

# **Beneficiamento de rejeito mineral de ágata e opala por usinagem CNC para reprodução de formas complexas**

*Processing of waste from agate and opal by CNC machining for reproduction of complex forms*

**TESSMANN, Camila Sieburger**

Mestranda LdSM, PGDESIGN/UFRGS

**DUARTE, Lauren da Cunha**

Pós-doutoranda LdSM, PPGEM/UFRGS

**KINDLEIN Jr., Wilson**

Prof. do DEMAT, PPGEM, PGDesign e coord. LdSM/UFRGS

**GOMES, Lara Elena Sobreira**

Acadêmica em Física, Servidora pública, LdSM/UFRGS

Palavras-chave: Rejeito Mineral, Usinagem CNC, Design.

Resumo: Este estudo mostra o resultado da aplicação da tecnologia de usinagem CNC ao rejeito mineral de opala branca e ágata, oriundos da mineração dos garimpos do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí, RS. A opala branca compõe os geodos de ágata extraídos da região. No Estado, os objetos produzidos visando à indústria de gemas e jóias possuem pouco diferencial, tecnologia aplicada e carência de design, tanto no processo quanto no resultado estético. O objetivo desta pesquisa é definir uma metodologia para utilização deste rejeito na reprodução de camafeus através da usinagem CNC e ferramentas adequadas. O resultado dos 5 testes efetuados até o momento demonstra a possibilidade da intervenção positiva, sob ponto de vista do design, neste material disponível.

*Key-words: Mineral reject, CNC Machining, Design.*

*Abstract: This study shows the result of applying the technology of CNC machining to reject the mineral opal and white agate, from the mining of the goldfields of the Mining District of the Salto Jacuí, RS. The opal white comprise the Geodis of agate from the region. In the state, the objects produced to the industry of gems and jewelry have little difference, applied technology and lack of design, both in the process as the aesthetic result. The intention of this research is to define a methodology for using this waste in the reproduction of camafeus through appropriate tools and CNC machining. 5 The result of tests performed to date demonstrates the possibility of positive intervention, in terms of design, this material available.*

## **Introdução**

O Brasil é um dos principais exportadores de ágata em bruto, sendo o estado do Rio Grande do Sul o maior produtor e o município de Salto do Jacuí a região onde se encontram os garimpos de ágata (BRANCO & GIL, 2002). A região onde se localizam estes garimpos é denominada de Distrito Mineiro do Salto do Jacuí. Neste distrito mineiro são explorados geodos, que são cavidades circulares a esféricas alojados em rochas vulcânicas, que estão parcial ou totalmente preenchidos por camadas intercaladas de ágata, quartzo incolor e opala. O processo de extração dos geodos gera grande quantidade de rejeito, composto tanto pela rocha portadora do minério como também por minério de baixa qualidade, como por exemplo, a opala branca (AUGUSTIN, 2004). Esta opala é a mais comum, não sendo valorizada no mercado por não ser apropriada para corte de chapas, tal como a ágata, gerando assim, significativa quantidade de rejeito.

Grande parte da produção de ágata, que é constituída da intercalação de bandas de calcedônia, destina-se à produção de objetos para fins ornamentais, corte em chapas para tingimento e fabricação de produtos em geral. No município de Soledade, RS, se concentram as principais empresas de beneficiamento e também o comércio dos materiais gemológicos explorados no Rio Grande do Sul, no entanto, a maioria dos objetos produzidos é repetitiva nas diversas indústrias beneficiadoras e não há diferencial no design das peças. A introdução de novas tecnologias e design neste setor pode auxiliar no aproveitamento desse material, incluindo métodos de beneficiamento que podem modificar sua aparência.

A ágata também é muito utilizada para reprodução de camafeus. Camafeu é um objeto para adorno constituído de um desenho em relevo, em materiais compostos por camadas em cores diferenciadas, ou seja, é uma gema entalhada ou esculpida (SCHUMANN, 2006). Os primeiros camafeus surgiram por volta de 300 AC, em Alexandria, Egito e eram muito utilizados em jóias e adornos para vestimentas, bem como eram apreciados pelos antigos gregos e romanos. Um grande centro mundial da produção de camafeus é Idar-Oberstein, na Alemanha, onde a produção se dá a partir de ágata branca, cornalina e ônix, datando desde o século XIV sendo desenvolvidas novas técnicas com o passar do tempo.

Através deste estudo, objetiva-se estabelecer uma metodologia de beneficiamento do rejeito de opala e ágata oriundo do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí com a finalidade de agregar valor com a introdução de novas possibilidades de aproveitamento através do design. Devido ao tamanho dos rejeitos, onde as dimensões máximas são de 6 x 5 x 3 cm o beneficiamento mais apropriado para a reprodução de camafeus é a usinagem CNC, uma vez que as diferentes cores da opala (branca) e da ágata (cinza) atribuem a este material as características mais apropriadas para este tipo de beneficiamento.

Foram realizadas análises em amostras de material gemológico de ágata e opala branca, bem como das ferramentas. Posteriormente foram realizados cinco testes de usinagem em amostras destes materiais, onde foram comparados os parâmetros de usinagem relacionados à fresa, verificando o comportamento das ferramentas utilizadas para o desgaste e o acabamento final do objeto. O resultado confirma a possibilidade deste tipo de beneficiamento ao rejeito opala branca e ágata, no entanto, são necessárias outras tentativas a fim de reduzir o tempo de produção sem danificar o equipamento nem a ferramenta.

## **1 - Materiais e Métodos**

Os procedimentos de beneficiamento do rejeito de opala branca e ágata foram realizados no Laboratório de Design e Seleção de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com utilização de equipamento para usinagem, fresamento e corte.

O trabalho realizado foi embasado em estudos teóricos, experiências práticas e foi executado seguindo etapas de atualização bibliográfica de aplicações deste material gemológico na produção de adornos sob a forma de camafeus; pesquisa sobre métodos de usinagem visando à melhoria de qualidade de gemas e materiais gemológicos; visitas ao garimpo de extração de ágata e opala no Distrito mineiro do Salto do Jacuí; coleta e seleção do rejeito desta lavra de exploração mineral; escolha da melhor parte da amostra do material gemológico para então realizar os testes de usinagem com a finalidade de definir os parâmetros adequados, relacionados à ferramenta, ao equipamento e ao material para a produção de camafeus.

## **1 - Materiais**

### **1.1 - Opala e ágata**

Reyes *et. Al.* (2005) consideram, baseados na literatura mineralógica, a opala como sendo uma forma de sílica hidratada amorfa ou com baixo grau de cristalinidade, outros, a definem como um agregado cristalino (FRONDEL, 1962).

A opala ocorre em diversas cores, possui dureza de 5,5 a 6,5 na escala Mohs, densidade de 1,98 a 2,20 g/cm<sup>3</sup>, varia de transparente a opaca e pode apresentar fluorescência, opalescência e jogo de cores, fenômeno que a valoriza no mercado. Não possui clivagem, ou seja, quando partida, não segue um plano determinado. A clivagem é uma característica física que está relacionada com o tipo de ligação existente entre os átomos e é importante ser considerada no momento do beneficiamento.

Após ser extraída dos geodos de ágata, a opala, em geral, fica quebradiça e por isso não é recomendável o seu corte em chapas para o aproveitamento, como é geralmente feito com a ágata. A ágata é uma calcedônia com bandas, ocasionalmente mesclada, com um pouco de opala. Estas bandas podem ser de cores distintas ou de tom uniforme, onde as fibras de quartzo são orientadas verticalmente para a superfície de suas

camadas. A ágata desta região é geralmente de cor cinzenta e com desenho regular, por isso são tingidas (SCHUMANN, 2006).

O rejeito de opala branca, e eventualmente de outras tonalidades, possui dimensões máximas de 20 x 10 x 8 cm. A opala ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), por conter água em sua estrutura, pode se desidratar e, por isso, quebra em pedaços menores, onde as dimensões máximas são de 6 x 5 x 3 cm. Este rejeito, ao ser destinado ao beneficiamento para reprodução de camafeus passa por uma etapa de seleção da melhor região a ser trabalhada, levando-se em consideração fraturas e bandamento, para então proceder com o corte da amostra e a usinagem adequada para a forma preestabelecida. A camada de opala branca sobre a ágata é a parte usinada pela fresadora durante o processo de formatação do material gemológico em camafeus.

## 2 Métodos

### 2.1 - Usinagem CNC (Controle Numérico Computadorizado)

O processo de usinagem CNC aplicado às amostras de ágata e opala branca, teve por finalidade a reprodução de camafeus, uma vez que as amostras deste rejeito possuem características propícias para tal objeto, como a divisão em cores (bandeamento).

Usinagem, segundo Ferraresi (1986), é uma operação que confere à peça a forma, as dimensões, acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens. A usinagem em minerais, processo utilizado por Bruxel *et. Al.* (2007), consiste em remover material de um bloco sólido através do equipamento Fresa CNC utilizando refrigeração por água, restando a peça pretendida.

Partindo desta análise de sua função básica, a usinagem CNC pode colaborar no beneficiamento de diversos materiais, inclusive dos minerais, permitindo a reprodução de desenhos e formas pré-estabelecidas em detalhes precisos no material, na forma de relevos e, com utilização de criatividade e conhecimento da técnica, permite a produção de objetos inovadores e únicos, podendo estes ser reproduzidos em série.

Os desenhos ou formas emitidas como informação ao equipamento de usinagem são efetuados em software CAM (*Computer Aided Manufacturing*), onde são definidos volumes, medidas e os parâmetros necessários para a usinagem e para a ferramenta.

### 2.2 - Ferramentas utilizadas na usinagem

As ferramentas utilizadas para efetuar a usinagem nas amostras de ágata e opala possuem ponta montada diamantada. O diamante é um mineral que possui dureza 10 na Escala Mohs enquanto a ágata e a opala possuem dureza de 5,5 a 6,5 na mesma escala. Devido às características físicas do material a ser usinado, definiu-se, inicialmente, que estas ferramentas trariam melhores resultados. No Quadro 1 são apresentadas as ferramentas utilizadas e suas medidas.

Quadro 1. Ferramentas utilizadas nos testes de usinagem

Testes	1	2	3	4	5
Ferramentas diamantadas					
Dimensões/parâmetros	Ponta cilíndrica diâmetro= 2 mm	Ponta cônica d= 3 mm Ângulo lateral: 4.0° Raio da ponta: 0.60 mm	Ponta cônica d= 3 mm Ângulo lateral: 4.0° Raio da	Ponta cilíndrica d= 6mm Ponta cônica d= 3 mm Ângulo lateral: 4.0° Raio da ponta: 0.75 mm	Ponta cônica d= 3mm Ângulo lateral: 4.0° Raio da ponta: 0.60

			ponta: 0.75 mm		mm
--	--	--	-------------------	--	----

### 2.3 - Microscopia Eletrônica de Varredura




O MEV tem como função gerar imagens a partir da incidência de um feixe de elétrons sobre a amostra do mineral que se pretende analisar. Esse feixe de elétrons, segundo Duarte *et. Al* (2003), incide sobre o mineral e gera elétrons secundários (SE), retroespalhados (BSE), raios X característicos e catodoluminescência (caso particular de luminescência). A análise dos elétrons secundários fornece detalhes da superfície da amostra, em uma imagem representada em tons de cinza. A análise dos elétrons retroespalhados mostra as diferenças composicionais na região ionizada do mineral, onde elementos químicos com maior peso atômico são representados em tons claros e os mais leves em tons escuros.



A caracterização de minerais é um procedimento importante para, além de outros aspectos, o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada (BORGES *et. Al* 2008). A análise dos materiais por MEV pode ser efetuada posterior ao processo de usinagem CNC, onde se obtém respostas quanto à interação do material gemológico com a ferramenta diamantada. A obtenção de imagens de elétrons secundários (SE) ressalta as características morfológicas do material e auxiliaram na avaliação da resistência da gema e também da ferramenta, podendo assim fazer uma melhor avaliação dos parâmetros de usinagem utilizados no processo. As imagens SE para análise das amostras de opala e ágata usinadas e da ferramenta diamantada foram geradas no equipamento da marca Jeol JSM-6060 *Scanning Electron Microscope*® da UFRGS, com corrente do feixe de elétrons de 20 kev.

### 3 Resultados e discussão

No Quadro 2, observa-se a relação de testes já efetuados, os parâmetros de usinagem utilizados e equipamentos.

Quadro 2. Parâmetros utilizados nos testes de usinagem e resultados da usinagem CNC

Teste	Material	Equipamentos	Tempo	Parâmetros	Resultado
1	Opala	Ferramenta ponta montada diamantada formato cilíndrica / mandril	5 min	Velocidade do equipamento: 3000 rpm	
2	Opala	Ferramenta ponta montada diamantada formato cônica / Fresa Digimill®	3 horas	Passo lateral: 0.40 mm Passo vertical: 0.600 mm Velocidade da máquina: 20.000 r.p.m Avanço lateral: 150.000 mm/min Avanço vertical: 50.000 mm/min	
3	Opala	Ferramenta ponta montada diamantada formato cônica / Fresa Digimill®	4 horas	Passo lateral: 0.5 mm Passo vertical: 0.800 mm Velocidade da máquina: 20.000 r.p.m Avanço lateral: 150.000 mm/min Avanço vertical: 50.000 mm/min	

4	Opala / ágata	Ferramenta ponta montada diamantada formato cilíndrica e cônica / Fresa Digimill®	4 horas	Passo lateral: 1.000 mm Passo vertical: 0.800 mm Velocidade da máquina: 20.000 r.p.m Avanço lateral: 150.000 mm/min Avanço vertical: 50.000 mm/min	
5	Opala / ágata	Ferramentas pontas montadas diamantadas formato cilíndricas / Fresa Digimill®	Etapa 1: 90 min Etapa 2: 70 min	Passo lateral: 0.675 mm Passo vertical: 0.250 mm Velocidade da máquina: 20.000 r.p.m Avanço lateral: 75.000 mm/min Avanço vertical: 50.000 mm/min	

No primeiro teste, onde se utilizou a ferramenta de ponta montada diamantada formato cilíndrica com diâmetro de 2 milímetros, houve desgaste considerável da opala em um tempo menor que 5 minutos, utilizando uma como equipamento um mandril. Com exceção do resultado positivo quanto ao desgaste, que se sucedeu em uma profundidade satisfatória se comparada com o tempo de desgaste e também com resistência da ferramenta, que não apresentou desgaste visível a olho nu, não puderam ser controlados a pressão da ferramenta exercida pelo executor contra o mineral, nem a precisão do desenho a ser reproduzido. Este aspecto deve ser considerado, pois, para a reprodução dos camafeus é necessária precisão no detalhamento do desenho, bem como este fator influencia na eventual reprodução do objeto.

No segundo teste, realizado em uma amostra de opala, se utilizou uma ferramenta de ponta montada diamantada em formato cônica com diâmetro de ponta de 1,5 mm (ferramenta analisada no MEV, como mostra a Figura 1). A velocidade de usinagem e os avanços da ferramenta, descritos como parâmetros no Quadro 2, resultaram em uma superfície usinada sem marcas da ferramenta, demonstrada por imagens de MEV observadas na Figura 2. No entanto, ao final do teste, após 3 horas de usinagem, percebeu-se o desgaste da ponta da ferramenta.

Do terceiro teste ao quinto, as ferramentas utilizadas também foram de pontas montadas diamantadas, o processo envolveu a usinagem CNC com o equipamento Fresa Digimill®. Foram variados os parâmetros, como mostra o Quadro 2, sendo as etapas: coleta da amostra, estudo da zonação de cores da amostra para definição de um desenho no programa vetorial Corel Draw®, definição dos parâmetros de usinagem da ferramenta e definição dos relevos e alturas do desenho a ser usinado na amostra no programa Art Cam®, envio das informações à fresa através de um arquivo específico do equipamento de usinagem.

As análises da morfologia feitas com auxílio do MEV permitiram descrever o comportamento da ferramenta utilizada em um dos testes (Figura 1), a superfície do material gemológico após usinado (Figura 2), podendo-se descrever a diferença superficial de cada tipo de material gemológico usinado e a avaliação do resultado como um todo.

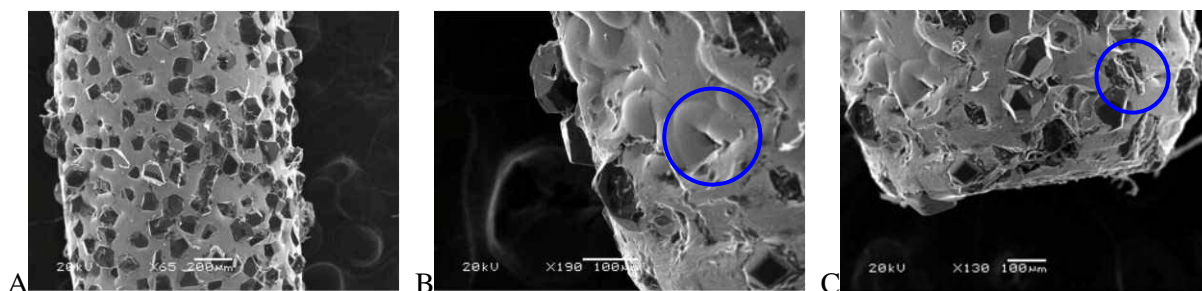


Figura 1. Aspecto geral em imagem eletrônica SE de ferramenta na região que não entrou em contato com o material gemológico durante a usinagem (A), textura tipo “box works”, definida por cavidades com o formato dos minerais que

as preenchiam, indicando que houve arranque dos grãos de diamantes durante o processo de usinagem (B) e detalhe da ponta da ferramenta desgastada com diamantes lascados (C).

A ferramenta (A) observada ao MEV apresentou, na região que interage com o material gemológico durante a usinagem, espaços vazios, onde antes constavam grãos de diamante (detalhe circulado em B), assim como mostra o desgaste na ponta (C) e a quebra de alguns diamantes devido à vibração e fricção contra o material gemológico, no detalhe circulado também em (C).

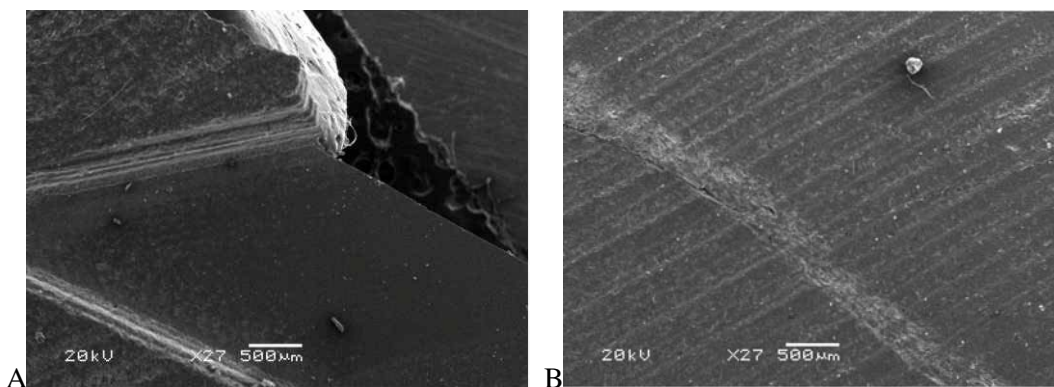


Figura 2. Superfícies de amostras de opala após a usinagem. Em (A): superfície sem marcas visíveis da ferramenta utilizada (cônica com diâmetro da ponta 1.2 mm) no teste número 2. Em (B): superfície com marcas do processo de usinagem deixadas por uma ferramenta diamantada de maiores dimensões (formato cilíndrica com diâmetro de ponta 3 mm para desbaste e formato cilíndrica com diâmetro de ponta 1,50 mm para acabamento) utilizadas no teste número 4.

As imagens da Figura 2 mostram a diferença entre superfícies de amostras de opala branca usinadas. O material gemológico observado em (A) pertence ao teste número dois, onde foi utilizada uma ferramenta com menor diâmetro que no teste de número quatro, representado por (B). Observa-se, portanto, que a superfície não apresenta muitas ranhuras, ou seja, são pouco visíveis as marcas da ferramenta. Observa-se que a interferência da ferramenta, percebida através das marcas na amostra em (B), foi maior, devido à utilização de uma ferramenta com diâmetro maior. Além deste fator, os avanços de usinagem (vistos no Quadro 2) foram alterados para que o processo fosse mais rápido que no teste número dois, o que pode ter afetado o resultado final aliado às dimensões da ferramenta.

Pode-se afirmar, analisando os resultados obtidos dos testes realizados até então, que as ferramentas utilizadas nos processos de usinagem CNC poderiam possuir uma melhor distribuição e fixação dos diamantes para poder otimizar o tempo de usinagem e aumentar a duração e eficiência da ferramenta. A eficiência da ferramenta pode ser questionada tanto no teste número 2, onde houve desgaste visível, e no teste número 5, onde houve a quebra da segunda ferramenta utilizada para o acabamento final, após 70 minutos de usinagem. O tempo de usinagem de 2 a 4 horas ainda é considerado alto, e o acabamento da superfície do camafeu, dentro do que foi analisado até então, depende da dimensão e qualidade da ferramenta.

No entanto, uma vez determinados parâmetros de corte, ferramentas e materiais gemológicos adequados, torna-se viável a reprodução de camafeus e demais objetos para adorno com diferencial estético e tecnológico comparado ao que se encontra atualmente no mercado de gemas e jóias do Estado.

## Referências

- AUGUSTIN, A. **Geologia e Mineralogia dos depósitos de opala da região do Salto do Jacuí, RS, Brasil.** Monografia apresentada ao curso de Geologia – UFRGS, 2004
- BORGES, A; LUZ, J; FERREIRA, L. **Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 61(1): 29-34, jan. mar. 2008
- BRANCO, P. GIL, C. **Mapa gemológico do Rio Grande do Sul.** Informe de recursos minerais, 2 edição. CPRM: Porto Alegre, 2002

BRUXEL, E; ETCHEPARE, H.; KONZEN, J. **Estudo da utilização de softwares 3D e tecnologias de prototipagem CNC em gemas.** 4° Congresso internacional de pesquisa em Design, 2007  
DUARTE, L; JUCHEM, P; PULZ, G; BRUM, T; CHODUR, N; LICCARDO, A; FISCHER, A; ACAUAN, R. **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros.** Pesquisas em Geociências, 30(2): 3-15, ISSN 1518-2398, 2003  
FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Edgard Blücher, 1986, 751 p.  
FRONDEL, C. **The system of mineralogy.** Silica minerals. Volume III, 1962  
REYES, B; OSTROUMOV, M; FRITSCH, E. **Estudio mineralógico de la desestabilización de ópalos mexicanos.** Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, num. 3, p. 391 – 400, 2005  
SCHUMANN, W. **Gemas do Mundo.** São Paulo: Disal, 2006, 279 p.

**Camila Sieburger Tessmann** casieburger@gmail.com

**Lauren da Cunha Duarte** laurenduarte@terra.com.br

**Wilson Kindlein Júnior** kindlein@portoweb.com.br

**Laura Elena Sobreira Gomes** laraele@gmail.com