

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**VIABILIDADE ECONÔMICA NA PRODUÇÃO DE RUBI
SINTÉTICO PELO MÉTODO DE FUSÃO A LASER PARA O
MERCADO DE JÓIAS**

GABRIEL MARCONDES DE OLIVEIRA GONZAGA

SÃO CARLOS -SP
2023

VIABILIDADE ECONÔMICA NA PRODUÇÃO DE RUBI SINTÉTICO PELO MÉTODO DE FUSÃO A LASER PARA O MERCADO DE JÓIAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Professor Doutor Marcello Rubens Barsi Andreeta

São Carlos-SP
2023



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Gabriel Marcondes de Oliveira Gonzaga

RA: 727379

TÍTULO: Viabilidade econômica na produção de rubi sintético pelo método de fusão à laser para o mercado de joias

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Marcello Rubens Barsi Andreetta

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 25/08/2023, 13h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Marcello Rubens Barsi Andreetta	9,3	9,5
Prof. Dr. Rodolfo Foster Klein Gunnewiek	9,3	9,5
Média	9,3	9,5

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Marcello Rubens Barsi Andreetta

Prof. Dr. Rodolfo Foster Klein Gunnewiek

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho aos meus pais, Maria Gabriela Marcondes de Oliveira Gonzaga e Márcio Gonzaga da Silva.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais, Maria Gabriela Marcondes de Oliveira Gonzaga e Márcio Gonzaga da Silva, por todo o esforço que tiveram para minha criação.

Agradeço ao meu professor orientador Marcello Rubens Barsi Andreeta pela oportunidade de ter contato com o método presente neste trabalho.

Agradeço a minha colega de curso e amiga Geovana de Fatima da Silva por todas as vezes que me ouviu reclamar e me ajudou a continuar.

RESUMO

O presente trabalho aborda a avaliação econômica da produção de rubis artificiais sintéticos por meio do método de fusão a laser conhecido como "Laser Heated Pedestal Growth" (LHPG), em contraste com o método tradicional de Verneuil. O método de Verneuil utiliza uma chama composta de hidrocarboneto e oxigênio para criar rubis sintéticos, enquanto o LHPG emprega um feixe de laser direcionado para fundir hastes cilíndricas de óxido de alumínio e cromo. O texto discute as propriedades do coríndon, a técnica de cristalização por zona flutuante e o mercado de gemas sintéticas, destacando a crescente demanda por alternativas sustentáveis. Os resultados experimentais mostram que o método LHPG é promissor em termos de viabilidade econômica, eficiência e qualidade do produto final, oferecendo vantagens sobre o método de Verneuil. No entanto, são necessárias investigações adicionais para otimizar o processo. O estudo conclui que o LHPG possui potencial para transformar a indústria de gemas sintéticas, impulsionando a diversificação de cores e tamanhos das gemas, embora ressalte a importância da colaboração e inovação contínuas para alcançar plenamente esse potencial.

Palavras-chave: Rubi. LHPG. Gemas sintéticas.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

This paper deals with the economic evaluation of the production of synthetic artificial rubies using the laser fusion method known as "Laser Heated Pedestal Growth" (LHPG), in contrast to the traditional Verneuil method. The Verneuil method uses a flame composed of hydrocarbon and oxygen to create synthetic rubies, while LHPG employs a directed laser beam to fuse cylindrical rods of aluminum oxide and chromium. The text discusses the properties of corundum, the floating zone crystallization technique and the synthetic gem market, highlighting the growing demand for sustainable alternatives. The experimental results show that the LHPG method is promising in terms of economic viability, efficiency and quality of the final product, offering advantages over the Verneuil method. However, further research is needed to optimize the process. The study concludes that LHPG has the potential to transform the synthetic gem industry by boosting the diversification of gem colors and sizes, although it highlights the importance of continuous collaboration and innovation to fully achieve this potential.

Keyword: Ruby. LHPG. Synthetic gem.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - a) eixo de orientação. b) Estrutura trigonal escalenoédrica pseudo-hexagonal.	4
Figura 2 - a) Bandas de valência e de condução e subnível energético causado pela impureza no meio do espaçamento entre bandas. Elétron sendo excitado por um fóton. b) Elétron decaindo primeiro para o subnível energético gerado pela impureza e depois para o subnível energético Gerado pela impureza e depois para o subnível original n abanda de valência.....	5
Figura 3 - Picos de absorção de comprimentos de luz visível para rubi e safira.....	5
Figura 4 - Esquema do equipamento LHPG.....	10
Figura 5 - Equipamento LHPG com sistema de alimentação por baixo.....	11
Figura 6 - Monocristal de rubi sendo puxado para cima.....	12
Figura 7 - Parâmetros importantes sendo monitorados e controlados pelo software durante o processo.....	12
Figura 8 - Hastes monocristalinas de rubi, produzidas pelo método LHPG.....	13

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA/PRESSUPOSTOS TEÓRICOS/REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 CORÍNDON, PROPRIEDADES E CORES	3
2.2 CRISTALIZAÇÃO POR ZONA FLUTUANTE	6
2.3 MERCADO E DEMANDAS	6
3.1 OBTENÇÃO DAS HASTES NÃO SINTERIZADAS.	9
3.2 LASER HEATED PEDESTAL GROWTH (LHPG).	9
4 RESULTADOS	13
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	13
4.2 ESTIMATIVA DA VIABILIDADE ECONÔMICA	13
4.2.1 Estimativa Da Viabilidade Econômica Do Método De Verneuil	14
4.2.2 Estimativa Da Viabilidade Econômica Do Método De Lhpg	14
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	17
6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
REFERÊNCIAS	20

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa realizar uma avaliação de custo econômico referente à fabricação de rubis artificiais sintéticos, utilizando um método até então não abordado no âmbito do mercado de joias.

Na atualidade, a produção de rubis sintéticos através do processo de fusão é predominantemente conduzida mediante a utilização do método de Verneuil. Concebido por Auguste Verneuil em 1890, esse método se fundamenta na geração de uma chama composta por hidrocarboneto e oxigênio, direcionada para uma pilha de alumina em pó até que um estrato cristalino se forme na parte superior. Subsequentemente, partículas de pó de alumina são introduzidas nas chamas, as quais se fundem em estado líquido. As microgotículas de alumina fundidas precipitam sobre o estrato cristalino, incorporando-se com este último e promovendo o crescimento do cristal (HARRIS, 2009). Como resultado intermediário, obtém-se um volume caracterizado por múltiplos monocristais de dimensões significativas, translúcidos, situados na porção superior, enquanto que uma porção inferior é constituída por material policristalino opaco.

A etapa seguinte demanda a remoção do material policristalino e a subsequente realização de procedimentos de quebra e lapidação no volume composto por monocristais, visando à viabilização da utilização destes últimos. É relevante assinalar que o método de Verneuil carece de uma uniformidade no resultado final do produto, além de apresentar inerentes riscos associados à manipulação do gás hidrocarboneto-oxigênio, que podem culminar em situações potencialmente perigosas, como explosões.

Consequentemente, visando mitigar possíveis riscos inerentes e minimizar o potencial desperdício de recursos, a síntese de monocristais por meio do método de zona flutuante emerge como uma perspectiva alternativa. Além de conferir um grau aumentado de segurança devido à ausência de gases em sua operação, esse método revela o potencial de introduzir, ao segmento de joias, novas configurações geométricas para as gemas, bem como inovadores projetos e designs para os produtos finais em questão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA/PRESSUPOSTOS TEÓRICOS/REVISÃO DE LITERATURA

A compreensão do processo de síntese de rubi por meio do método de zona flutuante requer uma explanação abrangente de diversos aspectos. Inicialmente, é imprescindível abordar o conceito e as características do coríndon, além de elucidar o mecanismo de crescimento cristalino por meio da técnica de zona flutuante. Adicionalmente, é essencial contextualizar a situação vigente no mercado, bem como a demanda por rubis sintéticos.

2.1 CORÍNDON, PROPRIEDADES E CORES

O coríndon é um cristal composto por óxido de alumínio, cuja estrutura cristalina é caracterizada como trigonal escalenoédrica pseudo-hexagonal como sistematizado na Figura 1 (REPOSITÓRIO DA UFRGS, 2021). Sua notável dureza é avaliada em 9 na escala de Mohs, evidenciando sua resistência, apresentando uma densidade considerável de 4.05 g/cm^3 . É um material com alta refração, possuindo uma temperatura de fusão de $2054 \text{ }^\circ\text{C}$ (ICSC 0351 - OXIDO DE ALUMINIO, 2000).

Este mineral em seu estado puro é incolor, porém possui a capacidade de manifestar uma variedade de colorações, atribuídas às impurezas presentes em sua estrutura. Destacam-se dentre essas variações cromáticas o rubi, cujas tonalidades se assemelham ao espectro entre o roxo e o vermelho, e a safira, que exibe nuances próximas ao azul e ao verde. Porém é possível possuir outras colorações como laranja, amarelo, cinza, rosa, marrom e branco (MUSEU HEINZ EBERT, 2023).

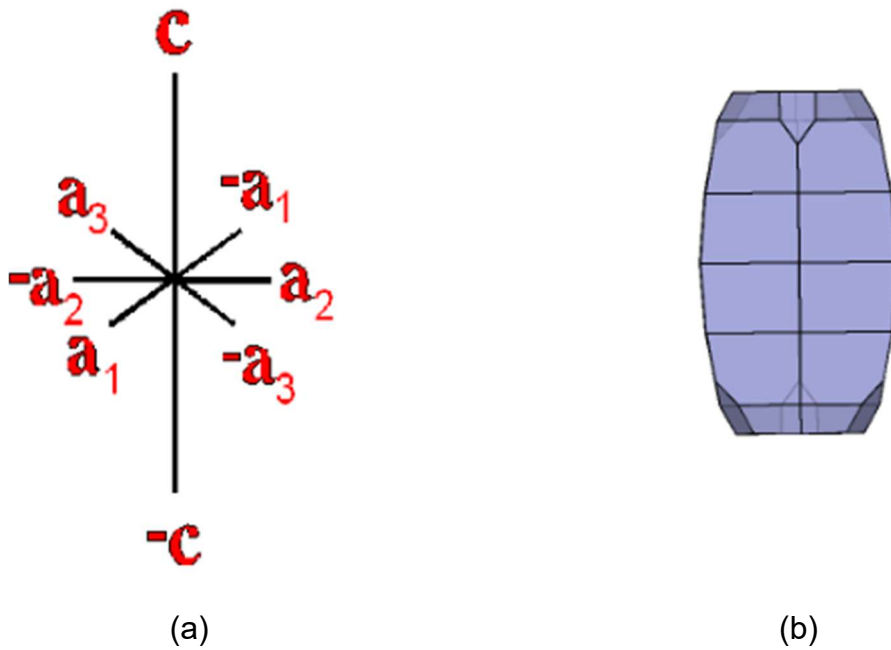


Figura 1 - a) eixo de orientação. b) Estrutura trigonal escalenoédrica pseudo-hexagonal.

Fontes: WEBMINERAL, 2021 e MUSEU HEINZ EBERT, 2023.

Enquanto material isolante elétrico, os monocristais de coríndon se caracterizam por sua transparência e coloração incolor. A manifestação de cores distintas, quando presente, emerge como resultado da absorção seletiva de comprimentos de onda luminosa. A coloração observada, portanto, decorre da transmissão dos comprimentos de onda específicos, influenciada pelas impurezas intrínsecas do material. Essas impurezas introduzem níveis eletrônicos entre a banda de valência e a banda de condução (Figura 2), resultando na absorção de picos particulares da luz visível como é possível observar na Figura 3 (CALLISTER, 2002).

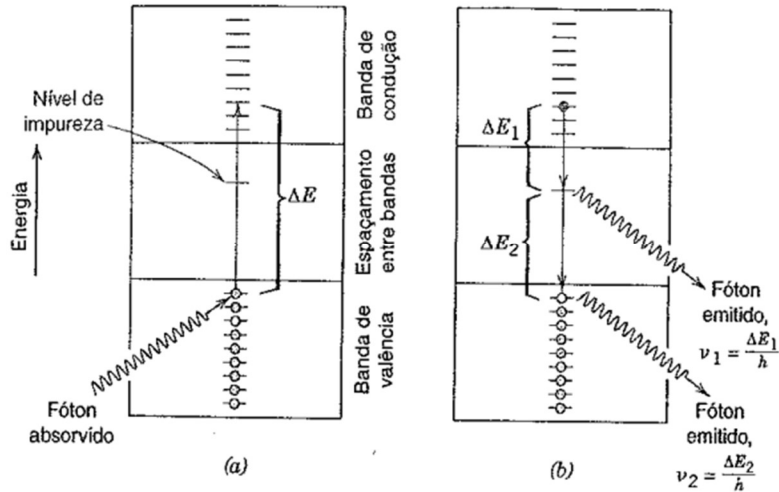


Figura 2 - a) Bandas de valência e de condução e subnível energético causado pela impureza no meio do espaçamento entre bandas. Elétron sendo excitado por um fóton. b) Elétron decaindo primeiro para o subnível energético gerado pela impureza e depois para o subnível energético gerado pela impureza e depois para o subnível original na banda de valência.

Fonte: CALLISTER, 2002.

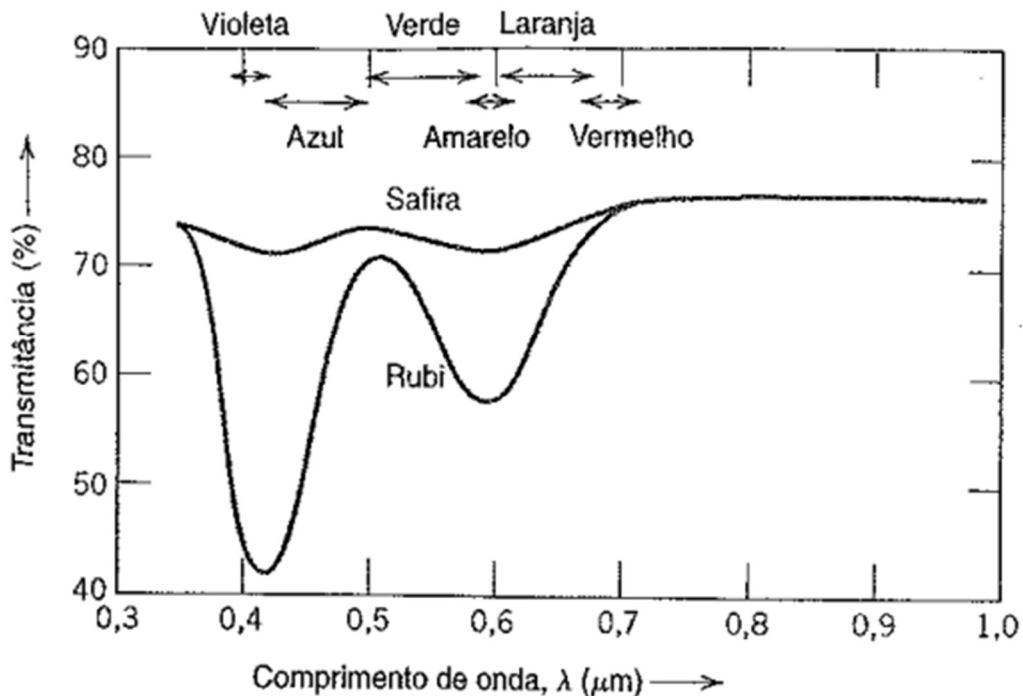


Figura 3 - Picos de absorção de comprimentos de luz visível para rubi e safira.

Fonte: CALLISTER, 2002.

2.2 CRISTALIZAÇÃO POR ZONA FLUTUANTE

A técnica conhecida como zona flutuante (FZ) constitui um método de crescimento cristalino que não utiliza de um cadinho, caracterizando-se por sua singularidade. No processo de crescimento por zona flutuante, a região fundida é delimitada e mantida entre duas hastas sólidas verticais, essencialmente através da atuação de sua própria tensão superficial. O cultivo de um único cristal se materializa mediante a inserção de um cristal de semente na extremidade da zona fundida, a qual é então progressivamente deslocada em direção à fonte de alimentação.

O atributo preponderante da técnica de zona flutuante reside na ausência de um recipiente convencional refratário, um aspecto que mitigará a contaminação proveniente do material do cadinho e reduzirá a formação de defeitos no cristal que podem ser ocasionados pela interação entre o cristal em crescimento e o recipiente.

Apesar de suas vantagens, é relevante mencionar que a aplicação industrial da técnica de zona flutuante é sujeita a limitações, uma vez que o diâmetro máximo da amostra produzida é inerentemente restrito. Essa limitação é imposta pelas desafiantes exigências da manutenção de uma zona fundida estável. Geralmente, a altura máxima da zona fundida é restringida a alguns poucos milímetros, um parâmetro que é determinado pela relação intrínseca entre a tensão superficial e a densidade do material em estado fundido (MÜLLER; FRIEDRICH, 2005).

2.3 MERCADO E DEMANDAS

O segmento do mercado de rubi sintético, tanto a nível nacional no Brasil como em escala global, se encontra em uma fase de crescimento notório. Esse avanço é substancialmente alimentado pelo desejo crescente por alternativas que atendam aos princípios da sustentabilidade e da ética no contexto da indústria de jóias. É digno de menção o fato de que marcas proeminentes, a exemplo da Pandora, já estão adotando gemas sintéticas em suas coleções, evidenciando um movimento tangível em direção à adoção de práticas sócio-ambientalmente responsáveis.

A Pandora, uma das principais produtoras globais de jóias, comunicou no dia 4 de Maio de 2021 sua decisão de abandonar a utilização de diamantes naturais em

suas criações. Tal determinação coincide com um momento no qual a preocupação com a sustentabilidade e a proveniência ética das gemas ganhou proeminência como uma prioridade entre os consumidores. O CEO da Pandora, Alexander Lacik, sustenta que a adoção de diamantes de laboratório (sintéticos) reflete o futuro sustentável da indústria joalheira (NEWSDETAIL, 2021).

De acordo com um relatório emitido pela Grand View Research (GRANDVIEWRESEARCH, 2023), a perspectiva do mercado global de coríndon, que engloba a gema natural conhecida como rubi, é caracterizada por uma trajetória de notável crescimento até o ano de 2028. A demanda por rubis sintéticos, em virtude de suas similaridades com gemas naturais e sua acessibilidade financeira, continua a experimentar uma ascensão contínua. Tal movimentação é impulsionada, primordialmente, pela expansão da indústria joalheira e pelo incremento da procura por gemas de elevada qualidade.

Outro estudo, conduzido pela Coherent Market Insights (COHERENTMARKETINSIGHTS, 2022), revelou um cenário análogo no mercado global de safira sintética, no qual o rubi está incluído. A safira sintética, uma alternativa ao rubi natural produzida em laboratório, também registra uma trajetória ascendente. O incremento da demanda por safira sintética no contexto da fabricação de dispositivos eletrônicos e smartphones emerge como um fator preponderante para o crescimento desse mercado. Adicionalmente, a contínua procura por jóias e relógios de luxo exerce uma contribuição substancial para a expansão do mercado de safira sintética.

O mercado de rubi sintético no contexto brasileiro tem exibido perspectivas promissoras nos anos recentes. No cenário de uma demanda crescente por artigos joalheiros e uma crescente atenção às questões de sustentabilidade, as pedras sintéticas têm emergido como uma alternativa atrativa para muitos consumidores.

De acordo com dados advindos da Associação Brasileira de Joalheria e Relógios (ABRJ), o mercado de joias no Brasil experimentou um incremento de 12% em seu desempenho no ano de 2019. Tal progressão é impulsionada pelo aumento do poder aquisitivo da classe média e pelo reforço da cultura do consumo de joias no país.

Segundo análises fornecidas pela consultoria Mordor Intelligence (MORDORINTELLIGENCE, 2022), projeta-se que o mercado global de pedras

sintéticas apresente uma expansão a uma taxa anual de 7%, até o ano de 2025. No que concerne ao Brasil, antevê-se que esse crescimento possa ser ainda mais acentuado, resultante do aumento da procura por produtos de cunho sustentável e da ampliação do potencial de crescimento do mercado de joias em território nacional.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A abordagem metodológica empregada no âmbito deste presente estudo origina-se da aplicação de hastes cilíndricas em estado verde, cuja composição e procedimento de obtenção serão elucidados em fases subsequentes, no contexto do LHPG (do inglês "Laser Heated Pedestal Growth"), visando a obtenção de hastes cilíndricas monocristalinas de coríndon, os rubis sintéticos.

3.1 OBTENÇÃO DAS HASTES NÃO SINTERIZADAS.

Inicialmente, procede-se à homogeneização dos óxidos em forma de pó disponíveis comercialmente. 99.5% de óxido de alumínio e 0.5% de óxido de cromo.

Com o propósito de conferir à mistura uma plasticidade apropriada, procedemos à sua incorporação em um moinho de bolas de alumina, empregando uma solução aquosa de poliacetato de vinila (PVA) em uma proporção de 0,1 gramas por mililitro (GARCIA. IBANEZ. ANGUREL. COSTA. FUENTE, 2020). A adição do PVA desempenha a função de agente plastificante, visando a geração de uma pasta dotada de uma consistência plástica, com vistas a facilitar a etapa subsequente de extrusão.

A pasta obtida é, então, introduzida e impulsionada por meio de um tubo cilíndrico confeccionado em aço inoxidável, possuindo 9 centímetros de extensão e 2 milímetros de diâmetro. Este processo é conduzido por intermédio de uma prensa manual (ANDREETA. ANDREETA. HERNANDES, 2002) Esta sequência de etapas tem por escopo alcançar a formação das hastes cilíndricas a verde.

As dimensões inerentes às hastes, tanto no que concerne ao comprimento quanto ao diâmetro, possuem uma relação intrínseca com as características dimensionais almejadas para a peça definitiva que se pretende sintetizar, estabelecendo, portanto, um elo direto entre a geometria das hastes em estado verde e a configuração alvo da peça final.

3.2 LASER HEATED PEDESTAL GROWTH (LHPG).

Uma vez que as hastes a verde tenham sido devidamente preparadas, torna-se possível incorporá-las ao sistema de alimentação do equipamento, efetuando assim o início do processo de síntese da gema artificial. No entanto, é de crucial

importância uma análise mais minuciosa das especificações do equipamento empregado no método LHPG, bem como uma delimitação das suas operações fundamentais.

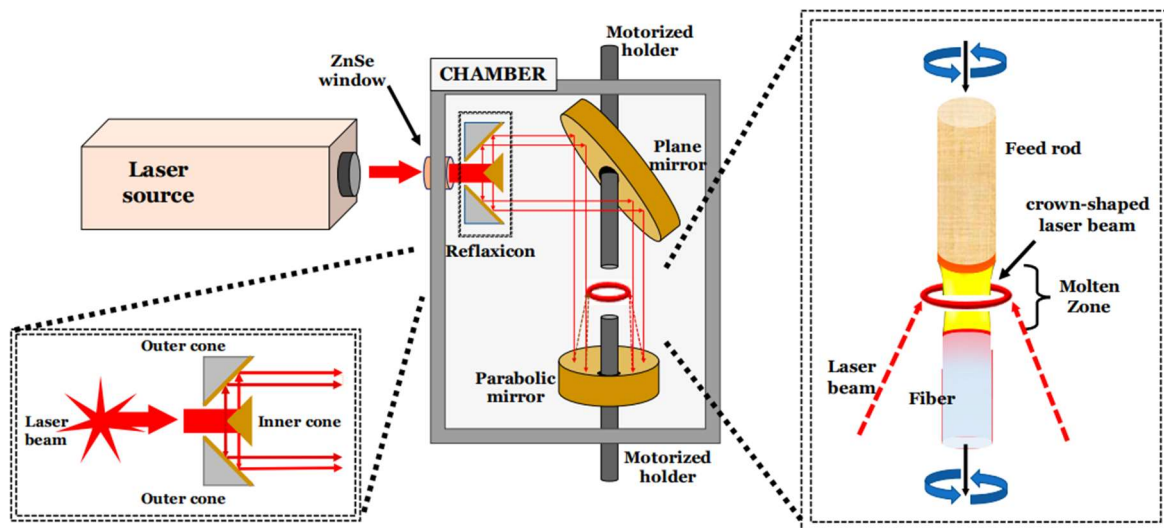


Figura 4 - Esquema do equipamento LHPG.

Fonte: GARCIA. IBANEZ. ANGUREL. COSTA. FUENTE, 2020.

De maneira concisa, o equipamento utilizado se configura como um conjunto composto por elementos essenciais, a saber: uma fonte laser, um sistema de espelhos e um eixo vertical motorizado responsável pela condução do processo de alimentação, extração das hastes e pela imposição do movimento rotativo.

O princípio subjacente a este sistema baseia-se na aplicação de um feixe de laser controlado e direcionado, que incide sobre as hastes em estado verde, desencadeando o processo de fusão do material. O sistema de espelhos, meticulosamente dispostos, direciona e focaliza o feixe laser com precisão milimétrica, otimizando a eficiência da energia transmitida ao material em processamento, gerando a zona flutuante do mesmo. Ver Figura 4 (GARCIA. IBANEZ. ANGUREL. COSTA. FUENTE, 2020).

É adotada, nesse cenário, uma fonte de laser de dióxido de carbono com uma potência de 100 watts, o qual foi utilizado em 50% de sua capacidade, logo uma potência de 50 watts. O feixe de laser é então direcionado até atingir o primeiro espelho de configuração côncava, desempenhando a função primordial de separar o feixe incidente. Este espelho côncavo então, espalha o feixe de laser.

O feixe de laser espalhado incide sobre um espelho com uma geometria de

seção de cone que se encontra disposto de maneira que sua face esteja paralela à geratriz do primeiro espelho cônico. A resultante deste processo de separação confere ao feixe de laser uma morfologia em anel. Essa configuração direciona o feixe de laser a um segundo espelho, de característica plana, cuja função reside em orientar o feixe anular em direção a um espelho côncavo, incumbido de focalizar o feixe de laser circular, resultando em uma forma anular similar a uma coroa.



Figura 5 - Equipamento LHPG com sistema de alimentação por baixo.

O ponto focal do feixe de laser anelar delimita a região na qual o processo de fusão das hastes em estado verde é efetivado. O procedimento de alimentação do equipamento, diferente da Figura 4, se deu por baixo como visto na Figura 5. Com isto, o monocristal de rubi formado pode ser visto na parte superior do equipamento como na Figura 6.

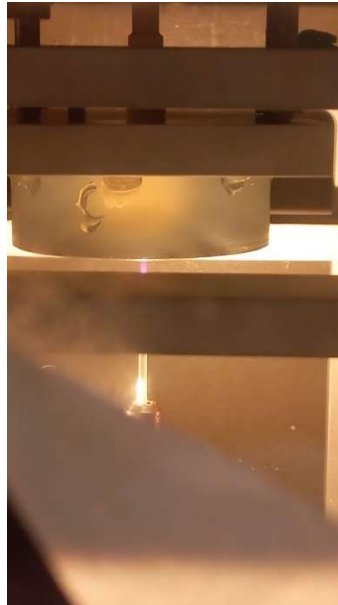


Figura 6 - Monocristal de rubi sendo extraído por cima.

Em resumo, o aparato em questão é instrumentalizado com uma fonte de laser de dióxido de carbono, seguida por uma série de elementos ópticos cuidadosamente orquestrados, culminando no processo de fusão das hastes a verde para a obtenção das hastes monocristalinas finais de coríndon. Nesse contexto, parâmetros essenciais como a potência do laser, a velocidade de alimentação, velocidade de extração altura e comprimento da zona flutuante desempenham papéis cruciais na obtenção das propriedades desejadas e na maximização da qualidade do produto final. A Figura 7 demonstra como esses parâmetros podem ser controlados durante o processo.

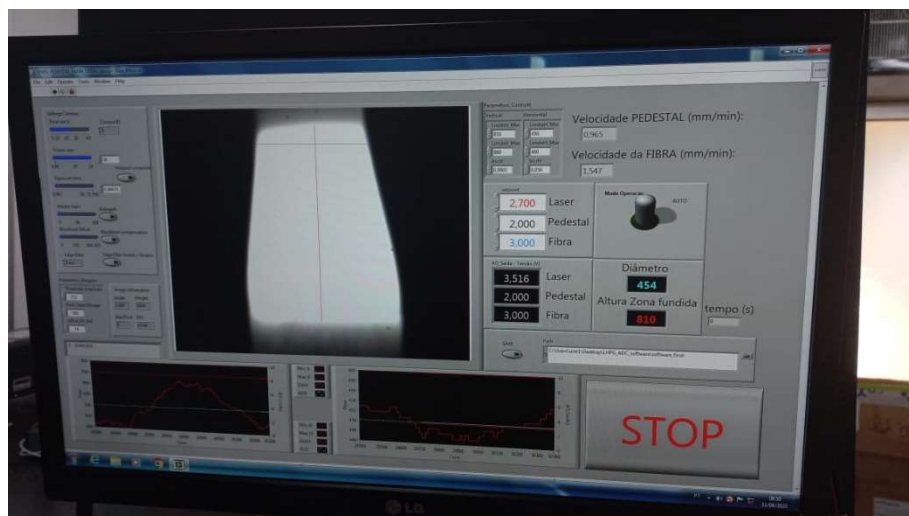


Figura 7 - Parâmetros importantes sendo monitorados e controlados pelo software durante o processo.

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após o processo de síntese, as hastes foram confeccionadas, culminando na formação de um monocristal com um diâmetro medindo 1 milímetro, expandindo-se a uma taxa de crescimento de 1,5 milímetros por minuto. A coloração ostentada pelo monocristal exibe uma notável semelhança àquela correspondente a uma onda de luz visível com comprimento de onda de 405 nanômetros.

A síntese foi feita sem o emprego de sementes para orientação do desenvolvimento cristalino. Nesse contexto, as hastes obtiveram crescimento em conformidade com o plano cristalino a , conforme visualizado na Figura 1 (a). Esse cenário induziu à formação de reentrâncias na superfície, conferindo à mesma uma textura rugosa.

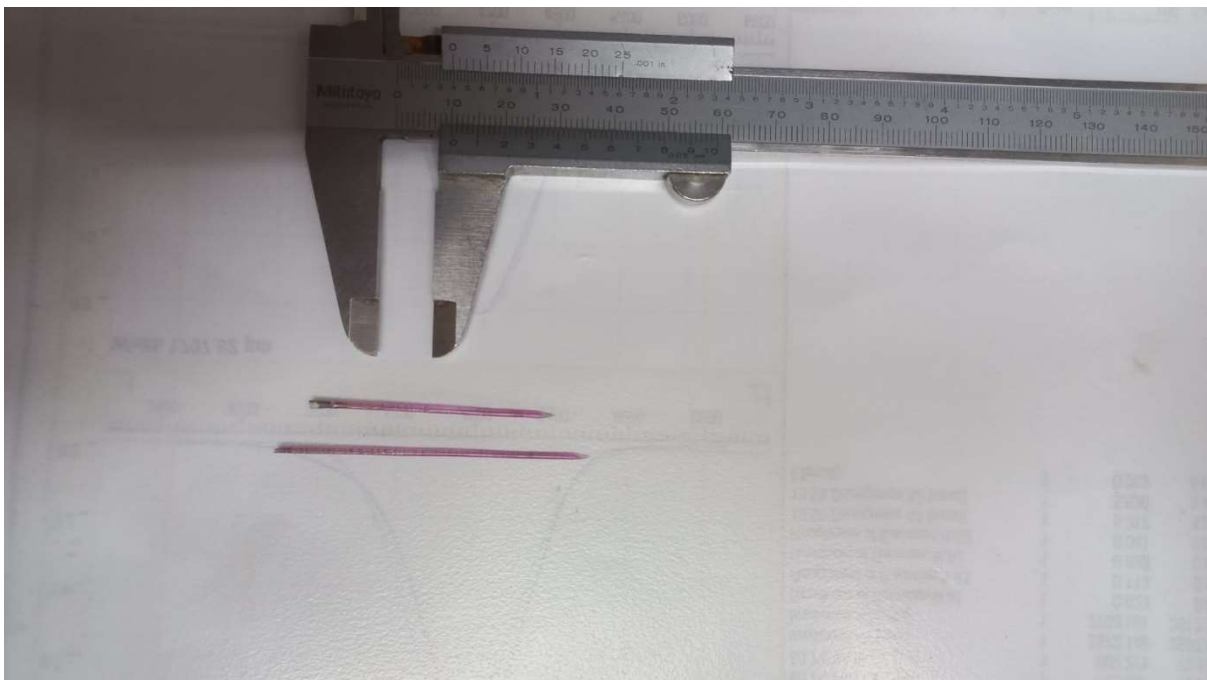


Figura 8 - Hastes monocristalinas de rubi, produzidas pelo método LHPG.

4.2 ESTIMATIVA DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a realização da análise de viabilidade econômica, é essencial proceder à avaliação de diversos custos inerentes tanto ao método de Verneuil quanto ao método LHPG.

Alguns parâmetros de custo serão empregados para fins de comparação,

incluindo o investimento no equipamento e seus combustíveis, despesas associadas à mão de obra, custos de matéria-prima e aquisição de equipamentos.

4.2.1 Estimativa Da Viabilidade Econômica Do Método De Verneuil

O método desenvolvido por Verneuil se fundamenta na fusão por chama, conseqüentemente, o primeiro fator de custo a ser submetido à análise abrange o valor do gás hidrocarboneto-oxigênio. Para simplificar as considerações, é factível estimar a utilização do gás de petróleo liquefeito (GLP). O cilindro de 216 litros, contendo 90 kg de GLP, encontra-se disponível por aproximadamente R\$1.500,00, conforme levantamento efetuado junto a distribuidoras no mês de agosto de 2023. O consumo de gás alcança a marca de 2 quilogramas por hora. Sob a premissa de uma jornada diária de trabalho de 8 horas, um cilindro é exaurido a cada 5,6 dias úteis. Estimando, então, que um equipamento de configuração simplificada, empregando o método de Verneuil, seja equipado com dois cilindros de 90 kg de GLP, resultará em um desembolso fixo semanal de aproximadamente R\$3.000,00 exclusivamente destinado ao suprimento do combustível utilizado pelo equipamento.

Outros desembolsos se vinculam a ativos suscetíveis à depreciação, ilustrativamente exemplificados por cadinhos e discos de abrasão. É altamente provável que, mensalmente, seja imprescindível adquirir uma quantidade destes elementos.

O equipamento empregado no método de Verneuil requer um espaço considerável, resultando em encargos relacionados à obtenção dos materiais para sua construção e, inclusive, despesas pertinentes ao aluguel de um espaço mais amplo. Dado o porte significativo do equipamento, uma quantidade substancial de mão de obra se faz necessária para assegurar sua operação eficaz.

4.2.2 Estimativa Da Viabilidade Econômica Do Método De Lhpg

O método LHPG baseia-se primordialmente na aplicação da fusão a laser. Uma fonte de laser de 100 watts da synrad modelo f100 com 1728 watts de entrada, por exemplo, pode ser subdividida para suportar o crescimento simultâneo de duas hastes monocristalinas, com uma taxa de cristalização que pode atingir até 3 mm por minuto. Com tais premissas, é factível calcular que em uma jornada diária de

trabalho de 8 horas, serão consumidos 13824 watts-hora de energia. Durante o transcurso de uma semana de operação, o consumo elétrico totaliza 69.12 kWh. A partir das considerações supramencionadas, tomando como base a Resolução Homologatória nº 2.313 datada de 16/11/2022, com efetividade a partir de 22/11/2022 (DME, 2023) o custo aproximado de 1 kWh é estimado em R\$0,84811. Isto posto, o gasto associado à energia elétrica necessária para alimentar a fonte de laser alcança a cifra de aproximadamente R\$58.62 por semana.

No contexto do método LHPG, o equipamento empregado é caracterizado por sua ocupação reduzida de espaço. Em decorrência disso, a maior parcela de despesa associada à montagem do equipamento recai sobre a aquisição da fonte de laser. Considerando sua configuração de tamanho diminuto ou mediano, demanda-se um contingente limitado de mão de obra para as operações de manutenção.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente, é notório por meio dos resultados obtidos nos experimentos que a síntese de rubis monocristalinos por meio do método LHPG é uma perspectiva concreta. A introdução de uma semente orientada com relação ao plano cristalino *c* durante o processo de cristalização revela-se como uma estratégia eficaz para evitar a formação de reentrâncias na superfície do monocristal. Tal abordagem, além de contribuir para a obtenção de uma superfície mais uniforme, também simplifica significativamente as etapas subsequentes de polimento e lapidação, promovendo a otimização do produto final.

A análise comparativa dos custos entre os dois métodos apresenta resultados instigantes. Os custos associados aos combustíveis do processo, à aquisição de equipamentos e à alocação de mão de obra indicam claramente uma tendência de maior gasto no processo de Verneuil quando equiparado ao processo LHPG. Esta discrepância de custos tem implicações relevantes na viabilidade econômica e na eficiência geral dos métodos, conferindo uma vantagem significativa ao processo LHPG em termos de custo-benefício.

Não obstante, um desafio notável reside na avaliação dos custos por unidade de massa dos materiais produzidos pelos dois métodos. A falta de dados específicos sobre a quantidade de material gerado pela fusão a chama empregada no método Verneuil constitui um obstáculo substancial para uma comparação precisa nesse âmbito. No entanto, mesmo diante dessa limitação, as vantagens econômicas do processo LHPG permanecem evidentes.

Diante desses achados, torna-se cada vez mais claro que o método LHPG possui um potencial promissor como alternativa viável para a produção de rubis e safiras sintéticas. As características econômicas favoráveis, aliadas à eficácia do processo e à qualidade dos produtos obtidos, sugerem que o método LHPG poderá desempenhar um papel significativo no avanço da indústria de gemas sintéticas. Contudo, são necessárias investigações adicionais para elucidar aspectos mais detalhados, como a otimização contínua dos processos envolvidos.

6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Indubitavelmente, a síntese de monocristais de rubi mediante a aplicação do método LHPG emerge como uma alternativa que não apenas oferece vantagens econômicas tangíveis, mas também suscita considerações de grande alcance no contexto da indústria joalheira. A notável disparidade nos custos iniciais e de manutenção quando comparados ao método Verneuil, que tradicionalmente domina o cenário, sinaliza a atratividade intrínseca do método LHPG. Contudo, é prudente reconhecer que uma avaliação minuciosa e abrangente é necessária para corroborar de forma inequívoca a viabilidade econômica desse processo para os propósitos específicos do mercado de joias.

A exploração adicional das possibilidades intrínsecas ao método LHPG abre horizontes interessantes. A pesquisa direcionada ao desenvolvimento de uma paleta expandida de cores para os monocristais de coríndon transcende o mero aspecto estético, visto que a diversificação cromática das gemas pode potencialmente aumentar o seu apelo e, conseqüentemente, a sua demanda no mercado. Da mesma forma, a exploração da capacidade de produção de peças com maiores diâmetros introduz uma dimensão adicional de versatilidade, ampliando as oportunidades de aplicação das gemas sintéticas.

O caminho futuro do método LHPG é perspicaz e pleno de potencialidades. Todavia, para materializar plenamente esse potencial, uma abordagem colaborativa e proativa se revela necessária. A interação com profissionais e empresas atuantes do mercado de joias, bem como a promoção de colaborações interdisciplinares, é essencial para o desenvolvimento contínuo e aprimoramento da técnica. A criação de um ecossistema que permita a inovação, a troca de conhecimento e a aplicação direta das descobertas em cenários práticos é o alicerce para efetivamente disponibilizar e comercializar o método LHPG como uma alternativa impactante e promissora na produção de gemas sintéticas de alta qualidade.

REFERÊNCIAS

HARRIS, Daniel. **A century of sapphire Crystal growth: origino f the EFG method**. San Diego, 2009.

REPOSITÓRIO DA UFRGS. CORINDON – Al_2O_3 . Disponível em: < <https://www.ufrgs.br/minmicro/Corindon.pdf> >. Acesso em: agosto, 2023.

ICSC 0351 - OXIDO DE ALUMINIO. Disponível em: < https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=pt&p_card_id=0351&p_version=2 >. Acesso em: agosto, 2023.

MUSEU HEINZ EBERT. Corindon (corindo). Disponível em: < <https://museuhe.com.br/mineral/corindon-corundum/> >. Acesso em: agosto, 2023.

WEBMINERAL. Trigonal Hexagonal Classe Escalenoédrica. Disponível em: < <http://webmineral.com/crystal/Trigonal-HexagonalScalenoedral.shtml> >. Acesso em: agosto, 2023.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2002.

MÜLLER, G.; FRIEDRICH, J. **Crystal Growth, Bulk: Methods**. In: **Enciclopédia de Física da Matéria Condensada**. 2005.

NEWSDETAIL. Pandora launches lab – created Diamond collection. Disponível em: < <https://static.poder360.com.br/2021/05/NewsDetail-1.pdf> >. Acesso em: agosto, 2023.

GRANDVIEWRESEARCH. Relatório de análise de tamanho, participação e tendências do mercado Corindo. Disponível em: < <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/corundum-market> >. Acesso

em: agosto, 2023.

COHERENTMARKETINSIGHTS. Mercado de safira sintética – análise de tamanho, participação, perspectiva e oportunidade, 2019 – 2027. Disponível em: < <https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/synthetic-sapphire-market-3534> >. Acesso em: agosto, 2023.

MORDORINTELLIGENCE. Mercado de joias no Brasil - crescimento, tendências, impacto do COVID-19 e previsões (2022 - 2027). Disponível em: < <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-jewelry-market-industry> >. Acesso em: agosto, 2023.

GARCIA, Francisco. IBANEZ, Rafael. ANGUREL, Luis Alberto. COSTA, Florinda. FUENTE, Germán. **Laser Floating Zone Growth: Overview, Singular Materials, Broad Applications, and Future Perspectives**, 2020. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/1/38> >. Acesso em: agosto, 2023.

ANDREETA, ERM; ANDREETA, MRB; HERNANDES, AC. **Laser heated pedestal growth of Al₂O₃/GdAlO₃ eutectic fibers**. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002202480101764X> >. Acesso em: agosto, 2023.

DME - Distribuição de Energia Elétrica SA **Tarifas**. Disponível em: < <http://www.dme-pc.com.br/atendimento/tarifas> >. Acesso em: agosto, 2023.