

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Faculdade de Arquitetura
Programa de Pós-Graduação em Design**

DENISE RIPPEL ARAUJO BARP

**DESIGN E MATERIAIS: CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO PROCESSO DE
CORTE DE ÁGATA POR JATO D'ÁGUA EM FORMAS COMPLEXAS**

**Porto Alegre
2009**

DENISE RIPPEL ARAUJO BARP

**DESIGN E MATERIAIS: CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO PROCESSO DE
CORTE DE ÁGATA POR JATO D'ÁGUA EM FORMAS COMPLEXAS**

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: Ney Francisco Ferreira,
Prof. Dr.

Porto Alegre
2009

DENISE RIPPEL ARAUJO BARP

**DESIGN E MATERIAIS: CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO PROCESSO DE
CORTE DE ÁGATA POR JATO D'ÁGUA EM FORMAS COMPLEXAS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Design, da Escola de Engenharia e da Faculdade de Arquitetura, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do título de MESTRE EM DESIGN.

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira - Orientador
Escola de engenharia – PGDESIGN/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Juliano Tonezer da Silva - Membro
Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Jóias – UPF

Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior - Membro
Escola de Engenharia – PGDESIGN/UFRGS

Prof. Dr. Pedro Luiz Juchem - Membro
Instituto de Geociências – PGDESIGN/UFRGS

Porto Alegre, _____ de _____ de 20____

*Dedico este trabalho a meus pais, Cleóbis e Haidee,
que sempre me incentivaram em minhas realizações e
em especial por me estimularem a estudar e a
aprender.
E aos amados Fábio e Mariana que me dão força e
apoio em todos os momentos.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração direta de muitas pessoas. Manifesto minha gratidão a todas elas e de forma particular:

A meu orientador, Ney Francisco Ferreira, pela orientação à minha pesquisa, por sua disposição, dedicação, paciência e apoio para que se concretizasse. E por acreditar em minha capacidade.

A Wilson Kindlein Júnior, por me mostrar a importância da pesquisa, iniciada na oportunidade de trabalho no LdSM, pelo incentivo para que eu fizesse parte deste programa de Pós-Graduação, por seu empenho e dedicação como coordenador do PGDesign e por sua contribuição na etapa de qualificação desta dissertação.

A todos os mestres que ministraram as disciplinas que contribuíram para formação dos conhecimentos adquiridos durante este curso de pós-graduação, em especial a Liane Roldo, Régio Pierre da Silva e Fábio Gonçalves Teixeira. A Liane e Régio agradeço também pela contribuição na etapa de qualificação.

A Pedro Luiz Juchem por sua generosidade em dividir e assim, multiplicar, seus conhecimentos do mundo da gemologia, por sua contribuição nesta pesquisa, pelas aulas ministradas ao PGDESIGN e pela oportunidade da viagem de campo.

A Rosito Vendrúsculo, por permitir a pesquisa em sua empresa Belapedra, e por sua direta contribuição na viabilização dos experimentos práticos.

A Sara Copetti Klohn, por sua importante contribuição nos conteúdos relacionados às formas gráficas e por sua dedicação e auxílio na estruturação dos conteúdos de pesquisa bibliográfica.

A Mariana Cidade por sua amizade, por seu importante incentivo, por sua disposição e auxílio indispensáveis na etapa de registro dos resultados.

A Lauren Duarte e seus sábios conselhos, a Manuela Medeiros por seu apoio sempre disponível, a Eduardo Bruxel, Fabio Pinto da Silva, Luiz Henrique Cândido, Álvaro Scur, Okajima Masamitsu, Marlova Sperotto e aos demais amigos e colegas que dedicaram seu tempo e contribuíram com esta pesquisa. Ao LACER, a Antônio Takimi.

Aos funcionários do PGDesign, especialmente à Eloísa Santana de Almeida e Américo Jardim Pinto Júnior.

Ao meu marido por ter esta presença que acolhedora, que me fortalece e ilumina a minha vida. A Mariana por sua companhia que torna nossa vida mais leve e feliz.

As minhas irmãs Ana e Helena pelo amor incondicional e amizade desde que nascemos. Aos meus pais que são a minha base, meus exemplos de amor e que me ensinaram a olhar para frente e buscar meus objetivos.

Ao meu sogro Telvino Barp por seu olhar atento, inteligente e dedicado nas palavras deste presente estudo.

E aos meus familiares, das famílias Araújo, Rippel e Barp pelo amor e compreensão nas horas de ausências que foram necessárias durante este período de estudos.

RESUMO

No estado do Rio Grande do Sul, estão localizadas importantes regiões de extração e processamento do material gemológico ágata. No Distrito Mineiro do Salto do Jacuí encontram-se as maiores jazidas de ágata do Brasil e do Mundo. No município de Soledade se concentram as principais empresas de beneficiamento e comércio de materiais gemológicos. Apesar da abundância de material, a maioria dos objetos produzidos apresenta baixo grau de inovação, os produtos oferecidos no mercado são muito semelhantes entre si e tem, em comum, a falta de diferencial e de utilização de processos que envolvam tecnologia. A ágata é geralmente exportada em estado bruto ou apresentando baixo grau de aproveitamento. O processamento mais comum, utilizado na maior parte das empresas, é o corte em chapas que posteriormente são lixadas, polidas e tingidas em diversas cores. Entre as empresas pesquisadas no presente estudo apenas uma já utiliza processos envolvendo novas tecnologias. Pode-se afirmar que a pesquisa e estudos que auxiliem em um melhor aproveitamento do material ágata possam representar novas oportunidades de produção de objetos e adornos pessoais (jóias) modificando um cenário onde o design inovador é pouco explorado e apresentado.

A metodologia empregada para a realização deste estudo contemplou etapas de conhecimento da realidade dos locais de extração, beneficiamento e comercialização de ágata, avaliação dos processos, ensaio de usinagem convencional CNC, ensaios de usinagem não convencional por jato d'água CNC e desenvolvimento de produtos em formas complexas. Foram realizados vinte e quatro ensaios de usinagem, a análise posterior identifica larguras e espessuras ideais buscando a otimização da matéria-prima. Desta forma foi possível alcançar o objetivo principal nesta pesquisa de realizar o corte de ágata com utilização de tecnologia CNC em peças com formas complexas.

Palavras-chave: Design; Usinagem CNC; Corte por jato d'água CNC; Materiais, Ágata; Formas Complexas.

ABSTRACT

Rio Grande do Sul State, Brazil, has important regions of extraction and processing of agate. Salto Jacuí Mining District, in the central region of this State, is one of the largest and more important agate's mines region of Brazil and even of the World. In Soledade town, there are the most important gemstone processing and trade companies of this State. Despite the abundance of gem materials, most of the objects produced in the different companies are very similar and have in common that they seldom are manufactured using new technological processes. Agate is usually exported as raw material or as cut polished slabs which can be dyed in various colors. Among several companies studied in this research, only one uses industrial processes involving new technologies. So, scientific studies to indicate a better use of agate produced in Rio Grande do Sul, can provide new opportunities for the production of objects and personal ornaments (jewelry), modifying the trade where innovative designs are little explored.

The methodology used in this study had several steps: identification of the extraction, processing and trade places of agate; evaluation of the industrial benefit processes used in agate; testing of conventional CNC machining on agate slabs; and testing on agate slabs of non-conventional computer controlled machining by water jet cutting (WJC), with development of complex forms agate products. Twenty-four machining tests were carried out, with further analysis identifying ideal widths and thicknesses to optimize the use of agate raw material. With these tests, it was possible to achieve the goal of this study, which is to cut agate using water jet technology, in order to produce agate objects with complex forms.

Keywords: Design; CNC Machining; Water Jet Cutting CNC; Materials; Agate; Complex forms, Complex shapes.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE QUADROS.....	12
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Problema da pesquisa.....	19
1.2. Delimitação da pesquisa.....	20
1.3. Objetivos da pesquisa.....	20
1.3.1. <i>Objetivo geral</i>	20
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	20
1.4. Hipótese da pesquisa.....	21
1.5. Justificativa da pesquisa.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1. O setor de pedras preciosas.....	24
2.1.1. <i>Definições e nomenclaturas</i>	24
2.1.2. <i>Indústria de lapidação de pedras preciosas no mundo</i>	30
2.1.3. <i>Ocorrências de materiais gemológicos no Brasil</i>	32
2.1.4. <i>Ocorrências de materiais gemológicos no RS</i>	34
2.1.4.1. <i>Ágata no RS</i>	35
2.2. A ágata (substância gemológica).....	37
2.2.1. <i>Propriedades físicas</i>	41
2.3. Controle numérico computadorizado.....	42
2.3.1. Projeto e Fabricação auxiliados por computador – CAD/CAM.....	43
2.4. Usinagem convencional CNC.....	44
2.5. Usinagem não convencional por jato d'água.....	46
2.6. Formas gráficas complexas.....	49
2.7. Design.....	55
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
3.1. Pesquisa de campo.....	58
3.2. Processos de usinagem.....	64
3.2.1. <i>Usinagem convencional CNC</i>	64

3.2.2. Usinagem não convencional por jato d'água com abrasivos.....	65
3.3. Caracterização do material abrasivo.....	68
3.4. Espessuras das chapas de ágata.....	68
3.5. Formas.....	69
3.5.1. Formas simples.....	69
3.5.2. Formas de média complexidade.....	70
3.5.3. Formas complexas.....	71
3.5.4. Desenvolvimento de formas complexas e programação CAM e CNC.....	75
4. RESULTADOS E ANÁLISES.....	77
4.1. Resultado do ensaio de usinagem convencional CNC.....	77
4.2. Ensaio e resultados de usinagem não convencional por jato d'água	78
5. CONCLUSÕES.....	88
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
7. Referência bibliográficas.....	91
8. Anexos.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistemas Cristalinos dos Minerais.....	28
Figura 2: Escala de Mohs - Dureza dos Minerais.....	29
Figura 3: Imagem de Gemas Lapidadas.....	31
Figura 4: Mapa Gemológico Brasileiro.....	33
Figura 5: Mapa Gemológico da Região Sul do Brasil.....	34
Figura 6: Mina de extração de ágata, município do Salto do Jacuí.....	36
Figura 7: Geodo de ágata cortado.....	36
Figura 8: Geodos de ágata.....	37
Figura 9: Chapa de quartzo (ágata e macrocristais).....	38
Figura 10: Fotomicrografia de seções de geodos vistas ao microscópio petrográfico	39
Figura 11: Chapas de ágatas tratadas por tingimento.....	40
Figura 12: Chapa de ágata (tratada termicamente para realçar a cor).....	41
Figura 13: Inter-relações de formas.....	51
Figura 14: Diferentes formas ordenadas de dispor círculos.....	52
Figura 15: Imagem de Equipamento para corte de geodos de ágata em chapas.....	59
Figura 16: Imagem de equipamentos para lixar e polir chapas de ágata, setor de acabamento.	60
Figura 17: Imagem do setor de polimento e acabamento de ágata.....	60
Figura 18: Imagem de objetos produzidos com utilização de chapas de ágata SENAI – RS	61
Figura 19: Imagem de outros objetos produzidos com utilização de chapas de ágata- SENAI-RS	61
Figura 20. Chapas tingidas – etapa de secagem.....	62
Figura 21. Em A) equipamento para corte de chapa de ágata, em B) operador controlando o processo por computador.....	63
Figura 22: Equipamento para usinagem convencional CNC – Model Master.....	65
Figura 23: Equipamento para usinagem por jato d'água CNC – Jetstream.....	66
Figura 24: Componentes do equipamento de corte por jato d'água.....	66
Figura 25: Imagens do equipamento Jetstream. Em (A) pode ser visualizado o compartimento de material abrasivo, em (B) vista aproximada do equipamento,	67

na parte de saída da do jato d'água.

Figura 26: Vista aproximada do equipamento em operação de corte.....	67
Figura 27: Forma 01: simples retangular com linhas com larguras diversas.....	70
Figura 28: Formas de complexidade média. A união de formas.....	70
sobrepostas vazadas. Em (A) formas ovais, em (B) formas de círculos, em (C) formas de gotas e em (D) formas de losangos	
Figura 29: Em (A) forma da natureza (a ponta do rabo do camaleão),	71
em (B) a proporção expressa no retângulo áureo sobreposta a forma encontrada na natureza e em (C) a curva de Fibonacci inscrita dentro do triângulo áureo	
Figura 30: Forma complexa composta por círculos agrupados,.....	72
disposição iniciada.Utilizando a espiral logarítmica ou curva de Fibonacci como ponto de partida.	
Figura 31: Forma 06, em (A) forma complexa com extremos arredondados,.....	73
composta por repetição de formas circulares, variando larguras de linhas, também cheios e vazados, e (B) estruturação da forma composta por círculos de raios diferentes. Unidade de medida milímetros.	
Figura 32: Forma 07, em (A) forma complexa com extremos pontiagudos,.....	73
composta por repetição de formas triangulares, variando larguras de linhas e formas cheias e vazadas. e (B) estruturação da forma composta por triângulos de diferentes ângulos em seus extremos. Unidade de medida milímetros.	
Figura 33: Forma 08: complexa com extremos arredondados,	74
composta por repetição de formas circulares vazadas, variando os tamanhos dos raios. Unidade de medida milímetros.	
Figura 34: Forma complexas sobrepostas.....	75
Figura 35:Forma 09: complexa com extremos pontiagudos,	75
composta por repetição de formas triangulares, variando os ângulos das pontas dos triângulos. Unidade de medida milímetros.	
Figura 36: Imagem da programação em programa Bob-CAD.....	76
Figura 37. Ensaio de usinagem convencional,	77
trajetória do desbaste (pontilhado). Chapa de ágata de espessura 3,0 mm	
Figura 38: Forma 01: simples linear, ensaio com chapa de espessura 5,0 mm.....	80
Figura 39: Forma 01: simples linear, ensaio com chapa de espessura 4,5mm.....	81
Figura 40:Forma 01: simples linear, ensaio com chapa de espessura 3,5 mm.....	81
Figura 41.Forma 01:simples linear, ensaio com chapa de espessura 2,5 mm.....	82

Figura 42. Formas de complexidade média, composta por duas formas.....	82
Em (A), forma 02, em (B) forma 03, em (C) forma 04 e em (D) forma 05	
Espessura de chapa 5,0 mm.	
Figura 43: Forma 08: complexa composta por círculos vazados.....	83
Ensaio com diferentes espessuras, em (A) 4,0 mm, em (B) 4,5, em (C) 3,5mm e em (D) 2,5 mm. Em (E) peça com régua indicando tamanho.	
Figura 44: Forma 09: complexa composta por triângulos vazados.	84
Em (A) ensaio com espessura de 4,0 mm, em (B) espessura de 3,5, em (C) espessura de 2,5mm. Em (D) peça com régua indicando tamanho.	
Figura 45: Forma 06: complexa composta por círculos cheios e vazados,	85
com larguras de linha variadas. Em espessuras de chapa variadas, em (A) 5,0 mm, em (B) 4,5mm, em (C) 3,5 e em (D) 2,5mm. Em (D) peça com régua indicando o tamanho.	
Figura 46: Peças sobrepostas, ensaios 16, 17, 18 e 19. Na ampliação,.....	86
rachadura apresentada no ensaio de número 19, com chapa de espessura 2,5 mm.	
Figura 47: Forma 07: complexa composta por triângulos cheios e vazados.....	87
com larguras de linha variadas. Em espessuras de chapa variadas, em (A) 5,0 mm, em (B) 4,5mm, em (C) 3,5 e em (D) 2,5mm. Em (E) peça com régua indicando o tamanho.	

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Propriedades físicas da ágata.....	42
Quadro 2: Ensaios de Usinagem não convencional por jato d'água.....	79

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

APL - Arranjo Produtivo Local

AWJC – Abrasive Water Jet Cutting (Corte por jato d'água com abrasivos)

CAD - Computer Aided Design (Projeto auxiliado por computador)

CAM - Computer Aided Manufacturing (Manufatura auxiliada por computador)

CNC - Controle Numérico Computadorizado

GPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

IBGM - Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos

MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

RS - Rio Grande do Sul

RGD – Rede Gaúcha de Design

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SPL - Sistema Produtivo Local

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

WJC – Water Jet Cutting (Corte por jato d'água)

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a procura por tecnologias que possam auxiliar o processo produtivo industrial se tornou importante ferramenta para manter empresas competitivas e atuantes frente a seus concorrentes, em um mercado aberto e integrado. Pesquisadores e empresas de diversas áreas estudam e buscam novas formas de processar os materiais com aumento de produtividade e, se possível, minimizando esforços humanos em tarefas que possam ser auxiliadas por maquinários eficientes.

Entre as tecnologias associadas à produção industrial, podem ser citadas a automação dos processos via controle numérico computadorizado (CNC - *Computer Numerical Control*), a utilização de tecnologias de manufatura auxiliada por computador (CAM - *Computer Aided Manufacturing*); e projeto auxiliado por computador (CAD - *Computer Aided Design*), esta última aplicada principalmente em estágios anteriores à produção, como por exemplo, os estágios de desenvolvimento virtual de projetos e simulação de atuação de maquinários e processos.

As formas de processar as diversas matérias-primas foram sendo refinadas com o passar dos anos e séculos. Entre os materiais que geraram desejo e fascínio nos seres humanos estão os metais e as pedras preciosas.

A prática das artes mineralógicas, de talhar minerais e rochas e do beneficiamento de gemas, vem proporcionando a geração de negócios, trabalho e renda desde os primórdios da civilização. O homem ao longo dos séculos deu forma aos materiais encontrados na natureza, confeccionou suas ferramentas, armas e utensílios e melhorou continuamente sua qualidade de vida (Ferroli et al, 2002; apud Costa, 2007)

No contexto vivido neste segundo milênio, muitas são as possibilidades de processos, que trazem melhores condições e maior eficiência na

execução de tarefas (que eram artesanais) e produção de bens de consumo de forma mecanizada. Porém a base da criação, mesmo com todas as mudanças que a humanidade passou, segue dependendo do pensar humano. A atração pela arte, o desejo de expressar-se e o costume de adornar-se, constituem elos com nossos antepassados. Segundo Gola (2008, p.07),

o homem, desde o início de sua existência, produz elementos artísticos associados a ornamentos – as jóias- , revelando assim sua criatividade , representando os símbolos de cada época e colocando em destaque a dimensão estética do mundo material, ou mesmo, das formas naturais.

A arte criativa, hoje em dia, pode ter novas perspectivas de produção, como sua aplicação em objetos para a produção em série. Os profissionais que atuam nesta área são os designers, ou desenhistas industriais. Estes podem representar suas idéias e projetos de forma artesanal, com lápis, lapiseiras, réguas, mas muitos também se utilizam de outros recursos que podem refinar esta representação e encaminhar ao processo produtivo com maior facilidade.

Benefícios na área do design abrangem as novas possibilidades disponibilizadas pelos softwares de desenho vetorial; como o Corel Draw^R, de representação 2d, e o Rhinoceros^R, de representação 3d. Estes softwares auxiliam tanto na visualização virtual de um produto como na transmissão das informações e dados, com precisão, aos comandos computadorizados de produção.

Com processos produtivos associados a tecnologias, as possibilidades de criar formas mais elaboradas e complexas permitem a obtenção de um produto final com dimensões cada vez mais fiéis ao projeto.

Nos processos de corte de gemas, como a ágata, os processos mecânicos mais antigos com discos cortantes apresentavam muitas restrições de corte em formatos complexos e peças com detalhes vazados. Apresentavam

também muitas falhas dimensionais. A diminuição das falhas associadas à precisão dimensional das gemas lapidadas é necessária e imprescindível, principalmente quando estas constituem parte de produtos e devem ser encaixadas com exatidão. Nestes casos, poucos milímetros são críticos para peças produzidas em série, em processos como, por exemplo, a fundição por cera perdida, muito utilizada na produção joalheira.

As novas ferramentas de trabalho dos designers (softwares específicos) e as novas possibilidades de processos produtivos associados à criatividade humana abrem novos horizontes para estes profissionais, utilizando o design e a tecnologia como forma de inovação.

A contribuição de estudos que envolvam novas tecnologias de beneficiamento, como a usinagem por jato d'água CNC, pode representar ganhos em produtividade, precisão, elevando o valor agregado do produto. Novas possibilidades de produzir ágata em formas complexas (utilizando formas agrupadas, repetidas, espelhadas, reduzidas, ampliadas), através da utilização de tecnologias de usinagem CNC, são fatores que aumentam as possibilidades de desenvolvimento do produto jóia, utilizando o design como fator diferenciador. Neste sentido, o presente estudo visa fortalecer no Brasil o beneficiamento inovativo da gema ágata em peças com formas complexas, através de tecnologia CNC utilizando a usinagem não convencional por jato d'água com abrasivos como processo de corte.

No parque industrial brasileiro a usinagem realizada através de comando computadorizado é largamente utilizada na indústria metalúrgica e também para materiais como madeira e polímeros.

No Rio Grande do Sul estão concentradas as maiores jazidas¹ de ágata e ametista, o que faz do estado o maior produtor e exportador destes minerais (Brum et al., 1994).

Este estado brasileiro é um importante produtor de ágata dentre os produtores mundiais. Representa grande importância do ponto de vista da ocorrência de minerais, com grande jazidas de ágata e ametista, e, apesar de toda riqueza mineral, o beneficiamento destinado às gemas e materiais gemológicos produzidos, em sua maior parte, é pouco elaborado. O parque industrial, de uma forma geral, apresenta limitações do ponto de vista tecnológico e produtivo. Segundo Costa (2007), as empresas de beneficiamento de pedras preciosas no Vale do Taquari, RS, em questões específicas dos processos produtivos, apresentam característica predominantemente manual e pequena automação.

Esta condição restringe importantes etapas do design, como por exemplo, a etapa de desenvolvimento, quando limitações de processo, podem representar limitações formais que tolhem, em parte, a liberdade criativa do designer.

Devido ao inexpressivo acesso às tecnologias de beneficiamento, a ágata gaúcha tem sua comercialização, em sua maior parte, em estado bruto ou em produtos pouco inovadores.

O setor carece de uma mudança de base tecnológica, que o torne apto a produzir toda a linha de manufaturados de ágata colocados no mercado mundial, com a competitividade e qualidade equivalentes às dos países que ele abastece de matéria-prima (Brum et al.1998).

¹Jazida de gemas: uma concentração de gemas, suficientemente extensa para merecer uma exploração sistemática. (Schumann, 2006)

Os principais beneficiamentos dados à ágata são o corte em chapas de espessura em torno de 3 milímetros, lixamento, polimento e o tingimento destas chapas em cores variadas. Os produtos oferecidos apresentam baixa complexidade e inovação e, por este motivo, têm pequeno valor agregado. Quando há corte em formas específicas, percebe-se que as estas são limitadas pelas possibilidades processuais disponíveis, através do processo artesanal. O processo artesanal de produção gera diversas falhas relacionadas à forma e à precisão nas medidas.

Na contramão desta corrente, algumas poucas empresas têm investido em tecnologias de corte de gemas, inovando na forma de beneficiamento com processos como, por exemplo, usinagem não convencional por jato d'água, representando uma direção de maior valorização do material gemológico ágata do Rio Grande do Sul.

1.1. Problema da pesquisa

São duas as principais questões desta pesquisa:

- 1º) Como o beneficiamento de ágata pode ser realizado através do uso de recursos CNC?
- 2º) Quais são os materiais, ferramentas e processos adequados para realizar o corte deste material visando atender demandas de produtividade e precisão em peças com formas complexas?

1.2. Delimitação da pesquisa

Neste trabalho serão analisados os processos produtivos de beneficiamento da pedra preciosa ágata, em empresas do RS, e serão realizados experimentos em laboratório visando à investigação científica do processo de corte de ágata utilizando jato d'água com abrasivos por comando CNC.

1.3. Objetivos da pesquisa

1.3.1. Objetivo Geral

Estudar como realizar o corte de Ágata, utilizando de jato de água com abrasivos através do uso de comando numérico computadorizado, de modo que possa atender às demandas de mercado, por tecnologia, produtividade e precisão em peças com formas complexas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver a fundamentação teórica pertinente ao esclarecimento do objeto da pesquisa – o processo de corte do material ágata.

- Investigar os processos de beneficiamento já utilizados nos pólos de extração do Estado do Rio Grande do Sul.
- Verificar o comportamento de ferramentas de corte em experimentos em laboratório e identificar os materiais mais adequados ao corte da ágata.
- Desenvolver os parâmetros de largura de linha e espessura de chapas que permitam o corte de forma satisfatória (entende-se por corte de forma satisfatória quando o processo não acarreta quebra e nem rachaduras no material, quando este, encontra-se em medidas mínimas, evitando o desperdício de matéria-prima).
- Usinar formas complexas em ágata.

1.4. Hipótese da pesquisa

A produção de ágata pelo processo de usinagem por jato d'água com abrasivos, através do uso de comando computadorizado CNC, pode representar um incremento em produtividade e qualidade. E poderá também representar um aumento significativo em possibilidade de formas de peças que podem ser produzidas, ampliando possibilidades para designers desenvolverem formatos complexos para aplicação em joalheria e, em consequência, ampliando possibilidades para desenvolvimento de outros produtos utilizando este material.

1.5. Justificativa da pesquisa

Esta pesquisa se insere num contexto de transformação nos processos de produção devido à maior competitividade gerada pelo acesso à

tecnologias que aumentam a produção e a precisão do produto final e também possibilitam inovações nas formas.

Os consumidores, atualmente, estão mais exigentes e desejam mais opções de escolha na forma, tamanho, precisão, praticidade e preço. Portanto, a indústria necessita ser ágil e rápida no desenvolvimento do design da jóia e na obtenção das gemas que a compõem e também nos processos de fabricação. O problema que surge para a concretização desses objetivos é de que a maior parte das indústrias de beneficiamento no RS não demonstra este foco, não dispõe de tempo, e nem principalmente, de capital financeiro para o investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para implementação de novos processos de beneficiamento do material gemológico disponível. Por estas razões, o setor demonstra carência de desenvolvimento científico e tecnológico.

O beneficiamento da matéria-prima exportada em bruto, geralmente, é feito em outros países, como Índia, Itália e Alemanha (Schumann, 2006).

O beneficiamento de gemas gaúchas, segundo Costa (2007), representa uma lacuna a ser trabalhada para proporcionar o aprimoramento necessário às empresas do ramo no competitivo mercado mundial. O valor agregado pelo beneficiamento dessas matérias-primas oscila entre 50 e 100 vezes o seu valor em Bruto (*Barbosa e Grumendi, 1995*). Verifica-se, portanto, que sua exportação em bruto, significa exportação de divisas de baixo valor. Deve-se ponderar, porém, que economicamente o valor da matéria-prima em estágio avançado de beneficiamento pode atingir o dobro de seu preço, se o produto final apresentar a qualidade e a precisão desejada pelo mercado. Para tanto, é importante que sejam feitos estudos e investimentos para que o setor possa acompanhar os avanços tecnológicos dos demais países produtores.

Os recursos minerais têm como uma de suas características, a não renovabilidade física, sendo a sua exaustão, um condicionante vital para as empresas ligadas ao setor de mineração. (Vale, 2000). Assim, os recursos devem ser utilizados visando maior valoração das riquezas naturais e geração de renda para a sociedade local. A exportação de ágata em estágio mais avançado de beneficiamento poderá representar mais recursos para a economia do país como um todo, e estes recursos poderão favorecer outros setores da economia. A contribuição de estudos que visem melhorias nos processos envolvendo novas tecnologias como a usinagem, poderá representar ganhos em produtividade, precisão, e representar um papel sócio-econômico importante nas regiões beneficiadoras e de comércio, elevando o valor agregado do produto e gerando emprego, renda e divisas para o Rio Grande do Sul e para o país.

O estudo também tem importância para o profissional de Design, pelo desenvolvimento da pesquisa aplicada na área de gemas, jóias e acessórios, que poderá produzir algo novo e com eficácia produtiva através de processos de fabricação inovadores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados assuntos inerentes ao desenvolvimento da presente pesquisa, entre estes: o setor de pedras preciosas, a ágata, processos de usinagem, formas gráficas complexas e design.

2.1. O Setor de pedras preciosas

2.1.1. Definições e nomenclaturas

Inicialmente necessita-se esclarecer as definições e diferenças entre as nomenclaturas que foram utilizadas. Segundo (IBGM, 2005):

- Mineralogia – Ramo da Geologia que estuda os minerais.
- Mineral – Substância sólida natural, homogênea, inorgânica, de composição química definida e com estrutura cristalina.
- Rocha – Associação natural de minerais, geralmente dois ou mais, em proporções definidas, que ocorre em uma extensão considerável.
- Materiais Ornamentais - minerais ou rochas naturais que são utilizados principalmente para coleções, esculturas, decorações de interiores e como acabamento arquitetônico.

Segundo IBGM, (2005, p.10),

os *materiais gemológicos naturais* são aqueles inteiramente formados pela natureza, sem interferência do homem. São de origem inorgânica: os minerais e as rochas; e orgânica: os de origem animal ou vegetal.

Quando substâncias naturais orgânicas e inorgânicas, por suas características intrínsecas (cor, brilho, raridade, dureza e outros), são utilizadas principalmente como *adorno pessoal*, estas são denominadas *gemas naturais*.

Entre os termos que geralmente suscitam dúvidas, estão pedra preciosa, e semipreciosa, suas definições e diferenças; antigamente as pedras preciosas “clássicas” eram: diamante, esmeralda, rubi e safira, e as demais pedras, de menor dureza, eram classificadas como “semipreciosas”. Na busca por este entendimento seguem algumas definições. Segundo Schumann (2006, p. 10) em seu capítulo terminologia, iniciando pela definição de pedra:

“popularmente, pedra é o nome coletivo para todos os constituintes sólidos da crosta da Terra. Para o joalheiro uma pedra é uma gema, para o arquiteto, o material usado para a construção de ruas e casas. Na ciência da Terra, Geologia, não se fala em pedras, mas em rochas ornamentais.”

O autor ainda cita que, o termo mais utilizado para substâncias gemológicas utilizadas em joias é gema;

“Todas as pedras, preciosas e semipreciosas, possuem algo especial, algo bonito em torno delas. A designação “semipreciosas” é utilizada no comércio, mas não é uma expressão correta porque muitas pedras chamadas semi-preciosas são mais valiosas que as “preciosas”. O termo melhor para todas é gemas. Gemas é o nome coletivo para todas as pedras utilizadas como ornamento, não há uma linha divisória real entre as pedras mais ou menos valiosas é, portanto, um sinônimo para pedras preciosas e semipreciosas.”

No passado, somente poucas pedras eram classificadas como *gemas*, mas hoje há muitas; e novas gemas estão sendo descobertas. As pedras mais duras, como por exemplo: diamante, coríndon e topázio, são próprias para

joalheria, enquanto as pedras mais moles, como gipso e calcita, por exemplo, são freqüentemente procuradas por colecionadores.

A moda, através dos tempos, impulsionou a valorização de algumas gemas que apresentaram cores com maior demanda, acompanhando períodos estéticos distintos; segundo Hall (1997, p.06),

"Existem mais de três mil minerais diferentes, mas apenas cinqüenta são utilizados comumente como pedras preciosas. Outros são lapidados para colecionadores de minerais incomuns, mas mostram-se muitas vezes inadequados ao uso por serem muito macios e riscarem facilmente. De fato, o número de minerais considerados como gemas altera-se constantemente, à medida que novas fontes e variedades são encontradas e a moda passa".

Dentre os minerais, as *pedras preciosas ou gemas*, se distinguem pela beleza, raridade e durabilidade. Para Hall (1997), uma pedra preciosa “deve possuir um “talhe” que revele suas melhores qualidades, deve ser durável - o suficiente para sobreviver ao uso ou manuseio constante, sem ficar riscada ou danificada. Finalmente, deve ser rara, pois é sua raridade que lhe confere um valor de mercado mais alto.”

Complementando a definição do termo *gema*, Hall (1997, p. 10) afirma que “as gemas são geralmente minerais que foram, ou podem ser, trabalhados para uso em adornos pessoais (...) a maioria é composta por materiais inorgânicos naturais com uma composição química fixa e estrutura interna regular. Algumas gemas como o âmbar e a pérola, são provenientes de animais e plantas e são conhecidas como orgânicas.”

As *gemas naturais* podem ser trabalhadas, cortadas, lapidadas, polidas mantendo esta denominação; mas gemas que são coloridas, ou, tem a sua cor modificada por tratamento químico ou físico químico, devem ser classificadas como “*tratadas*”. Por exemplo, uma ágata tingida é uma gema cuja cor foi alterada por tratamento químico, é denominada, portanto, *gema tratada*. Dentre os tipos de

tratamento de cor estão também revestimento, difusão, tingimento, realçar tom com utilização de óleo ou utilização de resinas coloridas, preenchimento de cavidades com vidro e irradiação por laser.

No que diz respeito à *estrutura cristalina*, Hall (1997) afirma que

“... a maioria das gemas minerais possui estrutura cristalina, com seus átomos organizados em padrões simétricos e regulares. Os minerais podem consistir em um único cristal ou em diversos em um grupo. Os minerais policristalinos são compostos de diversos cristais, normalmente pequenos; nos minerais criptocristalinos, os cristais são muito pequenos para serem vistos sem o auxílio de um microscópio.

Os minerais são compostos de diversas superfícies planas, chamadas de faces; a orientação destas faces define a forma geral, conhecida como “hábito”. Alguns possuem um único hábito característico, tais como piramidal e ortorrômbico; outros podem ter numerosos hábitos. Um pedaço de mineral cristalino sem hábito definido é chamado de compacto”. Hall (1997, p.18).

Um cristal é um corpo uniforme com um retículo geométrico. As estruturas variadas dos retículos são as causas das propriedades físicas variadas dos cristais e, portanto, também dos minerais e gemas. (Schumann, 2006)

Segundo suas formas cristalinas e simetrias, os cristais são classificados em sete sistemas diferentes. São eles sistema cúbico (isométrico), tetragonal, hexagonal/trigonal, ortorrômbico, monoclinico e triclinico. Cada sistema apresenta semelhanças e variações relacionadas aos eixos cristalográficos; sendo o comprimento e o ângulo formado entre os eixos, as variantes consideradas para esta classificação. Os sistemas podem ser melhor entendidos na figura 01:

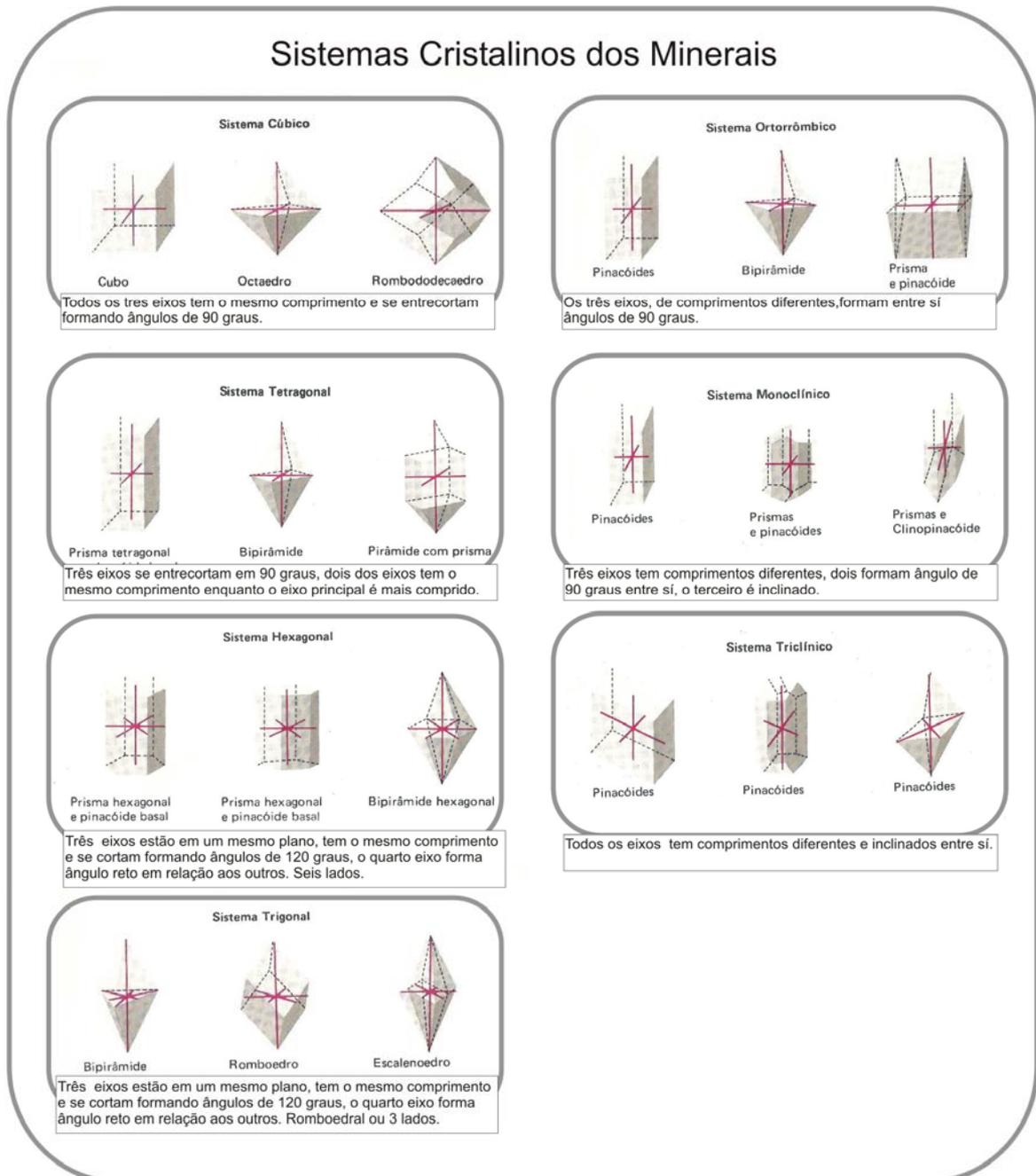


Figura 1: Sistemas Cristalinos dos Minerais - Os sistemas podem ser classificados segundo a forma como seus eixos cristalográficos se apresentam, sendo o comprimento e o ângulo formado entre os eixos, as variantes para esta classificação.

Modificado de Schumann (2006)

Entre as propriedades físicas das gemas, sua dureza, densidade relativa, seu peso específico e a forma como se quebram ou "clivam" dependem das ligações químicas e da estrutura atômica. A dureza e a tendência à quebra são propriedades importantes quando estuda-se o corte de uma gema.

A *dureza* dos minerais pode ser medida pela forma através da qual resiste ao risco. A dureza ao risco pode ser testada e classificada utilizando uma escala de dureza chamada de escala de Mohs. Criada, em 1812, pelo mineralogista alemão Friedrich Mohs, fornece a cada mineral um valor de um a dez. Colocando-os em ordem segundo a “riscabilidade”, cada mineral irá riscar aqueles abaixo de si na escala e não por aqueles que estão acima. Não há relação matemática entre os graus atribuídos aos minerais. A figura (2) apresenta amostra de minerais segundo a referida escala:



Figura 2: Escala de dureza dos minerais segundo Mohs. Classifica a capacidade de um mineral riscar outro relacionando com a dureza do mineral. Onde o diamante, número 10 na escala, é capaz de riscar todos os minerais abaixo dele e não é suscetível ao risco por nenhum deles; e o talco, mineral que apresenta a menor dureza na referida escala, é ser suscetível ao risco por todos os minerais acima e não apresenta dureza capaz de riscar os demais.

Modificado de Hall (1997)

As gemas podem se quebrar de duas formas: elas se clivam ou se fraturam. A forma pela qual se quebrarão depende da estrutura atômica interna da gema. As gemas que se clivam tendem a quebrar ao longo de planos de ligações atômicas fracas (planos de clivagem). Estes planos normalmente são paralelos, perpendiculares ou diagonais às faces do cristal (uma vez que tanto os planos quanto as faces estão diretamente relacionados à estrutura atômica da gema).

A fragmentação de um mineral, com um golpe, produzindo superfícies irregulares, é denominada fratura. Ocorre em minerais que não possuem tendência de quebra em planos preferenciais, onde não há clivagem.

Outras propriedades, como as propriedades óticas, não foram aprofundadas por não representarem relevância direta para este estudo.

2.1.2. Indústria de lapidação de pedras preciosas no Brasil e no mundo

O homem começou a beneficiar as gemas utilizando o processo de polimento. Segundo Schumann, (2006, p.54),

“as origens da lapidação das gemas podem ser encontradas na Índia. Até por volta de 1400, apenas as faces naturais do cristal ou os planos de clivagem das pedras transparentes eram polidas a fim de aumentar seu brilho e ressaltar sua transparência. As gemas opacas (especialmente a ágata) já tinham sido polidas anteriormente com areia dura em forma de domo (cabochão) ou plana.”

A lapidação através do polimento em forma de chapas planas e cabochões (formas convexas) é mais apropriada para ágatas e gemas opacas, são chamadas de lapidações lisas e são consideradas as lapidações mais simples, comparando com as lapidações facetadas. A lapidação em facetas, com numerosas e pequenas superfícies lisas, é quase que exclusivamente, utilizada em gemas transparentes (fig. 3).



Figura 3: Gemas lapidadas, onde A) lapidação facetada, B) lapidação lisa tipo cabochão

Segundo Schumann (p.54), “o ponto culminante no trabalho das pedras é a lapidação em facetas. Há registros de um diamante facetado em Veneza já no século IX, embora segundo outras opiniões, a lapidação em facetas só tenha aparecido no século XV.”

O autor cita ainda que, no princípio dos tempos modernos, Amsterdã e Antuérpia se convertem em centros de lapidação do diamante, enquanto Idar-Oberstein, desde o século XVI, é o centro de lapidação da ágata e gemas coloridas. Atualmente diversos centros de lapidação estão se desenvolvendo no mundo todo. A fim de encorajar estes centros, muitos países proibiram a exportação de material gemológico em estado bruto, medida pode benéfica também se aplicada no Brasil.

Atualmente os principais pólos de lapidação no Brasil, estão em Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Rio Grande do Sul. Empresas destes pólos são capazes de lapidar gemas de média e boa qualidade, mas trabalham com baixa escala de produção e, normalmente, não possuem preços competitivos (Costa, 2007, p.29).

2.1.3. Ocorrências de materiais gemológicos no Brasil

O Brasil é conhecido por abrigar uma das maiores Províncias Gemológicas do planeta, que se destaca pela qualidade, variedade e dimensão dos minerais gemológicos produzidos e também pela extensão territorial das áreas de ocorrência, pois quase todos os estados produzem algum tipo de gema (Svisero e Franco, 1991). É um importante produtor mundial de pedras de cor e diamantes. O mapa gemológico do Brasil (fig.4) mostra a localização geográfica dos principais depósitos de materiais de interesse gemológico no país.



Figura 4: Mapa Gemológico Brasileiro, indicando as principais áreas de ocorrências de materiais de interesse gemológico
Modificado de IBGM (2005)

2.1.4 Ocorrências de materiais gemológicos no RS

No Rio Grande do Sul estão concentradas importantes depósitos de geodos preenchidos por ágata e ametista. O volume e a qualidade do material produzido, fazem deste estado um dos maiores fornecedores destas gemas para os mercados internacionais (Juchem et al., 2009).

O Mapa (fig.5) mostra a localização geográfica dos principais depósitos de materiais de interesse gemológico, nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, indicando ainda o contexto geológico das ocorrências.

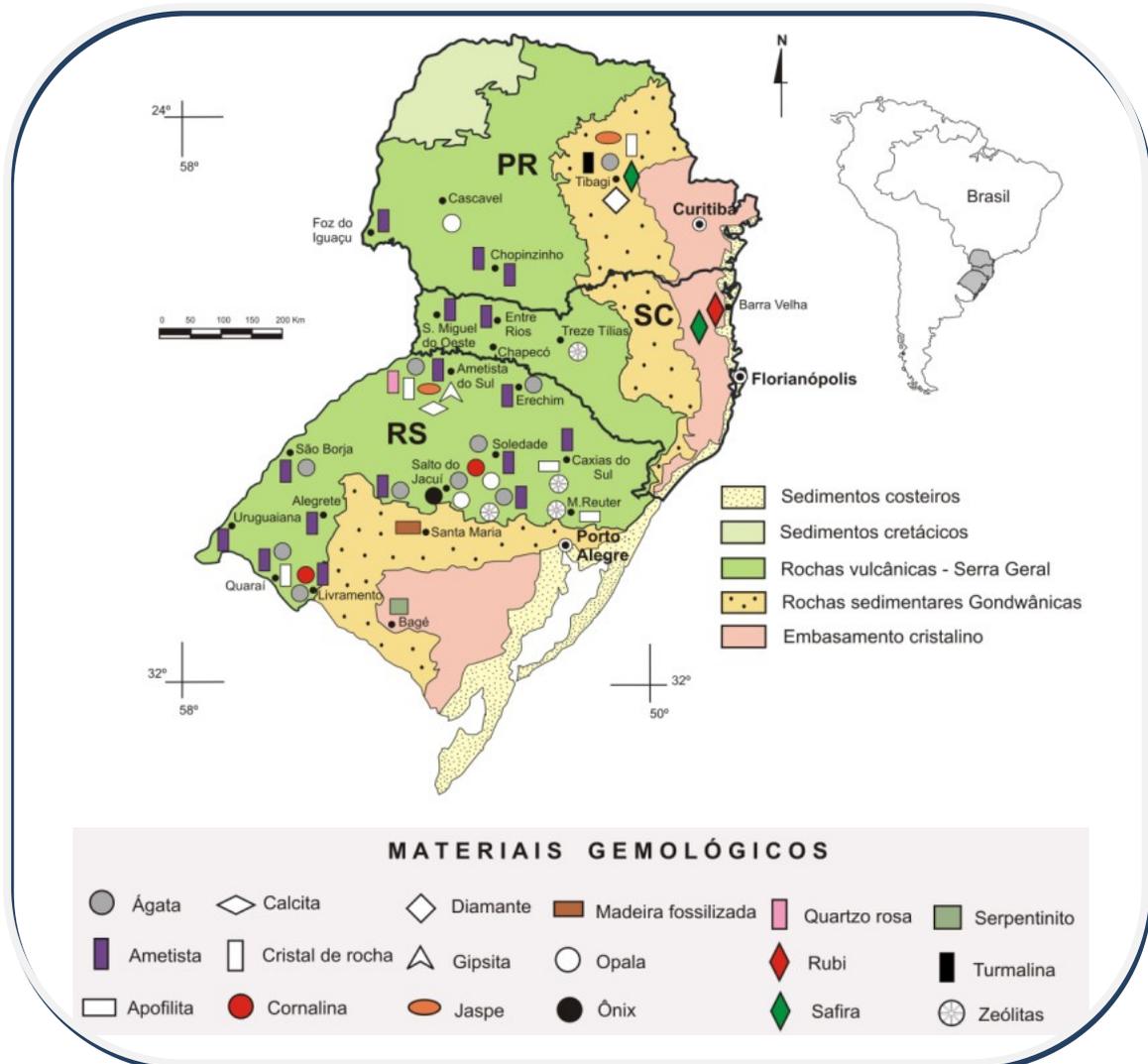


Figura 5: Mapa Gemológico da Região Sul do Brasil indicando localização geográfica de materiais gemológicos bem como seu contexto geológico.

Modificado de Juchem et al., (2009)

2.1.5. Ágata no RS

A ágata é bastante abundante no Brasil e países vizinhos. A Bacia do Paraná, considerada o maior derrame de lavas vulcânicas do mundo, estende-se pelo Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. Sendo que a maior parte dos referidos derrames está localizada em território Brasileiro.

O Brasil é o maior produtor mundial da gema ágata, são conhecidas ocorrências em Roraima, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Minas Gerais, Paraíba, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Segundo Juchem e Brum (1998), a ágata é um material de ocorrência comum no Rio Grande do Sul, sendo registrada sua presença em praticamente todos os depósitos de geodos conhecidos. Neste estado, a ágata ocorre preenchendo cavidades em rochas vulcânicas da Formação da Serra Geral.

O Distrito mineiro de Salto do Jacuí é o maior produtor mundial de ágata, com cerca de duzentas frentes de lavra abertas e está localizado na região central do Estado do Rio Grande do Sul. Neste município, nas margens do Rio Jacuí e Ivaí, a principal produção é da denominada “ágata Umbu”, de cor acinzentada e com bandeamento fraco ou imperceptível, muito utilizada para tingimento.

A extração da ágata se dá através da retirada de geodos que ocorrem em cavidades nas rochas vulcânicas basálticas já muito alteradas. A figura 6 retrata os orifícios de entrada onde os garimpeiros realizam a verificação da ocorrência de geodos, são corredores chamados de “galerias”. Os tratores fazem o trabalho de transportar e retirar os geodos, cascalho e outros rejeitos que se acumulam durante o processo de abertura das galerias.



Figura 6: Mina de extração de ágata, apresentando orifícios de entrada para verificação de ocorrências (galerias). Localizada no Município Salto do Jacuí
Fotografia de Pedro Juchem

Quando a cavidade formada nas rochas vulcânicas, apresenta parte de seu interior total ou parcialmente preenchido, é denominada geodo. O geodo pode apresentar ainda água em seu interior. (Lamachia, 2007) (fig. 7).



Figura 7: Geodo de ágata
Fotografia de Pedro Juchem

Os geodos ocorrem em formas arredondadas e ovóides e com dimensões médias entre 20 e 50 cm de diâmetro (fig. 8), embora não seja incomum a ocorrência de geodos maiores (Juchem e Brum, 2009).



Figura 8: Geodos de ágata extraídos da mina retratada na figura 6.
Fotografia de Pedro Juchem

Grande parte da produção no RS é de geodos em estado bruto e de chapas, geralmente exportados para países como Japão, Alemanha, Estados Unidos, França, Itália e China. (Lamachia, 2006).

2.2. A ágata (substância gemológica)

A substância gemológica quartzo, de composição química SiO_2 , apresenta variedades macrocristalinas, como por exemplo, cristal de rocha, ametista, citrino e outras; e variedades micro a criptocristalinas, formadas por cristais

muito pequenos, só visíveis ao microscópio petrográfico ou eletrônico; entre estas variedades estão a calcedônia, a ágata, o ônix, cornalina, jaspe entre outros (IBGM, 2005). Em uma chapa de quartzo podemos encontrar diferentes variedades do material em suas estruturas micro a macrocristalinas (fig.9).

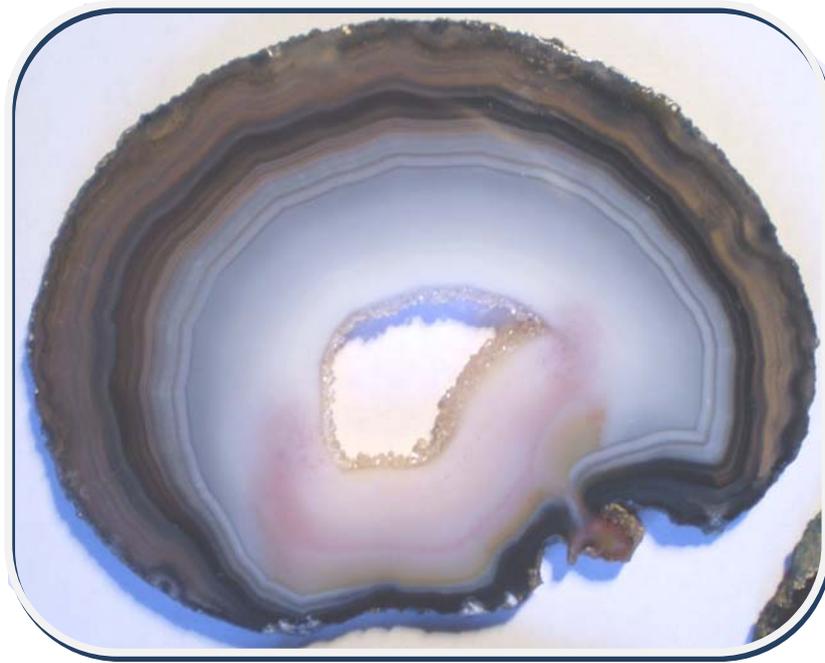


Figura 9: Chapa de quartzo (cortada de um geodo) onde podem ser observadas regiões de ágata (parte maciça bandada) e de cristal macrocristalino (parte do centro, próximo ao orifício da chapa)

Segundo Schumann (2006), sob o nome calcedônia, engloba-se o grupo inteiro do quartzo microcristalino: ágata, dendrita, calcedônia verdadeira (que não apresenta bandas), crisoprásio, heliotrópio, madeira silicificada, jaspe, cornalina, ônix, sardo. Visando analisar a sequência de preenchimento de um geodo podem ser analisadas fotomicrografias vistas em microscópio petrográfico (fig. 10)

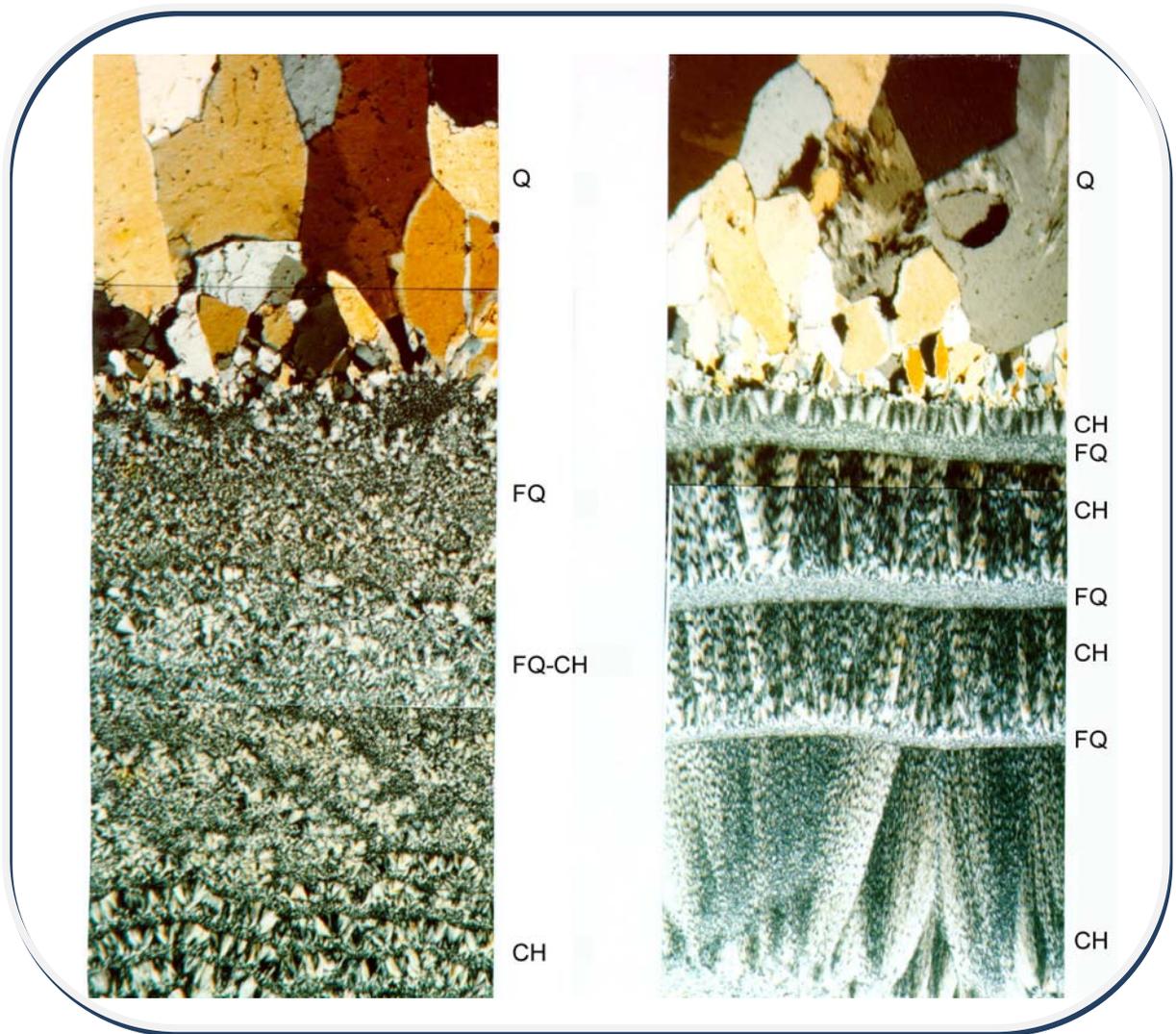


Figura 10 - Fotomicrografias de seções de geodos vistas ao microscópio petrográfico (LP), mostrando a sequência de preenchimento de minerais da parte mais externa (base das fotos) em direção ao centro (topo das fotos). À esquerda, geodo com camada de quartzo microcristalino sem bandamento macroscópico evidente. Ao microscópio observa-se que esta camada é constituída de quartzo fino (FQ) e calcedônia (CH) misturados, ou em sequências não muito bem marcadas, apresentando contatos mal definidos com os macrocristais de quartzo (Q). À direita, geodo com camada de quartzo microcristalino com bandas evidentes em amostra de mão. Ao microscópio observa-se uma alternância de camadas bem definidas de calcedônia (CH) e quartzo fino (FQ) e contatos nítidos com os cristais de quartzo (Q). Aumento 50 X. A distância da base ao topo das fotos é de aproximadamente 5 mm.

Modificado de Juchem (1999)

A ágata se caracteriza por apresentar estrutura bandada, com camadas de cor, espessura e porosidade diferentes. (IBGM, 2005, p.148). Segundo Hall (1997), a ágata ocorre em massas nodulares em rochas como as lavas

vulcânicas. Quando cortadas em chapas, elas podem revelar uma diversidade de cores e padrões e uma disposição em faixas que distinguem a ágata de outros tipos de calcidônia. Os tratamentos de cor são comuns para ágata devida a sua porosidade, freqüentemente, tingida de várias cores, principalmente com corantes metálicos, para colorações como o verde utiliza-se sais de cromo, vermelho utilizando óxido de ferro, azul utilizando ferro cianeto de potássio e sulfato de ferro; também preto cujo corante é o carbono utilizando açúcar e ácido sulfúrico (fig 11).

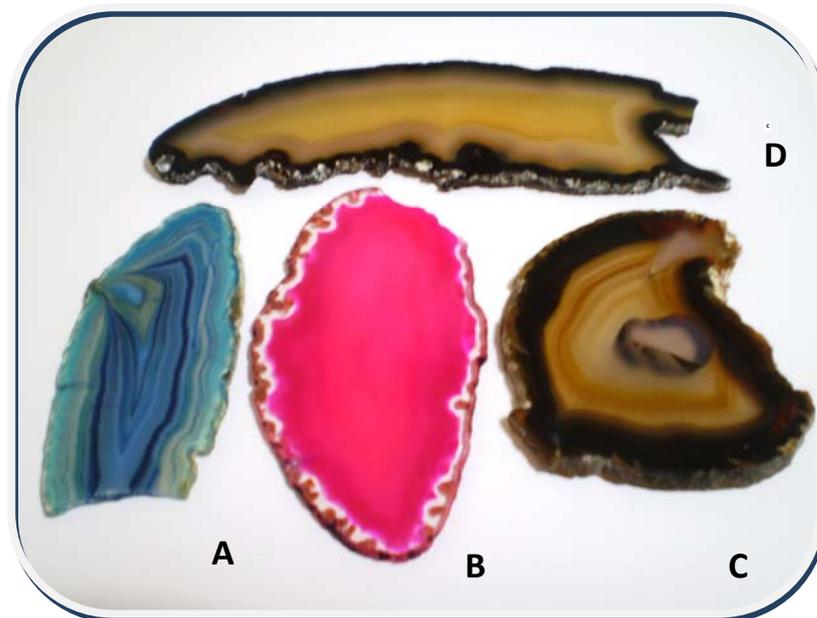


Figura 11 – Chapas de ágata tratadas por tingimento.

Em (A) azul (8 x 3,5 cm), em (B) rosa (9 x 5 cm) e em (C) (6,5 x 6 cm) e (D) preto (13 x 4 cm).

As chapas de ágata podem ter sua cor realçada também por tratamentos térmicos, o aquecimento pode intensificar a cor sem a inclusão de corantes (fig. 12).

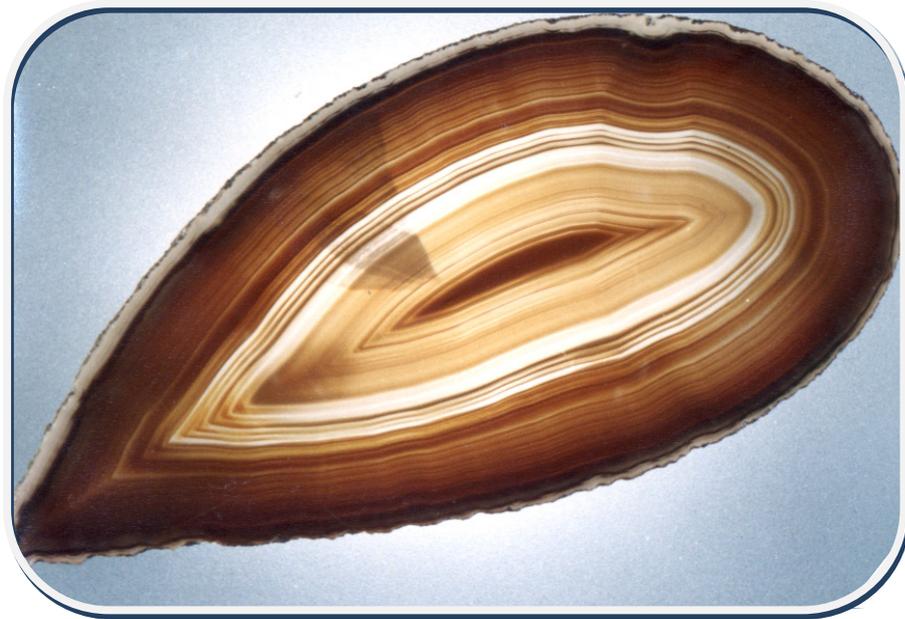


Figura 12: Chapa de ágata (tratada termicamente para realçar a cor) (17cm X 8,1 cm)
Brum (1998)

2.2.1 Propriedades físicas

Para um melhor entendimento e simplificação, as propriedades físicas da ágata do Rio Grande do Sul, são apresentadas no quadro 01, abaixo.

Entre as características mais relevantes para este estudo, pode ser ressaltada, a dureza da ágata, relativamente elevada em comparação com a maioria dos minerais, esta de 6 ½ a 7 na escala de Mohs (apresentada na fig. 2, página 29).

Quadro 1- Propriedades físicas da ágata

Propriedades Físicas da Ágata:

Classe Mineral: silicatos

Espécie Mineral: quartzo - agregados micro a criptocristalinos

Composição: Dióxido de Silício

Fórmula Química: SiO_2

Sistema de Cristalização: hexagonal/ trigonal

Densidade Relativa: 2,60 – 2,65

Dureza (Mohs): $6 \frac{1}{2}$ - 7

Cor: cinza azulado, branco cinzento, marrom e vermelho

Transparência: de translúcido a semitransparente; opaca.

Brilho: gorduroso a vítreo

Clivagem: não há

Fratura: desigual (ou irregular) e conchoidal

Fonte: modificado de IBGM (2005)

2.3. Controle numérico computadorizado (CNC)

A cada instante, novas tecnologias são incorporadas ao ambiente industrial, e outras, até então tidas como imutáveis, passam a ser contestadas ou viram exemplos do que não se deve mais fazer. Segundo Pires (1995 apud Nardini 2002) o aumento da competitividade tem sido caracterizado pela diminuição dos

ciclos de vida dos produtos e pelo aumento na diversificação dos mesmos, impulsionados pelo uso, cada vez mais intenso, do computador no ambiente industrial.

O controle numérico computadorizado (CNC) faz parte das inovações desenvolvidas para fazer frente à necessidade de aumentar a eficiência dos processos de manufatura através da automação. O CNC é considerado como “o mais dinâmico processo de fabricação, constituindo um dos maiores desenvolvimentos para a automatização das máquinas operatrizes de usinagem, além de outras possíveis aplicações fora da indústria que utiliza o processo de usinagem” (LEATHAM, 1986).

O acionamento de uma máquina CNC é comandado por uma programação que contém a informação de todas as etapas de fabricação para uma determinada operação de uma peça. Uma linha de comando CNC pode conter informações sobre o movimento da ferramenta, velocidade, avanço, e informações que acionam funções auxiliares (ligar fluido de corte, torre de ferramentas, etc.). Com a programação instalada, a máquina assume o controle do processo de trabalho, sendo que o operador restringe-se, a alimentá-la (matéria-prima, ferramentas, dispositivos), acioná-la e controlá-la à distância, podendo ser responsável por mais de uma ao mesmo tempo (SOUZA, 2001).

2.3.1 Projeto e fabricação auxiliados por computador – CAD/CAM

O projeto auxiliado por computador (CAD) é uma técnica na qual o homem e a máquina interagem, formando um *grupo* para a solução de problemas, agrupando as melhores características de cada um (BESANT, 1985). No software

tipo CAD, o designer armazena as informações pertinentes ao projeto e, simultaneamente, o software gera a visualização dos resultados. Desta forma os dados são definidos, visualizados, analisados e modificados, quando necessário, ainda na etapa de criação, tornando mais ágil o processo de elaboração do produto, se comparado às técnicas manuais de projetar. No software tipo CAD, são definidas medidas, volumes e espessuras do produto desenvolvido. A possibilidade de visualização dos resultados ainda em fase virtual é um fator que reduz perdas de tempo, materiais e evita etapas de retrabalho.

O software tipo CAM auxilia o processo de fabricação, ou seja, de execução dos projetos desenvolvidos via software tipo CAD. Os sistemas CAD/CAM são definidos pelo uso efetivo da tecnologia do computador para funções envolvidas com o planejamento, o gerenciamento e o controle das funções de manufatura.

“o sistema CAD/CAM foi desenvolvido visando executar as seguintes funções: gerenciamento de dados, aplicação para a programação de etapas NC, incluindo a simulação e derivação de linha de corte, transferência de dados seriais entre as estações de trabalho CAD/CAM e uma ferramenta de máquina CNC.” (BESANT, 1985).

2.4. Usinagem convencional CNC

A usinagem é a operação que confere à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três, através da remoção de material sob a forma de cavaco (FERRARESI,1986). No processo de usinagem, uma quantidade de material é removida com auxílio de uma ferramenta de corte, produzindo o cavaco e obtendo-se uma peça com formas e dimensões desejadas. A definição de cavaco, segundo Ferraresi (1986) é a “porção

de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizado por formato irregular”. A ferramenta de corte é constituída de arestas cortantes, destinadas à remoção do cavaco. O processo de usinagem envolve: esforços mecânicos (atrito, deformação), termodinâmica (calor) e propriedades dos materiais.

A classificação dos processos é dividida em usinagem com ferramenta de geometria definida, usinagem com ferramenta de geometria não definida e processos não convencionais de usinagem.

A usinagem por controle computadorizado representa um avanço tecnológico que permite um maior controle do processo e, por consequência, maior precisão e minimiza o esforço físico do operador da máquina.

A cinemática geral dos processos de usinagem inclui a velocidade de corte (V_c), que está relacionada com a velocidade da ferramenta, a velocidade de avanço (V_f) e a velocidade efetiva de corte (V_e).

As propriedades dos materiais determinam quais processos podem ser utilizados com eficiência em cada material. A usinagem convencional é largamente utilizada para metais como o aço, por exemplo, mas em materiais gemológicos outros processos, não convencionais, podem ser testados. Segundo Ferraresi (1986), os processos não convencionais de usinagem removem material por remoção térmica (arc air, plasma, laser), química (corrosão por ácidos), eletroquímica (eletricidade e ácidos), por ultra-som e por jato d'água com alta pressão.

Segundo Tessmann (2009), estudos envolvendo ensaios de usinagem CNC em opala e ágata, representam inovações no processo de beneficiamento de materiais gemológicos. O processo pode ser utilizado para a produção de camafeus; o desbaste e a obtenção do relevo desejado neste estudo foi

alcançado, sendo que o corte não foi o objetivo buscado. Foram determinados os parâmetros que permitiram a reprodução de camafeus com o relevo proveniente de uma face humana escaneada, o processo apresenta como ponto crítico o desgaste das fresas.

Os procedimentos do referido estudo foram realizados no Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS (LdSM) .

2.5. Usinagem não convencional - corte por jato d'água

O corte por jato d'água (Water Jet Cutting - WJC) enquadra-se no grupo dos processos que visam seccionar um material através da utilização de energia mecânica, onde a força de impacto exercida por um fino jato de água de alta pressão na superfície de contato do material supera a tensão de compressão entre as moléculas do material, seccionando o mesmo. Segundo Groover (1996), os referidos processos utilizam jatos que removem o material por meio de fluxos de alta velocidade de água, ou uma combinação de água com abrasivos. Este processo também é chamado de usinagem hidrodinâmica, mas corte por jato de água é o termo mais comumente usado na indústria.

O autor afirma ainda que para obter o fino fluxo/jato d'água, uma pequena abertura de um bocal de diâmetro 0,1 a 0.4 mm é utilizada. Para fornecer o fluxo de energia suficiente para o corte, pressões de até 400 MPa (entende-se por MPa , Mega Pascal, unidade de medida de pressão) são aplicadas fazendo com que o jato atinja velocidades de até 900 m/s. O fluido é pressurizado para o nível desejado por uma bomba hidráulica. A unidade por onde a água é injetada consiste

de um tubo suporte feito de aço inoxidável e um bocal com ponta constituída de uma pedra preciosa, geralmente coríndon (rubí ou safira) e diamante por sua alta dureza. A safira e o rubí apresentam dureza 9.0 na escala Mohs e o diamante apresenta dureza 10 na referida escala (Schumann, 2006).

Os fluidos de corte em soluções em WJC, geralmente são polímeros, preferidos por causa de sua tendência a produzir um fluxo coerente.

Parâmetros importantes no processo de WJC incluem a distância entre a abertura do jato até a peça de trabalho, o diâmetro de abertura do bocal, a pressão da água e a velocidade de avanço de corte. É desejável que a distância entre o bocal de abertura e a superfície de trabalho em geral seja pequena, para minimizar a dispersão do fluxo de líquido antes de atingir a superfície. Uma distância padrão é de 3,2 mm. O tamanho do orifício do bocal afeta a precisão de corte. Aberturas menores são usadas para cortes mais finos em materiais mais finos. Para cortar uma chapa mais grossa, um jato mais grosso e pressões mais elevadas são necessárias.

A velocidade de avanço de corte geralmente oscila entre 5mm/s e 500 mm/s, dependendo da espessura do material de trabalho. O processo de corte por jato de água é geralmente automatizado, utilizando computador com controle numérico, ou robôs industriais para manipular a unidade do bocal ao longo da trajetória desejada. O WCJ pode ser utilizado de forma eficaz para cortar estreitas fendas em materiais planos como o plástico, têxteis, materiais compósitos, pisos e outros materiais como carpete, couro e papelão.

Segundo Groover (1996), uma limitação do WJC é que o processo não é adequado para o corte de materiais frágeis (por exemplo, vidro) devido à sua tendência de quebrar durante o corte. Para o corte de materiais gemológicos, como

a água, por exemplo, o processo adequado inclui, junto com o fluxo d'água, uma combinação com partículas abrasivas. Este processo é chamado de corte do jato de água abrasivo (Abrasive Water Jet Cutting - AWJC). A introdução das partículas abrasivas no fluxo confere maior complexidade ao processo, pois aumenta o número de parâmetros que devem ser controlados. Entre os parâmetros de processo adicionais estão os tipos de abrasivos, o tamanho dos grãos e a velocidade do fluxo. Óxido de alumínio, dióxido de silício e granada (um silicato), são materiais abrasivos bastante utilizados. As partículas abrasivas são adicionadas ao jato d'água depois este saiu do bico WJC.

Os parâmetros restantes do processo incluem aqueles que são comuns a WJC: pressão, vazão e diâmetro do orifício. O diâmetro de abertura do bocal tem em torno de 0,25 a 0,63 milímetros, um pouco maior do que no corte somente com jato d'água para permitir maior fluxo e mais energia no jato, visando injetar abrasivos. O bico de saída de água para corte deve apresentar uma câmara de mistura e um sistema de controle de injeção do abrasivo. A pressão da água é praticamente a mesma que em WJC. As distâncias entre o bocal e a área de trabalho são um pouco menores para minimizar o efeito de dispersão do fluido de corte, que agora contém partículas abrasivas. As distâncias oscilam entre 25 a 50 por cento menores que no corte por jato d'água.

O diâmetro do orifício de saída de água é bastante reduzido, variando de cerca de 1,2 mm a 5,0 mm. A velocidade da água é da ordem de 520 a 920 m/seg. Estes dois fatores combinados fazem com que a pressão exercida no bico de corte seja da ordem de 1500 a 4200 bar, causando um elevado desgaste do mesmo.

2.6. Formas gráficas complexas

Muitos autores realizaram estudos sobre as formas gráficas, sua estrutura e classificações. Estes apresentam considerações sobre a estrutura da forma, seu conteúdo, a análise da composição, repetição, a origem de sua construção e também a percepção ou o efeito psicológico.

Sobre a classificação das formas, Wong (1998) defende que estas podem ser classificadas segundo seu conteúdo específico, nos seguintes tipos: figurativas, verbais e abstratas. Se uma forma possui um tema reconhecível, seja por apresentar um realismo fotográfico ou mesmo que apresente algum grau de abstração, desde que não seja irreconhecível, é chamada de forma figurativa. As formas figurativas são divididas em formas naturais ou formas feitas pelo homem. Se as formas estiverem representando elementos da linguagem escrita, são consideradas formas verbais. Porém quando a forma não possui um tema reconhecível ela é considerada não-figurativa ou abstrata. (...)

Os tipos de formatos são descritos por Wong (1998) segundo a forma como são executados ou construídos. Nos formatos caligráficos, o movimento da mão para fazer o desenho fica evidenciado. Já nos formatos orgânicos, através de curvas suaves, convexidade e concavidade são mostradas apresentando pontos de contato entre as curvas. Os formatos geométricos, nítidos e precisos, dependem de meios mecânicos para sua construção. Neste sentido, Frutiger (1999) também trabalha com classificações segundo a origem das linhas curvas e descreve a existência de dois tipos básicos: as derivadas da geometria precisa e as derivadas do movimento natural da mão do artista:

“Este estudo, que pretende ‘organizar graficamente’ a definição dessas linhas, não pode dedicar-se à expressão pura e espontânea do movimento, embora tenhamos consciência de que por trás de todo conceito gráfico baseado na geometria existe um impulso natural, escondido na mão do desenhista. Ou, para expressar esse pensamento de outra forma, pode-se dizer também que o projetista concretiza suas idéias empregando mentalmente a geometria.” (FRUTIGER, 1999, p.10)

Sobre os formatos, Wong (1998) ainda classifica divisões entre formatos com extremos pontiagudos e formatos com extremos arredondados: “duas curvas que se encontram podem estabelecer um fluxo contínuo ou um extremo pontiagudo. Extremos pontiagudos podem se projetar do corpo de um formato, ou nele penetrar”. Sobre formatos com extremos arredondados, o autor afirma: “Qualquer extremo que se projete ou que penetre no corpo de um formato pode ser arredondado, suavizando-se sua ponta”.

Wong (1998) descreve a simetria e a assimetria; enquanto na figura simétrica, um eixo invisível divide a figura por igual e a metade direita constitui uma metade idêntica da metade esquerda, na assimetria, “um leve desvio pode ser introduzido em um formato simétrico pelo deslocamento do alinhamento das duas metades, pela superposição das metades ou pelo acréscimo de alguma variação entre as duas metades”.

Sobre a análise da construção das figuras, Wong (1998) cita que as mesmas possuem elementos conceituais (ponto, linha, plano, volume), visuais (formato, tamanho, cor, textura), relacionais (direção, posição, espaço, gravidade) e práticos (representação, significado, função).

Existem também agrupamentos, ou construções, onde formas iguais ou distintas se inter-relacionam na composição da figura. Wong (1998) classifica estas possíveis construções ou inter-relações (fig.13):

- Separação: formas separadas, mas podendo estar próximas;

- Contato: as formas se aproximam e começam a se tocar;
- Superposição: as formas se aproximam tanto que se cruzam, uma parece estar por cima da outra;
- Interpenetração: as formas se cruzam, porém nenhuma parece estar sobre a outra, na interseção elas parecem transparentes, com ambos os contornos bem visíveis;
- União: as formas se unem, formando outra nova forma, ambas perdem parte do seu contorno;
- Subtração: uma forma invisível se sobrepõe a uma visível, tornando a parte sobreposta também invisível;
- Interseção: duas formas se cruzam e a parte que fica visível é a da interseção entre ambas;
- Coincidência: duas formas se aproximam tanto que coincidem, tornando-se uma só.

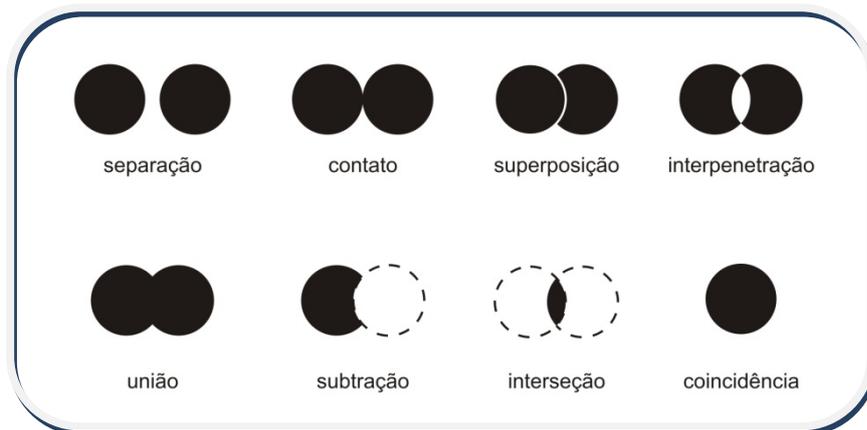


Figura 13: Inter-relações de formas.
modificado de Wong (1998)

Sobre a composição com formas idênticas e repetições, podem ser obtidos desenhos com maior sensação de harmonia,

“Quando um desenho é composto por um número de formas, aquelas que têm formatos idênticos ou semelhantes constituem ‘unidades de formas’ que aparecem mais do que uma vez no desenho. A presença de unidades de forma ajuda a unificar o desenho.” (WONG, 1998, p.51)

O tamanho e a quantidade da repetição de unidades de forma, estão relacionados com a percepção de simplicidade e de textura,

“A repetição de unidades de forma geralmente transmite uma sensação imediata de harmonia. Cada unidade de forma repetida é como a batida de algum tipo de ritmo. Quando as unidades de forma são utilizadas em tamanho maior e número menor, o desenho pode parecer simples e evidente; quando são infinitamente pequenas e em grande número, o desenho pode parecer uma porção de textura uniforme, composto com elementos diminutos” (WONG, 1998, p.51)

A disposição das unidades de forma pode ser exemplificadas pela união de quatro círculos em disposição linear, quadrada ou retangular; rômbrica ou losango; triangular; circular conforme pode ser visualizado na figura 14;

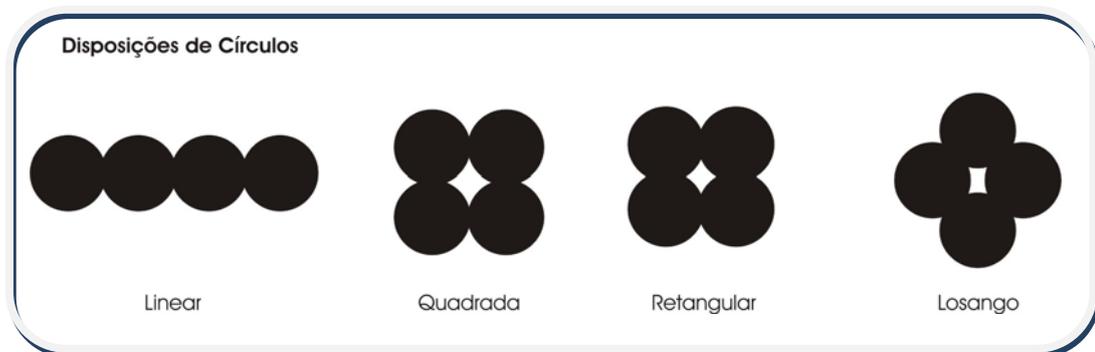


Figura 14: Diferentes formas ordenadas de dispor quatro círculos
Fonte: modificado de Wong (1998)

Sobre a percepção e ou efeito psicológico da figura, é interessante que o olhar e o raciocínio dediquem mais tempo ao analisar figuras mais complexas ou densas.

“A teoria da informação mostra que, quando a quantidade de informação fornecida por unidade de superfície perceptiva não é muito grande a imagem é percebida num instante, como uma totalidade, num rápido lance de olho sobre os detalhes subjacentes. Se, pelo contrário, a mensagem visual é muito densa, muito complexa, a visão é levada a explorar a imagem, isto é, a fixar um certo número de pontos, memorizá-los, até ser capaz de efetuar a integração necessária.” (ARCHELA, 1999, p.5)

Em 1916, Ehrenfels publicou um ensaio sobre “A altura e a pureza da configuração” (“*Höhe und Reinheit der Gestalt*”), que somente mais tarde adquiriu um significado central para o design. Ele descreve o fato de que existe uma medida

que concede a cada figura um grau de configuração. Uma figura com alta configuração se diferencia de uma com grau baixo, pelo fato de ter uma medida maior de ordem de conjunto (limpeza de configuração= alto grau de configuração). O conceito de conjunto pode ser descrito por ordem e o conceito de diferença pode ser relacionado com o conceito de complexidade. Assim, a 'altura' da configuração no produto é determinada pela ordem (O) e pela complexidade (C) (BÜRDEK, 2006).

Nos anos 60 foi desenvolvido o conceito de "estética exata", que descreve que "a configuração é a produção de ordem". A estética exata propõe o uso de elementos sólidos e geométricos simples (quadrado, triângulo, círculo, cubo, pirâmide, esfera). A teoria da configuração dos produtos, por sua importância para a estética e para o design é bastante conhecida e é chamada de "teoria da Gestalt", conduz a um design mais simples e, portanto, minimalista. "A configuração se desenvolveu então sempre em campo de tensão entre ordem e complexidade, ou seja, a 'medida de configuração' (M) é uma função (f) de ordem (O) e da complexidade (c)." (BÜRDEK, 2006)

Em 1970 unem-se as leis da Gestalt com as categorias de ordem e complexidade de Ehrenfels (1916), através de uma série de pares estéticos relacionados à forma: simples e complexo; regular e irregular; fechado e aberto; unitário e separado; simétrico e assimétrico, claro e confuso, na grade e fora da grade, balanceado e não balanceado, conhecido e desconhecido, ordem conhecida e complexidade nova, e outros. Através destas qualidades estéticas é possível a classificação das formas.

A complexidade discutida no parágrafo acima refere-se à complexidade formal, não tendo, naturalmente, ligação com o conteúdo (semântico) do produto. "Desta forma, produtos formalmente simples podem ser complexos na

sua funcionalidade ou no manejo” (BÜRDEK, 2006). O funcionalismo - movimento estético contra ornamentos e a favor da forma simples, atendendo somente a função - nos anos 70, se baseou na meta formal de ordem, porém se fizermos uma interpretação radical da teoria da Gestalt, poderíamos estar vivendo num mundo com produtos muito simples e isso poderia gerar uma monotonia visual.

Modernamente, criou-se mais liberdade para se trabalhar com as formas. Baxter (1995) descreve uma pesquisa profunda, realizada por um psicólogo canadense, Daniel Berlyne, sobre os objetos que as pessoas consideravam atraentes. Este estudo construiu uma curva de preferência para a complexidade visual. “A principal causa da atração visual não é a complexidade intrínseca de um objeto, mas a complexidade percebida pelo observador”. O estudo também conclui que as pessoas mais instruídas tendem a aceitar maior nível de complexidade, o mesmo acontecendo com os jovens em relação às pessoas mais idosas. “Os aspectos complexos despertam a curiosidade e um certo desafio, que deve ser vencido através da exploração e interpretação” (Baxter, 1995). Um objeto pode ter uma forma nunca vista e mesmo assim não causar estranheza. Antes de um objeto ser atrativo, ele é visto como interessante. Se despertar interesse, será capaz de manter a atenção do observador. Após esta observação, poderá considerá-lo atraente ou sem atrativo.

O autor ainda afirma que a receita mais adequada é uma combinação de aspectos simples com aqueles complexos em um mesmo produto, isto porque aspectos simples também apresentam apelo ao consumidor, uma vez que transmitem segurança ao observador, que encontra nestes aspectos algum ponto de referência com objetos que já conhece e, com os quais, já possui intimidade.

2.6 O DESIGN

O design é uma atividade criativa que visa estabelecer o fator central para a inovação. (BERTOL, 2008). A inovação através do desenvolvimento de novos produtos é um fator que aumenta a competitividade entre as empresas e pode ser um fator crucial para alavancar vendas de produtos e bens de consumo.

Segundo Baxter (1995) a criatividade é uma das mais misteriosas habilidades humanas. Este autor afirma que “a criatividade é o coração do design em todos os estágios do projeto”. O autor considera que o projeto mais empolgante e desafiador é aquele que exige inovações de fato – a criação de algo radicalmente novo, nada parecido com o que se encontra no mercado. Mas ainda que a inovação seja apenas um aperfeiçoamento, isso não diminui a importância da criatividade.

Para a Rede Gaúcha de Design – (RGD) “entende-se por design a melhoria dos aspectos funcionais, ergonômicos e visuais dos produtos, de modo a atender as necessidades do consumidor, melhorando o conforto, a segurança e a satisfação dos usuários”. As necessidades do consumidor podem ser entendidas através pesquisa de mercado voltada para o mercado de interesse, para o qual está sendo desenvolvido o produto.

A pesquisa e análise é geralmente a parte do planejamento que mais consome tempo. É realizada para identificar, avaliar e justificar uma oportunidade de produto. As fontes para pesquisa são: demanda de desejo de consumidores, a concorrência exercida pelos produtos existentes e as oportunidades tecnológicas para projeto e fabricação de novos produtos. Pode ser considerada uma oportunidade de mercado para um produto, quando forem identificadas:

demandas e desejo dos consumidores e diferenças em relação aos produtos oferecidos pelos concorrentes, ou seja, demandas até então não atendidas pelo mercado (BAXTER, 1995).

A atividade de desenvolvimento de um novo produto não é tarefa simples. Ela requer além da pesquisa e planejamento cuidadoso, controle meticuloso e o uso de métodos sistemáticos. Os métodos sistemáticos de projeto exigem uma abordagem interdisciplinar, abrangendo métodos de marketing (durante a etapa de planejamento), engenharia de métodos (visando a etapa de produção) e aplicação sobre estética e estilo (atrelada a aceitação pelo mercado) (BAXTER, 1995).

Segundo Bonsiepe (1997), *design* é a “atividade projetual responsável pelas características estruturais, estético-formais e funcionais de um produto para a fabricação em série”. O processo de fabricação seriado é, portanto, um fator que deve ser considerado antes do desenvolvimento da forma, pois o mesmo implica em possibilidades e limitações do ponto de vista da produção. Quando um processo de fabricação de tecnologia avançada traz inovações, se tornando mais eficiente e abrangente, apresenta novas capacidades produtivas relacionados às formas que podem ser executadas, aportam maiores condições de alcançar soluções inovadoras de projeto. Quanto menos limitações de processos que tolham a liberdade projetual, maior é a possibilidade de oportunidades de inovação.

Desta forma, possibilidades de uso de novas tecnologias geram inovações que podem estar relacionadas com novo material, novos processos ou novos conceitos de projetos. Portanto, segundo Faller, (2006) “a interação do design com a tecnologia são fundamentais para agregar valor aos novos produtos” e especificamente nesta área de materiais gemológicos faz a grande diferença entre

expartir matérias-primas em bruto ou fortalecer divisas brasileiras através dos benefícios desta interação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste capítulo é descrever os procedimentos metodológicos e os materiais utilizados no desenvolvimento deste estudo:

- pesquisa de campo para conhecer a realidade das empresas que beneficiam ágata (duas empresas e uma escola em Soledade e uma empresa em Gaurama);

- realização de ensaio de usinagem convencional por fresadora CNC;
- realização de ensaios de usinagem não convencional por jato d'água CNC;
- estudo das espessuras de chapas para corte por jato d'água no material gemológico ágata;

- desenvolvimento das formas para realização dos experimentos;
- avaliação dos resultados.

3.1. Pesquisa de campo

Trata-se da etapa de reconhecimento dos procedimentos de corte utilizados em empresas do RS. Grande parte das empresas responsáveis pelo beneficiamento da ágata no estado está sediada na região de Soledade, município que faz parte do Sistema Produtivo Local (SPL) de Gemas e Jóias do Rio Grande do Sul. A pesquisa de campo iniciou-se nesse município, onde duas empresas foram visitadas visando a um aprofundamento nos conhecimentos dos processos existentes. Além destas, foram visitadas também uma escola de lapidação, a Escola

Senai em Soledade, e uma empresa sediada na cidade de Gaurama, devido à sua importância pela tecnologia a que tem acesso.

Estudo da empresa 01: Irmãos Lodi, no município de Soledade, RS. O beneficiamento de ágata ocorre através de corte dos geodos de ágata em chapas planas de espessura em torno de 3 e 4 milímetros. O corte é feito com serra circular, diamantada na região de corte e, como refrigerante do calor causado pela abrasão na ágata, é usando óleo marítimo. A operação pode durar em torno de 5 horas para um geodo de diâmetro medindo por volta de 60 cm, por exemplo; o tempo de operação depende do tamanho do geodo (fig.15).



Figura 15. Imagem de equipamento para corte de geodos de ágata em chapas
Fotografia de Álvaro Scur

Após o corte e a limpeza, são realizadas as etapas de acabamento para retirada de riscos e possíveis marcas da serra circular e posteriormente ocorre a etapa de polimento. O acabamento é realizado com a utilização de lixas contínuas movimentadas com motor e líquido com partículas abrasivas. Para lixar e polir são utilizadas lixas de granulometrias diversas, é necessária pressão manual da chapa contra a lixa visando o desbaste (figura 16). O Setor de acabamento é bastante

empoeirado, os funcionários estavam utilizando máscaras como equipamento de segurança.



Figura 16. Imagem de equipamentos para lixar e polir chapas de ágata, setor de acabamento.
Fotografia de Álvaro Scur

As chapas de ágata são dispostas em pilhas e agrupadas em carrinhos para o transporte para o setor de lavagem (fig. 17).



Figura 17. Imagem do setor de polimento e acabamento de ágata
Fotografia de Álvaro Scur

Na Escola de Lapidação do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), em Soledade, são produzidos diversos produtos utilizando chapas de ágata. Entre as opções desenvolvidas para aproveitamento deste material da região estão: relógios, cruzes, dragões, móveis, sinos de vento, chaveiros, pirâmides, esferas, meia luas e estrelas (figura 18).



Figura 18. Imagem de objetos produzidos com utilização de chapas de ágata. SENAI – RS
Fotografia de Álvaro Scur

Também são produzidas peças para colecionadores de materiais gemológicos, produtos onde chapas planas de ágata são fixadas em suportes de madeira (fig. 19).



Figura 19. Imagem de objetos produzidos com utilização de chapas de ágata. SENAI-RS
Fotografia de Álvaro Scur

Estudo da empresa 02: Ágata Sul, em Soledade. A empresa trabalha com produtos que utilizam chapas de ágata tingidas no local em cores diversas. A imagem abaixo mostra a etapa de secagem de chapas tingidas da cor rosa (fig.20).



Figura 20. Chapas tingidas – etapa de secagem
Fotografia de Álvaro Scur

Esta segunda empresa visitada realiza a montagem de produtos tais como: móveis, sinos de vento, borboletas, porta copos, entre outros. Não costuma desenvolver periodicamente produtos novos.

Estudo da empresa 03: Em Gaurama, RS, está sediada uma importante empresa de beneficiamento de gemas. A empresa “Belapedra” trabalha com o beneficiamento de diversos materiais gemológicos produzidos por processos artesanais; porém diferencia-se das demais visitadas por também investir em tecnologias de ponta entre os processos de produção utilizados.

Os processos manuais de manufatura que utiliza são: corte de chapas com disco diamantado, corte manual em chapas planas, lapidação mecânica manual na forma de cabochões e lapidações facetadas por processos artesanais. Entre os processos envolvendo tecnologias, destacam-se desbaste CNC para

pedras facetadas e corte de ágata por jato d'água com abrasivos (fig.21), metalização de cristais e outros.

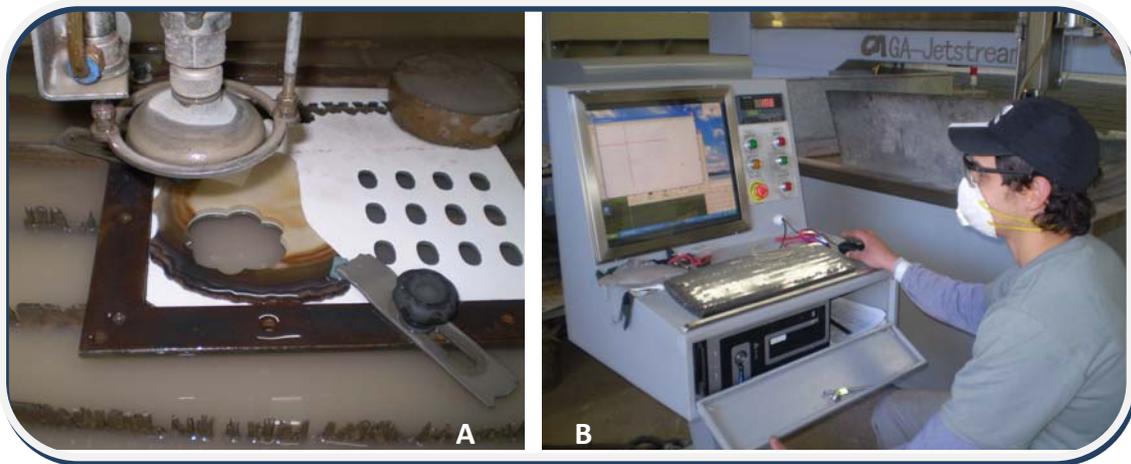


Figura 21. Em A) Equipamento para corte de chapa de ágata por jato d'água, em B) operador controlando o processo por computador.

Sobre a realidade das empresas visitadas e a realidade nas empresas em geral na região de Soledade, foi reconhecido que a maior parte que trabalha com produtos provenientes do beneficiamento da ágata e o fazem através do processo de corte em chapas, que são lixadas, polidas, tingidas, cortadas artesanalmente em formas diversas para montagem posterior em objetos decorativos. Não foi relatada a existência de projetos de desenvolvimento de produtos sendo executados periodicamente para fins de lançamentos e ampliação de linha. Não apresentavam setor de desenvolvimento de produtos novos.

Na empresa Belapedra, em Gaurama, foi encontrado um panorama mais adequado do ponto de vista do design, há um setor de desenvolvimento de produtos novos e execução de projetos da empresa e de clientes. Setor este onde trabalham funcionários capacitados em softwares tipo CAD, tipo CAM e outros. Os processos de fabricação incluem os tradicionais artesanais e os processos envolvendo novas tecnologias CNC.

3.2. Processos de usinagem

Os processos de usinagem ensaiados utilizaram os processos CNC convencional e não convencional por jato d'água com abrasivos.

3.2.1. Usinagem convencional CNC

Os ensaios de usinagem têm o objetivo de cortar ágata com as ferramentas e materiais adequados para o desbaste, encontrando assim as características necessárias para ferramentas a fim de aperfeiçoar o processo de fabricação. Visaram, portanto, encontrar parâmetros eficientes para usinagem buscando melhor acabamento, qualidade e produtividade.

A primeira tecnologia usada para os ensaios foi a de usinagem CNC, com uma fresadora da marca Model Master CNC, de 3 eixos (X,Y,Z) (fig. 22). O teste foi realizado em chapa de ágata com espessura de 3 milímetros (comumente encontrada no mercado da região de Soledade). A ferramenta utilizada foi fresa diamantada (possui ponta com incrustação de diamantes) com ponta de forma cilíndrica em diâmetro de 2,0 mm (comumente encontrada no mercado).



Figura 22. Equipamento para usinagem convencional CNC, Model Master.

O experimento foi realizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – (UFRGS), no Laboratório do Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial o (Gpfai).

3.2.2. Usinagem não convencional por jato d'água com abrasivos

Os ensaios seguintes a tecnologia usada foi de corte por jato d'água com abrasivos, foram feitos com ágata, em chapas de espessuras variadas. Foi utilizado o equipamento da marca Jetstream CNC (figura 23). No trabalho utilizou jato d'água de alta pressão por volta de 390 MPa (Mega Pascal), funciona com 30 CV de potência e dois pistões hidráulicos (nestes pistões é utilizado óleo hidráulico). Estes experimentos foram realizados em Gaurama,RS, na empresa Belapedra.



Figura 23. Equipamento para usinagem por jato d'água CNC da marca Jetstream.

A máquina possui como ferramenta de corte o fluxo de água, que, passa por um orifício com ponta de safira e depois por um bico feito de aço inoxidável (figura 24). A ponta de safira é substituída a cada 50 horas de uso.



Figura 24. Componentes do equipamento de corte por jato d'água.

Após a saída da água são agregadas ao fluxo finas partículas abrasivas, de tamanho de grão 0,3 mm (figura 25).

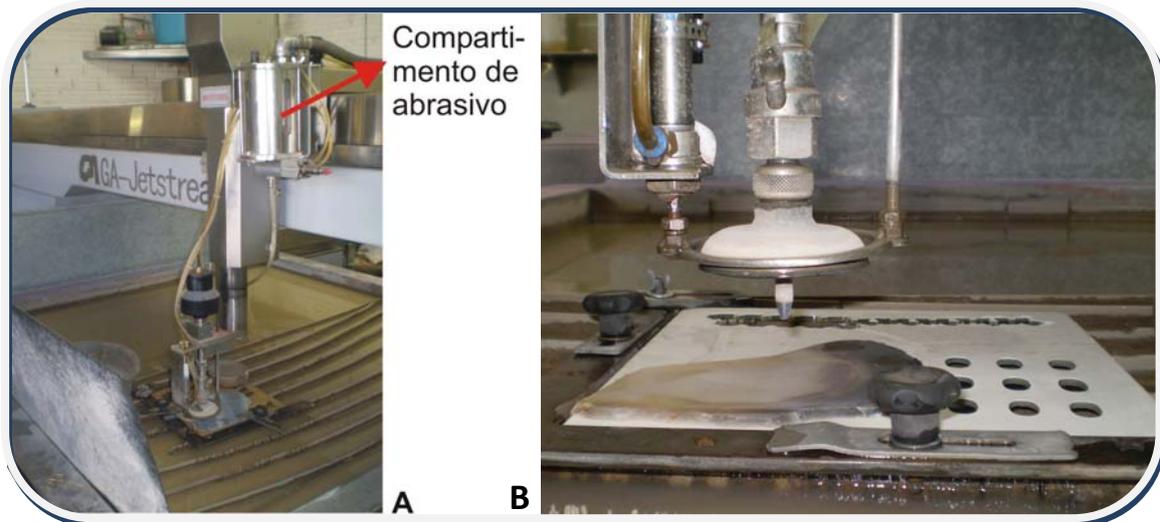


Figura 25. Imagens do equipamento Jetstream. Em (A) pode ser visualizado o compartimento de material abrasivo, em (B) vista aproximada do equipamento, na parte de saída da do jato d'água.

O jato de água cortante de diâmetro de 1,2mm é utilizado para espessuras de chapas de ágata de aproximadamente 5mm (figura 26).



Figura 26. Vista aproximada do equipamento em operação de corte.

3.3 Caracterização do material abrasivo

Amostras do abrasivo depois de moídas foram enviadas à análise de difração por raios- X na forma de pó. A análise foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS, no equipamento da marca Philips Expert MPD.

O resultado da análise é de um material de composto de 61,8 % de alumínio ferro silicato: $\text{Fe}^3 + 2 \text{Al}_2 (\text{SiO}_4)^3$, mineral conhecido como almandina, do grupo da granada, é muito resistente, e por isso, indicado para aplicações abrasivas, sua dureza segundo a escala Mohs é de 7 1/2.

Foi constatada a presença de 17 % de magnésio silicato Mg SiO_3 entre outros componentes variados em volumes menos significativos.

3.4 Espessuras da chapas de ágata

As chapas de ágata que foram utilizadas nos ensaios apresentavam espessuras variadas, para que fosse possível verificar o comportamento das mesmas ao serem submetidas ao corte nas diversas formas e larguras de linhas.

O objetivo foi de estabelecer uma espessura mínima para que o produto final não apresentasse peso excessivo e por outro lado não fosse frágil demais, tendendo à quebra. A empresa Belapedra, onde os experimentos foram realizados, tem como costume utilizar a espessura de chapa 5,0 mm. Os ensaios

partiram da referida espessura (5,0mm) e foram sendo diminuídas para 4,5; 4,0; 3,5 e 2,5 mm. As chapas ensaiadas não estavam lixadas e nem polidas.

3.5 Formas

Nove formas foram desenvolvidas para os ensaios: a primeira foi projetada com a utilização de formas geométricas simples, no caso o retângulo, que envolve o corte retilíneo. Para os ensaios seguintes, foram desenvolvidas formas de complexidade média e de maior complexidade, envolvendo cortes arredondados e cortes de triângulos de ângulos variados.

3.5.1 Forma simples

Um desenho utilizando formas simples foi desenvolvido visando investigar e analisar o corte retilíneo: um retângulo de 38 x 40 cm, com retângulos menores vazados, com a permanência de barras fixas em larguras de linhas variadas (fig.27). A variação de barras com larguras de linhas foram testadas, principalmente para observar as larguras mínimas, para que pudessem ser utilizadas posteriormente em outros ensaios em formas mais complexas. O tempo de duração deste tipo de corte reto também foi objeto de interesse para comparação com a usinagem convencional.

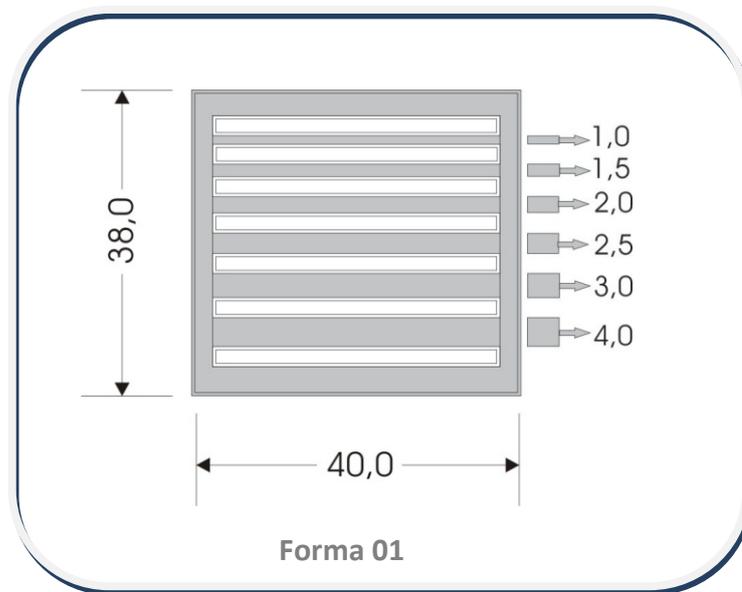


Figura 27. **Forma 01**: simples retangular com linhas com larguras diversas
Tamanho 38 x 40 mm. Unidade de medida milímetros.

3.5.2 Formas de média complexidade

Visando uma complexidade maior, desenhos com agrupamento de formas vazadas sobrepostas foram desenvolvidos. Este grupo de desenhos é composto por uma mesma forma repetida duas vezes, sendo utilizadas formas circulares, ovais, em gota e em losangos (fig. 28). A largura de linha é de 2,0 mm.

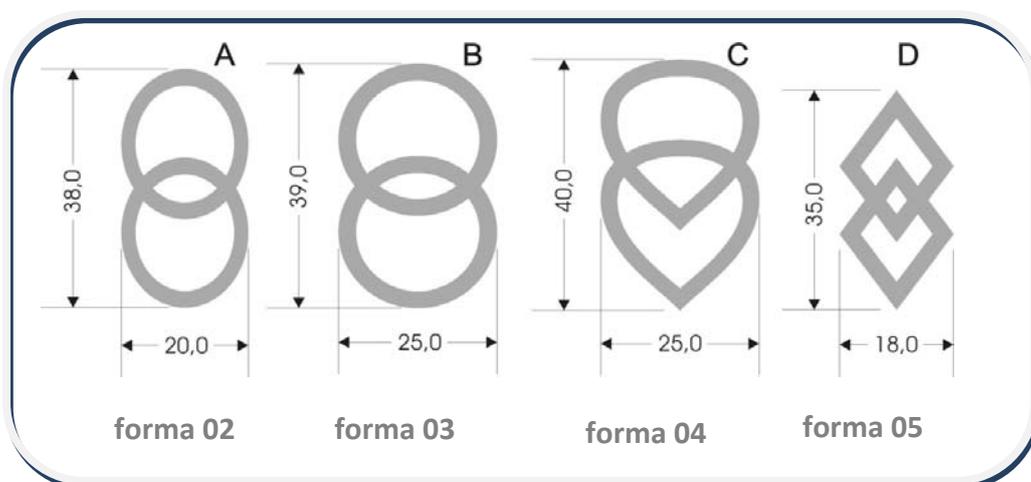


Figura 28. Formas de complexidade média com a união de formas sobrepostas vazadas. Em (A) formas ovais, em (B) formas de círculos, em (C) formas de gotas e em (D) formas de losangos. Unidade de medida dos tamanhos: milímetros.

3.5.3 Formas complexas

Visando uma complexidade crescente foram desenvolvidos desenhos com a utilização de círculos. O desenho do agrupamento dos círculos foi inspirado na curva de Fibonacci (fig. 29).

Fibonacci, matemático italiano, descobriu, no século 13, que os desenhos de plantas e animais, como o arranjo das posições das folhas, e outras diversas ocorrências da natureza seguem regras numéricas matemáticas.

Segundo Celuque (2004) Fibonacci relaciona a proporção encontrada em diversos fenômenos da natureza com as formas geométricas. As folhas, as conchas, os chifres dos antílopes, o rabo do camaleão serviram como base para os estudos que determinaram a série de Fibonacci, a razão áurea e a espiral logarítmica ou curva de Fibonacci.

A referida curva é inscrita dentro do retângulo áureo. O retângulo áureo é formado pela soma de quadrados sucessivos cujos lados são os números de Fibonacci (1,1,2,3,5,8,13,21,34) (fig 29).

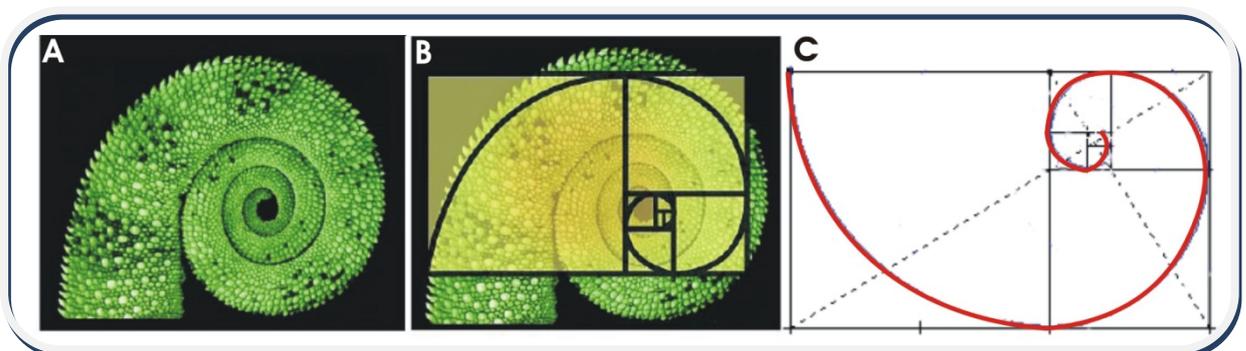


Figura 29. Em (A) forma da natureza (a ponta do rabo do camaleão), em (B) a proporção expressa no retângulo áureo sobreposta a forma encontrada na natureza e em (C) a curva de Fibonacci inscrita dentro do retângulo áureo.

A primeira forma complexa teve a disposição do primeiro círculo direcionada pela espiral logarítmica (fig.30).

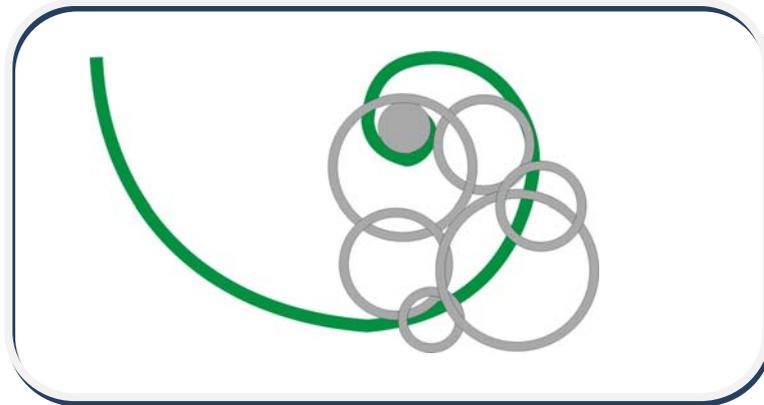


Figura 30. Forma complexa composta por círculos agrupados. Disposição utilizando a espiral logarítmica ou curva de Fibonacci como ponto de partida.

O desenho da peça projetada apresenta repetição de unidades de formas circulares. A composição do agrupamento foi de assimetria entre as duas metades do desenho, se considerado um eixo central dividindo o desenho. Foi intencional a ausência de ordenamento entre as formas.

As formas estão agrupadas, unidas e sobrepostas, por vezes intercecionadas; algumas cheias e outras, vazadas, em larguras de linhas diversas. Os círculos apresentam diâmetros diversos, o que confere maior complexidade no projeto e também na produção da peça (fig.31).

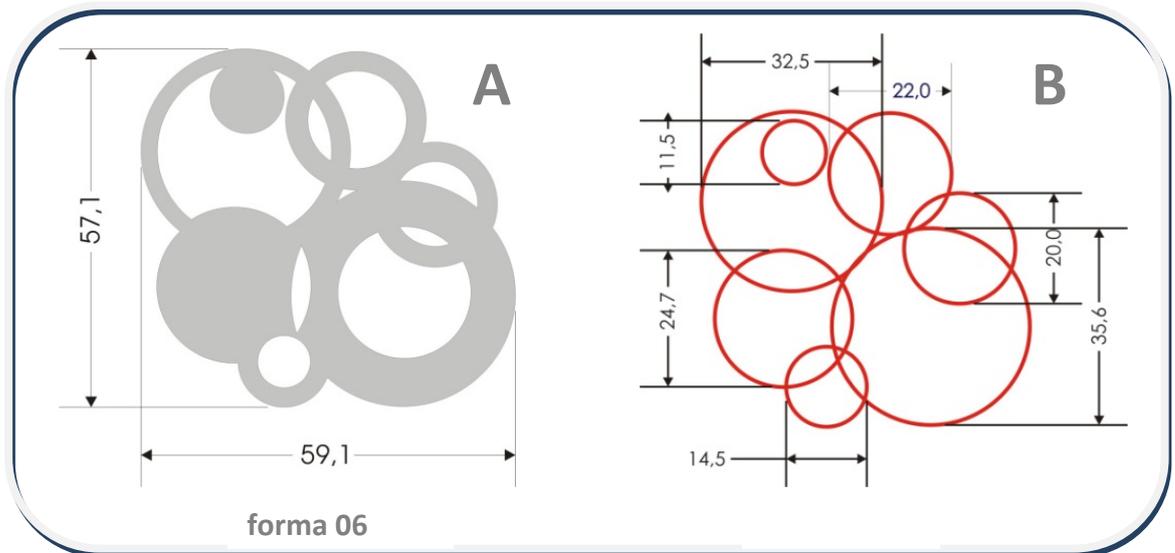


Figura 31. **Forma 06:** em A) forma complexa com extremos arredondados, composta por repetição de formas circulares, variando larguras de linhas, também cheios e vazados, e em B) estruturação da forma composta por círculos de raios diferentes. Unidade de medida milímetros.

Outro desenho projetado apresenta a inclusão das mesmas variações aplicadas na proposta anterior de desenho com formas circulares, variação entre cheios e vazados e variação de larguras de linhas. Porém, neste projeto, compondo com o agrupamento de formas triangulares. Os triângulos apresentam nas pontas, ângulos variados (fig. 32).

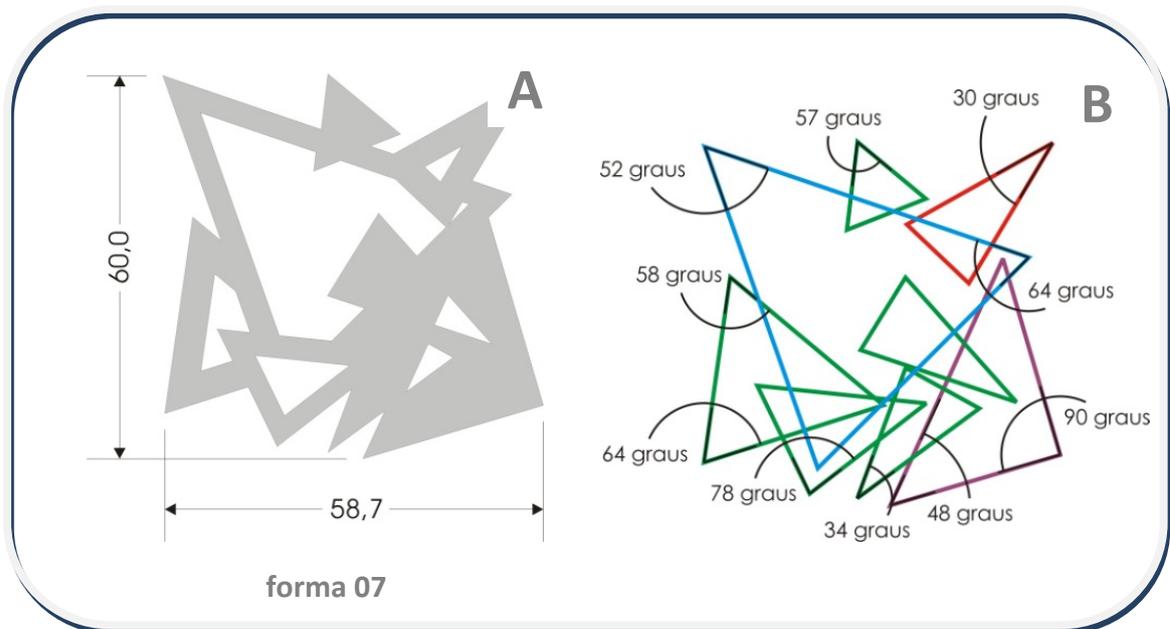


Figura 32. **Forma 07:** em A) complexa com extremos pontiagudos, composta por repetição de formas triangulares, variando larguras de linhas e formas cheias e vazadas. Em B) estruturação da forma composta por triângulos de diferentes ângulos em seus extremos. Unidade de medida milímetros.

A relação entre círculos, raios, retas e ângulos explorada nas formas complexas desenvolvidas para esse estudo, decorreu de pensamentos criativos relacionados aos estudos de Fibonacci.

Os desenhos seguintes com os agrupamentos de círculos (forma 08) e triângulos (forma 09) apresentam as formas vazadas, com a largura de linha constante de 2,0 mm.

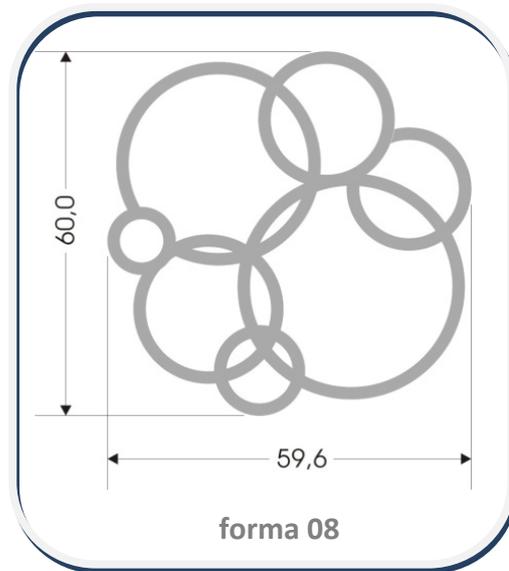


Figura 33. **Forma 08**: complexa com extremos arredondados, composta por repetição de formas circulares vazadas, variando os tamanhos dos raios. Unidade de medida milímetros.

Para o ensaio seguinte, foi desenvolvido o desenho de uma peça também composta por repetição de unidades de formas, sendo porém, utilizadas formas pontiagudas, constituídas de triângulos com ângulos variados entre as retas. Ao desenvolver este desenho buscou-se utilizar as formas triangulares na mesma quantidade e localização aproximada, relacionando com as formas circulares do desenho anterior (fig. 34).

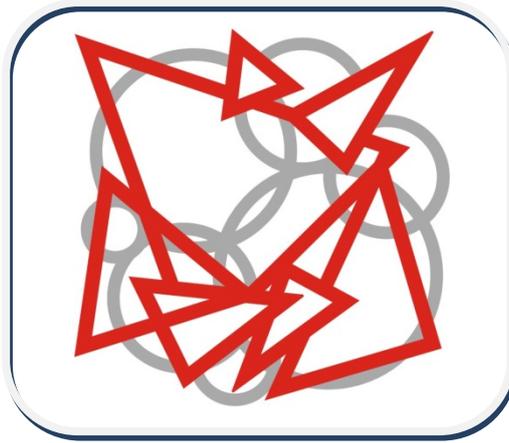


Figura 34. Formas complexas sobrepostas.

As formas triangulares vazadas estão agrupadas sobrepostas, unidas e por vezes, interpenetradas. É um fator constante a largura de linha de 2,0mm vazando os triângulos. A forma 09 pode ser visualizada na figura 35.

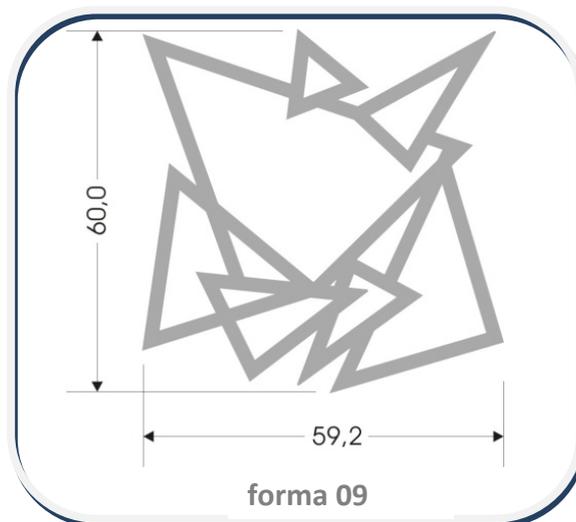


Figura 35. **Forma 09**: complexa com extremos pontiagudos, composta por repetição de formas triangulares, variando os ângulos das pontas dos triângulos. Unidade de medida milímetros.

3.5.4 Desenvolvimento de formas complexas e programação CAM e CNC

Para realização dos experimentos de usinagem é necessário o planejamento de peças em formas complexas. O desenvolvimento foi realizado por computador, em software 2D, o Corel Draw^R e os vetores gerados foram exportados

para software que trabalha a programação em três dimensões, o Rhinoceros^R. Nesta etapa é possível definir a estratégia de usinagem e, finalmente, o projeto é encaminhado para software tipo CAD/CAM, o Bob-CAD^R, que simula e aciona os comandos computadorizados do equipamento que realiza o corte (fig. 36).

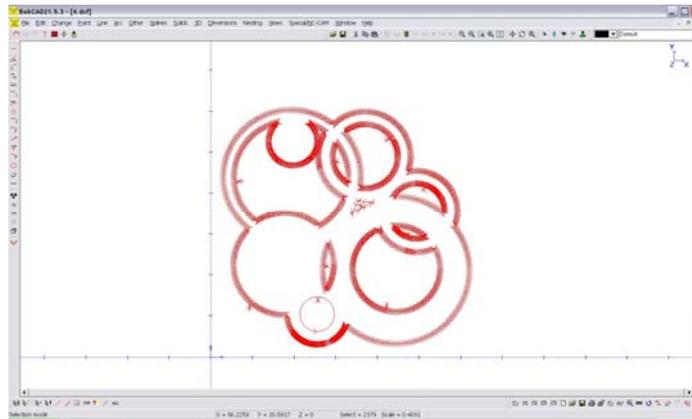


Figura 36. Imagem da programação no programa Bob-CAD^R.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Abrangem os ensaios com usinagem CNC convencional e não convencional.

4.1. Resultado do ensaio de usinagem convencional CNC

O primeiro ensaio foi realizado por usinagem convencional em fresadora CNC, utilizando como ferramenta fresa diamantada. Houve remoção de material, a usinagem foi possível, porém a ferramenta utilizada apresentou desgaste na ponta da ferramenta que impediu a continuidade do trabalho. A profundidade do desgaste foi de 1,0 mm e o comprimento do trajeto de 30 mm, o trabalho de desbaste foi realizado, porém, não o corte vazado do desenho/linha (fig. 37).

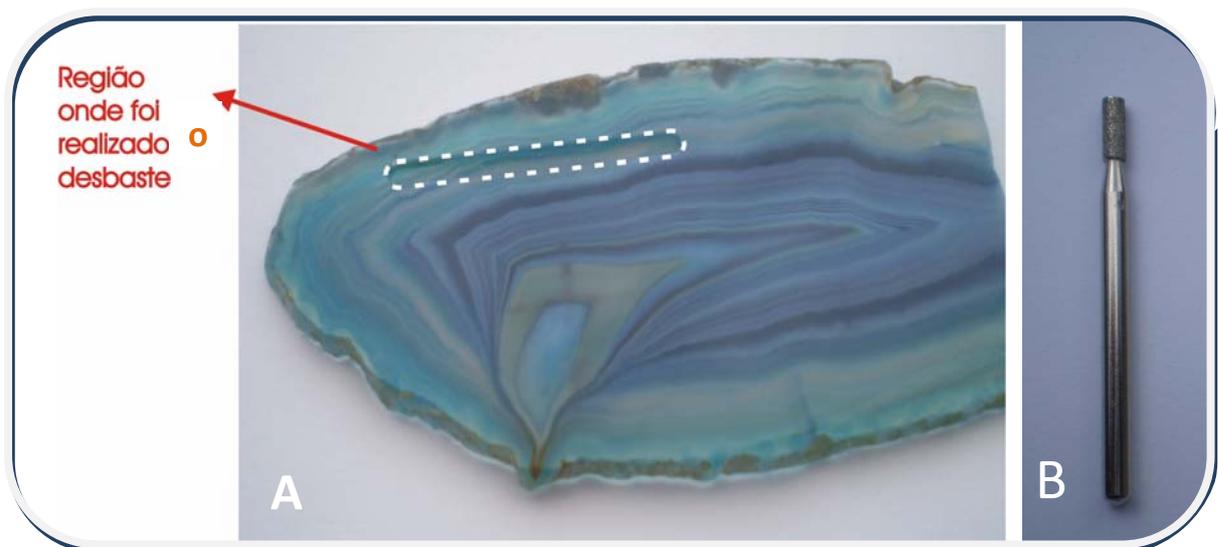


Figura 37. Em A) ensaio de usinagem convencional, mostrando a trajetória do desbaste (pontilhado). Chapa de ágata com espessura de 3,0 mm, em B) ferramenta diamantada.

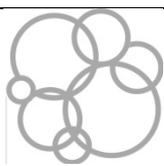
Os parâmetros do experimento foram: passo lateral de 0,5 mm, passo vertical de 0,1 mm e a velocidade da máquina foi de 15.000 r.p.m; avanço lateral: 0,100 mm/seg e o avanço vertical de 1,10 mm/seg.

O tempo de duração do ensaio foi de 2 horas, o que foi considerado demasiadamente longo, pois o emprego/gasto de energia elétrica e tempo de maquinário acarretaria em alto custo a ser acrescido no valor final da pedra. O tempo demasiadamente longo levou à procura de outros processos, que poderiam realizar o corte em menor tempo e utilizando ferramentas mais adequadas que apresentassem menor desgaste.

4.2. Ensaio e resultados de usinagem não convencional por jato d'água

O quadro 2 mostra, de forma sistemática, os 23 ensaios realizados, relacionando formas, espessura e tempos. As chapas de ágata utilizadas nos ensaios foram apenas serradas, sem terem sido submetidas a processos de lixa ou polimento. Em todos os ensaios por este processo, foi considerado resultado satisfatório quando o material, após o corte na forma desejada, não apresenta irregularidades, defeitos, acabamento superficial serrilhado, lascado, rachaduras ou ocasiona a quebra.

Quadro 2- Ensaio de usinagem não convencional por jato d'água.

ENSAIO	ESPESSURA	FORMA		TEMPO
01	5,0 mm	Simples linear	 Forma 01	3:30 min
02	4,5 mm			
03	3,5 mm			
04	2,5 mm			
05	5,0 mm	Complexidade média – ovais	 Forma 02	2:00 min
06	5,0 mm	Complexidade média – círculos	 Forma 03	2:00 min
07	5,0 mm	Complexidade média – gota	 Forma 04	2:00 min
08	5,0 mm	Complexidade média – losangos	 Forma 05	1:50 min
09	4,5 mm	Complexa círculos vazados	 Forma 08	6:00 min
10	4,0 mm			
11	3,5 mm			
12	2,5 mm			
13	4,0 mm	Complexa triângulos vazados	 Forma 09	5:30 min
14	3,5 mm			
15	2,5 mm			
16	5,0 mm	Complexa círculos cheio, vazado, larguras diversas	 Forma 06	5:00 min
17	4,5 mm			
18	3,5 mm			
19	2,5 mm			
20	5,0 mm	Complexa triângulos cheio, vazado, larguras diversas	 Forma 07	4:26 min
21	4,5 mm			
22	3,5 mm			
23	2,5 mm			

No primeiro ensaio foi utilizada uma chapa de 5,0 mm de espessura e a forma 01, um retângulo de 38 x 40 cm, com barras de larguras de linhas variadas; iniciando linhas com larguras de 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 e 4,0 mm. A intenção deste ensaio foi verificar o comportamento do material em diferentes larguras de linhas. O tempo de ensaio de corte foi de 3:30 minutos, tempo aproximadamente 40 vezes menor do que o ensaio por usinagem convencional. A chapa de ágata ensaiada, de 5mm de espessura, não lascou e nem quebrou nem mesmo nas larguras mais finas (fig.38).

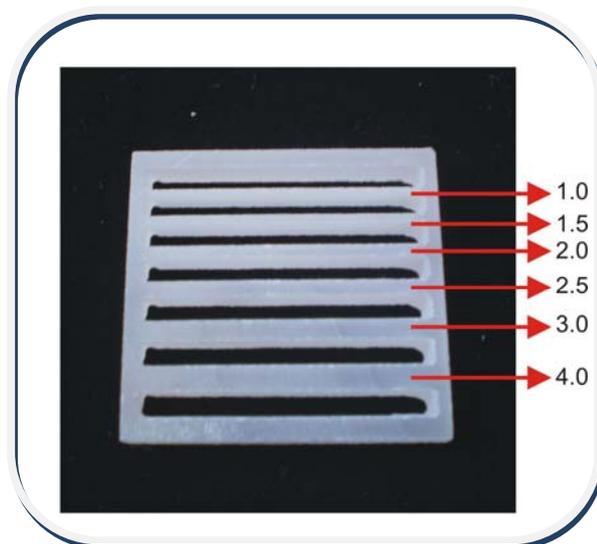


Figura 38. Forma 01: simples linear. Ensaio utilizando chapa de espessura 5,0 mm. Tamanho 38 x 40 mm.

Com o objetivo de comparar o comportamento do material, repetindo a mesma forma e variando as espessuras de chapas, foram realizados os ensaios números 2, 3 e 4. No segundo ensaio a espessura da chapa ensaiada foi de 4,5mm. A linha com largura de 1,0 mm lascou, apresentou irregularidades em sua superfície, enquanto as demais espessuras apresentaram resultado satisfatório (fig. 39).

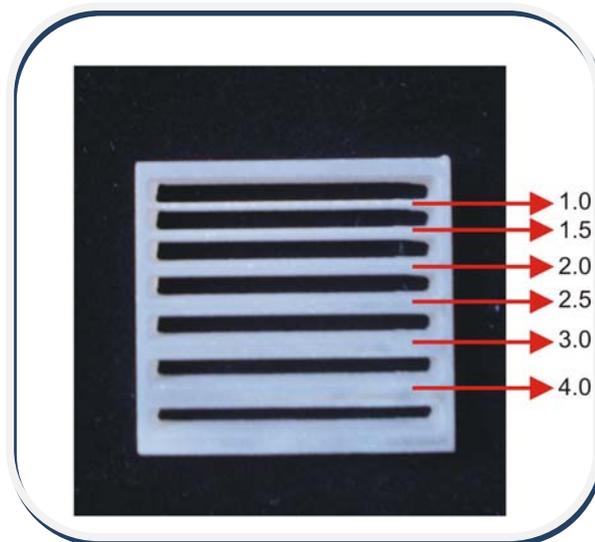


Figura 39. Forma 01: simples linear. Ensaio utilizando chapa de espessura 4,5mm.

No terceiro ensaio com a forma 01, cortada utilizando chapa de espessura 3,5mm, a linha com largura de 1,0mm e a linha de 1,5mm apresentaram irregularidades a linha de 2,0 mm apresentou resultado satisfatório assim como as demais 3 larguras (fig. 40).

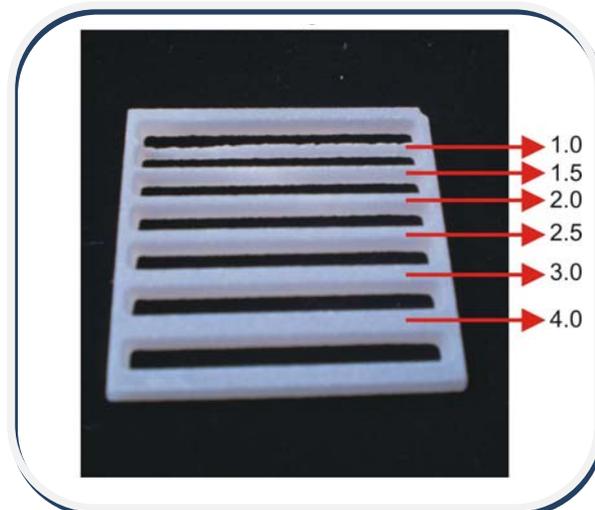


Figura 40. Forma 01: simples linear. Ensaio utilizando chapa de espessura 3,5 mm.

No quarto ensaio, com a forma 01, utilizando chapa de espessura 2,5mm, a linha de largura 1,0mm quebrou, as linhas das demais larguras apresentaram irregularidades e defeitos na parte superior das linhas. Esta espessura de chapa foi considerada inadequada por sua fragilidade. Dos quatro ensaios

citados, a largura de linha de 2,0mm foi considerada a largura mínima satisfatória e foi utilizada para desenvolvimento dos demais desenhos (fig. 41)

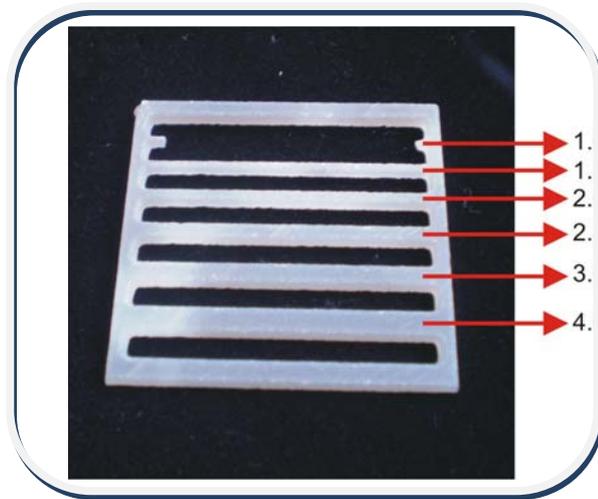


Figura 41. Forma 01: simples linear. Ensaio utilizando chapa de espessura 2,5 mm.

Nos ensaios de números cinco, seis, sete e oito, formas vazadas e interpenetradas com larguras de linha de 2,0mm foram usinadas, os ensaios apresentaram resultado satisfatório. A espessura de chapa utilizada foi de 5,0mm e os tempos de ensaios foram, em média, 2 minutos para cada ensaio (fig. 42).

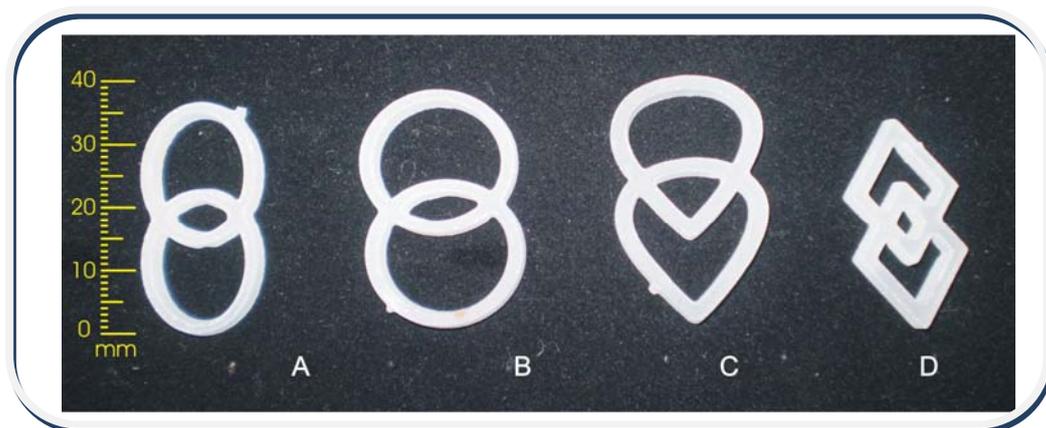


Figura 42. Formas de complexidade média, composta por duas formas. Em (A), forma 02: dois ovais, em (B) forma 03: dois círculos, em (C) forma 04: duas gotas e em (D) forma 05: dois losangos. Espessura de chapa 5,0 mm

No quinto ensaio foi usinada a forma 02, o tamanho da peça é de 38 x 20 cm, a duração do ensaio foi de 2 minutos. No sexto ensaio, este com a forma

03 o tamanho da peça é de 39 x 25 cm e a duração do ensaio foi de 2 minutos. No sétimo ensaio, este com a forma 04, o tamanho da peça é de 40 x 25 cm e a duração do ensaio foi de 2 minutos. No ensaio número 8, com a forma 05, o tamanho da peça é de 35 x 18 cm e a duração do ensaio foi de 1:50 minutos.

No nono, décimo, décimo primeiro e décimo segundo ensaios foram realizados com a forma 08, complexa composta por círculos vazados com largura de linha 2,0 mm. As espessuras de chapas foram de 4,5; 4,0; 3,5; e 2,5, respectivamente, os resultados foram satisfatórios. Os tempos de ensaios foram de 6 minutos, para cada ensaio (fig. 43).

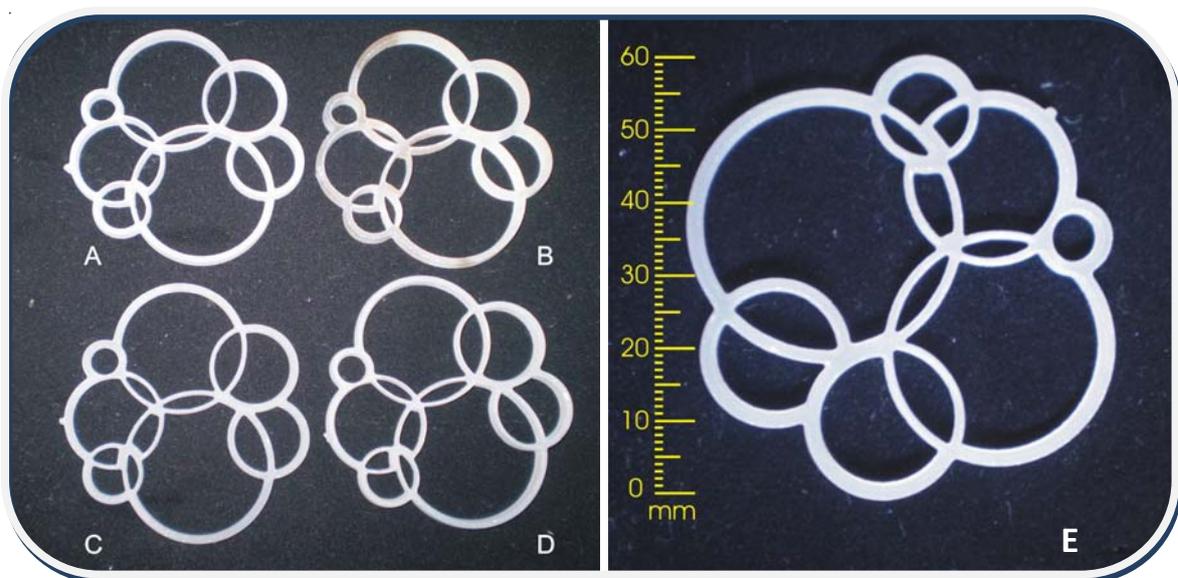


Figura 43. Forma 08: complexa composta por círculos vazados. Ensaio com diferentes espessuras, em (A) 4,0 mm, em (B) 4,5, em (C) 3,5mm e em (D) 2,5 mm. Em (E) peça com régua indicando tamanho.

Nos ensaios número 13 e 14, com a forma complexa, composta por triângulos vazados, as espessuras de chapa 4,0 e 3,5 mm apresentaram resultado satisfatório. No ensaio número 15, com a mesma forma, porém, com chapa de 2,5mm, a peça ensaiada apresentou fragilidade, ocasionando a quebra durante o

processo de corte (fig. 44). Resultado que corrobora com os resultados encontrados para formas lineares simples apresentado na figura 41.

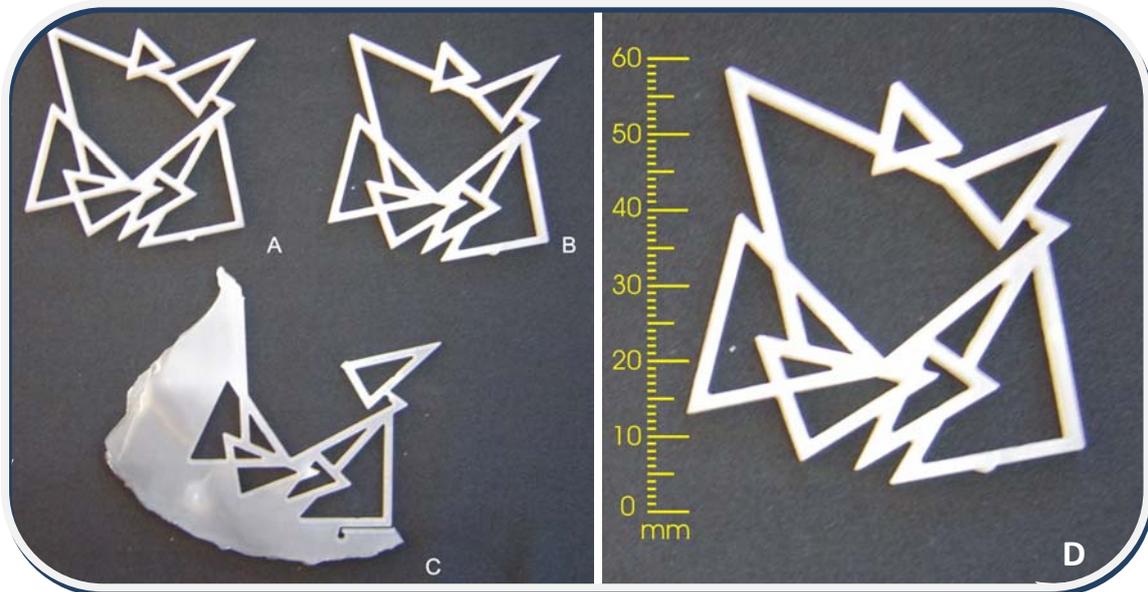


Figura 44. Forma 09: complexa composta por triângulos vazados. Em (A) ensaio com espessura de 4,0 mm, em (B) espessura de 3,5, em (C) espessura de 2,5mm. Em (D) peça com régua indicando tamanho.

O objetivo destes ensaios foi de comparar/verificar o comportamento do material em formas pontiagudas, a sua fragilidade/resistência em diferentes espessuras. Tiveram a duração de 5:30 minutos cada ensaio.

Nos ensaios números 16, 17, 18, com a forma 06, composta por círculos cheios e vazados, com diferentes larguras de linhas, as espessuras de chapa 5,0; 4,5 e 3,5 mm apresentaram resultado satisfatório. No ensaio número 19, com a mesma forma, porém com chapa de espessura 2,5 mm, a peça ensaiada apresentou fragilidade e um ponto de rachadura, que poderá ocasionar a quebra da peça (fig. 45). A duração destes ensaios foi de 5:00 minutos cada um.

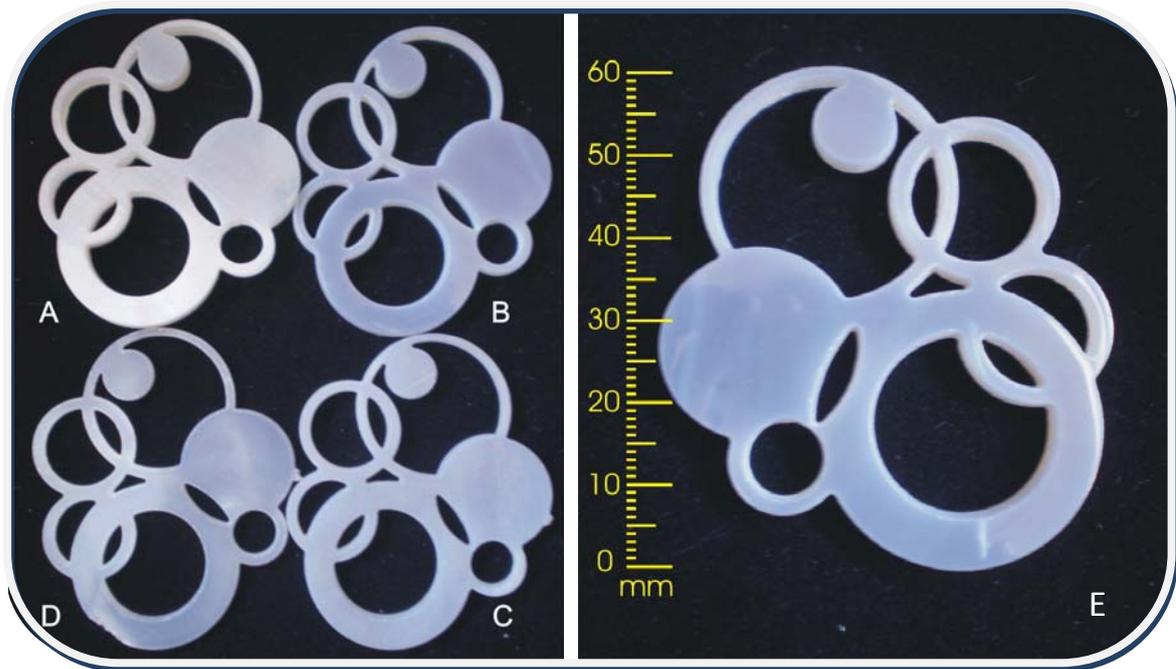


Figura 45. Forma 06: complexa composta por círculos cheios e vazados com larguras de linha variadas. Em espessuras de chapa variadas, em (A) 5,0 mm, em (B) 4,5mm, em (C) 3,5 e em (D) 2,5mm. Em (D) peça com régua indicando o tamanho.

A imagem 46 com as peças dos ensaios 16, 17,18 e 19 podem ser visualizadas, a ampliação visa mostrar o local que apresenta rachadura. Atribui-se essa rachadura a espessura muito fina da chapa em largura de linha mínima de 1mm. O bandamento, quando presente na chapa de ágata, pode ser associado a alterações na estrutura do material, e possivelmente, contribuir para regiões de maior fragilidade.



Figura 46. Peças sobrepostas, dos ensaios 16, 17, 18 e 19. Na ampliação, rachadura apresentada no ensaio de número 19, com chapa de espessura 2,5 mm.

Nos ensaios 20, 21, 22 e 23, com a forma 07, complexa composta por triângulos cheios e vazados com diferentes espessuras de linhas. Foram realizados com chapas de espessura de 5,0; 4,5; 3,5 e 2,5 mm, respectivamente. Estes ensaios tiveram o objetivo foi observar o comportamento do material em linhas de larguras diversas, partindo de 1,0 mm, depois 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 e 4,0mm. Apresentaram resultado satisfatório para todas as espessuras de chapa ensaiadas (fig.47). A duração destes ensaios foi de 4:26 minutos cada um.

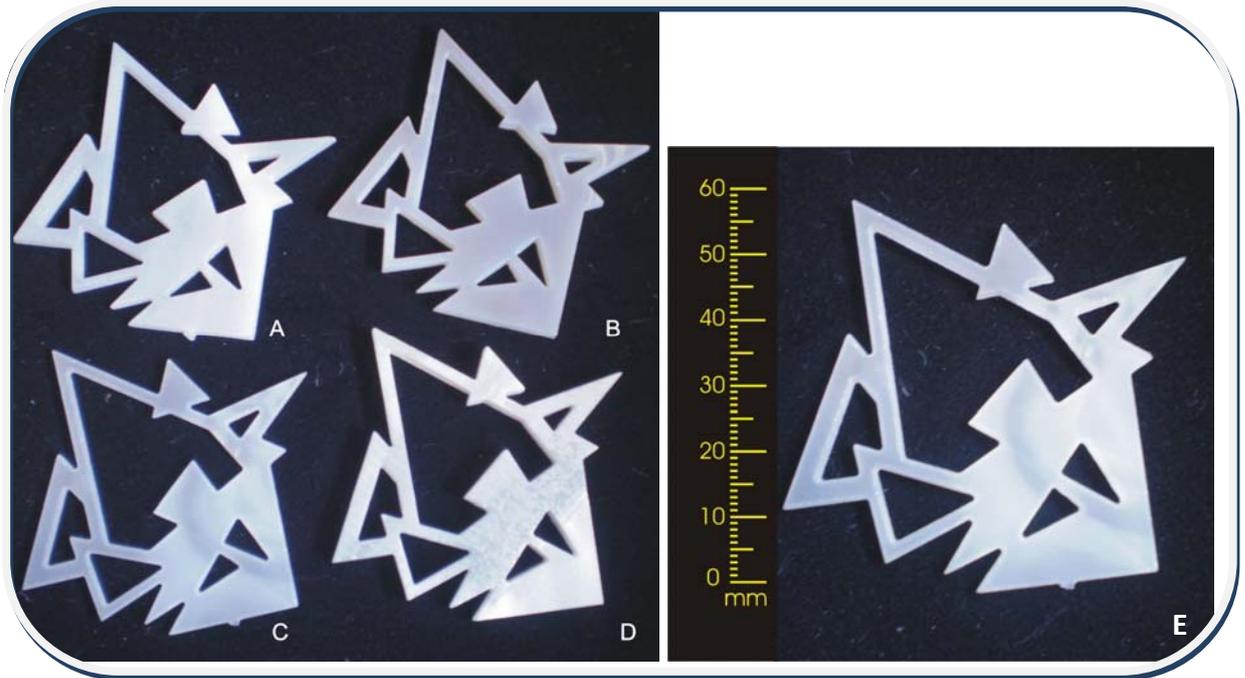


Figura 47. Forma 07: complexa composta por triângulos cheios e vazados com larguras de linha variadas. Em espessuras de chapa variadas, em (A) 5,0 mm, em (B) 4,5mm, em (C) 3,5 e em (D) 2,5mm. Em (E) peça com régua indicando o tamanho.

Comparando os tempos dos ensaios entre as formas complexas com extremos pontiagudos (compostas por triângulos) e as formas complexas com extremos arredondados (compostas por círculos), as formas pontiagudas apresentaram um tempo um pouco menor que as de extremos arredondados, com uma diferença de meio minuto.

5. CONCLUSÕES

O material gemológico ágata, extraído em grandes quantidades no Rio Grande do Sul, apresenta potencial para beneficiamento no Brasil envolvendo tecnologias que agilizem e agreguem maior eficiência, qualidade e precisão ao corte.

Os produtos desenvolvidos pela maior parte das empresas que trabalham com materiais gemológicos no Estado, de forma geral, apresentam baixo grau de inovação e design e podem ser encontrados no mercado, predominantemente na forma de produtos onde o beneficiamento principal é o corte dos geodos em chapas.

O desenvolvimento e a fabricação de peças em formas complexas, produzidas pelo processo de corte por jato d'água representam uma oportunidade de negócios a ser explorada, uma vez que esta tecnologia de processo, quando disponível, permite a fabricação de peças que satisfaçam a demanda por produtos que apresentem diferenças e inovações em relação aos produtos oferecidos pelos concorrentes. Utilizando o referido processo, novas possibilidades de desenvolvimento de produtos de formatos com maior complexidade, com precisão e agilidade, são disponibilizadas aos empresários, aos designers e aos projetistas.

Para cortes, em comparação com o processo de usinagem convencional por fresadora CNC, o processo de usinagem por jato d'água apresenta maior agilidade e menor desgaste de ferramenta sendo considerado eficiente para cortes de chapas planas. A que se ressaltar que para formas complexas com texturas 3D, como em camafeus, a técnica de usinagem CNC adequada.

Através da metodologia aplicada nos ensaios pode-se afirmar que no processo de corte por jato d'água, a largura de linha mínima ideal é de 2,0 mm e

pode ainda ser realizada com larguras maiores. Análises dos ensaios mostraram também que a espessura mínima de chapa considerada adequada para este processo é de 3,5 mm, espessura esta que apresentou resultado satisfatório em todos os experimentos. O estudo da utilização de chapas em espessuras mínimas direciona para a otimização do uso de matéria- prima. O estudo de espessuras que permitam trabalho com peças mais leves, é considerado relevante para aplicação em joias, onde o peso pode ser um fator importante em tipos de peças como brincos, por exemplo.

Pode-se afirmar que a tecnologia estudada é aplicável ao material ágata ampliando possibilidades de realizar cortes em formas complexas e minimiza esforços humanos na execução de tarefas, como o corte de chapas em formas diversas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento da pesquisa, surgiram pontos que ainda podem ser desenvolvidos para complementar o estudo de corte de ágata. Pode ser realizada uma quantidade maior de experimentos para um controle estatístico de verificação de quebras e rachaduras. Estudar a influência do bandamento na fragilidade do material, se pode ocasionar alguma descontinuidade física prévia ao corte. Aprofundar técnicas de acabamento, como o polimento das chapas após o corte nas formas complexas também podem ser realizados.

Diferentes regulagens do tamanho do feixe do jato d'água e diferentes pressões podem ser estudadas visando diminuir as espessuras de corte. Estudos relacionados ao aproveitamento de sobras do processo. O corte de outros materiais gemológicos com o jato d'água também pode ser complementar a este estudo.

Pode ser estudada a utilização de dois processos de corte em seqüência; em uma primeira etapa o corte por jato d'água, que faz o corte em chapas planas, em um desenho 2D e, posteriormente uma segunda etapa, processos de usinagem CNC visando a obtenção de relevos em 3D.

Testes com outras tecnologias, como corte pelo processo de ultrassom também podem ser realizados no material ágata, ampliando o alcance deste estudo.

REFERÊNCIAS

ARCHELA, R. S. Imagem e representação gráfica. **Revista Geografia**, Londrina. Editora da Universidade Estadual de Londrina, v.8, p. 5- 11, jun.1999.

BARBOSA, F.L.M.; GURMENDI, A.C. (coord). **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: DNPM. Estudos de Política e Economia Mineral, cap. 08, 278 p, 1995.

BAXTER, M. **Projeto de Produto**: guia prático para o design de novos produtos. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

BERTOL, Liciane S. **Contribuição ao Estudo da Prototipagem Rápida, Digitalização Tridimensional e Seleção de Materiais no Design de Implantes Personalizados**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

BESANT, C. B.; **CAD/CAM**: projeto e fabricação com o auxílio do computador. Rio de Janeiro: Campus, 1985.

BONSIEPE, G. **Design do Material ao Digital**. Florianópolis: FIESC/IEL, 1997.

BRANCO, Pécio M.; GIL, Cláudio A. A. **Mapa Gemológico do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: CPRM, 2002.

BRUM, Tânia M. M.; JUCHEM, Pedro L. Gemas no Rio Grande do Sul: uma síntese. In: **Salão das Pedras Preciosas do Rio Grande do Sul**, 1., 1994. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Secretaria de Energia, Minas e Comunicações, 1994.

Brum, T.M.M.; Juchem, P.L.; Agostini, I.M.; Fiorentini, J.A. **Classificação da Água**. In: **Ágata do Rio Grande do Sul**. Brasília, DF. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. (Série Difusão Tecnológica) n. 5. cap. 03, p. 37-63, 1998.

BÜRDEK, B. **História, Teoria e Prática do Design de Produtos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006, 496 p.

CELUQUE, Leonardo. **A Série de Fibonacci**: um estudo das relações entre as ciências e as artes. 2004. Dissertação (Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências), Programa de Pós-Graduação em Ensino e Filosofia e História das Ciências. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

COSTA, Manfred. **Beneficiamento de Pedras Preciosas no Vale do Taquari**: diagnóstico e modelo para análise e redução de perdas nos processos produtivos. 227, 130 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

EHRENFELS, Christian Von., **Höhe und Reinheit der Gestalt, In: Gestalt haf tes Sehen**. Darmstadt: Ed. Ferdinand Weinhand, 1974.

FALLER, R. R.; GUANABARA, A. S.; ROLDO, L.; KINDLEIN JR., W. **A Interação do Design com a Engenharia no Projeto de Produto**: estudo de caso de um isqueiro descartável. **Estudos em Design**, Rio de Janeiro, v. 14, p. 87-103, 2006.

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

FERREIRA, A.C., STEMER, C.E., Noções Básicas de CAM/CNC, In: **Congresso Nacional de Automação Industrial**, 1., 1983, jul. 11-15, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sucesu, 1983.

FRUTIGUER, Adrian. **Sinais e Símbolos**: desenho, projeto e significado. São Paulo: Martins e Fontes, 1999.

GOLA, Eliana. **A Jóia**: história e design. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2008.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes and systems.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1996.

HALL, Kelly. **Pedras Preciosas: um guia ilustrado com mais de 130 variedades de gemas.** Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM). Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio (MDIC). Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Manual Técnico de Gemas.** 3 ed. Brasília, 2005.

Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM), Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). **Políticas e Ações para a Cadeia Produtiva de Gemas e Jóias.** Brasília: Brisa, 2005.

JUCHEM, Pedro Luiz. **Mineralogia, Geologia e Gênese dos Depósitos de Ametista da Região do Alto Uruguai e Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado em Geociências), Programa de Pós Graduação em Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999, 225 p.

JUCHEM, P.L., et al. Potencial Gemológico da Região Sul do Brasil. In: **Seminário Sobre Design e Gemologia de Pedras, Gemas e Jóias do RS**, 1., 2009, Soledade. **Anais...** Soledade: UPF Editora, 2009.

LEATHAM, Jones, B. **Introduction to Computer Numerical Control.** Harlow: Addison Wesley Longman Limited, 1986.

LAMACHIA, Fábio. **Pedras Preciosas do Brasil.** São Paulo: Editora do Autor, 2006.

NARDINI, J. J.; PIRES, S. R. I. Tecnologias e Sistemas de Gestão da Produção e da Qualidade: um estudo na indústria metal mecânica. In: **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 22. , 2002, Curitiba **Anais...** Curitiba: ENGEP, 2002.

REDE GAÚCHA DE DESIGN (RGD). Disponível em: <<http://www.rgd.org.br>>. Acesso em junho de 2009.

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

SOUZA, A. F. **Análise das Interpolações de Trajetórias de Ferramenta na Usinagem HSC (high speed cutting) em Superfícies Complexas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2001.

SVISERO, D. P.; FRANCO, R. A Província Gemológica Brasileira. In: **Principais Depósitos Minerais do Brasil**, v. 4, parte A: Gemas e Rochas Ornamentais. Brasília: DNPM, p.9-16, 1991.

TESSMANN, C. S. **Importância do Binômio Design e Engenharia no Beneficiamento de Regeito Mineral de Opala e Água na Produção de Camafeus por Usinagem CNC**. 2009, 109 fls. Dissertação (Mestrado em Design), Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

WONG, Wucius. **Princípios de Forma e Desenho**. 3. ed. São Paulo: Martins e Fontes, 1998.

VALE, E. **Análise Econômica das Pequenas e Médias Empresas de Mineração. Relatório Final**. Brasília: CPRM 2000.

ANEXOS

Questionário desenvolvido pela autora, respondido pelo proprietário da empresa Belapedra.

Estudo realizado com colaboração de Sr. Rosito Vendruscolo

Informações para realização do estudo:

1. Sobre o processo:

Qual é o equipamento utilizado para o corte?

Jato de água de alta pressão

Qual é o programa para desenhar a forma do corte, corel-draw ?

Sim ou qualquer 2D

Qual a potência de pressurização necessária para o jato de água cortar?

A máquina tem 30 CV de potencia e dois pistões hidráulicos,

A água utilizada é pura ou tem algum elemento misturado?

Dependendo da dureza do material a ser cortado, é injetado junto com o jato de água um abrasivo especial para este tipo de máquina.

Utiliza óleo em alguma parte do processo?

Somente oleo hidraulico dentro da máquina para fazer a pressão.

Qual é o diâmetro do jato de corte? É possível variar a espessura do jato?

Nesta máquina o minimo é 1,2mm

Qual é a espessura do corte na lâmina de ágata?

Dependendo da espessura, inicia e 1,2mm e pode chegar a 5mm

Qual é a borda necessária para os suportes que prendem a lâmina na mesa de corte? Tendo um ponto de fixação de 10mm já é suficiente

2. Benefícios envolvendo este processo:

Comando CNC comando computadorizado realiza cortes precisos e exatos.

Tempo de corte muito reduzido em comparação ao processo de usinagem por fresadora

Não há desgaste ou utilização de ferramenta como fresas e brocas.

Na verdade o único desgaste que ocorre são nas pontas de safira que são substituídas cada 50 horas

Permite a realização de vazados internos e depois corte externo.

Qual a espessura mínima entre a borda e o desenho vazado?

1mm ou até menos

3. Limitantes deste processo:

Corte limitado aos eixos x e y, não há possibilidades de realizar desbaste para formação de relevos, apenas corte.