

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**MESTRADO ACADÊMICO EM DESIGN**

Camila Sieburger Tessmann

**IMPORTÂNCIA DO BINÔMIO DESIGN E ENGENHARIA NO BENEFICIAMENTO  
DE REJEITO MINERAL DE OPALA E ÁGATA NA PRODUÇÃO DE CAMAFEUS  
POR USINAGEM CNC**

Porto Alegre / 2009

Camila Sieburger Tessmann

**Importância do binômio design e engenharia no beneficiamento de rejeito mineral de opala e ágata na forma de camafeus por usinagem CNC**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Design – ênfase em Design e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito à obtenção do título de Mestre em Design, modalidade acadêmico.

Orientador: Wilson Kindlein Jr. Prof.Dr.  
Co-orientadora: Lauren da Cunha Duarte, Prof. Dra.

Porto Alegre, 2009

## RESUMO

No estado do Rio Grande do Sul, os garimpos de pedras preciosas estão distribuídos em duas regiões principais: no Distrito Mineiro de Ametista do Sul (maior produtor de ametista) e no Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (maior produtor de ágata). Nestes dois distritos mineiros são explorados geodos, parcial ou totalmente preenchidos por camadas intercaladas de ágata, quartzo incolor, ametista, calcita e opala. O processo de extração desses geodos gera grande quantidade de rejeito, composto tanto pela rocha portadora do minério como também por minério de baixa qualidade. No município de Soledade 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 que visam à exportação se repete nas diversas indústrias beneficiadoras sem diferencial aparente. A opala encontrada nos garimpos de Salto do Jacuí ocorre em muitas cores. A opala branca é a mais comum e não é valorizada, gerando, assim, significativa quantidade de rejeito. Através deste estudo, objetiva-se estabelecer uma metodologia de beneficiamento por usinagem CNC do rejeito de opala branca e ágata oriundo do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí, que agregue valor pelo design e tecnologia. Considerando que os processos mais utilizados nas indústrias atualmente para a ágata, o tingimento e o corte em chapas, não se aplicam à opala, pode-se afirmar que a introdução da tecnologia de usinagem CNC neste setor pode auxiliar no aproveitamento desse material, ao modificá-los e valorizá-los como objetos de adorno sob a forma de camafeus. A metodologia empregada para a presente pesquisa consistiu de etapas de identificação dos locais de extração de ágata e de opala branca do Estado; avaliação dos procedimentos mais utilizados para beneficiamento destes materiais; estudo e análise do material por técnicas específicas; ensaios de usinagem CNC, análise das fresas utilizadas e dos materiais envolvidos após os processos de usinagem e desenvolvimento de produto. Foram realizados nove ensaios de usinagem e as análises posteriores, identificando nos resultados obtidos que, com as fresas adequadas destinadas ao desgaste (maior diâmetro) ou acabamento (menor diâmetro de ponta), quando utilizados em conjunto com parâmetros e estratégias de usinagem bem definidos, são suficientes para que se alcance o objetivo definido nesta pesquisa.

**Palavras-chave:** Design. Usinagem CNC. Rejeito de opala branca e ágata. Camafeu.

## ABSTRACT

In the state of Rio Grande do Sul, the precious stones mines are distributed in two main regions: in the Mining District of South Amethyst (largest producer of amethyst) and the Mining District of the Salto Jacuí (largest producer of agate). In these two districts Geodis miners are exploited, partially or completely filled by intercalated layers of agate, clear quartz, amethyst, opal and calcite. The extraction process of Geodis generates large amounts of waste, comprising both the rock of the ore carrier as well as of low quality ore. In the municipality of Soledade focus the main company to benefit from trade and gemological materials used in Rio Grande do Sul. However, most of the objects produced aimed at the export is repeated in various industries benefit without apparent difference. The opal found in the mines of the Salto Jacuí appears in many colors. The white opal is the most common and is not valued, thus generating significant amount of waste. Through this study, that aims to establish a methodology for processing by the CNC machining waste of opal and white agate from the Mining District of the Salto Jacuí, a great value was added for design and technology. Whereas the most currently used in industries for agate, dyeing and cut into plates, are not applied to the opal, one can say that the introduction of CNC machining in this sector can assist in the exploitation of such material, to modify and value them as objects of adornment in the form of camafeus. The methodology used for this research consisted of steps of identifying locations for extraction of opal and white agate the state, evaluate the procedures used for further processing of these materials, study and analysis of the material by specific techniques, testing of CNC machining, analysis of cutters and materials used after the processes involved in machining and product development. Were conducted nine tests of machining and the subsequent analysis, identifying the results that, with the cutters suitable for the wear (larger diameter) or finishing (minor diameter of tip), when used together with parameters and machining strategies for well-defined, are sufficient to achieve the goal defined in this study.

**Key Words:** Design. CNC machining. Reject of the white opal and agate. Cameo.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa gemológico da região Sul do Brasil, indicando a localização dos principais depósitos de materiais de interesse gemológico e seu contexto geológico.	31
Figura 2: Chaveiros produzidos com chapas de ágata e detalhe com ametista.	34
Figura 3: Cabo de talheres confeccionados em ágata.	34
Figura 4: Pedacos pequenos de ágata tingida, transformados em chaveiro.	36
Figura 5: Chapas de ágata expostas para venda.	37
Figura 6: Corte em chapas de ágata em disco diamantado.	37
Figura 7: Chapas de ágata tingidas.	38
Figura 8: Opala translúcida e branca, respectivamente, lapidadas em formato cabochão.	40
Figura 9: Variedades gemológicas de opala: respectivamente opala branca formato cabochão e opala de fogo em estado bruto, ambas de Salto do Jacuí, RS.	44
Figura 10: Opala australiana, opalas mexicanas e opala com jogo de cores na rocha.	45
Figura 11: Jogo de cores: os raios de luz penetram no arranjo de esferas de sílica e refratam-se, quando o feixe retorna à atmosfera é dissociado com o mesmo efeito de um prisma.	46
Figura 12: Micrografia eletrônica. (A): opala preciosa demonstrando o agrupamento regular das partículas de sílica e (B): opala comum com arranjo irregular das esferas.	46
Figura 13: Esferas de sílica em I, e agregado cristalino característico de opala Cristobalita-tridimita em II.	54
Figura 14: Camafeu estilo parisiense, ágata com base em ônix.	56
Figura 15: Camafeus de Idar Oberstein.	57
Figura 16: As cores bandadas da ágata permitem a reprodução de camafeus.	57
Figura 17: Sinete cilíndrico de pedra calcária (detalhe circulado) rolado em argila, com figuras representando guerreiros e animais, terceiro séc. a.C, Síria.	58
Figura 18: Garimpo de extração de ágata: município de Salto do Jacuí.	61
Figura 19: Depósito de rejeito de opala branca.	61
Figura 20: Objetos elaborados a partir de chapas de ágata tingidas.	62

Figura 21: Amostra em camadas de ágata e opala.....	63
Figura 22: Difratoograma de raios X da opala branca, confirmando a presença de cristobalita e tridimita.....	65
Figura 23: Em (A), equipamento de fresamento, scanner 3D e usinagem CNC Digimill, e em (B), detalhe da parte onde é acoplada a ferramenta para usinagem.....	67
Figura 24: Equipamento de corte, formação e polimento de materiais gemológicos.....	68
Figura 25: Esquema dos parâmetros utilizados para a usinagem no ensaio número seis.....	75
Figura 26: Desenho feito em <i>Software</i> CAM, definindo a dimensão das regiões a serem usinadas na amostra de opala, referentes a cada ferramenta conforme seus diâmetros de ponta.....	75
Figura 27: Vista em 3D da estratégia de usinagem.....	76
Figura 28: Imagem de um perfil, capturada por scanner tridimensional a laser e transformada em superfície, para que possa ser usinada.....	76
Figura 29: Imagem nas cores originais fotografada pelo scanner 3D móvel.....	77
Figura 30: Seleção do perfil a ser utilizado no camafeu, no <i>software</i> Geomagic.....	78
Figura 31: Simulação da atuação das ferramentas de 10 mm de diâmetro de ponta em (A) e após a atuação da PMG_720_etapa 1, fresa com diâmetro de ponta igual a 2 mm em (B).....	78
Figura 32: Amostra de opala branca com detalhe da área desgastada.....	80
Figura 33: Desenho em baixo-relevo, em forma de estrela, reproduzido na opala. A região mais escura indica o local onde a ferramenta deixou marcas após ter quebrado.....	81
Figura 34: Em (A) e (B), vista de topo do texto reproduzido em relevo na opala e em (C), vista lateral, revelando a altura do texto.....	82
Figura 35: A região composta por ágata, mais escura, compõe a base do perfil deste camafeu resultante do ensaio número quatro.....	83
Figura 36: Resultado do ensaio número cinco, mostrando o baixo relevo resultante da usinagem.....	83
Figura 37: Imagem de perfil feminino usinado em amostra de opala branca.....	85
Figura 38: Imagem reproduzida em tamanho reduzido.....	85
Figura 39: Comparação entre os tamanhos de imagens usinadas.....	86
Figura 40: Camafeu reproduzido no ensaio número 9. Em A, a percepção do tamanho ao lado da escala, e em B, foto de outro ângulo para percepção da altura do relevo.....	87
Figura 41: Imagens da ferramenta utilizada no ensaio número 2. Em (A), detalhe da ferramenta. Em (B), circulado e ampliado detalhe do espaço vazio onde havia um diamante, e em (C), detalhe circulado e ampliado de um diamante quebrado.....	88

Figura 42: Em (A), superfície polida da opala usinada no ensaio 2, e em.....	89
(B) marcas deixadas pela ferramenta de maior diâmetro em superfície de opala.	
Figura 43: Ferramentas utilizadas no ensaio seis, antes de serem.....	90
submetidas ao processo de usinagem. Na ordem PMG_003_2 (A), PMG_003_1 (B), PMG_710_2 (C), PMG_710_1 (D) e PMG_720 em (D).	
Figuras 44: Superfície usinadas pela ferramentas PMG_720.....	91
(ponta cônica grande).	
Figura 45: Marcas da fresa de ponta cônica, PMG_710_2, na superfície.....	91
de opala branca.	
Figura 46: Imagem demonstra a irregularidade na semelhança dos.....	92
formatos da duas ferramentas, e a diferença na quantidade de diamantes.	
Figura 47: Em (A), ferramenta PMG_710_1 antes da usinagem e em (B).....	93
após o processo, com desgaste visível.	
Figura 48: Ferramenta PMG_710_2 e o desgaste após a usinagem.....	93
observado em (B).	
Figura 49: Em (A), fresa PMG_720 antes da usinagem e em (B) após.....	94
a usinagem, não demonstrando desgaste visível.	
Figura 50: Fresa PMG_003_1 (formato esférico) em (A) antes do processo.....	94
de usinagem e em (B) após, sem apresentar desgaste visível.	
Figura 51: Em (A) escaneamento das ferramentas antes da usinagem e.....	95
em (B) após usinagem. Nuvem de pontos renderizada para melhor visualização da morfologia das ferramentas.	
Figura 52: Fresa PMG_720 antes do processo de usinagem em (B).....	96
após em (A) e em (C) a sobreposição das imagens.	
Figura 53: Fresa PMG_720 e a ausência dos tons avermelhados, que.....	96
indicam a diferença de medidas.	
Figura 54: Fresa PMG_003_2 e a uniformidade de medidas na.....	97
sobreposição, observada pela predominância do tom verde.	
Figura 55: Fresa PMG_710_1. Em detalhe, ampliação da região.....	97
que apresentou a diferença de níveis.	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exportação brasileira do setor 2004/ 03 (US\$ mil).....	30
Tabela 2: Maior participação nas exportações de produtos com valor agregado (US\$ mil).....	30
Tabela 3: Resultado da fluorescência da opala branca.....	64
Tabela 4: Resultado da fluorescência da ágata.....	64
Tabela 5. Resultados da medida de dureza Vickers ..... em opala branca e ágata	66

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Relação dos tipos de gemas existentes no Brasil. .... Em negrito, as que serão estudadas nesta pesquisa	13
Quadro 2: Técnica de medida de microdureza: vickers.....	53
Quadro 3: Ferramentas utilizadas nos ensaios de usinagem..... com as respectivas dimensões	69
Quadro 4: Parâmetros de usinagem.....	71



## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

CAD – Computer Aided Design

CAM – Computer Aided Manufacturing

CME – Centro de Microscopia Eletrônica

CNC – Comando Numérico Computadorizado

INPI - Instituto industrial de propriedade industrial

Labogem – Laboratório de Gemologia

LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos

LdSM – Laboratório de Design e Seleção de Materiais

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

SEDETEC - Secretaria de desenvolvimento tecnológico

## Dedicatória

*Dedico este trabalho a meus pais, Arno e Diva.  
E a Nelson, paixão da minha vida!*

## **Agradecimentos**

A meu orientador, Wilson Kindlein Júnior, pela orientação à minha pesquisa e pelas oportunidades de crescimento junto ao LdSM.

A Lauren da Cunha Duarte, minha coorientadora, por ter colocado “pedras no caminho”, literalmente, pela amizade e dedicação.

A meus sobrinhos Fernanda e Eduardo, me fazendo crer, com ingenuidade e energia, que a vida pode ser mais colorida em momentos difíceis.

A minha irmã Fabiana, pela companhia, apoio e amizade desde sempre.

A Jacira, parte da família, por transmitir o pensamento positivo que necessito.

A família toda, os Tessmann e os Sieburger, por serem minha essência.

Aos colegas LdSM, peças importantes no fechamento desta pesquisa.

Ao LACER, pelo apoio dado às análises realizadas nesta pesquisa.

A Pedro Juchem e ao LABOGEM, pelo apoio às análises desta pesquisa, pelo conhecimento fornecido através das aulas dadas ao PGDESIGN e pela oportunidade das viagens de campo.

Aos amigos mais que especiais, quase irmãos, alguns, me acompanhando desde a infância, outros, mais adiante, mas sempre preenchendo meu coração e transformando-se em porto-seguros nos momentos difíceis.

Ao CNPq. Por ter apoiado esta pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....</b>	<b>17</b>
<b>1.4 OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.1 Objetivo geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>1.5 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 DESIGN DE PRODUTO.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.1 Metodologia para projeto de produto.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.2 Design de gemas e jóias.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.3 Design de jóias relacionado ao Ecodesign.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 EXTRAÇÃO E MERCADO DE GEMAS.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.1 O mercado de pedras preciosas no Brasil.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.2 Cenário de pedras preciosas no Rio Grande do Sul.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3 BENEFICIAMENTO DE ÁGATA E OPALA NO RS.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.1 Corte em chapas.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.2 Tingimento.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3 Lapidação.....</b>	<b>39</b>
<b>2.4 NOVA TECNOLOGIA PARA BENEFICIAMENTO DE ..... MATERIAIS GEMOLÓGICOS</b>	<b>40</b>
<b>2.4.1. Usinagem por comando numérico computadorizado.....</b>	<b>41</b>
<b>2.5 MATERIAIS ESTUDADOS.....</b>	<b>42</b>
<b>2.5.1 Definição de mineral e gema.....</b>	<b>42</b>
<b>2.5.2 Opala Branca.....</b>	<b>43</b>
<b>2.5.2.1 Jogo de cores e opalescência.....</b>	<b>45</b>
<b>2.5.3 Ágata.....</b>	<b>47</b>

<b>2.6 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS</b> .....	48
<b>2.6.1 Fluorescência de Raios-X</b> .....	50
<b>2.6.2 Difratomia de Raios-X</b> .....	50
<b>2.6.3 Índice de refração</b> .....	51
<b>2.6.4 Microdureza</b> .....	52
<b>2.7 MÉTODOS PARA CAPTAÇÃO DE IMAGENS E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DO BENEFICIAMENTO DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS</b> .....	53
<b>2.7.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....	53
<b>2.7.2 Escaneamento a laser 3D</b> .....	55
<b>2.8 OBJETO DE ADORNO ELABORADO A PARTIR DE ÀGATA E OPALA BRANCA – CAMAFEU</b> .....	56
<b>CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	59
<b>3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DE EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DO MATERIAL NA REGIÃO</b> .....	60
<b>3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL</b> .....	63
<b>3.2.1 Fluorescência de Raios-X</b> .....	63
3.2.1.1 <i>Opala Branca</i> .....	64
3.2.1.2 <i>Ágata</i> .....	64
<b>3.2.2 Difratomia por Raios-X</b> .....	65
<b>3.2.3 Análise no refratômetro</b> .....	65
<b>3.2.4 Medida da microdureza</b> .....	66
<b>3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS</b> .....	66
<b>3.3.1 Equipamento de usinagem CNC e escaneamento 3D</b> .....	66
<b>3.3.2 Corte e formação dos materiais gemológicos</b> .....	67
<b>3.4 ENSAIOS DE USINAGEM CNC</b> .....	68
<b>3.4.1 Ferramentas (fresas) utilizadas</b> .....	68
<b>3.4.2 Parâmetros de usinagem</b> .....	70
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS</b> .....	80
<b>4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE USINAGEM CNC</b> .....	80

<b>4.1.1 Microscopia eletrônica de varredura dos materiais.....</b>	<b>87</b>
<b>envolvidos nos processos de usinagem CNC</b>	
4.1.1.1 Primeira análise do material e ferramenta utilizados.....	87
nos ensaios de usinagem	
4.1.1.2 Segunda etapa de análises no MEV das ferramentas.....	89
e do material gemológico utilizados no ensaio número seis	
<b>4.1.2 Escaneamento a laser das ferramentas utilizadas no.....</b>	<b>94</b>
<b>ensaio seis</b>	
<b>CAPÍTULO V – DISCUSSÃO .....</b>	<b>99</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>102</b>
<b>5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>104</b>
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>105</b>

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Neste capítulo consta a parte introdutória da pesquisa e são abordados: a contextualização e delimitação do tema, formulação do problema de pesquisa, objetivo geral e objetivos específicos e por fim, a justificativa do presente trabalho.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

No cenário de gemas e jóias, o Brasil se destaca como uma das maiores e mais importantes províncias gemológicas do planeta, contribuindo com cerca de 60% das gemas de cor para o mercado internacional (SVISERO & FRANCO, 1991). A relação das gemas do Brasil publicada pelo Departamento Nacional da Produção Mineral neste ano foi revista, contando com um total de 107 tipos diferentes (Branco, 2009), como se observa no Quadro 1.

Quadro 1. Relação dos tipos de gemas existentes no Brasil. Em negrito, as que serão estudadas nesta pesquisa. Fonte: modificado de Branco, 2009

Acroíta	Childrenita		Obsidiana	Rodolita
Adulária	Cianita	Euclásio	Olho-de-gato	Rodonita
<b>Ágata</b>	Citrino	Fenaquita	Oneguita	Rubelita
Água-marinha	Concreção de sílica	Fluorita	Ônix	Rubi
Alexandrita	Copal	Gahnita	Ônix-real	Rutilo
Allanita	Cordierita	Goshenita	<b>Opala branca (comum)</b>	Safira
Almandina	Cornalina	Grossulária	Opala preciosa	Scheelita
Amazonita	Crisoberilo	Heliodoro	Peridoto	Schorlita
Ambligonita	Crisocola	Heliotrópio	Petalita	Siberita Sillimanita
Ametista	Crisólita	Hematita	Pirita	Sodalita
Anatásio	Crisoprásio	Herderita	Piropo	Spessartina
Andaluzita	Cristal-de-rocha	Hessonita	Quartzo azul	Titanita
Apatita	Diamante	Hiddenita	Quartzo com goethita	Topázio
Apofilita	Diopsídio	Jarina	Quartzo	Topázio imperial
Aragonita	Dravita	Jaspe	enfumaçado	Trifana
Aventurinino	Dumortierita	Kunzita	Quartzo mórion	Turmalina bicolor
Axinita	Epídoto	Lazulita	Quartzo olho-de-gato	Turmalina melancia
Barita	Escapolita	Madeira fossilizada	Quartzo rosa	Turmalina Paraíba
Berilo verde	Esfalerita	Malaquita	Quartzo rutilado	Turquesa
Brasilianita	Esmeralda	Morganita	Quiastolita	Verdelita
Calcedônia	Espinélio	Nefrita		Zircão
Calcita	Estaurolita			
Cassiterita				

Parte do volume de gemas de cor produzida é destinada ao mercado joalheiro, alguns tipos são destinados à produção de artefatos e objetos de decoração e grande parte deste volume destina-se à exportação. Neste sentido, a tendência de profissionais da área de design de produtos que trabalham com este material é a tentativa de voltar esta produção ao mercado interno, valorizando a matéria-prima.

O design de produto, para que seja eficaz e para que desperte o interesse do consumidor e do mercado, necessita, em um primeiro instante, de procedimentos específicos para o desenvolvimento das soluções. Um bom design não é unicamente uma boa solução formal ou funcional de todo um processo de projeto, mas é também o próprio processo, tão importante quanto o resultado. O processo de projeto inicia na fase da concepção, com base na lista de requisitos que se deseja para o produto. Pahl *et. al* (2005) definem como um projeto inovador quando “tarefas ou problemas são atendidos por novos princípios de solução ou uma combinação de princípios de soluções familiares”. O princípio de um processo que trará como resultado produtos inovadores pode ser a adaptação de novas funções a este produto, novas características de funcionamento ou constituições.

Nos requisitos de um projeto considerado inovador, encontra-se a seleção de um material específico que atenda às exigências do produto, um nicho de mercado promissor, a incorporação de tecnologia adequada, a criatividade do designer, além da preocupação ambiental, pois, atualmente, consideram-se os produtos que foram desenvolvidos no âmbito do Ecodesign, tanto no processo de produção, escolha do material ou funcionamento, mais inseridos no cenário atual de produção. Segundo Frazão (1995), na concepção ecológica de um produto, o Ecodesign visa incentivar a criatividade e a inovação além de diferenciar os produtos pela qualidade ambiental. Etchepare (2005) cita o Ecodesign como sendo um modelo projetual ou de projeto, orientado por critérios ecológicos e também como uma expressão que sintetiza um vasto conjunto de atividades que tendem a enfrentar os problemas projetuais levando em conta a questão ambiental.

De acordo com Pujari (2006), apesar do surgimento de novos produtos inseridos no contexto de sustentabilidade, isso não implica no sucesso destes produtos no mercado, pois ainda são poucos os estudos e pesquisas nesta área. No entanto, nota-se um aumento da preocupação ambiental como um diferencial



competitivo e um aumento de produtos e pesquisas enfatizando uso de materiais ecologicamente corretos, reutilização de materiais, novas formas de produção, etc.

O design de jóias, enfatizando-se a vasta utilização de matérias-primas não renováveis na maior parte de suas criações, pode colaborar com inovação e criatividade atendendo às necessidades do consumidor com produtos inseridos nas atuais tendências, à exigência da indústria e também pode estar na direção de produtos ambientalmente corretos, como por exemplo, a utilização de rejeito mineral oriundo de minas e garimpos.

A cadeia produtiva de gemas, jóias e artefatos compreende etapas que vão desde a extração, beneficiamento e processos de produção, até incorporação de design aos produtos. Estima-se que existam cerca de 2.000 empresas legalizadas do setor no Brasil e também um grande número de empresas informais e artesãos vivendo à margem do mercado (IBGM, 2005).

Segundo Costa (2007), os processos de beneficiamento de pedras preciosas realizados no Brasil são, geralmente, artesanais, com pouca ou nenhuma automação. Existe escassez de estudos e pesquisa neste setor, conseqüentemente há a necessidade de aprimoramento dos processos, das técnicas de extração, beneficiamento de minerais e de investimento em tecnologia para obtenção de produtos padronizados e com maior qualidade.

A quantidade de rejeito gerado no beneficiamento das gemas é significativa e diminui a competitividade das empresas do setor de gemas e jóias do Rio Grande do Sul, pois aumenta o custo do produto final. Com aplicação de procedimentos corretos ao beneficiamento de rejeito mineral, agregando-lhe valor, os impactos do custo da matéria-prima tendem a minimizar-se (Bruxel, Etchepare, Brandt, 2008) e, conseqüentemente, resultarão em produtos de qualidade, diferenciados e competitivos.

## **1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA**

No estado do Rio Grande do Sul, os garimpos de pedras preciosas estão distribuídos em várias regiões do estado, especialmente nos Distritos Mineiros de

Ametista do Sul (maior produtor de ametista) e do Salto do Jacuí (maior produtor de ágata) (BRANCO & GIL, 2002), como observado na Figura 1.

A extração é feita de modo que gera grande quantidade de rejeito, tanto de rocha quanto de minerais. Nestas ocorrências, são explorados geodos, que são cavidades na rocha e estão total ou parcialmente preenchidos por calcedônia, ágata, quartzo incolor, ametista e, por vezes, opala. A opala branca ocorre associada com a ágata como preenchimento de alguns geodos, principalmente em garimpos do município de Salto do Jacuí, RS. Os geodos preenchidos por opala branca são encontrados na forma de pedaços, pois, durante o processo extrativo, eles se quebram, devido à sua estrutura frágil.

Como a economia do município de Salto do Jacuí é voltada à comercialização de geodos em bruto, os que contêm opala branca não se encaixam a este fim. Por ser um material quebradiço, o beneficiamento, como o corte em chapas, não é recomendável. Porém, a exemplo de outras opalas mundialmente conhecidas e valorizadas, como as provenientes da Austrália e do município de Pedro II, no estado do Piauí, Brasil, a opala branca constitui um material promissor para o mercado de gemas se transformada em camafeus e cabochões. Camafeu é um objeto para adorno constituído de um desenho em relevo, em materiais compostos por camadas em cores diferenciadas (SCHUMANN, 2006, p. 142). Esta hipótese reflete que, com a introdução de tecnologia e design neste setor, pode haver maior aproveitamento deste material. Nestes itens estão inseridos, atualmente, diversos métodos de beneficiamento de materiais gemológicos que modificam sua aparência, como tipos de lapidação, usinagem CNC (comando numérico computadorizado), entre outros.

Devido ao tipo de rejeito e à carência do mercado de produtos diferenciados e inovadores, o objetivo do presente trabalho é determinar uma metodologia adequada ao beneficiamento de rejeito contendo opala e ágata através da tecnologia de usinagem CNC para a confecção de camafeus, uma vez que a opala possui as características propícias para tal fim. Esta metodologia será avaliada mediante testes de usinagem com equipamentos e ferramentas adequadas, além da aplicação de outras tecnologias existentes com a finalidade de explorar a resistência do material a interferências diversas. O objetivo é tornar o rejeito passível de ser aproveitado no mercado, lhe conceder um novo destino e obtenção de produtos com valor agregado pelo design e tecnologia.

### **1.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA**

Como processos de design e tecnologia integrados ao processo de beneficiamento do rejeito de opala branca e ágata podem contribuir para agregar valor a este material?

### **1.4 OBJETIVOS**

#### ***1.4.1 Objetivo Geral***

Propor uma metodologia para o processo de beneficiamento do rejeito de opala branca e ágata, oriundo da atividade de mineração do município de Salto do Jacuí, RS, que integre o design e a tecnologia de usinagem CNC para agregar valor ao material.

#### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Investigar os possíveis processos de beneficiamento já utilizados e as técnicas adequadas às características e propriedades dos materiais gemológicos ágata e opala branca nos pólos de extração do Estado;
- Caracterizar o material gemológico quanto à sua composição e estrutura;
- Estabelecer uma metodologia que integre o design e a tecnologia no processo de beneficiamento do rejeito;
- Avaliar a metodologia a partir dos resultados obtidos.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

Para o desenvolvimento desta pesquisa, o foco é direcionado à adaptação das técnicas de fresamento (usinagem) por controle numérico computadorizado ao rejeito de material gemológico contendo opala branca e ágata, no intuito de obter produtos ainda não difundidos no mercado nacional. O aprofundamento se dará ao estudo da opala branca, pois é o material que sofrerá maior interferência no método de beneficiamento proposto. No entanto, a ágata também será analisada por fazer parte das amostras utilizadas nesta pesquisa.

A intenção de projeto utilizando este material e esta técnica encontra-se na atual tendência de mercado e que há muito já vem sendo desenvolvido com técnicas diversas, em países como Alemanha e Itália. Estes países atuam na produção de objetos de adorno confeccionados em ágata.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, portanto, são analisados os processos de beneficiamento de ágata e opala já realizados nas empresas do estado e a busca por produtos e técnicas já desenvolvidos utilizando estes materiais.

O consumo de matérias-primas mineral e de origem orgânica tem aumentado significativamente e tem repercutido no Ecodesign. Interferências nos projetos, desde a fase da concepção e seleção de materiais podem vir a ser um fator positivo quanto ao Ecodesign, como por exemplo, a seleção e utilização do rejeito de materiais gemológicos. Segundo Frazão (1995), a redução na fonte é o mais eficiente do ponto de vista do Ecodesign, existindo muitas opções a serem analisadas com vantagens ou inconvenientes do ponto de vista ambiental, social, econômico e tecnológico.

A utilização do rejeito de um material gemológico não valorizado e desprezado nos garimpos visa incorporar à pesquisa os conceitos do Ecodesign, uma vez que, segundo Vale (2000): “os recursos minerais têm como característica principal a não renovabilidade física, e sua exaustão é um condicionante vital para as empresas ligadas ao setor de mineração.” A utilização da opala branca, como um subproduto da mineração de ágata, reflete alguns benefícios a este cenário, pois, além da redução da quantidade de rejeito, existe a seleção de um material até então subutilizado, a incorporação de design e tecnologia a um novo material e,

conseqüentemente, um produto inovador desenvolvido no estado do Rio Grande do Sul.

Inovação é um dos caminhos para o sucesso das empresas que buscam competir com produtos de alto valor agregado, além de focar o aumento de volume das exportações de produtos com a “cara Brasil”. Neste contexto, Costa (2007) afirma que existem, no país, dois tipos de empresas: as que inovam e diferenciam os seus produtos e as empresas especializadas em produtos padronizados, possuindo em geral menor inovação e pouca tecnologia incorporada aos processos, reduzindo seu poder competitivo.

Branco & Gil (2002) defendem a idéia de que os processos de beneficiamento necessitam ser revistos e aprimorados com a finalidade de proporcionar às muitas empresas do setor de pequeno porte a inclusão no competitivo mercado mundial. Uma das maneiras dessa inclusão seria na inovação e melhorias no setor, representando a eficácia produtiva.

No Rio Grande do Sul, as indústrias de beneficiamento de gemas e materiais gemológicos utilizam com abundância a ágata e mantêm-se estagnadas quanto à inovação em produtos e novas tecnologias. Devido à complexidade deste mercado, o foco da pesquisa se resume na fabricação de novos produtos que podem vir a inovar o setor de gemas. No município de Soledade, o beneficiamento e comércio de gemas são intensos. A beleza reconhecida deste material da região e a possibilidade do rejeito possuir valor não vêm ao encontro da introdução de inovação e design nos processos de beneficiamento, pois a maioria dos objetos produzidos é destinada à exportação e é repetitivo nas diversas indústrias beneficiadoras, sem diferencial aparente. O principal beneficiamento destinado à ágata é o corte em chapas e tingimento.

O beneficiamento adequado de ágata e opala branca, para a produção de formas complexas pode ser feito através de tecnologia de usinagem CNC usando parâmetros de processos próprios.

A característica de bandamento do material abre caminho para criação de objetos diferenciados e competitivos utilizando as gemas gaúchas, uma vez que a melhor maneira de beneficiamento e utilização dos recursos minerais do Brasil não é suficientemente difundida e não há grande volume de pesquisas científicas bem embasadas sobre este assunto. A competitividade é grande e a inovação no setor não acompanha as grandes tendências mundiais de mercado. Na intenção de inovar

em um produto utilizando uma matéria-prima tida como rejeito, é conveniente aproveitar as características naturais do material, perceber um nicho de mercado em aberto e ter criatividade para aliar tecnologia e design.

O aproveitamento do material abundante na região mineradora do Salto do Jacuí, com uso de suas características naturais de forma criativa e da tecnologia a favor do design de gemas na produção de camafeus, por exemplo, pode elevar as vendas das indústrias, além de colaborar com o meio ambiente, através da seleção de um material que seria depositado em pilhas de rejeito.

## **CAPÍTULO II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão abordados os assuntos inerentes ao desenvolvimento da presente pesquisa, tornando claros os objetivos e a metodologia empregada.

### **2.1 DESIGN DE PRODUTO**

Segundo Leon (2005), o design industrial conquistou espaço como fator competitivo para as indústrias, ao agregar valor aos produtos. O design, hoje cada vez mais presente na sociedade, atua como fator importante para o sucesso de um produto, pois, além do apelo estético-formal incorporado ao objeto, imprescindível para a atração do usuário, atua em todo o processo de desenvolvimento de produtos. Para tanto, é imprescindível a sensibilidade para captar o desejo do consumidor e a habilidade em determinar a melhor maneira e a tecnologia adequada para produzir o produto com base na interdisciplinaridade.

O design é uma das atividades que se ocupa da configuração de produtos fabricados em série e considera cinco elementos como fatores principais, determinantes do desenvolvimento de um projeto: um designer que participa do processo de produção de objetos de acordo com os objetivos da sociedade, capacidade técnica e interesses pessoais; um produtor para a produção dos objetos; um consumidor a quem o produto se destina; a sociedade como instituição, que determina normas e representa o interesse de grupos e por fim o produto, enquanto conjunto de estrutura e funções (BOMFIM, 1995).

No entanto, esta atividade ou processo, possui uma definição mais abrangente, pois é também o fator responsável pela “atração” entre o consumidor e o objeto. Segundo Bürdek (2006), o design permite a comunicação entre as pessoas e a definição em grupos sociais podendo estar afastado, como exemplo no design espacial, ou muito próximo, como no caso das roupas, acessórios e objetos. Os objetos têm uma função de integração social, podendo ser vistos como práticos, somente pelo uso, ou podem ser vistos como um modo simbólico, para unir-se a determinado nicho ou grupo.

Um exemplo dos valores simbólicos encontra-se na joalheria. Uma peça de adorno, quando não é produzida em material nobre e passa a ser considerada como jóia de valor, no sentido de investimento, para o usuário esta possui valor sentimental, ou seja, valor de apego. Em outro contexto, quando a peça de adorno lhe remete a alguma outra época ou situação devido ao seu conceito, ou quando carrega valores de status social, de tendência sustentável quando fabricada em materiais ecologicamente corretos, ou quando simbolizam alguma situação, como alianças de casamento, entre outros.

Além dos aspectos simbólicos e dos funcionais estarem intimamente relacionados ao termo design, o aspecto ecológico também deve ser considerado importante. Existem também alguns problemas que o design necessita atender, como a visualização de progressos tecnológicos, a transparência do contexto da produção, do consumo e da reutilização e, se possível, o desvio da projeção de objetos sem sentido (BÜRDEK, 2006). Com isto, torna-se clara a necessidade de criação de produtos inseridos num contexto onde haja respeito ao meio ambiente, bom senso na escolha dos materiais, que atenda em todos os aspectos inerentes a um produto de sucesso e à demanda.

De acordo com o envolvimento da atividade de projeto com o funcional, com o estrutural, estético e com o simbólico, a definição de design publicada pelo *Internacional Council of Societies of Industrial Design - ICSID* (1995), citada por Moraes (1999, p. 86-87) diz que:

“[...]design industrial é uma atividade criativa cujo objetivo é determinar as propriedades formais dos objetos produzidos industrialmente. Por propriedades formais não se devem entender apenas características exteriores, mas, sobretudo, as relações estruturais e funcionais que fazem de um objeto uma unidade coerente, tanto do ponto de vista do produtor como do consumidor. O design abrange todos os aspectos do ambiente humano condicionado pela produção industrial.”

Moraes (1999) dispõe ainda de novas características a serem acrescentadas a esta definição do ICSID para que haja uma reflexão maior sobre a atividade, quando afirma que os designers devem considerar, além dos aspectos já citados, a evolução da tecnologia industrial, os novos materiais, a mudança do comportamento humano, as necessidades do usuário, o advento da informática, os aspectos psicofisiológicos, semiológicos e semânticos dos produtos, o design como centro de estratégias e não



somente como atividade projetual e, por fim, o design como referência de identidade de uma geração e de um tempo.

Niemeyer (2007) coloca que, ao longo do tempo, desde as mudanças no panorama de produção advindas, principalmente, com a Revolução Industrial, o design de produto vem sendo compreendido sob três pontos de vista distintos de prática e conhecimento. É visto como uma atividade artística, valorizando no profissional seu compromisso com a fruição do uso; visto também como um invento ou planejamento: o profissional possui um compromisso prioritário com a produtividade do processo de fabricação e com a atualização tecnológica e por fim, o design de produto é visto como coordenação: o designer tem a função de integrar atividades de diferentes especialistas, atua desde a especificação da matéria-prima, produção, utilização e o destino final do produto. Neste último, o design atua como o artista, como o tecnólogo e o gestor, perpassa por estes três níveis, ou seja, atua com base na interdisciplinaridade.

O design de produto, portanto, busca unir a liberdade de produção advinda da evolução tecnológica e a liberdade de criação, com a finalidade de criar uma cumplicidade entre o consumidor e o produto, sem deixar de atender à demanda da indústria e às limitações que possa vir a ter diante das inovações.

### **2.1.1 Metodologia para projeto de produto**

Metodologia de projeto, segundo Pahl *et. al* (2005), é um procedimento planejado que orienta aos projetistas no desenvolvimento de um produto, incluindo a atuação da intuição, da experiência e talento do projetista. Não se sabe ao certo a época do início de projetos metódicos, no entanto, Cardoso (2008) afirma que a escola Bauhaus, fundada em 1919 por Walter Gropius na cidade de Weimar, na Alemanha, transformou-se no principal paradigma do ensino do design do século XX. Seu maior interesse era o ensino de artes e ofícios.

Anterior a este fato, no período da Revolução Industrial, acontecimento histórico entre os séculos XVIII e XIX, houve intensificação da produção em série nas indústrias e, conseqüentemente, a necessidade de utilização de projetos como base para esta produção. A partir destes fatores, houve a separação entre artista e

artesão nas indústrias, ou seja, a separação entre concepção e execução, o que determinou a aceleração da produção e também na contratação de trabalhadores capacitados para cada etapa específica estabelecida pela indústria, entre eles, designers (CARDOSO, 2008).

Após a modificação pela Revolução Industrial dos métodos de produção e de consumo, a Alemanha foi o primeiro país a utilizar os métodos de ensino de design. Estes métodos foram o principal foco da escola de design Bauhaus na Alemanha, em sua primeira fase, esta caracterizada pela preocupação com o processo pedagógico.

Já Bürdek (2006) aponta que a metodologia do design teve maior aprofundamento a partir de 1960, especialmente na escola *Hochschule für Gestaltung* em Ulm (posterior a Bauhaus), também na Alemanha.

Nesta época, aumentaram as tarefas direcionadas a designers nas indústrias e foram desenvolvidas, testadas e discutidas muitas metodologias. Autores do período descreveram inúmeras maneiras para desenvolvimento de produtos, que envolviam avaliação de alternativas de projeto, processo de projeto com base na sua superformalização, a divisão do projeto em etapas bem definidas, divisão dos problemas de design em seus componentes (estruturação do problema), entre outros.

No contexto do desenvolvimento do design no Brasil, com a implementação dos cursos de design, houve a preocupação para que fosse encontrada uma linguagem formal em design que sintetizasse as concepções artísticas contemporâneas com elementos da tradição nacional (NIEMEYER, 2007). Com implementação dos cursos da ESDI, os primeiros professores de projeto fizeram com que prevalecesse a estética racionalista da Escola de Ulm, resultando no surgimento de outras abordagens em projetos, na busca constante por um design brasileiro. Niemeyer (2007) afirma ainda que as interfaces com o design se apresentam como um campo aberto à pesquisas tecnológicas.

Nas tentativas de se especificar uma metodologia para os projetos, foi considerado, equivocadamente, que o objetivo de uma pesquisa metodológica ao design era restringir um único método. A importância de um método que valorizasse a variedade, para alcançar um conhecimento objetivo, surgiu em 1980 com a propagação das novas tendências de design pelos pós-modernos. Pahl *et. al* (2005),

atualmente defendem que, sem a intuição, o verdadeiro sucesso poderá ficar ausente.

A partir de 1990, a necessidade do usuário passou a ser a nova orientação dos métodos, devido ao surgimento da digitalização. Uma metodologia que foque em soluções satisfatórias e que “seja planejável, otimizável e verificável” tende a inserir o produto no contexto correto, fazendo com que este desperte o interesse do consumidor. Pahl *et. al* (2005) apontam que, para soluções novas e projetos inovadores, a coordenação dos procedimentos possibilita a geração de boas soluções, assim como a estruturação dos problemas e das tarefas facilita a visualização do emprego das soluções.

### **2.1.2 Design de gemas e jóias**

A joalheria é uma arte muito antiga, pois sua existência data desde quando os ancestrais do homem utilizavam conchas e sementes como adorno pessoal. Neste período, as peças contendo estes materiais orgânicos eram utilizadas para representação de tribos e grupos, para identificar caçadores e, posteriormente, como adornos. Adorno é definido como um sinal que comunica, um instrumento com uma função em si mesmo e que possui determinado fim (CODINA, 2000).

A joalheria se desenvolveu de maneira paralela à arte pura. Artistas criaram e desenharam peças para a produção de jóias e as retrataram em quadros exemplares da joalheria de várias épocas.

Com as conseqüências do período da Revolução Industrial na Inglaterra, foi em meados do séc. XVIII que a produção de jóias sofreu modificações, principalmente no consumo. Estas modificações tiveram início quando a produção joalheira passou a refletir as idéias de movimentos da época, como os conceitos propagados pelo *Arts and Crafts* (BENUTTI, SILVEIRA & PINHEIRO, 2009). Este movimento pregava o retorno aos métodos artesanais de produção. Alguns artistas produziram jóias com processos industriais acreditando esta ser a forma de criar joalheria para um público geral, não limitá-la a uma elite. (CODINA, 2000).

No Brasil, até aproximadamente 1970, o design de jóias era desenvolvido por artesãos que fabricavam as jóias em ateliês, alheios às indústrias devido à

discordância do modo com que os empresários e indústrias lidavam com a produção e vendas (BENUTTI, SILVEIRA & PINHEIRO, 2009).

Pode-se afirmar, portanto, que as tentativas de aprimoramento das técnicas de produção joalheira e de ferramentas adequadas são vistas desde os primórdios da civilização, e visam melhor produtividade e qualidade (BRUXEL, ETCHEPARE & KOZEN, 2007) estendendo-se até os dias atuais.

Neste contexto, o design adquire cada vez mais importância nos processos de beneficiamento de gemas e produção de jóias, importância esta percebida, segundo Benutti, Silveira & Pinheiro (2009), em grandes empresas joalheiras que dominam o mercado mundial através de sua marca. Estas empresas investiram em design e obtiveram seu sucesso desde o modo de exposição das jóias, no conceito na criação das formas como na criatividade na cravação das gemas.

A jóia pode ser considerada um objeto de desejo e de investimento e envolve, em sua estrutura, tradicionalmente, gemas e metais preciosos. Atualmente, a produção e a criação também se têm voltado ao uso de materiais e técnicas diferenciados. Esta inovação aproveita as inúmeras possibilidades que a tecnologia dispõe na criação de novos conceitos visando à diferenciação das peças e inserção do produto em um novo cenário de consumo cada vez mais exigente e que ainda atenda aos fatores ambientais, como por exemplo, através da valorização de materiais até então subutilizados na joalheria.

Do volume total de material gemológico extraído, pode ser considerado pequeno o volume que é destinado à produção de jóias e beneficiamento em gemas, uma vez que o mercado tradicional possui exigências quanto à qualidade e aparência de uma gema. Boiabaid (2006) afirma que o Brasil é responsável pela produção de cerca de um terço das gemas de cor do mundo e possui empresas de lapidação, joalheria e fabricação de artefatos diversos. Deste número, muitas são informais e vivem à margem do mercado. Isto se deve ao baixo volume de produção, ao alto valor do produto e ao difícil acesso a máquinas novas e reciclagem do ferramental, o que facilita a informalidade dos estabelecimentos.

Devido à concorrência nacional na produção de jóias, especialmente a partir de 1990, fizeram-se necessárias modificações no panorama de novas tecnologias e processos a serem utilizados na sua fabricação (FONSECA, PEIXOTO & XAVIER, 2006). Incluídos na tecnologia que auxilia neste setor encontram-se os métodos de lapidação, usinagem e técnicas de prototipagem rápida. Estes métodos,

relacionados ao design de minerais, servem para a modificação da superfície e da forma das gemas e materiais gemológicos, com a finalidade de agregar-lhes valor, inseri-los em produtos e no mercado consumidor.

A otimização da produção e do aproveitamento da matéria-prima, por parte das indústrias beneficiadoras e produtoras de gemas do Rio Grande do Sul, poderia levar ao mercado objetos e peças de adorno inovadoras, diferenciadas e de valor agregado, uma vez que estariam desenvolvendo técnicas não difundidas no estado e que poderiam vir a ser um ponto positivo no requisito competitivo.

O segmento de gemas e jóias do Brasil procura desenvolver estilo e design próprios, explorando símbolos da cultura, fauna e flora nacionais além da variedade de materiais gemológicos existentes no país. Foi constatado que o mercado brasileiro é considerado forte, no quesito vendas, e que existe no país um forte movimento de design que poderia ser mais estimulado e orientado. Neste contexto, o segmento joalheiro tem melhorado sua qualidade e competitividade, mas muitas empresas do ramo ainda não aperfeiçoaram o uso sobre o que investiram, ou seja, não inovam (IBGM, 2005).

Para a aplicação de qualquer técnica de beneficiamento de gemas, é necessário o estudo do mineral a ser trabalhado, pois, cada gema possui uma composição química, uma microestrutura cristalina própria que influenciam em uma interferência mecânica. A compreensão das propriedades do material gemológico é essencial para a escolha dos materiais e dos procedimentos a serem utilizados para a lapidação ou usinagem (MOL, SANTOS & TEIXEIRA, 2007).

### ***2.1.3 O design de gemas e jóias relacionado ao Ecodesign***

Nosso planeta possui imensas reservas naturais, e o Brasil, por sua vez, é rico em recursos minerais. No entanto, o consumo e o desperdício excessivos dos recursos naturais, como se apresentam atualmente, tornaram-se um grande impacto ao meio ambiente.

Este desperdício está vinculado ao grande volume de produção de bens de consumo, aliado ao aumento constante de necessidades por parte dos consumidores. O consumidor compartilha de simbolismos e significados oriundos

dos objetos e produtos utilizados como veículo para este fim e buscam uma diferenciação perante a sociedade, geralmente nos grupos sociais onde estão inseridos. Partindo do princípio de que a jóia sempre foi adaptada à sociedade ao longo do tempo e que ela representa o desejo do consumidor, pode-se afirmar que ela, além dos materiais nobres utilizados e de sua estética formal, é uma estrutura simbólica usada por indivíduos para sua representação, seja em tribos, como nos primórdios da civilização, seja na sociedade capitalista. A função simbólica da jóia é um fator muito relevante neste tipo de produto, e pode ser este o caminho da solução para sua adaptação em meio a estas mudanças no ambiente sustentável.

O novo cenário sustentável vem exigindo novas propostas e possibilidades para todos os tipos de produtos, incluindo o joalheiro, especialmente por parte dos designers. Estas novas propostas acontecem na forma e na intensidade de consumo. Neste contexto de novas possibilidades de produtos, há a utilização de diferentes materiais, a qualidade prevalece sobre a quantidade e há o aumento da vida útil dos mesmos, segundo Manzini & Vezzoli (2002).

Relacionado à extração de material gemológico para servir de matéria-prima para a produção de jóias, Bruxel, Etchepare & Brandt (2008) afirmam que este processo ocasiona um impacto ao meio ambiente, devido à abertura de garimpos e minas, sendo necessária a redução deste impacto com a finalidade de colaborar com o meio ambiente. No entanto, esta modificação da mineração torna-se complexa devido à falta de organização no setor.

A partir deste pressuposto, uma das tentativas de uso destes materiais na joalheria com base na premissa do Ecodesign, ou seja, considerando-se o meio ambiente, ocorre durante os processos de beneficiamento, isto é, no aperfeiçoamento dos métodos de beneficiamento dos materiais extraídos. Este aperfeiçoamento pode estar relacionado à inovação tecnológica nas ferramentas e máquinas, inovação nos métodos de lapidação para reduzir o desperdício e também pode estar relacionado à utilização e aproveitamento da maior parte do material extraído como gema, não somente das partes mais valorizadas comercialmente no mercado consumidor tradicional, como é visto hoje.

Segundo Machado (2008), uma das tendências previstas é o consumo consciente, quando afirma que: “as preocupações dos consumidores estão cada vez mais engajadas com as questões que envolvem ecologia, sustentabilidade e responsabilidade social”. Entre as tendências, Machado (2008) também confirma a

valorização do design como identidade, tanto na inspiração quanto na utilização de materiais que caracterizem determinada região.

Frente às novas tendências para os produtos, há uma forte inclinação ao uso de materiais menos agressivos ao meio ambiente, a mistura de materiais e busca de novos conceitos, como por exemplo, o beneficiamento de rejeito mineral.

A ágata do Rio Grande do Sul é um material gemológico ainda subutilizado no setor joalheiro com estética apurada e é destinado a fins com menor valor estético. Este material é abundante e característico da região e gera grande quantidade de rejeito nos processos de beneficiamento e extração. Tanto o rejeito quanto a gema tornam-se alvo de projetos de joalheria e objetos que refletem uma identidade, bem como sustentabilidade e com valor estético mais elevado.

## **2.2 EXTRAÇÃO E MERCADO DE GEMAS**

### ***2.2.1 O mercado de pedras preciosas no Brasil***

O Brasil, por aproximadamente um século e meio, ocupou a posição de maior produtor mundial de diamante. Após a década de 40, outros tipos de minerais adquiriram maior importância e, durante a Segunda Guerra, foram descobertas novas jazidas com o surgimento da demanda de alguns minerais por parte da indústria eletrônica. Mesmo a Índia dominando as técnicas de lapidação e comercialização de gemas, as gemas brasileiras, por sua beleza, ganharam valor no mercado tanto nacional quanto internacional, principalmente exportadas em bruto. Somente em 1963, com a descoberta de jazidas de esmeralda, turmalina, ágata, opala, ametista, entre outros minerais, o Brasil pode consolidar-se como um grande e importante produtor mundial.

Hoje, o país produz cerca de 1/3 de todas as gemas coradas comercializadas no mundo, mas, no entanto, não recebe benefícios suficientes devido à instabilidade da indústria de lapidação (IBGM, 2005).

Devido às suas dimensões continentais, o Brasil apresenta um número expressivo de ocorrência de material gemológico ligadas a vários contextos

genéticos ou situações geológicas peculiares, como os derrames de lava da Bacia do Paraná sobre os estados do Sul do país, incluindo RS, tornando o ambiente propício para a maior produção mundial de geodos contendo ametista e ágata (LICCARDO & CHODUR, 2009). A extração ocorre principalmente em garimpos de pequeno porte e estima-se que, 80% da produção total de material-gemas, lapidadas ou em bruto, são exportadas, como se observa na Tabela 1.

Tabela 1. Exportação brasileira do setor 2003/ 2004 (US\$ mil)

<b>Principais itens</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2004 / 2003 %</b>
Pedras em bruto	47.629	47.550	0
Pedras lapidadas	55.696	77.299	39
Obras e artefatos de pedras	13.456	14.775	10

Fonte: modificado de IBGM (2005)

Uma mineração pode ser definida como de pequeno porte ou pequena escala, segundo Vale (2000), quando, entre outras características, apresenta operações artesanais, a céu aberto, utilização de equipamentos simples e baixo nível de mecanização. Os minerais beneficiados são, geralmente, destinados à joalheria. A indústria joalheira no Brasil é relativamente nova, pois começou a se desenvolver após a Segunda Guerra e, a partir do Plano Real, no ano de 1994, ganhou nos quesitos produtividade e qualidade, tornando-se apta a competir no mercado internacional, como consta nos dados da Tabela 2.

Tabela 2. Maior participação nas exportações de produtos com valor agregado, como jóias com gemas ou gemas beneficiadas (US\$ mil)

	<b>2000</b>	<b>2002</b>	<b>2004</b>	<b>2006</b>
A- Matérias-primas	393	397	461	500
B- Produtos industrializados	244	294	345	500
<b>Total do setor</b>	<b>637</b>	<b>691</b>	<b>806</b>	<b>1000</b>
B / TOTAL	38%	42%	43%	50%

Fonte: IBGM (2005)

No entanto, segundo o IBGM (2005), o beneficiamento das gemas, que inclui a lapidação e fabricação de artefatos diversos em pedras, ainda é feito, na maioria das vezes, por pequenas indústrias e existem poucas que possuem um processo eficaz com a garantia de qualidade e tipos diferenciados de lapidação e beneficiamento, para enfrentar o concorrente mercado que cresce a cada ano.



## 2.2.2 Cenário de pedras preciosas no Rio Grande do Sul

Branco & Gil (2002) apontam que as regiões do Rio Grande do Sul que mais produzem material gemológico são o Médio Alto Uruguai com produção de ametista e a região que inclui os municípios de Soledade, Salto do Jacuí (Figura 1) e Lajeado com principal produção de ágata.

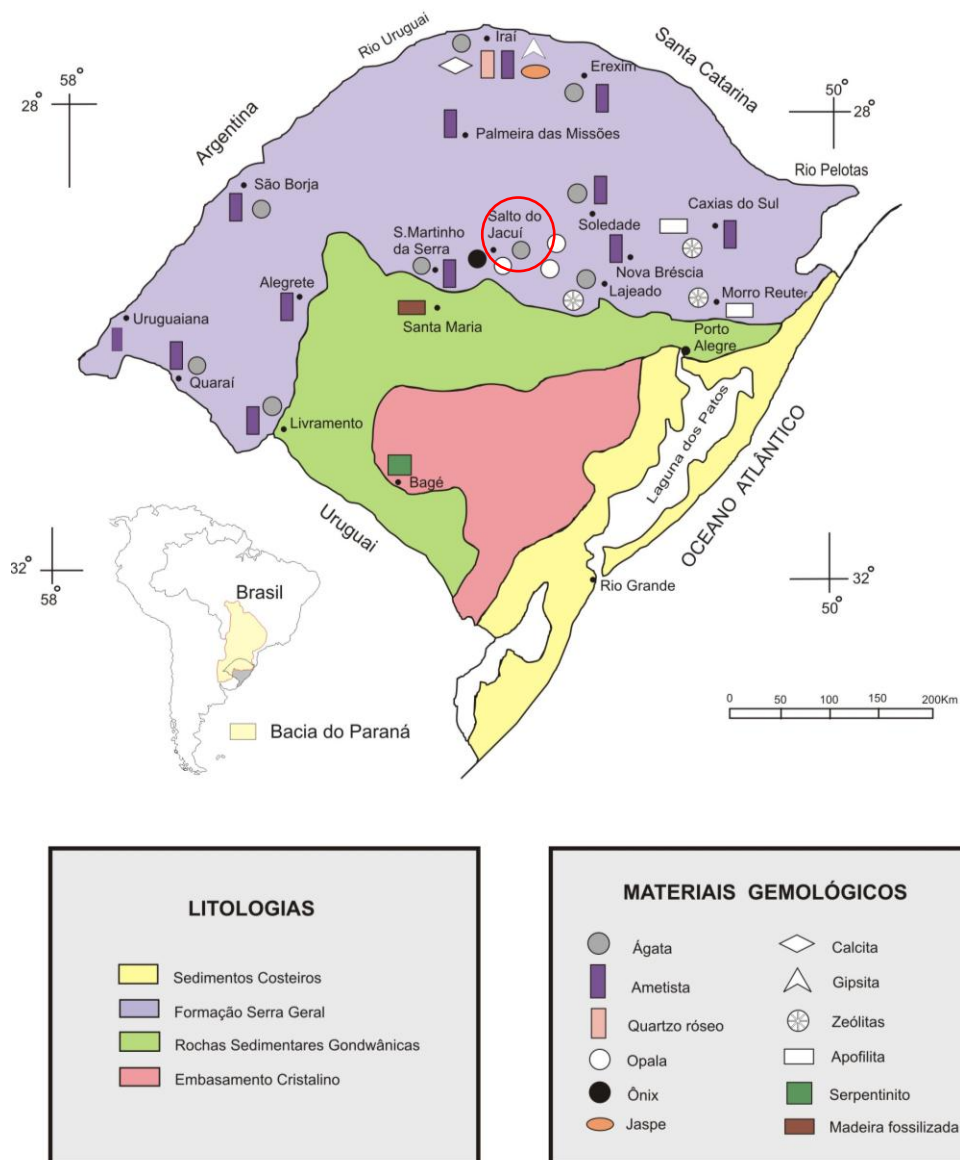


Figura 1. Mapa gemológico da região Sul do Brasil, indicando a localização dos principais depósitos de materiais de interesse gemológico e seu contexto geológico. Em destaque, a área onde se localizam os depósitos de ágata em Salto do Jacuí, RS. Fonte: Modificado de Juchem *et. al*, 2007.

No estado, a ocorrência de ágata é maior que a de ametista e quartzo incolor (cristal-de-rocha). A ágata é encontrada em até 71% das jazidas cadastradas e o município de Salto do Jacuí é o maior produtor, com aproximadamente 80% a 90% da produção total do estado (BRANCO E GIL, 2002).

Neste município, o basalto portador de ágata possui espessura média de 6 metros e é bastante alterado, o que significa que não necessita desmanche da rocha por explosivos e pode ser explorado com auxílio de retroescavadeiras. A pesquisa de ocorrência de geodos é feita por túneis exploratórios com o objetivo de verificar a presença e qualidade de geodos de ágata para então serem feitos os cortes no terreno e o rebaixamento de taludes, que atingem até 60 m (STRIEDER, 2005).

Existem mais de 600 galerias abertas atualmente no estado, porém apenas quinze em atividade, aproximadamente. No ano de 2001, segundo Branco & Gil (2002) a produção advinda da extração de geodos de ágata era de aproximadamente 3.500 toneladas/ano no início de 1998, excluindo-se uma variedade de ágata que somente é utilizada em moinhos e que responde por 50% do consumo.

Segundo Michelin *et. al* (2006), a região produtora de ágata abrange uma área de aproximadamente 200 km<sup>2</sup>. O município de Soledade possui baixa produção, mas, desde o final da década de 70, é o principal centro de beneficiamento, comercialização e exportação de artefatos em material gemológico, principalmente em ágata, e possui as maiores empresas do setor.

Apenas 3% do minério extraído são lapidados, sendo o restante destinado aos artigos decorativos. Os rejeitos são constituídos por fragmentos de geodos mineralizados que não têm um destino comercial imediato segundo os padrões de classificação utilizados pelos garimpeiros, tendo sua qualidade variável (dependendo do interesse econômico). Estes garimpos somente extraem os geodos sem desenvolver nenhuma técnica de beneficiamento, devido ao interesse em aproveitar somente o que lhes trará retorno financeiro imediato (PALMA, 2003). Geralmente, nesta seleção, a ágata é aproveitada e a opala branca é excluída como material não proveitoso.

Há uma rede de produtores que atuam de maneira informal, ausente de garimpos, pois coletam pequenos geodos fora dos garimpos principais e efetuam a venda para comerciantes e empresários. Existem também pequenas empresas, ou locais de beneficiamento destes materiais nos quintais das casas, onde são

efetuadas montagens de produtos de baixa complexidade com ágatas, tingimento deste material e confecção (manufatura) de objetos diversos.

Entre as diversas ocorrências de geodos de ágata, um tipo mais comum é o chamado calcedão, muito apreciado pelos garimpeiros e empresários. Sob este tipo de geodo, segundo Branco & Gil (2002) “aparece uma placa de opala branca [...] acima dessa opala, que não possui valor comercial, há uma zona de ágata cinza, bandada, igualmente sem valor e, sobre ela, uma zona aparentemente homogênea, mas que dá faixas retas e paralelas quando tingida”.

Segundo os mesmos autores, a opala sem jogo de cores, usualmente branca e ocasionalmente com manchas marrons ou cinza-amarronadas pode ser valiosa para coleções, mesmo desprezada pelos garimpeiros. Antes do corte do geodo e beneficiamento, este é classificado sob alguns parâmetros que determinam seu valor, como grau de preenchimento, tipo de preenchimento, peso, dimensões, cor e minerais associados. O grau de preenchimento é utilizado como parâmetro de separação dos geodos em duas categorias antes de serem levados à serra: a denominada pedra de massa totalmente preenchida e o geodo, que é oco ou parcialmente preenchido.

A abundância de extração de minérios no estado vem acompanhada de dois fatores preocupantes: além da exportação deste produto em bruto, o fator ambiental, extremamente afetado pela ação de extração e deposição irregular de rejeitos. Os fatores negativos da deposição dos rejeitos nas encostas são os eventuais desmoronamentos sob ação de chuva, além do desperdício de matéria-prima não renovável e o assoreamento de rios.

O rejeito da mineração é estudado na presente pesquisa, em virtude do enorme potencial que possui como matéria-prima para formação de novos produtos, somado ao impacto ambiental que provoca, quando descartado indiscriminadamente na natureza.

### **2.3 BENEFICIAMENTO DE ÁGATA E OPALA NO RS**

A produção de objetos e artefatos de materiais gemológicos no município de Soledade, RS, ocorre de forma seriada, com pouca ou nenhuma inovação

tecnológica e diferencial estético. Esta produção torna-se distante do cenário das tendências atuais de consumo e da utilização das possibilidades tecnológicas existentes para sua melhoria. Existem muitas empresas de beneficiamento de pequeno porte que funcionam na informalidade, como por exemplo, no município de Ametista do Sul. Na Figura 2 se observa um conjunto de chaveiros com ausência de um acabamento adequado, elaborado em chapas de ágata e cristal de ametista.



Figura 2. Chaveiros produzidos com chapas de ágata e detalhe com ametista  
Fonte: Autor

Nas maiores empresas, o processo de beneficiamento abrange desde o armazenamento dos geodos de ágata até o corte e processos diversos de interferência no material. O material gemológico comercializado em Soledade consiste em três possibilidades: venda de geodos em lotes, exportação em bruto e beneficiamento e comercialização pela própria empresa (COSTENARO, 2005).

Branco & Gil (2002) afirmam que existe pouca criatividade na produção e beneficiamento da ágata do estado. A confecção de objetos se limita, há muito tempo, de artigos decorativos como esferas, encostos de livros, chaveiros, chapas, cabo de talheres, entre outros, como observado na Figura 3.



Figura 3. Cabo de talheres confeccionados em ágata  
Fonte: Schumann (2006)

Nos últimos anos há iniciativas de combinar a ágata com outros materiais, como madeira, couro e metal, obtendo-se alguns produtos de boa qualidade funcional, principalmente. Ressalta-se que muitos carecem de design, por possuírem acabamento insuficiente e ausência do quesito reprodutibilidade. Mudanças na produção e inovação no beneficiamento deste material podem levar às indústrias beneficiadoras vantagens competitivas.

Boiabaid (2006) sugere que a rivalidade competitiva somente é intensificada quando a empresa é desafiada pelas ações do concorrente, ou seja, se uma empresa concorrente inova em um produto e este adere ao gosto do consumidor e do mercado, as outras empresas necessitam sair da estagnação e também aderir à inovação de seus produtos.

Supondo-se que as empresas das regiões beneficiadoras não possuem uma concorrência maior no estado, falta aos empresários do ramo o incentivo para investimentos em tecnologia e criatividade para aperfeiçoar o uso da matéria-prima, inclusive da opala branca que é considerada rejeito. Em frente às técnicas de beneficiamento e matéria-prima disponíveis, as empresas gaúchas de beneficiamento utilizam técnicas que se tornam obsoletas perto da riqueza e capacidade da matéria-prima existente, especialmente quando defrontadas com as atuais tendências de mercado.

A ágata é o material mais abundante e mais utilizado no estado para a fabricação de objetos e artefatos, no entanto, não há preocupação na inovação dos produtos. Neste mesmo contexto, a opala branca, resultante do processo de extração dos geodos de ágata, é desvalorizada aos olhos de empresários e garimpeiros, e não causa interesse para sua inserção na produção de novos produtos. Branco & Gil (2002) afirmam que, “a glíptica, arte de gravação em materiais gemológicos formados por camadas de cores diferentes, praticamente não existe no Rio Grande do Sul, o que é muito lamentável. O produto (opala branca com ágata) presta-se a valiosas obras de arte [...]”. A arte da produção de camafeus é tradicional e é feita há muitos anos em países como Alemanha, na cidade de Idar-Oberstein com a ágata branca, e na Itália, mais especificamente em Grieco, em conchas e corais.

O corte em chapas e tingimento da ágata ainda são os métodos mais efetuados nas empresas. Segundo IBGM (2005), mesmo com tecnologia avançada para lapidação em grande volume, o custo da mão-de-obra (encargos sociais) não

permite a concorrência com países do oriente. Deste modo, predominam no Brasil os métodos tradicionais de lapidação artesanal para gemas de maior valor. A padronização (calibração) das gemas é fundamental para impactar as exportações, inserida em um cenário onde a lapidação e beneficiamento para produção de artefatos diversos em pedras se encontram desatualizados. Para tanto, há necessidade de novos equipamentos para otimizar a produtividade seguida de qualidade.

Existem ainda métodos que envolvem tecnologias mais inovadoras no beneficiamento mineral, como por exemplo, a usinagem por comando numérico computadorizado, tratada nesta pesquisa.

### 2.3.1 Corte em chapas

No Rio Grande do sul, após a extração, os geodos são classificados por tamanho e qualidade. Os que atingem de 5 a 10 cm de diâmetro são destinados ao corte em chapas, os menores que 5 cm destinam-se a chaveiros e produção de pequenos artefatos (Figura 4), e os que alcançam o tamanho entre 15 a 25 cm destinam-se à exportação.



Figura 4. Pedaçõs pequenos de ágata tingida, transformados em pingentes  
Fonte: Autor

Quanto à qualidade, a ágata que serve para exportação possui preço superior à destinada à indústria local. A ágata encontrada no mercado nacional na

forma de objetos e chapas (Figura 5), possui coloração cinza escuro, de cor e composição heterogêneos (BRANCO & GIL, 2002).



Figura 5. Chapas de ágata expostas para venda  
Fonte: Autor

Os geodos previamente selecionados são submetidos a uma lavagem para que seja retirado o excesso de argila. Posteriormente, passam ao setor de corte e são serrados em chapas de tamanhos diversos. Nesta etapa de corte se obtém, segundo Costenaro (2005), um aproveitamento de, aproximadamente, 90%.

O corte em chapas é uma das formas mais efetuadas nas empresas do estado. Os procedimentos de corte são tradicionais e são efetuados em máquinas automáticas e de simples manutenção (Figura 6), por serras circulares providas de pós de diamante e refrigeração feita por óleo marítimo.



Figura 6. Corte em chapas de ágata em disco diamantado  
Fonte: Autor

Após a obtenção das chapas e efetuado o polimento, são enviadas ao setor de limpeza para remoção da película de óleo oriunda do corte. Em seguida, as peças são lavadas em água corrente e secas ao sol ou com auxílio de uma estufa.

### 2.3.2 Tingimento

O processo de tingimento de ágata é desenvolvido no mundo todo. Segundo Schumann (2006) os antigos romanos já tingiam ágatas e, em Idar Oberstein, centro mais importante de polimento e tingimento de ágata, o tingimento é feito desde os anos 20 do século XIX. O mesmo autor mostra que, geralmente, são utilizados corantes inorgânicos, uma vez que os orgânicos não são estáveis à luz.

A ágata extraída de garimpos do município de Salto do Jacuí permite a introdução dos corantes em seu interior (Figura 7), pois possui como estrutura grãos de quartzo microcristalino que formam bandas fibrosas, com diferentes graus de porosidade, característica física fundamental para impregnação pelos agentes de coloração (SILVA, PETER & SCHNEIDER, 2007).



Figura 7. Chapas de ágata tingidas  
Fonte: Autor



Zenz (2005) afirma que a ágata do Brasil possui uma porosidade de 0,15 a 0,45%, sendo que, as camadas com menos porosidade são, geralmente, da cor branca. A prática de tingimento de ágata, segundo o autor, é criticada por muitos empresários ou colecionadores, principalmente devido às cores utilizadas, consideradas muito vibrantes e artificiais. Ágatas de coloração cinza atingiram tons vermelhos intensos através da ativação de partículas de ferro pela ação do calor, processo muito realizado no Brasil e Uruguai. As de coloração preta são imersas em solução de mel ou açúcar por cerca de três semanas, e, posteriormente, impregnadas por ácido sulfúrico concentrado (ZENZ, 2005).

O tingimento pode ser a frio ou a quente. O primeiro caracteriza-se o por ser mais demorado, mas com cor final estável, o que nem sempre ocorre com o tratamento a quente (BRANCO & GIL, 2002).

### **2.3.3 Lapidação**

A lapidação de um material gemológico consiste em um processo de beneficiamento que agrega valor ressaltando sua beleza (características ópticas e morfológicas) através do uso de substâncias abrasivas, como óxidos de alumina, lixas, rebolos diamantados etc.

Segundo Schumann (2006), a origem da lapidação de gemas encontra-se na Índia. Aproximadamente no ano 1400, as faces ou planos de clivagem naturais dos minerais eram polidos para aumentar o brilho e ressaltar a transparência. No entanto, a ágata já havia sido polida anteriormente com utilização de areia, no formato de cabochão ou plana.

Posteriormente, por volta do século 13 *d.C.*, surgem os tipos de lapidação facetados. São realçados os efeitos ópticos do mineral, como brilho e dispersão da luz. A partir do século XX, segundo Filho, Mol & Rocha (2005), os parâmetros dos diversos tipos de lapidação tornaram-se mais definidos, devido sua importância à aparência das gemas.

Na lapidação, são muitos os fatores que influenciam na aparência de uma gema facetada: físicos, de absorção e reflexão da luz; as propriedades do material

gemológico; o polimento da superfície; o tipo de luz incidente e condições de observação (FILHO, MOL & ROCHA, 2005).

MacNevin & Holmes (1980) afirmam que, para os propósitos de joalheria, as gemas transparentes geralmente são facetadas e as que variam de translúcidas a opacas são transformadas em cabochões (arredondadas). O objetivo do facetamento é a reflexão interna da luz. Quando um feixe de luz incide na superfície de uma gema, parte deste feixe é refletido e parte é refratado, através da interface ar – gema. Este feixe refratado repete o comportamento dentro da gema, incidindo-se nas outras superfícies de interface e refletido.

A lapidação mais comum em opala é a do tipo cabochão, (Figura 8). Caracteriza-se por faces lisas e arredondadas. A opala branca não possui transparência suficiente para o corte em facetas (faces planas), por este motivo é usualmente lapidada neste formato.



Figura 8. Opala branca e translúcida, respectivamente, lapidadas em formato cabochão  
Fonte: Autor

## 2.4 NOVA TECNOLOGIA PARA BENEFICIAMENTO DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS

Além das possibilidades de beneficiamento existentes e já desenvolvidas no Estado com o material gemológico oriundo de seus garimpos e jazidas, existem outros métodos que envolvem tecnologias mais avançadas. Com intuito de verificar

e testar outras possibilidades de agregação de valor à ágata e opala branca, é descrito neste tópico a usinagem CNC, com objetivo de produzir camafeus.

#### **2.4.1 Usinagem por comando numérico computadorizado**

Objetos com formação de relevo já foram explorados há tempos. Enfatiza-se a confecção de camafeus e entalhes por métodos manuais com auxílio de ferramentas ou mecanização. As pedras gravadas tornaram-se freqüentemente utilizadas na Idade da Pedra como ornamentos, selos pessoais e amuletos, e tornaram-se populares a partir do século VII. Desta mesma época datam os primeiros camafeus ou glípticas (RIBEIRO, 1998).

Atualmente, este processo de formação de relevo em materiais gemológicos pode ser feito com auxílio da tecnologia de usinagem CNC. Ferraresi (1986) define uma operação de usinagem como aquela que confere à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens.

A fabricação por usinagem CNC, segundo Faller, Silva & Kindlein (2006), é um dos coadjuvantes da evolução tecnológica, juntamente com o desenvolvimento do design de produto. Segundo os autores, o surgimento dessa tecnologia só foi possível após a criação da automação e da informática.

O processo de usinagem CNC envolve uma série de etapas. Uma delas é a escolha ou criação de desenhos ou formas, utilizando-se *softwares* vetoriais ou imagens oriundas de outras fontes. Estes desenhos são enviados ao *software* CAM<sup>®</sup> (*Computer Aided Manufacturing*) e são definidos volumes, medidas e as espessuras que se pretende com a usinagem, além dos parâmetros (avanços) de usinagem. Estes avanços referem-se à ferramenta (fresa) utilizada para efetuar o desbaste do material, definem a velocidade de avanço desta ferramenta, e levam em consideração suas dimensões e o material que será usinado. Ocorrem no sentido vertical e no sentido lateral.

No processo de usinagem CNC é também preestabelecida a estratégia da usinagem, para orientação do equipamento nos passos que deve seguir ao longo do processo. Posteriormente, estas informações são salvas na linguagem do programa da fresadora e emitidas ao equipamento de usinagem CNC.

A função básica da usinagem CNC é conferir volume e forma a um bloco de material. O processo pode colaborar no beneficiamento de materiais diversos, inclusive os gemológicos, pois permite a reprodução de desenhos e formas pré-estabelecidas em detalhes com grande precisão dimensional sob a forma de relevos. Permite também, com uso de criatividade e conhecimento da técnica, a produção de objetos inovadores e únicos, que podem ser reproduzidos em série.

O método de usinagem em materiais gemológicos, utilizado por Bruxel, Etchepare & Konzen (2007), consiste em remover material de um bloco sólido através do equipamento Fresadora CNC. Na usinagem deste tipo de material existe a necessidade de refrigeração por água, pois os minerais, quando expostos a temperatura elevada, tornam-se sucessíveis a rachaduras e quebra. As propriedades do material usinado podem ser modificadas durante este processo devido à ação da pressão da ferramenta contra o material, trepidação do equipamento fresador e atrito interno do material exposto ao processo (FALLER, SILVA & KINDLEIN, 2006).

Este processo é uma ferramenta de auxílio ao beneficiamento e transformação de minerais e materiais gemológicos diversos, pois permite formas mais complexas que a lapidação comum, ou que o trabalho artesanal, além de ser uma ferramenta inovadora quando utilizada em materiais gemológicos.

## **2.5 MATERIAIS ESTUDADOS**

### ***2.5.1 Definição de mineral e gema***

Mineral é um constituinte natural, inorgânico e sólido da crosta terrestre, e a maioria possui composição química e estrutura cristalina definida. Gema é todo o mineral beneficiado, diferenciando-se por sua beleza e raridade (SCHUMANN, 2005). Quando o material gemológico não possui estrutura cristalina, este é denominado amorfo, como exemplo, a opala do tipo A (amorfa).

### **2.5.2 Opala branca**

Para MacNevin & Holmes (1980), a opala é uma forma de sílica hidratada de fórmula química  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , onde a proporção de água na composição é variável. O conteúdo de água varia de 1 a 21 %. Quando o conteúdo de água varia de 6 a 10 % a opala é mais valorizada como gema. Porém, Reyes, Ostrooumov & Fritsch (2005) afirmam que este conteúdo varia entre 2 a 20%, segundo o tipo de opala.

A água presente na sua estrutura pode ser a causa do fenômeno de desestabilização, segundo os autores, especialmente em variedades de opala preciosa, de alta qualidade e muito valorizada como gema. Este fenômeno trata-se da perda de água presente no interior do material.

Esta desidratação pode ocorrer após tratamentos mecânicos, como por exemplo, o polimento, formando uma rede de fissuras, muito comum na opala amorfa (denominada opala A) e também podendo ocorrer espontaneamente, com o passar do tempo. Este problema é uma característica conhecida deste material gemológico. No entanto, é pouco estudado do ponto de vista científico, prático e gemológico e pode vir a ser uma oportunidade de pesquisas (REYES, OSTROOUMOV & FRITSCH, 2005).

Os autores ainda consideram a opala como sendo uma forma de sílica hidratada amorfa ou com baixo grau de cristalinidade. Em uma das primeiras análises de opala por difração de raios-X, constatou-se que o material era amorfo (sem sistema cristalino). Posteriormente, a opala foi caracterizada como um agregado cristalino, com uma estrutura interna mais ou menos desordenada (FRONDEL, 1962). Para o autor, portanto, a opala é considerada como uma variedade de cristobalita.

Portanto, a opala pode ser estruturada internamente de tal modo formando três tipos: opala amorfa (opala A), opala cristobalita (opala C) e opala cristobalita - tridimita (opala CT). A opala A tem sido a mais estudada, no que diz respeito à microestrutura, segundo Reyes, Ostrooumov & Fritsch (2005). A opala CT tem sido pouco estudada, e sabe-se somente que é formada por grãos muito finos de natureza incerta.

Neste sentido, há uma grande variedade de estruturas que se comportam de maneira diferente diante as interferências e tratamentos. O comportamento térmico da opala, por exemplo, depende diretamente de sua estrutura, como no caso da opala CT, onde água é eliminada por difusão através da rede de sílica que forma sua estrutura.

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. Outra característica da opala é a ausência de clivagem, ou seja, quando partida, não segue um plano determinado. A clivagem está relacionada com o retículo do cristal, com a propriedade de coesão dos átomos e é importante ser considerada no momento da lapidação.

Em suas variedades gemológicas, incluem-se: a opala nobre, que possui opalescência e jogo de cores, a opala de fogo que é transparente com coloração que vai do amarelo (Figura 9 A) ao vermelho e a opala comum, onde se inclui a opala branca (Figura 9 B). A opala comum não apresenta jogo de cores nem opalescência, varia de translúcida a opaca e ocorre em diversas cores.

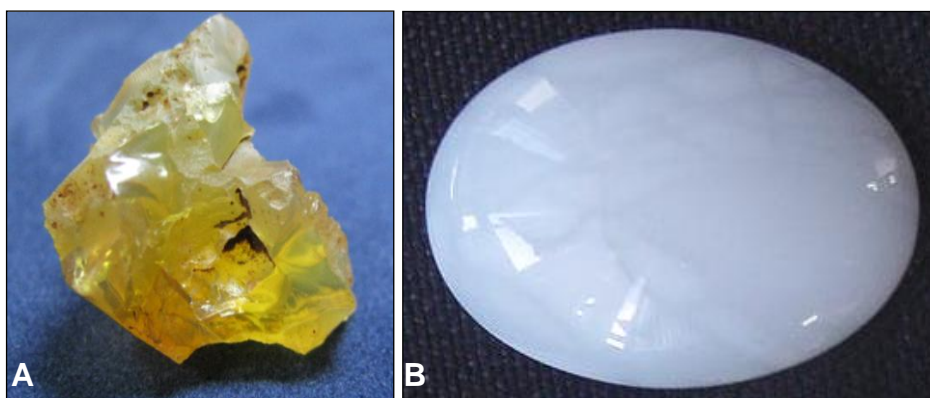


Figura 9. Variedades gemológicas de opala: em (A), opala de fogo em estado bruto e em (B) opala branca formato cabochão, ambas de Salto do Jacuí, RS. Amostra de opala de fogo cedida por Augustin. Fonte: Autor

Segundo Augustin (2004), no Brasil, há ocorrência de opalas nobres de alta qualidade no estado do Piauí, no município de Dom Pedro II, onde a extração é intensa.

### 2.5.2.1 Jogo de cores e opalescência

O jogo de cores é a característica que mais valoriza a opala no mercado. Também denominado opalização, é uma característica distinta de opalescência, muitas vezes confundidas como sendo sinônimas. Observa-se o fenômeno do jogo de cores nas Figuras que seguem:



Figura 10: (A) opala australiana, (B) opalas mexicanas e (C) opala com jogo de cores na rocha  
Amostras do acervo do Labogem – UFRGS  
Fonte: Autor

A opalescência caracteriza-se por um aspecto leitoso ou de brilho opalino, ou seja, típico da opala e é uma característica ausente na opala comum. No microscópio eletrônico, com 20000 aumentos pode-se observar a causa da opalescência como sendo a presença de pequenas esferas de 1/10000 de mm do mineral cristobalita em uma massa de sílica gel, que provoca os fenômenos de interferência ou reflexão (SCHUMANN, 2006).

A opalização é o jogo de cores característico da opala e varia de acordo com o ângulo observado. Segundo Schwarz (1984), a perda de água da opala ocasiona fraturas e enfraquecimento do jogo de cores. Para o autor, a opala é uma rede de difração natural construída de pequenas esferas de sílica amorfa, que permite a produção do efeito óptico. Este efeito é resultado da superposição da difusão e difração da luz. As esferas de sílica são transparentes, no entanto, os interstícios (espaços) difundem a luz devido à mudança do índice de refração nos pontos de contato, como observado na Figura 11. Estes interstícios entre as esferas da opala nobre apresentam arranjo tridimensional ordenado e são preenchidos por um gel, ou massa de sílica-gel.

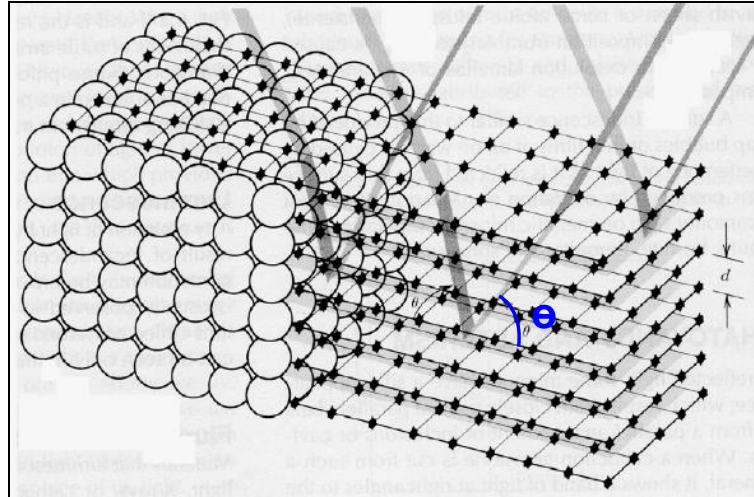


Figura 11. Jogo de cores: os raios de luz penetram no arranjo de esferas de sílica e refratam-se, quando o feixe retorna à atmosfera é dissociado com o mesmo efeito de um prisma. Modificado de Darragh (1976)

A opala comum possui uma disposição irregular das esferas de sílica, ao contrário da opala nobre, fator que não permite a ocorrência do jogo de cores. Os resultados de uma eletromicrografia podem ser observados na Figura 12, e se pode comparar a estrutura da opala preciosa com agrupamento regular das esferas de sílica (A) e a opala comum com arranjo irregular das esferas (B).

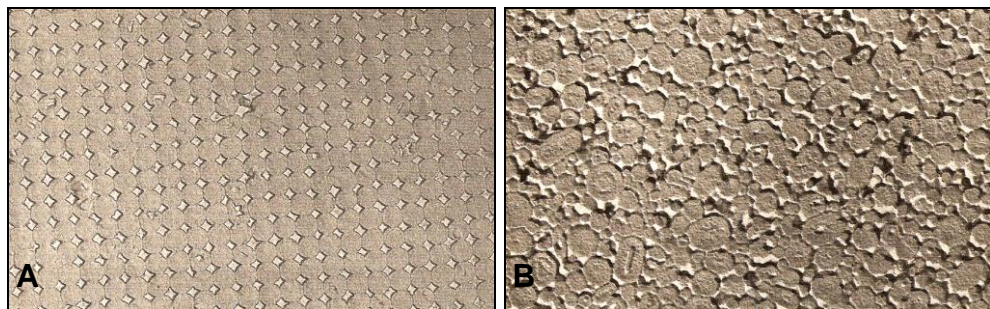


Figura 12. Micrografia eletrônica. (A) opala preciosa demonstrando o agrupamento regular das partículas de sílica e (B) opala comum com arranjo irregular das esferas. Fonte: MacNevin & Holmes (1980)

Na opala comum, ou branca, as esferas de sílica possuem tamanhos e arranjos irregulares. As esferas de sílica constroem a rede de difração, formando filas e camadas inequidistantes e possuem diâmetro em torno de 150 a 400 nm. Estas esferas são compostas por esferas primárias menores formadas por empacotamento irregular tridimensional de tetraedros de  $\text{SiO}_4$ . A água fica entre as esferas primárias.



O jogo de cores varia com o ângulo de luz incidente e diâmetro das esferas. A intensidade do jogo de cores depende do arranjo regular das esferas e dos interstícios, da dimensão dos interstícios e de seu enchimento. A dimensão dos interstícios também influencia na transparência da opala, pois, quanto menores, maior a transparência (SCHWARZ, 1984).

### **2.5.3 Ágata**

A ágata é uma variedade micro a criptocristalina de quartzo, consiste de  $\text{SiO}_2$  e pertence, portanto, ao grupo dos silicatos. Sua dureza varia de 6,5 na Escala Mohs, sua densidade varia de 2,49 a 2,64, sua fratura é conchoidal e, quando está estruturada em camadas, zonas de fraqueza podem ocorrer paralelamente a estas (ZENZ, 2005).

A ágata possui, muitas vezes, porosidade de 0,15 a 0,45%, fator que possibilita a introdução de pigmentos em sua estrutura. Por este motivo, este material gemológico é muito utilizado em artefatos e é muito vendido como chapas em diversas cores.

Sobre a formação da ágata surgem diversas teorias. Uma delas defende a idéia de que uma solução rica em sílica entrou em uma cavidade de determinada rocha através de dutos. Esta solução é depositada em camadas e, em alguns casos, preenchendo a cavidade da rocha em questão. Muitas vezes, esta cavidade é deixada em aberto, e a superfície interna é preenchida por pequenos cristais de quartzo, ou toda cavidade pode ser preenchida por quartzo cristalino (WEBSTER, 1983). Entretanto, nem esta teoria nem outras teorias discutidas até os dias de hoje sobre a formação da ágata foram completamente comprovadas ou determinadas.

Segundo Schumann (2006), a ágata do Rio Grande do Sul possui uma coloração acinzentada, sendo, por este motivo, destinada à prática do tingimento. Também definida como uma calcedônia com bandas, ocasionalmente mesclada com um pouco de opala branca, a ágata pode conter bandas de cores distintas ou de tom uniforme. Sua transparência é variável: de quase transparentes a opacas. A maioria, em forma de discos, é translúcida.

Zenz (2005) afirma que, inclusões de outros minerais entre os microcristais da ágata, ou calcedônia, ocasionam cores diversas. Estas inclusões podem somar um total de 0,5 % de seu peso total. Outras substâncias, além destas inclusões, são outros minerais que podem ter-se inserido nas cavidades dos geodos de ágata, como por exemplo, o quartzo macrocristalino incolor (cristal-de-rocha), ametista, opala, entre outros.

A ágata é encontrada possuindo alguns milímetros a vários metros de circunferência, em rochas vulcânicas pobres em sílica. Se o interior da cavidade não fica cheio de ágata, podem formar-se cristais bem desenvolvidos no espaço restante, como por exemplo, cristal de rocha, ametista, quartzo fumê, entre outros, conferindo à rocha a denominação de drusa.

## **2.6 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS**

A caracterização de minerais e demais materiais gemológicos é um procedimento importante para identificação destes materiais e verificação de sua procedência. Conforme os equipamentos utilizados e a tecnologia disponível, é possível a verificação de sua autenticidade, analisar sua composição e estrutura interna para o aproveitamento deste recurso mineral de forma otimizada. A alguns anos atrás, a caracterização de minerais e materiais gemológicos era pouco empregada em rejeito de empresas de beneficiamento. O material era descartado sem conhecimento das suas características físicas, químicas, mineralógicas e, conseqüentemente, da resposta do mineral ao processo de beneficiamento. Esta situação vem mudando nos últimos anos, e isto pode ser devido a questões ambientais e escassez de minério (BORGES, LUZ & FERREIRA, 2008). O conhecimento dos rejeitos minerais pode vir a favorecer seu aproveitamento como subproduto na própria indústria, ou em outro segmento industrial. Assim, com o reuso, minimiza-se o impacto ambiental e inova-se em produtos.

O estudo da composição dos materiais gemológicos, mais especificamente da opala e da ágata, serve para verificação e análise do tipo de rejeito que existe nos garimpos de Salto do Jacuí, uma vez que, a olho nu, observa-se que a maior parte deste material é de cor branca.

Através das análises efetuadas no material estudado, da avaliação dos fatores envolvidos no processo de usinagem CNC, tipo de ferramentas utilizadas, dos avanços e parâmetros do processo e da avaliação posterior à usinagem, obtém-se no resultado o reflexo desta interação. Verifica-se então, a relação entre estes parâmetros e a resistência do material gemológico ao fresamento.

A caracterização de materiais gemológicos envolve também o estudo das inclusões. Duarte *et. al* (2003) sugere que o estudo das inclusões é de extrema importância. Inclusão, segundo Schumann (2006), são imperfeições no interior da gema, que pode ser uma matéria estranha ou uma irregularidade na rede interna do cristal. Na maioria das vezes, somente uma análise microscópica pode identificar essas inclusões. Duarte *et. al* (2003) afirma que inclusão, em gemologia, abrange, além das inclusões sólidas e fluidas, fraturas secas e preenchidas, zonação de cor, linhas de crescimento, clivagem e geminados, dentre outras. O estudo das inclusões fornece subsídios para identificação da origem da gema, na distinção entre gemas naturais e sintéticas. Contribui ainda para a previsão de efeitos ópticos e indica quais técnicas empregar para melhoria da qualidade da gema. Além disso, certos arranjos espaciais em que ocorrem as inclusões podem determinar a melhor forma de lapidação.

Para Juchem & Brum (2008), a análise de inclusões é o método mais utilizado e mais seguro para determinar se a gema é natural ou sintética, uma vez que as demais propriedades físicas e ópticas podem ser idênticas à de sua equivalente natural.

Augustin (2004) efetuou uma pesquisa sobre a opala de Salto do Jacuí. As análises laboratoriais das gemas serviram para caracterizar química e mineralogicamente os diferentes tipos de opala existentes na região.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV), fluorescência de raios-X, difração de raios-X (DRX), a leitura do índice de refração e a medida da microdureza, foram realizados para a avaliação da superfície do material, da composição, da cristalinidade e outras características inerentes ao material.

### **2.6.1 Fluorescência de raios-X**

A técnica de análise por fluorescência de raios-X (XRF) pode ser utilizada para avaliar qualitativamente ou quantitativamente a composição química em amostras de materiais diversos. A fluorescência de raios-X permite analisar, geralmente de modo não destrutivo, vários elementos simultaneamente. É uma técnica que possui muitas vantagens, como ser de baixo custo, alta exatidão, possuir ampla capacidade de detecção de elementos, entre outras. Os resultados adquiridos pela análise de fluorescência de raios-X “são baseados na medida das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitada” (FILHO, 1999).

Augustin (2004) explica que, “quando um feixe de raios-X incide sobre a amostra, a mesma produz uma radiação secundária, através de luz (fluorescência) na região do espectro eletromagnético correspondente aos raios-X.” Nas análises realizadas pelo autor nas amostras de opala de Salto do Jacuí, as radiações produzidas por estas amostras objetivaram a identificação e a estimativa da concentração de elementos químicos presentes nas mesmas, variando os conteúdos de sílica e alumínio e, em todas as amostras, encontrou-se CaO, Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O também em teores variáveis.

### **2.6.2 Difratomia de raios-X**

A difratometria de raios-X é utilizada como ferramenta qualitativa para análise de fases minerais. Para Costa & Neumann (2007), a análise de minerais é fundamental para caracterização tecnológica de minérios e rejeitos para, entre outras finalidades, a definição da viabilidade de aplicações de maior valor agregado destes minerais.

As análises por difratometria de raios-X efetuadas em amostras de opala de Salto do Jacuí, por Augustin (2004), não evidenciaram, em nenhuma amostra, características de opala A, mas mostrou a presença dos outros dois tipos de opala, a

opala C e opala CT. Esses dois tipos de opala, não sendo amorfas, classificam-se no grupo das opalas cristalinas. Diferenciam-se através da relação dos picos dois teta ( $2\theta$ ) iguais a 20,6 e 21,7 Angstrom, representando, respectivamente, os picos da tridimita e da cristobalita (Augustin, 2004).

Ainda tendo como base as análises por difratometria de raios-X realizadas por Augustin (2004), confirma-se que a diferença de cristalinidade, para diferenciação entre opala CT ou opala C não tem influência na cor das amostras, ou seja, não há predominância de uma cor em um tipo de opala.

### **2.6.3 Índice de refração**

O grau de refração da luz nos cristais é constante nos vários tipos de gemas. É, portanto, uma maneira de identificação de materiais gemológicos e minerais.

O índice de refração, segundo Schumann (2006), é definido como a relação proporcional entre a velocidade da luz no ar e no material. O desvio do raio de luz provém da redução de sua velocidade quando penetra em outro meio, no caso, o material gemológico. Os índices das gemas variam e, em alguns tipos denominados birrefringentes, possuem dois índices.

Nas substâncias amorfas, como a opala, a luz se propaga sempre com a mesma velocidade em qualquer direção considerada. Como consequência, estas substâncias apresentarão apenas um índice de refração, qualquer que seja a direção em que um raio de luz se propagar. Esta propriedade denomina-se Isotropia, e as substâncias que a possuem são denominadas Isótropas. O equipamento utilizado para analisar e definir o índice de refração de um material gemológico é denominado refratômetro (JUCHEM & BRUM, 2008).

Segundo análise feita por Augustin (2004) em amostras de opala oriundas do Salto do Jacuí, os índices de refração lidos variaram entre 1,439 a 1,475. Conforme Schumann (2006), os índices de refração da opala alternam entre 1,37 a 1,52.

#### **2.6.4 Microdureza**

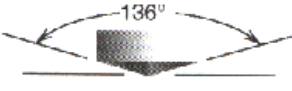

Callister (2002) define dureza como “uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada”.

Os ensaios de dureza são realizados com mais frequência do que qualquer outro ensaio mecânico. Isto se deve à simplicidade e baixo custo dos equipamentos de ensaio, o corpo de prova não é fraturado, nem excessivamente deformado, apenas uma pequena impressão no material é a única deformação.

Antes, os ensaios de dureza de materiais diversos eram realizados de forma qualitativa e considerados também como arbitrários, baseados nos minerais naturais, construindo-se uma escala a partir da habilidade de um material em riscar a outro, considerado mais macio. A escala definida a partir destas medições é denominada Escala de Mohs, e se estende do 1 ao 10, sendo o diamante o material considerado mais duro. Com o tempo foram desenvolvidas técnicas quantitativas para determinação da dureza, pelas quais um penetrador de pequenas dimensões é forçado contra a superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação. Faz-se a medida da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual por sua vez é relacionada a um número índice de dureza: quanto mais macio o material, maior e mais profunda é a impressão e menor é o número índice de dureza (CALLISTER, 2002).

Para medição de dureza de materiais gemológicos, o método utilizado é o ensaio de microdureza Vickcers, também chamada de pirâmide de diamante. Procede-se o ensaio da seguinte forma: um penetrador de diamante com geometria piramidal é forçado contra a superfície do corpo de prova. As cargas aplicadas são muito menores do que para outros ensaios, variando entre 1 a 1000 g. A impressão resultante é observada e medida no microscópio. Essa medição é convertida em um número, o índice de dureza, como se observa no Quadro 2.

Quadro 2. Técnica de medida de microdureza: Vickers. Fonte: Modificado de Callister (2002)

Ensaio	Penetrador	Forma de impressão		Carga	Fórmula para número – índice de dureza
		Vista lateral	Vista superior		
Microdureza Vickers	Pirâmide de diamante			$P$	$HV = 1,854P/d_1^2$

É necessária uma preparação cuidadosa da superfície do corpo de prova, como lixamento e polimento, a fim de obter-se uma impressão bem definida que possa ser medida com precisão. O método Vickers é conhecido como método de ensaio de microdureza com base na carga e no tamanho do penetrador, é adequado para medição de dureza de regiões pequenas e selecionadas no corpo de prova (CALLISTER, 2002). Por este método são realizadas várias medidas, com um desvio padrão, e o resultado é uma média dessas medidas.

## 2.7 MÉTODOS PARA CAPTAÇÃO DE IMAGENS E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DO BENEFICIAMENTO DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS

Existem métodos de análise que, sendo utilizados posteriormente aos processos de beneficiamento, permitem avaliar os resultados dos processos de interferência no material, como por exemplo, analisar o comportamento de uma superfície após processos de usinagem e avaliar o desgaste das ferramentas utilizadas. Exemplos destes métodos é a microscopia eletrônica de varredura e o escaneamento tridimensional a laser.

### 2.7.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Análises do MEV posterior a processos de beneficiamento e interferências nos materiais gemológicos adquire importância pois, desta maneira, é possível verificar na superfície dos materiais o efeito causado, medir eventuais fraturas,

avaliar a resistência de um material comparado a outro, beneficiado pelo mesmo método. Permite também analisar o desgaste das ferramentas utilizadas no beneficiamento.

A microscopia eletrônica de varredura gera 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, retroespalhados, 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 material, elementos químicos com maior peso atômico são representados em tons claros e os mais leves em tons escuros.

Segundo Duarte *et. al* (2003), na utilização do MEV para a identificação de inclusões em materiais gemológicos, as amostras podem se brutas, polidas ou lapidadas, desde que as inclusões e características morfológicas a serem estudadas estejam expostas na superfície.

Segundo este tipo de análise realizada no MEV por Augustin (2004), foi possível identificar a presença de esferas de sílica e cristais de cristobalita e / ou tridimita, como se observa na Figura 13. Segundo o autor, através desta análise foi possível a identificação de formas cristalinas inclusas na opala.

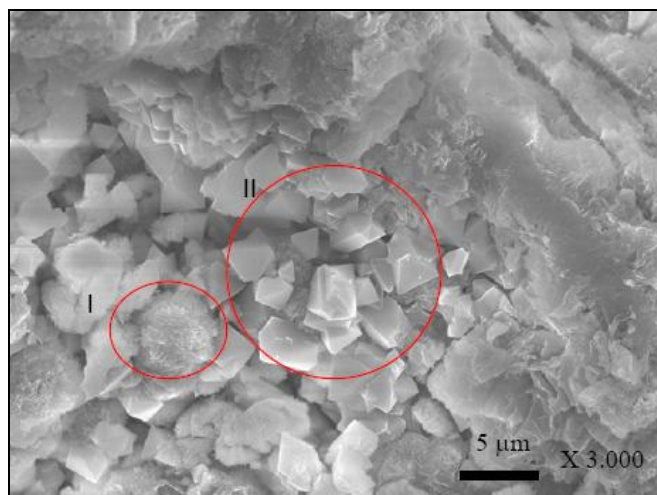


Figura 13. Esferas de sílica em I, e agregado cristalino característico de opala Cristobalita-tridimita em II.

Fonte: Augustin (2004)



### 2.7.2 Escaneamento a laser 3D

Para Silva (2006), a digitalização tridimensional é utilizada para captar imagens e dados em 3D e permite, com auxílio de ferramentas computacionais, a obtenção com grande precisão de detalhes de superfícies, texturas e mesmo de objetos inteiros. Esta captação de imagens é obtida através de um cabeçote de digitalização, denominado conoscópico. Consiste na emissão, através de um diodo, de um feixe de laser, o qual é refletido por um divisor de feixe e incide pontualmente sobre a peça a ser medida. A luz dispersada retorna da peça, passa através do divisor de feixe, por um cristal birrefringente e é detectada por um sensor.

A digitalização tridimensional a laser é mais precisa e rápida do que os sistemas onde existe contato com o objeto a ser scaneado, porém, este processo depende de alguns fatores, como opacidade e cor da superfície a ser digitalizada (escaneada), pois, se estes refletem muito a luz, interfere no processo (SILVA, 2006).

Após o processo de digitalização, as informações advindas do escaneamento são sob a forma de um conjunto de coordenadas de pontos, sendo que, geometricamente, estes dados são processados como coordenadas da superfície no espaço tridimensional (x, y, z). Este conjunto de pontos é chamado de “nuvem de pontos” e após manipulação computacional permite gerar curvas, malhas, superfícies e sólidos tridimensionais compatíveis com sistemas CAD/CAE/CAM. A partir da nuvem de pontos é possível unir os pontos, criando-se uma malha tridimensional da superfície da peça. Com a malha criada, é possível fazer uma série de alterações, como suavizar a superfície, criar furos, alterar cantos vivos, entre outras possibilidades (SILVA, 2006).

A digitalização pode ser uma ferramenta de auxílio ao processo de usinagem CNC, pois permite reproduzir uma textura captada em materiais diversos e analisar o desgaste causado em fresas, por exemplo, após processos de usinagem, escaneando antes e após o processo, sobrepondo as imagens e analisando a diferença entre de medida entre os volumes. A digitalização também pode ser realizada com equipamento móvel, permitindo a captação de imagens, como feições humanas, por exemplo, para a reprodução por usinagem CNC em materiais.

## 2.8 OBJETO DE ADORNO ELABORADO A PARTIR DE ÁGATA E OPALA BRANCA – CAMAFEU

Camafeu, *cammaeus*, do latim, ou glíptica (Figuras 14 e 15), é um produto desenvolvido a partir de gemas com coloração bandada. Esta técnica, também compreendida como uma gema entalhada ou esculpida. O termo glíptica deriva do grego “a arte de gravar a pedra” e inclui o trabalho em minerais como baixo ou alto-relevo e também estátuas e objetos ornamentais.



Figura 14. Camafeu estilo parisiense, ágata com base em ônix.  
Fonte: Schumann (2006)



Figura 15. (A) e (B) Camafeus de Idar-Oberstein.  
Fonte: Fotos cedidas por Duarte

Segundo Schumann (2006), este tipo de material gemológico que possui o bandamento em cores denomina-se estratificada, uma ágata com faixas planas e paralelas, de modo que uma camada clara fique sobre outra escura, como se observa na Figura 16.

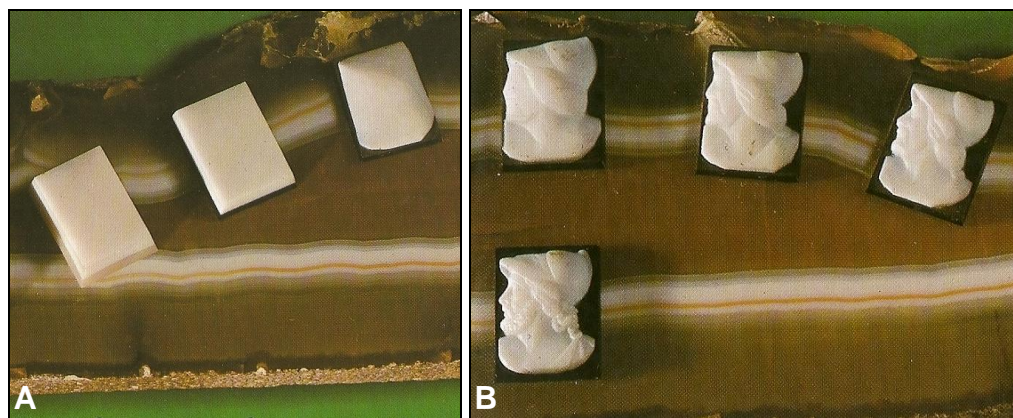


Figura 16. As cores bandadas da ágata permitem a reprodução de camafeus. Em (A), amostras do material cortado em retângulos expostos sobre placa de ágata e em (B), o material já na forma de relevos. Fonte: Schumann (2006)

O método mais antigo de trabalhar as gemas é a partir da gravação de figuras, imagens, símbolos ou letras de onde surgiu a técnica de lapidação. As gravações em pedras mais antigas serviam para identificação de selos e amuletos (Figura 17), como por exemplo, a primeira gravação com desenho representando um escaravelho, proveniente do antigo Egito (SCHUMANN, 2006).

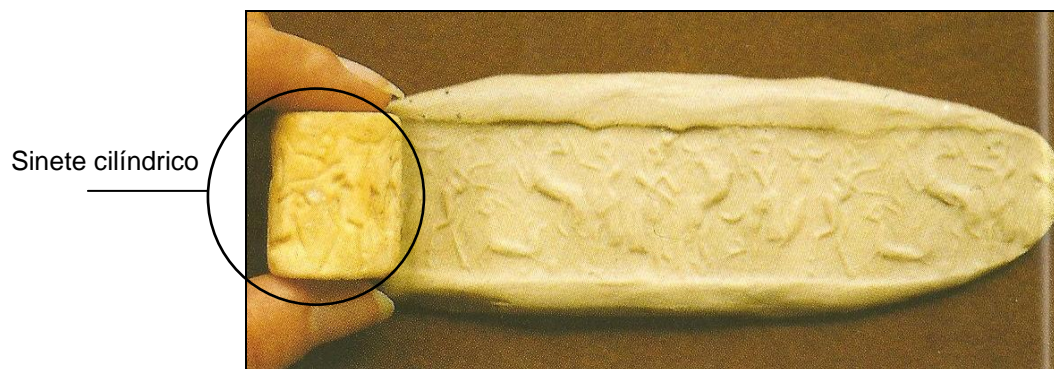


Figura 17. Sinete cilíndrico de pedra calcária (detalhe circulado) rolado em argila, com figuras representando guerreiros e animais, terceiro séc. a.C, Síria.  
Fonte: Schumann (2006)

A gravação em pedras teve grande repercussão na Grécia e alcançou alto padrão de acabamento e técnica na Roma antiga. No entanto, na Itália, durante o Renascimento, essa arte retornou e hoje é muito apreciada. Os primeiros camafeus surgiram por volta de 300 a.C, em Alexandria, Egito e eram muito utilizados em jóias e adornos para vestimentas, bem como eram apreciados pelos antigos gregos e romanos, pelas figuras entalhadas de deuses e deusas. A cidade de Torre Del Greco, Itália, é referência mundial em produção de camafeus feitos a partir de conchas, onde o método produtivo (entalhe) data de mais de mil anos.

A Alemanha é um grande centro mundial da produção de camafeus, na cidade de Idar-Oberstein, sendo que os trabalhos com as gemas datam da primeira metade do século XVI. No ano de 1834, devido à escassez de ágata na Alemanha, foram exportadas ágatas brasileiras para a produção dos objetos (SCHUMANN, 2006). Em Idar-Oberstein, a produção se dá a partir de gemas como a ágata branca, a cornalina e o ônix. Neste processo, as gemas são gravadas e esculpidas com a ajuda mecânica, devido à sua dureza.

Uma forma de gravação em gemas, a técnica de glíptica, é realizada manualmente, utilizando um torno com eixo horizontal, podendo-se aplicar cabeçotes diversos, segundo a necessidade. Este mandril, é impulsionado por um motor de rotações por minuto específico para que o gravador mova a pedra com precisão adequada à reprodução do relevo (SCHUMANN, 2006).

O fresamento por CNC, comandado por programação CAM, pode auxiliar no desenvolvimento de camafeus, tornando o processo mais rápido.

### CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa consistiu das seguintes etapas:

- visita aos locais de extração de ágata do Estado do Rio Grande do Sul, com a finalidade de reconhecer os garimpos e a sistemática de extração de geodos;

- coleta e seleção do rejeito dos locais de exploração mineral contendo opala branca;

- avaliação dos procedimentos mais utilizados pelas empresas no Rio Grande do Sul para beneficiamento deste material na região, como o corte de pedras e tingimento (ágata), etc;

- análise do rejeito através de técnicas que permitam identificar e estabelecer com clareza qual tipo de material gemológico se está trabalhando, com a finalidade de aplicação do mais adequado método de beneficiamento;

- ensaios de usinagem no material gemológico utilizando tecnologias CNC no desenvolvimento de projetos para obtenção de camafeus concebidos com auxílio de *software* CAM;

- desenvolvimento de produto incrementando o design nesta área;

- avaliação dos resultados;

- análise do material depois de beneficiado para verificar seu comportamento posterior ao processo de usinagem CNC;

- análise das ferramentas (fresas) utilizadas no processo para definir a melhor geometria e concluir o grau de eficácia relacionado a cada formato de ponta;

- definição, após as análises, de uma metodologia adequada incluindo novos parâmetros e estratégias de usinagem, bem como uma nova combinação de ferramentas, com a finalidade de otimizar o processo de produção de camafeus.

No processo de usinagem, foram realizados ensaios de usinagem CNC em amostras de opala branca e ágata com o objetivo de encontrar o método adequado de interferência neste material com dureza entre 5 e 7 na Escala Mohs. A realização dos ensaios permitiu, também, analisar e definir ferramentas adequadas de corte a fim de aperfeiçoar o processo de fabricação. Para realização da usinagem é necessária a definição da estratégia por *software* CAM projetando os caminhos que a ferramenta deverá percorrer a superfície do material, durante o processo na

fresadora CNC. A usinagem foi testada principalmente na opala branca, junto com a ágata, pois se apresenta na mesma estrutura, no entanto, será o material que entrará mais em contato com a fresa.

Os procedimentos de beneficiamento por usinagem CNC foram realizados no Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS (LdSM), com apoio do Laboratório de Gemologia (Labogem), Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) e do Centro de Microscopia Eletrônica (CME), todos pertencentes à UFRGS, para as análises anteriores e posteriores aos processos de beneficiamento. O LdSM possui equipamentos propícios aos testes de beneficiamento dos materiais gemológicos, como o equipamento para usinagem CNC, scanner 3D a laser (fixo e móvel) e equipamento de corte e formação de cabochões; no Labogem, do Instituto de Geociências, constam os equipamentos de caracterização de minerais e materiais gemológicos em geral; no LACER equipamentos de fluorescência de raios-X, moinhos de bola para realizar a moagem das amostras para obtenção de pó, microdurômetro e o CME.

### **3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DE EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DO MATERIAL NA REGIÃO**

No município de Salto do Jacuí, RS, encontram-se as principais jazidas de ágata do Rio Grande do Sul. Na visita realizada ao garimpo de ágata (Figura 18), no mês de junho de 2008, constatou-se a presença de um material gemológico de cor branca junto aos geodos de ágata, reconhecido como sendo opala comum.



Figura 18. Garimpo de extração de ágata – município de Salto do Jacuí  
Fonte: Autor

Este tipo de opala, por não possuir a opalescência nem o jogo de cores, característico da opala considerada nobre, por não possuir resistência mecânica ao corte em chapas nem ser passível de tingimento, é considerada como rejeito. São estocadas em pilhas, como observado na Figura 19.



Figura 19. Depósito de rejeito de opala branca  
Fonte: Autor

A ágata considerada de qualidade, denominada calcedão, é destinada às indústrias de beneficiamento da região, para corte em chapas, montagem de artefatos de baixo valor agregado destinados ao comércio, exportação e tingimento. As peças da Figura 20 são um exemplo do trabalho realizado na escola SENAI de lapidação e beneficiamento de gemas do município de Lajeado, Rio Grande do Sul. Constam de chapas de ágata tingidas e cortadas em formas diversas, com as bordas laminadas em metal para acabamento.



Figuras 20. Objetos elaborados a partir de chapas de ágata tingidas  
Fonte: Autor

Os objetos produzidos possuem baixo valor agregado tendo em vista a qualidade da matéria-prima, pois, neste processo, não há interferência de nenhum profissional adequado para inserção de inovação na criação, execução de objetos com maior qualidade estética nem para inserção e utilização de novas tecnologias.

Sem auxílio de equipamentos, lupas ou microscópio, é possível observar que, como rejeito de opala, encontram-se tonalidades diferentes da mesma, sendo a de cor branca a mais comum. Verificou-se a presença de algumas amostras mais translúcidas, outras com manchas marrons e algumas, porém poucas, amostras na cor azul. A maioria do rejeito possui uma camada de ágata e uma de opala branca, sendo propícia à produção de camafeus como se observa na Figura 21. A amostra da Figura foi cortada por serra diamantada, com a finalidade de obter uma camada menos espessa de opala sobre a ágata, para facilitar o desenvolvimento de um camafeu.



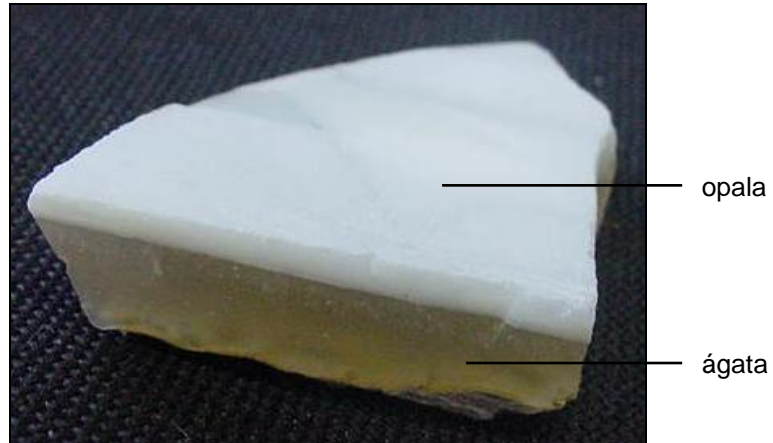


Figura 21. Amostra em camadas de ágata e opala.  
Fonte: Autor

A opala de cor branca é mais abundante e com mais possibilidades de beneficiamento devido à quantidade gerada no processo de extração e à ausência de aplicação dos métodos de beneficiamento locais. Foi analisada, juntamente com a ágata presente nas amostras dos rejeitos, para verificação de sua estrutura e composição, com a finalidade de comprovação das suas características estruturais e químicas, que ocasionalmente influenciam nos procedimentos de usinagem.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

### 3.2.1 *Fluorescência de raios-X*

As amostras de opala branca e ágata, depois de moídas com esferas de alumina no moinho de bolas, foram enviadas à análise de fluorescência de raios-X na forma de pó. A análise foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS, no equipamento da marca Shimadzu® XRF 1800.

### 3.2.1.1 Opala branca

O resultado da análise por fluorescência de raios-X da opala branca confirma a presença de  $\text{SiO}_2$  em abundância e demais elementos em menor quantidade, como se observa na Tabela 3.

Tabela 3. Resultado da fluorescência da opala branca (%)

elemento	Resultado (%)
$\text{SiO}_2$	91.2347
$\text{Al}_2\text{O}_3$	8.3098
$\text{CaO}$	0.2214
$\text{K}_2\text{O}$	0.1893
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.0338
$\text{ZrO}_2$	0.0110

### 3.1.1.2 Ágata

Na Tabela 4, o resultado da análise de fluorescência da ágata também confirma a presença do elemento  $\text{SiO}_2$  em maior quantidade e a presença de  $\text{TiO}_2$ .

Tabela 4. Resultado da fluorescência da ágata (%)

elemento	Resultado (%)
$\text{SiO}_2$	88.3163
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10.2664
$\text{K}_2\text{O}$	1.1365
$\text{CaO}$	0.1241
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.1185
$\text{TiO}_2$	0.0382

### 3.2.2 Difractometria de raios- X

Na Figura 22, observa-se o difratograma resultante da análise de difratometria de raios-X realizada em amostra de opala branca de Salto do Jacuí. Os picos mais altos constatam a presença de tridimita e cristobalita e confirmam as análises já realizadas em pesquisas anteriores. A presença destes picos indica a cristalinidade da opala branca e a classifica como do tipo CT.

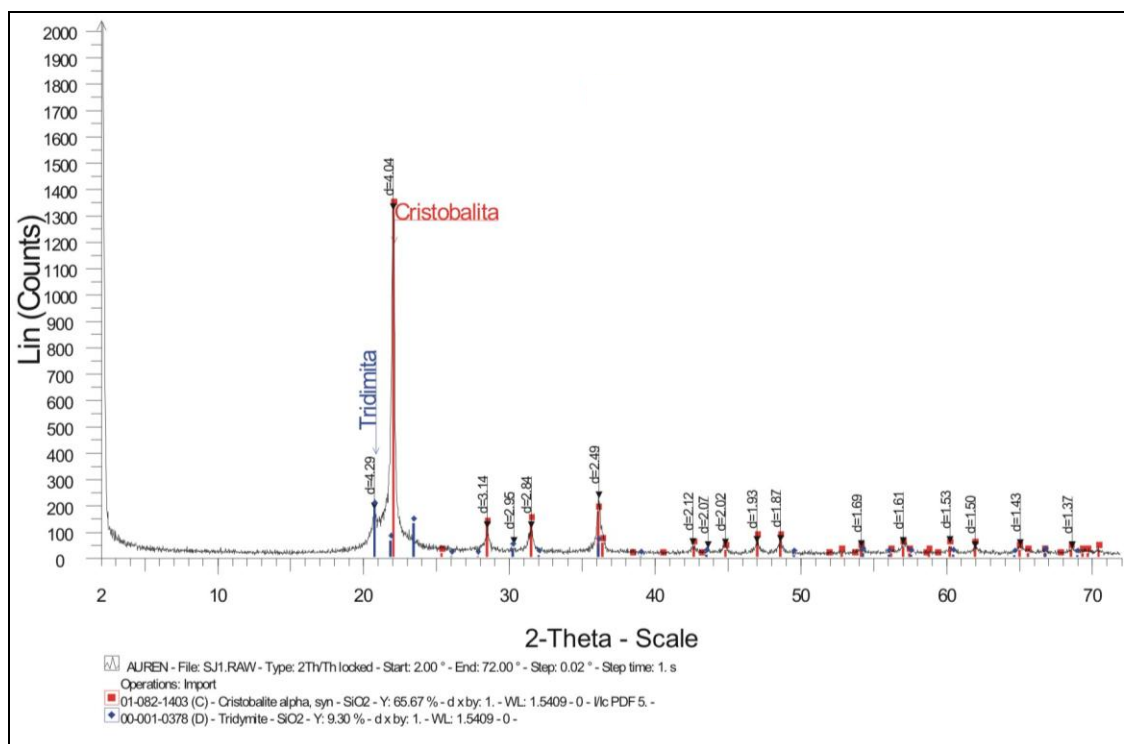


Figura 22. Difractograma de raios-X da opala branca a caracteriza como opala do tipo CT.

### 3.2.3 Análise no refratômetro

As análises de amostras de opala de variedade branca e outras amostras de ágata foram realizadas no refratômetro gemológico da marca Topcon®, pertencente ao Labogem do Instituto de Geociências com intuito de caracterizar o rejeito.

O resultado da leitura do índice de refração médio das amostras de opala foi de aproximadamente 1,401 e na ágata, a leitura variou entre 1,537 a 1,540, ambas coincidindo com resultados de análises já realizadas em outras pesquisas.

### **3.2.4 Análise da Microdureza**

Amostras de opala branca e ágata foram embutidas em resina para o ensaio de análise da microdureza, com a finalidade de obtenção de resultados na escala Vickers. O ensaio foi realizado no LACER, com uso do equipamento Micromet 2001<sup>®</sup>, Buehler, com ponteira piramidal de diamante. Na tabela 5 abaixo, observa-se os valores de carga aplicada e os resultados para cada material.

Tabela 5. Resultados da medida de dureza Vickers em opala branca e ágata

<b>Material</b>	<b>Carga aplicada</b>	<b>HV</b>
Opala branca	200 g	Entre 570 a 426
Ágata	300 g	Entre 1007 a 927

## **3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

### **3.3.1 Equipamento de usinagem CNC e escaneamento a laser 3D**

A tecnologia utilizada para os ensaios de usinagem das amostras contendo opala branca e ágata foi de usinagem CNC. Os testes foram realizados no LdSM, com uso da fresa e scanner 3D Digimill (Figura 23). Neste equipamento foram acopladas ferramentas diversas de ponta diamantada de formatos variados, conforme o objetivo do desgaste. Isto se deve ao foco do trabalho, que é a criação de formas detalhadas, característicos de camafeus tradicionais. Devido à

necessidade de refrigeração por água, o processo de usinagem foi efetuado em amostras fixadas em um recipiente contendo água.

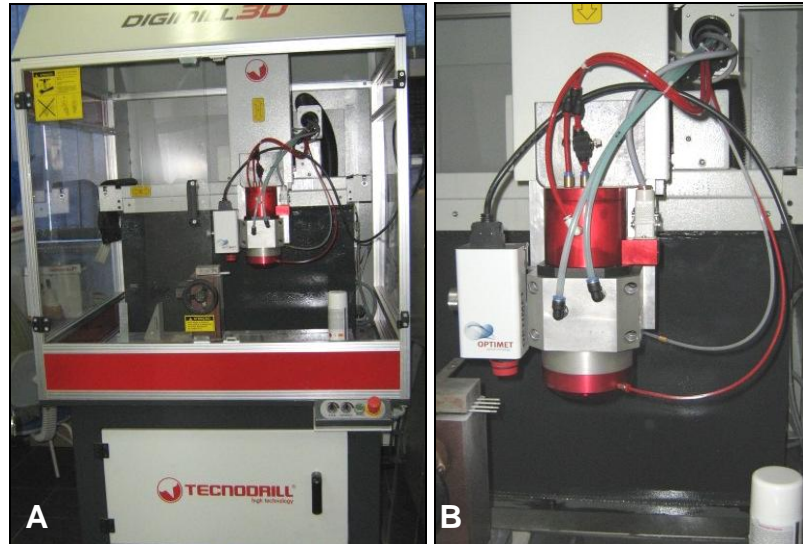


Figura 23. Em (A), equipamento de fresamento, scanner 3D e usinagem CNC Digimill®, e em (B), detalhe da parte onde é acoplada a ferramenta para usinagem. Equipamento pertencente ao LdSM, UFRGS

Fonte: Autor

### **3.3.2 Corte e formação dos materiais gemológicos**

Anterior às tentativas de usinagem, as amostras foram cortadas e formadas (desbastadas) no equipamento Multimachine da Lapidart® (Figura 24) com a finalidade de se obter amostras de tamanho suficiente para os testes de usinagem. O corte foi efetuado com serra diamantada por eletrodeposição, o desbaste efetuado por de rebolo diamantado também por eletrodeposição e lixamento com lixa fina scotch-brite. Os cortes e polimento foram realizados com refrigeração por água, presente no sistema do próprio equipamento.

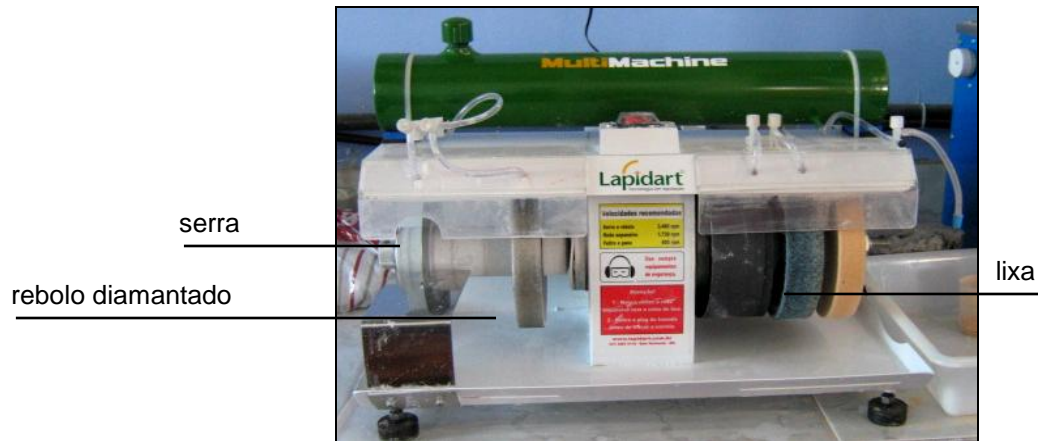


Figura 24. Equipamento de corte, formação e polimento de materiais gemológicos, pertencente ao LdSM – UFGRS  
Fonte: Autor








### 3.4 ENSAIOS DE USINAGEM CNC



#### 3.4.1 Ferramentas (fresas) utilizadas

Todas as ferramentas utilizadas para efetuar os ensaios de usinagem nas amostras de ágata e opala branca possuem ponta com incrustação de diamantes, alterando somente as dimensões e geometrias da ponta.

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, comparação que explica a opção pelas ferramentas diamantadas. No Quadro 3 são apresentadas as ferramentas utilizadas e suas dimensões e as características que influenciam nos resultados do processo.

Quadro 3. Ferramentas utilizadas nos ensaios de usinagem com as respectivas dimensões

Ensaio	Ferramentas	Dimensões / parâmetros			
1		Formato de ponta: cilíndrica Diâmetro= 2 mm			
2		Formato de ponta: cônica Diâmetro= 2 mm Ângulo lateral: 4.0° Raio da ponta: 0.5 mm			
3		Formato de ponta: cônica Diâmetro= 3 mm Ângulo lateral: 4.0° Raio da ponta: 0.75 mm			
4		Formato de ponta: cilíndrica Diâmetro= 6mm	Formato de ponta: cônica Diâmetro= 3 mm Ângulo lateral: 4.0° Raio da ponta: 1 mm		
5		Formato de ponta: cônica d= 2 mm Ângulo lateral: 4.0° Raio da ponta: 0.60 mm			
6		Formato de ponta: cônica Ângulo lateral: Raio da ponta: 1 mm	Formato de ponta: cônica Ângulo lateral: Raio da ponta: 0,5 mm	Formato de ponta: esférica Raio da ponta= 0,8 mm	
7		Formato de ponta: cilíndrica Raio da ponta= 5 mm	Formato de ponta: cônica Ângulo lateral: 3° Raio da ponta= 1 mm	Formato de ponta: esférica Raio da ponta= 0,8 mm	Formato de ponta: cônica Ângulo lateral: 2,5° Raio da ponta= 0,5 mm

8		Formato de ponta: cônica Ângulo lateral: 3° Raio de ponta= 1 mm	Formato de ponta: cônica Ângulo lateral: 2,5° Raio da ponta= 0,5 mm	
9		Formato de ponta: cilíndrica Raio da ponta= 5 mm	Formato de ponta: cônica Ângulo lateral: 3° Raio da ponta= 1 mm	Formato de ponta: cônica Ângulo lateral: 2,5° Raio da ponta= 0,5 mm

### 3.4.2 Parâmetros de usinagem

Para cada ensaio realizado considerou-se parâmetros e estratégias específicos, definidos e alterados conforme o material, a geometria da ferramenta e conforme o desenvolvimento dos processos de usinagem e avaliação de alguns resultados. Parâmetros de usinagem são as definições dos avanços (velocidade e deslocamento) da fresa e a estratégia (caminhos) da usinagem. Estes são definidos conforme a dimensão e tipo da fresa e do material. O Quadro 4 mostra os parâmetros de usinagem utilizados em cada ensaio. A partir do ensaio número 6, as fresas utilizadas foram denominadas por códigos, presentes no catálogo da marca.



Quadro 4. Parâmetros de usinagem

Ensaio	Material	Equipamentos	Tempo	Parâmetros
1	Opala	Mandril	5 min	Velocidade do equipamento determinada pelo usuário, por acionamento em pedal.
2	Opala	Fresa Digimill®	3 h	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	Fresa Digimill®	4 h	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	Fresa Digimill®	4 h	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	Fresa Digimill®	1 h 40 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
6	Opala/ágata	Fresa Digimill®	2 h	<b>*PMG 720</b> Passo lateral: 0.5 mm Passo vertical: 1 mm Vel. da máquina: 20.000 rpm Avanço lateral: 100 mm/ min Avanço vertical: 50 mm/min  <b>PMG 710_1</b> Passo lateral: 0.25 mm Passo vertical: 0.5 mm Vel. da máquina: 20.000 rpm Avanço lateral: 50 mm/ min Avanço vertical: 25 mm/min

				<p><b>PMG 710_2</b>  Passo lateral: 0.25 mm  Passo vertical: 0.5 mm  Vel. da máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 75 mm/ min  Avanço vertical: 37.5 mm/min</p> <p><b>PMG 003_1</b>  Passo lateral: 0.4 mm  Passo vertical: 0.8 mm  Vel. da máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 50 mm/ min  Avanço vertical: 25 mm/min</p> <p><b>PMG 003_2</b>  Passo lateral: 0.4 mm  Passo vertical: 0.8 mm  Vel. da máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 100 mm/ min  Avanço vertical: 50 mm/min</p>
7	Opala/ ágata	Fresa Digimill®	1 h 40 min	<p><b>End Mill</b>  Passo lateral: 0.5 mm  Passo vertical: 0.5 mm  Veloc. Máquina: 15.000 rpm  Avanço lateral: 150 mm/ min  Avanço vertical: 25 mm/ min</p> <p><b>PMG_720_passo 1</b>  Passo lateral: 0.5 mm  Passo vertical: 1 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 100 mm/ min  Avanço vertical: 50 mm/ min</p> <p><b>PMG_720_passo 2</b>  Passo lateral: 0.25 mm  Passo vertical: 1 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 100 mm/ min  Avanço vertical: 50 mm/ min</p> <p><b>PMG_003_passo 1</b>  Passo lateral: 0.4 mm  Passo vertical: 0.8 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 50 mm/ min  Avanço vertical: 25 mm/ min</p> <p><b>PMG_003_passo 2</b>  Passo lateral: 0.4 mm  Passo vertical: 0.8 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 50 mm/ min  Avanço vertical: 25 mm/ min</p>

				<p><b>PMG_710_passo 1</b>  Passo lateral: 0.25 mm  Passo vertical: 0.5 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 50 mm/ min  Avanço vertical: 25 mm/ min</p> <p><b>PMG_710_passo 2</b>  Passo lateral: 0.1 mm  Passo vertical: 0.5 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 50 mm/ min  Avanço vertical: 25 mm/ min</p>
8	Opala/ agata	Fresa Digimill®	30 min	<p><b>PMG_720</b>  Passo lateral: 0.5 mm  Passo vertical: 1 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 100 mm/ min  Avanço vertical: 50 mm/ min</p> <p><b>PMG_710</b>  Passo lateral: 0.1 mm  Passo vertical: 0.5 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço lateral: 75 mm/ min  Avanço vertical: 25 mm/ min</p>
9		Fresa Digimill®	1h 20 min	<p><b>End Mill</b>  Passo lateral: 0.25 mm  Passo vertical: 1.5 mm  Veloc. Máquina: 15.000 rpm  Avanço Lateral: 175 mm/min  Avanço vertical: 25 mm/min</p> <p><b>PMG_720</b>  Passo lateral: 0.5 mm  Passo vertical: 1 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço Lateral: 150 mm/min  Avanço vertical: 50 mm/min</p> <p><b>PMG_003</b>  Passo lateral: 0.2 mm  Passo vertical: 0.8 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço Lateral: 50 mm/min  Avanço vertical: 25 mm/min</p> <p><b>PMG_710</b>  Passo lateral: 0.25 mm  Passo vertical: 0.5 mm  Veloc. Máquina: 20.000 rpm  Avanço Lateral: 50 mm/min  Avanço vertical: 25</p>

\*os códigos das ferramentas constam no catálogo da marca utilizada

No primeiro ensaio, foi utilizada uma fresa de ponta diamantada com formato de ponta cilíndrica de diâmetro igual a dois milímetros, como especificado no Quadro 3, e houve desgaste da opala branca em um tempo menor que 5 minutos. A intenção do ensaio foi verificar a interação entre o tipo de ferramenta e o material gemológico, sem haver preocupação com a reprodução de um relevo específico.

No segundo ensaio, a velocidade de usinagem e os avanços da fresa, descritos como parâmetros no Quadro 4, resultaram em uma superfície usinada sem marcas da ferramenta, demonstrada por imagens do MEV observadas nos resultados no próximo capítulo. No entanto, ao final do ensaio, após 3 horas de usinagem, percebeu-se o desgaste da ponta da ferramenta.

Do terceiro ensaio ao quinto, foram variados os parâmetros: (a) estudo da zonagem de cores da amostra para definição de um desenho no programa vetorial Corel Draw<sup>®</sup>, (b) definição dos parâmetros de usinagem da ferramenta e (c) definição dos relevos do desenho a ser usinado na amostra no programa Art Cam<sup>®</sup>. O envio das informações a fresa realizou-se através de um arquivo específico do equipamento de usinagem.

Depois dos cinco ensaios, foi realizada análise por MEV em uma das ferramentas utilizadas e na superfície do material usinado. Obteve-se a primeira impressão do resultado do processo de usinagem CNC à opala, que é observado no próximo capítulo. Posterior a prévias conclusões dos primeiros ensaios, foi então efetuado um processo de usinagem, denominado de sexto ensaio, para que fossem definidos parâmetros adequados através de testes de velocidades e avanços.

No ensaio número seis, foram utilizadas cinco fresas de ponta diamantada da marca Master Diamond<sup>®</sup>, com três formatos diferentes e variação do diâmetro da ponta, fator que altera a dimensão e profundidade da usinagem referente a cada ferramenta. Duas fresas possuem formato de ponta cônico com diâmetro igual a 1 mm, duas de ponta esférica e uma com diâmetro de ponta igual a 2 mm, denominadas, conforme catálogo da marca, respectivamente de PMG\_710\_1 e 2, PMG\_003\_1 e 2 e PMG\_720. Cada fresa, conforme seu formato de ponta, foi testada com um parâmetro, e sua semelhante com os valores dobrados deste parâmetro anterior, para poder efetuar a avaliação posterior. A única a ser testada nos dois parâmetros foi a PMG\_720.

Para que haja um equilíbrio entre a avaliação de cada tipo de fresa, para que possa ser efetuada uma comparação fiel antes e depois do processo de usinagem e para que, cada tipo, independente de sua forma, tenha parâmetros definidos proporcionais à suas dimensões, definiu-se os parâmetros segundo o diâmetro da ponta, parte da ferramenta que participa do processo de usinagem. O método utilizado, esquematizado na Figura 25, define que a profundidade a ser usinada na amostra de opala é igual ao raio da ponta, e a largura do rasgo igual ao diâmetro somado ao raio da ponta da fresa.

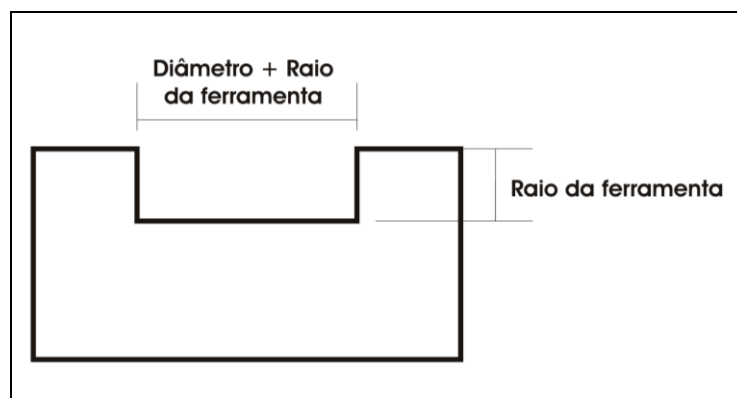


Figura 25. Esquema dos parâmetros utilizados para a usinagem no ensaio número seis  
Fonte: Autor

No *software* CAM, foram determinados os parâmetros da usinagem, velocidades e profundidades relacionadas a cada ferramenta (Figuras 26 e 27).

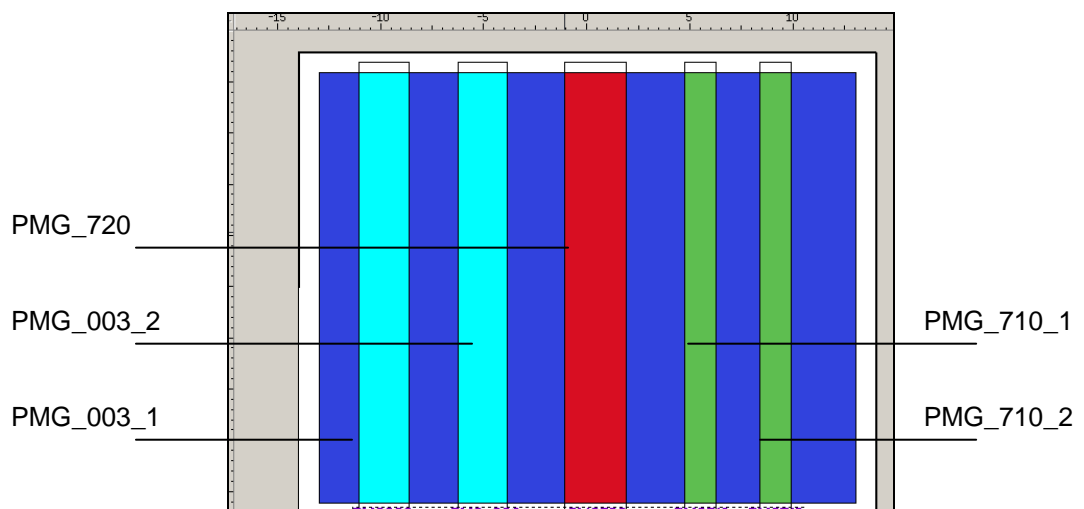


Figura 26. Desenho feito em *Software* CAM, definindo a dimensão das regiões a serem usinadas na amostra de opala, referentes a cada ferramenta conforme seus diâmetros de ponta.

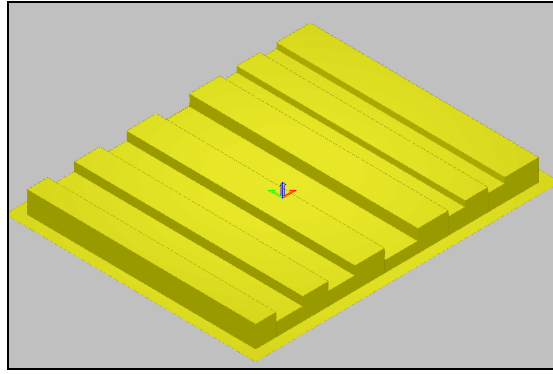


Figura 27. Vista em 3D da estratégia de usinagem

O objetivo é verificar a ferramenta antes do processo e após, através do escaneamento 3D a laser e do MEV. Com isto, pode-se verificar se houve desgaste ou mais alterações, assim como testar o limite de parâmetro que pode ser utilizado para que o processo de usinagem se torne menos dispendioso em tempo e ferramental. Também pode-se verificar a superfície do material após o processo inferindo, assim, o trajeto cada ferramenta e os diferentes avanços.

No ensaio número sete, foi utilizado o equipamento móvel de escaneamento tridimensional a laser, com a finalidade de capturar uma imagem de uma face humana, como se observa na Figura 28.

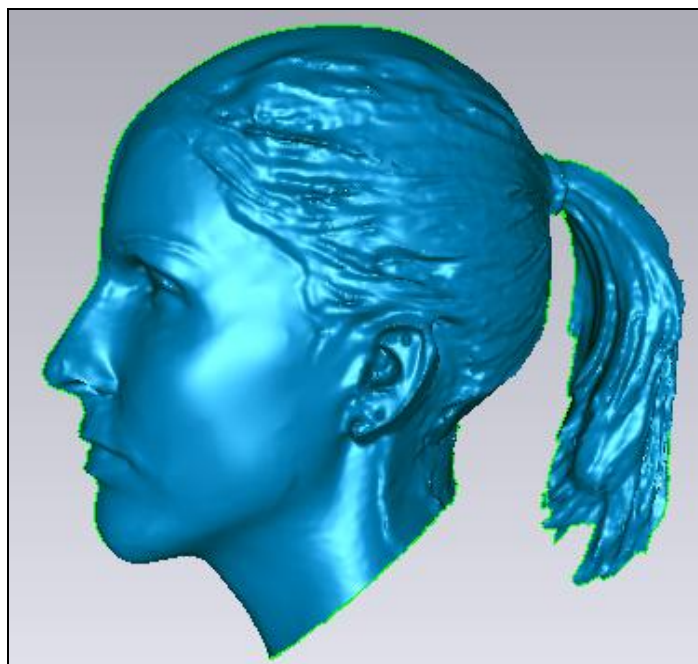


Figura 28. Imagem de um perfil, capturada por scanner tridimensional a laser e transformada em superfície, para que possa ser usinada.

Esta imagem foi obtida através de “fotografias” capturadas de um indivíduo que, sob postura quase imóvel, submeteu-se a estes processos de captação de várias fotos, conforme Figura 29.



Figura 29. Imagem nas cores originais fotografada pelo scanner a laser 3D móvel.

Estas fotos foram, posteriormente, unidas e montadas através de pontos de referência. Esta imagem, sob a forma de nuvem de pontos, foi transformada em superfície no *software* Geomagic®, conforme ilustra a Figura 30, e foi seccionada para que restasse somente o perfil desejado.

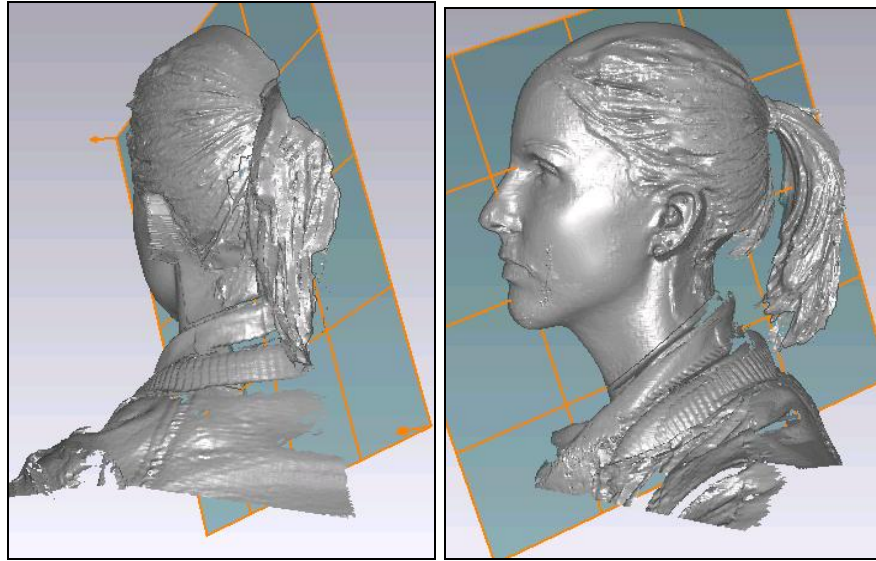


Figura 30. Seleção do perfil a ser utilizado no camafeu, no *software* Geomagic®

Após a seleção do perfil, esta imagem foi transferida ao *software* CAM a fim de definir o volume e os parâmetros de usinagem, para então ser usinada em amostra de opala e ágata.

O processo envolveu a utilização de quatro fresas diferentes, conforme as especificações definidas com o ensaio anterior e seis programas de usinagem especificados para cada ferramenta. Algumas destas fresas foram utilizadas mais de uma vez no processos, apenas alterando o trajeto sob a peça, a fim de aprimorar o acabamento final. O resultado de cada etapa utilizando fresas diferentes e programas específicos para cada ferramenta com alteração de trajetos podem ser vistos através da simulação feita pelo *software* CAM, observado na Figura 31.

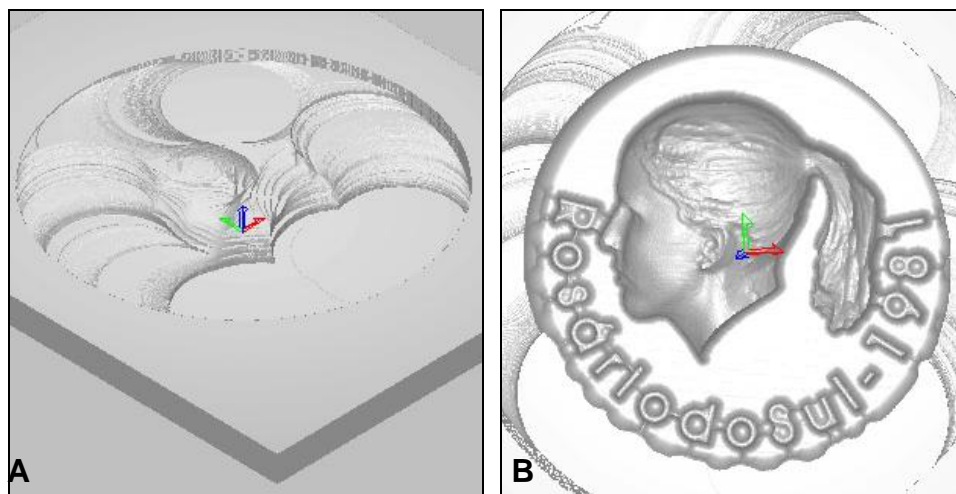


Figura 31. Em (A) simulação da atuação das ferramentas de 10 mm de diâmetro de ponta e em (B) após a atuação da PMG\_720\_etapa 1, fresa com diâmetro de ponta igual a 2 mm.



Esta imagem do perfil feminino foi reproduzida também nos ensaios oito e nove, modificando o tamanho do relevo, os parâmetros e as fresas.

O objetivo da utilização de um perfil humano captado com detalhamento preciso é a utilização da alta tecnologia disponível para obtenção de objetos exclusivos e diferenciados, valorizando a matéria-prima, neste caso, a opala branca e a ágata.

## CAPÍTULO IV - RESULTADOS

### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE USINAGEM CNC

As especificações das fresas utilizadas para cada ensaio são vistas no Quadro 3, e as especificações dos parâmetros de usinagem e equipamentos utilizados no Quadro 4.

No primeiro ensaio houve desgaste visível da opala, como se observa na Figura 32.

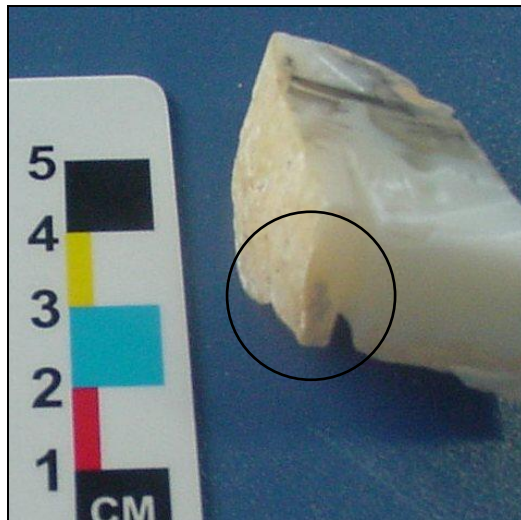


Figura 32. Amostra de opala branca com detalhe da área desgastada.  
Fonte: Autor

Nesta primeira interferência no material, não houve preocupação com a forma a ser usinada, mas com o resultado desta interação entre a ferramenta e a opala.

A profundidade do desgaste na amostra foi de aproximadamente 5 mm, o tempo do processo de desgaste foi inferior ao tempo dos ensaios posteriores, (considerando-se a profundidade do desgaste) e a ferramenta não apresentou desgaste visível a olho nu. No entanto, não foi possível controlar a pressão da ferramenta exercida pelo executor contra o material, 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 e este fator influencia na eventual reprodução do objeto. Fato este que, utilizando a técnica de reprodução manual, limita a repetibilidade e a acuidade à habilidade de motricidade fina do executor.

No segundo ensaio, a velocidade de usinagem e os avanços da ferramenta, descritos como parâmetros no Quadro 4, resultaram em uma superfície usinada sem marcas, demonstrada por imagens do MEV observadas a seguir. No entanto, ao final do teste, após 3 horas de usinagem, percebeu-se o desgaste da ponta da ferramenta, também analisada no MEV e que, como consequência, resultou em uma região marcada, como se observa na região mais escura da Figura 33.

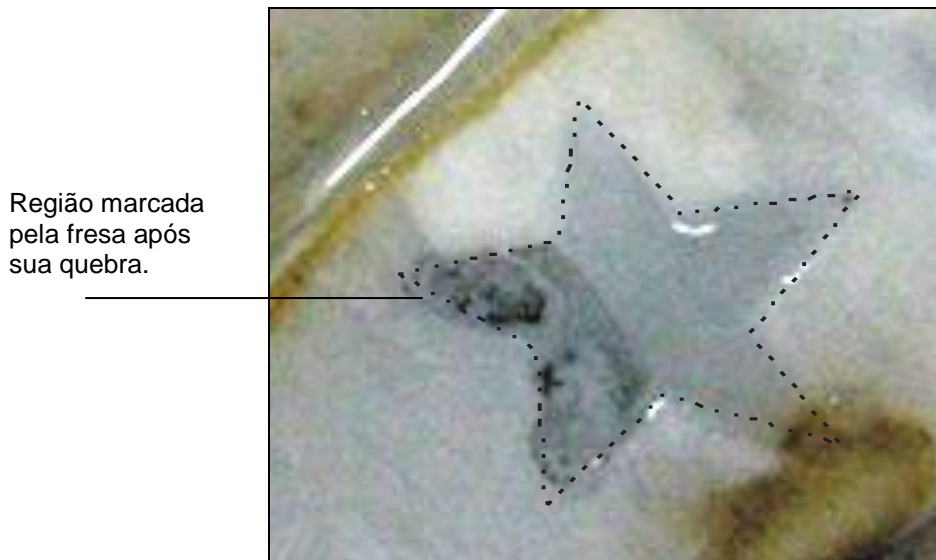


Figura 33. Desenho em baixo-relevo, em forma de estrela (pontilhado), reproduzido na opala. A região mais escura indica o local onde a ferramenta deixou marcas após ter quebrado.

Fonte: Autor

Do terceiro ensaio ao quinto, foram variados os parâmetros, como mostra o Quadro 4, sendo as etapas: coleta da amostra, estudo da zonação de cores da amostra para definição de um desenho no programa vetorial Corel Draw<sup>®</sup>, definição dos parâmetros de usinagem da ferramenta e definição dos relevos e alturas do desenho a ser usinado na amostra no programa Art Cam<sup>®</sup>, envio das informações à fresa através de um arquivo específico do equipamento de usinagem.

O terceiro ensaio foi realizado somente na opala branca com um desenho em forma de texto, um pouco mais complexo comparado à forma em baixo relevo do ensaio número dois.

Neste ensaio a ferramenta resistiu à quebra e a superfície da amostra mostrou-se homogênea, mesmo não possuindo um aspecto polido, devido à dimensão da ferramenta utilizada, como observado na Figura 34.



Figura 34. Em (A) e (B), vista de topo do texto reproduzido em alto relevo na opala e em (C), vista lateral, revelando a altura do texto.

Fonte: Autor

Para o quarto ensaio foi criado, em *software* vetorial, um perfil feminino aleatório em linhas básicas, para não tornar o relevo muito complexo. A intenção é uma aproximação dos camafeus tradicionais.

Neste processo de usinagem, a profundidade definida no *software* CAM permitiu que a ferramenta chegasse à ágata. O material gemológico não trincou, as fresas resistiram a todo o processo sem quebrar.

Foram utilizadas duas fresas neste ensaio, uma de maior dimensão no formato cilíndrico com diâmetro igual a 6 mm, utilizada para o desgaste maior e outra de ponta em formato cônico com diâmetro de ponta igual a 2 mm para acabamento.

Esta iniciativa visou a aproximação da forma da figura com relevos de camafeus tradicionais, como visto na Figura 35.

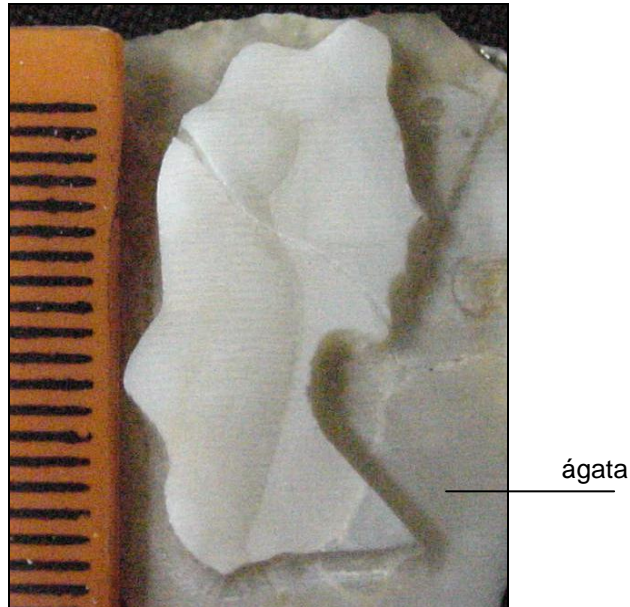


Figura 35. A região composta por ágata, mais escura, compõe a base do perfil deste camafeu resultante do ensaio número quatro.

Fonte: Autor

No ensaio número cinco, assim como no anterior, a ferramenta atuou também na ágata. O desenho definido para esta amostra objetivou ressaltar a característica da amostra de possuir as cores intercaladas da opala e da ágata.

O objetivo foi usinar regiões em baixo relevo, para que se chegasse à ágata contida na base da amostra. O resultado deste ensaio pode ser observado na Figura 36. No entanto, não foi possível o total desgaste da opala branca nos baixos relevos devido ao desgaste da ferramenta.

Baixo relevo  
com a base de  
ágata à mostra



Figura 36. Resultado do ensaio número cinco, mostrando o baixo relevo resultante da usinagem.

Fonte: Autor

Este relevo foi usinado com intenção de quebrar o paradigma de que camafeus apenas podem ser representados por perfis humanos e imagens figurativas. Outra finalidade deste ensaio foi obter um objeto com um diferente valor agregado, tornando-se um estilo distinto de camafeu entre os já conhecidos.

O ensaio número seis foi realizado com a finalidade de definição de parâmetros mais adequados a fim de se obter maior domínio do processo nos ensaios posteriores.

As ferramentas foram analisadas no MEV para verificação de seu desgaste. As fresas de menores diâmetros de ponta, as PMG\_710\_1 e 2, que possuem diâmetro igual a 1 mm, apresentaram maior desgaste, conseqüentemente ficando definido sua melhor atuação nas fases de acabamento dos camafeus, sem necessidade de imprimir muita profundidade no material gemológico.

A fresa maior, a PMG\_720, que apresenta diâmetro de ponta igual a 2 mm, não apresentou desgaste visível. As fresas de formato de ponta esférica, denominadas PMG\_003\_1 e 2, também não apresentaram desgaste visível.

O ensaio número sete foi a usinagem CNC de um perfil scanneado pelo equipamento móvel. Com utilização de quatro ferramentas diferentes e seis estratégias de usinagem, começando com uma de desbaste geral com fresa de diâmetro de ponta 5 mm, e terminando com o acabamento com a fresa menor, PMG\_710 em dois passes distintos.

Como resultado, foi possível observar o contraste entre a opala com o perfil em relevo e a base em ágata. As letras ficaram legíveis e as fresas não desgastaram como nos ensaios anteriores, pois foram trocadas e utilizadas conforme a necessidade, de desbaste, corte ou acabamento.

O resultado é observado na Figura 37. A imagem do perfil foi repetida em tamanho reduzido (Figura 38).



Figura 37. Imagem de perfil feminino usinado em amostra de opala branca e ágata.  
Fonte: Autor



Figura 38. Imagem reproduzida em tamanho reduzido.  
Fonte: Autor

Na Figura 39 observa-se a comparação entre o tamanho maior e o menor usinados.



Figura 39. Comparação entre os tamanhos de imagem usinados.  
Fonte: Autor

A reprodução da imagem teve por resultado menor detalhamento que a anterior, porém, com acabamento de maior qualidade. Neste ensaio, a ágata apresentou maior desgaste ao ser usinada, e a fresa mostrou-se resistente, não apresentando desgaste visível maior do que quando utilizada na opala, que possui menor dureza.

No ensaio nove houve a repetição do mesmo perfil em tamanho maior, e o resultado também foi uma superfície aparentemente bem lisa. As fresas não apresentaram desgaste visível e o material (opala) não apresentou trincas ou rachaduras devido ao processo. As rachaduras que aparecem nas amostras das Figuras anteriores já faziam parte da amostra antes de ser usinada.

O resultado é observado na Figura número 40.



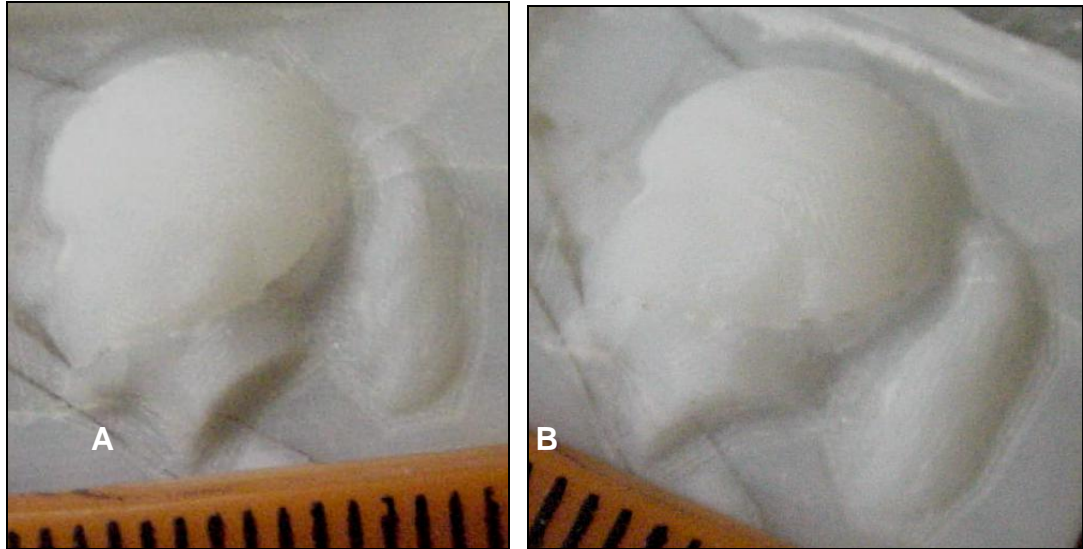


Figura 40. Camafeu reproduzido no ensaio número 9. Em (A), a percepção do tamanho ao lado da escala, e em (B), foto de outro ângulo para percepção da altura do relevo.  
Fonte: Autor

#### ***4.1.1 Microscopia eletrônica de varredura dos materiais envolvidos nos processos de usinagem por comando numérico computadorizado***

As imagens das amostras do material gemológico contendo opala branca e ágata e das ferramentas utilizadas nos ensaios de usinagem foram geradas no equipamento da marca Jeol JSM-6060 *Scanning Electron Microscope*<sup>®</sup> da UFRGS, com corrente do feixe de elétrons de 20 Kev.

##### ***4.1.1.1 Primeira análise do material e ferramenta utilizados nos ensaios de usinagem***

Esta análise possui a finalidade de verificação da superfície das amostras usinadas nos ensaios de número dois e quatro. Verificou-se o comportamento do material perante a interferência mecânica, a ferramenta utilizada no ensaio dois após a usinagem, forma dos diamantes fixados no corpo da ferramenta e comportamento após a usinagem. A ferramenta do ensaio dois foi analisada por ter sido a primeira ferramenta a ser testada por mais tempo e com aumento dos parâmetros de velocidade e avanços.

Os materiais analisados pertencem somente a dois ensaios devido às seguintes peculiaridades: o material gemológico do ensaio número dois por apresentar detalhes da quebra da ferramenta (ver Figura 33), e o número quatro por ser um ensaio intermediário, devido à usinagem tanto da ágata quanto da opala (ver Figura 35) e devido aos volumes e parâmetros mais complexos que os demais.

Esta primeira análise no MEV serviu de base para o seguimento dos demais ensaios e análises e não teve como objetivo análises quantitativas, mas qualitativas. As análises da morfologia permitiram descrever o desgaste e/ou danos da ferramenta, como observado na Figura 41.

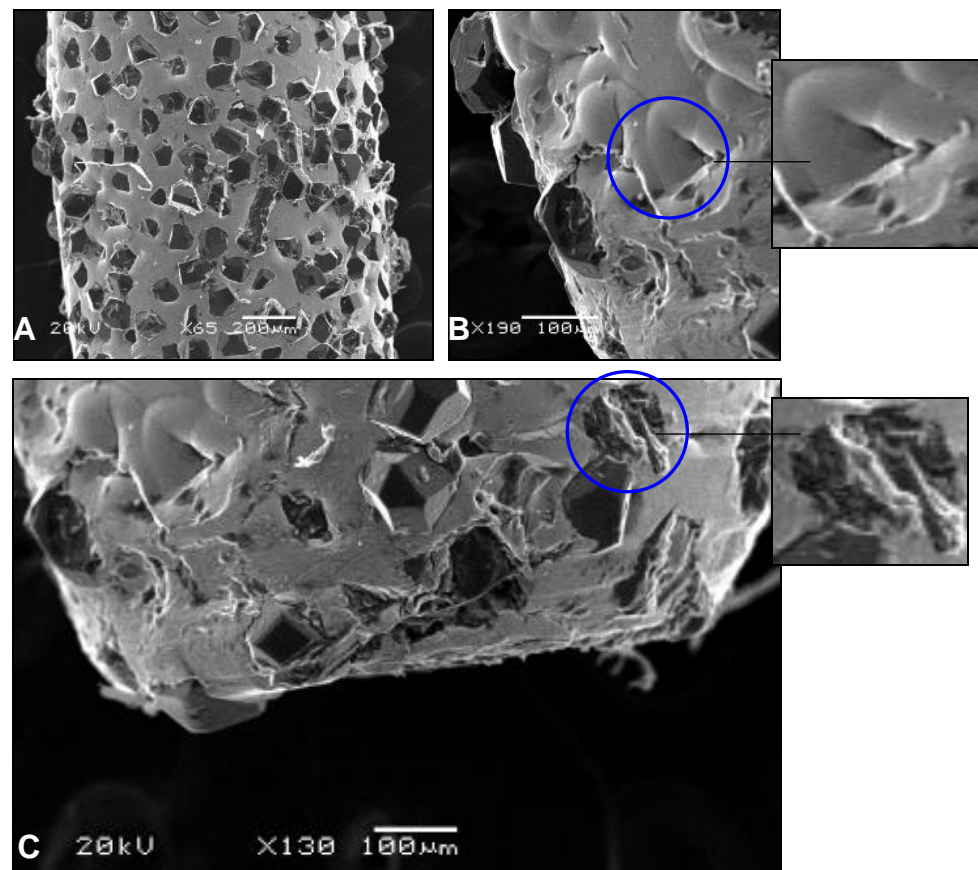


Figura 41. Imagens da ferramenta utilizada no ensaio número 2. Em (A), detalhe da ferramenta. Em (B), circulado e ampliado detalhe do espaço vazio onde havia um diamante, e em (C), detalhe circulado e ampliado de um diamante quebrado.

A fresa 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). Esta característica de quebra de alguns diamantes é denominada friabilidade.

As imagens da Figura 42 mostram a diferença entre superfícies de amostras de opala branca usinadas.

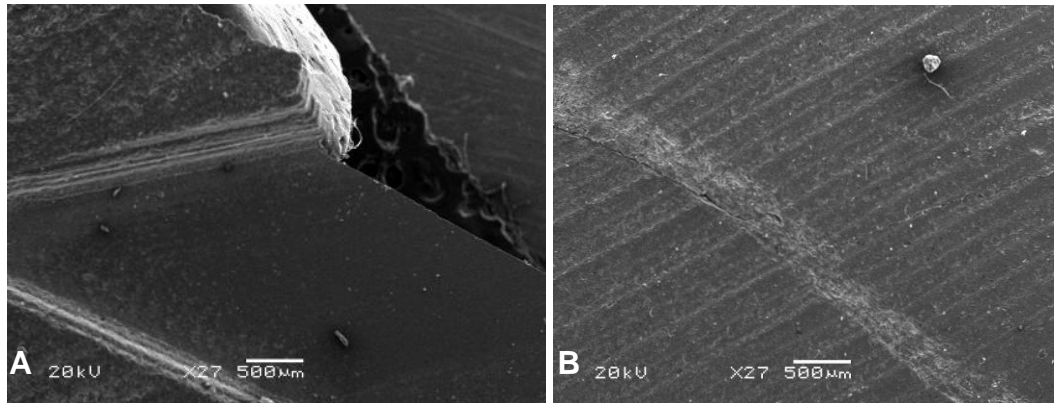


Figura 42. Em (A), superfície polida da opala usinada no ensaio 2, e em (B), marcas deixadas pela ferramenta de maior diâmetro em superfície de opala.

O material gemológico observado em (A) pertence ao ensaio número dois, e foi utilizada neste processo uma ferramenta em formato cônico com diâmetro de ponta igual a 1 mm, e em (B) superfície do material usinado no ensaio número quatro por fresas de formato cilíndrica para desbaste com diâmetro igual a 6 mm e formato cônica de diâmetro de ponta igual a 2 mm pra acabamento.

Observa-se que a superfície em (A) não apresenta muitas ranhuras, ou seja, são pouco visíveis as marcas da ferramenta. É possível também verificar que a interferência da ferramenta em (B) foi maior. Este fator pode relacionar-se à utilização de uma ferramenta com diâmetro maior. Além deste fator, os avanços de usinagem foram alterados para que o processo fosse mais rápido que no teste número dois o que afetou o resultado final.

#### *4.1.1.2 Segunda etapa de análises no MEV das ferramentas e do material gemológico utilizados no ensaio número seis*

A segunda etapa de análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura objetivou a análise do material e das ferramentas utilizadas no ensaio para

definição de parâmetros e a geometria adequada de ferramentas (ensaio número seis). A análise das ferramentas permite a verificação da qualidade deste material, da montagem dos diamantes no corpo de metal e comparação entre os formatos para poder definir a melhor geometria para a reprodução de camafeus com bom acabamento.

Na Figura 43, constam as cinco ferramentas utilizadas no ensaio seis, e os três formatos diferentes.

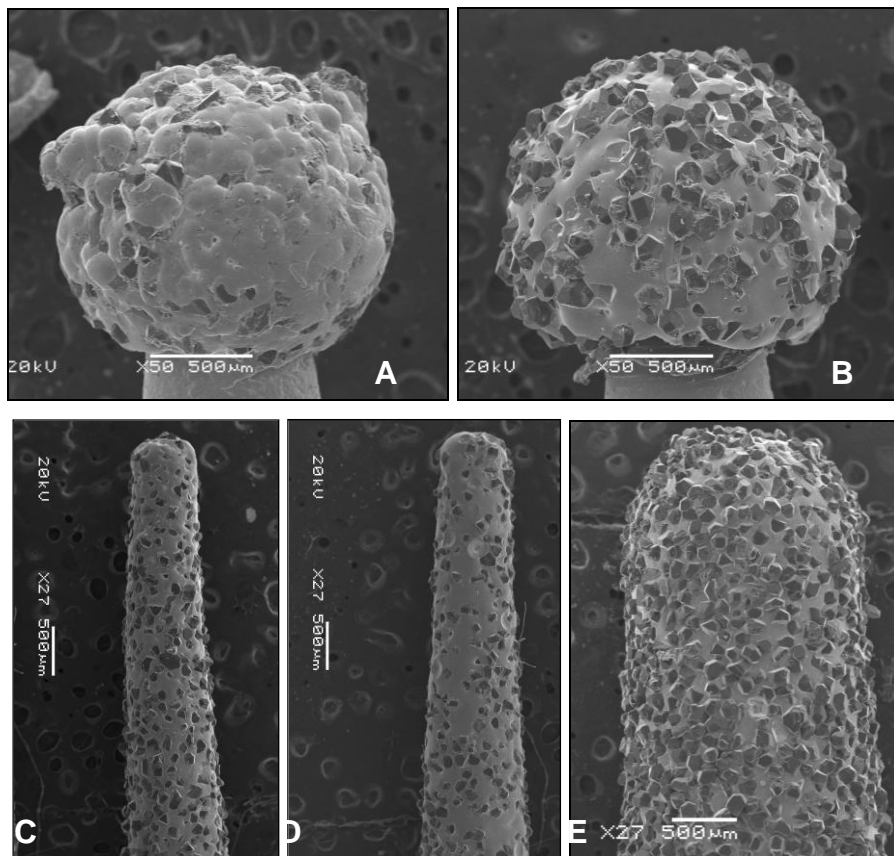


Figura 43. Ferramentas utilizadas no ensaio seis, antes de serem submetidas ao processo de usinagem. Na ordem PMG\_003\_2 (A), PMG\_003\_1 (B), PMG\_710\_2 (C), PMG\_710\_1 (D) e PMG\_720 em (E).

Após o processo de usinagem, a amostra foi analisada, obtendo-se uma imagem do local onde cada ferramenta atuou. O objetivo, além da verificação do desgaste das ferramentas com a mudança de parâmetros, é verificar o acabamento e o comportamento da superfície do material gemológico diante a interferência de dois formatos distintos de ponta de ferramentas, como se observa nas Figuras 44 e 45.

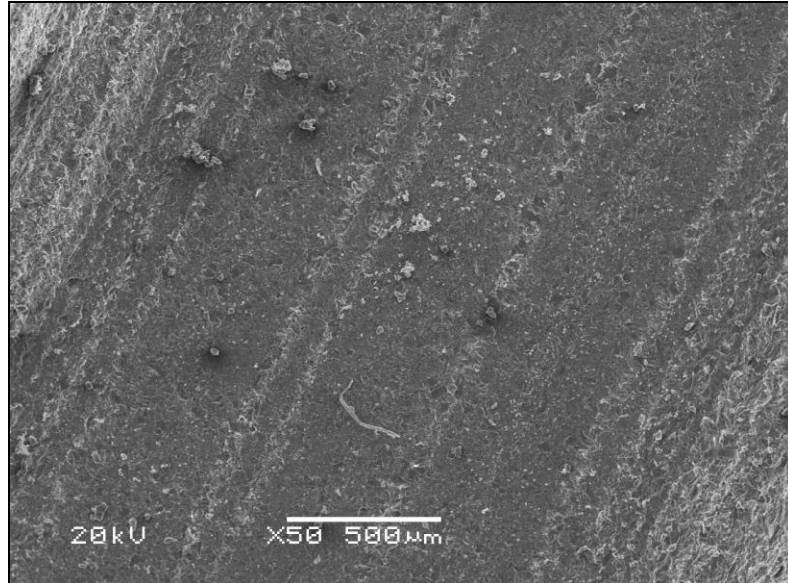


Figura 44: Superfície usinada pela ferramenta PMG\_720 (ponta cônica grande)

Observa-se, na Figura 44, que as marcas deixadas pela fresa no material são visíveis. Estas marcas são da ferramenta PMG\_720, com ponta em formato cônica de dimensões consideradas grandes (diâmetro de ponta igual a 2 mm). Na primeira análise por MEV, ferramenta com essas dimensões já haviam marcado o material, demonstrado na Figura 42 (B).

Na Figura 45 é possível observar que as marcas deixadas pela fresa são menores que as marcas deixadas pela fresa PMG\_720. A amostra desta Figura foi usinada pela fresa PMG\_710\_2 (diâmetro de ponta igual a 1 mm).

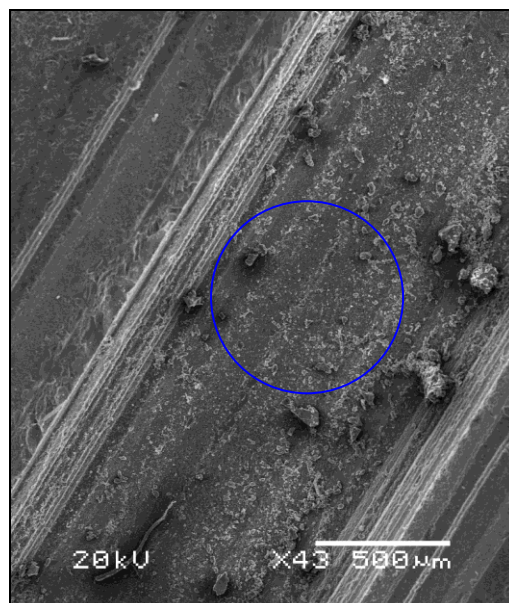


Figura 45. Marcas da fresa de ponta cônica, PMG\_710\_2, na superfície de opala branca.

Para a determinação do desgaste das ferramentas utilizadas nos ensaio número seis, é importante considerar que ferramentas iguais, compradas pelo mesmo código e dimensões, quando observadas no MEV apresentaram diferenças marcantes que certamente influenciam a usinagem.

Observa-se na Figura 46 que a ferramenta da direita apresenta mais diamantes aderidos na base que a da esquerda. Esta falta de conformidade deve ser levada em consideração quando ocorre a fabricação de camafeus produzidos em série.

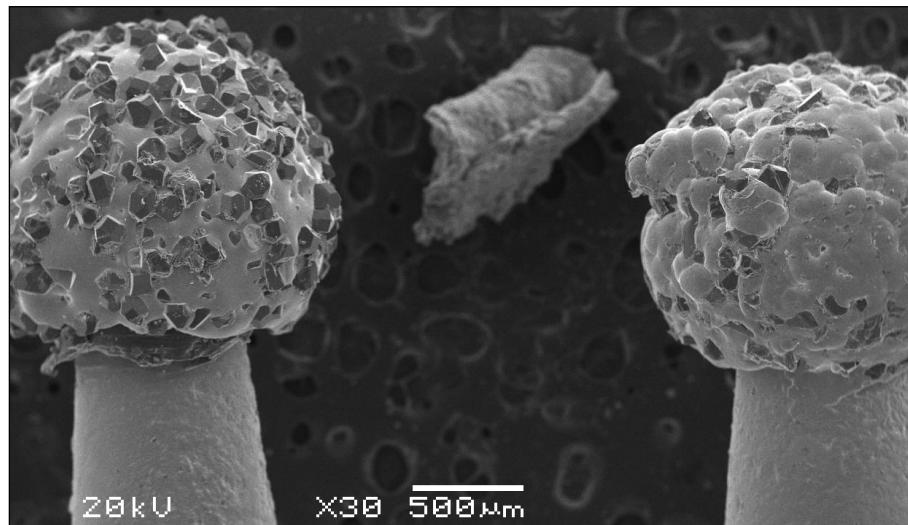


Figura 46. Imagem demonstra a irregularidade na semelhança dos formatos das duas ferramentas e a diferença na quantidade de diamantes.

Na avaliação do desgaste das ferramentas após o processo de usinagem no ensaio número seis, foram obtidas imagens de cada ferramenta na mesma posição em que foram fotografadas anteriormente ao processo de usinagem, para comparação.

As fresas PMG\_710\_1 e 710\_2 (ponta cônica de diâmetro 1 mm) foram analisadas antes e após o processo de usinagem, como se observa nas Figuras 47 e 48, e torna-se visível o desgaste e as ranhuras deixadas no material base da mesma.

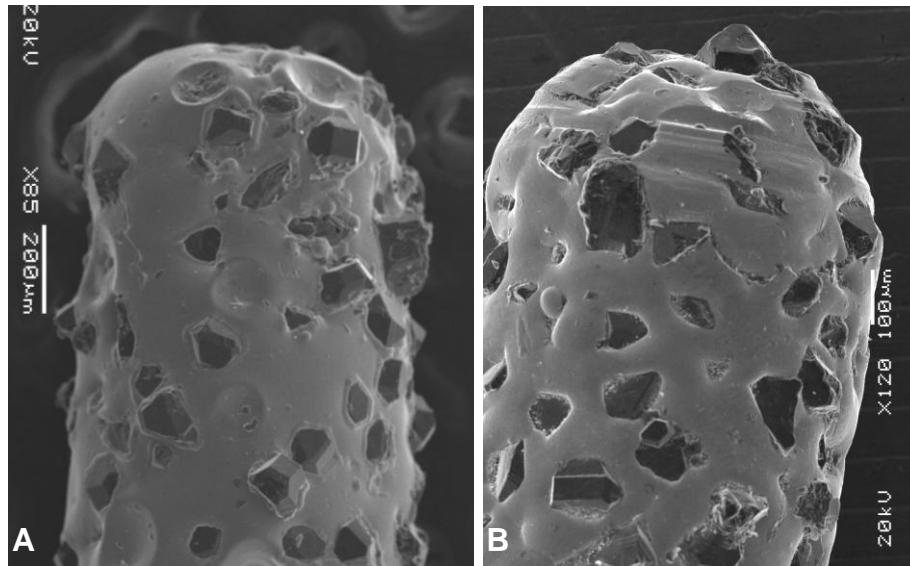


Figura 47. Em (A), ferramenta PMG\_710\_1 antes da usinagem e em (B), após o processo, com desgaste visível.

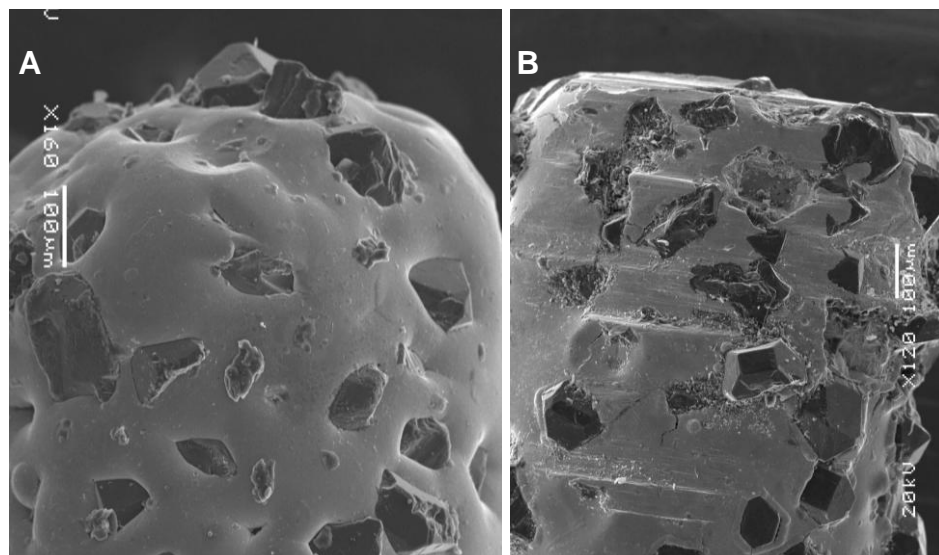


Figura 48. Ferramenta PMG\_710\_2 e o desgaste após a usinagem, observado em (B).

Na Figura 47 (B), este detalhe é observado pela ponta da fresa, onde existem ranhuras no material base da mesma. Na Figura 48 (B), o desgaste é mais visível, quando comparado com 47 (B), pois tanto o metal base da fresa quanto os diamantes foram danificados. O dano foi maior pois a fresa PMG 710\_2 foi utilizada na segunda etapa do ensaio seis, ou seja, com os parâmetros dobrados.

Nas ferramentas com formato de ponta esférica (PMG\_003\_1 e 2) e na ferramenta PMG\_720, de ponta cônica com diâmetro igual a 2 mm, não foi perceptível o desgaste, como se pode observar nas Figura 49 e 50, respectivamente..

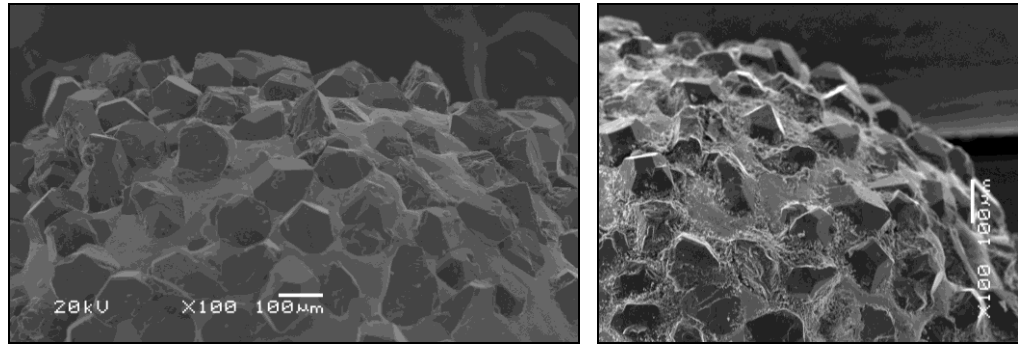


Figura 49. Em (A), fresa PMG\_720 antes da usinagem e em (B) após a usinagem, não demonstrando desgaste visível.

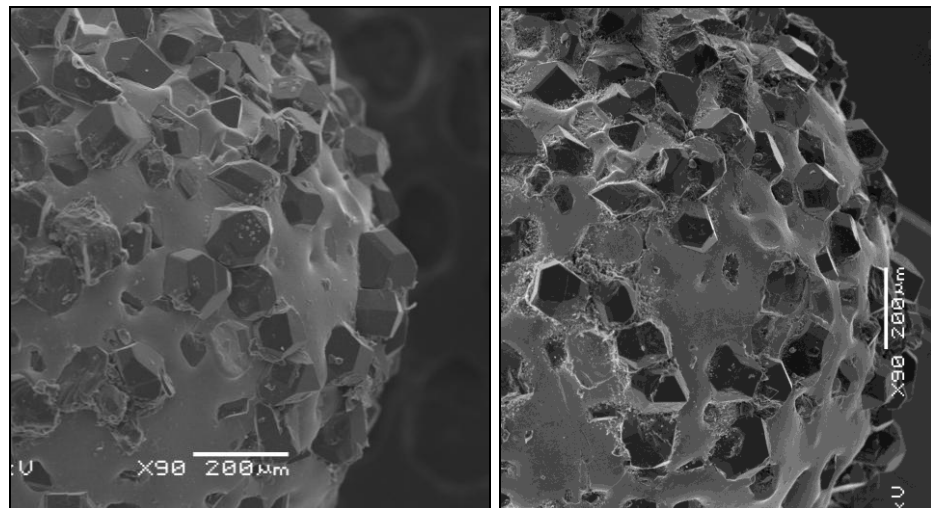


Figura 50. Fresa PMG\_003\_1 (formato esférico) em (A) antes do processo de usinagem e em (B) após, sem apresentar desgaste visível.

#### 4.1.2 Escaneamento a laser das ferramentas utilizadas no ensaio seis

Foi realizado o escaneamento da ponta das ferramentas utilizadas no ensaio na tentativa de, após a utilização das ferramentas e efetuados os ensaios, a fim de quantificar o desgaste da ferramenta através da sobreposição das imagens no *software* Geomagic®. O scanner utilizado é da marca Tecnodrill modelo a laser 3D da Digimill®, que possui funcionamento junto ao equipamento CNC. A marca do laser é OPTMET® e a lente foi de 50 mm. A distância entre os pontos capturados pelo laser foi de 0,05 mm de resolução.



A imagem gerada foi obtida na forma de nuvem de pontos, conforme pode ser observado na Figura 51. Com o auxílio do *software* Geomagic® foi feita a leitura desses pontos e a transformação da nuvem em superfície.

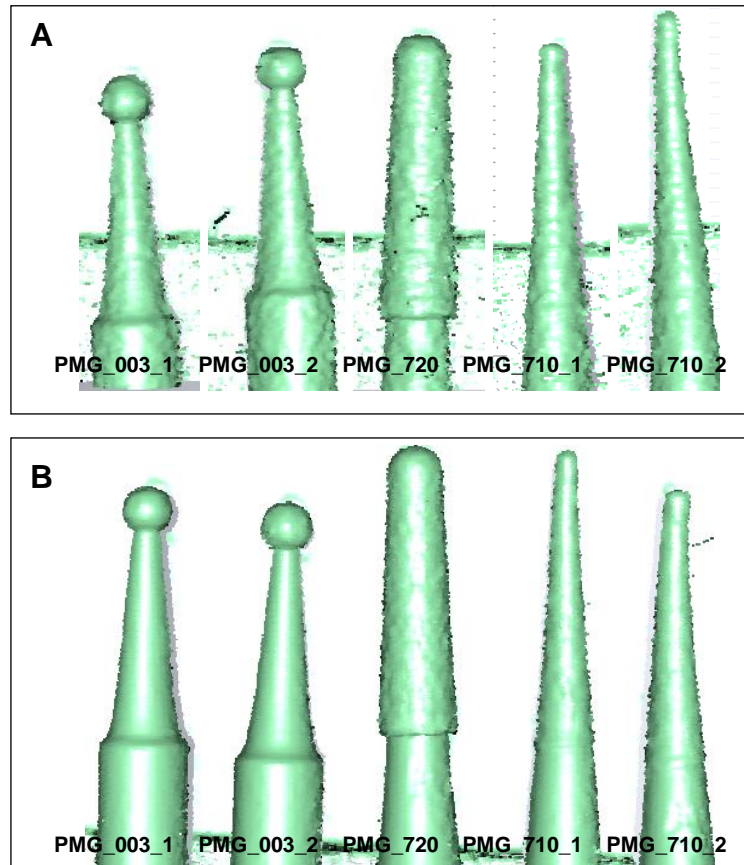


Figura 51. Em (A) escaneamento das ferramentas antes da usinagem e em (B) após usinagem. Nuvem de pontos renderizada para melhor visualização da morfologia das ferramentas.

Após a captação das imagens, as fresas PMG\_003\_2 (formato de ponta esférica), a PMG\_720 (cônica de diâmetro igual a 2 mm) e a PMG\_710\_1 (cônica de diâmetro igual a 1 mm) tiveram suas imagens antes e após o processo de usinagem sobrepostas com auxílio do *software* Geomagic®, para verificação do desgaste. Na Figura 52, se observa o início do processo, como exemplo, a fresa PMG\_720.

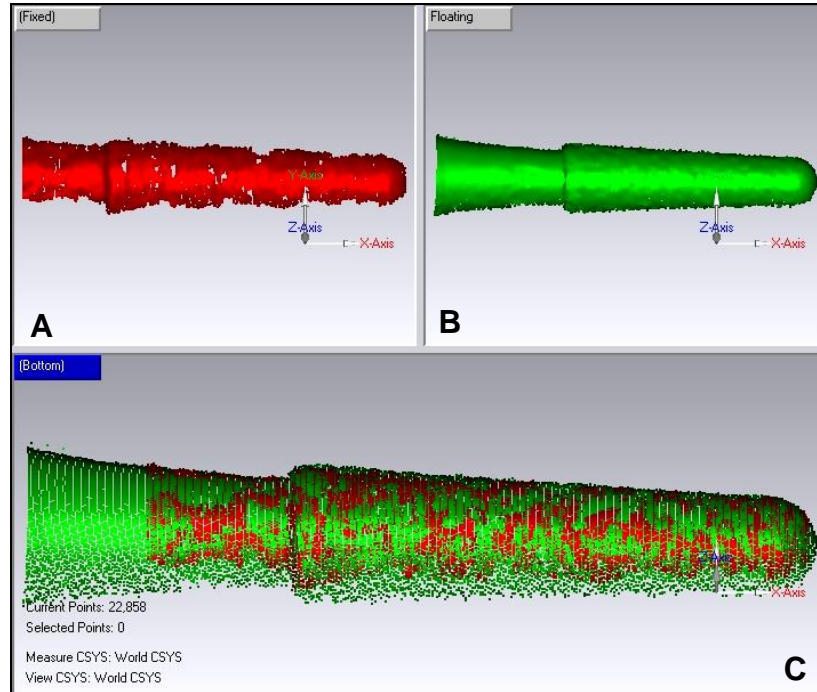


Figura 52. Fresa PMG\_720 antes do processo de usinagem em (B), após em (A) e em (C) a sobreposição das imagens.

Posterior a esta etapa, o próprio software sobrepõe as imagens e prevê a diferença entre as superfícies sobrepostas, como se observa nas Figuras 53, 54 e 55. As cores nos tons avermelhados indicam a maior diferença.

Conforme demonstra a Figura 53, a fresa PMG\_720 não apresentou desgaste significativo, assim como a Fresa PMG\_003\_2, representada na Figura 54.

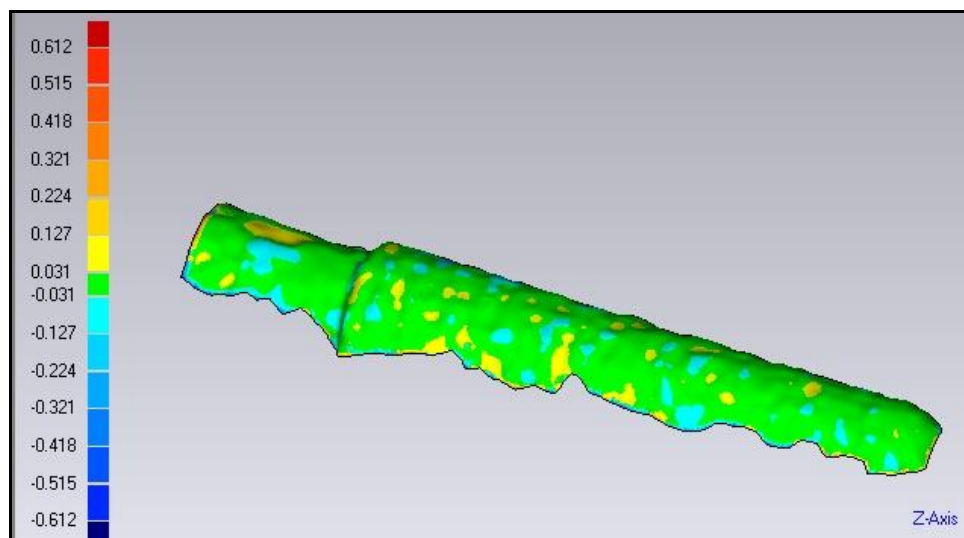


Figura 53. Fresa PMG\_720 e a ausência dos tons avermelhados, que indicam a diferença de medidas.

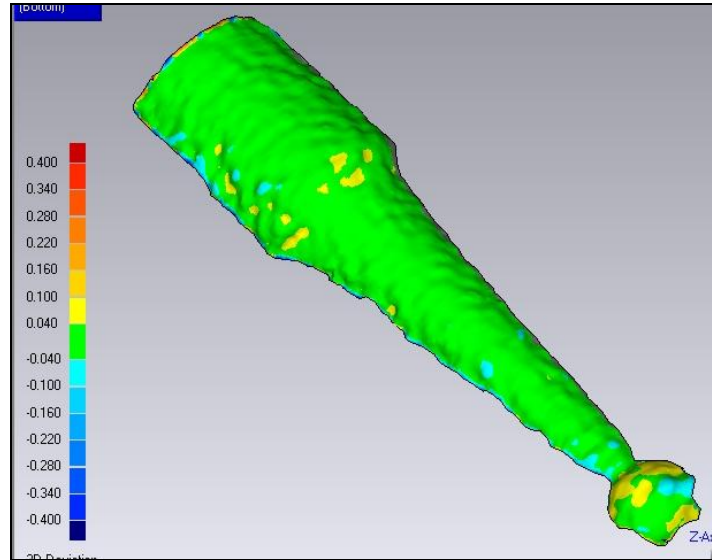


Figura 54. Fresa PMG\_003\_2 e a uniformidade de medidas na sobreposição, observada pela predominância do tom verde.

A fresa PMG\_003\_2 foi utilizada no ensaio número seis no segundo passe, ou seja, com parâmetros maiores (dobrados) que os utilizados para a PMG\_003\_1, como se pode verificar no Quadro 4. Portanto, se a fresa do passe número 2 não apresentou desgaste, não foi necessário a análise na fresa PMG\_003\_1, utilizada no primeiro passe, pois esta foi menos solicitada.

Na Figura 55, está representada a análise por sobreposição da fresa PMG\_710\_1 (ponta cônica de diâmetro 1 mm), utilizada no ensaio com menor solitação. Em detalhe a região desgastada.

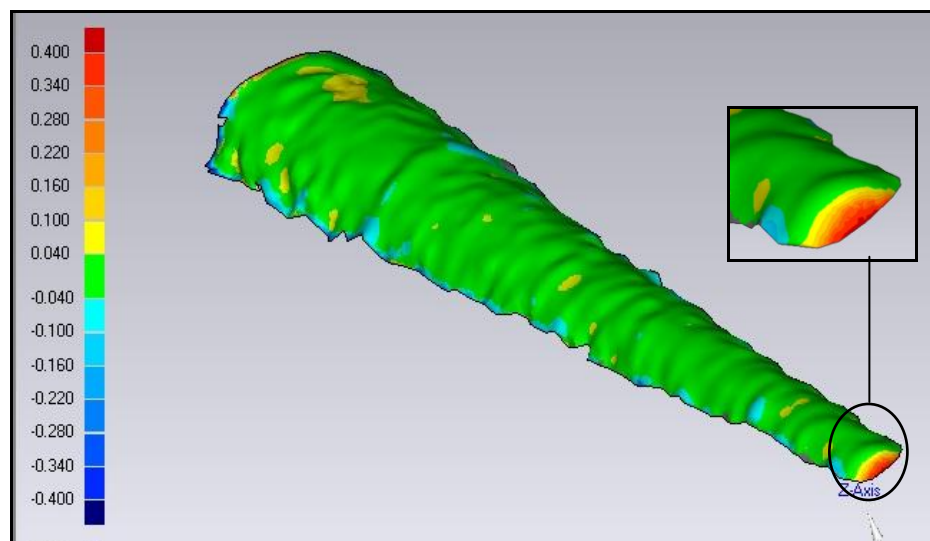


Figura 55. Fresa PMG\_710\_1. Em detalhe, ampliação da região que apresentou a diferença de níveis.

Nota-se que houve um desgaste significativo da ponta da fresa, verificado pela cor vermelha acentuada.

A fresa PMG\_710\_1 foi utilizada na primeira etapa do ensaio seis, e apresentou desgaste observado tanto por estas sobreposições geradas pelo *software* Geomagic® como pelas imagens obtidas por MEV. Este tipo de fresa, com ponta em formato cilíndrica e diâmetro de ponta igual a 1 mm. A fresa em questão foi considerada mais frágil quanto ao desgaste utilizadas nos ensaios, portanto, a que concede melhor acabamento à superfície dos materiais gemológicos.

Estas Figuras são apresentadas com intuito de demonstrar o método para verificar o desgaste das fresas com auxílio do laser 3D.

## CAPÍTULO V - DISCUSSÃO

Os materiais gemológicos ágata e opala branca são extraídos em grande quantidade em Salto do Jacuí, no Rio Grande do Sul e beneficiados em diversas empresas de grande a pequeno porte, existentes na região mineradora. Basicamente, os processos de beneficiamento realizados são o corte em chapas, tingimento e produção de objetos e artefatos pouco complexos, gerando, na economia do estado, um grande volume de exportações, tanto destes produtos quanto dos geodos em bruto.

Os processos de design ainda não refletiram sua importância na percepção da matéria-prima, beneficiamento e inovação tecnológica para melhoria dos produtos neste mercado de gemas e jóias da região. Percebe-se este fato nos produtos oriundos do comércio nas regiões mineradoras de ágata, pois pecam na estética e apelo visual, desvalorizando este material que possui um potencial bem maior. A matéria-prima também é exportada em bruto, pois, em outros países, é beneficiada em objetos de maior valor agregado, com tecnologias diferenciadas e uma estética apurada, que, posteriormente, retornam em parte ao próprio Brasil, porém com alto valor agregado. A questão que surge se refere a iniciativas para mudanças neste panorama de beneficiamento de gemas no Estado, tratando de utilizar de modo mais racional o que é extraído dos garimpos, para que o design e a tecnologia atuem juntos na sua valorização, para que a produção vá além de chapas de ágata tingidas, chaveiros sem apelo estético e para que a opala branca não seja considerada rejeito.

A Alemanha utilizava ágata brasileira desde o século XVI na fabricação de camafeus, objetos estes que se tornaram um clássico na joalheria com formas complexas esculpidas sob a forma de relevos. No entanto, este processo era desenvolvido manualmente. Pesquisas de design e processos voltadas a estes materiais ainda são escassas no Brasil, abrindo um vasto caminho a pesquisadores na busca por soluções inovadoras no uso e processamento do material gemológico extraído no RS. Esta inovação pode vir seguida do uso de novas tecnologias e novos processos, caracterizada pelo design envolvendo todas as etapas, não somente o produto final.

A opala branca é alvo desta pesquisa, por ser um material gemológico promissor e por não ser utilizada em empresas pela falta de tecnologia apropriada. Nesta pesquisa, o design atua como processo, havendo a preocupação na estruturação de uma metodologia adequada que alie a tecnologia, o material gemológico e a solução final representada por um objeto de adorno tradicional, porém, com características inovadoras engajadas no seu processo de fabricação.

A problemática do desenvolvimento da pesquisa girou em torno da opala branca, devido à suas fragilidades e peculiaridades estruturais, por possuir uma estrutura interna composta por água, o que ocasiona fissuras e a torna frágil sob ação de força, podendo quebrar durante o processo da lapidação e demais processos. A ágata é um material gemológico mais resistente a interferências mecânicas, como corte e usinagem, tanto que é utilizada em larga escala para diversos fins.

A tecnologia utilizada nesta pesquisa, usinagem CNC, teve como dificuldade técnica a fragilidade da opala branca com base em ágata. Para superar estas dificuldades foram analisados diversos fatores que intervieram no processo, além da peculiaridade do material. Fatores esses são: as ferramentas utilizadas, o desgaste destas ferramentas e o comportamento do material gemológico diante a estas interferências, para então, poder avaliar o resultado como um todo.

A usinagem CNC é uma tecnologia adequada para a reprodução de camafeus, pois permite, basicamente, a reprodução dos relevos fielmente em grande escala. Antes de realizar os ensaios de usinagem, houve a preocupação quanto à refrigeração para que a opala nem a ágata não quebrassem devido ao aumento da temperatura decorrente da fricção da fresa no material e devido à pressão exercida com o trabalho da fresa. Para solucionar o problema, a amostra do material foi aderida a um recipiente contendo água, o que possibilitou o desenvolvimento dos processos de usinagem sem haver dano à ferramenta nem ao material. Para que haja o aprimoramento desta técnica de produção de camafeus, alguns líquidos refrigerantes mais adequados podem ser testados, no lugar da água.

Algumas ferramentas diamantadas utilizadas apresentaram desgaste. Este desgaste ocorreu na base da ferramenta, onde estão fixados os diamantes. Os diamantes são fixados nas fresas de modo irregular, ocasionando, neste processo que envolve velocidade e pressão, a descolagem destes grãos da base da fresa e

até mesmo, a quebra de alguns. O desgaste ocorreu em maior profundidade nas fresas com ponta cônica e com pequeno diâmetro de ponta.

Como a pesquisa envolve a utilização de fresas comuns adquiridas no comércio, a conclusão que se chegou nos últimos ensaios foi que: para a preservação das ferramentas, para que possam ser utilizadas em mais processos de usinagem minimizando o desgaste, é necessária a definição de diversas estratégias de usinagem para um único camafeu, com utilização de três, quatro ou mais geometrias de pontas de fresa: uma com diâmetro maior para o desgaste, outra média para a definição do relevo, e outras mais finas para os acabamentos. Desta forma, o resultado é mais satisfatório visualmente, pois as superfícies dos materiais gemológicos se apresentam mais lisas, o processo leva menor tempo e há a preservação das ferramentas. Outra possível proposta relacionado às fresas para o aprimoramento do processo seria a utilização de uma fresa com diamante mono cortante, ou seja, uma fresa que possua apenas um grão na extremidade, que efetuará os desgastes e cortes.

Durante os ensaios percebe-se que na ágata o processo se diferencia, por ser um material mais duro e com uma estrutura diferente. A diferença na dureza entre a opala branca e a ágata de Salto do Jacuí é explícita na Escala Mohs, e também nos valores de micro dureza Vickers. Por este motivo foi dada preferência à usinagem da opala branca, deixando a ágata como base nestes primeiros ensaios de usinagem. Posteriormente, este material pode vir a oferecer uma vasta gama de possibilidades de camafeus, dada à riqueza das cores de seu bandamento natural, pela abundância no RS e pela valorização da ágata como material gemológico no mundo todo.

Além da tecnologia de usinagem CNC aplicada a materiais gemológicos, o uso do scanner móvel 3D inseriu mais inovação na pesquisa. Este fator se deve à reprodução de relevos na forma de camafeus, onde a imagem utilizada, por ter sido captada de um rosto, tornou o produto final exclusivo. O processo de desenvolvimento deste tipo de camafeu incorpora à metodologia definida nesta pesquisa após a realização de todos os ensaios e análises dos resultados, um fator muito relevante de inovação, aliando tecnologia e materiais com o design, considerado como processo.

Esta inovação gerou, inclusive, um pedido de patente de processos depositado em junho de 2009 que se encontra tramitando na SEDETEC (Secretaria

de desenvolvimento tecnológico) sinalizando que não há processo similar e que como pleito terá continuidade através de solicitação de preferência junto ao INPI (Instituto industrial de propriedade industrial).

O invento traz, como inovação principal, a possibilidade de beneficiamento de rejeito do material opala branca e ágata com utilização de tecnologia CNC, trazendo vantagens ao processo de produção de camafeus que se conhece, no sentido de possibilitar a reprodução e a criação de formas complexas, além de levar benefícios ao nicho de produção e comércio de materiais gemológicos abundantes na região. A utilização de uma tecnologia disponível com objetivo de produzir um objeto de adorno tradicional, porém até hoje fabricado por processos manuais, reflete a inovação desta interação. Para tanto, faz-se necessário a adaptação de refrigeração por água no equipamento CNC, para não danificar o material gemológico.

## **5.1 CONCLUSÕES**

O material gemológico extraído dos garimpos de Salto do Jacuí são pouco aproveitados na produção e comércio do estado. Com isso, a tecnologia utilizada e os objetos produzidos tornam-se obsoletos diante ao potencial que este material possui. Aliado a este fator, as pesquisas em design direcionadas ao beneficiamento destes materiais gemológicos são escassas, deixando em aberto inúmeros pontos a serem esclarecidos e aprofundados.

A metodologia aplicada no desenvolvimento desta pesquisa não teve nenhuma outra como base, pois foi a primeira aplicação da usinagem CNC como processo de beneficiamento de materiais gemológicos não envolvendo corte, mas na produção de camafeus.

O processo de usinagem CNC mostrou-se capaz de produzir camafeus de qualidade. O processo apresenta como pontos críticos as fresas utilizadas, além das particularidades da opala branca. No entanto, após análises no MEV e o desenvolvimento dos ensaios, a função adequada a cada tipo de fresa foi compreendida e definida, relacionada à geometria da ponta e suas dimensões.



Realizados os últimos ensaios já com os parâmetros definidos, pode-se preservar as fresas evitando seu desgaste desnecessário.

Então, para a produção de camafeus por processos de usinagem CNC com ferramentas de ponta diamantada comuns, é necessária a definição no software CAM de vários parâmetros, para cada ferramenta, sendo cada uma destinada a uma função: as de ponta cilíndricas para desbaste, as de ponta cônica com diâmetro acima de 1 mm para a definição dos relevos, as esféricas e as de diâmetro de ponta inferior ou igual a 1 mm para acabamentos finais. Ainda neste processo pode-se variar, além do tipo de fresas, a forma do caminho percorrido por elas, ou seja, as estratégias da usinagem no material, que podem ser lineares ou circulares e que se diferenciam no resultado final de acabamento.

Pode-se afirmar, ao analisar os resultados dos ensaios realizados neste trabalho de dissertação, que as ferramentas utilizadas nos processos de usinagem CNC poderiam possuir uma melhor distribuição e fixação dos diamantes para otimizar o tempo de usinagem e aumentar a duração e eficiência da ferramenta. A eficiência da ferramenta pode ser questionada no ensaio número 2 observando o desgaste visível, e no ensaio número 5, na 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, 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.

Toda esta metodologia para o beneficiamento por usinagem CNC só foi possível com a atuação interdisciplinar, pois são muitas as técnicas e materiais envolvidos neste processo complexo. A interdisciplinaridade enriquece e impulsiona uma pesquisa, refletida em todo o processo.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento da pesquisa, surgiram pontos que podem ainda ser desenvolvidos para colaborar com o enriquecimento da metodologia de usinagem CNC em opala branca e ágata. O aprofundamento neste tema de pesquisa otimizaria o aproveitamento destes materiais gemológicos, valorizando os produtos e a matéria-prima regional com introdução de tecnologia e design.

Como o foco dado ao trabalho foi direcionado ao processo e ao material, o desenvolvimento de fresas mais adequadas à usinagem CNC em materiais gemológicos faria com que o processo se tornasse menos demorado e evitaria o desperdício ocasionado pelo desgaste das ferramentas. Este desenvolvimento de fresas envolveria uma ponta monocortante de diamante, ou uma “ponta montada” com a melhor colocação dos diamantes e ainda mudanças do material base da ferramenta e de sua geometria.

Ainda focado no processo em si, o estudo, testes e aplicação de óleos refrigerantes no lugar da água para a usinagem poderiam trazer resultados diversos.

Tendo em vista a abundância de ágata e opala branca e o valor deste material para o Estado, o aprimoramento do processo de produção de camafeus em ágata e diversos outros materiais gemológicos também aumentaria as chances da disseminação deste processo pelas indústrias beneficiadoras, já que a opala branca possui suas peculiaridades e é menos aceita no mercado que a ágata.

Ampliando o estudo de produção de camafeus, testes com outras tecnologias, como a gravação a laser e gravação por ultrassom podem trazer resultados diferenciados e levantar novas questões quanto às respostas do material gemológico diante estas interferências.

## Referências bibliográficas

ACAUAN, Roberta. **Caracterização Geológica e Gemológica das Ametistas de Santana do Livramento, Sudoeste do RS**. 2004. Monografia apresentada ao curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AUGUSTIN, A. **Geologia e Mineralogia dos depósitos de opala da região do Salto do Jacuí, RS, Brasil**. 2004. Monografia apresentada ao curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BENUTTI, M; SILVEIRA, C; PINHEIRO, O. O design na joalheria brasileira. I Seminário sobre Design e Gemologia de Pedras, Gemas e Jóias do Rio Grande do Sul, 2009, Soledade. **Anais eletrônicos**. CD-ROM.

BOABAID, P. **A indústria de jóias no Brasil: posicionamento estratégico de uma micro-empresa**. 2006. Programa de pós-graduação e pesquisa em Administração e Economia, Ibmec. Disponível em: [www.ibmecrj.br](http://www.ibmecrj.br). Acesso em: novembro de 2008.

BOMFIM, G. **Metologia para desenvolvimento de projetos**. João Pessoa: Ed. Universitária, 1995, 64 p.

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.

BRANCO, P. A riqueza brasileira em gemas. I Seminário sobre design e gemologia de pedras, gemas e jóias do Rio Grande do Sul, 2009, Soledade. **Anais eletrônicos**. CD-ROM.

BRUXEL, E; ETCHEPARE, H.; KONZEN, J. **Estudo da utilização de softwares 3D e tecnologias de prototipagem CNC em gemas**. 4º Congresso internacional de pesquisa em Design, 2007. Disponível em: [www.anpedesign.org.br](http://www.anpedesign.org.br). Acesso em novembro de 2008.

BRUXEL, E; ETCHEPARE, H; BRANDT, E. **Viabilidade econômica de utilização do Ecodesign na diminuição do impacto ambiental no beneficiamento de gemas**. IV Congresso nacional de excelência em gestão. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: [www.latec.uff.br](http://www.latec.uff.br). Acesso em outubro de 2008

BÜRDEK, B. **História, teoria e prática do Design de produtos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006, 496 p.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002, 589 p.

CARDOSO, R. **Uma introdução à história do Design**. São Paulo: Editora Blucher, 2008, 273 p.

CAVALCANTE, M; JARDIM, V; BARROS, J. **Inserção de física moderna no ensino médio: difração de um feixe de laser**. Cad.Cat.Ens.Fís., v. 16, n. 2: p. 154-169, ago. 1999. Disponível em: [www.periodicos.ufsc.br](http://www.periodicos.ufsc.br). Acesso em março de 2009.

CODINA, C. **A joalheria: A técnica e a arte da joalheria explicadas com rigor e clareza**. Lisboa: Estampa, 2000, 160 p.

COSTA, L; NEUMANN, R. **Quantificação de fases minerais e de amorfos por difração de raios X, método de refinamento de espectro multifásico total (método de Rietveld)**. XV Jornada de Iniciação Científica – CETEM, 2007. Disponível em: [www.cetem.gov.br](http://www.cetem.gov.br). Acesso em março de 2009.

COSTA, M. **Beneficiamento de pedras preciosas no Vale do Taquari - Diagnóstico e modelo para análise e redução de perdas nos processos produtivos**. 2007. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COSTENARO, Alessandra. **Indústria de pedras preciosas: um estudo dos fatores competitivos em empresas de Soledade - RS**. 2005. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Maria.

DARRAGH, P.J.; GASKIN, A.J.; SANDERS, J.V. 1976. **Opals**. Scientific American, v. 234, p. 84-95.

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.

ETCHEPARE, H. **Contribuição do Ecodesign na utilização de materiais de origem animal (ossos e chifres) para fabricação de artefatos diversos**. 2005. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FALLER, R; SILVA, F; KINDLEIN, W. **A utilização da usinagem em altíssimas velocidades com quatro eixos no design de produto**. VII P&D, Curitiba, 2006. Disponível em: [www.ndsm.ufrgs.br](http://www.ndsm.ufrgs.br). Acesso em maio de 2009.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1986, 751 p.

FILHO, L.; MOL, A; ROCHA, R. Desenvolvimento de ferramenta computacional para auxílio ao projeto de gemas lapidadas. REM: **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, 58(4): 367 - 373, out. dez. 2005.

FILHO, V. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED – XRF) e por reflexão total (TXRF)**. Departamento de ciências exatas – Laboratório de instrumentação nuclear, 1999. Disponível em: [www.scholar.google.com.br](http://www.scholar.google.com.br). Acesso em maio de 2009.

FONSECA, J; PEIXOTO, J; XAVIER, L. **As possíveis contribuições da prototipagem rápida para a melhoria da competitividade na produção joalheira da cidade do Rio de Janeiro**. XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de Outubro de 2006.

FRAZÃO, C. Ecodesign no desenvolvimento dos produtos. Volume I. **Cadernos do Instituto nacional de engenharia e tecnologia industrial**. Instituto de tecnologias ambientais, 1995.

FRONDEL, C. **The system of mineralogy**. Silica minerals. Volume III, 1962.

INTERNATIONAL COUNCIL OF SOCIETIES OF INDUSTRIAL DESIGN. **ICSID**. Publicado no conteúdo do Programa Brasileiro de Design do Ministério da Indústria, do Comércio e do Turismo, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS. **IBGM**. Políticas e ações para a cadeia produtiva de gemas e jóias. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS. **IBGM**. Boletim do Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos. n 50, ano XV, janeiro, fevereiro e março, 2007.

JUCHEM, P. L; STRIEDER, A. J; HARTMANN, L. A; BRUM, T. M. M; PULZ, G. M; DUARTE, L. C. 2007. **Geologia e Mineralogia das gemas do Rio Grande do Sul**. In: 50 Anos de Geologia. Instituto de Geociências. Contribuições.01. Editora Comunicação e Identidade, CIGO e IG-UFRGS, Porto Alegre. V. único, p. 177-197.

JUCHEM, P. L; BRUM, T. **Gemologia para designers**. Apostila elaborada ao Programa de Pós-graduação em Design – Laboratório de Gemologia, UFRGS, 2008.

LEON, E. **Design Brasileiro, quem fez, quem faz**. Rio de Janeiro: Viana e Mosley, 2005

LICCARDO, A; CHODUR, N. Turismo mineral no Brasil – gemologia e geoturismo. I Seminário sobre design e gemologia de pedras, gemas e jóias do RS, 2009. Soledade. **Anais eletrônicos**. CD-ROM.

LUZ.A, LINS F. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. cap.I. Comunicação Técnica elaborada para a 4ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios. Pág. 3 a 16. 2004

MACHADO, R. **Caderno de Tendências do Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos**. 2008.

MacNEVIN, A; HOLMES, G. **Gemstones**. The Mineral Industry of New South Wales - Geological survey of New South Wales – Department of Mineral Resources and Development, n 18, Ed. 2, 1980.

MANZINI, E; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**. São Paulo: EdUSP, 2002.

MICHELIN, C; HARTMANN, L; STRIEDER, A; PIRES, C. **Os depósitos de ágata no Rio Grande do Sul: uma revisão.** In: semana acadêmica dos alunos de pós-graduação em Geociências, 1., 2006, Porto Alegre. Resumos... Porto Alegre: UFRGS, p. 97-100, 2006.

MOL, A; SANTOS, V; TEIXEIRA, B. **A qualidade do polimento de pedras preciosas como fator de valorização no mercado de gemas.** Quarto Congresso Internacional de Pesquisa em Design, 2007.

MORAES, D. **Limites do Design.** São Paulo: Studio Nobel, 1999, 168 p.

NIEMEYER, L. **Design no Brasil: origens e instalação.** Rio de Janeiro: 2 AB, 2007, 134 p.

PAHL, G; BEITZ, W; FELDHUNSEN, J; GROTE, K. **Projeto na Engenharia.** São Paulo: Blücher, 2005, 411 p.

PALMA, P. **Estudo dos rejeitos de garimpos de ametista do Distrito mineral do Alto Uruguai, RS.** Monografia apresentada ao curso de Geologia da UFRGS: Porto Alegre, 2003.

PUJARI, D. **Eco-innovation and new product development: understanding the influences on market performance.** Elsevier: Technovation 26 (2006) 76–85

REYES, B; OSTROOUMOV, M; FRITSCH, E. **Estudio mineralógico de la desestabilización de ópalos mexicanos.** Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, num. 3, p. 391-400, 2005.

RIBEIRO, W. **As formas artísticas na Grécia antiga.** Revista eletrônica Graecia Antiqua ISSN 1679-5709, 1998.

SCHWARZ, D. **Gemas policristalinas e amorfas.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, Ano XLVIII, Volume XXXVII, Número 2, 1984.

SCHUMANN, W. **Gemas do Mundo.** São Paulo: Disal, 2006, 279 p.

SILVA, R; PETTER, C; SCHNEIDER, I. Avaliação da perda da coloração artificial de ágatas. REM: **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, 60(3): 477-482, jul. set. 2007.

STRIEDER, A. **Geologia e mineração em áreas de garimpo de pedras preciosas no estado do Rio Grande do Sul.** UFRGS, 2005.

SVISERO, D.P; FRANCO, R. **A Província Gemológica Brasileira.** In: Principais Depósitos Minerais do Brasil, Volume IV - Parte A - Gemas e Rochas Ornamentais. DNPM - p. 9-16, 1991.

VALE, E. **Análise econômica das pequenas e médias empresas de mineração.** Relatório final. Brasília: CPRM, 2000.

WEBSTER, R. **Gems: Their sources, descriptions and identification**. Butterworth & Co Ltd, 1983.

WINTER, J; GOMES, L; VERDUM, R. Impactos ambientais e avaliação dos riscos na exploração de ametista na região do Alto Uruguai-RS. In: Simpósio Brasileiro de desastres naturais 1,. Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: GEDN / UFSC, p.1-13. (CD-ROM), 2004.

ZENZ, J. **Agates**. Haltern: Bode Verlag, 2005, 656 p.

#### **Sites de referência**

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)  
[www.scholar.google.com](http://www.scholar.google.com)

Trabalho de pesquisa apoiado pelo CNPq.