

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA METALÚRGICA

LÁIS NARA MACHADO DA SILVA

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA COM LIGAS
DE PRATA APLICADA A JOALHERIA**

Vitória

2021

LÁIS NARA MACHADO DA SILVA

**ESTUDO DE LIGAS DE METÁLICAS UTILIZADAS NA JOALHERIA PELO
PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenadoria do curso de Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal do Espírito Santo – como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharel em Engenharia metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. André Caetano Melado

Vitória

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Nilo Peçanha do Instituto Federal do Espírito Santo)

S586e Silva, Laís Nara Machado da.

Estudo de técnicas de fundição por cera perdida com ligas de prata aplicada a joalheria / Laís Nara Machado da Silva. – 2021.
105 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: André Caetano Melado

Monografia (graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Cursos Superiores em Metalurgia, Curso Superior de Engenharia Metalúrgica, Vitória, 2021.

1. Metalurgia. 2. Ligas (metalurgia). 3. Fabricação de jóias. 4. Ligas de prata-cobre. 5. Calcinação – (Metalurgia). 6. Fundição. 7. Engenharia metalúrgica. I. Melado, André Caetano. II. Instituto Federal do Espírito Santo. III. Título.

CDD 21 – 669

Elaborada por Bruno Giordano Rosa – CRB-6/ES - 699



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Autarquia criada pela Lei nº 11.892, de 29 de dezembro de 2008
CAMPUS VITÓRIA
Avenida Vitória, 1729 - Jucutuquara - 29040-780 - Vitória - Espírito Santo

LÁIS NARA MACHADO DA SILVA

**ESTUDO DE LIGAS DE METÁLICAS UTILIZADAS NA JOALHERIA PELO
PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica do Ifes,
como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalúrgica

Aprovado em 17 de maio de 2021

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. André Caetano Melado
Instituto Federal do Espírito Santo
(Orientador)

Prof. Dr. Felipe Fardin Grillo
Instituto Federal do Espírito Santo

Eng. André Luiz Poubel
Escola Capixaba de Joalheria

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela minha vida.

Agradeço à minha família, Geraldo, Sandra e Sanger Lya por me incentivarem e me apoiarem para concluir o meu curso superior.

Agradeço ao meu amado noivo, Luiz Paulo Silva, por não me deixar desistir nos momentos difíceis e por escutar com paciência as minhas reclamações durante este trabalho.

Agradeço à minha professora de ourivesaria Ana Carolina Poubel e seu irmão André Luiz Poubel, da Oficina - Escola Capixaba de Joalheria, por me concederem espaço e equipamentos para realizar os experimentos deste trabalho e pela amizade eterna.

Agradeço ao professor Alfredo Gonçalves Cunha, da Universidade Federal do Espírito Santo, por me auxiliar na montagem do sistema de vácuo, que foi tão importante para conclusão deste trabalho.

Agradeço à empresa SEGOTEC que imprimiu os modelos para os testes realizados neste trabalho.

Agradeço ao meu orientador André Caetano Melado pelo conhecimento em Fundição que compartilhou comigo e pela ajuda na conclusão deste trabalho.

Agradeço aos demais professores, do curso de Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal do Espírito Santo, por todo conhecimento compartilhado comigo durante todo o curso de graduação.

Para meus Pais, Geraldo e Sandra, que me deram a vida.

Para minha Irmã, Sanger Lya, que sempre esteve do meu lado.

Para meu Noivo, Luiz Paulo, que sempre me apoiou.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”

Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho foram apresentados equipamentos de micro fundição, com baixo custo de investimento, que atende pequenas empresas de produção de joias. Para verificar qual liga é mais adequada para fundição, foram feitos testes de fluidez, e utilizados 2 tipos de ligas: Prata 925 e Prata 725. Para comparar a fluidez das ligas, 2 tipos de modelos de cera diferentes foram usados: espiral e grade. Sendo o modelo de grade mais preciso que o modelo de espiral. Para fazer a inclusão do metal no molde cerâmico utilizou-se 4 métodos: vácuo, massalote com vácuo, massalote e sem nada. Os resultados mostram que a fundição com vácuo teve maior preenchimento, e a liga de prata 725 apresentou maior fluidez nos testes de espiral. No modelo de grade, somente os testes com vácuo tiveram preenchimento significativo, para as 2 ligas. Para avaliar as possibilidades de aplicação deste equipamento, foram feitos testes de qualidade de fundição, onde 2 modelos foram utilizados: modelo de cera e modelo de resina. Esse modelo tem design mais complexo, e foi projetado no *software Rhinoceros 3D*, e impresso em uma impressora 3D. Nestes testes a qualidade superficial, das peças fundidas foram avaliadas, considera-se principalmente preenchimento e porosidades. Após considerar os melhores resultados dos testes anteriores, para o teste de qualidade de fundição, foram usadas a liga 925 e a fundição com vácuo. Os resultados mostram que, o modelo de cera apresentou menor quantidade de porosidade superficial, do que o modelo de resina, utiliza-se um ciclo de calcinação mais curto (ciclo 1). Um novo teste com o modelo de resina foi realizado, com um ciclo de calcinação mais longo (ciclo 2), o que gerou uma diminuição considerável na quantidade de porosidade superficial, na peça fundida.

Palavra-Chave: Fabricação de joia, fundição por cera perdida, ligas de prata.

ABSTRACT

In this work, micro casting equipment was presented, with low investment cost, which serves small jewelry production companies. To check which alloy is best suited for casting, fluidity tests were performed, and 2 types of alloys were used: Silver 925 and Silver 725. To compare the fluidity of the alloys, 2 types of different wax models were used: spiral and grid. The grid model being more precise than the spiral model. To make the inclusion of the metal in the ceramic mold, 4 methods were used: vacuum, feeder with vacuum, feeder and nothing. The results show that the vacuum casting had greater filling, and the silver 725 alloy showed greater fluidity in the spiral tests. In the grid model, only the vacuum tests had significant filling, for the 2 alloys. With the view to evaluate the application possibilities of this equipment, casting quality tests were carried out, where 2 models were used: wax model and resin model. This model has a more complex design, and was designed in the Rhinoceros 3D software, and printed on a 3D printer. In these tests, the surface quality of the castings was evaluated, considering mainly filling and porosity. After considering the best results of the previous tests, for the casting quality test, 925 alloy and vacuum casting were used. The results show that the wax model presented a lower amount of surface porosity than the resin model, using a shorter calcination cycle (cycle 1). A new test with the resin model was carried out, with a longer calcination cycle (cycle 2), which generated a considerable decrease in the amount of surface porosity in the cast.

Keyword: jewelry making, investment casting, silver alloys.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVO	12
2.1	OBJETIVO GERAL.....	12
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	13
3.1	HISTÓRICO	13
3.2	PROCESSO DE FUNDIÇÃO	14
3.3	LIGAS DE PRATA	15
3.4	FUSÃO DO METAL	19
3.5	EQUIPAMENTOS PARA FUSÃO	20
3.6	FUNDIBILIDADE E FLUIDEZ	22
3.7	SOLIDIFICAÇÃO.....	25
3.7.1	Contração da peça solidificada	33
3.8	PROJETO DO MOLDE PARA CERA PERDIDA.....	36
3.9	ETAPAS DA FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA	38
3.10	MODELAGEM DA CERA	45
3.10.1	Modelagem manual	46
3.10.2	Modelagem por prototipagem rápida	46
3.10.3	Impressão 3D	49
3.11	REVESTIMENTOS REFRAATÓRIOS	50
3.11.1	Composição	51
3.11.2	Reações do sulfato de cálcio	53
3.11.3	Preparo do revestimento	53
3.11.4	Secagem e decerção	55

3.11.5	Ciclo de calcinação.....	56
3.12	FUNDIÇÃO DIRETA	61
4	MATERIAIS E METODOS	65
4.1	ELABORAÇÃO DAS LIGAS	65
4.2	CONFECÇÃO DO MODELO EM CERA.....	66
4.3	PREPARO E CALCINAÇÃO DO REVESTIMENTO	69
4.4	INCLUSÃO DO METAL FUNDIDO.....	72
4.5	PROCEDIMENTO	74
4.6	CICLOS DE CALCINAÇÃO.....	79
4.7	MODELOS DE CERA	80
5	RESULTADOS	85
5.1	TESTE DE FLUIDEZ	85
5.1.1	Prata 925	85
5.1.2	Prata 725	87
5.1.3	Comparação dos testes de fluidez.....	89
5.2	TESTE DE QUALIDADE DE FUNDIÇÃO	92
5.2.1	Modelo de cera	93
5.2.2	Modelo de resina	95
5.2.3	Comparação dos testes de qualidade de fundição	98
5.3	INVESTIMENTO.....	98
6	CONCLUSÃO	100
	REFERÊNCIAS.....	102

1 INTRODUÇÃO

No passado, as joias eram criadas e confeccionadas somente com trabalho manual, um ourives modelava uma joia, através da forja e do recozimento do metal, ou seja, um único artesão trabalhava em todas as etapas da produção, o que tornava a fabricação de joias um processo lento e caro, que demandava mão de obra qualificada e escassa. Porém com a industrialização isso mudou, muitos equipamentos deixaram de ser manuais e se tornaram elétricos, aumentou-se a produtividade, porém ainda havia alto valor agregado, devido a produção individual de cada joia. Outra revolução foi a utilização de peças produzidas em series, como a fundição de areia verde, e em seguida a fundição por cera perdida, diminui a necessidade de mão de obra qualificada, e diminui a produção artesanal das joias.

Com a fundição por cera perdida, uma única joia pode ser replicada infinitamente, nos moldes flexíveis. Assim com métodos de replicação rápida, as joias começam a ser menos exclusivas e mais acessíveis, e com utilização de novas ligas mais baratas e pedras sintéticas, surge um novo tipo de acessório as semi-joias e bijuterias, que tornaram esse tipo de peça barata e popular.

A escolha do processo de fundição vai depender das características da peça a ser fundida, peças de joalheria geralmente são delicadas e cheias de detalhes, além disso as ligas de ouro e prata nem sempre são ideais para fundição, devida a alta pureza de algumas ligas. Como não é possível fazer grandes mudanças nas ligas tradicionais, faz-se necessário utilizar outros métodos para forçar a inclusão do metal no molde, como gravidade, força centrífuga, vácuo, baixa pressão e alta pressão.

A fundição de ligas de alto ponto de fusão apresentam alta reatividade, no estado fundido, com o revestimento cerâmico, usado na fundição por cera perdida. Dessa forma esses materiais ter refratariedade suficientemente alta. Como as ligas utilizadas na joalheria apresentam alto ponto de fusão, que variam entre 800°C à 1200°C, além da necessidade de uma alta qualidade no acabamento superficial das peças, isso gera a necessidade de revestimentos refratários de qualidade, e o processo de queima do revestimento refratário é complexo. (FRYE, YASREBI, STURGIS, 2000)

Os avanços tecnológicos na área de modelagem começaram nos anos de 1980, com os *softwares CAD (Computer Aided Design)*, que são as ferramentas mais utilizadas nas

representações gráficas. Assim como em outras áreas, a joalheria também se beneficiou do uso da tecnologia para projetar e modelar tridimensionalmente com maior rapidez e precisão as joias produzidas. (BATISTA, 2008)

No mercado de joias, muitas empresas que vendem equipamentos de fundição, de alto valor, com a promessa de uma peça fundida “sem defeitos”, porém sem conhecimento aprofundado do processo, o resultado não será satisfatório, mesmo com as máquinas de fundição mais modernas (FACCENDA, 2001).

Com este trabalho, busca-se aprofundar o conhecimento do processo de fundição por cera perdida, aplicada a joalheria, com objetivo de produzir peças fundidas com alto preenchimento e baixa porosidade. Para aplicar este conhecimento, foi desenvolvido, para este trabalho, um sistema de fundição de baixo custo, com isso busca-se o melhor resultado da peça fundida, com o menor investimento possível em equipamento. Assim para comprovar que o sistema de fundição desenvolvido, pode ser utilizado para produção de joias, propôs-se comparar aspectos relevantes ao processo de fundição por cera perdida, como o tipo de liga, a utilização de vácuo na fundição, ciclo de calcinação e material do modelo a ser fundido.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a fundibilidade das ligas Ag 925 e Ag 725 na utilização em joalherias, pelo processo de cera perdida, varia-se alguns parâmetros de processo como, a aplicação de vácuo no molde e o uso de massalotes. Além disso tem-se como objetivo avaliar a eficiência do equipamento de fundição, de baixo custo, utilizado neste trabalho na produção de joias de alto padrão

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

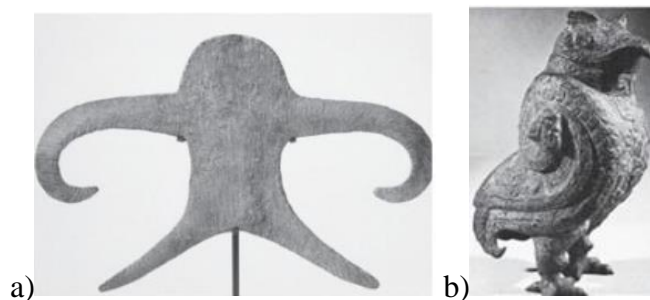
- Comparar a fluidez das ligas Ag 925 e Ag 725;
- Avaliar mecanismo de inclusão do metal no molde cerâmico: massalote, vácuo e sem nada;
- Comparar quantidade de porosidade superficial das peças fundidas, em cera e resina;
- Avaliar os ciclos de calcinação utilizados;
- Determinar a funcionalidade do sistema de fundição desenvolvido.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 HISTÓRICO

Segundo Kliauga e Ferrante (2009), a fundição iniciou por volta de 4000-3000 a.C., quando, na denominada era do bronze, o homem aprendeu a usar o cobre, e logo depois o estanho e o chumbo na fabricação de objetos e adornos. A peça fundida mais antiga que se conhece é um pequeno sapo de bronze, proveniente da antiga Mesopotâmia (hoje Iraque), fabricado pelo processo de cera perdida, e que data de 3200 a.C. Na Índia, as primeiras peças fundidas pertenceram à civilização Harappan (Figura 1a), da qual se conhecem peças de cobre, ouro, prata e chumbo já em 3000 a.C., e onde foram desenvolvidos os cadinhos para fundição. É deste país que vêm os primeiros textos menciona-se técnicas sobre a arte de extração, fusão e fundição de metais, por exemplo, o Arthashastra (500 a.C.). Na mesma época, as técnicas de fundição de metais e ligas eram conhecidas no Irã e na China, onde alcançaram altos níveis de perfeição, e de onde se conhecem peças de bronze (2100 a.C.), sinos de alta precisão (1000 a.C.) e as primeiras peças de ferro fundido, que datam de 500 a.C. (Figura 1b).

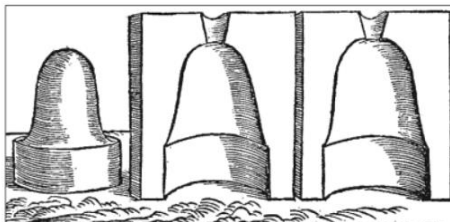
Figura 1 - a) Objeto de forma antropomórfica, 1300-1500 a.C.; b) Vaso para vinho em bronze, china, 800 a.C.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

O método de fundição utiliza-se moldes de areia compactada, por exemplo, só foi introduzido na França. Vannoccio Biringuccio, que dirigiu a fundição do Vaticano, ao produzir canhões, sinos e estátuas religiosas, é considerado o pai da fundição moderna no Ocidente (Figura 2). (KLIUGA, FERRANTE, 2009)

Figura 2 - Molde bipartido para fundição de pequenos sinos com macho central. Gravura do livro de *La Pirotechnia* (1540).



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

Em 1763, Lavosier, um importante químico francês, fez um estudo com métodos usados para aquecer gesso e fazer gesso de Paris, assim chamado, porque seu principal uso era em residências em Paris na França. No início de 1900, um trabalho experimental foi feito para fazer moldes para peças fundidas dentárias, o primeiro uso desses métodos para fundir joias foi em Nova York em 1927, na joalheira de William Bojar em 1935 em Rhode Island. Ao longo dos anos, foram feitas modificações no revestimento refratários, a base de gesso para torná-lo mais adequado para produção de joias. (ECCLES, 2002).

Dois outros grandes desenvolvimentos permitiram, que a fundição por cera perdida se tornasse a preferida na produção de joias: a invenção de moldes flexíveis, de borracha vulcanizada pelo canadense Jungersen em 1935, e a descoberta de que a fundição por cera perdida, muito utilizado no campo da odontologia, também pode ser usado com sucesso para produção de joias. Essa descoberta aconteceu em meados do século 20 (1940-1950). Desde então, o uso de fundição de cera perdida tornou-se cada vez mais difundida, e atualmente uma estimativa aproximada diz que 60% ou mais de ouro, platina e joias de prata, no mundo são produzidas por fundição por cera perdida. (FACCENDA, 2001)

3.2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Fundição é um processo de fabricação onde um metal ou liga metálica, no estado líquido, é vazado em um molde com formato e medidas correspondentes, aos da peça a ser produzida. Os processos de fundição, apresentam algumas vantagens em relação a outros tipos de processos de fabricação, como no caso da produção de peças complexas e com cavidades internas. Depende também do material, com o qual vai ser produzida a

peça, no processo de fundição parte do estado líquido. Logo, aspectos relacionados com a solidificação de metais e ligas devem ser considerados. O processo de fundição envolve: fusão do metal ou liga, vazamento em um molde, solidificação da peça, remoção do metal ou liga solidificado do molde.

Os métodos com molde permanente, utilizam moldes metálicos, e são adequados para a produção de grande número de peças, porém torna limitada as dimensões dos modelos, por isso não é muito utilizado na produção de joias, somente é utilizada como lingoteira, onde o metal fundido é vazado, para depois ser laminado ou forjado.

Os métodos com moldes não duráveis são: areia verde e fundição de precisão por cera perdida. Porém areia verde é mais utilizada em indústrias, como de fundição de alumínio, e não fundi peças muito detalhadas, por isso não é muito utilizada no ramo de joalheria. Na fundição de precisão por cera perdida, é necessário fabricar o molde a cada fundição e, em geral, são acopladas várias peças em um mesmo sistema de alimentação. Nos processos de modelos não permanentes, cada modelo só dura uma reprodução. Estes modelos são feitos em cera, poliestireno expandido (isopor) ou outros materiais poliméricos. Durante o processo de queima, esse modelo é consumido, deixa-se um espaço vazio, que será preenchido pelo metal.

3.3 LIGAS DE PRATA

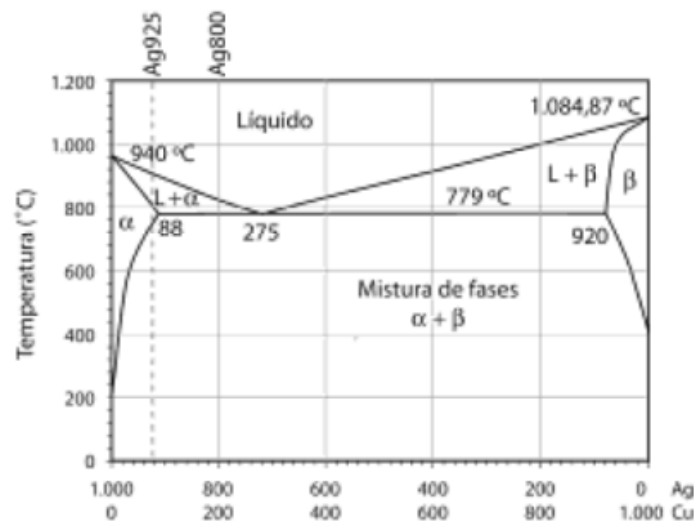
A Prata é um elemento químico do grupo dos metais, que no estado natural apresenta cor branco e brilhante. A prata é dúctil e maleável, de fácil manipulação química e mecânica, é o metal de maior condutibilidade elétrica e calorífica. Quando polida, possui excelente capacidade de reflexão. De atividade química discreta, reage com ácido sulfúrico e Nítrico, com o enxofre e com os derivados deste. (RICK, 2006)

Na joalheria para aumentar a sua dureza e resistência mecânica, é normalmente ligada ao cobre (adicionam-se de 2,5 a 20%). Para ligas de brasagem o teor de Prata é menor e contêm também Zinco e mais Cobre.

O diagrama Ag-Cu (Figura 3), tanto a prata como o cobre apresentam solubilidade limitada um no outro. A máxima solubilidade do cobre na prata é 88% Cu, e ocorre a 779°C. Abaixo desta temperatura, a solubilidade diminui gradativamente, e o diagrama apresenta uma região de duas fases. Outra característica é que o diagrama apresenta um eutético. O eutético é um ponto com composição e temperatura fixos (Ag 720, 779°C) no

qual as linhas *sólidas* e *líquidas* se encontram. Neste ponto a liga solidifica em temperatura mais baixa do que as demais composições. A solidificação ocorre com patamar de temperatura, forma-se porém, duas fases: a fase α rica em prata e a fase β rica em cobre. As composições químicas destas fases (a 200°C) são respectivamente Ag 990 e Cu 1000, ou seja, a solubilidade mútua é praticamente nula. (KLIUGA, FERRANTE, 2009)

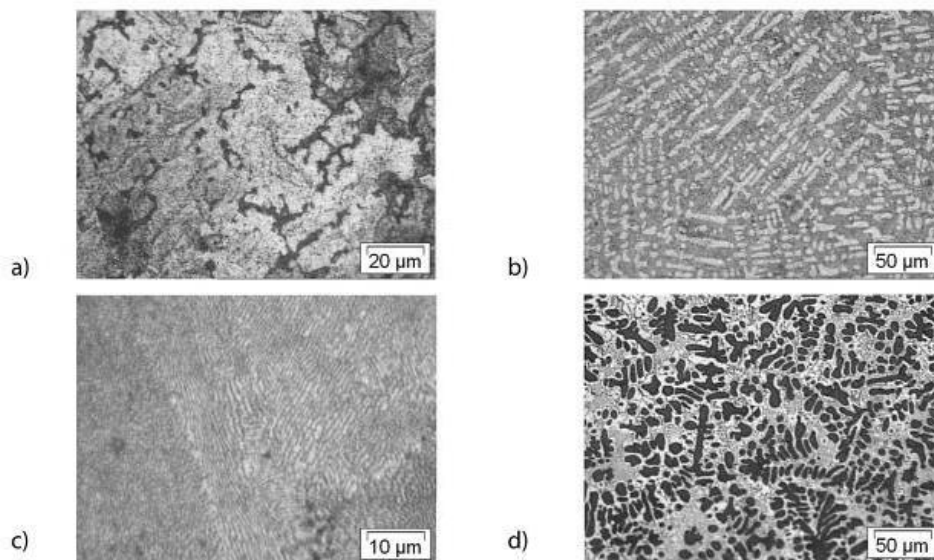
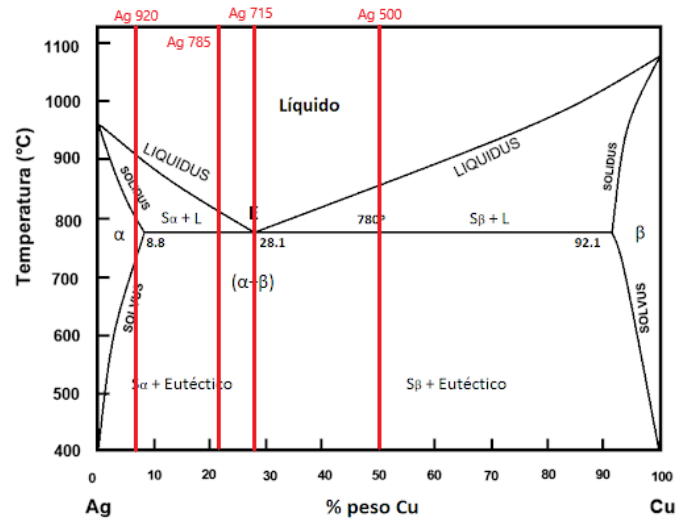
Figura 3 – Diagrama de fases Ag-Cu.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

As ligas com composição localizadas a esquerda do ponto eutético são chamadas hipoeutéticas e se solidificam no campo α +líquido o que significa que iniciam a sua solidificação forma-se cristais de fase α e β de maneira simultânea. As ligas localizadas à direita do ponto eutético denominam-se hipereutéticas e iniciam a solidificação forma-se cristais da fase β , e quando a temperatura atinge o ponto eutético, o restante do líquido forma as fases α e β de maneira simultânea. Para entender melhor como funciona o sistema eutético, pode-se observar como ocorrer a solidificação das ligas Ag 920, Ag 785, Ag 715 e Ag 500, cujas microestruturas são apresentadas no gráfico e nas micrografias na Figura 4. Nelas a fase escura é a rica em cobre (fase β) e a mais clara, a rica em prata (fase α). (KLIUGA, FERRANTE, 2009)

Figura 4 - Micrografia de algumas ligas do sistema Ag-Cu na estrutura de solidificação, as áreas claras correspondem à fase α e as escuras, à fase β : a) liga Ag920; b) liga Ag785; c) liga Ag 715; d) liga Ag500.



Fonte: adaptado de Kliaugas e Ferrante (2009)

-Ag 920 (Figura 4a): a liga solidifica entre 930°C e 890°C, forma-se fase α , somente abaixo de 760°C é que a liga entra no campo bifásico $\alpha+\beta$, e a partir daí começa a se formar a fase β rica em cobre, nos contornos de grão da fase α formada durante a solidificação.

-Ag 785 (Figura 4b): liga hipoeutética, que já não se encontra no campo de miscibilidade de Cu em Ag. Ela se solidifica forma-se cristais de fase α , e tem intervalo de solidificação entre 820°C e 779°C, à medida que a solidificação avança, tanto o sólido formado quanto o líquido se enriquecem em Cu. A fase α primária (a primeira a se formar), tem o formato de dendritas. O eutético é constituído de lamelas finas e paralelas das fases α e β .

-Ag 715 (Figura 4c): Liga eutética sem intervalo de solidificação a 779°C. As fases α e β crescem concomitantemente na forma de lamelas paralelas, tanto mais finas quanto maior for a velocidade de resfriamento. Durante a solidificação, é no líquido localizado adiante da frente de crescimento das duas fases, que ocorre a separação entre cobre e prata.

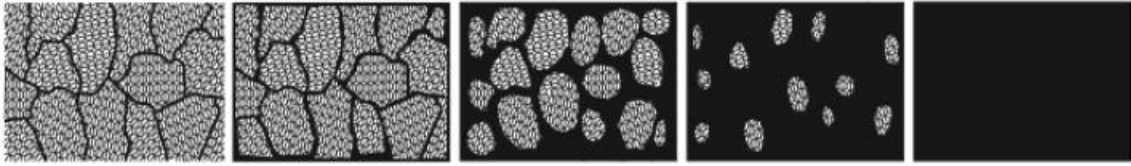
-Ag 500 (Figura 4d): liga hipereutética se solidifica com formação da fase β primária, e tem intervalo de solidificação entre 970°C e 779°C. O líquido e o sólido vão se enriquecendo em prata, à medida que a solidificação avança, e quando o líquido atinge a temperatura eutética, forma-se concomitantemente as fases α e β . Estas ligas não têm nenhuma aplicação em joalheria, devido sua cor a ser avermelhada. (KLIAUGA; FERRANTE, 2009)

As ligas de interesse para joalheria são aquelas com teor de prata acima de 72% (Ag720), a liga de prata mais utilizada no mercado é a Ag 925, conhecida também como prata de lei. É preciso lembrar, que os diagramas de equilíbrio de fases representam estados de equilíbrio, ou seja, que ocorrem em velocidades de solidificação muito lentas, muito pouco comuns na prática.

3.4 FUSÃO DO METAL

Segundo Kliauga e Ferrante (2009), fundir metais e ligas é prática diária do ourives e da indústria de joalheria, conhecer alguns conceitos sobre fusão dos metais e suas ligas é essencial para a escolha da melhor liga para cada processo de fabricação. Os átomos que compõem uma rede cristalina não estão imóveis, mas estão em contínua vibração, e são as forças de atração mútuas que as mantêm unidas. É como se pequenas esferas estivessem unidas umas às outras por molas. Quando a temperatura sobe, o movimento relativo dos átomos aumenta de intensidade e a estrutura cristalina se alarga. Com o aumento da distância entre os átomos, a sua força de atração diminui e o material amolece. Quando a temperatura de fusão é atingida, o movimento relativo entre os átomos é maior do que a força de coesão, e eles se desprendem uns dos outros. A microestrutura não se dissolve instantaneamente, pois passa por um processo gradativo, que tem início nos contornos de grão; isso ocorre porque nesta região, os átomos têm, menor número de ligações, do que no interior dos grãos. Com a aproximação da temperatura de fusão, os átomos começam a sair de seus lugares e a formar lacunas. As lacunas (vazios) migram para os contornos de grão ou, por vezes, alojam-se nos interstícios da rede cristalina, degradando sua ordem. Aos poucos a região do contorno de grão se desintegra e forma-se o líquido. Como o calor chega primeiro à superfície do bloco metálico, é esta região que atinge primeiro a temperatura de fusão, com a fusão inicia-se nas regiões de contorno de grão enquanto o interior do metal continua sólido. Em seguida, a fração volumétrica de líquido cresce e os grãos se arredondam para diminuir a área da interface sólido-líquido, e vão se dissolver até que todo o material se torna líquido, como mostra esquematicamente a Figura 5 da esquerda para a direita.

Figura 5 - Representação esquemática da fusão de um metal monofásico policristalino.



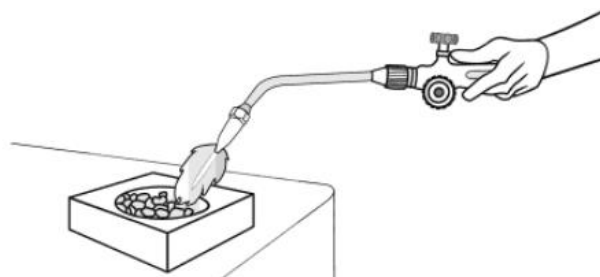
Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

Quando se trata de ligas metálicas o processo de fusão se torna mais complexo. Diferente dos metais puros, as ligas metálicas podem apresentar um processo diferente de fusão, depende da diferença de interação entre os átomos da mistura. Durante o processo de fusão, nas ligas com mais de uma fase as regiões de composições eutéticas, são as que primeiro entram em fusão, e dissolve as fases intermediárias (com menor ponto de fusão), e ocorre a formação do líquido nos contornos de grãos, e o processo prossegue com a dissolução dos grãos.

3.5 EQUIPAMENTOS PARA FUSÃO

Geralmente nas oficinas de ourivesaria, o metal é fundido com maçarico de GLP e Oxigênio (Figura 8), o metal é colocado em um cadinho resistente a altas temperaturas (ponto de fusão acima de 2.000°C), que pode ser cerâmico (à base de alumina), de grafite ou de carbetto de silício. Também é possível utiliza diferentes composições de gases, para fundir ligas metálicas, para metais com maior ponto de fusão, como as ligas de ouro branco com platina, é geralmente utilizado o acetileno com oxigênio, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Representação esquemática da fusão com contato direto metal-chama e temperaturas máximas de chamas para algumas misturas gasosas.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

Outra forma de fazer a fusão do metal, é através de um forno de resistência elétrica, nestes fornos utilizam-se termopares que permitem um melhor controle da temperatura do metal, sendo esse equipamento o ideal para o processo de fundição. Existem fornos de resistência para fundir de 2 até 50 kg de metal. As potências variam entre 700 e 1.000 W e podem atingir temperaturas de até 1.100°C, utiliza-se geralmente cadinhos de grafite. Na Figura 7 apresenta exemplos de fornos a resistência elétrica.

Figura 7 - Exemplos de fornos de resistência elétrica: a) fornos tipo copo de resistência cromo-níquel para até 2kg de metal; b) resistência elétrica para até 20kg de metal.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

3.6 FUNDIBILIDADE E FLUIDEZ

A fundibilidade ou facilidade de preencher a cavidade e os detalhes do molde de uma liga é uma somatória de várias propriedades físicas:

Tensão superficial: dela dependem a velocidade de preenchimento do molde, e a capacidade de preencher detalhes. Os átomos, no interior do metal líquido, compensam as forças de atração e repulsão uns dos outros. Quando a superfície do líquido toca outra fase (o ar, a superfície de um molde), há uma alteração local do número de ligações entre seus átomos.

Para a maioria dos metais, a tensão superficial do líquido diminui com o aumento da temperatura. Uma exceção é o cobre, que sofre um aumento da tensão superficial com o aumento da temperatura. A adição de elementos de liga, pode mudar a tensão superficial do líquido; por exemplo, Sn, Zn e Cd, diminuem a tensão superficial do cobre, melhora-se a sua fundibilidade.

Viscosidade: é a propriedade que influencia a capacidade do metal líquido de preencher o molde e de reter gases e escória. A viscosidade de um líquido é função das forças de coesão entre os seus átomos e do atrito interno, que se traduzem na força necessária para colocar duas camadas de átomos de líquido em movimento relativo. A temperatura e a viscosidade têm relação inversa: o aumento da temperatura causa a queda da viscosidade. A Tabela 1 mostra a viscosidade de alguns metais puros nas suas respectivas temperaturas de fusão. (KLIAUGA, FERRANTE, 2009)

Tabela 1: Viscosidade de alguns metais puros nas suas temperaturas de fusão.

Metal	Viscosidade (Pa.s)
Cobre	0,35
Zinco	0,34
Chumbo	0,27
Cádmio	0,23
Estanho	0,19

Fonte: Kliaugas e Ferrante (2009)

Temperatura de vazamento: quando se deseja avaliar a fundibilidade de uma liga, é importante saber se a fonte de calor terá energia térmica suficiente, para atingir a temperatura de fusão e de vazamento. A temperatura de vazamento fica em geral entre 100°C e 150°C, acima da temperatura de fusão da liga. Este superaquecimento é necessário, para que o líquido tenha tempo de tomar a forma geométrica do molde, antes de se solidificar. Claramente, a fonte de calor deve poder alcançar temperaturas acima daquela; por isso é importante conhecer a temperatura de fusão da liga com que se trabalha.

Fluidez: é a característica de um metal líquido fluir através de canais e preencher todos os detalhes de um determinado molde. Baixa fluidez pode resultar em falha de preenchimento ou não reprodução de detalhes. Diferente da fundibilidade a fluidez não depende somente de características físicas do material (como viscosidade e tensão superficial), mas também da sua composição química, de fatores de projeto do molde e do processo de fundição. Ela é medida experimentalmente pela capacidade de preenchimento de uma geometria complexa e pode ser dada em cm ou em porcentagem. O fator de processo mais importante é o superaquecimento na hora do vazamento, e, quanto maior a temperatura, maior a fluidez.

Segundo Kliauga e Ferrante (2009), alguns fatores influenciam a fluidez:

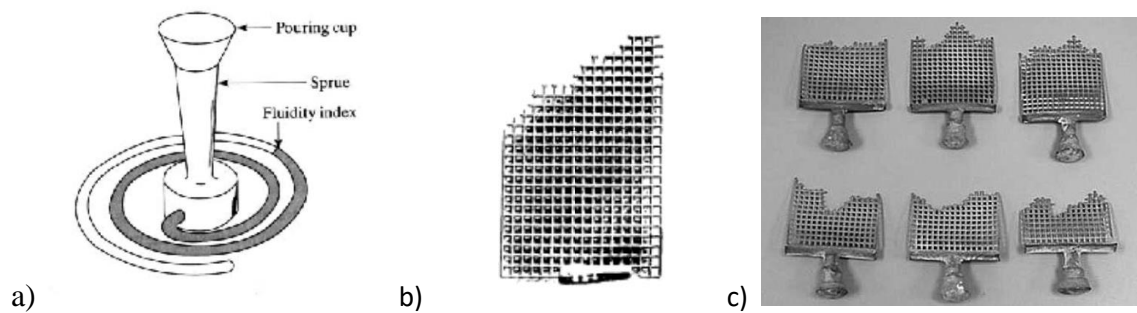
- O tempo de solidificação, que pode variar com a distância que o metal tem de percorrer até a entrada no molde da peça e depende do projeto do molde.
- A ação de forças externas, como o uso de força centrífuga e da variação de pressão.

Os metais puros e a composição eutética têm maior fluidez do que as ligas com intervalo de solidificação, enquanto o aumento da temperatura de vazamento influencia positivamente esta propriedade.

A Figura 8a ilustra dispositivo para teste de fluidez, este é o método mais aceito para medir a fluidez de uma liga, utiliza-se um molde cujo canal é uma espiral, este teste é definido como a distância máxima que o metal irá fluir no molde antes de solidificar. Segundo Lopez (2015), o ensaio de fluidez em espiral consiste no vazamento do metal por um canal, que por ação da força gravitacional, conduz o metal até o percurso espiral por onde ele flui, enquanto perde calor até que o fluxo se interrompa e cesse. O comprimento total que o metal consegue atingir antes de ser bloqueado pela solidificação,

consiste na medida da fluidez. Outros testes mais precisos de fluidez são do modelo grade, estes modelos são mais utilizados em fundições, que não utilizam apenas a gravidade, para a inclusão do metal pois a grade é muito mais difícil de ser preenchida, é utilizada para fundição a vácuo ou centrífuga, como pode ser vista na Figura 8b e Figura 8c.

Figura 8- a) Teste de fluidez utilizada em fundição com gravidade usado com ligas de alumínio. b) Teste de fluidez utilizada em fundição a vácuo com liga de ouro 14k. c) Teste de fluidez utilizada em fundição a vácuo com liga de prata 925.



Fonte: Machado 2002; Kliauga e Ferrante (2009); Carter (2004)

3.7 SOLIDIFICAÇÃO

Estudar de forma mais aprofundada a solidificação de ligas metálicas, é extremamente importante, pois esta etapa irá influenciar a qualidade do preenchimento do molde, e pode fragilizar a peça fundida.

Segundo Garcia (2007), o processo de solidificação de metais é um fenômeno físico, que tem início quando o calor latente é liberado, durante a transformação da fase líquida para a fase sólida. O início da liberação do calor de transformação, nem sempre ocorre à temperatura de solidificação, pode ocorrer um decréscimo local da temperatura, antes do início efetivo da liberação de calor latente, ou seja, pode ocorrer super-resfriamento do metal líquido. A formação da fase sólida ocorrerá através de dois fenômenos sucessivos: nucleação e crescimento. A nucleação, tem origem a partir da formação de embriões sólidos no líquido super-resfriado, os quais podem se dissolver na massa líquida ou transformar-se em núcleos sólidos. O tamanho médio dos embriões aumenta com a diminuição da temperatura, e depois que embrião atinge um tamanho crítico, pode transformar-se em um núcleo que passa a crescer espontaneamente.

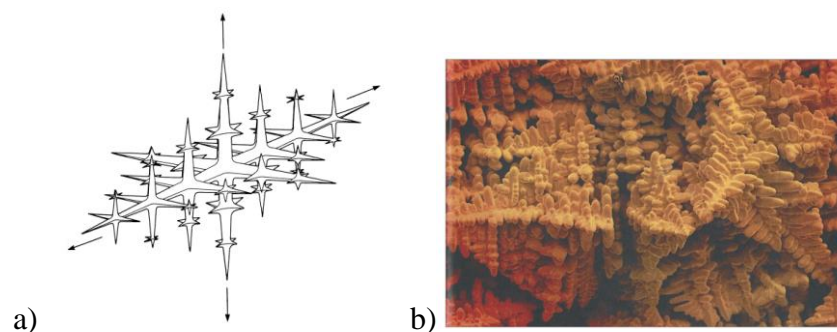
Segundo Grimwade (2002), quando a nucleação é homogênea, os núcleos crescem igualmente em todas as direções, também formam grãos equiaxiais. Na prática, o líquido começa a solidificar a partir da superfície do molde, que geralmente está a uma temperatura menor que a do metal líquido. É mais fácil para um núcleo, se formar e crescer na superfície de uma substância estranha (substrato), como um recipiente ou parede de molde, ou uma partícula de impureza insolúvel, em vez de sofrer nucleação homogênea. Este segundo tipo de nucleação é nucleação heterogênea. Um bom exemplo disso, é ver a formação de gelo em um lago no inverno. A tendência é que o gelo comece a crescer nas bordas do lago e ao redor de qualquer objeto flutuante. O gelo não se forma espontaneamente em toda a superfície do lago, de forma homogênea.

Quando metais e ligas comerciais são fundidos a solidificação prossegue por nucleação e crescimento heterogêneos. Na prática, não existe apenas um núcleo, mas vários núcleos que se formam e crescem em cristais sólidos. Os fatores que afetam o número de núcleos incluem o grau de sub-resfriamento, os espaçamentos da rede do substrato e do metal de solidificação, a taxa de resfriamento e o número de impurezas insolúveis e suas características. (GRIMWADE, 2002)

Dois mecanismos de crescimento de cristal de um núcleo foram identificados para metais puros, a saber, crescimento da interface plana e crescimento dendrítico. Além dos dois primeiros, ocorre um terceiro mecanismo, crescimento celular, que foi observado em soluções sólidas de liga. Provavelmente o crescimento dendrítico é, de longe, o mecanismo de crescimento mais comum em ligas comercialmente. (GRIMWADE, 2002)

No crescimento dendrítico, pontas se ramificam lateralmente a partir das pontas primárias, e assim por diante, para produzir uma estrutura semelhante a uma árvore conhecida como dendrito como mostrado na Figura 9.

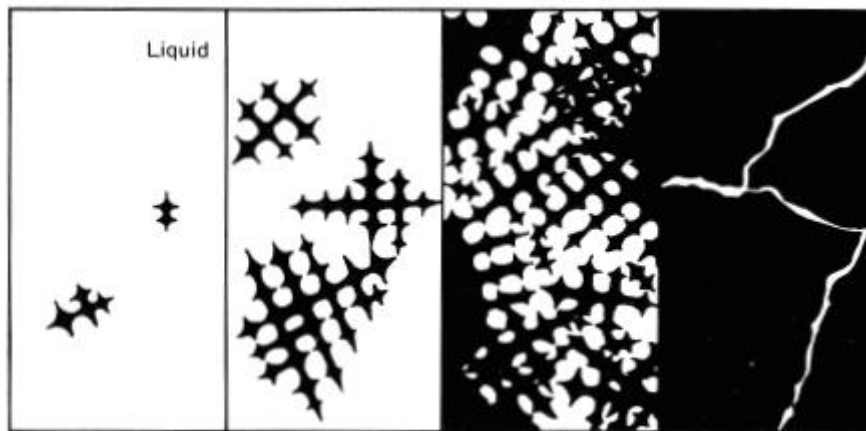
Figura 9 - a) representação de uma dendrita. b) Imagem SEM de dendritos em liga Pt-Ru.



Fonte: Grimwade (2002); Corti (2008).

Cada dendrito crescerá pelo mecanismo descrito, mas inevitavelmente eles irão encontrar outros dendritos crescem de núcleos vizinhos como pode ser visto na Figura 10. Os dendritos não serão vistos nas microestruturas de metais puros, porque uma vez que a solidificação esteja completa, os espaços entre os braços serão preenchidos. Isso também é verdade até certo ponto quando as soluções sólidas de liga são solidificadas, desde que a taxa de resfriamento seja muito lenta e haja uma grande aproximação das condições de equilíbrio. No entanto, na prática, as taxas de resfriamento são relativamente rápidas, e a natureza dendrítica do processo de solidificação pode ser revelada, por variações de composição entre os braços dendríticos ou pela presença de uma segunda fase.

Figura 10 - Nucleação e crescimento de dendritos para formar uma estrutura policristalina.



Fonte: Grimwade (2002).

A direção de extração de calor também tem muita influência na morfologia dos grãos. Se o calor for retirado sem direção preferencial, o crescimento tende a ser igual para todos os lados. Mas, se o calor é retirado preponderantemente em uma direção, o crescimento dos grãos ocorre alinhado com a direção de extração de calor.

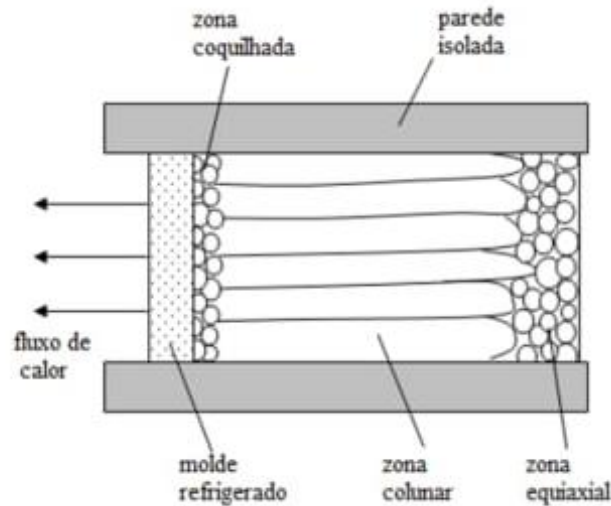
Quando despejamos metal fundido em um molde, ele começa a se solidificar internamente, a partir das paredes do molde, pois esta é a temperatura mais fria. Se um molde de metal frio for usado, por exemplo, ferro, como é comum para fundição de lingotes, a taxa de remoção de calor é rápida. Inicialmente, uma fina camada de grãos finos é formada uma camada de resfriamento, por causa da alta taxa de nucleação. Em seguida, grãos longos em forma de dedo, chamados grãos colunares, começam a crescer para dentro da camada fria em direção ao centro do lingote, como pode ser visto na Figura 11. (CORTI, 2008)

Segundo Kliauga e Ferrante (2009), as estruturas de grãos formados são:

- (1) Zona coquilhada: o metal líquido entra em contato com a parede fria do molde se solidifica, formam-se os grãos muito finos.
- (2) Zona Colunar: apresenta grãos alongados, pois a taxa de extração de calor é alta, alguns destes grãos crescem rapidamente se alinha com a direção de extração de calor. No caso de solidificação de ligas, essa região é caracterizada por formação de dendritas.

- (3) Zona equiaxial: quando o líquido no centro do lingote se torna super-resfriado pela redução de temperatura via condução através do metal solidificado, ocorrerá nucleação homogênea e o crescimento de grãos equiaxiais.

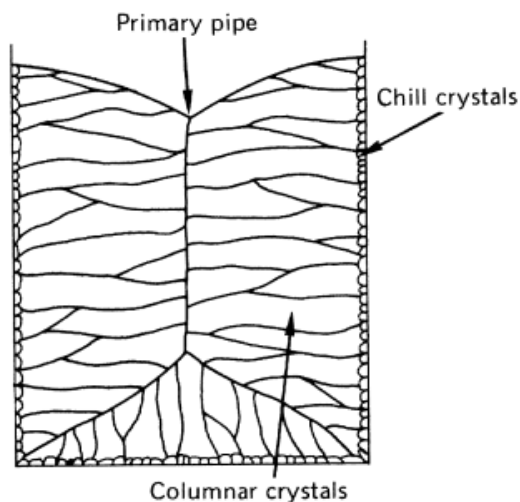
Figura 11: A imagem mostra a solidificação em um molde com estruturas ampliadas.



Fonte: Santos (2006)

Se a temperatura de vazamento for alta, digamos na ordem de 200°C acima da linha *líquidus*, o gradiente de temperatura entre a parede do molde e o fundido é alto. O excesso de temperatura é conhecido como superaquecimento. Haverá uma tendência de os grãos colunares crescerem até o centro do lingote (Figura 12). Os últimos vestígios de líquido estarão ao longo de um plano central, e em planos que se estendem até os cantos inferiores. Impurezas insolúveis, que permanecem no líquido são varridas e concentradas nesses planos. Isso é indesejável, porque existe o perigo de que estes planos mais frágeis podem rachar e abrir quando o lingote é trabalhado posteriormente. (GRIMWADE, 2002)

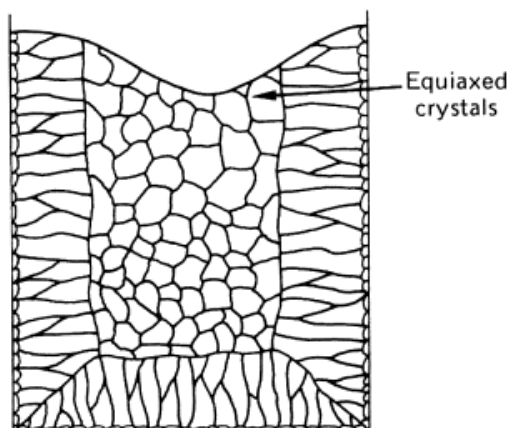
Figura 12: Estrutura de grãos de lingotes fundidos em moldes de metal a uma temperatura de vazamento relativamente alta.



Fonte: Grimwade (2002).

Uma microestrutura mais favorável é obtida quando um superaquecimento menor de 50–75 ° C é usado. O gradiente de temperatura é menor, e a nucleação heterogênea pode ocorrer no líquido à frente dos cristais colunares em avanço. Nessas circunstâncias, os grãos equiaxiais crescem nas regiões centrais do lingote, e os planos de fraqueza são evitados ou minimizados (Figura 13). Um superaquecimento menor também tem a vantagem de haver menos risco de oxidação excessiva devido ao superaquecimento. (GRIMWADE, 2002)

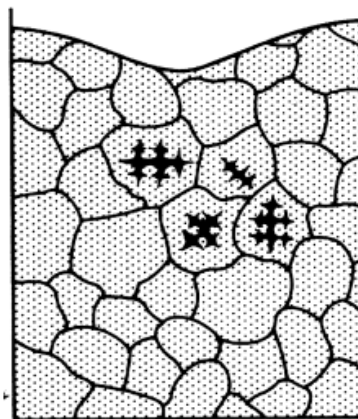
Figura 13 - Estrutura de grãos de lingotes fundidos em moldes de metal a uma temperatura de vazamento relativamente baixa.



Fonte: Grimwade (2002).

O aquecimento prévio do molde, antes do vazamento do metal líquido pode provocar um efeito semelhante ao do superaquecimento, faz aumentar o tamanho da zona colunar. No molde cerâmico, como no caso do processo de fundição, a taxa de extração de calor é lenta, o líquido se resfria mais homogênea, e atinge condições de produzir nucleação homogênea, gera-se uma microestrutura de grãos equiaxiais, que em geral são grosseiros como visto na Figura 14.

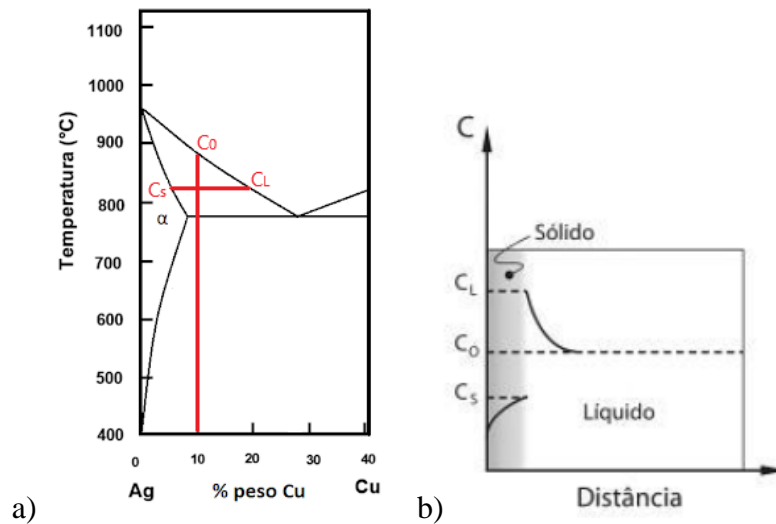
Figura 14 - Estrutura de grão de um revestimento cerâmico ou fundição em areia.



Fonte: Grimwade (2002).

Segundo Kliauga e Ferrante (2009), em ligas com intervalo de solidificação, haverá sempre uma diferença de composição química entre a liga e a composição de equilíbrio do sólido e do líquido, como mostra na Figura 15a (diagrama Ag-Cu), uma liga de composição C_0 , após a solidificação se completar, é bifásica. À medida que a temperatura diminui, o sólido formado assume a composição C_s , e segue a linha *sólidus*, e ocorre rejeição de soluto, de forma que o líquido tem composição C_L , e segue a linha *líquidus*. Durante a solidificação, o líquido longe das partículas de sólido tem composição igual à da liga original (C_0), mas próximo à interface sólido/líquido há uma variação gradual de composição química até que, na interface, a composição do líquido é C_L , como mostra a Figura 15b.

Figura 15 – a) O diagrama Ag-Cu mostra as mudanças de composição química durante a solidificação de uma liga com composição C_0 ; b) Variação das concentrações durante a solidificação de uma liga de composição C_0 em função da distância medida a partir da fase sólida.

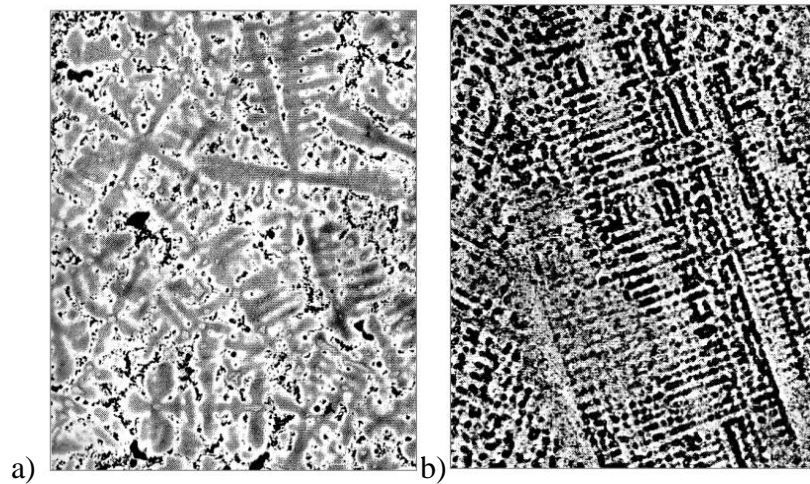


Fonte: Kliauga e Ferrante (2009), adaptado.

Neste intervalo de gradiente de concentração, o líquido, para estar em equilíbrio, deveria assumir temperaturas equivalentes às temperaturas de cada composição, e segue a linha *liquidus*. Ocorre que, em situações reais, o metal se encontra em um molde que retira calor do sistema e impõe um outro gradiente de temperatura que não o de equilíbrio.

Este tipo de solidificação, acarreta normalmente a segregação de elementos de liga, que em peças fundidas causa uma diferença de concentração de curto e longo alcance. Um exemplo é a liga de prata 925, com 92,5% Ag e 7,5% Cu. O diagrama de equilíbrio indica que ele deve se solidificar em uma fase única α solução sólida antes de subsequentemente precipitar o β - Estágio. Na prática, muitas vezes ainda há alguma fase líquida fora de equilíbrio presente durante a fundição, esta sofrerá a reação eutética, quando a temperatura de 779 ° C for atingida. A microestrutura fora do equilíbrio consistirá em fase α cercada por uma pequena quantidade de eutético $\alpha + \beta$ (Figura 14). A segregação de curto alcance é chamada de micro segregação, e é causada pela expulsão de soluto, que fica acumulado entre os braços das dendritas. A micro segregação de uma peça de estrutura dendrítica, pode ser reduzida ou até mesmo eliminada por um tratamento térmico denominado homogeneização. (KLIUGA, FERRANTE, 2009)

Figura 14 - a) Variações composicionais entre os braços dendríticos em ouro fundido 9 quilates, conhecidas como Coring. b) Estrutura de não equilíbrio em prata esterlina em 92,5% Ag - 7,5% Cu fundida mostra α dendritos cercados por $\alpha + \beta$ eutético.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009); Grimwade (2002).

3.7.1 CONTRAÇÃO DA PEÇA SOLIDIFICADA

Um outro fator que afeta a microestrutura de uma peça fundida é seu tamanho e forma, uma vez que isso afetará a taxa de resfriamento, gradientes de temperatura e o tempo de vazamento. Isto também influenciará o tempo necessário para a peça fundida se solidificar. Segundo Kliauga e Ferrante (2009), quando os metais se solidificam, eles encolhem, essa contração pode variar entre 3 e 6% do volume inicial, no estado líquido (Tabela 2), simplesmente porque os átomos ficam mais próximos uns dos outros, no estado sólido. Isso geralmente é evidente como uma cavidade de retração, no topo de um lingote ou fundição, e pode ser necessário fornecer um reservatório de metal fundido para compensar essa retração.

Tabela 2 - Contração volumétrica de metais puros durante a solidificação.

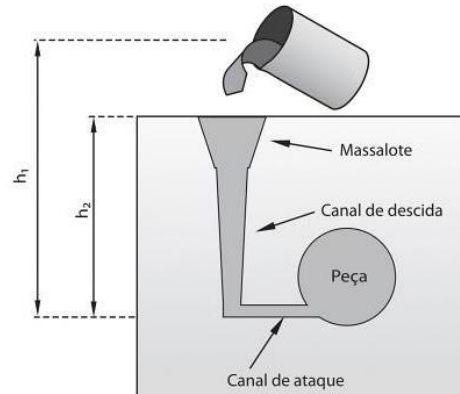
Metal	Contração (%)
Ouro	5,03
Prata	5,0
Cobre	4,25
Chumbo	3,38
Zinco	4,7
Cádmio	4,72
Estanho	2,9

Fonte: Kliauga e Ferrante (2009).

Como a contração não pode ser evitada, sua localização deve ser controlada durante o processo de solidificação. Enquanto líquido, o metal preenche totalmente o molde, mas, ao se solidificar, o seu volume diminui e o metal deixa de estar em contato com o molde. Quando se deseja fundir peças com pequenos detalhes na superfície, e com cantos vivos, isso se torna problemático. Uma alternativa para total preenchimento de detalhes é o vácuo, que força o metal para dentro do molde e aumenta a velocidade de preenchimento. Quando a solidificação ocorre apenas sob o peso da gravidade (utiliza apenas o sistema de massalote), o que se pode fazer é aumentar a altura da coluna de metal líquido, para que este exerça certa pressão auxiliar no preenchimento do molde. O massalote é uma reserva externa de metal líquido, que irá garantir o suprimento de material durante a solidificação, e os canais de alimentação e ataque são os ductos que conduzem o metal

líquido ao molde. A Figura 15 mostra o esquema de um molde tradicional. (KLI AUGA, FERRANTE, 2009)

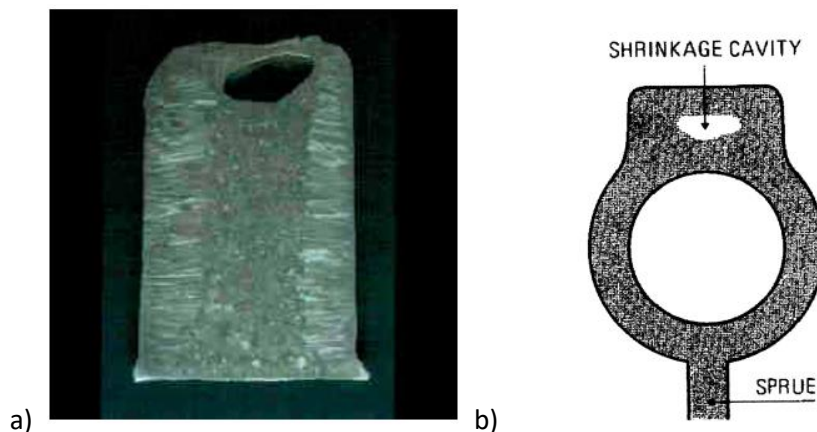
Figura 15: Representação esquemática de um projeto com massalote.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009).

Quando o metal se solidifica, a contração volumétrica se concentra na região superior do lingote, forma-se uma depressão que é denominada rechupe. Além do rechupe, é comum o surgimento de vazios (ou macro porosidades) no interior da peça, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - a) Imagem mostra o rechupe na região de massalote. b) Representação esquemática de macro porosidades no interior de um anel fundido.

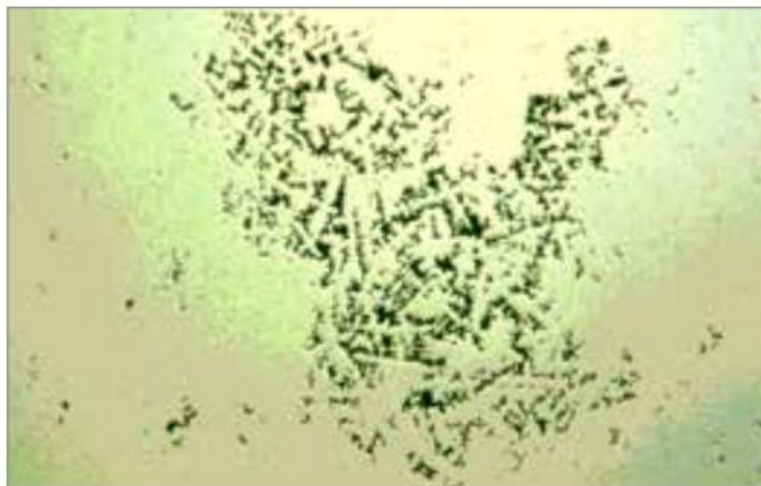


Fonte: Grimwade (2002), adaptado.

Na solidificação de ligas com microestrutura dendrítica, pode ocorrer formação de micro porosidades, devido ao aprisionamento de líquido entre os ramos dendríticos. Ligas com maior intervalo de solidificação tenderão a formar porosidades em camadas bem

dispersas no volume do material, enquanto ligas com menor intervalo de solidificação tenderão a formar porosidades mais localizadas. A falha em fornecer alimentação adequada de metal dará origem à porosidade de contração, o que pode reduzir significativamente a resistência da fundição (por exemplo, a fratura de pinos em peças fundidas é frequentemente, devido a essa porosidade de contração). Isto é particularmente um problema na fundição de joias. A Figura 17 mostra um poro de contração, em uma fundição de ouro em alta ampliação. Os dendritos em crescimento podem ser vistos claramente e, portanto, como nenhum metal líquido estava disponível para alimentar esta área para compensar o encolhimento na solidificação. (CORTI, 2008)

Figura 17 - Poro de redução em uma fundição de ouro amarelo 18K.



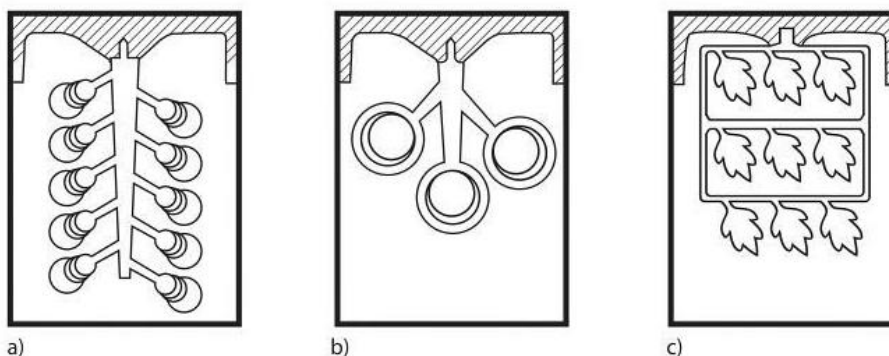
Fonte: Corti (2008).

3.8 PROJETOS DO MOLDE PARA CERA PERDIDA

Em consequência das contrações durante a solidificação, e a formação ou não de dendritas, as peças solidificadas podem apresentar cavidades de diferentes tamanhos, formas e distribuições. Para obtenção de uma peça ideal (sem poros e de superfície lisa), seria necessário que cada frente de solidificação mantivesse contato contínuo com uma fonte de suprimento de metal líquido, externa à peça, até que todo o metal contido dentro dos limites da peça estivesse sólido. Para garantir isso, o projeto de fundição inclui não só o modelo da peça, mas também um sistema de suprimento de metal líquido, denominado massalote, canais de alimentação e canais de ataque. O volume do massalote, deve ser suficiente para que ele forneça o líquido necessário para a compensação de todas as contrações. (KLIAUGA, FERRANTE, 2009)

Para compensar a contração os moldes são montados em forma árvore, onde o tronco tem espessura muito maior do que os canais de ataque. A base da árvore é cônica, e o tronco ligado a base, que irá alimentar as peças e suas extremidades, como pode ser visto na Figura 18 e 19. Assim, os rechupes irão se concentrar no tronco e na base da árvore, evitam-se defeitos nas joias fundidas.

Figura 18: Diferentes modos de se montar um molde para vários modelos de peça: a) método de árvore; b) método de arbusto; c) método de sobreposição.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

Figura 19: Exemplos de posicionamento de canais de ataque em modelos de fundição.

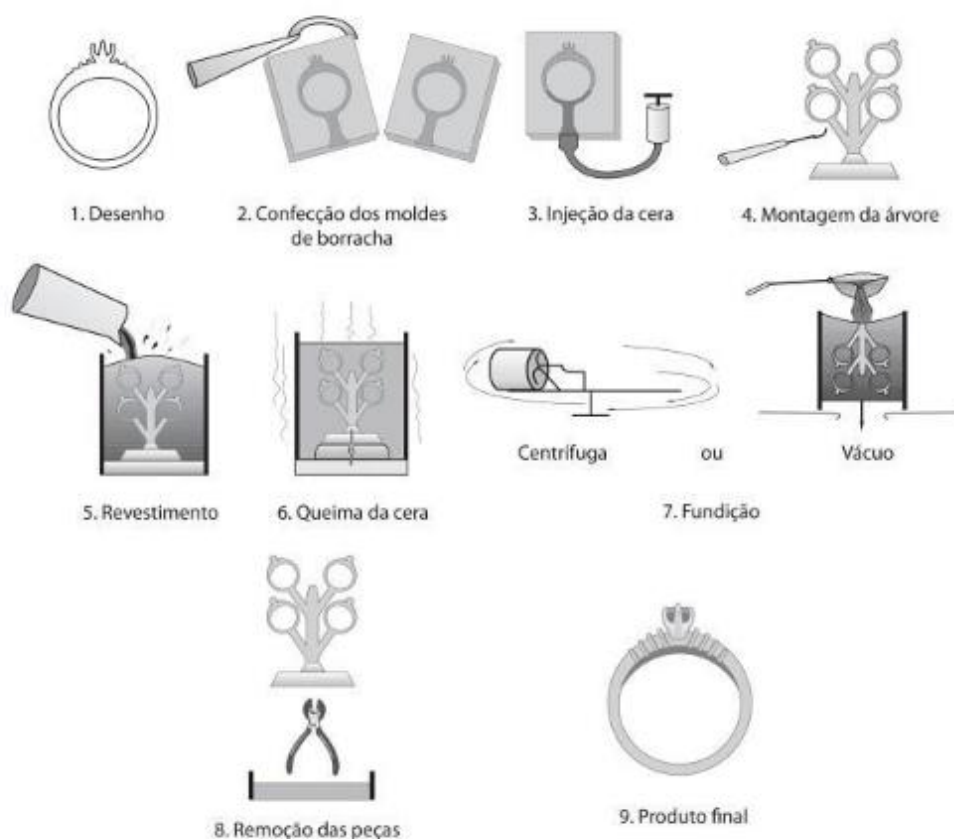


Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

3.9 ETAPAS DA FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA

Segundo Kliauga e Ferrante (2009), no processo de fundição por cera perdida 9 etapas básicas definem esse processo de fundição. No mercado atual existe vários equipamentos disponíveis, para efetuar estas etapas, porém todos seguem praticamente o mesmo princípio, com poucas variações. As etapas são ilustradas na Figura 20.

Figura 20: Fluxograma do processo de fundição por cera perdida.



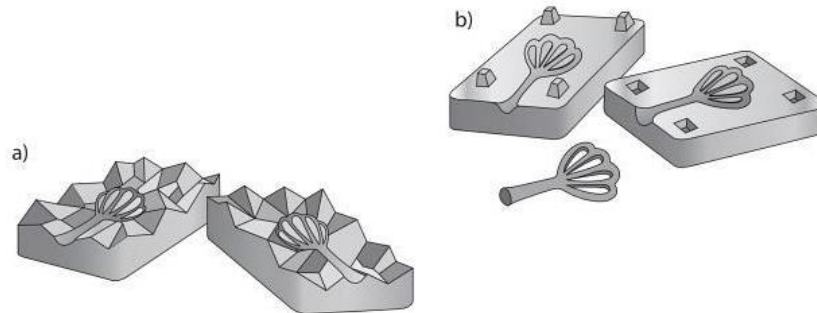
Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

1-Desenho (modelo): O processo inicia com a produção de um modelo, em cera ou metal (etapa 1, Figura 20). É nesta ocasião que entra o trabalho de design do produto. Também é nesta etapa, que ocorre a inovação da impressão 3D, que proporciona moldes de resina com design mais complexo, o assunto será discutido melhor no item 3.10. É preciso levar em conta, que o processo envolve a transferência do modelo geométrico para diferentes meios (borracha, cera, revestimento, metal), todos sujeitos a variações de temperatura, o que acarreta grande variação de dimensões, devido às contrações volumétricas dos materiais envolvidos. O acabamento superficial do modelo deve ser o melhor possível,

pois qualquer irregularidade será reproduzida na peça final, evitar cantos vivos em junções e detalhes. Os modelos devem ser ligeiramente mais espessos, pois ocorre a expansão após a vulcanização, fecha-se a cavidade do molde. Como regra geral, chapas e fios devem ser cerca de 10% mais espessos que o desejado na peça final. Os canais de ataque não podem ser muito finos, pois levam à falha de preenchimento durante a fundição. Ligas com maior intervalo de solidificação necessitam de canais de ataque mais espessos.

2-Confeção da borracha: Existem vários tipos de borracha: borracha quente (150°C) borracha de silicone (Temperatura ambiente), borrachas de cura a frio (80°C). A principal característica da borracha adequada é a grande capacidade de reprodução de detalhes, assim como grande resistência ao rasgamento e ao calor, resistência ao envelhecimento, baixa aderência à cera, habilidade de manter suas propriedades de maciez e elasticidade, após a vulcanização, para que a extração do modelo seja fácil. As borrachas são comercializadas como uma massa crua distribuída em camadas de cerca de 3 a 4 mm. Podem vir em rolos ou placas. Existem vários tipos de formulação de borracha e os procedimentos de cura devem seguir as instruções do fabricante. Borrachas de cura a quente são utilizadas para moldes metálicos apenas. Já as borrachas de cura a frio, são semelhantes as de cura a quente, porém necessitam de menor temperatura, assim podem ser utilizadas em peças de resina de impressão 3D. Estas borrachas são colocadas em moldes metálicos, e colocado em uma prensa que aquece, que é a vulcanizadora, por até 40 min, a pressão e o calor fazem o processo de cura na borracha, em seguida a borracha é cortada, para retirar o protótipo, resta uma cavidade, como pode ser visto na Figura 21. A borracha de silicone, é um método de molde mais recente, utiliza a mistura de um silicone mais um catalizador, pode ser utilizada em qualquer material, até em materiais orgânicos como galhos e folhas, ideal para peças delicadas, e muito utilizada para peça de resina de impressão 3D, pois não necessita alta temperatura nem pressão, e não utiliza nenhum equipamento para cura, e não sofre redução de contração, como a vulcanizada, porém leva 12h para cura completa, e é necessário uma câmara de vácuo para retirar as bolhas dentro do silicone líquido. Após a confecção a borracha de silicone é cortada e o protótipo é retirado. (etapa 2, Figura 20).

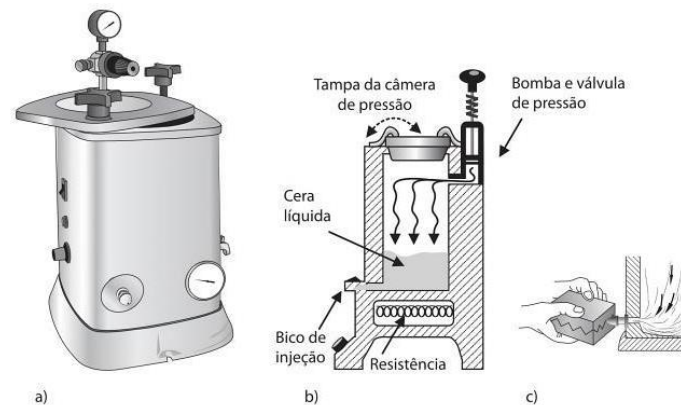
Figura 21: Representação esquemática: a) corte ideal para molde sem pino; b) molde com pino.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

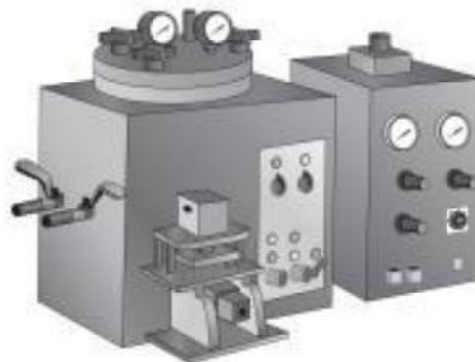
3-Injeção de cera: O molde será preenchido por cera (etapa 3, Figura 20). O processo tem como objetivo a reprodução em massa de modelos em cera. Esta é injetada no estado líquido, por uma injetora na cavidade da borracha e, ao solidificar, clona o protótipo original. A cera é um polímero composto na sua maior parte de carbono, oxigênio e hidrogênio. Pode ter origem animal (cera de abelha), vegetal (cera de carnaúba) ou mineral (parafina, lignina) e sua densidade varia entre 0,815 e 0,996 g/cm³. A injetora de cera é um equipamento que consiste em um forno elétrico e um sistema de pressão, que comprime o ar dentro do forno e expelle a cera líquida (Figura 22). Atualmente, as injetoras mais usadas são as automatizadas com sistema de vácuo, essas injetoras retiram o ar dos moldes, antes de injetar a cera, evita o aprisionamento do ar que gera bolhas no modelo, além de um sistema pneumático automático para apertar o molde durante a injeção, o que gera maior produtividade e menos defeito nos modelos, como ilustrada na Figura 23.

Figura 22: Modelo manual de injetora de cera: a) aparência externa; b) sistema de funcionamento; c) controle manual da injetora.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

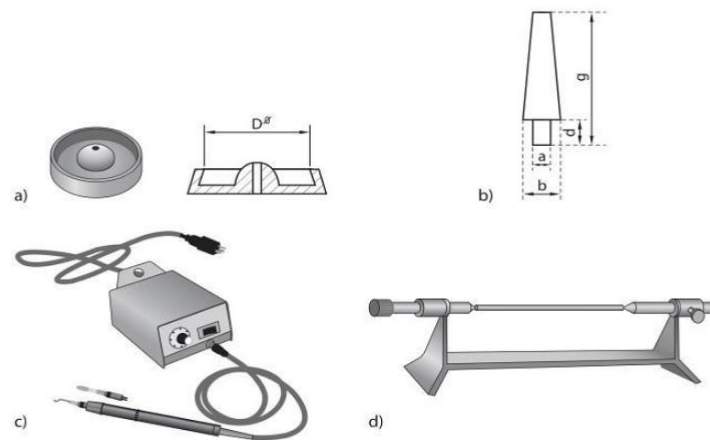
Figura 23: Modelo automático de injetora de cera.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

4- Montagem da árvore: Produzidos estes modelos, passa-se à montagem da árvore (etapa 4, Figura 20). O cilindro ou cone do canal de alimentação (Figura 24b), é fixado no suporte de montagem (Figura 24a), e os modelos são soldados ao canal com pirografo, um ferro de solda, ou faca aquecida (Figura 24c). Este cilindro, servirá para alimentar as peças e como reservatório de metal líquido. A disposição dos modelos de cera na coluna central é extremamente delicada, pois o operador precisa incliná-los com um ângulo de cerca de 60° , e efetuar a solda enquanto a cera está quente, e mantém uma distância constante entre os demais, tanto na horizontal quanto na vertical.

Figura 24 - Representação gráfica de equipamentos utilizados para montar a árvore: a) base de borracha; b) tronco cônico de cera; c) ferro de solda; d) base metálica giratória.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

5- Revestimento: Após a montagem da árvore, esta é colocada dentro de um tubo de aço inox, como visto na Figura 25. O revestimento é a base de gesso e outros componentes, que misturado com água até ficar fluida, em seguida é despejado sobre o suporte, dentro do cilindro de aço, no qual é vazada a massa de revestimento cerâmico (etapa 5, Figura 20). A composição, as técnicas e equipamentos para preparar o revestimento será discutido de forma mais aprofundada no item 3.11.

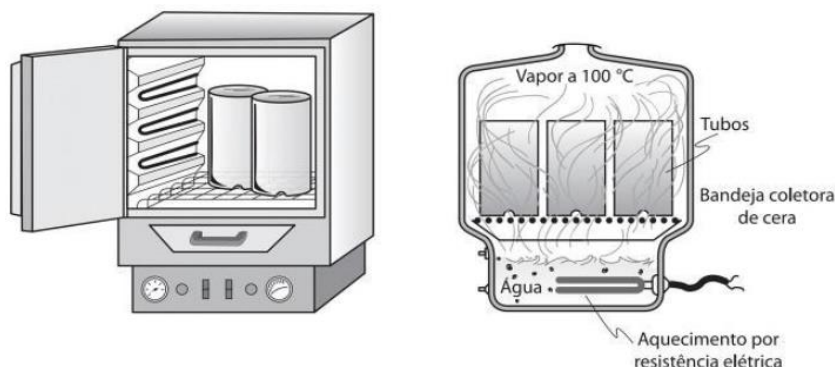
Figura 25: Tudo de aço inox para contenção do revestimento cerâmico.



Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

6-Queima da Cera: Após secagem da massa, o conjunto é aquecido para remoção da cera e da água (etapa 6, Figura 20). Essa etapa é realizada em fornos elétricos, ou em estufas com vapor d'água. Os tubos são colocados na estufa com o bocal para baixo, ou inclinados. No equipamento há uma grade, sobre a qual são colocados os cilindros, e uma bandeja para o recolhimento da cera (Figura 26). Em seguida, o cilindro que contém a massa refratária, é levado a um forno para o ciclo de calcinação, este assunto será discutido de forma mais aprofundada no item 3.11.5.

Figura 26 - Forno para retirada da cera: a) Forno de resistência elétrica; b) forno a vapor d'água.



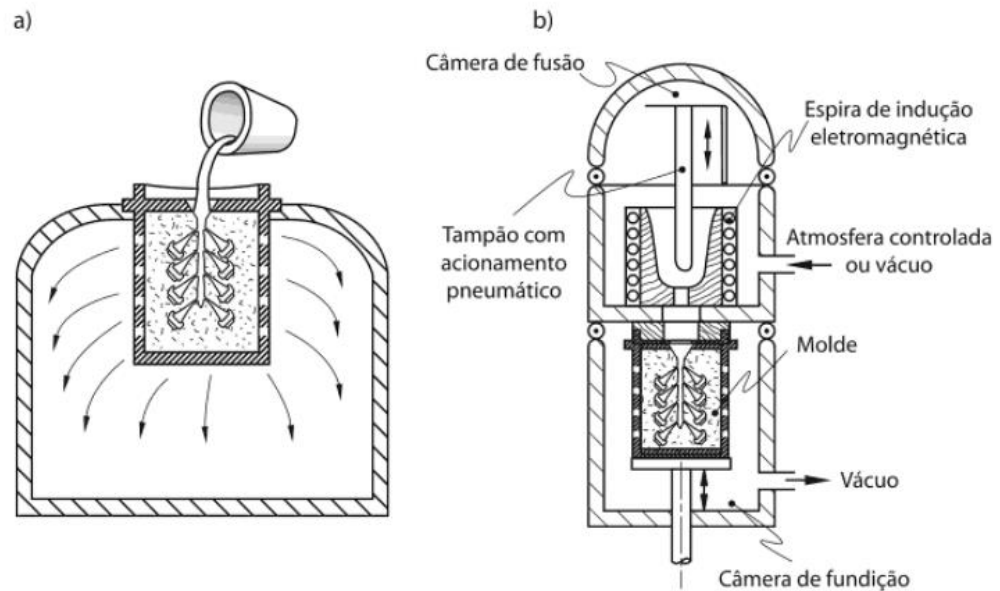
Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

7-Fundição: Após a retirada da cera, os cilindros são calcinados para retirar a umidade residual, e tornar o revestimento cerâmico mais resistente à pressão hidrostática do metal líquido. Os fornos utilizados são elétricos, e devem ser capazes de atingir 1.000 °C (para ligas de prata e ouro). O ciclo de aquecimento requer bom controle de tempo e temperatura, utiliza-se normalmente um controlador eletrônico. O ciclo é longo, pode durar entre 6h e 12h, depende do tamanho do forno e do tubo. O ideal é que o forno utilizado tenha circulação forçada, para a melhor retirada dos gases formados na queima, bem como um sistema de exaustão. Após a calcinação, é vazado o metal líquido e se empregam métodos auxiliares para força o metal para o interior do tubo: força centrífuga ou vácuo (etapa 7, Figura 20), neste trabalho será utilizado somente o vácuo.

- **Fundição a Vácuo:** O sistema de fundição a vácuo mais simples é o mostrado na Figura 27, consiste basicamente em um recipiente metálico, com um orifício superior onde é posicionado o cilindro do molde cerâmico. O cilindro deve ajustar-se perfeitamente neste orifício e diferentes anéis podem ser inseridos para ajustar diferentes tamanhos de molde. O recipiente também possui uma saída de ar à qual é acoplada uma bomba de vácuo. O vácuo é feito durante o procedimento de vazamento do metal, e isso faz com que haja um aumento da pressão hidrostática dentro do molde, e se aumente a eficiência de preenchimento (Figura 27a). Os equipamentos de fundição a vácuo mais recente têm uma segunda câmara, onde se encontra o forno de indução para fusão do metal, acoplada à

câmara de vácuo, assim o metal fundido é derramado no tubo sob atmosfera controlada, o que impede que o metal fundido sofra oxidação (Figura 27b).

Figura 27 - Equipamentos de fundição a vácuo: a) câmara de vácuo simples; b) câmara de vácuo acoplada ao forno de indução com câmara de atmosfera controlada.



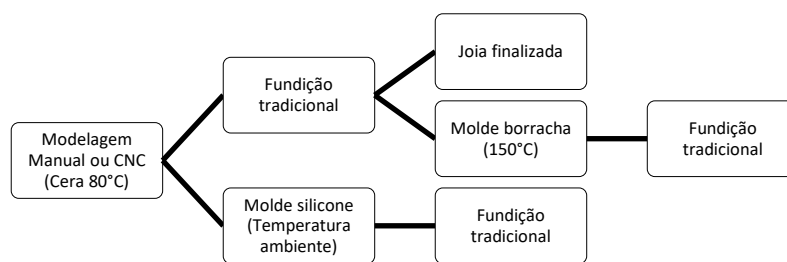
Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

8-Remoção: Após a solidificação do metal, a massa refratária é dissolvida em um banho de água, as peças são cortadas do sistema de alimentação e seguem para o processo de acabamento (etapas 8 e 9, Figura 20).

3.10 MODELAGEM DA CERA

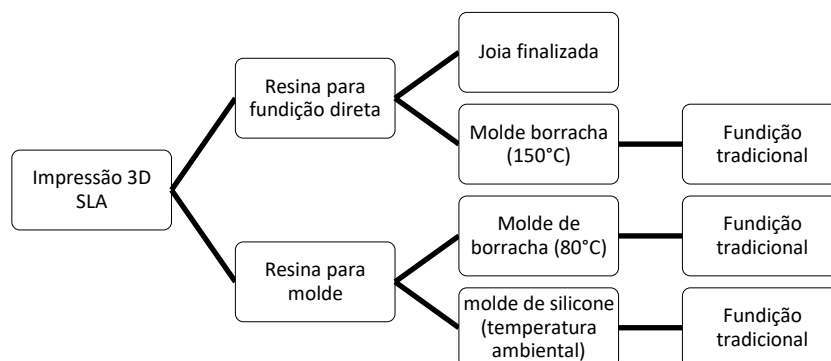
A modelagem da cera está dentro da etapa 1 da Figura 20, inicialmente os protótipos eram joias de prata ou ouro, em seguida era confeccionado um molde de borracha e depois injetado cera líquida. Porém com o avanço de novas tecnologias, é possível produzir um protótipo, ao esculpir na própria cera de fundição, sem necessidade de molde de borracha, outra forma de esculpir essa cera é com uma CNC, sendo este, um processo mais automatizado. Um grande avanço tecnológico, neste segmento, é a Impressão 3D, que permite produzir peças com resina calcinável, para fundição direta, ou para confeccionar molde de borracha, para entender melhor o processo, são apresentados os fluxogramas nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 - Fluxograma do processo produtivo a partir da modelagem manual e da utilização de uma CNC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Figura 29 - Fluxograma do processo produtivo a partir da impressão 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.10.1 MODELAGEM MANUAL

Na produção tradicional de joias, a etapa de modelagem física é predominantemente artesanal, realizada em ceras sólidas especiais, próprias para esculpir e para fundição, utiliza-se inúmeras ferramentas, quase todas manuais, que vão de brocas e buris até os esculpidores dentários, onde por vezes, é necessária uma habilidade e perícia só presentes em alguns artesãos, como pode ser visto na Figura 30. Um artesão modelista pode, na modelagem tradicional, consumir horas, frequentemente dias ou até mesmo semanas de trabalho para modelar uma peça/modelo de joia, retarda e, sobretudo, encarece a produção da joia.

Figura 30 - Modelagem de cera artesanal.



Fonte: Batista (2008).

Atualmente, as indústrias joalheiras buscam otimizar o processo de fabricação de joias, visa-se obter melhor qualidade do produto e maior produtividade. Por isso, a modelagem em cera artesanal vem sendo substituída pela prototipagem computadorizada ou prototipagem rápida. (BATISTA, 2008)

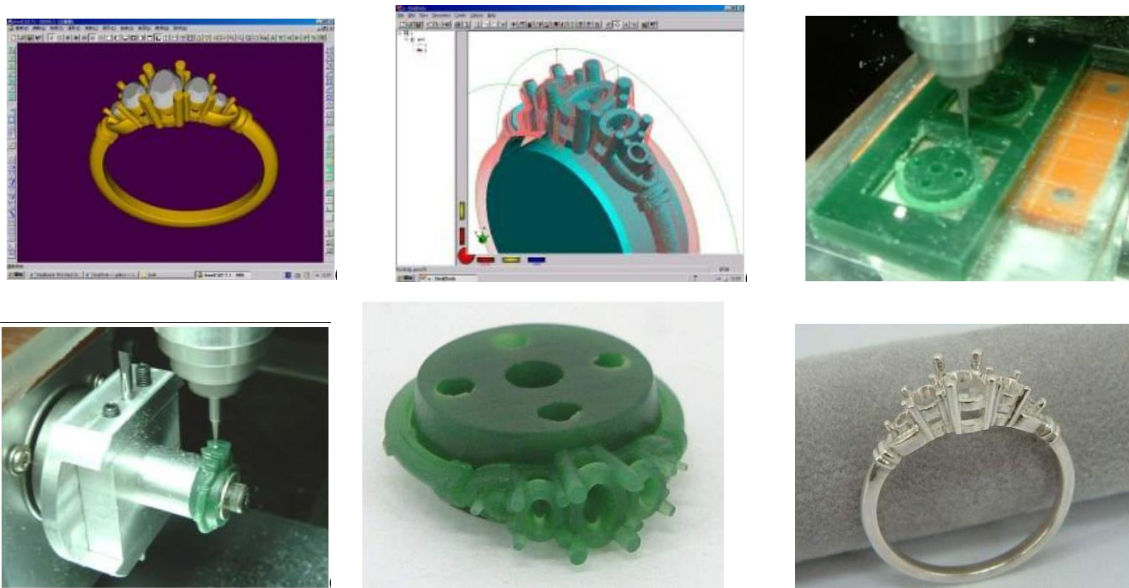
3.10.2 MODELAGEM POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA

O processo de Prototipagem Rápida (PR) inicia a partir da modelagem tridimensional do objeto a ser produzido, utiliza-se *software* de CAD (*Computer Aided Design*). Posteriormente, os desenhos 3D devem ser exportados como arquivos STL e SLC dos sistemas de prototipagem rápida. Na Prototipagem Rápida (PR) podem ser adotadas duas técnicas: a subtrativa e a aditiva. (BATISTA, 2008)

A técnica subtrativa promove o desbaste de blocos de diferentes materiais, um dos materiais mais comuns são os blocos de cera, utilizados para esculpir na modelagem manual, os equipamentos utilizados mais comuns são as fresadoras CNC (Controle

Numérico Computadorizado). A cera utilizada na modelagem manual e na CNC tem um custo baixo, e não gera resíduos que atrapalha a fundição e o acabamento das peças fundição, diferente das resinas da impressora 3D, que são muito mais caras e geram resíduos, porém a impressão 3D possui maior precisão que a CNC. A Figura 31 apresenta uma sequência de imagens para exemplificar o processo que inicia com o desenho 3D, posteriormente a produção do protótipo na CNC, o modelo de cera segue para o processo de fundição. (BATISTA, 2008)

Figura 31 - Imagens da produção de joia pela CNC, desde o projeto até o produto final.



Fonte: Batista (2008).

O *Rhinceros*© (com *plugin RhinoGold*) é um dos *softwares* CAD mais utilizados para modelagem 3D digital de joias. A imagem apresentada na Figura 32, é um exemplo das possibilidades oferecidas pelos *softwares* para modelagem 3D digital de joias. (BATISTA, 2008)

Figura 32 - Modelagem 3D no software *Rhinoceros*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A modelagem 3D digital de produtos, para a indústria joalheira, constitui uma inovação tecnológica e uma tendência mundial que faz com que a criação de joias, passe a ser uma atividade quase que exclusivamente exercida por designers especializados.

3.10.3 IMPRESSÃO 3D

A impressão 3D foi aplicada como ferramenta de prototipagem, pois trazia os benefícios da eliminação do trabalho manual na construção do protótipo para molde, garante maior padronização e fidelidade, como pode ser visto na Figura 33. Posteriormente novas tecnologias de impressão em resina foram desenvolvidas e aplicadas na joalheria, o que passou a eliminar outra etapa da fabricação tradicional, a confecção dos moldes de borracha e a injeção de cera, para fabricação das peças em cera, para montagem da árvore de fundição. (MONTEIRO, 2015).

Figura 33 - A imagem mostra peças imprimidas em impressora 3D



Fonte: Monteiro (2015).

Dependendo da capacidade da impressora 3D, também é possível fabricar toda uma série de peças em resina calcinável para fundição direta, o problema da resina calcinável é que ela tem um custo muito mais alto que a resina para molde, e gera carbono que pode incorporar no revestimento, sendo necessário modificar alguns parâmetros para fundição como maior tempo e temperatura de calcinação, para isso é necessário utilizar revestimentos mais caros o que aumenta os custos. Esse tipo de fundição é geralmente chamado de fundição direta. Apesar dos custos da fundição direta serem maiores que a fundição tradicional ela ainda é muito vantajosa, pois elimina a necessidade de molde e permite a produção de peças com design muito complexo que inviabiliza a confecção do molde, como os anéis vistos na Figura 34. Uma joia como a apresentada na Figura 34,

não poderia ser fabricada de outra forma senão com a impressão 3D, com resina calcinável para fundição direta, devido sua forma complexa não seria possível confeccionar o molde de borracha desta peça.

Figura 34 - Imagem mostra uma peça impressa em resina roxa calcinável à esquerda e à direita a peça já fundida em prata.



Fonte: Treemodels (2021).

No momento a impressão 3D é parte integrante do processo de fundição da joalheria, mais especificamente na etapa de modelagem, e vem sendo bem empregada em função das suas características que encaixaram com as necessidades específicas do segmento. (MONTEIRO, 2015)

3.11 REVESTIMENTOS REFRAATÓRIOS

Os revestimentos refratários utilizados na joalheria para molde de fundição, possuem composição variada e seu processamento é complexo. Como a joalheria exige alta qualidade superficial e preenchimento de peças com designer delicado, a fundição desse tipo de peça requer revestimentos de alta qualidade, e para garantir que o revestimento tenha o desempenho planejado, todos os fatores que podem influenciar o desempenho precisam ser controlados. Defeitos de fundição muitas vezes são causados por reações químicas entre o molde e o metal fundido, como os defeitos positivos na superfície rugosa que ocorre quando o metal fundido penetra na porosidade do molde.

Segundo Faccenda (2001), um estudo sobre os defeitos que podem ocorrer na fabricação de joias foi realizado pelo Instituto Alemão de Metais Preciosos (FEM) com o apoio da

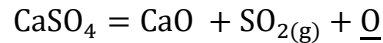
World Gold Council e Santa Fé Symposium. Este estudo mostrou que cerca de 80% das joias com defeito examinadas, foram produzidas por fundição de revestimento e cerca de 50% dos defeitos eram porosidades, um defeito típico de fundição relacionado com o revestimento. Sendo assim o estudo do revestimento e seu manuseio é uma das etapas mais importantes do processo de fundição.

3.11.1 COMPOSIÇÃO

Os revestimentos utilizados têm como composição básica o gesso, além de quartzo e cristobalita que são formas de sílica (SiO_2):

- Sílica: constituída de uma mistura de cristobalita (dióxido de silício SiO_4) e quartzo (SiO_2) em proporções de 4:3. O teor total de sílica no revestimento varia de 60 a 80% e proporciona resistência a altas temperaturas. A sílica no material cerâmico é responsável pela expansão do refratário durante o resfriamento, que irá compensar a contração do metal. ((KLIAUGA, FERRANTE, 2009; KOLOMEISKY, 2004)
- Gesso uma massa (sulfato de cálcio semi hidratado $\text{CaSO}_4 - \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$): age como aglomerante, e ao ser misturado com água se dissolve forma uma massa dura e resistente de sulfato de cálcio bihidratado ($\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$). O gesso, quando seco, forma uma rede de pequenas agulhas em torno das partículas de sílica o que gera uma microestrutura porosa que dá ao revestimento a permeabilidade necessária para que o ar contido no molde passe a ser expulso durante o vazamento. O teor de gesso do revestimento varia entre 20% e 40%. ((KLIAUGA, FERRANTE, 2009; KOLOMEISKY, 2004)
- Aditivos: perfazem cerca de 1% da composição do revestimento e têm inúmeras funções, como a de controle do tempo de secagem e da expansão, além de exercer função redutora (ácido bórico, pó de carvão). Alguns elementos, como cloreto de sódio e sulfeto de potássio, aceleram o tempo de secagem do revestimento, além de fazer com que a mistura seja mais solúvel em água. Outros, como bórax, carboneto de potássio e substâncias coloidais retardam o tempo de secagem do revestimento. ((KLIAUGA, FERRANTE, 2009; KOLOMEISKY, 2004)

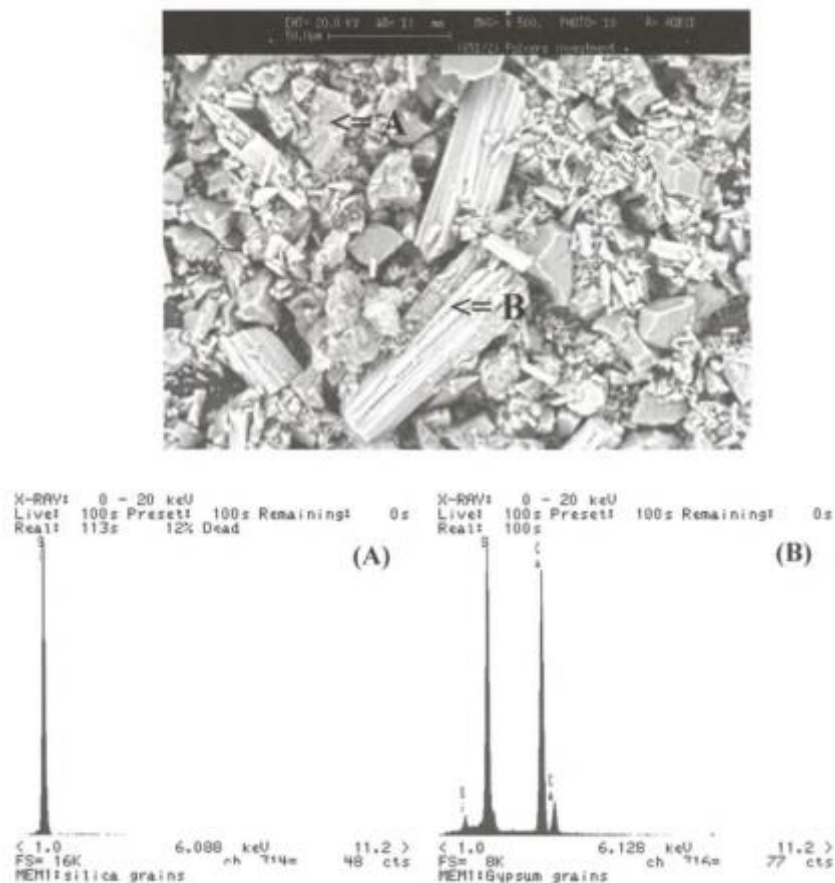
Porém quando se trabalha com ligas metálicas de com alto ponto de fusão próximo a 1000°C , como ligas de ouro amarelo e de ouro branco, a composição do refratário deve ser diferente. Os revestimentos a base de gesso começam a se decompor em gás que penetra nas peças fundidas e gera porosidades, como mostra a reação:



O oxigênio produzido se dissolve na liga, e forma óxidos com os elementos de liga menores, como Cu, Ag e Zn. A reação acima é então mais catalisada pela presença de SiO_2 , e os óxidos formados no fundido. O resultado é a formação de uma grande concentração de SO_2 gás no elenco. (FRYE, YASREBI, STURGIS, 2000)

O material de revestimento mais comumente usados para fundir ligas de ouro e prata é uma mistura de 25-30% de sulfato de cálcio semi hidratado ($2\text{CaSO}_4\text{H}_2\text{O}$), que atua como um aglutinante e 70-75% de sílica (o verdadeiro material refratário), na forma de quartzo e β -cristobalita. A morfologia dos componentes é mostrada na Figura 35, onde os cristais alongados são gesso (espectro B) e as partículas fragmentadas de sílica (espectro A). (FACCENDA, 2001; KOLOMEISKY, 2004)

Figura 35 - Morfologia dos componentes do revestimento: sulfato de cálcio e sílica.



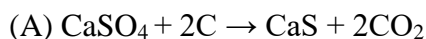
Fonte: Faccenda (2001).

A quantidade relativa de quartzo e β -cristobalita afetarão as características do molde, pois essas fases de sílica possuem diferentes características termomecânicas, como temperatura de transição de fase e coeficiente de expansão térmica, que será descrito

melhor no item 3.11.5. Devido às suas propriedades químicas e físicas, o pó de revestimento deve ser mantido em tambores fechados, de preferência em local com temperatura e umidade controlada.

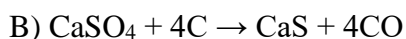
3.11.2 REAÇÕES DE SULFATO DE CÁLCIO

O sulfato de cálcio reage com o carbono em duas reações dependentes da temperatura que formam o cálcio sulfureto. Esses são:



Este sulfeto de cálcio e dióxido de carbono é visto pela primeira vez a cerca de 700 ° C

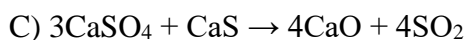
Uma segunda reação:



Esta reação começa em uma temperatura um pouco mais alta. Produz carbono monóxido e sulfeto de cálcio.

Essas reações variam com a temperatura. Ambas as reações estão completas a 1000 ° C.

A reação C gera o óxido de cálcio e o dióxido de enxofre, isso começa a 800 ° C e é mais intenso a 850–900 ° C. Isto é:



Aqui vemos o dióxido de enxofre que é o mal, geralmente designado como um causa de defeitos de fundição, o SO₂ deve ser evitado a todo custo pois pode inutilizar as peças fundidas. O maior problema é a porosidade resultado da presença física de bolhas de gás. O enxofre também pode gerar inclusões nas peças fundidas, ao interagir com o metal fundido forma sulfeto de cobre e prata. (ECCLES, 2002)

3.11.3 PREPARO DO REVESTIMENTO

O revestimento é comercializado na forma de pó, que deve ser misturado com água para formar uma massa viscosa e homogênea. Em geral o pó é adicionado à água e não o contrário, para evitar a formação de pelotas, pode ser misturado à mão ou em equipamento próprio à vácuo.

O tempo de cura do revestimento (reação entre o gesso e a água) é de cerca de 10 min. Isso significa que neste intervalo deve-se efetuar a mistura (3 min), o ar presente na massa cerâmica precisa ser eliminado (câmara de vácuo – 2 min), a massa deve ser vertida nos cilindros (1 min) e o ar presente no cilindro após o vazamento deve ser retirado (câmara

de vácuo – 4 a 6 min). O vazamento da massa refratária nos cilindros, que estão presos a base de borracha, deve ser feito lentamente e de maneira uniforme, no espaço entre o cilindro e a árvore. (KLIAUGA, FERRANTE, 2009)

Após despejar todo revestimento nos tubos de aço, estes devem permanecer em repouso durante 1 a 2 h, o que depende do seu tamanho, para que o gesso endureça e perca uma parte da água superficial por evaporação. Quando o gesso está suficientemente duro, a base de borracha é retirada. O formato da base de borracha molda a entrada do canal de vazamento do molde cerâmico. Esta etapa do processamento pode gerar as seguintes falhas: rachaduras e barbatanas, marcas d'água, bolhas e esferas na superfície das peças.

3.11.4 SECAGEM E DECERAÇÃO

Depois que o revestimento no frasco é definido, a cera pode ser removida em 2 formas diferentes: com vapor ou a seco.

A deceragem a vapor deve ser preferida, porque a remoção de cera é mais eficiente e a espessura do revestimento impregnado com cera é reduzido praticamente a zero. Portanto, haverá pouca cera restante que poderia originar gases redutores (principalmente CO) no molde durante a queima processo. Esses gases podem favorecer a decomposição térmica do CaSO_4 e da formação da porosidade por gás. (FACCENDA, 2001)

A deceragem a vapor não pode ser usada quando usamos o processo de fundição de pedra no local, pois neste caso o revestimento contém ácido bórico.

A desvantagem da deceragem a vapor é a desintegração dos cristais de sulfato de cálcio que ocorrem na superfície do revestimento exposta ao vapor, que é a superfície que mais tarde entrará em contato com o metal fundido. Isto é o local onde a decomposição térmica do sulfato de cálcio pode ocorrer. Este efeito de desintegração pode aumentar a reatividade do sulfato de cálcio cristais, diminui-se a temperatura de decomposição térmica, o que favorece a formação de porosidade do gás.

A deceragem a seco, especialmente se o ciclo de queima foi realizado com circulação de ar, queima todos os resíduos de cera completamente e deixa o tamanho e as propriedades termoquímicas dos cristais CaSO_4 inalteradas.

Os frascos não devem ser completamente secos antes da deceragem, pois a água residual no interior do tubo ao tentar sair irá trincar a parte já seca do revestimento. Portanto, deve-se decerar os frascos dentro de 2-3 horas após despejar o revestimento no franco, caso isso não seja possível é preciso mantê-los cobertos com um pano úmido para evitar que sequem. (FACCENDA, 2001)

A retirada da água e da cera requer temperaturas de 100-200 °C. Esta etapa é muito importante, pois, acima de 200 °C, o ideal é retirar o máximo de cera nesta temperatura (principalmente em forma de cera líquida), pois acima desta temperatura o carbono presente na cera começa a reagir com o revestimento forma ácidos e sulfetos com o enxofre do gesso, que poderão reagir com o metal durante a fundição. A presença de oxigênio nesta etapa é importante, pois transforma o carbono da cera em CO e CO₂, facilita, assim, a sua eliminação. Utiliza-se fornos elétricos a resistência ou em estufas com vapor d'água, como foi descrito anteriormente. O Forno precisa ser aquecido de

forma gradual até atingir 150 °C (2 a 4 h), o que depende do tamanho da peça e da quantidade de cera, para evitar que ocorra vaporização intensa, que pode prejudicar a estabilidade mecânica do revestimento. O uso de fornos com vapor d'água ajuda a manter o revestimento umedecido durante a operação, o que evita queima do revestimento e infiltração de cera nos seus poros. Esta etapa deve durar entre 1 e 1,5 h. (KLIAUGA, FERRANTE, 2009)

3.11.5 CICLO DE CALCINAÇÃO

Para obter peças fundidas de boa qualidade, é fundamental ter fundições com temperaturas homogêneas no forno de queima e dar aos frascos tempo suficiente para atingir o equilíbrio nas temperaturas.

Se considerarmos as diferentes transformações de fase do revestimento que ocorrem em temperaturas específicas durante o ciclo de queima, podemos perceber que um alto gradiente de temperatura pode gerar zonas onde a transformação já foi concluída e as zonas onde a transformação não começou, o que pode originar tensões mecânicas e formação de fissuras.

O ciclo de calcinação do material cerâmico é comumente chamado pelas principais referências de ciclo térmico de Burnout. (FACCENDA, 2001)

Ciclo térmico de Burnout

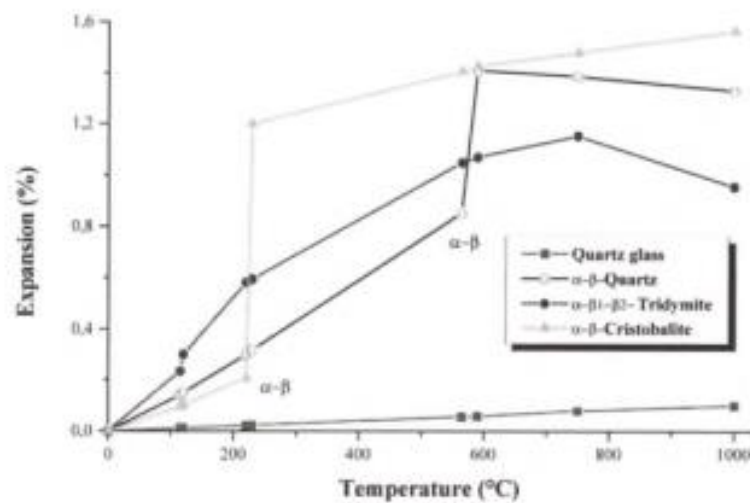
As propriedades finais do revestimento dependem do ciclo de Burnout e, particularmente, das diferentes etapas de aquecimento. Geralmente o ciclo de Burnout sugerido pelo fabricante do revestimento é o que deve ser mais utilizado.

O revestimento refratário, a base de gesso e cristobalita, sofrem várias transformações microestruturais em diversas fases durante o ciclo de Burnout, algumas dessas fases necessitam de cuidados para não gerarem defeitos no revestimento.

A primeira fase está a 100-240 ° C, quando a água absorvida e a água ligada ao gesso hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$). Este o processo é lento e a temperatura deve subir muito lentamente, pois se a água ferver violentamente o revestimento irá trincar e a superfície ficara rugosa. A segunda fase está a 250-350°C, quando a β -cristobalita se transforma em α -cristobalita, essa transformação ocorre com um aumento de volume, portanto a temperatura deve ser mantida constante a 250 ° C por algum tempo, para permitir que a transformação ocorra uniformemente em todo o material. A terceira fase está a 450-500°C ocorre uma transição de fase γ - $\text{CaSO}_4 \rightarrow \beta$ - CaSO_4 que não afeta de

forma notável as propriedades finais do investimento. Em 607 ° C, a transformação de quartzo α em quartzo β ocorre com o conhecido fenômeno de expansão, uma vez que pode ser visto no gráfico da Figura 36. Por último, a temperatura máxima permitida (750 ° C) não deve ser ultrapassada. Em temperaturas mais altas, o sulfato de cálcio pode se decompor, especialmente se resíduos de carbonetos estão presentes. (FACCENDA, 2001).

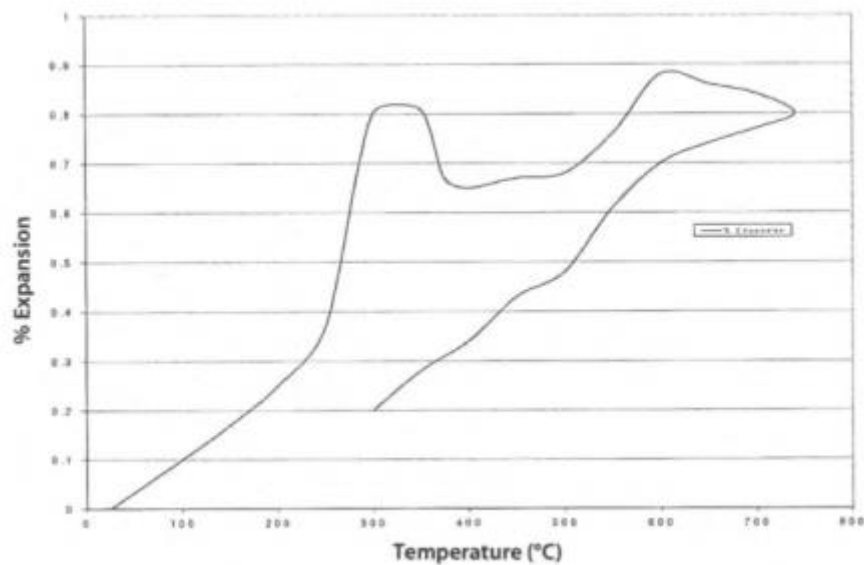
Figura 36 - Gráfico representa a expansão térmica das diferentes fases da sílica.



Fonte: Faccenda (2001)

Já na Figura 37, é possível observar a expansão volumétrica sofrida pelo revestimento refratário, dentro do tubo durante o processo de queima gerado pelas transformações de fase mostradas na Figura 38, é importante ressaltar que com a diminuição da temperatura para o vazamento do metal o revestimento sofre contração. (FACCENDA, INGO, RICCUCCI, CHIOZZINI, VEROLI, 2000)

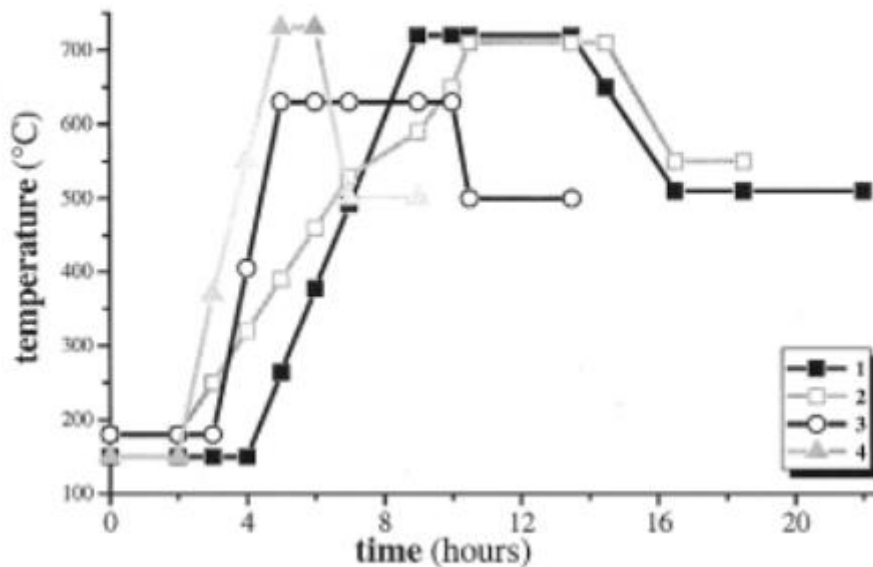
Figura 37 - O gráfico representa a expansão volumétrica sofrida pelo revestimento refratário dentro do tubo gerado pelo aumento da temperatura e pelas transformações de fase da sílica.



Fonte: Faccenda, Ingo, Riccucci, Chiozzini e Veroli (2000).

Na indústria diferentes tipos ciclos de Burnout são utilizados, pois apesar dados apresentados, a escolha do melhor ciclo não depende apenas do revestimento mais das características do forno, tipo de peça a ser fundido, custo de energia e a qualidade esperada no final do processo. Na pratica as indústrias testam os ciclos de Burnout ideias leva em conta o custo de energia x benefício da qualidade no processo. Alguns dos ciclos utilizados estão representados na Figura 38.

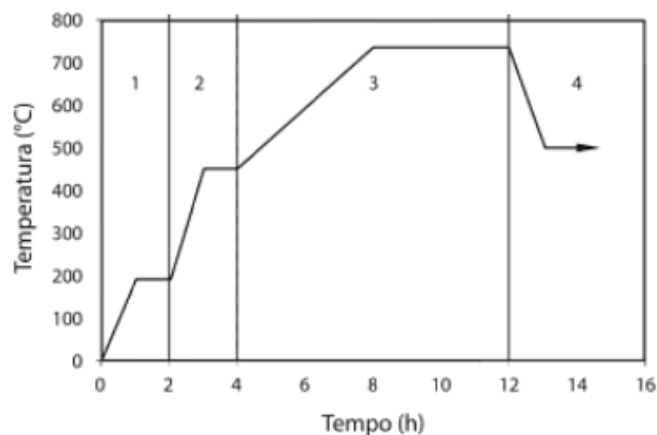
Figura 38 - Exemplos típicos de ciclo de Burnout utilizados pela indústria.



Fonte: Facenda, Ingo, Riccucci, Chiozzini e Veroli (2000).

Outro ciclo possível adiciona uma rampa a mais entre 250-450°C, e se mantém a uma temperatura constante de 450°C, visa acomodação das tensões causadas pela expansão do revestimento, a Figura 39 representa este ciclo de Burnout. (KLI AUGA, FERRANTE, 2009)

Figura 39 - Ciclo de Burnout com rampa em 450°C



Fonte: Kliaugas e Ferrante (2009)

Em todos os ciclos de Burnout após atingir o patamar máximo de temperatura e permanecer nele o tempo necessário à queima está completa, e o refratário precisa ser

resfriado para atingir a temperatura para o vazamento. Esta temperatura é naturalmente menor do que a do metal, e para o seu cálculo pode-se utilizar:

$$T_{\text{cilindro}} = \frac{T_{\text{liquidus}}}{2} + 50^{\circ}\text{C}$$

Onde T_{liquidus} é a temperatura *líquidus* (temperatura em que se inicia a solidificação) da liga que está sendo vazada e T_{cilindro} é a temperatura ideal do molde refratário. Esta etapa só pode ser feita em um equipamento mais sofisticado, que despeje o metal em ambiente com temperatura controlada. Nos demais equipamentos o tubo sofre leve resfriamento ao ser retirado do forno. O metal deve ser vazado no cilindro ainda quente, se a temperatura do cilindro for muito baixa, o metal começa a solidificar antes de preencher o molde. Se a temperatura for muito alta, o metal absorverá gases, e sofrerá superaquecimento, o que gera um volume de contração maior, o que pode levar a regiões de rechupe na peça. Superaquecimento elevado também resulta em grãos mais grosseiros no material. A Tabela 3 sugere algumas temperaturas para o molde, mas o ajuste deve ser feito com a experiência.

Tabela 3 - Temperatura de molde para fundição de ligas utilizadas na joalheria.

Liga	Modelos pequenos	Modelos médios	Modelos grandes
Revestimento de cristobalita			
Ouro puro	650	620	550
Au585-750 branco	580 ± 20	550 ± 20	510 ± 20
Au585-750 amarelo	580 ± 20	510 ± 20	450 ± 20
Au373 amarelo	650	620	550
Ag925	480 ± 20	430 ± 20	380 ± 20
Latão	400	350	300
Revestimento de fosfato			
Pt950	950	800	650
Pd950	850	750	650
Au750 branco ao Pd	750	680	610

Fonte: Kliauga e Ferrante (2009)

3.12 FUNDIÇÃO DIRETA

A fundição com cera perdida tem quatro etapas: a primeira é fazer uma joia original, a segunda é fabricar uma borracha, a terceira etapa é produzir padrões de cera a partir do molde de borracha e a quarta etapa é fundi-los com o método de cera perdida.

Durante a última década, o progresso tecnológico na computação e nos materiais, levou a uma versão mais rápida desse processo, conhecida como prototipagem rápida (RP). Em vez de produzir um original em metal, o design auxiliado por computador, em programa como *Rhinoceros* de modelagem digital, é utilizado para produzir um modelo “virtual” que existe apenas como um arquivo de computador. Um sólido é então produzido em resina usa-se uma máquina de prototipagem rápida (impressora 3D), como foi descrito no item 3.10.3.

A fundição de resina de impressão 3D, recebe o nome de fundição direta, e não é tão simples quanto a fundição tradicional devido a composição dessa resina.

As ceras utilizadas na fundição tradicional são hidrocarbonetos naturais compostos de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (embora, em quantidades menores), que geralmente derretem entre 70°C à 80 ° C (158 a 176 ° F). Uma vez derretida, a cera escorrerá do frasco, embora uma pequena quantidade seja absorvida pelo revestimento, para remover esse pequeno resíduo, o revestimento deve ser queimado acima de 700 ° C (1292 ° F), segundo McKeer (2007). Isso garante que o resíduo de cera queime para deixar uma cavidade limpa para fundir o metal. As resinas utilizadas na impressão 3D são baseadas em carbono como cera, mas têm características de fusão e queima completamente diferentes. Resinas fornecidos por diferentes empresas também derretem e queimam em diferentes temperaturas. Uma resina foi aquecida em um cadinho de cerâmica, para determinar sua fusão e temperaturas de queima em comparação com a cera. A resina não foi alterada a 250 ° C (482 ° F), enquanto a cera estava derretida (Figura 40)

Figura 40 - Cera e resina após aquecimento a 250 ° C (482 ° F)



Fonte: McKeer (2007).

A resina derreteu e começou a queimar a 450 ° C (842 ° F). Após dez minutos a esta temperatura, um resíduo de alcatrão permaneceu. Quando este foi aquecido a 750 ° C (1382 ° F), a maioria do alcatrão foi queimado. Um resíduo, que inclui cinza branca permaneceu, e não queimou a 750 ° C (1382 ° F), enquanto não havia resíduo da cera (Figura 41). Apenas pelo aumento da temperatura para 1000 ° C (1832 ° F), o resíduo de resina foi queimado. (MCKEER, 2007)

Figura 41 - Cera e resina após aquecimento a 750°C (1382°F).



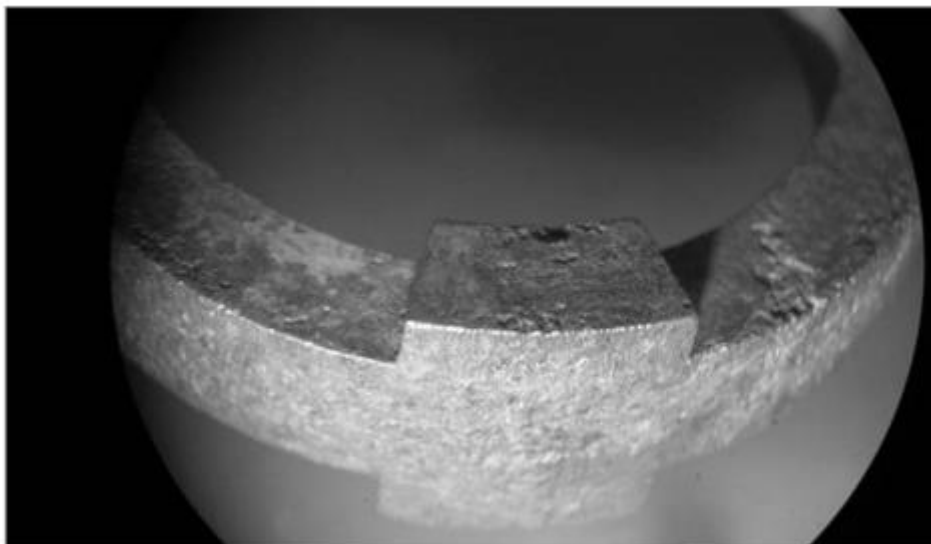
Fonte: McKeer (2007).

Segundo McKeer (2007), a principal diferença entre a fundição tradicional e a fundição direta, está no trabalho de eliminar os resíduos da resina deixado no revestimento, para isso é necessário alterar o revestimento utilizado e o ciclo de calcinação.

Existem várias maneiras do fabricante do revestimento tentar melhorar a qualidade das peças fundidas, obtidas a partir de padrões de resina. Quando se conhece a composição da uma resina, o ciclo de queima de revestimento pode ser alterado, para tentar melhorar o esgotamento dos resíduos. Já no ciclo de calcinação a temperatura usada tem que ser maior que 730°C, por isso quanto maior a temperatura de trabalho do revestimento melhor é a eliminação dos resíduos, sendo que o revestimento deve ser específico para fundição de joias. Outro fator importante é o tempo, os resíduos da resina são eliminados

lentamente por isso permanecer a temperaturas acima de 730°C pelo máximo de tempo possível é importante, como pode ser visto na Figura 42 em que durante um ciclo de calcinação a peça de resina foi deixada a 730°C por 4h enquanto a Figura 43 a peça de resina foi deixada a 730°C por 12h. (MCKEER, 2007)

Figura 42 - Ciclo de calcinação com patamar de temperatura de 730°C por 4h.



Fonte: McKeer (2007).

Figura 43 - Ciclo de calcinação com patamar de temperatura de 730°C por 12h.

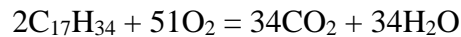


Fonte: McKeer (2007).

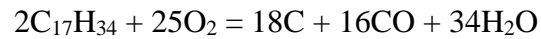
A peça fundida mantida por 4h a 730°C apresentou porosidades causadas pela presença de resíduos da resina, já a peça deixada por 12h apresentou uma superfície mais lisa e de melhor qualidade.

Outro fator importante, para aumentar a eficiência na eliminação dos resíduos da resina, e da cera é aumentar a oferta de oxigênio, durante o processo de calcinação. A queima de

cera e resina, pode ser vista com bastante precisão como queima de qualquer hidrocarboneto sólido, por exemplo:



Nas condições de escassez de oxigênio, a maior parte da cera e resina não queima, mas em vez disso, sofre processo de pirólise, ou seja, ocorre decomposição térmica em carbono, por exemplo:



Esse carbono sólido permanece no revestimento e causa defeitos superficiais como mostrados na Figura 42, a melhor forma de aumentar a oferta de oxigênio é utilizar fornos com troca de ar forçada, porém esse tipo de forno tem alto custo. (KOLOMEISKY, 2004)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ELABORAÇÃO DAS LIGAS

Neste trabalho foram utilizadas duas ligas de prata, a Ag 925 (92,5% de prata e 7,5% de cobre) e a Ag 725 (72,5% de prata e 27,5% de cobre). Para a elaboração das ligas utilizados neste trabalho (Ag 925 e Ag 725), foram adquiridos lingotes de prata mil (prata pura) e chapas de cobre, conforme mostrado na Figura 44. Para fundir as ligas deste trabalho, usou-se prata mil que pode ser comprada em qualquer Fornitura, já o cobre eletrólito utilizado, como visto na Figura 44, pode ser comprado em loja de materiais elétricos. Outra opção, é utilizar as pré-ligas para fundição como as vendidas em empresas como BQZ ou 3M recuperadora, nessas pré-ligas de prata temos opção de ligas com Zinco, linha *Germânia plus*, que proporciona a desoxidação do banho, e aumenta a fluidez do metal.

Figura 44 - Imagem dos metais puros utilizados para fabricar a liga



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para fundir o metal, foi utilizado um pequeno forno com resistência elétrica, que atinge temperatura de 1200°C, na parte interna do forno, é utilizado um cadinho de grafite, o equipamento foi descrito no item 3.5. Neste trabalho foi utilizado o forno da empresa ZEZIMAQ, como pode ser visto na Figura 45. A temperatura utilizada para fundir as ligas de prata foi 950°C.

Figura 45 - a) Imagem do forno de fusão de metal da Zezimaq. b) Imagem do cadinho no interior do forno.

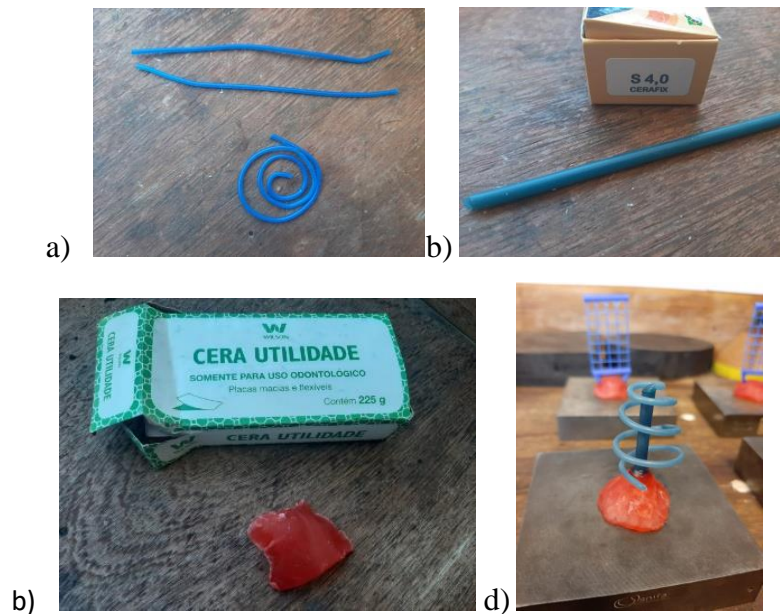


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.2 CONFECÇÃO DOS MODELOS DE CERA

Neste trabalho, foram utilizadas ceras em fio de 2mm, para confeccionar o teste de fluidez, da marca Cerfix e da Vigor. Esse tipo de cera, é encontrado facilmente em loja de material de prótese dentária, Figura 46a e 46b. A cera para confeccionar os massalotes, é uma cera de utilidade vermelha, que é bastante maleável (Figura 46c), muito usada na odontologia, e pode ser encontrada em qualquer loja de odontologia.

Figura 46 - a) Fio de cera de 2mm usada para fazer a espiral; b) Marca Vigor utilizada para fazer a espiral; c) Fio de cera de 4mm da marca Cerafix.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Outra cera utilizada, é a cera para injetar nos moldes, esta é colocada na injetora a 75°C e injetada em forma líquida nos moldes de silicone. As ceras são da marca *GoldStar* Brasil, a cera *Flexiblue* (cera azul), foi usada para o modelo de grade no teste de fluidez, a cera rosa (*Pink*), como visto na Figura 47a, foi utilizada no modelo de cera do teste de qualidade de fundição. As ceras podem ser encontradas em qualquer Fornitura ou na empresa BQZ. A injetora utilizada foi a *DWI-01*, como pode ser visto na Figura 47b, o equipamento foi descrito no item 3.9 (etapa 3).

Figura 47 - a) A imagem mostra a cera a esquerda é cera *Pink* e a da direita a cera *Flexiblue* da marca *GoldStar* Brasil. b) A imagem mostra a injetora utilizada no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para montar a árvore de fundição, foi utilizado uma cera sprue, esse tipo de cera tem ponto de fusão mais baixo que a cera anterior. Durante a deceragem, a cera sprue é eliminada primeiro, o que deixa o caminho livre para que as demais ceras sejam eliminadas, a cera sprue laranja em barra de 10mm de diâmetro, como pode ser visto na Figura 48a, é utilizada para o “tronco” da árvore de fundição, como pode ser visto na Figura 48b, é da marca Goldstar Brasil e é encontrada na empresa BQZ.

Figura 48 - a) Imagem da cera sprue que as peças de fundição na árvore. b) Imagem mostra a árvore de fundição com a cera sprue.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para montar a árvore de fundição, é necessário soldar as peças em cera, ao derreter as pontas e unindo-as, para isso, utiliza-se um pirografo, que é um equipamento semelhante a um ferro de solda, porém possui variação de temperatura e uma ponta mais delicada. O equipamento utilizado foi da empresa Sinzato, como visto na Figura 49.

Figura 49 - Pirografo profissional da empresa Sinzato.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.3 PREPARO E CALCINAÇÃO DO REVESTIMENTO

Neste trabalho, o revestimento utilizado *SRS Silk*, composto de Cristobalita desmineralizada comprado na empresa *GoldStar* (Figura 50), esse revestimento de cristobalita é indicado para fundição de ligas de ponto de fusão de até 1200° C, seu ciclo de calcinação chega à temperatura máxima de 730°C.

Figura 50 - Imagem do revestimento *SRS Silk*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para fazer a mistura do revestimento, foi utilizado uma balança analítica de precisão, para medir a quantidade de revestimento em proporção com a quantidade de água, um pote de silicone para auxilia na pesagem, e um misturador de bebidas da marca Hamilton, que poderia ser substituída por uma batedeira comum. Os equipamentos utilizados para misturar o revestimento pode ser visto na Figura 51.

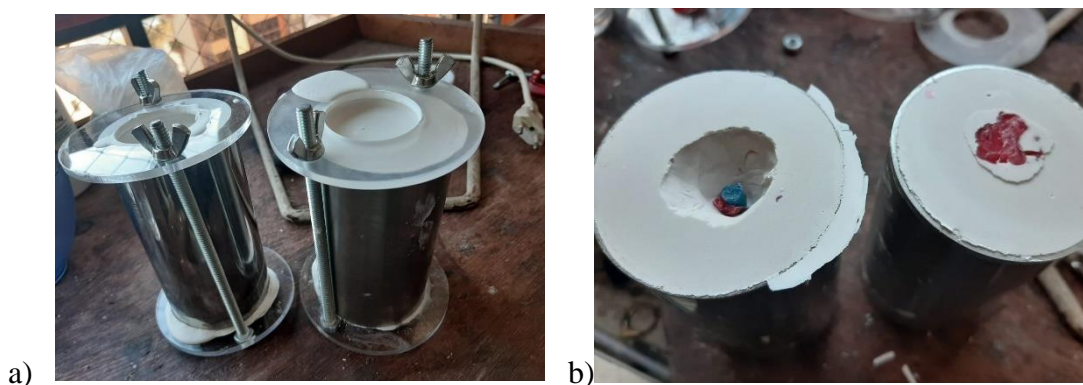
Figura 51 - Equipamentos utilizados para misturar o revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para manter o revestimento ao redor da peça fundida, é utilizado um tubo de aço inox, 2 tamanhos diferentes foram usados nos testes, o menor com diâmetro de 5 cm e altura de 7 cm, e o maior tem 6cm de diâmetro e 11 cm de altura, ambos com 2 mm de espessura. Para manter o revestimento em estado líquido, dentro do tubo até que se solidifique, são utilizadas 2 placas de acrílico presas por 2 roscas, sendo que, a placa de cima tem um buraco por onde o revestimento é derramado, como pode ser visto na Figura 52.

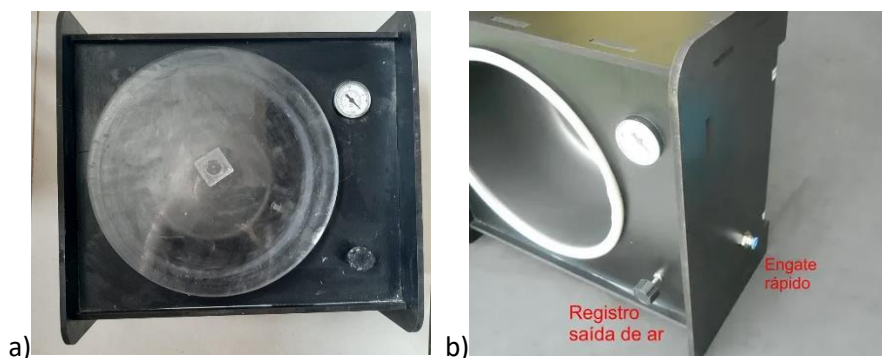
Figura 52- a) A imagem mostra o tubo de aço com as placas de acrílico. b) Imagem do revestimento seco no tubo de aço.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

No processo de mistura do revestimento, ocorre a formação de bolhas, devido a reação química do gesso. Para evitar que as bolhas acabem fixadas às peças de cera, e causem defeitos, é necessário colocar o revestimento ainda líquido na câmara de vácuo, para retirar as bolhas. A câmara utilizada para este trabalho, foi feita de forma artesanal, e consiste em um recipiente interno de 20 cm de diâmetro e 13 cm de profundidade, possui um registro de saída de ar, um pequeno vacuômetro e uma tampa de acrílico, como pode ser vista na Figura 53. A câmara tem um pequeno engate na lateral, que é conectada a bomba de vácuo para gerar um vácuo no interior da câmara.

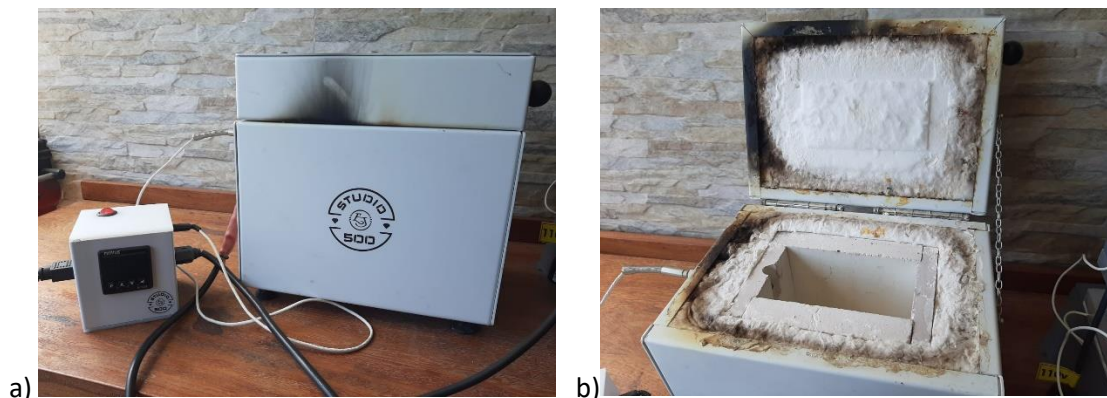
Figura 53 - a) Imagem da câmara de vácuo. b) Imagem do engate rápido e do registro de saída de ar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para o processo de calcinação, foi utilizado o forno da empresa Studio 500, que possui medidas internas de 15 cm de comprimento, 7 cm de largura e 13 cm de profundidade. O interior do forno, é revestido de tijolo refratário e manta de fibra de vidro. Acoplado ao forno, um controlador de temperatura, permite que o forno faça rampas com temperaturas específicas, como visto na Figura 54a. Dentro do forno, cabem 2 tubos grandes de 6 cm na vertical ou 4 tubos pequenos de 5 cm na horizontal, como visto na Figura 54b. Este forno, tem a menor área interna, do que outros fornos industriais utilizados para fundição de joias. No forno da Studio 500, é possível produzir até 500g de peças, sendo utilizado, principalmente, para pequenas oficinas que possuem uma demanda mais baixa, já em fornos industriais é possível produzir a partir de 4kg de peças, o que depende do tamanho do forno. Este forno atinge temperaturas de até 1000°C, porém os ciclos de calcinação vão até 730°C.

Figura 54- a) Forno de calcinação da empresa Studio 500. b) A imagem mostra a parte interna do forno de calcinação.

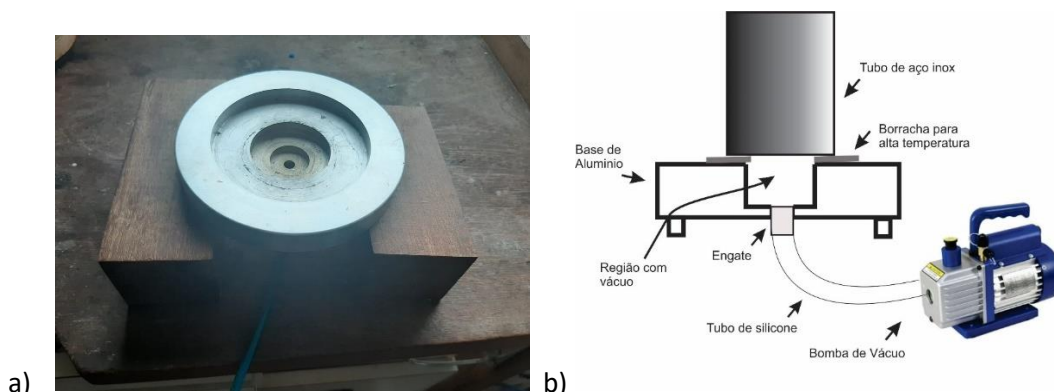


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.4 VAZAMENTO DO METAL FUNDIDO

Para fazer a inclusão do metal fundido no tubo calcinado, é utilizada uma base de alumínio, fabricada para este trabalho, a partir de um tarugo de alumínio de 4 cm de espessura 15 cm de largura, em seguida foram confeccionados os degraus para encaixar os tubos de aço. Na parte interna foram colocados 2 degraus, um de 10 cm e outro de 6 cm de diâmetro e profundidade de 1 cm. Para selar o tubo e a base de alumínio, é colocado uma placa de borracha, para alta temperatura. Na parte de baixo da base de alumínio, foi colocado um engate, que conecta na bomba de vácuo de 12CFM. A inclusora a vácuo de alumínio pode ser vista na Figura 55.

Figura 55 - a) Inclusora a vácuo de alumínio. b) Esquema da inclusora a vácuo de alumínio com tubo de aço inox.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Foi utilizado uma bomba de vácuo da empresa *Suryha* de 12CFM duplo estágio com o vacuômetro, como visto da Figura 56. A bomba é utilizada em 2 momentos, primeiro para retirar a bolha no revestimento, na câmara de vácuo, e depois para fazer a inclusão do metal no molde sob vácuo. O “CFM”, nada mais é do que, o volume de ar que a bomba consegue puxar por minuto, essa sigla, em inglês, representa Cubic Feet Minute, que significa “pés cúbicos por minutos”.

Figura 56 - A imagem mostra a bomba de vácuo da *Suryha* de 12CFM duplo estágio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.5 PROCEDIMENTO

Neste trabalho, todos os testes realizados seguem os mesmos procedimentos de preparo do revestimento, o que difere os testes são os modelos testados, o ciclo de calcinação e forma de incluir o metal no molde (com ou sem vácuo).

A primeira etapa do processo é a montagem da árvore, na base de acrílico é colocada uma pequena quantidade de massa de utilidade vermelha vista na Figura 57, de preferência em forma de cone, o objetivo é facilitar na hora de vaziar o metal no molde, e impedir que o metal derrame fora do tubo. Em seguida, com a ajuda do pirografo, o “tronco” da árvore com cera sprue laranja (Figura 57) é soldado na massa vermelha. As posições e os ângulos utilizados para formar a árvore de fundição estão descritos no item 3.8.

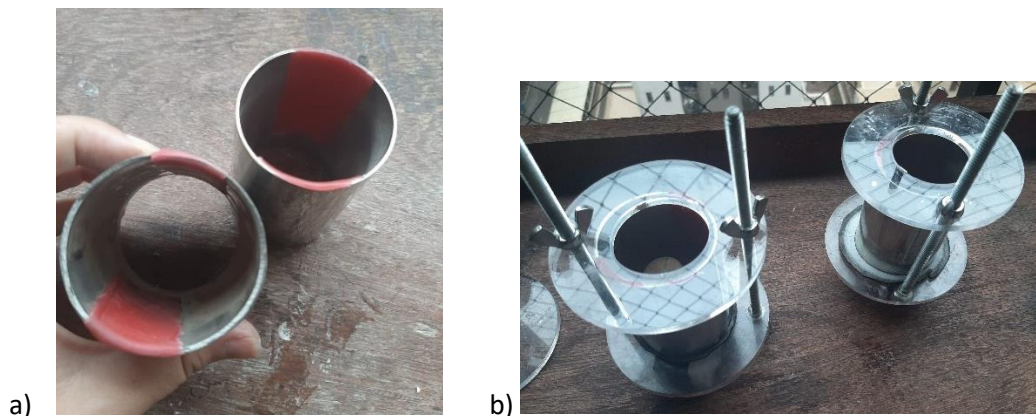
Figura 57 - A imagem mostra uma árvore montada para segunda sequência de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Após montagem da árvore, é necessário aplicar a cera de utilidade vermelha na lateral do tubo de aço inox, para aumentar a área de ação do vácuo sob o revestimento, como pode ser visto na Figura 58a, isso evita falta de preenchimento dos moldes. Em seguida, a outra placa de acrílico é colocada por cima do tubo, e presa na placa de baixo com uma rosca, como é possível ver na Figura 58b, isso evita que o revestimento vaze.

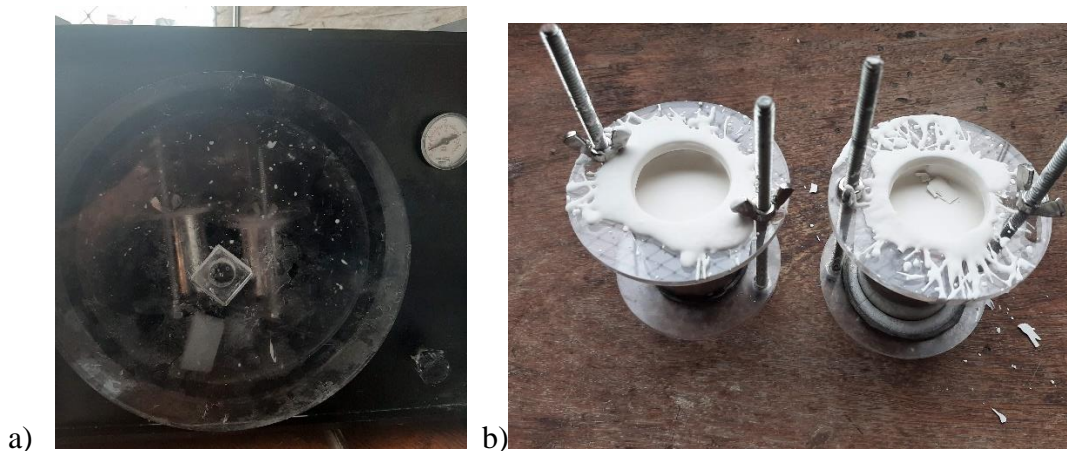
Figura 58 - a) Tubo com cera vermelha na lateral para aumentar a área de ação do vácuo. b) Tubo de aço inox com as 2 placas de acrílico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A próxima etapa é preparar o revestimento, para isso é necessário utilizar água filtrada ou desmineralizada em temperatura ambiente, para evitar que os íons presentes na água interfiram no revestimento. A proporção de água/revestimento, para as marcas utilizadas, são de 38:100 ou seja a cada 100g de revestimento são 38ml de água. Para preencher o tubo grande foi utilizado 390g de revestimento, e 148,2 ml de água e no tubo pequeno foi utilizado 190g de revestimento e 72,2ml de água. Em um recipiente é adicionada primeiro a água, em seguida pequenas porções do revestimento para evitar empelotar, depois mistura-se lentamente o revestimento com uma colher e com auxílio do misturador de bebidas da marca Hamilton (Figura 51). O revestimento é misturado por 2 min, e depois colocado na câmara de vácuo, que está conectada à bomba de vácuo, ao acionar a bomba o vácuo, o revestimento começa a borbulhar, o que libera as bolhas, deixa-se o revestimento no vácuo por 1 min. Após liberar o vácuo, o revestimento é vazado no tubo, pela lateral para evitar quebrar a árvore, com o revestimento dentro do tubo ele volta para a câmara de vácuo para retirar as bolhas restantes, o tubo fica no vácuo por 2 min e depois é retirado da câmara (Figura 59a). Depois de retirar o tubo da câmara é deixado em repouso por pelo menos 2h para secar completamente o revestimento (Figura 59b).

Figura 59 - a) A Imagem mostra o tubo de aço inox com revestimento dentro da câmara de vácuo; b) A Imagem mostra o revestimento já seco no interior do tubo de aço.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em seguida, inicia-se o processo de deceragem, que pode ser feito no próprio forno de calcinação ou em um forno elétrico convencional, o processo de deceragem foi descrito no item 3.11.4, a cera começa a derreter a partir de 80°C até 230°C, como visto na Figura 60.

Figura 60 - A imagem mostra o processo de deceragem que ocorre dentro do forno de calcinação, é possível ver a cera derretida na parte de cima do tubo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Entre a temperatura de 230°C e 500°C, o que restou da cera começa a virar CO₂, e o revestimento também começa a sofrer reações químicas que geram CO₂, com isso o revestimento se torna preto (Figura 61), e muito gás carbônico é expelido do forno, por isso é importante ter exaustor próximo ao forno.

Figura 61 - Na imagem é possível ver o revestimento preto devido ao CO₂ gerado no processo de queima.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quando o forno atinge 650°C, o revestimento começa a ficar branco, e maior parte dos gases foram eliminados, e não há mais fumaça e o forno fica com uma cor bem vermelha, como visto na Figura 62. As etapas do ciclo de calcinação foram descritas no item 3.11.5.

Figura 62 - A imagem mostra o forno a 730°C durante o processo de calcinação do revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Cada teste terá um ciclo de calcinação específico, que será apresentado posteriormente. Após o ciclo de calcinação, a temperatura do forno deve ser diminuída, para se fazer a vazamento do metal no molde, a temperatura está definida na Tabela 3, o tubo deve permanecer por algumas horas nesta temperatura, para garantir que o centro do tubo esteja na mesma temperatura.

A liga de prata é colocada no forno de fusão á 950°C, e depois de um tempo o metal se liquefaz. Quando o tubo está na temperatura correta, ele é retirado e colocado sob a inclusora de alumínio em cima da borracha de alta temperatura, em seguida a bomba de vácuo é ligada, o vacuômetro marca 700mbar, e então o metal fundido é vazado sobre o tubo. O tubo fica sob o vácuo por alguns segundos, e depois é retirado, após esfriar por 30 min, o tubo é colocado dentro de um balde de água, e a peça é retirada de dentro do revestimento. Para retirar os resíduos de revestimento das peças fundidas, utiliza-se um equipamento de ultrassom e para limpar a peça usa-se ácido clorídrico 50:50.

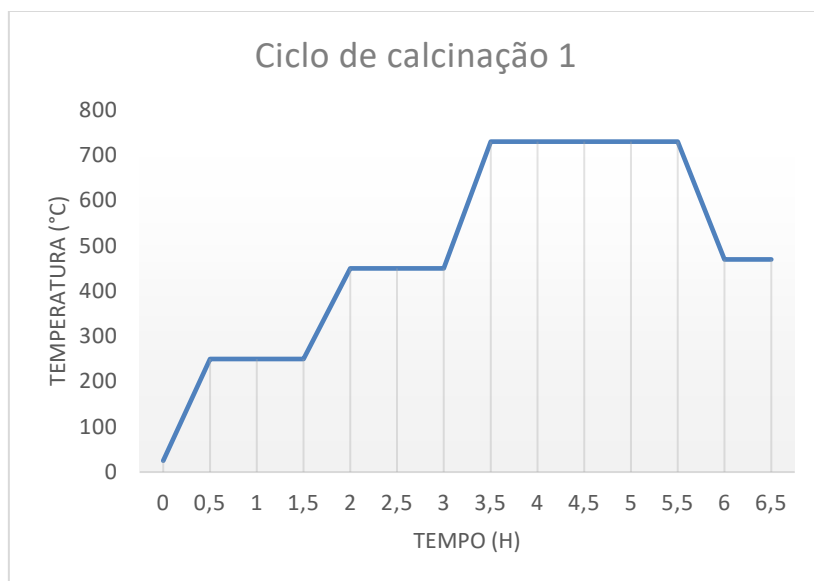
4.6 CICLOS DE CALCINAÇÃO

A escolha do ciclo de calcinação depende de vários fatores: tamanho do forno, quantidade de tubos, revestimento utilizado e material do modelo: resina ou cera. Os ciclos citados pelas referências e suas reações estão descritos de forma detalhada no item 3.11.5.

Neste trabalho foi utilizado um forno menor do que os fornos citados nas referências, por isso o tempo total do ciclo é menor, pois leva menos tempo para a temperatura se tornar homogênea no interior do tubo com revestimento.

O ciclo de calcinação 1, é apresentado na Figura 63, o ciclo chega à temperatura máxima de 730°C, e permanece nessa temperatura por 2 horas, o tempo total do ciclo é de 6,5 horas e só deve ser usado em fundição com cera. O revestimento utilizado neste ciclo é o *Silk* da *SRS*.

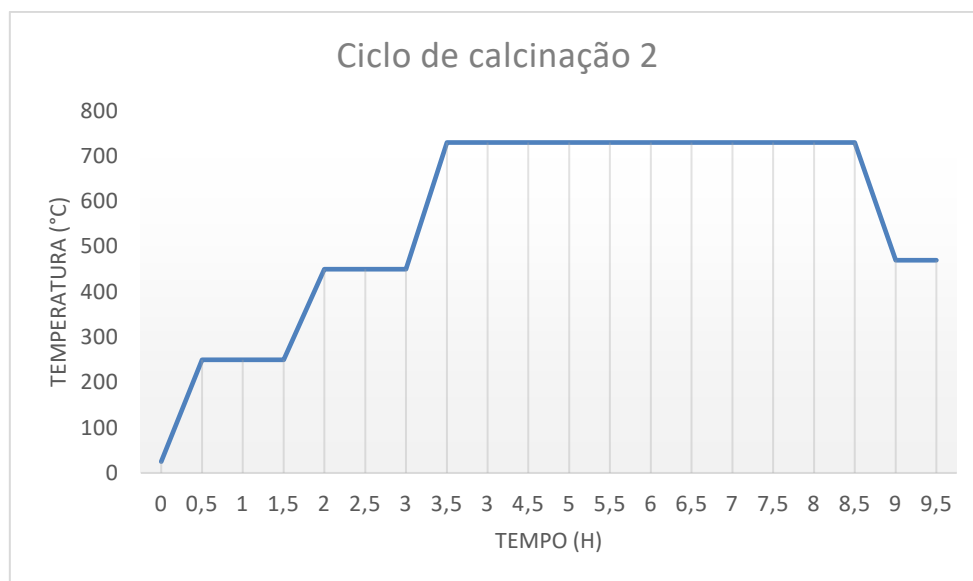
Figura 63 - Gráfico do ciclo de calcinação 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O ciclo de calcinação 2, é apresentado na Figura 64, neste ciclo a temperatura máxima também é de 730°C, e permanece nessa temperatura por 5 horas, e pode ser usado em fundição direta, o tempo total é de 9,5 horas para conclusão do ciclo. O revestimento utilizado neste ciclo foi o mesmo do ciclo anterior.

Figura 64: Gráfico do ciclo de calcinação 2

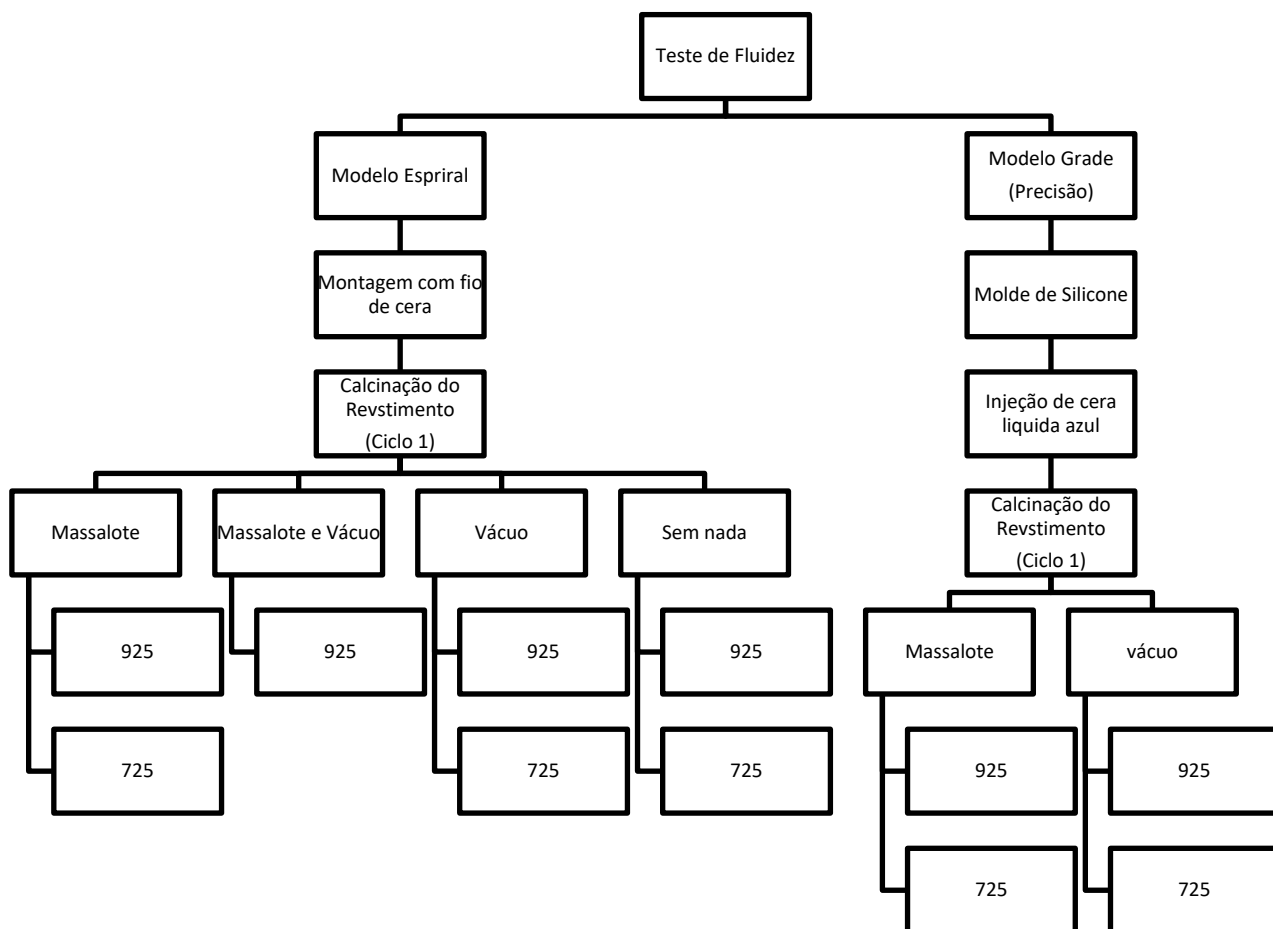


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.7-MODELOS DE CERA

No teste de fluidez, foram utilizados 2 tipos de liga de prata, a Ag 925 com 92,5% de prata e 7,5% de cobre conhecida como prata de lei, é a liga de prata mais utilizada do mercado de joias de prata. A outra liga é Ag 725 com 72,5% de prata e 27,5% de cobre, as propriedades das ligas de prata foram descritas no item 3.3.1. Foram utilizados 2 modelos: espiral e grade (precisão). O modelo de espiral foi montado com fios de cera, enquanto o modelo de grade foi confeccionado um molde de silicone e injetada cera líquida azul. O revestimento cerâmico é preparado e calcinação com um ciclo térmico específico. Para fazer o vazamento do metal no molde de cerâmico foram utilizadas 4 formas no modelo espiral: massalote, massalote e vácuo, vácuo e sem nada. No modelo de grade foram utilizadas 2 formas de inclusão de metal: massalote e vácuo. O fluxograma do teste de fluidez é mostrado na Figura 65.

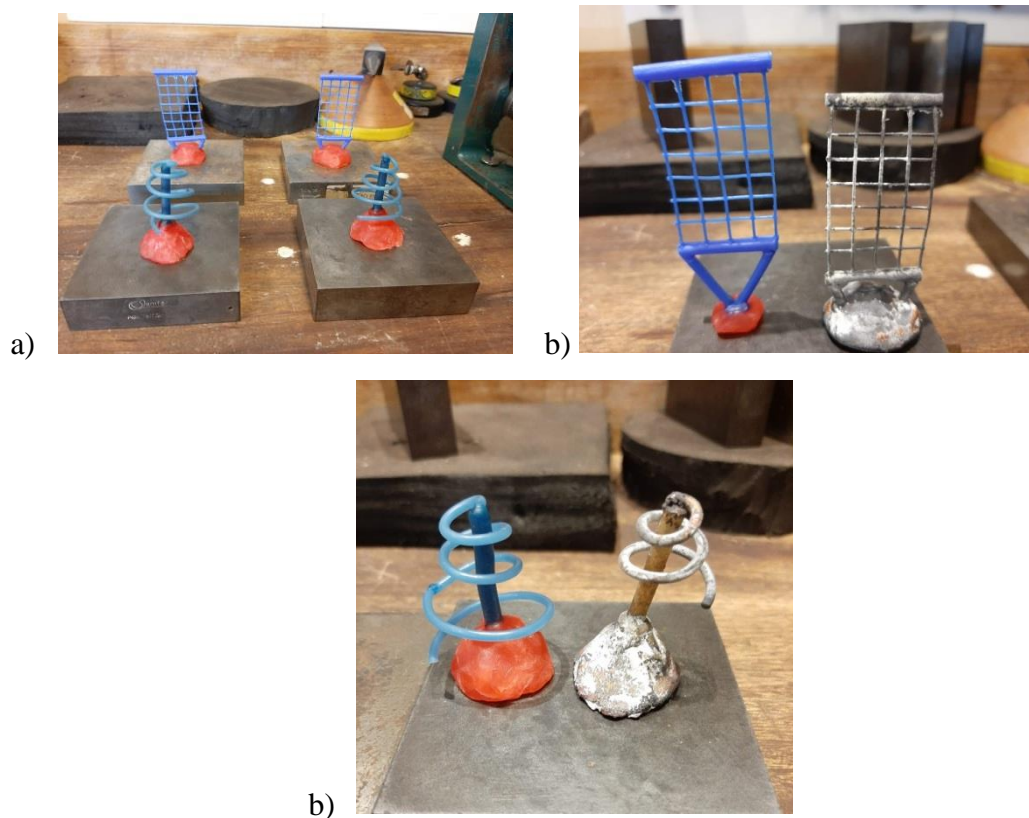
Figura 65 - Fluxograma do teste de fluidez



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O teste da espiral é semelhante ao teste de fluidez descrito no item 3.7 e na Figura 8a, baseado no teste realizado por Machado (2002). Já o teste de grade, tem uma precisão maior que o teste da espiral, e é semelhante ao teste descrito na Figura 8b e 8c, testes realizados por Kliauga e Ferrante (2009) e Carter (2004), respectivamente. A Figura 66 mostra os modelos utilizados para a realização dos testes. Nestes testes o ciclo utilizado foi o ciclo de calcinação 1, com o revestimento *Silk da SRS*.

Figura 66 - a) A imagem mostra os 2 tipos de testes realizados neste trabalho, atrás o teste da grade e na frente o teste de espiral; b) A imagem mostra o modelo do teste de grade em cera ao lado do teste já fundido em prata 925 com vácuo; c) A imagem mostra o modelo do teste de espiral em cera ao lado do teste já fundido.



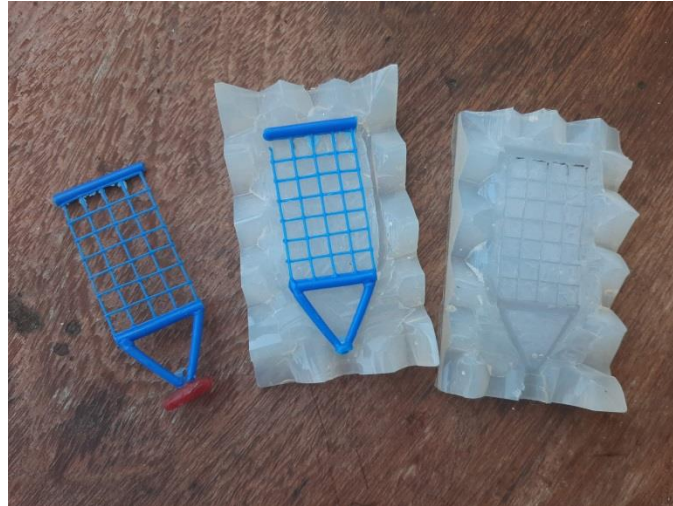
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Espiral: O modelo de espiral, testa a fluidez das ligas utilizadas neste trabalho, para fabricar o molde foi utilizado 2 fios de cera de 2,0mm (mostrada na Figura 46a), que foram soldados com pirografo, ao derreter as pontas de cada fio para uni-los. Esta espiral foi soldada em um fio mais grosso de 4,0mm que sustenta a espiral (Figura 46b). Após a deceragem, a espiral fica oca, e o metal fundido entra pela base do molde e atravessa o tubo de 4,0mm, e flui pela espiral. No final, a porcentagem de preenchimento servirá de comparação entre as ligas utilizadas.

Grade: O modelo de grade, foi produzido ao utilizar um pedaço de grade metálica, com tubos de cera nas extremidades (Figura 67), em seguida é vazado silicone líquido ao redor da grade e produz um molde de silicone, descrito no item 3.9 (etapa 2). O molde é cortado no meio e a grade é retirada, o que resta é um vazio, que foi preenchido com cera líquida pressurizada em uma injetora a vácuo (Figura 47), o equipamento descrito no item 3.9

(etapa 3). A cera utilizada foi a *Flexiblue* da *Goldstar* Brasil. O diâmetro da grade é extremamente fino, cerca de 0,6 mm e tem como objetivo medir fluidez da liga com maior precisão, do processo de fundição por cera perdida.

Figura 67 - A imagem mostra o molde de silicone e o modelo de cera para o teste da



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Massalote: Para alguns testes, foram utilizados o sistema de massalote, sem o vácuo, para ser possível comparar, a eficiência de preenchimento, de cada processo. O sistema de massalote é mais empregado na fundição industrial, com areia verde. Na fundição de joias o sistema de massalote é pouco utilizado, pois exigiria um volume muito maior de metal, que possui alto custo, por isso, é utilizado geralmente o vácuo ou a força centrífuga. Para fazer uma comparação entre a eficiência de preenchimento, das técnicas de fundição, um massalote foi feito com cera de utilidades vermelhas (Figura 46c). Em todos os testes, que tiveram o sistema de massalote, o peso da cera vermelha utilizada foi o mesmo peso da cera do teste (seja espiral ou grade), isso foi necessário, para garantir que uma pressão hidrostática seja gerada, para empurrar o metal para dentro do molde.

Densidade da liga: Para poder comparar os testes realizados é necessário calcular o volume de metal preenchido, para isso é necessário calcular a densidade de cada liga:

- Para AG 925:

$$\rho_{925} = 0,925\rho_{Ag} + 0,075\rho_{Cu}$$

$$\rho_{925} = 0,925 (10,5) + 0,075 (8,95)$$

$$\rho_{925} = 10,384 \text{ g/cm}^3$$

- Para AG 725:

$$\rho_{725} = 0,725\rho_{\text{Ag}} + 0,275\rho_{\text{Cu}}$$

$$\rho_{725} = 0,725 (10,5) + 0,275 (8,95)$$

$$\rho_{725} = 10,073 \text{ g/cm}^3$$

5 RESULTADOS

5.1 TESTE DE FLUIDEZ

5.1.1 PRATA 925

Para comparar cada teste realizado foram pesados todos os modelos fundidos, e dividiu-se a massa pela densidade da liga que é $10,384 \text{ g/cm}^3$. Todos os testes foram realizados com o ciclo de calcinação 1 e o revestimento *Silk da SRS*, todos os testes seguiram o procedimento descrito no item 4.3

Teste da espiral:

Na tabela 6 são apresentados os resultados dos testes realizados com o modelo espiral visto na Figura 66b. Na Figura 68 também é possível comparar o resultados dos testes descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos testes de espiral em Prata 925

	Mecanismo de preenchimento	Massa (g)	Volume (cm^3)	Percentual
1	Massalote	4,3	0,4141	67,2%
2	Massalote e Vácuo	6,4	0,6163	100%
3	Vácuo	6,4	0,6163	100%
4	Sem nada	3,9	0,3756	60,9%

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 68 - a) Teste AG 925 com massalote; b) Teste AG 925 com vácuo; c) Teste AG 925 sem nada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Ao analisar os dados da Tabela 4, é possível perceber que os testes que obtiveram os melhores resultados, são aqueles que utilizaram o sistema de vácuo (2 e 3), tiveram

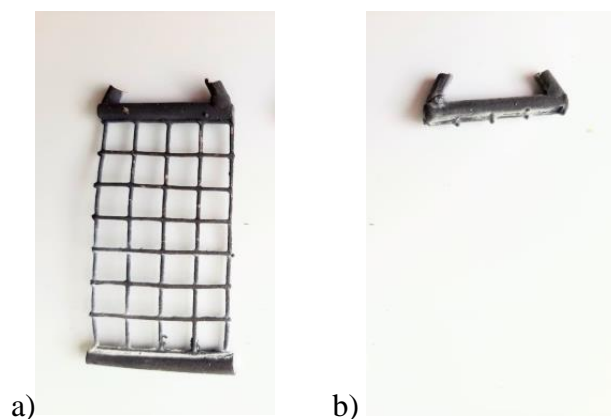
exatamente o mesmo preenchimento. Com o teste 3 (com vácuo) e o teste 2 (massalote + vácuo), é possível concluir que ao utilizar o sistema de vácuo, se torna desnecessário a utilização de massalote pois a pressão negativa gerada na cavidade do molde, pelo vácuo, já é o suficiente para forçar o seu preenchimento, diante disso a pressão hidrostática do massalote é irrelevante. Dessa forma, nos demais teste não serão utilizados massalote + vácuo. Já no teste 1, em que somente havia o massalote, não houve preenchimento total, ou seja, o vácuo tem eficiência maior que o massalote. Ao comparar o teste 4, em que não havia nem massalote e nem vácuo, foi o que teve pior resultado. Ao comparar o teste 4 (sem nada) e o teste 1 (com massalote), o teste com massalote teve maior eficiência de preenchimento, como pode ser visto na Figura 68a com massalote e Figura 68c sem nada.

O resultado do teste 2 e 3, será considerado como preenchimento total e o volume total, será utilizado como padrão para os demais testes a seguir.

Teste da grade:

Na Figura 69a o teste foi realizado sob o sistema de vácuo, como é possível perceber ele foi completamente preenchido sem falhas, já o teste da Figura 69b foi realizado com massalote, e só foi preenchida a base da grade, a região mais fina de 0,6mm de espessura não teve nenhum preenchimento.

Figura 69 - a) A imagem mostra o teste de grade com prata 925 com vácuo; b) A imagem mostra o teste de grade com prata 925 com massalote.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Neste teste, foi possível perceber que sem um sistema de vácuo, as peças por serem muito finas e delicadas não foram preenchidas. Como o teste com massalote não teve

preenchimento, não havia a necessidade de fazer um novo teste sem massalote, pois este também não teria preenchimento.

5.1.2 PRATA 725

Para comparar cada teste realizado foram pesados todos os modelos fundidos, e dividiu-se a massa pela densidade da liga que é $10,073 \text{ g/cm}^3$. Foi utilizado o ciclo de calcinação 1 e os revestimento *Silk da SRS*.

Teste da espiral

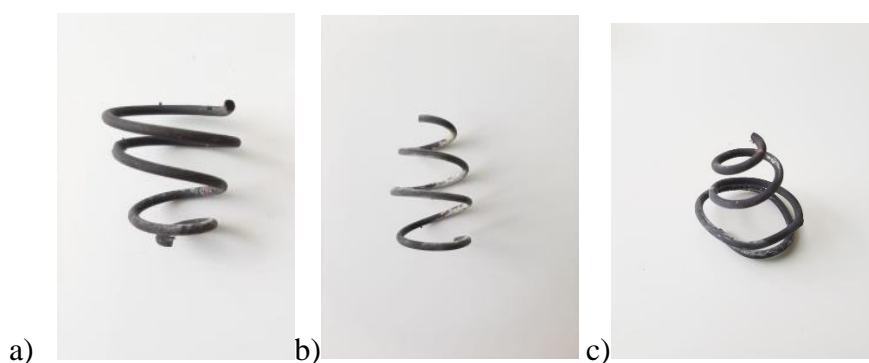
Na Tabela 5 são mostrados os resultados dos testes com prata 725, que foram comparados aos testes com prata 725. Na Figura 70 é possível ver o resultado dos testes.

Tabela 5 - Resultados dos testes de espiral em Prata 725

	Mecanismo de preenchimento	Massa (g)	Volume (cm^3)	Percentual comparado com AG 925
5	massalote	6,1	0,6022	97,7%
6	Vácuo	6,2	0,6155	99,9% ~ 100%
7	Sem nada	6,0	0,5956	96,6%

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 70 - a) A Imagem mostra o teste da espiral com prata 725 com sistema de vácuo
b) A imagem mostra o teste da espiral com prata 725 sem nada; c) A imagem mostra o teste da espiral com prata 725 com massalote.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

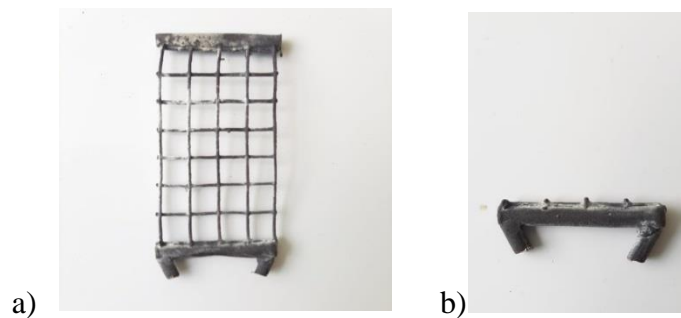
Ao analisar os dados da tabela 7, é possível notar que tanto o teste 6 (com o vácuo) e o teste 7 (sem nada) tiveram resultados muito próximo entre si. Além disso, o teste 5 (com

massalote) teve preenchimento próximo de 100%. Ao comparar o teste 4 (sem nada, AG 925) e o teste 7 (sem nada, AG 725), a liga de prata 725 teve um resultado melhor do que a prata 92, sob as mesmas condições. Como a liga de prata 725 está no ponto eutético do diagrama de fases, como visto na Figura 3, essa liga não tem intervalo de solidificação, assim as ligas eutéticas tendem a ter maior fluidez, e são mais utilizadas na fundição como foi discutido no item 3.7.

Teste da grade:

Na Figura 71a é possível ver o resultado do teste de grade da liga AG 725 com vácuo e na Figura 71b o resultado sem vácuo, o teste com vácuo foi completamente preenchida como no teste de grade com AG 925 e o teste sem vácuo não teve preenchimento.

Figura 71 - A imagem mostra o resultado do teste de grade com a liga AG 725



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Ao analisar o teste, é possível perceber que mesmo a liga de prata 725, tendo maior fluidez não é o bastante para preencher o teste grade que é mais preciso, apenas sob vácuo é possível preencher o teste independente da liga de prata. Como foi descrito no item 3.6, os modelos de grade sugeridos por Kliauga, Ferrante (2009); Carter (2004), para o teste de fluidez também utilizaram vácuo para preencher os modelos de grade.

5.1.3 COMPARAÇÃO DOS TESTES DE FLUIDEZ

Foram utilizados 2 tipos de ligas: Prata 925 e Prata 725. Para comparar, a eficiência de preenchimento, de cada liga foi utilizado 2 tipos de moldes de cera diferentes: espiral e grade. O modelo espiral, é um teste de fluidez para cada liga em condições específicas e o modelo de grade é um teste de precisão e detalhe com espessura de 0,6mm que tenta simular joias mais complexas. Foram utilizadas 4 condições diferentes: vácuo, massalote, vácuo + massalote, sem nada. Com os testes prontos, estes foram pesados e sua massa foi dividida pela densidade de cada liga, encontra-se assim, o volume preenchido. Os resultados gerados pelos testes foram colocados nas tabelas 6 e 7 para ser feita a comparação entre as ligas.

Tabela 6 - Resultados de todos os 7 testes de espiral

	Liga	Mecanismo de preenchimento	Massa (g)	Volume (cm ³)	Percentual
1	AG 925	Massalote	4,3	0,4141	67,2%
2	AG 925	Massalote e Vácuo	6,4	0,6163	100%
3	AG 925	Vácuo	6,4	0,6163	100%
4	AG 925	Sem nada	3,9	0,3756	60,9%
5	AG 725	Massalote	6,1	0,6022	97,7%
6	AG 725	Vácuo	6,2	0,6155	99,9% ~ 100%
7	AG 725	Sem nada	6,0	0,5956	96,6%

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 7 - Resultados de todos os testes da grade

	Liga	Mecanismo de preenchimento	Resultado
8	AG 925	Vácuo	Preenchimento completo
9	AG 925	Massalote	Sem preenchimento
10	AG 725	Vácuo	Preenchimento completo
11	AG 725	Massalote	Sem preenchimento

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Ao analisar a tabela 6, é possível concluir que os melhores resultados com as ligas de prata, foram alcançados pelo mecanismo de preenchimento com vácuo, nos testes 2, 3, 6. Isso ocorre porque o vácuo aplicado abaixo do tubo, gera uma pressão negativa que força a entrada do metal no molde, aumenta-se a velocidade do fluxo de metal líquido, antes deste começar a se solidificar dentro do molde, pelos resultados não há dúvidas de que o sistema de vácuo é mais eficiente, no preenchimento, que o sistema com massalote, que gera uma pressão hidrostática positiva na parte superior do molde. Os testes com a grade 8 e 10, da tabela 7, confirmam as conclusões anteriores, somente com o sistema de vácuo foi possível preencher a grade, que tem 0,6mm de espessura, ou seja, para que haja preenchimento de moldes de joias, com designer mais complexo e delicado, é necessário à aplicação de um sistema de vácuo adequado ao tamanho do molde utilizado.

Nos testes 1 e 4 (tabela 6) com Prata 925, pode-se observar que o massalote é mais eficiente no preenchimento, do que não utilizar nenhum mecanismo como no teste 4, porém, mesmo que o massalote seja mais eficiente, no preenchimento, não é o bastante para a produção de joias, pois limita o designer da peça, como pode ser observado também no teste 9 da grade (tabela 7), em que não houve preenchimento da grade de 0,6mm de espessura, com o mecanismo do massalote. Além disso, o massalote necessita adicionar mais metal, que tem alto custo, no processo de fundição.

Para fazer uma comparação mais direta, entre as ligas de Prata 925 e 725 observa-se os testes 4 e 7 (tabela 7), ambos os testes não utilizam nem o sistema de vácuo nem o massalote, com a liga AG 725 o preenchimento foi aproximadamente 36% maior do que na liga AG 925, isso mostra que a liga AG 725 tem maior fluidez que a liga AG 925. Além disso a composição de 72,5% de prata e 7,5% de cobre está localizada no ponto eutético do diagrama de fases (Figura 4), como foi descrito por Kliauga, Ferrante (2009), no item 3.3, a liga eutica não tem intervalo de solidificação, como na liga AG 925, e fundi à um temperatura mais baixa, em 779°C (temperatura do ponto eutético). Enquanto a liga AG 925, fundi a uma temperatura de 930°C e logo abaixo dessa temperatura, ocorre formação de fase α sólida, junto com a fase líquida (intervalo de solidificação).

Sendo assim possui menor temperatura de solidificação, e não apresenta intervalo de solidificação, passa-se diretamente do estado líquido para o sólido, permite assim maior preenchimento do molde (KLIAUGA, FERRANTE, 2009; LOPEZ, 2015). Apesar disso a liga AG 725 não é utilizada na joalheria, pois com o teor maior de cobre a liga fica mais

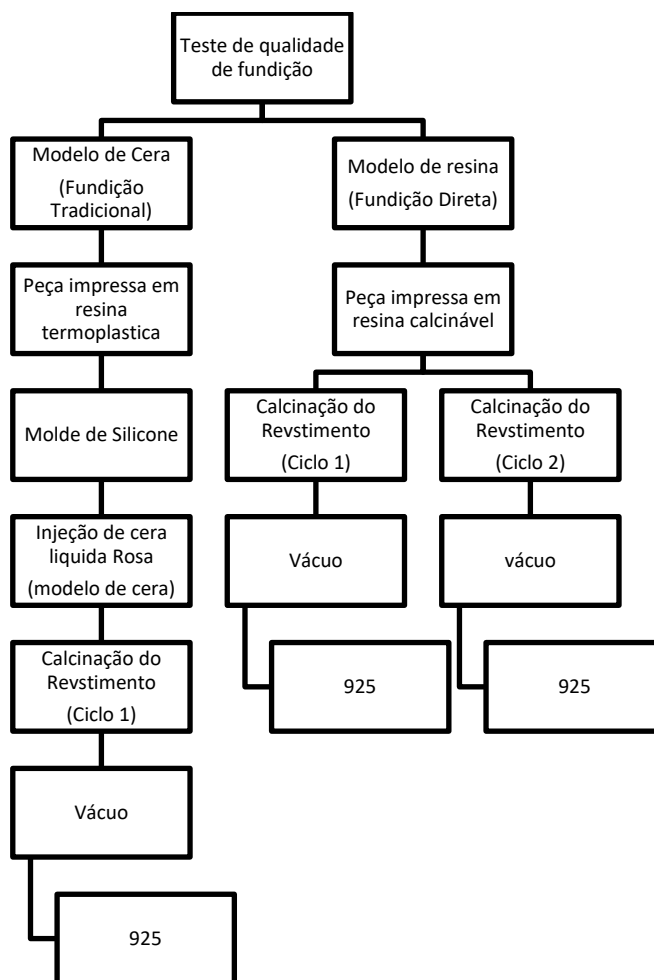
sujeita a oxidação, que não é algo desejado, essa liga de prata não tem representatividade no comércio de joias.

Com estes resultados, os próximos testes não terão massalotes e todos os testes utilizaram vácuo, para o preenchimento do molde. A liga utilizada será a de prata 925, pois é a liga mais utilizada no setor de joias.

5.2 TESTE DE QUALIDADE DE FUNDIÇÃO

No teste de qualidade de fundição, 2 modelos foram utilizados: cera e resina. Os dois modelos têm o mesmo formato, e foram impressos em uma impressora 3D, pela empresa SEGOTEC, porém são de materiais diferentes. O primeiro modelo, foi impresso em material termoplástico (resina laranja), para em seguida ser confeccionado um molde de silicone, e para fazer o modelo de cera foi injetado cera líquida rosa no molde de silicone. Em seguida, foi feita a fundição com vácuo e com a liga Ag 925. O outro modelo foi impresso em resina calcinável (resina roxa), esse material não precisa de molde de silicone e pode ser fundido de forma direta. Neste modelo foi testado 2 ciclos diferentes de calcinação: ciclo 1 e ciclo 2, sendo o segundo ciclo mais longo. Nestes 2 testes, foi utilizado o vácuo, para fazer a inclusão do metal com a liga Ag 925. O fluxograma do teste de qualidade de fundição é mostrado na Figura 72.

Figura 72 - Fluxograma do teste de qualidade de fundição.



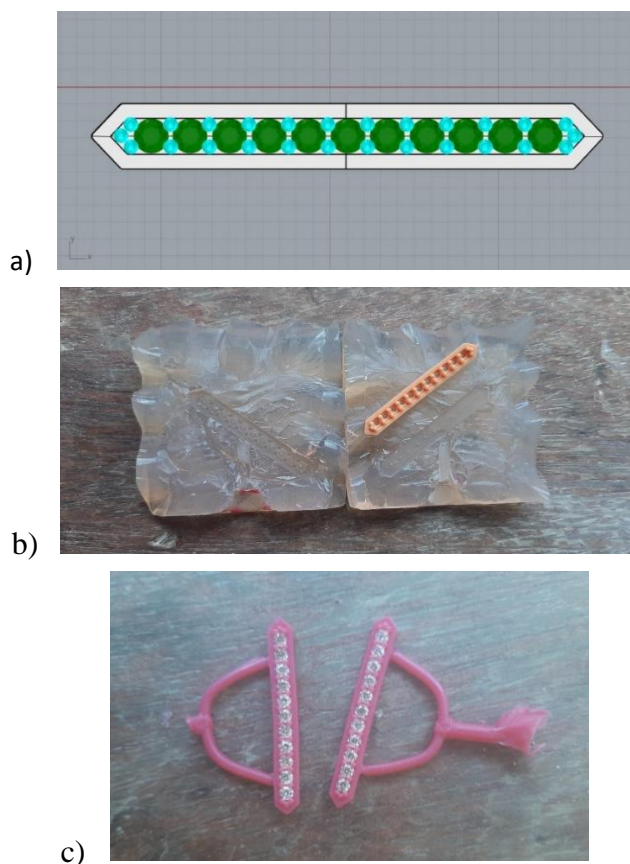
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5.2.1 MODELO DE CERA

O protótipo foi projetado no programa *Rhinoceros 3D*, como pode ser visto na Figura 73a, e foi impressa em uma impressora 3D, em resina para molde, pela empresa SEGOTEC. Após a impressão foi confeccionado molde de silicone, e injetada cera pressurizada, da mesma forma que o teste de grade e que foi descrito no item 3.9 (etapa 2 e etapa 3). A cera injetada foi a *Pink* da *Goldstar* Brasil, no modelo foi colocado zircônias, esta técnica é chamada pré-cravação em cera. O modelo impresso em resina laranja e o molde de silicone pode ser visto na Figura 73b.

Após injetar a cera no molde de silicone as Zircônias de 2mm foram colocadas no buraco e a peça foi soldada na árvore com a ajuda de um pirografo, como pode ser visto na Figura 73c.

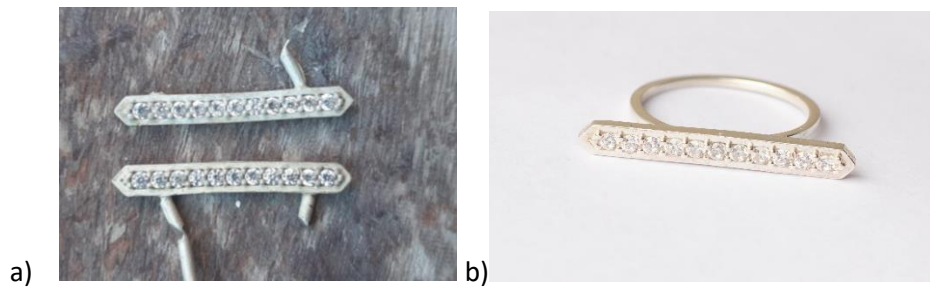
Figura 73 - a) A imagem mostra o modelo projetado no programa *Rhinoceros 3D*; b) A imagem mostra a peça impressa com o molde de silicone; c) A imagem mostra o modelo já em cera com as zircônias, que depois foi soldada na árvore.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Nos testes com o modelo utilizado foi de cera mostrado na Figura 73c, o revestimento foi o *Silk* da *SRS* e o ciclo de calcinação 1, que pode ser visto na Figura 63, que foi descrito no item 4.6, o resultado deste teste foi mostrado na Figura 74.

Figura 74 - a) A imagem mostra o modelo de cera após fundição. b) A imagem mostra um anel finalizado com o teste.



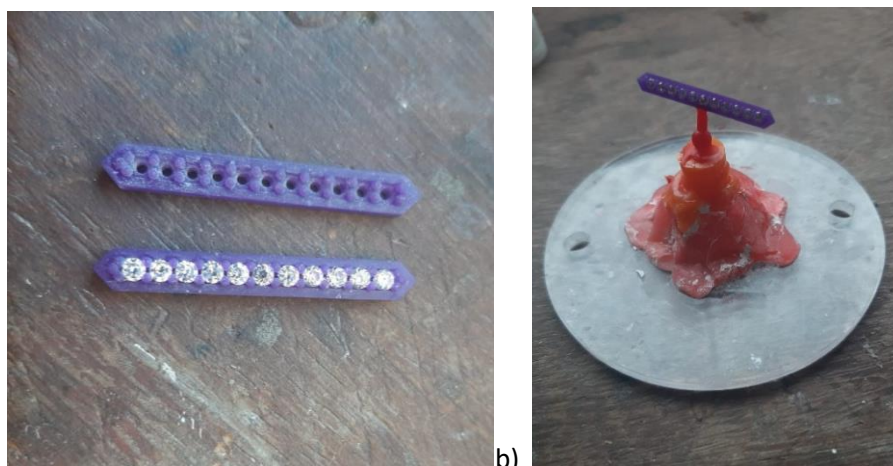
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O resultado do modelo em cera teve um bom acabamento, já que a cera não produz os resíduos que a resina de impressão produz. No item 3.12, foi discutido o mecanismo de eliminação dos resíduos da cera e da resina, na Figura 41, é possível notar que após atingir 750°C, a amostra de cera não apresentou mais nenhum resíduo, que podia causar porosidades superficiais, assim a peça fundida teve bom preenchimento e não apresentou porosidades significativas. Com a Figura 74 é possível ver a qualidade superficial da peça.

5.2.2 MODELO DE RESINA

O desenho deste modelo, utilizado para este teste, é o mesmo do modelo anterior, porém desta vez, a peça foi impressa em resina roxa calcinável, para fundição direta, pela empresa SEGOTEC. As zircônias foram colocadas diretamente na resina, e então ela foi soldada, diretamente, a árvore de fundição, como ser visto na Figura 75.

Figura 75 - a) A imagem mostra o modelo imprimido em resina roxa de fundição direta.
b) A imagem mostra a árvore de fundição montada para terceira sequência de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

No primeiro teste, o ciclo de calcinação 1 foi utilizado, o ciclo chega à temperatura máxima de 730°C, e permanece nessa temperatura por 2 horas, o tempo total do ciclo é de 6,5 horas, o ciclo foi descrito no item 4.6 e pode ser visto na Figura 63. O revestimento usado para o teste foi o *Silk* da *SRS*. O procedimento para preparo do revestimento foi o mesmo dos testes anteriores. O resultado do teste pode ser visto na Figura 76.

Figura 76: A imagem mostra o resultado do teste 1 com resina para fundição.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O resultado do teste apresentou grande quantidade de porosidade, semelhantes as porosidades apresentadas na Figura 42. Segundo McKeer (2007), a principal diferença entre a fundição tradicional e a fundição direta, está no trabalho de eliminar os resíduos da resina deixado no revestimento, como foi descrito no item 3.12. Como os resíduos da resina são eliminados lentamente, é necessário aumentar o tempo de permanência a 730°C por mais tempo, como foi demonstrado por McKeer (2007), na Figura 43, onde o houve redução de porosidade com o aumento do ciclo de calcinação.

No segundo teste foi utilizado mesmo modelo e o mesmo revestimento do teste anterior, porém foi utilizado o ciclo de calcinação 2, neste ciclo a temperatura máxima também é de 730°C, e permanece nessa temperatura por 5 horas, o tempo total é de 9,5 horas para conclusão do ciclo, que é mais longo que o ciclo 1, o ciclo foi descrito no item 4.6 e pode ser visto na Figura 64. O resultado do segundo teste, com o ciclo de calcinação 2, pode ser visto na Figura 77.

Figura 77 - A imagem mostra o resultado do teste 2 com resina calcinável, com a utilização do ciclo de calcinação 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O resultado deste teste (ciclo 2) apresentou menos porosidade que o teste anterior (ciclo 1), pois houver uma eliminação mais eficiente dos resíduos da resina, devido ao tempo maior de permanência a 730°C, como havia sido descrito por McKeer (2007), no item 3.12.

Porém a peça fundida, ainda apresentou uma pequena quantidade de porosidade, no lado direito. Neste teste as zircônias não foram colocadas para facilitar a visualização das porosidades, porém elas não afetam a qualidade final da peça.

Uma forma de melhorar o acabamento superficial dessa peça, seria mudar o revestimento, para um mais adequado para fundição direta, que tem custo muito maior. Também é possível, fazer um ciclo de calcinação mais longo, o que aumenta o custo de energia. A outra opção, seria alterar a resina para uma que produza menos resíduos, porém essas resinas são importadas e podem custar milhares de dólares, por isso, na fundição direta com resina de impressão 3D, é importante levar em conta o custo x benefício do processo.

5.2.3 COMPARAÇÃO DOS TESTES DE QUALIDADE DE FUNDIÇÃO

Os resultados obtidos nos testes mostram, que o modelo de cera teve menos porosidades que os modelos de resina, nos testes com fundição direta, mas isso já era esperado pois a cera não produz os resíduos que a resina calcinável (resina roxa) produz.

Entre os testes com modelo de resina, o teste 2 apresentou menos porosidades que o teste 1, devido o ciclo de calcinação mais longo, que deu mais tempo para que os resíduos fossem eliminados, com mais eficiência, como foi descrito no item 3.12

Ao comparar o resultado do modelo de cera e o teste 1, que tiveram o mesmo ciclo de calcinação, o modelo de cera teve resultado muito superior. Sendo assim o ciclo de calcinação 1 é indicado apenas para peças com cera, por ter um tempo muito curto de duração e o ciclo de calcinação 2 é indicado para fundição direta. Com isso é possível perceber que o custo para produção por fundição direta, utiliza-se a resina calcinável, é maior devido o gasto com energia. Apesar de eliminar uma etapa do processo, de confecção do molde, os custos de produção da fundição direta, são mais elevados do que a fundição com cera.

5.3 INVESTIMENTO

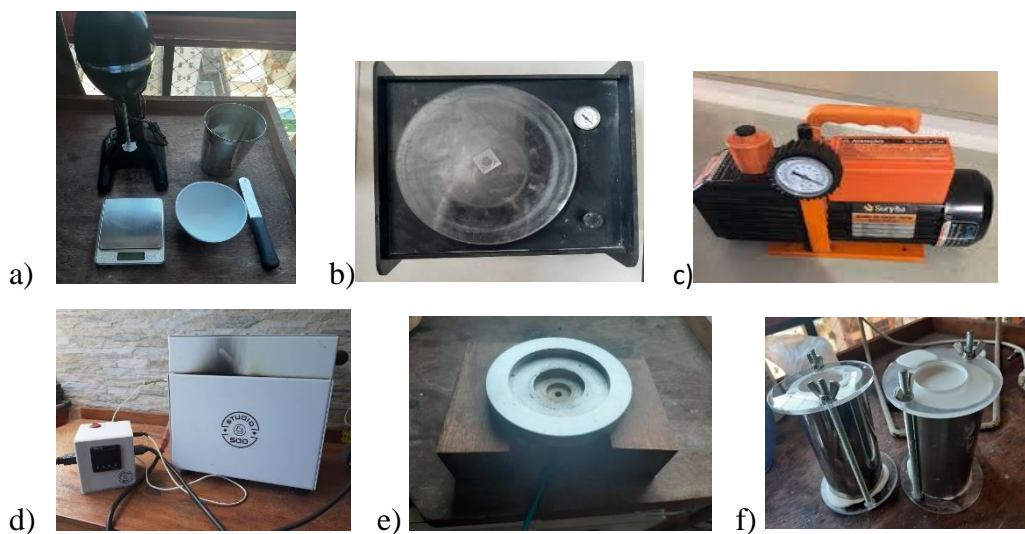
Na indústria de fabricação de joias por fundição de cera perdida, o sistema de vácuo é amplamente utilizado, porém o custo de tais equipamentos ficam entre 15 e 60 mil reais e exigem alta demanda de produção para tornar o processo viável. Para atender os ourives autônomos que possuem baixa demanda de produção, algumas empresas estão se voltando para este mercado, com sistemas de fundição menores, chamadas “fundição de bancada” ou micro fundição. O valor desses sistemas de micro fundição custa a partir de 10 mil reais. O custo para montar um sistema de fundição caseiro para este trabalho está descrito de forma aproximada na Tabela 8, os equipamentos descritos, podem ser vistos na Figura 78:

Tabela 8: Custos para montar o sistema de fundição

Equipamento	Custo
Misturador	R\$300
Câmara de vácuo	R\$500
Bomba de vácuo 12CFM	R\$1500
Forno de calcinação Studio500	R\$2200
Inclusora (base de alumínio)	R\$500
Tubo de aço inox e base de acrílico	R\$100
TOTAL: R\$5100	

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 78 - A imagem mostra o sistema de micro fundição, descrito na Tabela 8. a) Misturador. b) Câmara de vácuo. c) Bomba de vácuo 12CFM. d) Forno de calcinação Studio500. e) Inclusora (base de alumínio). f) Tubo de aço inox e base de acrílico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

6 CONCLUSÃO

Atualmente, uma estimativa aproximada diz que 60% ou mais de ouro, platina e joias de prata, no mundo são produzidas por fundição por cera perdida, com isso um estudo mais aprofundado desta técnica, como foi feita neste trabalho, é necessária.

No teste de fluidez foram utilizados 2 tipos de ligas: Prata 925, Prata 725. Para comparar a fluidez de cada liga foi utilizado 2 tipos de modelos de cera diferentes: espiral e grade (precisão). No teste da espiral, sem vácuo e massalote, a liga de Prata 725, apresentou um preenchimento 36% maior que a liga de Prata 925, sob as mesmas condições, pode-se concluir que a liga 725 tem maior fluidez que a 925. O que já era esperado, pois a liga de Prata 725 é uma liga eutética. Porém sob a ação do vácuo as duas ligas tiveram preenchimento total, ou seja, se houver a utilização do vácuo a liga não tem tanta influência.

No teste com a grade, só houve preenchimento sob a ação do vácuo nas duas ligas. Com os resultados destes testes, concluiu-se que, a utilização do vácuo na inclusão do metal, na fundição de cera perdida é essencial para fabricação de joias. Somente sob a ação do vácuo, os testes mais detalhados (de grade) podem ser preenchidos.

Nos de testes de qualidade de fundição, foram utilizadas uma peça projetada no programa *Rhinoceros 3D* e impressa em uma impressora 3D. Para os testes foram utilizados 2 modelos: cera e resina. Ao analisar os resultados dos testes, o modelo de cera, apresentou preenchimento total da peça, e não apresentou porosidades superficiais, pois a cera não produz os resíduos que a resina calcinável produz. O modelo de cera e o primeiro teste com a resina, tiveram o mesmo ciclo de calcinação (ciclo 1), porém o resultado do modelo de resina, apresentou grande quantidade de porosidades superficiais, com isso, pode-se concluir que, o ciclo de calcinação de resina não pode ser o mesmo que o ciclo de cera. Para que haja a eliminação dos resíduos da resina, é necessário permanecer a 730°C por um tempo maior.

Já o segundo teste, foi feito com a mesma resina, porém teve um ciclo mais longo (ciclo 2), assim teve resultado melhor que o primeiro teste, apresenta menos porosidades superficiais. Assim é possível concluir o ciclo de calcinação 1, que atinge à temperatura máxima de 730, °C, e permanece nessa temperatura por 2 horas, o tempo total do ciclo é de 6,5 horas e só deve ser usado em fundição com cera. Já o ciclo de calcinação 2, que

atinge a temperatura máxima também é de 730°C, e permanece nessa temperatura por 5 horas, e o tempo total é de 9,5 horas, e pode ser usado em fundição direta.

Com os resultados dos testes de qualidade da fundição, conclui-se que apesar da fundição direta, eliminar uma etapa do processo, de confecção do molde, os custos de produção da fundição direta, são mais elevados do que a fundição com cera.

REFERÊNCIAS

BATISTA, C. R. **A modelagem 3D digital de joias e o processo de prototipagem rápida**. XXI Simpósio nacional de geometria descritiva e desenho técnico. Departamento de expressão gráfica, UFSC. Florianópolis, 2008

CARTER, R. **Does Investment Permeability Impact Jewelry Castings**. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, Albuquerque: Met-Chem Research, 2004, p. 105-109. Disponível em: <http://www.santafesymposium.org/papers>. Acesso no dia 21 de setembro de 2020.

CORTI, C. **Basic Metallurgy of the Precious Metals Part 2: Development of Alloy Microstructure Through Solidification and Working**. The Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology, Albuquerque: Met-Chem Research, 2008, p.81-101 Disponível em: <http://www.santafesymposium.org/papers>. Acesso no dia 21 de setembro de 2020.

ECCLES, T. **Rapid Wax Elimination And Reaction Chemistry of Sulfate-Bonded Investment**. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, Albuquerque: Met-Chem Research, 2002, p. 157-176. Disponível em: <http://www.santafesymposium.org/papers>. Acesso no dia 21 de setembro de 2020.

FACCENDA V.; INGO G.M.; RICCUCCI C.; CHIOZZINI G.; VEROLI C. **Thermochemical and Microstructural Study of CaSO₄ Bonded Investment as a Function of the Burnout Process Parameters**. The Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology, Albuquerque: Met-Chem Research, 2000, p.147-161 Disponível em: <http://www.santafesymposium.org/papers>. Acesso no dia 21 de setembro de 2020.

FACCENDA, V. **Investment Casting: An Integrated Process**. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, Albuquerque: Met-Chem Research, 2001, p. 97-119. Disponível em: <http://www.santafesymposium.org/papers>. Acesso no dia 21 de setembro de 2020.

FRYE H.; YASREBI M.; STURGIS D. H. **Basic Ceramic Considerations for Lost Wax Processing of High Melting Alloys.** The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, Albuquerque: Met-Chem Research, 2000, p. 101-116. Disponível em: <http://www.santafesymposium.org/papers>. Acesso no dia 21 de setembro de 2020.

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações.** 2 ed. São Paulo: Editora UNICAMP, 2007

GRIMWADE, M. **Solidification and Casting.** The Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology, Albuquerque: Met-Chem Research, 2002, p. 231-254, Disponível em: <http://www.santafesymposium.org/papers>. Acesso no dia 21 de setembro de 2020.

KLIAUGA, A. M.; FERRANTE, M. **Metalurgia básica para ourives e designers: Do metal à joia.** 1 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

KOLOMEISKY, A. **Physical-Chemical Analysis of the Factors Influencing the Behavior of Flasks During Heating In the Jewelry Casting Process:** Development of the Optimal Model of Burnout Furnace. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, Albuquerque: Met-Chem Research, 2004, p.253-264, Disponível em: <http://www.santafesymposium.org/papers>. Acesso no dia 25 de setembro de 2020.

MACHADO, I. **Introdução à manufatura mecânica PMR2202:** Processos de Fundição e sinterização [material de sala de aula]. Disponível em <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/Processos%20de%20Fundição%20e%20Sinterização.pdf>. Acesso dia 19 de setembro de 2019.

MCKEER, I. **Improvements In the Burnout of Resin Patterns.** The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, Albuquerque: Met-Chem Research, 2007, p.363–376. Disponível em: <http://www.santafesymposium.org/papers>. Acesso no dia 25 de setembro de 2020.

MONTEIRO, M. T. F. **A impressão 3D no meio produtivo e o design:** Um estudo na fabricação de joias. Dissertação de Mestrado (Design). Programa de Pós-graduação em design PPGD - UEMG – Belo Horizonte 2015

RICK, C. F. **Estudo da liga à base de Zn-Al-Cu-Mg aplicada na fabricação de joias folhadas.** Dissertação de Mestrado (Engenharia e Tecnologia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia dos Materiais, PGETEMA. Porto Alegre 2006.

SANTOS, R. G. **Transformações de fases em materiais metálicos.** 1 ed. São Paulo: Editora da Unicamp, 2006.

TREEMODELS. **Impressão 3D em Alta resolução.** Disponível em: <https://www.treemodels.com.br/blog/impresao-3d-em-joias>. Acesso dia 20 de dezembro de 2020