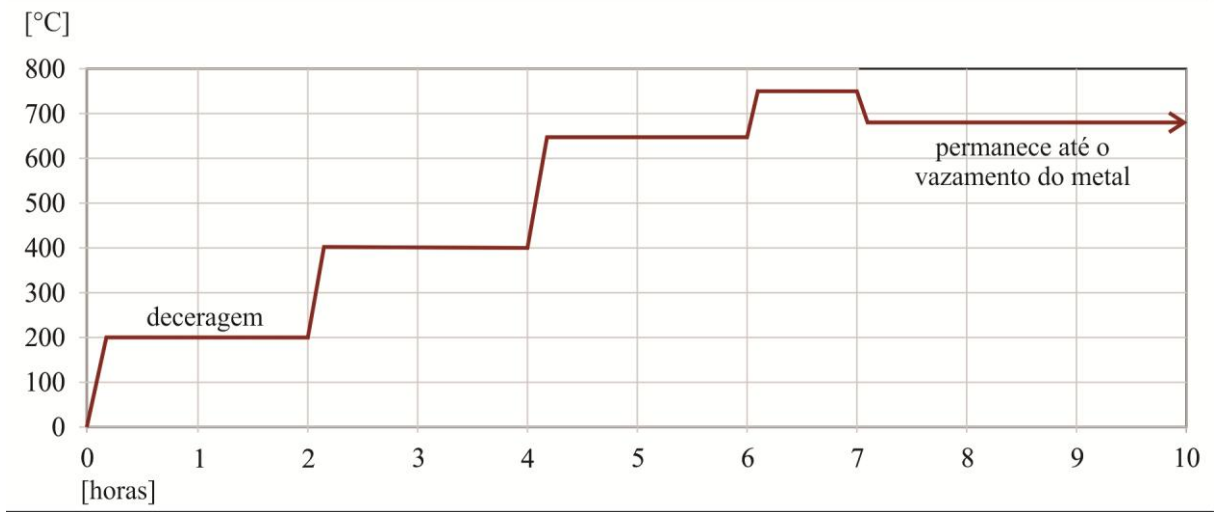
Figura 35 – Fase inicial do processo de microfusão.



(a) Construção da árvore de modelos com as peças em diferentes tipos de cera; (b) construção do molde em refratário cerâmico; e (c) equipamento utilizado para deceragem e calcinação.

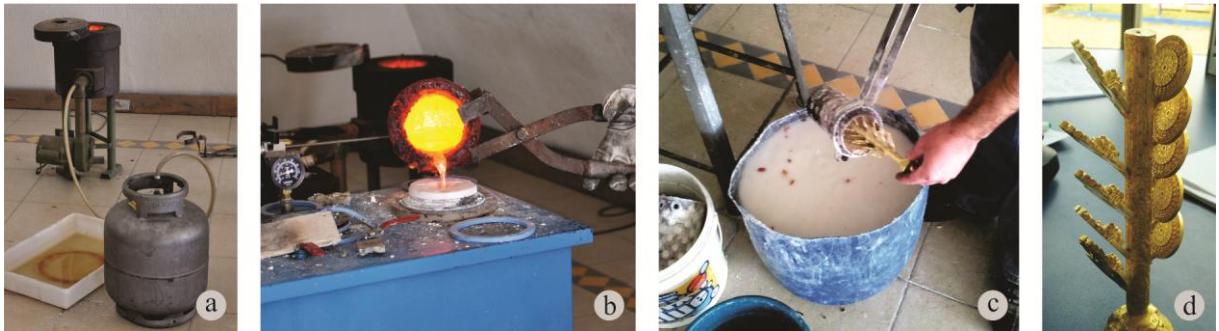
Para a eliminação da cera, manteve-se o cilindro a uma temperatura de 200 °C por um período de duas horas. Tendo finalizado esta etapa, o molde permaneceu no mesmo forno por mais oito horas e a temperatura foi sendo gradativamente aumentada, em diferentes intervalos de tempo, até alcançar 760 °C. Nas duas horas subsequentes, a temperatura foi mantida em 680 °C (Figura 36), completando, assim, a cura do material cerâmico.

Figura 36 – Ciclo de calcinação aplicado para completa cura do material cerâmico.



O molde foi retirado do forno e preparado para receber o latão (85% de cobre e 15% de zinco). O processo de fundição deste metal foi feito em uma forja a gás (Figura 37a), a qual permanece em 1100 °C até que o latão esteja completamente em estado líquido. Para o vazamento (Figura 37b), utilizou-se a inclusora Bomba de Vácuo 2000, da Zezimaq, a uma pressão de 700 mmHg. Depois desta etapa, o molde de gesso foi descartado (Figura 37c), revelando, então, as peças metálicas como resultado final da microfundição (Figura 37d).

Figura 37 – Fase final do processo de microfundição.



(a) Fundição do metal em forja a gás; (b) vazamento do latão em estado líquido; (c) descarte do molde cerâmico; e (d) árvore de modelos obtida com material metálico.

As peças obtidas foram destacadas do canal de ataque e receberam acabamento (Figura 38). Após a finalização deste procedimento, serviram como modelo para produção dos moldes de silicone.

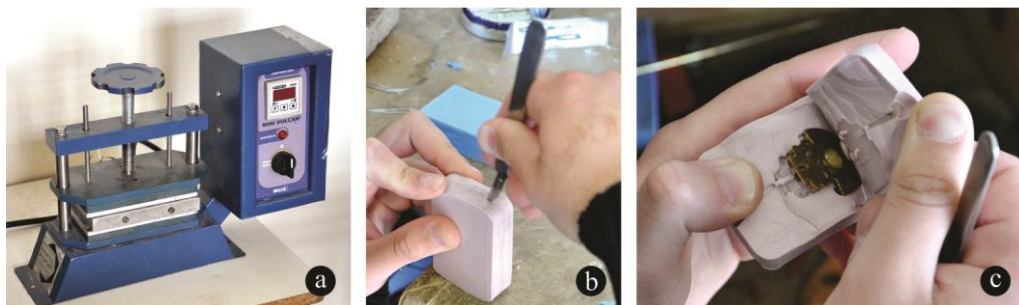
Figura 38 – Processo de acabamento das peças após retirá-las da árvore de modelos.



### 3.4 Obtenção de modelos via injeção de cera

A produção dos moldes de borracha de silicone foi realizada no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul (CT Pedras), no município de Soledade. Para tanto, definiu-se, que os materiais e procedimentos para vulcanização seriam mantidos de acordo com a experiência da instituição no atendimento à indústria. Foram utilizadas lâminas de borracha de silicone Violeta (dureza Shore A 40), da marca italiana Nicem, para envolver o modelo. A borracha, devidamente inserida na forma, permaneceu por 1 hora a uma temperatura de 150 °C na vulcanizadora Mini Vulcan, da BQZ Internacional (Figura 39a). Depois de vulcanizado, o molde de borracha de silicone foi aberto, com o auxílio de uma lâmina de bisturi, por um processo inteiramente manual (Figura 39b,c).

Figura 39 – Processo de obtenção do molde de silicone.



(a) Equipamento de vulcanização Mini Vulcan, CT Pedras; (b) abertura do molde já vulcanizado; e (c) molde parcialmente aberto revelando o modelo metálico em seu interior.

Com o molde totalmente aberto, a etapa subsequente foi a injeção da cera Vermelha, marca Pasom. Este procedimento foi realizado em um equipamento que trabalhou a uma temperatura de 60 °C e com pressão de 0,7 kgf/cm<sup>2</sup> (Figura 40).

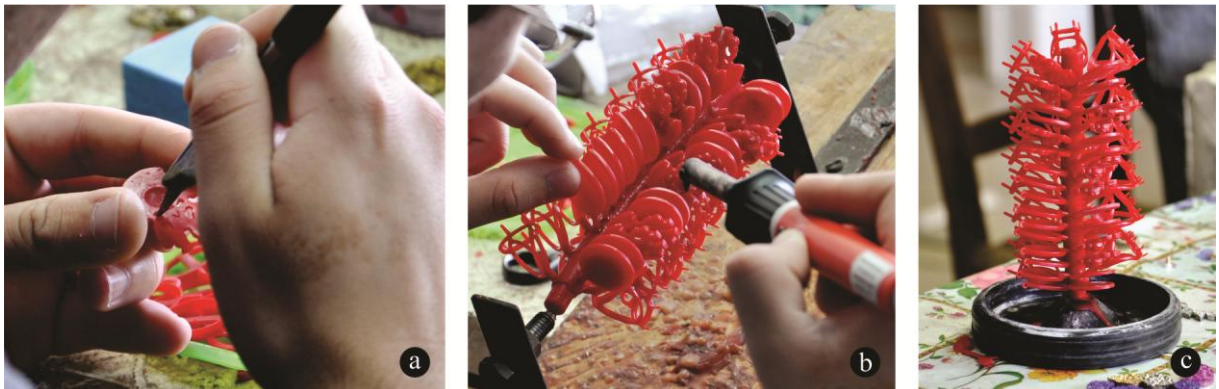
Figura 40 – Processo de injeção de cera nos moldes de borracha de silicone.



(a) Equipamento de injeção; (b) Preenchimento do molde com cera para injeção; e (c) Cera sólida com o formato do modelo.

O processo de obtenção de modelos por injeção de cera foi finalizado com a limpeza das peças (Figura 41a) e a montagem da árvore (Figura 41b,c).

Figura 41 – Montagem da árvore de modelos com peças de cera para injeção.



(a) Limpeza das peças; (b) Montagem da árvore de modelos; e (c) Árvore de modelos finalizada.

### 3.5 Obtenção das peças finais via microfusão

A árvore de modelos foi alocada no cilindro, onde, posteriormente, foi submersa pela massa refratária para, então, receber o metal em estado líquido. Os equipamentos, os materiais e os parâmetros desta etapa permaneceram os mesmos utilizados para produção das peças piloto (Item 3.3).

### 3.6 Análise dimensional

A fim de averiguar a fidedignidade da reprodução de detalhes – pela comparação virtual com o modelo original – foi realizada a aquisição das superfícies das peças obtidas em cada etapa dos processos de produção descritos neste trabalho. Para tanto, foi utilizado o equipamento de digitalização tridimensional a laser por holografia conoscópica modelo Digimill 3D, marca Tecnodrill<sup>®</sup>, instalado nas dependências do LdSM/UFRGS.

Conforme previamente descrito no item 3.2, o Digimill 3D é um equipamento híbrido: em seu cabeçote para usinagem CNC, é possível acoplar um cabeçote emissor de laser pontual modelo ConoProbe 1.000, marca Optimet<sup>®</sup>. Este sistema opera com 1 mW de potência máxima e 655 nm de comprimento de onda. Como característica, ressalta-se a possibilidade de aquisição de até 1.000 pontos por segundo e a precisão é variável de acordo com a lente utilizada. No equipamento disponível no LdSM, podem ser utilizadas três lentes: 50 mm, 150 mm e 250 mm (Tabela 5). Capaz de atender o tamanho das peças produzidas nesta pesquisa, a lente de 50 mm foi selecionada por apresentar maior precisão.

Tabela 5 – Características de Lentes Optimet (em mm) passíveis de serem utilizadas em equipamento de digitalização tridimensional a laser (LdSM/UFRGS).

Lente	50 mm	150 mm	250 mm
Precisão (Z)	0,006	0,035	0,100
Faixa de captura (Z)	8	70	180
Distância do objeto (Z)	42	140	240
Resolução Lateral (X)	0,015	0,050	0,100*

\*valor estimado

Modificado de Silva (2011).

Os processos de digitalização foram realizados com resolução nominal de  $0,01 \text{ mm}^5$  e, devido características de reflexão especular (das ceras e do metal), as peças foram recobertas com o revelador não aquoso Metal-Chek D70 (Figura 42). Os procedimentos adotados para aquisição das superfícies foram obtidos conforme descrito por Silva (2006).

Figura 42 – Digitalização dos modelos, recobertos pelo pó revelador, com o escâner Digimill 3D, LdSM/UFRGS.



A avaliação dos dados obtidos foi realizada com auxílio do *software* Geomagic Qualify™. Este programa permitiu verificar a precisão de cada processo em estudo, bem como a reprodução dos detalhes desde os modelos até a peça final. Devido à geometria apresentada pelos objetos, as nuvens do *hombre murciélag* permitiram alinhamento automático (*best fit alignment*), diferentemente daquelas da medalha cuja montagem foi inteiramente manual.

---

<sup>5</sup> Valor definido de acordo com a precisão de cálculo utilizada para as operações de usinagem.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Obtenção de modelos via usinagem CNC

A obtenção dos modelos por usinagem CNC teve início com uma série de operações preliminares. Com os dados obtidos nesta etapa, foi possível determinar os parâmetros utilizados nos procedimentos subsequentes. A seguir, são apresentados os resultados gerados pelos ensaios e pelo processo de validação.

#### 4.1.1 Ensaios preliminares

Conforme descrito no item 3.2.1, foram realizados ensaios de usinagem CNC em dois grupos de cera para modelagem, nos quais o primeiro grupo foi previamente aquecido e o segundo, resfriado. Para tanto, o ambiente foi mantido em 23 °C.

Ao dar início às operações de usinagem, o termômetro infravermelho já registrava a temperatura das amostras muito próxima a do recinto. Aquelas que foram aquecidas mantiveram a temperatura constante a partir do terceiro ensaio, executado com velocidade de avanço de 1000 mm/min. Já aquela resfriada permaneceu com a mesma temperatura a partir do segundo ensaio, realizado com velocidade de avanço de 1500 mm/min (Tabela 6).

Tabela 6 – Temperaturas registradas por termômetro infravermelho durante as operações de usinagem das amostras previamente aquecidas e resfriadas.

<b>Avanço (mm/min)</b>	<b>2000</b>	<b>1500</b>	<b>1000</b>	<b>500</b>
<b>Amostra Aquecida</b>	25,0 °C	24,1 °C	23,8 °C	23,8 °C
<b>Amostra Resfriada</b>	21,3 °C	22,9 °C	22,9 °C	22,9 °C

Este ensaio revelou que a temperatura das amostras não interfere na aderência do cavaco durante a usinagem. Além disso, indicou que as ceras são ineficientes quanto à capacidade de manter, por períodos longos, uma temperatura divergente daquela estabelecida no local onde estão alocadas.

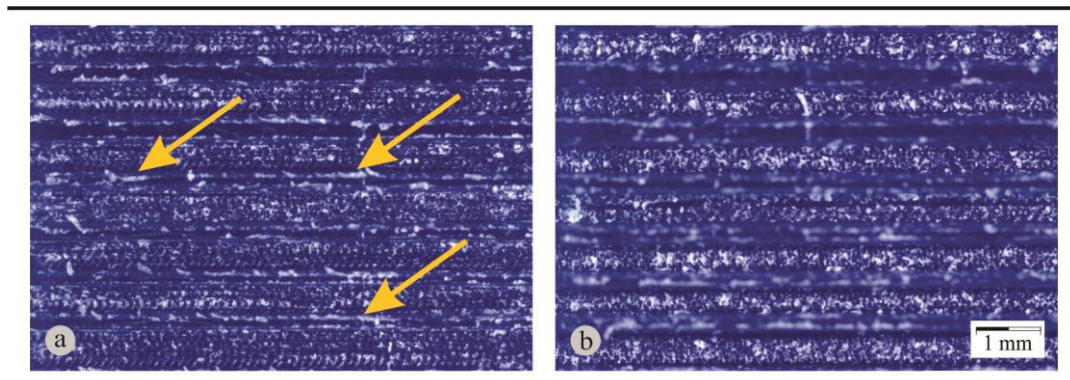


Diante dos resultados, operações de usinagem com velocidades de avanço de 500, 1000, 1500 e 2000 mm/min foram repetidas em amostras armazenadas em temperatura ambiente. Após a realização destes ensaios, observou-se que, de uma maneira geral, as cinco amostras apresentaram melhor acabamento nos padrões gerados com as velocidades de avanço de 500 e de 1000 mm/min. Assim, optou-se por acrescentar quatro velocidades intermediárias (600, 700, 800 e 900 mm/min) a fim de se obter mais detalhes à pesquisa.

Verificou-se, então, que os diferentes avanços ensaiados para obtenção dos padrões geométricos nas amostras resultaram em diferentes acabamentos: quando avaliadas em conjunto, foi possível observar uma qualidade superior no acabamento obtido pelas ceras *gold* e *wizard*; já isoladamente, foram registrados diferentes comportamentos dos materiais frente às operações realizadas. Os dados obtidos nos ensaios preliminares de usinagem são apresentados em uma concisa análise onde são apontados os melhores e os piores resultados obtidos em cada tipo de cera. O quadro de avaliação geral encontra-se no Apêndice 1.

Durante os procedimentos, a cera azul mostrou-se com alta elasticidade: ao passar a ferramenta por seções estreitas, estas, diversas vezes, deformaram e retornaram à posição original sem que houvesse quebra ou fissura do material. Quanto ao acabamento, observou-se que, quanto mais alta a velocidade de avanço, mais perceptíveis são as marcas deixadas pela ferramenta na superfície inferior das amostras usinadas. Ainda assim, pode-se dizer que é ínfima a diferença entre essas marcas. Em contraponto, nota-se que as superfícies laterais ficam mais irregulares à medida que se diminui a velocidade de avanço. Portanto, considera-se 700 mm/min a velocidade de avanço ideal para a usinagem da cera azul (Figura 43).

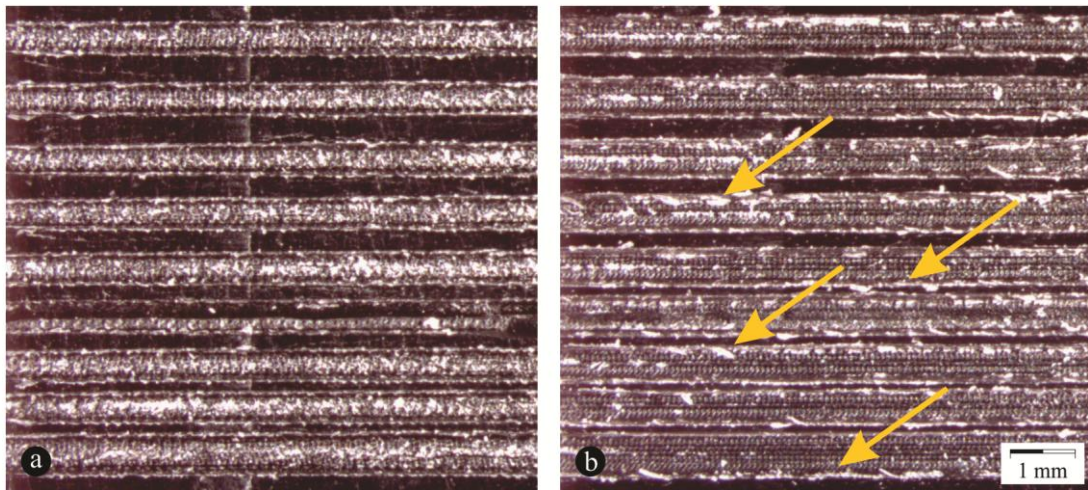
Figura 43 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera azul.



(a) Melhor resultado ( $V_f = 700$  mm/min). Em destaque, as marcas deixadas pela ferramenta nas superfícies laterais da amostra. (b) Pior resultado ( $V_f = 1000$  mm/min). Em toda a extensão da superfície inferior podem ser observadas as marcas da ferramenta.

O acabamento resultante dos ensaios realizados na cera de coloração roxa (Figura 44) foi o mais insatisfatório entre as amostras em estudo. Tanto nas velocidades de avanço mais altas (1000 mm/min) quanto nas mais baixas (500 mm/min), as marcas da ferramenta ficaram fortemente aparentes na superfície inferior. As peças finalizadas ficam, por isso, com um aspecto "sujo" dando a impressão de que ainda há cavaco aderido à amostra. Dentre os resultados obtidos com este material, considerou-se, portanto, como aceitável, aquele em que as superfícies laterais não ficaram tão marcadas pela ferramenta à velocidade de 1000 mm/min.

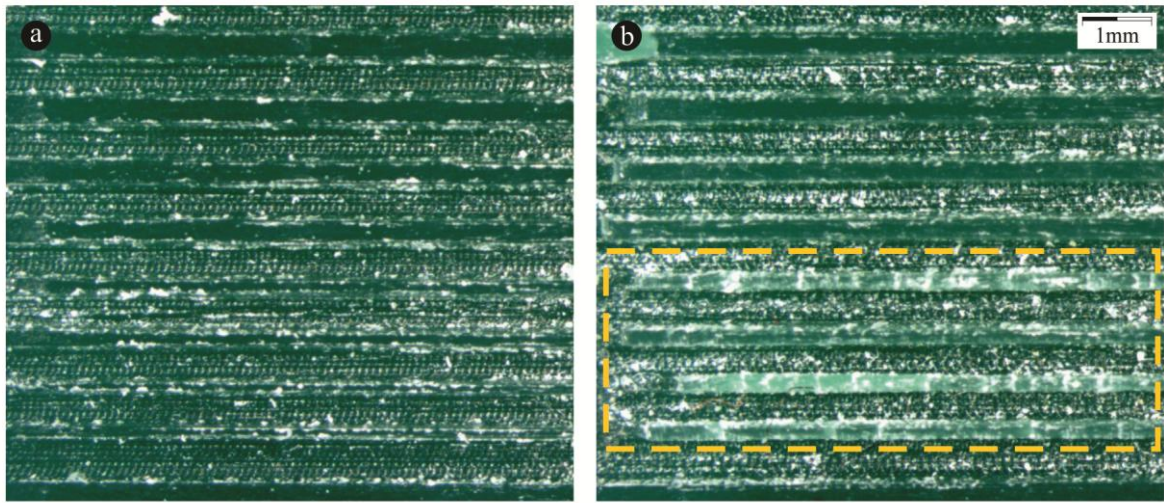
Figura 44 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera roxa.



(a) Melhor resultado ( $V_f = 1000$  mm/min). Apesar das marcas da ferramenta na superfície inferior, as superfícies laterais não apresentam rebarbas. (b) Pior resultado ( $V_f = 500$  mm/min). Em destaque, as marcas deixadas pela ferramenta nas superfícies laterais da amostra.

Nos ensaios realizados na cera verde (Figura 45) com as velocidades de avanço de 800, 900 e 1000 mm/min, as seções de 1 e 2 mm se desprenderam da superfície inferior. Ao avaliar o acabamento da superfície lateral e da superfície inferior, o resultado dos procedimentos ajustados com velocidade de 500 e 700 mm/min mostra-se equivalente. Os padrões obtidos com 600 mm/min geraram melhor acabamento superficial e as seções menos espessas mantiveram-se íntegras.

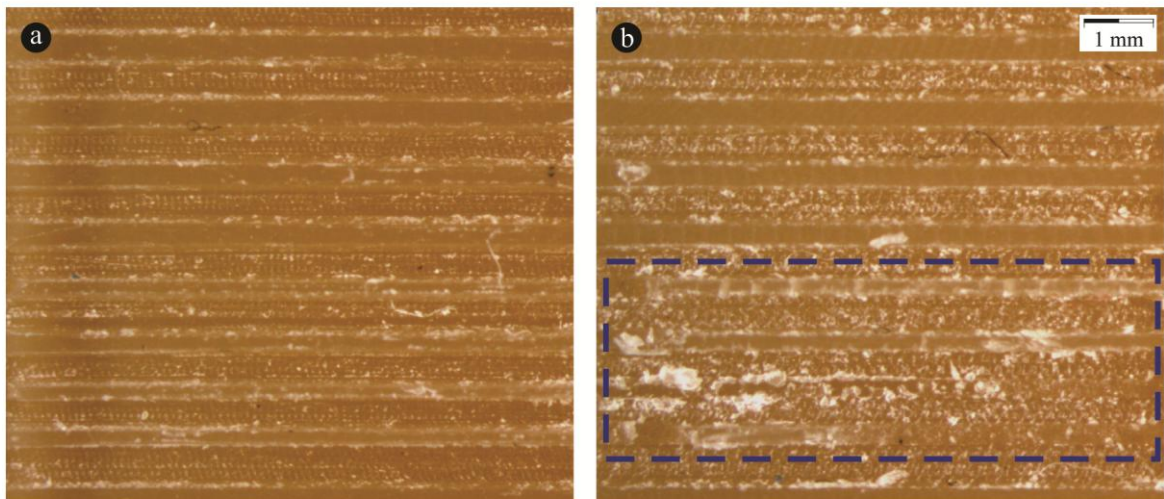
Figura 45 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera verde.



(a) Melhor e (b) pior resultado. Obtidos com, respectivamente, 600 e 800 mm/min. Em destaque, as seções de 1 e 2 mm trincadas e desprendidas da base da amostra.

Com 1000 e 500 mm/min, as seções menos espessas da cera *gold* (Figura 46) trincaram e algumas até foram consumidas durante as operações de usinagem. As velocidades de 600 a 900 mm/min resultaram em poucas marcas da ferramenta na superfície inferior das amostras. Considerou-se como resultado mais satisfatório o ensaio executado com velocidade de 600 mm/min uma vez que apresenta maior regularidade nas superfícies laterais.

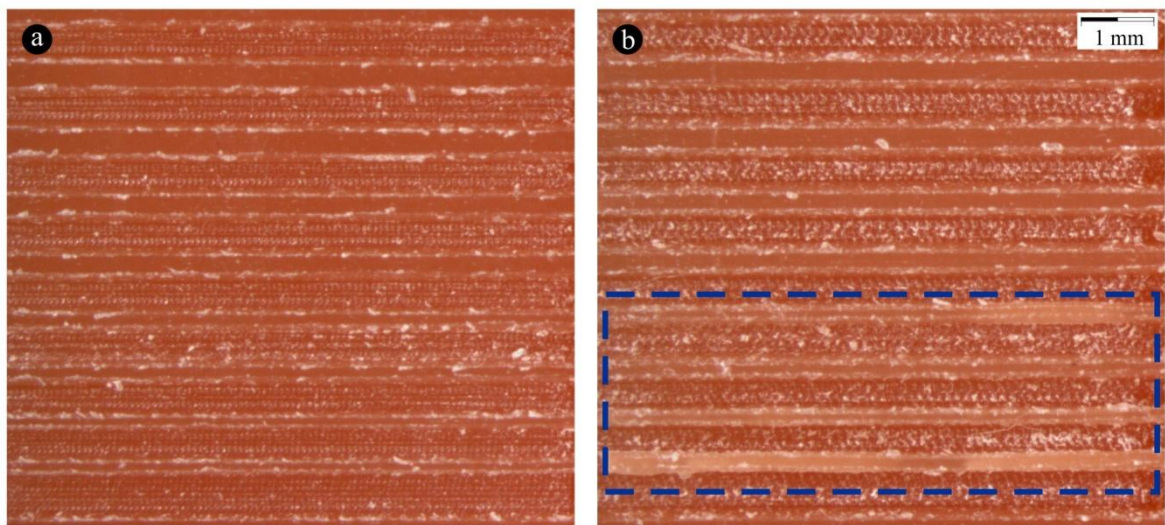
Figura 46 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera *gold*.



(a) Melhor resultado ( $V_f = 600$  mm/min). As marcas da ferramenta nas superfícies laterais e na superfície inferior da amostra são pouco perceptíveis. (b) Pior resultado ( $V_f = 1000$  mm/min). Em destaque, seções trincadas e consumidas.

Nos ensaios realizados com a cera *wizard*, observa-se que há pouca diferença entre as marcas deixadas pela ferramenta na superfície inferior das amostras. Nas operações realizadas com avanço de 700 e 800 mm/min, as seções de 1 e 2 mm se desprenderam da base; e, com 900 mm/min, apenas aquelas de 1 mm. Mesmo em velocidades mais baixas, as superfícies laterais apresentaram alta regularidade. Assim, a amostra usinada com velocidade de 500 mm/min foi considerada a de melhor acabamento (Figura 47).

Figura 47 – Resultado dos ensaios de usinagem na cera *wizard*.



(a) Melhor resultado ( $V_f = 500$  mm/min). Observam-se poucas marcas da ferramenta na superfície inferior, bem como superfícies laterais regulares. (b) Pior resultado ( $V_f = 800$  mm/min). Em destaque, as seções trincadas e consumidas durante a usinagem.

Ao serem submetidas às operações de usinagem, constata-se que as ceras azul, verde, *gold* e *wizard* possuem similaridade quanto aos resultados. Esses materiais têm melhor acabamento com velocidades de avanço mais baixas, entre 500 e 700 mm/min. Com o aumento da velocidade, as seções mais estreitas das ceras com maior dureza trincam e até mesmo se desprendem da superfície inferior das amostras. Observou-se que algumas seções de 1 e 2 mm das ceras verde e *wizard* trincaram e/ou quebraram quando esses materiais foram usinados a velocidade superior ou igual a 800 mm/min. Na *gold* esta ocorrência também pôde ser verificada, entretanto somente nas velocidades de 500 e 1000 mm/min.

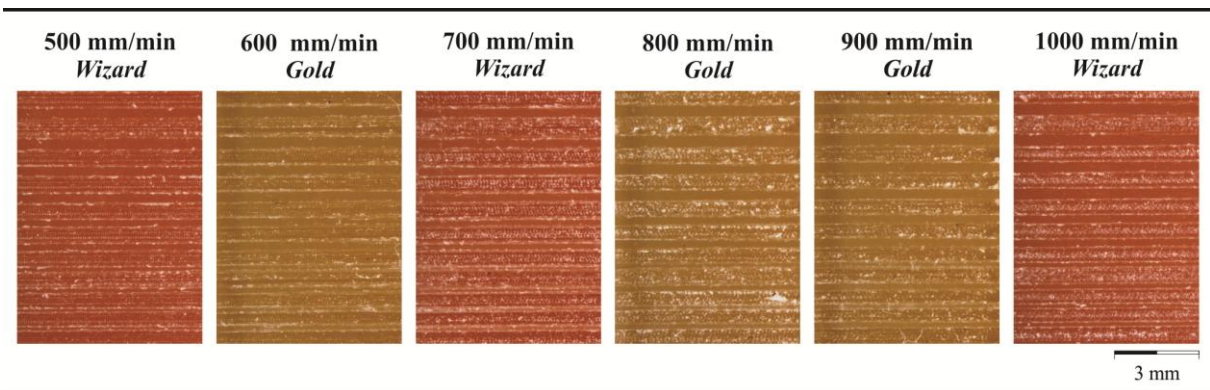
A cera de coloração roxa mostra-se diferente em relação às demais: o acabamento melhora conforme a velocidade aumenta. Pode-se afirmar, com os resultados avaliados, que este material necessita menor velocidade de rotação para que se torne viável a obtenção de amostras cujo acabamento possa ser efetivamente comparado ao das outras ceras em análise. O Quadro 1 apresenta de forma concisa os resultados obtidos neste estudo.

Quadro 1 – Indicação dos melhores e piores acabamentos obtidos com a variação da velocidade de avanço na usinagem de ceras para modelagem de joias.

Avanço (mm/min)	500	600	700	800	900	1000
Melhor Acabamento	<i>Wizard</i>	Verde e <i>Gold</i>	Azul	-	-	Roxa
Pior Acabamento	<i>Roxa</i>	-	-	<i>Wizard</i> e Verde	-	Azul e <i>Gold</i>

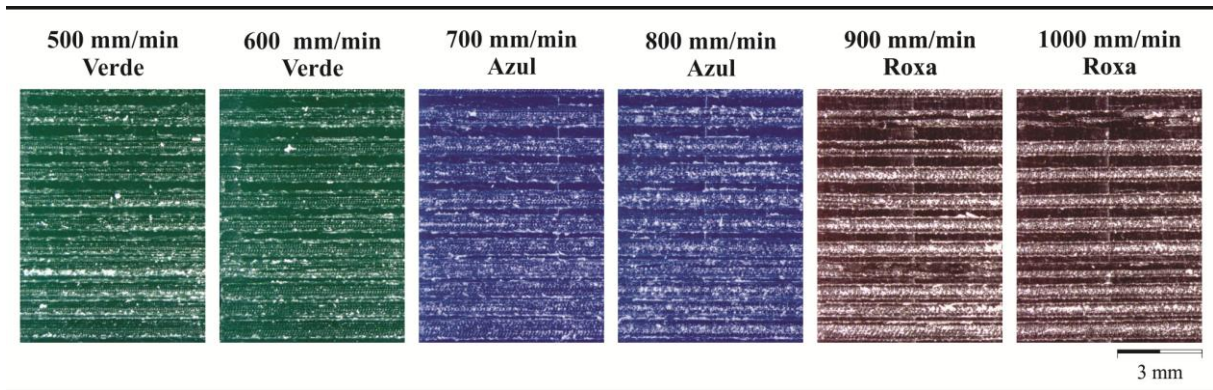
Além da avaliação geral da qualidade do acabamento obtido nas ceras, verificou-se a cera ideal em função das velocidades de avanço ensaiadas (Quadro 2). As ceras de maior dureza, *gold* e *wizard*, compartilham equilibradamente os melhores resultados. Esses materiais, portanto, são os mais adequados a serem submetidos às operações de usinagem.

Quadro 2 – Indicação dos melhores acabamentos obtidos para cada velocidade de avanço ensaiada.



É importante ressaltar que as ceras *gold* e *wizard* ainda não são comercializadas no Brasil, fato que dificulta a competição internacional de produtos tipo exportação de alto valor agregado e alto nível de acabamento. Sendo assim, foi elaborado um quadro similar ao apresentado anteriormente no qual estão dispostas apenas as ceras representadas nacionalmente (Quadro 3). Assim como observado no Quadro 2, a distribuição dos materiais também é homogênea e equilibrada.

Quadro 3 – Indicação dos melhores acabamentos obtidos na usinagem das ceras disponíveis no Brasil.



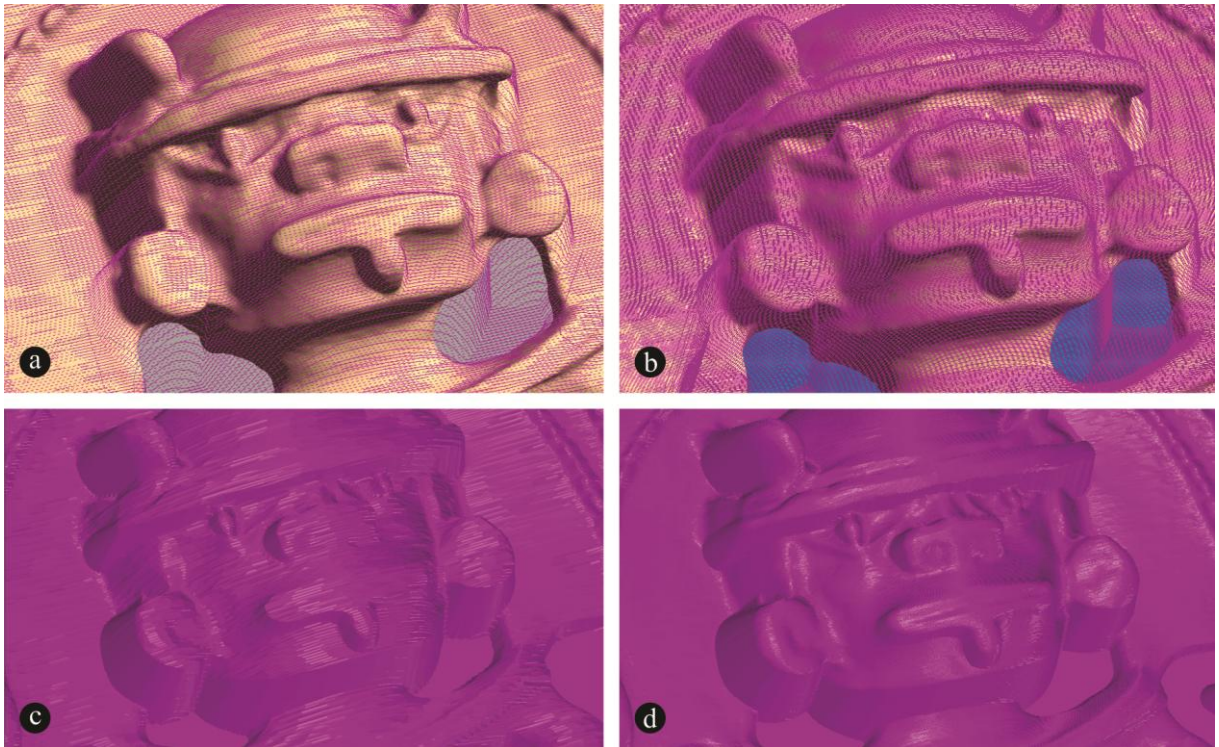
Além de gerar mais informações acerca do comportamento das ceras para modelagem quando submetidos às operações de usinagem, os resultados obtidos possibilitaram a determinação da velocidade de avanço ideal para cada tipo de material em estudo. Esses valores foram utilizados nos procedimentos para execução dos modelos.

#### 4.1.2 Execução dos modelos

Previamente à usinagem do acabamento com a fresa cônica com diâmetro de ponta 0,2 mm e ângulo de 18° foi feita uma simulação virtual do processo e constatou-se que a penetração de trabalho não estava de acordo com o tipo de ferramenta utilizada: o valor do deslocamento é ajustado de acordo com o diâmetro da haste. Então, no caso desta fresa cônica, cuja haste tem diâmetro de 3 mm e ponta de 0,2 mm, são nítidas as falhas na superfície do objeto usinado ao ser ajustada uma penetração de trabalho maior que 1% do diâmetro da haste.

Mesmo antes da simulação da usinagem, observou-se grande quantidade de linhas correspondentes ao percurso a ser realizado pela ferramenta. A estratégia ajustada com penetração de trabalho de 2,5% (Figura 48a) é escassa quando comparada com a estratégia ajustada com penetração de trabalho de 1% (Figura 48b). Com a simulação da usinagem, observa-se nitidamente as marcas deixadas entre uma passada e outra da ferramenta (Figura 48c), quando a penetração de trabalho é de 2,5%. Quando utiliza-se 1% para penetração de trabalho, obtém-se uma superfície mais homogênea (Figura 48d).

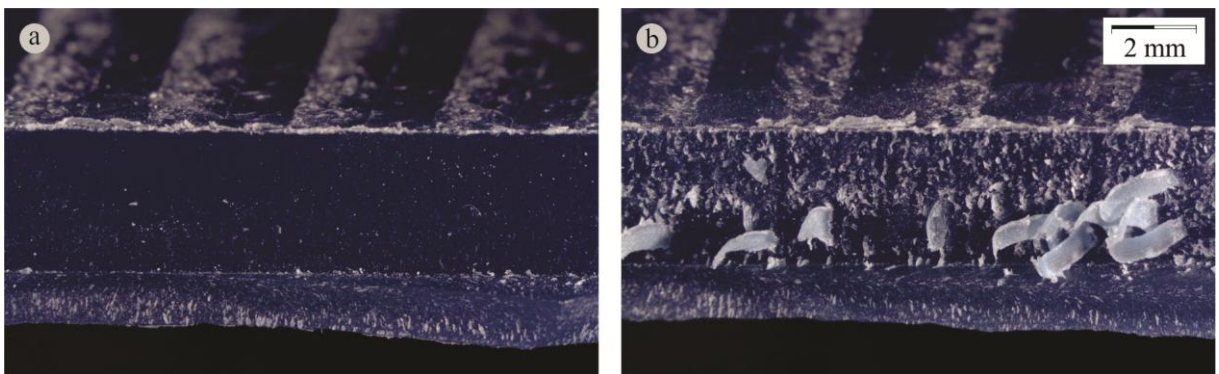
Figura 48 – Simulação de usinagens com diferentes ajustes de penetração de trabalho ( $a_e$ ).



Percurso da ferramenta com  $a_e = 2,5\%$  (a) e com  $a_e = 1\%$  (b) e correspondente simulação da usinagem. Podem ser observadas as marcas deixadas pela ferramenta, quando  $a_e = 2,5\%$  (c), e superfície mais homogênea, quando  $a_e = 1\%$  (d).

A usinagem dos modelos do *hombre murciélagó* iniciou com a remoção do material sobressalente na porção posterior. Em seguida, as peças foram recortadas em um tamanho padrão para que encaixassem perfeitamente no gabarito. Observou-se, assim, que, ao serem usinadas no sentido concordante, as amostras de cera resultaram em melhor acabamento (Figura 49).

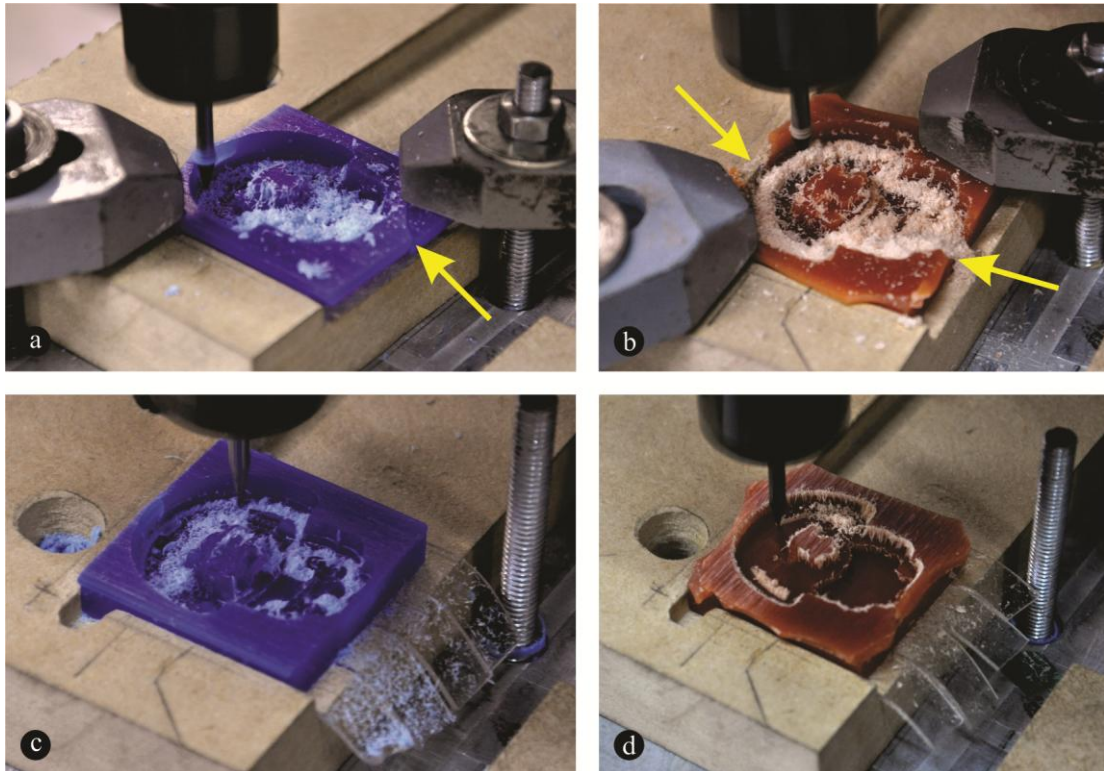
Figura 49 – Influência do sentido de corte nas amostras de cera para modelagem.



Corte (a) concordante e (b) discordante.

Além do sentido de corte, verificou-se o comportamento das amostras quando afixadas por grampo (Figura 50a, b) ou por fita dupla-face de alto desempenho (Figura 50c, d). Observa-se que, apesar da diferença de dureza entre as ceras de coloração azul (52 Shore D) e *wizard* (63 Shore D), ambas as amostras racharam durante as operações de usinagem quando presas por grampos.

Figura 50 – Resultados obtidos a partir de diferentes maneiras de fixação das amostras.



Fixação por grampo nas ceras azul (a) e *wizard* (b); e fixação por fita dupla-face nas ceras azul (c) e *wizard* (d). Em destaque, as regiões que apresentaram rachaduras durante as operações de usinagem.

Ao passar rente a seções estreitas da cera azul, pôde-se notar que a ferramenta empurrava o material, o qual era deslocado sem se romper, voltando à posição inicial assim que as operações de usinagem fossem finalizadas. Fraturas significativas foram percebidas nas regiões onde o grampo se apoiou, exercendo forte pressão localizada. Já na amostra de cera *wizard*, foi visto que ao usinar perto de seções estreitas, o material se rompeu e até se separou totalmente da peça, sendo, muitas vezes, lançado para longe. Essa variação no comportamento se justifica pela diferença entre a dureza dos materiais.



Ao realizar as mesmas operações de usinagem nos materiais afixados por fita dupla-face de alto desempenho, não foram observadas trincas, rachaduras ou fraturas as quais pudessem comprometer a obtenção dos modelos. Ressalta-se, apenas, que foi acrescentada a espessura da fita dupla-face (eixo z) na estratégia de usinagem de modo a acertar o ponto de origem para a produção das peças. Não foram preocupantes aqueles casos em que houve ruptura do material, percebidos principalmente com a cera *wizard*, uma vez que toda a superfície inferior do bloco estava aderida ao esquadro por fita dupla-face. Portanto, não havia risco de a peça ficar solta enquanto se completava a usinagem dos modelos. Assim, definiu-se que os demais materiais também seriam afixados por fita dupla-face.

Após a finalização das operações de usinagem, observou-se grande quantidade de cavaco aderido em um dos lados das peças (Figura 51). Acredita-se que esse acúmulo se deve ao sentido de corte nas regiões com diferença de altura. Assim, ao passar da esquerda para a direita, a ferramenta empurrava e destacava o cavaco gerado pela usinagem da base ao topo do relevo. Analogamente, ao usinar do topo em direção à base, o material removido permaneceu aderido ao modelo. Foi verificado o resultado obtido ao executar a usinagem da mesma peça com uma estratégia com a ferramenta cortando, sequencialmente, tanto da esquerda pra direita, quanto da direita pra esquerda. Não foi observado cavaco localizado em um dos lados, mas, sim, distribuído por toda a superfície da peça. Deste modo, a fim de facilitar a etapa subsequente, foi mantida a estratégia com corte em apenas um sentido.

Figura 51 – Cavaco aderido à peça: nas regiões em destaque, observa-se o material na região da cabeça do *hombre murciélag*.



Para a completa remoção do material excedente (Figura 52), foi necessário o auxílio de um profissional com experiência na modelagem de joias em cera, o qual utilizou como ferramenta a própria fresa empregada nas operações de acabamento. Foram despendidas cerca de 10 horas em um trabalho minucioso a fim de retirar o cavaco aderido sem que houvesse qualquer dano às peças.

Figura 52 – Processo de limpeza manual dos modelos.



Tendo finalizado esta etapa, as peças produzidas por usinagem CNC (Figura 53) foram submetidas à microfusão.

Figura 53 – Modelos produzidos pela usinagem CNC de cera para modelagem.

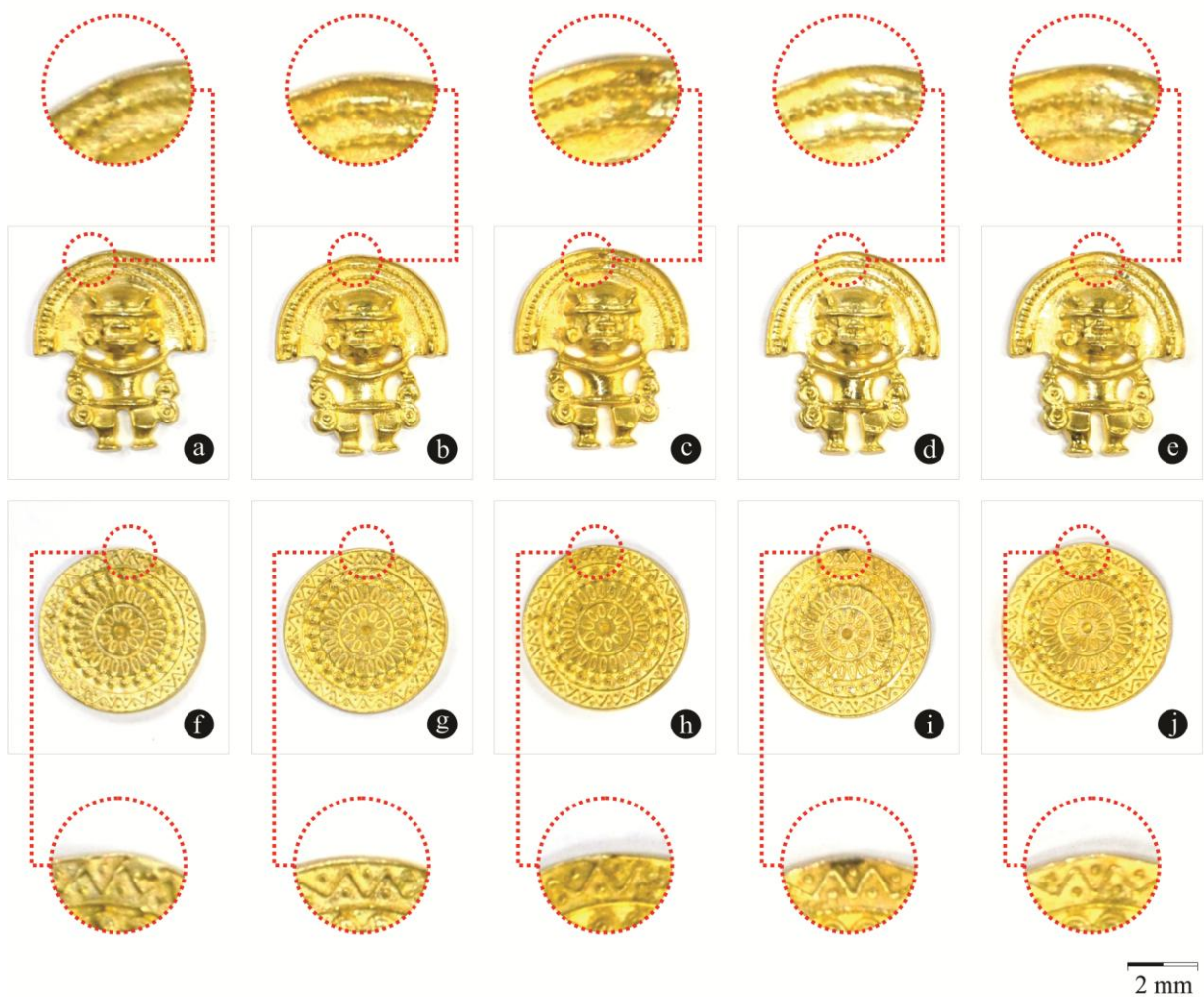


Reprodução da peça *hombre murciélagu* em cera para modelagem (a) azul, (b) roxa, (c) verde, (d) *gold*, e (e) *wizard*; reprodução da medalha em cera (g) azul, (h) roxa, (i) verde, (j) *gold*, e (k) *wizard*.

## 4.2 Obtenção de peças piloto via microfusão

As peças usinadas foram afixadas ao canal de alimentação pelo canal de ataque, o qual é comumente denominado “gito”. Ressalta-se que a decisão do melhor local para a entrada do metal em estado líquido é essencialmente empírica. Após a finalização do processo, os canais de ataque foram extraídos com o auxílio de um alicate de corte, ficando ainda, na peça, rebarbas deste componente que foram removidas por lixamento. Como característica em comum entre as peças, observou-se dano nos locais onde os canais haviam sido dispostos: alguns entortaram e/ou apresentaram uma superfície irregular devido ao excesso de desgaste para completa remoção dos canais de ataque (Figura 54).

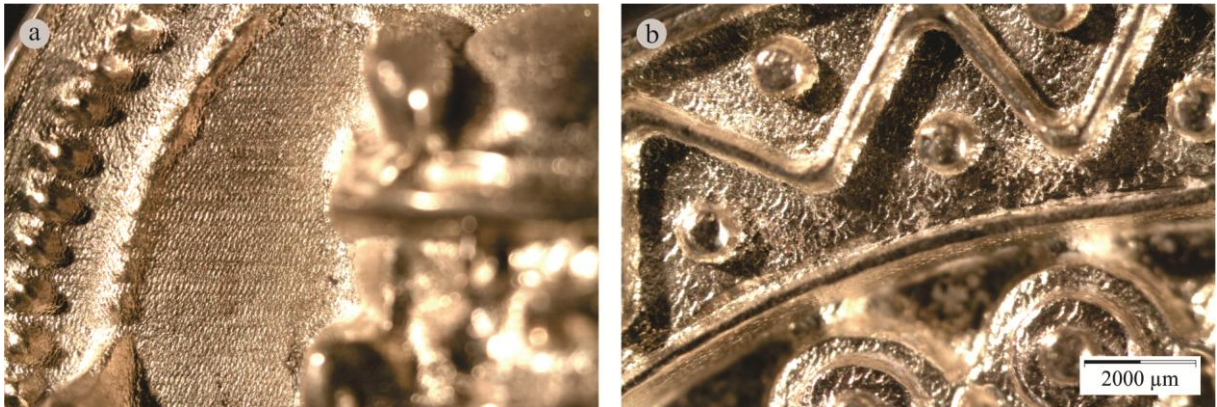
Figura 54 – Peças piloto produzidas em latão pelo processo de microfusão.



Reprodução, em latão, da peça *hombre murciélag* originalmente produzida em cera para modelagem (a) azul, (b) roxa, (c) verde, (d) *gold*, e (e) *wizard*; reprodução, em latão, da medalha originalmente produzido em cera (g) azul, (h) roxa, (i) verde, (j) *gold*, e (k) *wizard*. Em destaque as áreas que apresentaram danos após a completa remoção (por lixamento e polimento) do canal de ataque.

Observou-se que, apesar dos danos ocorridos em função da remoção dos canais, de maneira geral, as peças obtiveram boa qualidade de acabamento. Para a avaliação da superfície, as peças foram examinadas em microscópio estereoscópico (Figura 55). Aparentemente, os detalhes foram reproduzidos, assim como as marcas deixadas pela ferramenta na superfície dos modelos.

Figura 55 – Avaliação dos resultados da obtenção das peças piloto quanto ao acabamento superficial.



Observa-se que as marcas da ferramenta deixadas nos modelos em cera foram reproduzidos na versão metálica do (a) *hombre murciélag* e do (b) medalha.

Ainda como resultado da microfusão, observou-se que a superfície das peças tinha um aspecto fosco, sendo necessária a execução de polimento para que estas adquiram o brilho característico da liga metálica utilizada (Figura 56).

Figura 56 – Peças piloto em estado bruto e após receber polimento.



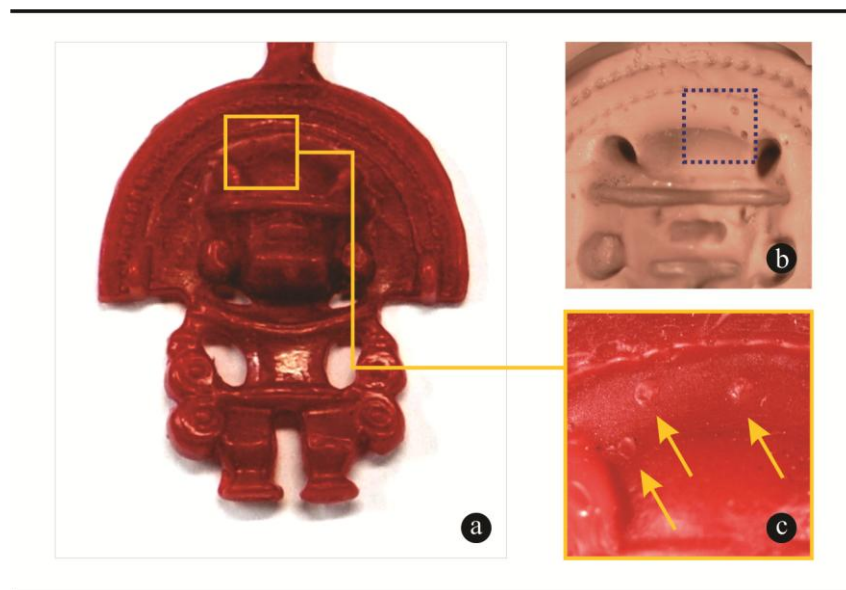
Versões do *hombre murciélag* (a) bruta e (b) com polimento; e da medalha (c) bruta e (d) com polimento.

### 4.3 Obtenção de modelos via injeção de cera

Para a produção dos moldes de borracha de silicone, os canais de ataque foram novamente dispostos juntos às peças, porém sem qualquer tipo de união. Em alguns casos, devido à pressão exercida sobre o molde – e, conseqüentemente, à peça – houve deslocamento do canal durante o processo de vulcanização. Esse deslocamento não prejudicou a injeção da cera no molde, entretanto esse canal não pôde ser utilizado para a montagem da árvore de modelos que dará origem às peças finais de latão. Portanto, essas estruturas foram removidas, para, então, serem novamente posicionadas e soldadas na peça.

Acerca da qualidade dos modelos obtidos pela injeção da cera, constatou-se perda de detalhes, aparecimento de cavidades no formato de bolhas (Figura 57), distorção no formato e perceptível diminuição no tamanho das peças.

Figura 57 – Bolhas na superfície do modelo do *hombre murciélag*.



Reprodução das bolhas no modelo em (a) cera para injeção, as quais surgiram no (b) molde de silicone. Em destaque (c), uma ampliação e indicação das bolhas.

Ressalta-se que os possíveis erros dimensionais ocorridos nesta etapa, assim como na etapa subsequente, não estão relacionados com a variação do material dos modelos utilizados para obtenção dos moldes. Diferentemente dos resultados descritos no item 4.2, no qual foram utilizados modelos em diferentes materiais para produção dos moldes, as peças apresentadas neste e no próximo item são provenientes de moldes obtidos por modelos de mesmo material: latão e cera para injeção.

#### 4.4 Obtenção das peças finais via microfundição

As peças finais (Figura 58) obtidas pelo processo de microfundição geraram resultados semelhantes àqueles das peças piloto, principalmente onde houve união dos canais de ataque.

Figura 58 – Peças finais produzidas em latão.



Reprodução em latão das peças finais (a) do *hombre murciélagu* e (b) da medalha.

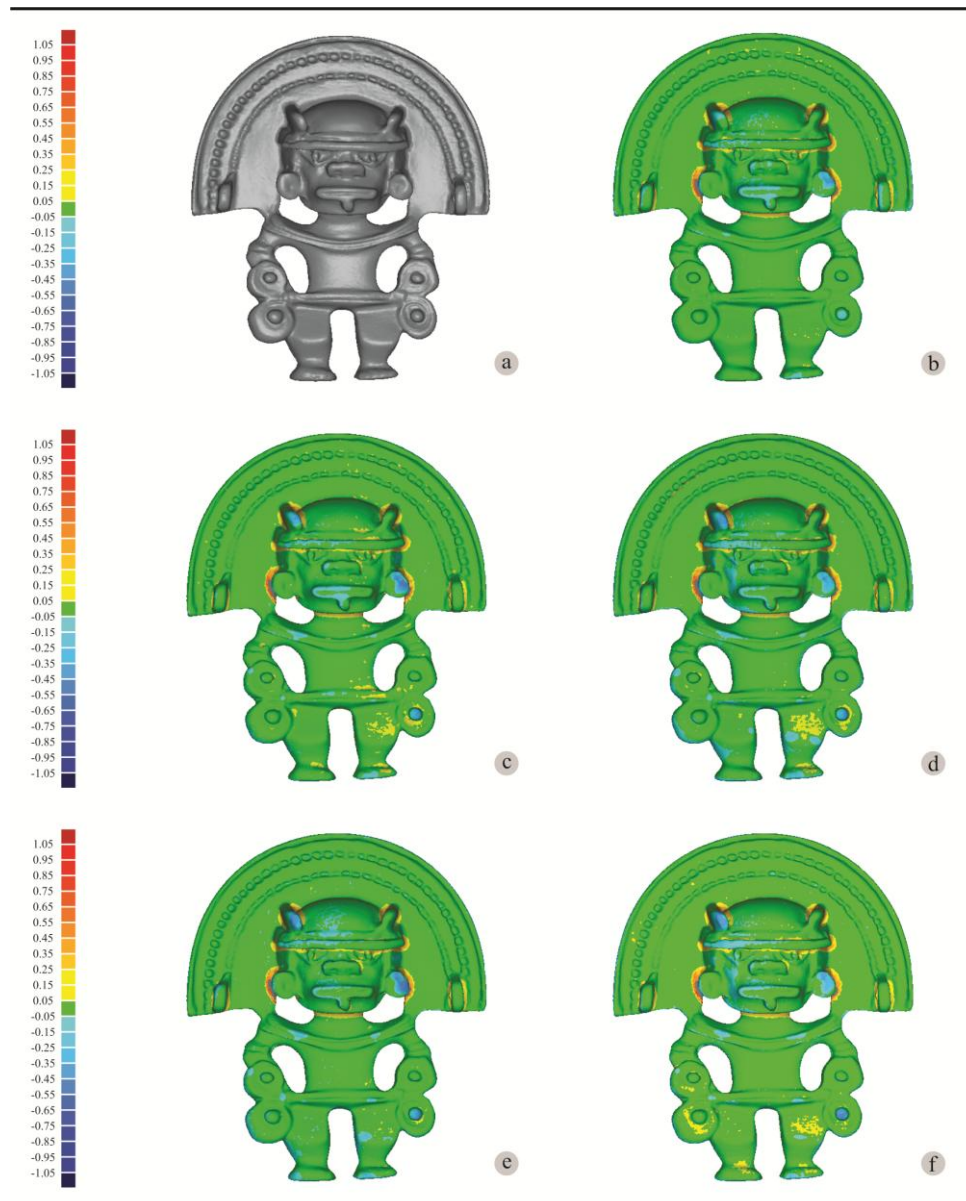
#### 4.5 Análise dimensional

Os dados gerados pela digitalização tridimensional a laser possibilitaram a análise dos resultados obtidos durante a produção das peças. Os erros dimensionais ocorridos em cada uma das quatro etapas envolvidas no processo são apresentados da Figura 59 a Figura 67 nas quais as diferentes cores representam os níveis de alteração dimensional.

Para a efetiva configuração dessas imagens, o *software* Geomagic Qualify™ calcula uma superfície média entre a adquirida pela digitalização e aquela utilizada como referência. Sendo assim, os tons frios (azulados) indicam pontos localizados abaixo e os tons quentes (avermelhados), pontos acima desta superfície; já a cor verde mostra as regiões onde não houve erro dimensional significativo. Além da utilização das cores como indicadores de erro, foram gerados gráficos que relacionam as peças, os materiais e os processos em estudo.

Os modelos obtidos a partir da usinagem CNC do *hombre murciélagu* (Figura 59) indicam que não houve erros dimensionais significativos quando comparados com o modelo original. Quando comparados entre si, os erros dimensionais dos modelos desta etapa apresentaram uma média abaixo de 0,1 mm. A maior alteração observada ocorreu na região em torno da cabeça em função do formato praticamente vertical, onde a ferramenta com ângulo de 18° teve dificuldade de alcançar.

Figura 59 – Análise dimensional da usinagem CNC dos modelos do *hombre Murciélagu*.

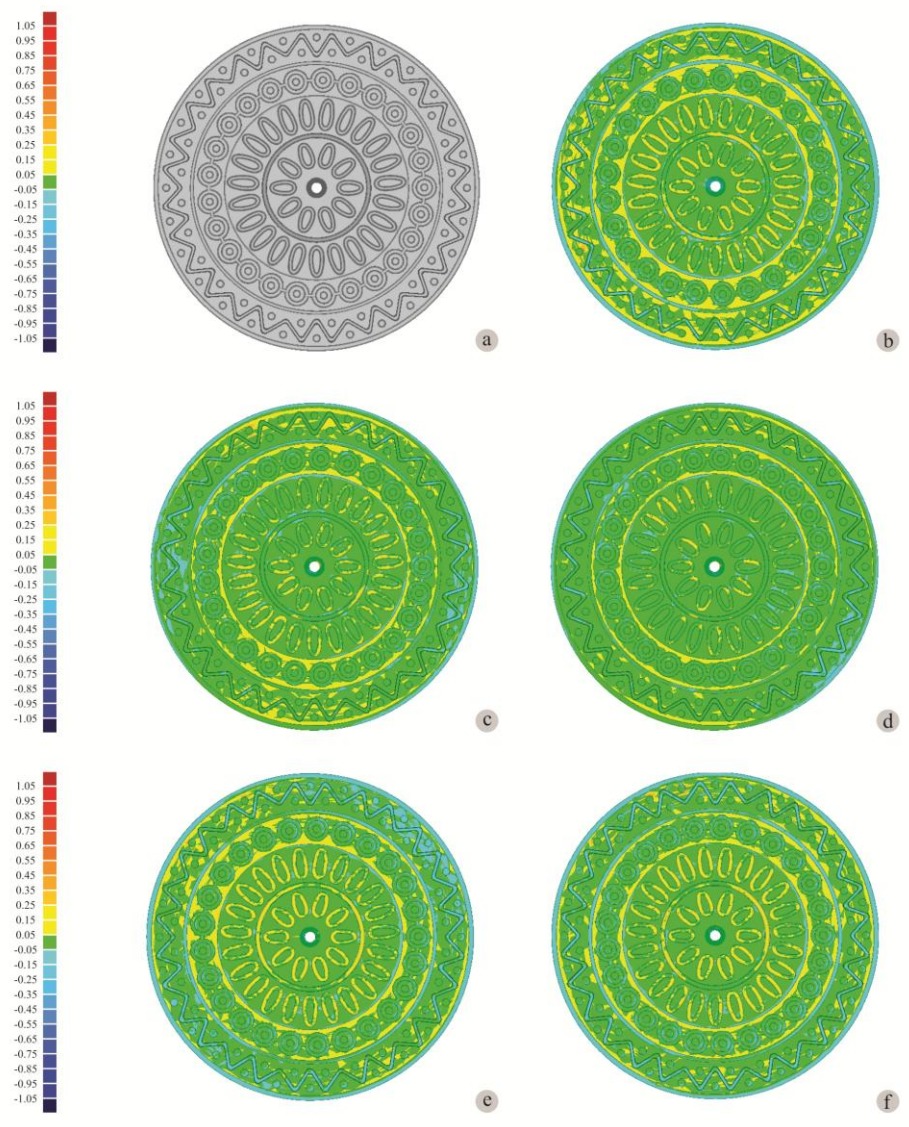


Resultado da comparação entre (a) o modelo original e as ceras (b) azul, (c) roxa, (d) verde, (e) *gold* e (f) *wizard*.

Na legenda, os tons azulados correspondem aos pontos localizados abaixo da superfície média, os tons avermelhados, representam pontos acima; já a cor verde indica regiões sem erro dimensional significativo. Unidades em mm.

Os modelos da medalha, quando comparados entre si, apresentaram desvios com valores médios de 0,05 mm, sendo considerados desprezíveis (Figura 60). Observa-se que as regiões destacadas pela cor amarela, representam, na peça original, zonas de baixo relevo onde a ferramenta de 0,2 mm de ponta não pôde alcançar completamente.

Figura 60 – Análise dimensional da usinagem CNC dos modelos da medalha.



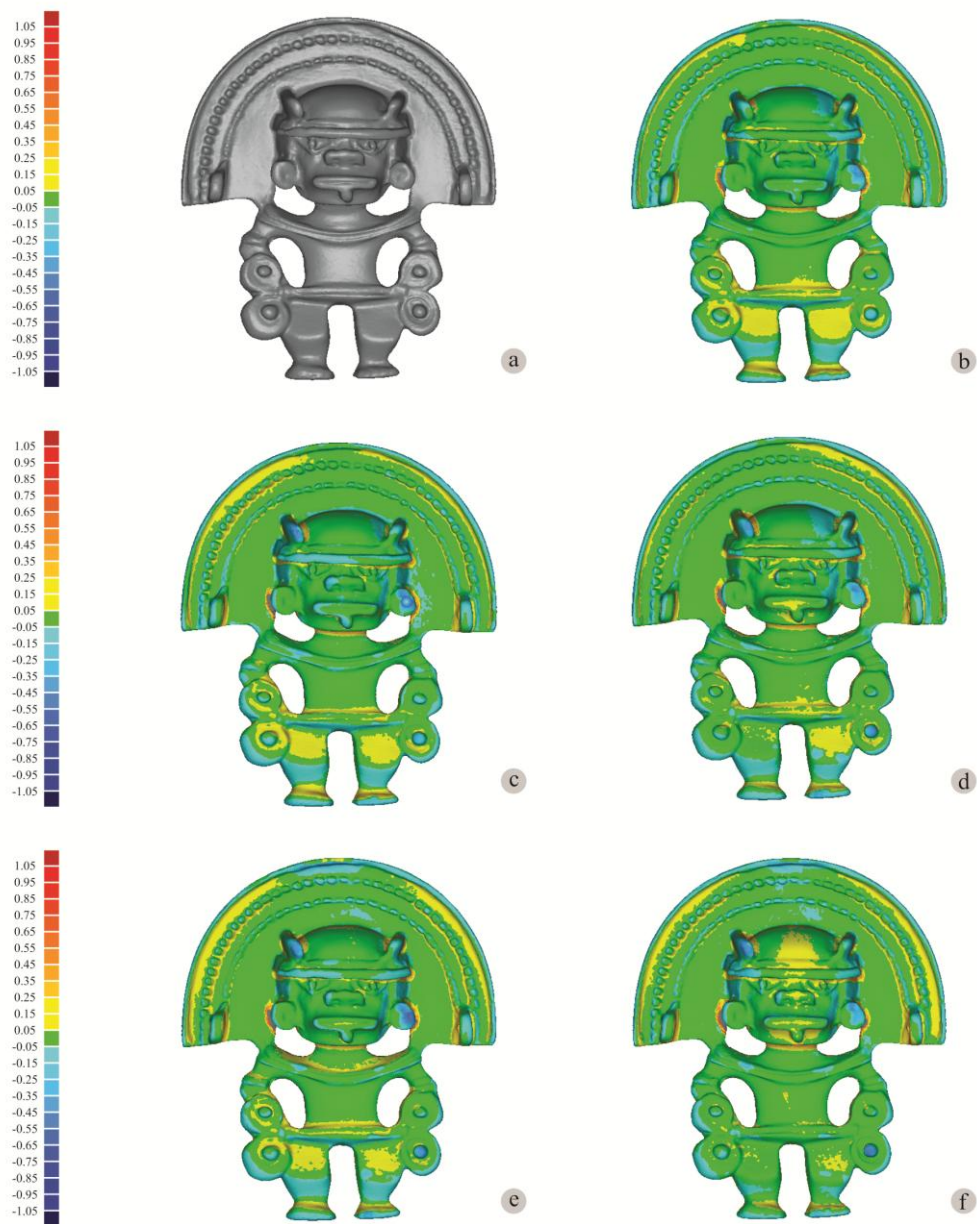
Resultado da comparação entre (a) o modelo original e as ceras (b) azul, (c) roxa, (d) verde, (e) *gold* e (f) *wizard*. Unidades em mm.

Como resultado geral da produção das peças piloto, era esperado que não houvesse muita diferença entre as peças de um mesmo modelo, uma vez que os melhores parâmetros foram utilizados nas operações de usinagem CNC de cada cera para modelagem. Da mesma forma, os resultados das etapas seguintes também não devem apresentar, entre si, altos valores de erro dimensional.



A microfusão das peças piloto do *hombre murciélago* não apresentou erros dimensionais relevantes, permanecendo em uma média de 0,1 mm (Figura 61). Em relação à etapa anterior, observa-se que os erros foram replicados na região da cabeça. Além disso, houve uma diminuição de altura na região do rosto (zonas em azul), no qual o valor máximo de desgaste chega a 0,5 mm.

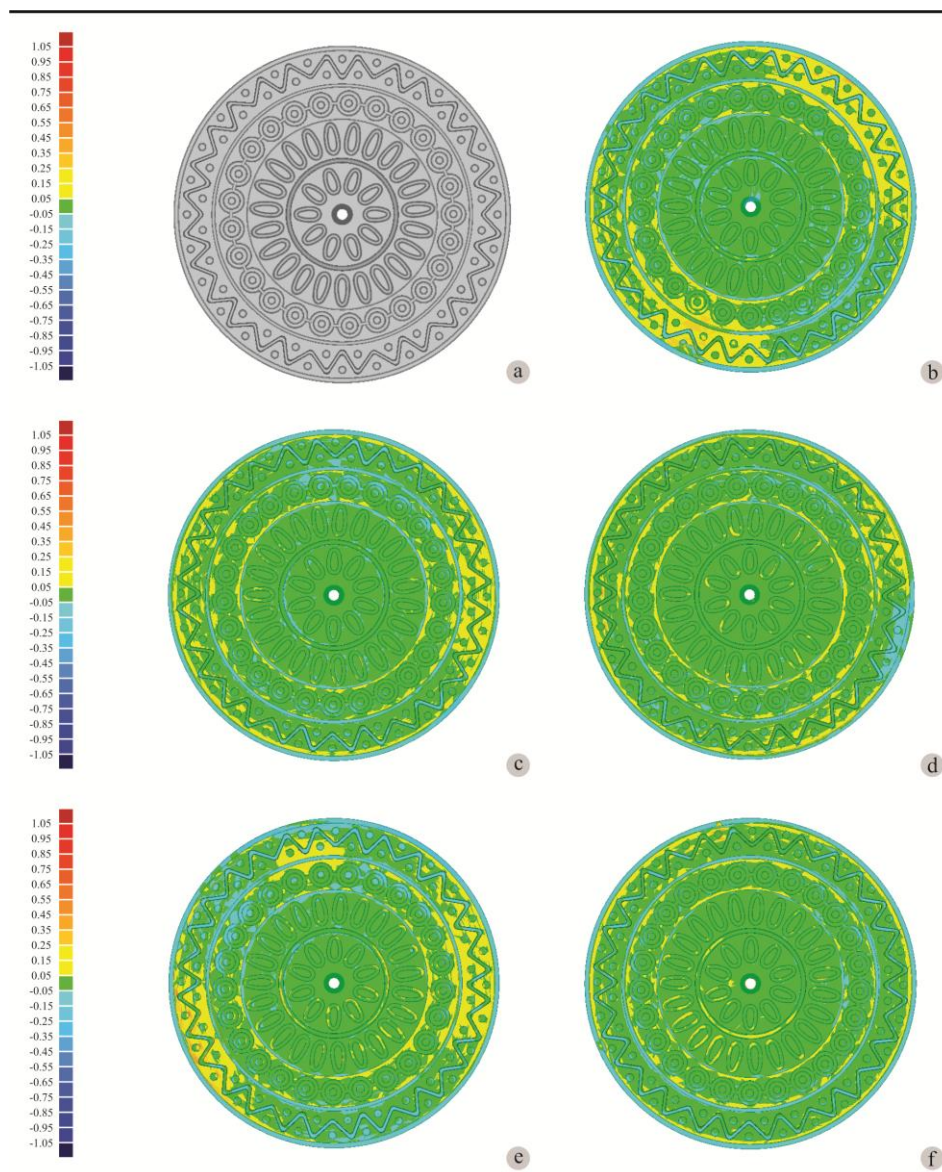
Figura 61 – Análise dimensional da microfusão das peças piloto do modelo do *hombre murciélago*.



Resultado da comparação entre (a) o modelo original e a microfusão das ceras (b) azul, (c) roxa, (d) verde, (e) gold e (f) wizard. Unidades em mm.

Assim como no modelo do *hombre murciélagu*, as peças piloto da medalha obtidas por microfusão também possuem valores de desvio desprezíveis (Figura 62). Observa-se, no modelo do *hombre murciélagu* zonas em amarelo predominantemente nas regiões do ornamento da cabeça e das pernas; e no modelo da medalha, nota-se a mesma coloração em zonas opostas. Essas alterações dimensionais são geradas pelo empenamento, provavelmente, ocasionado pela contração do metal durante seu resfriamento. Ainda assim, a diferenças dos valores, entre o modelo em cera e o modelo em metal, permanecem na média de 0,02 mm.

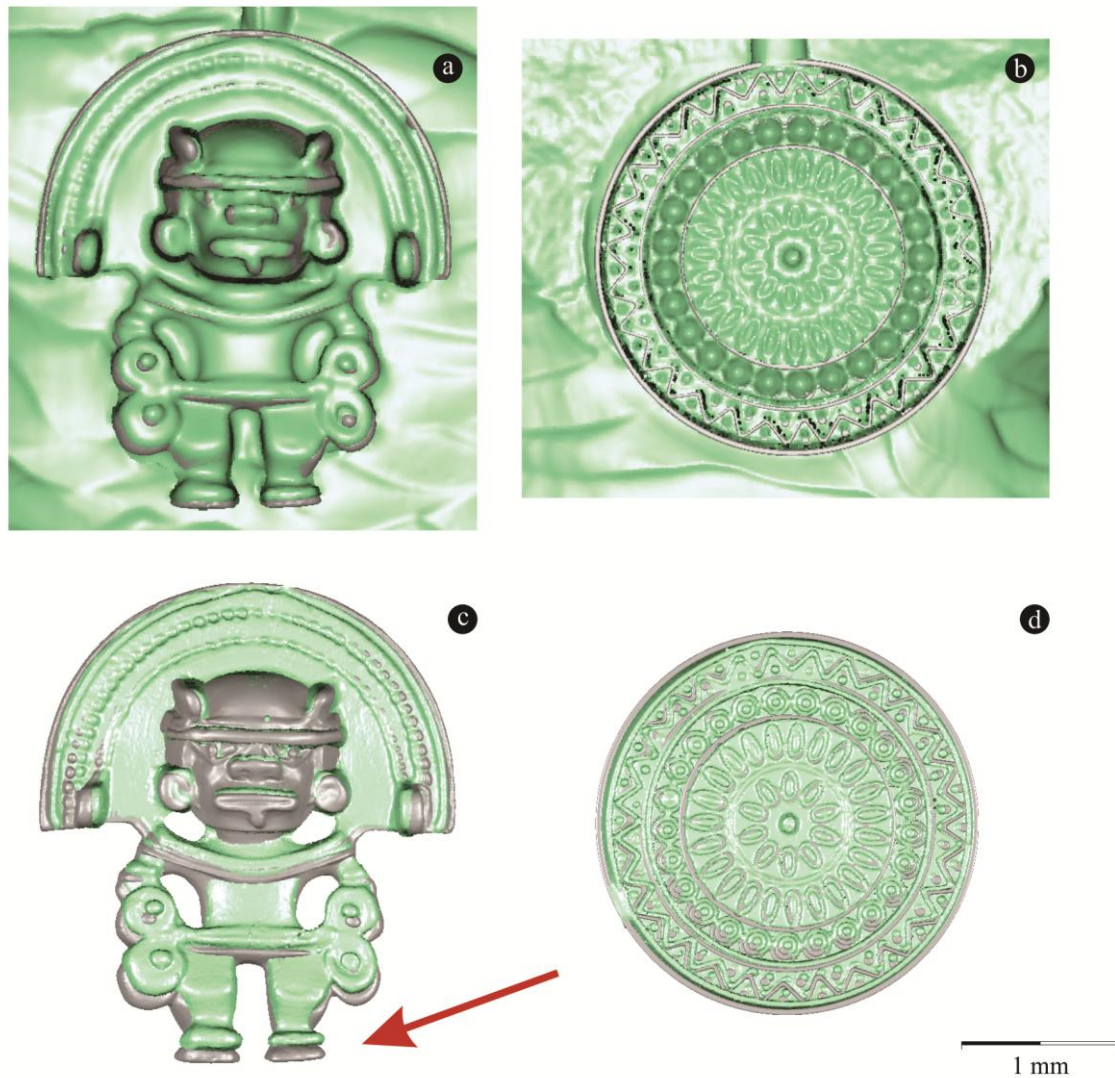
Figura 62 – Análise dimensional da microfusão das peças piloto do modelo da medalha.



Resultado da comparação entre (a) o modelo original e microfusão das ceras (b) azul, (c) roxa, (d) verde, (e) *gold* e (f) *wizard*. Unidades em mm.

A partir dos modelos em metal, foi possível a produção dos moldes em borracha de silicone. Com a avaliação das superfícies adquiridas pela digitalização tridimensional pôde-se observar uma significativa redução do tamanho dos moldes do *hombre murciélagu* (Figura 63a) e da medalha (Figura 63b). Essa alteração das dimensões fica ainda mais notória quando são avaliadas as peças de cera para injeção, provenientes dos moldes de borracha de silicone. A partir das médias realizadas com as dimensões das amostras, pode-se dizer que no modelo do *hombre murciélagu* houve uma diminuição de 6% do tamanho (Figura 63c); já na medalha, a diminuição foi de 4% do tamanho da peça (Figura 63d).

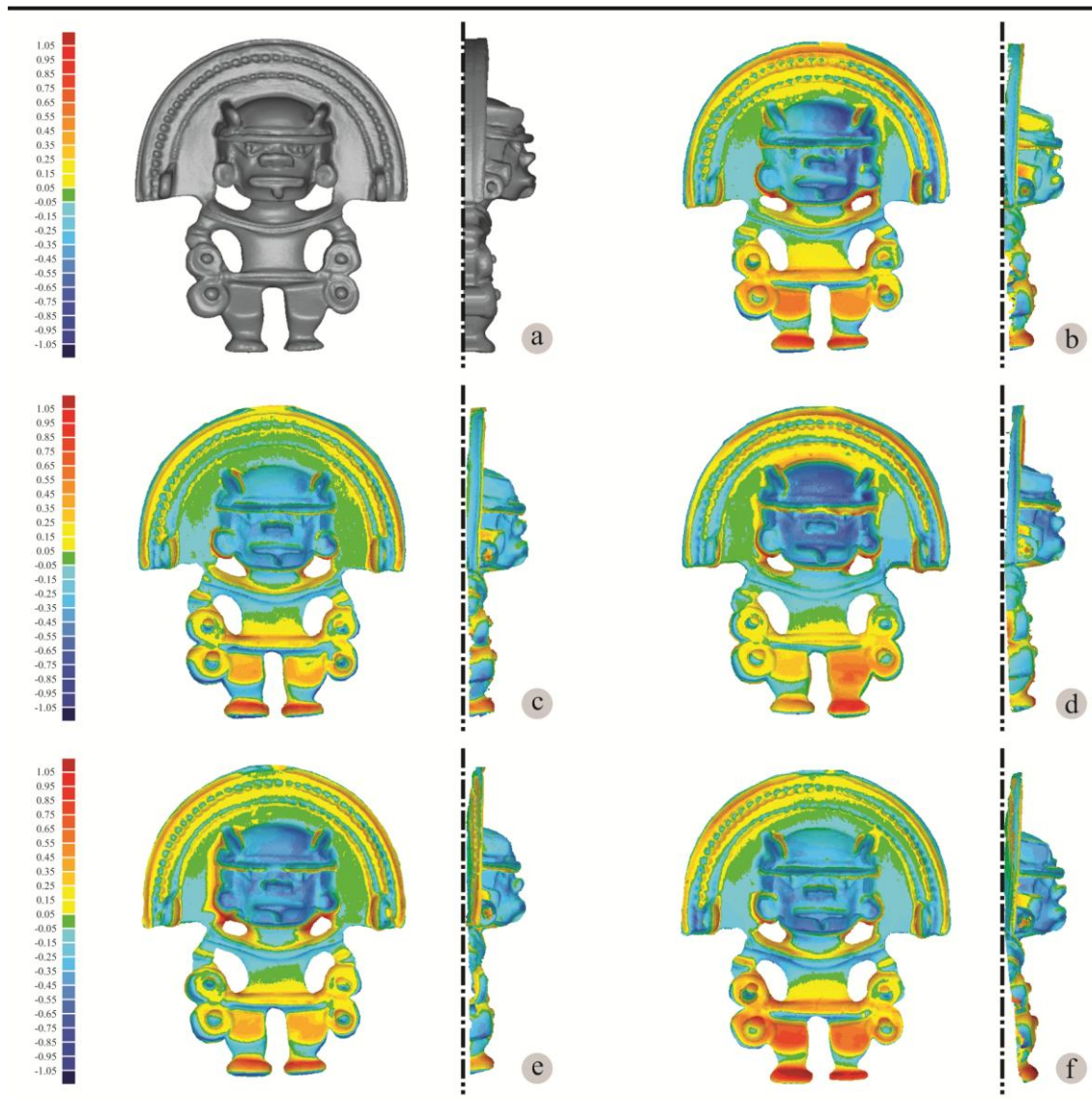
Figura 63 – Sobreposição virtual mostrando a diminuição do tamanho das peças.



Os modelos na cor cinza correspondem às peças de referência utilizadas nas análises dimensionais. Na produção dos moldes de silicone do *hombre murciélagu* (a) e da medalha (b) houve redução do tamanho, assim como nos modelos do *hombre murciélagu* (c) e da medalha (d) produzidos em cera para injeção. Em destaque, a sobreposição que mostra a alteração dimensional.

As imagens geradas para a avaliação dos modelos do *hombre murciélago*, produzidos pela injeção de cera nos moldes de borracha de silicone, indicam a maior divergência nas dimensões obtidas entre as etapas de produção das peças (Figura 64). Entretanto, com os ensaios realizados nesta pesquisa, não é possível afirmar que o desvio (com valor médio de 0,41 mm) é atribuído apenas ao processo de injeção de cera, uma vez que foram observadas alterações significativas nos moldes. Nota-se, ainda, que as regiões em amarelo – conforme mostrado no processo de microfusão das peças piloto – agora, estão representadas por tons avermelhados. Essa alteração de cor indica que houve um aumento no grau de empenamento, desta vez, em função da contração da cera injetada.

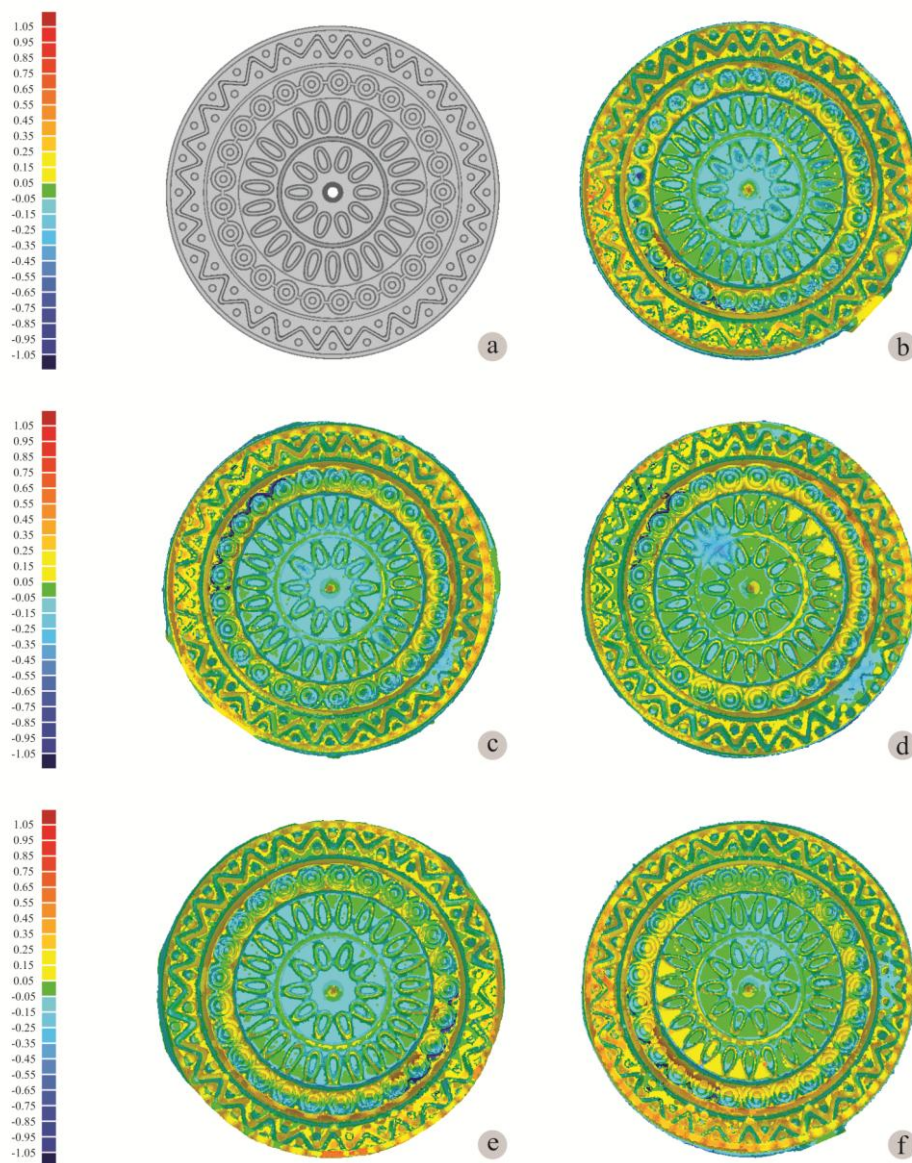
Figura 64 – Análise dimensional da injeção de cera para obtenção dos modelos do *hombre murciélago*.



Resultado da comparação entre (a) o modelo original e as peças de cera injetada, oriundas das ceras (b) azul, (c) roxa, (d) verde, (e) *gold* e (f) *wizard*. Podem ser observados, também, as vistas laterais de cada peça, tornando evidente o empenamento ocorrido nesta etapa. Unidades em mm.

Quando comparado à etapa de produção precedente, a produção das peças do modelo da medalha também apresentou o maior desvio, o qual ficou em torno de 0,22 mm (Figura 65). Os sinais de empenamento, já mostrados nas peças piloto, ficaram ainda mais evidentes quando estas foram produzidas por injeção de cera. Ressalta-se que a região central adquiriu uma coloração azulada, enquanto que nas proximidades da borda externa, predominam os tons amarelados. Essa configuração indica o modo como a cera se contrai enquanto esfria, conferindo à peça um formato côncavo.

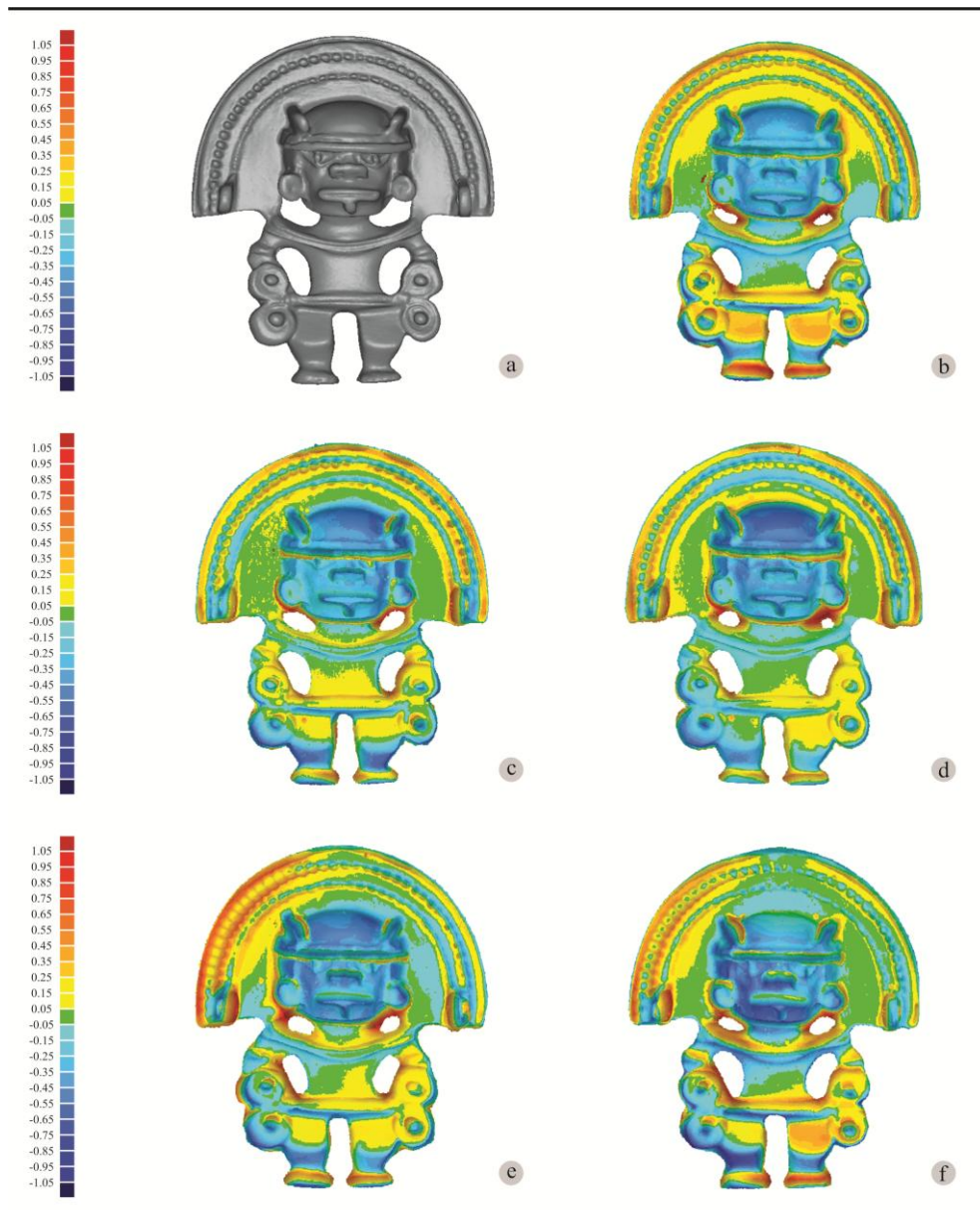
Figura 65 – Análise dimensional da injeção de cera para obtenção dos modelos da medalha.



Resultado da comparação entre (a) o modelo original e as peças de cera injetada, oriundas das ceras (b) azul, (c) roxa, (d) verde, (e) *gold* e (f) *wizard*. Unidades em mm.

As peças finais do *hombre murciélago* obtidas por microfusão apresentaram praticamente o mesmo valor de desvio médio obtido na etapa anterior de produção. O empenamento, advindo da contração dos materiais, antes era percebido de forma homogênea, entretanto, neste processo, mostra-se sem critério para ocorrência. Observa-se que ainda predomina no ornamento da cabeça e nas pernas do modelo, mas, em ambas as regiões, a alteração acontece ora nas porções centrais e ora nas laterais (Figura 66).

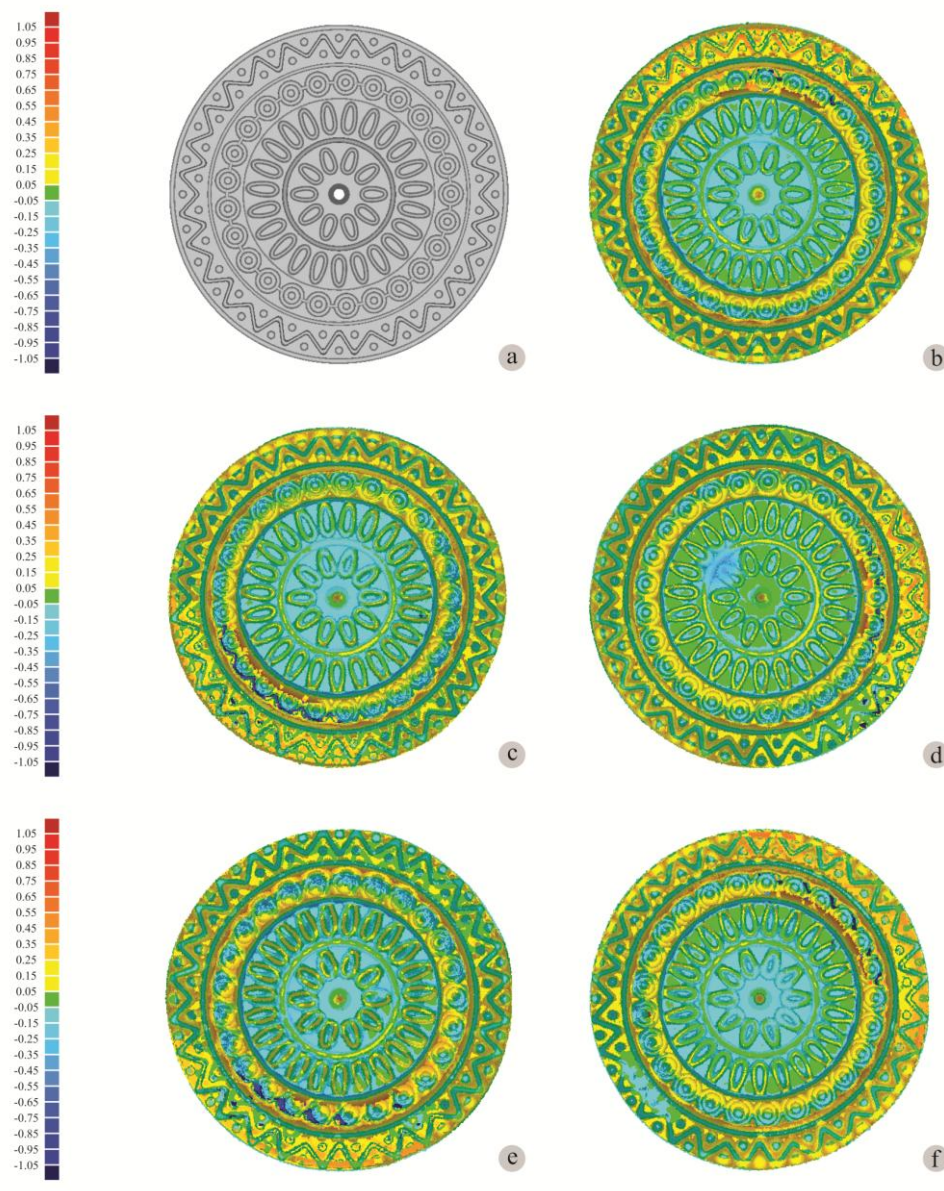
Figura 66 – Análise dimensional das peças finais do *hombre murciélago* obtidas por microfusão.



Resultado da comparação entre (a) o modelo original e as peças finais, oriundas das ceras (b) azul, (c) roxa, (d) verde, (e) *gold* e (f) *wizard*. Unidades em mm.

As peças finais da medalha, assim como as do *hombre murciélagu*, não apresentaram diferenças significativas em relação àquelas produzidas por injeção de cera. As diferenças geradas pela etapa anterior, como o formato côncavo resultante da contração da cera, foram reproduzidas no metal (Figura 67).

Figura 67 – Análise dimensional da microfusão para obtenção das peças finais da medalha.



Resultado da comparação entre (a) o modelo original e as peças finais, oriundas das ceras (b) azul, (c) roxa, (d) verde, (e) *gold* e (f) *wizard*. Unidades em mm.

A seguir, são apresentados, de forma resumida e sistemática, os resultados gerais obtidos em cada etapa da produção das peças do *hombre murciélagu* e da medalha.

Na Tabela 7 e na Tabela 8 são apresentados os dados referentes às médias dos erros dimensionais obtidos por meio da digitalização dos modelos do *hombre murciélagu* e da medalha, respectivamente. Os altos valores de desvio padrão observados, representam que os erros máximos são consideravelmente maiores do que a média apresentada. De acordo com a estatística, ao somar 3 desvios padrão à média é obtido o valor máximo para 99,7% dos erros. Por exemplo, a peça com acabamento oriunda da cera *wizard* apresenta erro médio de 0,43 mm e desvio padrão de 0,28 mm, portanto, 99,7% dos erros são inferiores a 1,27 mm.

De acordo com os dados referentes às médias dos erros dimensionais, os altos valores de desvio padrão observados, representam que os valores máximos dos erros ocorridos no decorrer dos processos são consideravelmente maiores do que as médias apresentadas.

Tabela 7 – Valores médios e desvios padrões das diferenças captadas pela digitalização tridimensional em cada etapa da produção dos modelos do *hombre murciélagu* (unidades em mm).

		Usinagem	Microfusão 1 <sup>6</sup>	Injeção	Microfusão 2 <sup>7</sup>	Acabamento
Azul	Média	0,07	0,09	0,43	0,41	0,42
	Desvio	0,09	0,08	0,28	0,28	0,26
Roxa	Média	0,07	0,10	0,34	0,41	0,36
	Desvio	0,09	0,09	0,22	0,26	0,23
Verde	Média	0,08	0,10	0,44	0,47	0,37
	Desvio	0,09	0,09	0,28	0,30	0,24
Gold	Média	0,08	0,11	0,39	0,45	0,43
	Desvio	0,09	0,09	0,25	0,29	0,27
Wizard	Média	0,08	0,10	0,44	0,46	0,43
	Desvio	0,10	0,09	0,29	0,30	0,28

<sup>6</sup> A etapa denominada Microfusão 1 corresponde ao processo de obtenção das peças piloto, descrito nos itens 3.3 e 4.2.

<sup>7</sup> A denominação Microfusão 2 representa a etapa de produção das peças finais, conforme descrito nos itens 3.5 e 4.4.

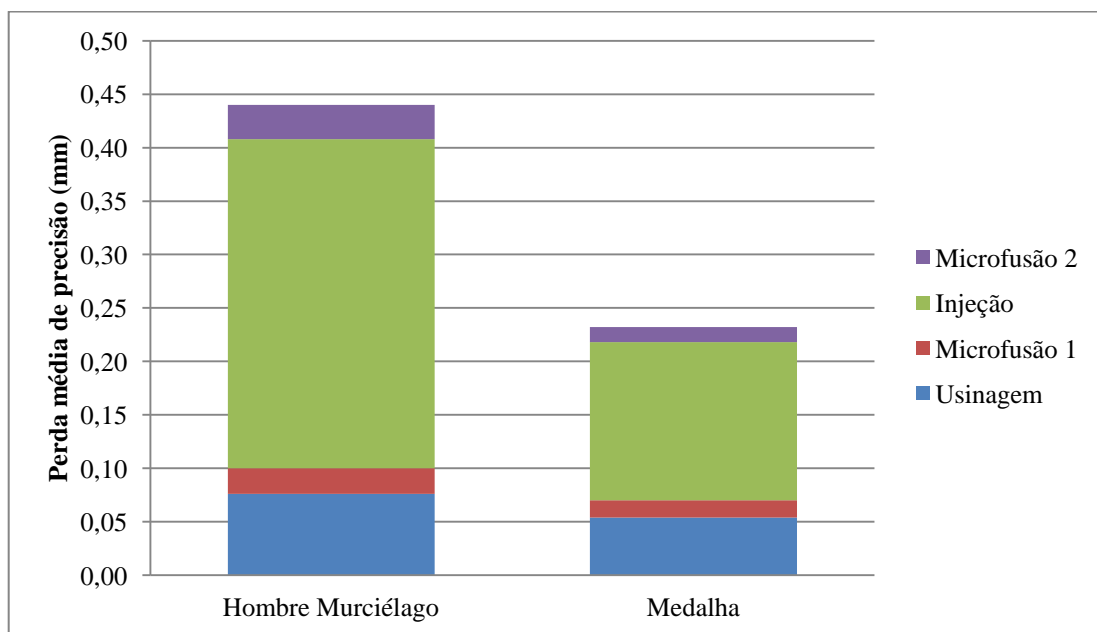


Tabela 8 – Valores médios e desvios padrões das diferenças captadas pela digitalização tridimensional em cada etapa da produção dos modelos da medalha (unidades em mm)..

		Usinagem	Microfusão 1	Injeção	Microfusão 2	Acabamento
Azul	Média	0,06	0,08	0,23	0,25	0,23
	Desvio	0,04	0,05	0,15	0,18	0,15
Roxa	Média	0,05	0,06	0,23	0,25	0,24
	Desvio	0,03	0,04	0,16	0,18	0,17
Verde	Média	0,04	0,06	0,20	0,21	0,20
	Desvio	0,03	0,04	0,15	0,15	0,15
Gold	Média	0,06	0,08	0,21	0,23	0,25
	Desvio	0,04	0,06	0,15	0,17	0,18
Wizard	Média	0,06	0,07	0,22	0,22	0,25
	Desvio	0,04	0,04	0,16	0,16	0,17

A Figura 68 apresenta os gráficos gerados a partir das médias dos erros dimensionais em função do processo de produção dos modelos do *hombre murciélago* e da medalha. Em ambos os casos, observa-se que a diferença dos valores obtidos entre as primeiras etapas (Usinagem e Microfusão 1), bem como entre as últimas (Injeção e Microfusão 2) são desprezíveis. É notória a discrepância dimensional ocorrida na etapa de produção dos moldes de borracha de silicone (Injeção), a qual é representada pela faixa na cor verde.

Figura 68 – Erros dimensionais ocorridos em função dos processos de produção dos modelos do *hombre murciélago* e da medalha.



Além das informações obtidas com a organização dos dados em tabelas e gráficos, cabe ressaltar que estes não indicam o melhor material. O tipo de cera utilizado para obtenção dos primeiros modelos exerce influência no acabamento superficial até a etapa de produção das peças piloto (Microfusão 1). A qualidade da peça final (Microfusão 2) será determinada em função dos materiais utilizados como modelos e moldes nas etapas subsequentes à primeira microfusão.

Em relação aos erros dimensionais em função dos materiais utilizados, eram esperados valores mais altos devido à contração do metal durante o resfriamento. Entretanto, verificou-se que estes reproduzem, com erros desprezíveis, quase que fielmente, os detalhes que haviam sido fornecidos pela peça tida como modelo. Neste sentido, constatou-se que as maiores diferenças dimensionais decorrentes da contração do material são provenientes das peças produzidas pela etapa de injeção de cera nos moldes de borracha de silicone.

## 5 CONCLUSÕES

O presente estudo permite compreender o processo referente à usinagem CNC, visto que aprofunda o conhecimento dos parâmetros de corte para diferentes tipos de cera. Através das especificações determinadas, é possível produzir modelos com melhor acabamento superficial em menor tempo. Além disso, identifica o principal ponto de perda dimensional no processo usual de produção de joias. Nas etapas de confecção dos moldes de borracha de silicone e injeção de cera deve ser dada máxima atenção a fim de reduzir os erros gerados nas etapas intermediárias da produção de joias em larga escala. De maneira geral, conclui-se que:

- Manter as ceras para modelagem armazenadas em locais aquecidos ou resfriados não geram melhores condições de fresamento, bem como de acabamento superficial.
- Velocidades de avanço mais baixas geraram menor rugosidade na superfície inferior das amostras e seções mais estreitas. Entretanto, as superfícies laterais apresentaram-se menos regulares;
- Verificou-se, ainda, que, dentre as amostras estudadas, as ceras *wizard* e *gold* apresentaram os melhores resultados, evidenciando o fato de que aquelas com maior dureza apresentam as melhores condições de acabamento na etapa de obtenção de modelos por usinagem (vale ressaltar que as ceras citadas estão disponíveis apenas no mercado internacional);
- Constatou-se que, para conferir às peças um melhor acabamento, as ceras devem ser fresadas no sentido concordante. E, para evitar a quebra e possível deslocamento durante procedimentos de usinagem, sugere-se que as peças sejam presas à mesa de forma a homogeneizar as tensões de fixação (no presente estudo, foi realizado com o uso de fitas dupla-face de alto desempenho);

- Ao usar ceras para modelagem, é indicada a utilização de seções com, no mínimo, 0,3 mm de espessura a fim de evitar fissuras e quebras. Além disso, sugere-se como parâmetro para as ceras azul, verde, *gold* e *wizard* a velocidade de avanço máxima de 700 mm/min.
- No caso específico da cera roxa, são necessários novos ensaios – em equipamentos que permitam o ajuste da velocidade de rotação abaixo da utilizada neste estudo (6.000 rpm) – para que os parâmetros adequados a este material possam ser determinados.
- Devido à grande quantidade de cavaco aderido à peça, a execução da limpeza por profissionais qualificados tornou-se indispensável. Sendo assim, propõe-se a realização de novos estudos utilizando-se diferentes tipos de ferramentas, bem como outras estratégias para a usinagem CNC.
- Para a execução do processo de microfusão, canais de ataque foram unidos às peças usinadas. Com o término do processo, verificou-se que a remoção dessas estruturas danificou parcialmente o formato dos modelos. Assim, propõem-se novos ensaios nos quais os canais de ataque façam parte do projeto de execução dos modelos obtidos por usinagem CNC.
- Observou-se que os processos de microfusão realizados nesta pesquisa apresentaram bom acabamento superficial e, ainda, replicaram, com riqueza de detalhes, a geometria das peças utilizadas como modelos.
- A partir das análises realizadas por meio da digitalização tridimensional pôde-se constatar que a usinagem CNC e os processos de microfusão não geraram erros dimensionais significativos. As zonas de maior divergência são as de ocorrência de muitos detalhes ou de ângulos onde a ferramenta não consegue alcançar.
- A execução dos moldes de borracha de silicone apresentou-se como a etapa crítica dentre as avaliadas neste estudo. Percebeu-se que a pressão exercida durante a vulcanização do material, pode deslocar a peça utilizada como modelo. Foi observado nos modelos produzidos pela injeção da cera que houve surgimento de cavidades no formato de bolhas na superfície, distorção no formato e perceptível diminuição no tamanho das peças.

- As maiores divergências nas dimensões obtidas entre as etapas de produção das peças foram indicadas por meio dos gráficos gerados para avaliação dos modelos produzidos pela injeção de cera. Entretanto, com os ensaios realizados nesta pesquisa, não é possível afirmar que o desvio (com valor médio de 0,41 mm) é atribuído apenas ao processo de injeção de cera, uma vez que foram observadas alterações significativas nos moldes.
- Os resultados obtidos com a medalha apresentam os maiores erros relativos. Apesar das análises indicarem erros absolutos com o dobro do valor nas peças do *hombre murciélagos*, deve-se considerar que as dimensões desta peça são três vezes maiores que as da medalha.
- No que tange a produção dos modelos por usinagem CNC em cera para modelagem, recomenda-se a utilização da cera roxa (a qual permite maior velocidade de avanço, resultando em menor tempo de processamento), visto que a diferença entre elas é insignificante perante a alta perda de precisão no processo de injeção de cera.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

- Execução de novos ensaios de usinagem CNC nas ceras para modelagem com velocidade de rotação abaixo de 6.000 rpm;
- Avaliação do acabamento obtido por outros tipos de ferramentas de corte, tais como a de ponta esférica;
- Realização de novos ensaios nos quais os canais de ataque estejam integrados às peças desde a execução dos primeiros modelos, sendo removidos apenas na etapa de acabamento final;
- Estudo das diferentes borrachas de silicone empregadas para obtenção de moldes, bem como das ceras para injeção utilizadas para produção de modelos.

## REFERÊNCIAS

ADRIAN, S.S.; VISWANATHAN, S. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting. In: **Materials Science & Engineering**, 2003. p. 125-134.

AGÊNCIA GAÚCHA DE DESENVOLVIMENTO E PROMOÇÃO DO INVESTIMENTO. **APL Pedras, Gemas e Joias**. Disponível em: <[http://www.agdi.rs.gov.br/upload/1351259638\\_Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20-%20APL%20PEDRAS,%20GEMAS%20E%20JOIAS.pdf](http://www.agdi.rs.gov.br/upload/1351259638_Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20-%20APL%20PEDRAS,%20GEMAS%20E%20JOIAS.pdf)>. Acesso em 04 dezembro 2012.

AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY. **Analysis of casting defects**. Des Plaines: AFS, 1974.

AMORIM, W.G.; TEIXEIRA, M.B.S. Integração de tecnologias na fundição simulada de joias de ouro. In: **VI Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto**, Belo Horizonte, 2007.

ARAÚJO, S.C. **Vulcanização do látex da borracha natural induzida com feixe de elétrons**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1993.

BENZ, I.E. **Inovação no processo de design de joias através da modelagem 3D e da prototipagem rápida**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

BERTOL, L. S. **Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção de materiais no design de implantes personalizados**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

BO BARDI, L. **Tempos de Grossura: O design no impasse**. São Paulo: Instituto Lina Bo e P.M. Bardi, 1994.

CANAL, M.F. **Dibujo para joyeros**. Barcelona: Parramón, 2006.

CARPENTER, W. Metals Suitable for Enameling. In: **Glass on Metal**, vol. 5, no. 6, 1986.

CARVALHO, J.; VOLPATO, N. Prototipagem rápida como processo de fabricação. In: VOLPATO, N. (Org.). **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007, pp. 1-15.

CHUA, C. K, LEONG, K. F., LIM, C. S. **Rapid Prototyping: Principles and Application**, 2nd ed., World Scientific, New Jersey. 2003.

CODINA, C. **A joalheria**. Barcelona: Editorial Estampa, 2000.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC. **Color Chart**. Disponível em: <[http://www.copper.org/applications/architecture/arch\\_dhb/copper\\_alloys/color\\_chart.html](http://www.copper.org/applications/architecture/arch_dhb/copper_alloys/color_chart.html)>. Acesso em: 07 novembro 2011.

COSTA, E.; SILVA, J. Design de Joias: faces da criação contemporânea. In: SILVA, J. (Org.). **Design, Arte e Tecnologia 4**. São Paulo: Edições Rosari, Universidade Anhembi Morumbi, PUC-Rio, Unesp-Bauru, 2008, p. 1-12.

COSTA, E.M.L. **Design de joias: desafios contemporâneos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Design, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2008.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2010.

DOUGHTY, A. **Bangles e Bracelets**. London: A&C Black Publishers, 2009.

FERRARESI, Dino. **Usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

FERREIRA, J. Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology. In: **Journal of Materials Processing Technology**, 2003, n. 142, pp. 374-382.

FERREIRA, J.M.G.C. **Tecnologia da Fundição**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

FIELDER, H. The Relationship between Wax Fillers and Resultant Wax Physical Properties. In: **Proceedings of 46th Annual Technical Meeting**, 1998, Investment Casting Institute, Orlando.

FONSECA, J.H.O. **A prototipagem rápida como proposta para solução de problemas técnicos na produção de joias no Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2006.

FREEMAN. **Ferris® File-A-Wax®: Carving & Milling Waxes**. Disponível em: <[freemanwax.com/ferris-file-a-wax-carving-milling-waxes.html](http://freemanwax.com/ferris-file-a-wax-carving-milling-waxes.html)>. Acesso em: 13 março 2012.

FREITAS, G. **Metodologia e aplicabilidade da digitalização 3D a laser no desenvolvimento de moldes para calçados e componentes**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2006.

GIULIANO, J.A.S. **Os processos de fundição, como ferramenta na obtenção de esculturas em metal**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2008.

GOLA E. **A joia: história e design**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2008.

GRIMWADE, M. **Introduction to precious metals: metallurgy for jewelers and silversmith**. London: A&C Black Publishers, 2009.

HORTON, R.A. Formulating Pattern Waxes. In: **Proceedings of the 31st Annual Meeting of the Investment Casting Institute**, 1983, n. 18.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS. **O setor de gemas e joias no Brasil**. IBGM. Brasília, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS. **Políticas e Ações para Cadeia Produtiva de Gemas e Joias**. Brasília: Brisa, 2005.

IPAR, C.E.A.L.; FERREIRA, N.L.; DUARTE, L.C.; VILLASBÔAS, F.S.; BISINELLA, J.C.; SILVA, J.T.; SILVA, B.B.; HARTMANN, L.A. Desenvolvimento de matéria-prima para impressão tridimensional a partir de rejeitos gemológicos de ágata. In: **Anais do VI Congresso Internacional de Materiales**, 2011, Bogotá, n. IM-PT-C-013.

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

LUFT, C.P. **Pequeno dicionário da língua portuguesa**. São Paulo: Scipione Autores Editores, 1984.

MAGTAZ, M. **Joalheria Brasileira: do descobrimento ao século XX**. São Paulo: Pinacoteca do Estado de São Paulo, 2008.

MIDGLEY, B. **The complete guide to sculpture, modeling and ceramics techniques and materials**. New Jersey: Chartwell Books, 1986.

MUSEO DEL ORO. **Fundiciones Especiales**. Disponível em: <<http://www.banrepcultural.org/museo-del-oro/sociedades/metalurgia-prehispanica/fundiciones-especiales>>. Acesso em: 05 outubro 2011.

PIAZAS, C.; LONDOÑO, E. **Catálogo: Museo del Oro**. Bogotá: Banco de la República – Museo Del Oro, 2006.



PIWONKA T.S., WOODBURY K. M., WIEST J.M. Modeling casting dimensions: effect of wax rheology and interfacial heat transfer. In: **Materials & Design**, 2000, pp. 365-372.

PRASAD, K.D.V.; YARLAGADDA, T.S.H. Statistical analysis on accuracy of wax patterns used in investment casting process. In: **Materials Processing Technology**, 2003. 138: pp. 75-81.

REBELLO, L.H.B. A Produção de Joias e o Design. In: **II Congresso Científico da UniverCidade**, 2007, Rio de Janeiro.

REZAVAND, S. A. M.; BEHRAVESH, A.H. An experimental investigation on dimensional stability of injected wax patterns of gas turbine blades. In: **Materials Processing Technology**, 2007. 182: pp. 580-587.

RICK, C.F. **Estudo da liga à base de Zn-Al-Cu-Mg aplicada na fabricação de joias folhadas**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

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

ROCKENBACH, M.; BERTOL, L.S.; SILVA, F.P; ROLDO, L. Avaliação da precisão e da facilidade de fabricação de diferentes métodos de produção de protótipos: prototipagem rápida e usinagem CNC. In: **V Congresso Internacional de Pesquisa em Design**, 2009, Bauru.

SALEM, C. **Joias: Modelagem em cera e múltiplos**. São Paulo: 2000 Joias, 2002.

SALEM, Carlos. **Joias Os Segredos da Técnica**. São Paulo. Gráfica Newpress, 2000.

SALMORIA, G.V; VELASQUES, V.; AHRENS, C.H.; SOLDI, V.; PIRES, A.T.N. Stereolithography Somos 7110 Photosensitive Resin: Study of Curing Kinetic Thermal Degradation. In: **Journal Processing Materials Techonology**, 2005, v. 168, pp.164 -171.

SANTOS, J.R.L. dos; ZAMBERLAN, M.C.P.L.; SANTOS, I.A. dos. Novas tecnologias de modelagem tridimensional física e virtual no design de joias. In: **II Congresso Internacional de Pesquisa em Design**, Rio de Janeiro, 2003, pp. 6-12.

SANTOS, M.S.; YAMANAKA, H.T.; PACHECO, C.E.M. **Bijuterias**. São Paulo: CETESB, 2005. (Série P + L)

SILVA, F.P. **O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produto.** Dissertação de mestrado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2006.

\_\_\_\_\_. **Usinagem de Espumas de Poliuretano e Digitalização Tridimensional para Fabricação de Assentos Personalizados para Pessoas com Deficiência.** Tese de doutorado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2011.

SOUZA, A.J. **Processos de Fabricação por Usinagem: Parte 1.** Porto Alegre: UFRGS, 2011. (apostila)

TASCLOGLU, S.; INEM, B.; AKAR N. Conversion of an investment casting sprue wax to a pattern wax by the modification of its properties. In: **Materials & Design**, 2004, pp. 499-505.

VOLPATO, N. Os principais processos de prototipagem rápida. In: Volpato, N. (Org.) **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações.** São Paulo: Edgard Blücher, 2007, pp. 55-100.

WINKLER, C.L. O papel do designer e a evolução da joalheria diante das novas tecnologias. In: **Revista Percepção & Design**, 2008, ed. 01.

WRUBLAK, O. ; PILATTI, L.A.; PEDROSO, B. Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto. In: **Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, Ponta Grossa**, 2008, pp. 01-07.

## **APÊNDICE 1**

Resultados dos ensaios de velocidade de avanço nas ceras para modelagem.

Quadro 4 – Resultado dos cortes gerados nas ceras para modelagem em diferentes velocidades de avanço. Em destaque os melhores resultados.



**Legenda**

Trincas e Quebras de Seções Estreitas

Marcas da Ferramenta na Base

Irregularidade nas Superfícies Laterais

**Nível**

Aceitável

Regular

Inaceitável

**Ferramenta**

Fresa cônica com ângulo de 18° e ponta reta de 0,2 mm

**Outros Parâmetros**

Rotação (n): 6.000 rpm

Profundidade de corte ( $a_p$ ): 0,35 mm

Penetração de trabalho ( $a_e$ ): 0,075 mm