

# Contribuição ao Estudo do Processo de Corte de Água por Jato d'Água em Formas Complexas

D.R.A. Barp<sup>a,b</sup>, P.D. Neis<sup>c</sup> e N.F. Ferreira<sup>c</sup>

<sup>a</sup>engmecpatric@yahoo.com.br

<sup>b</sup>Programa de Pós-Graduação em Design, Departamento de Design e Exp. Gráfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

<sup>c</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

## Resumo

No estado do Rio Grande do Sul, estão localizadas importantes regiões de extração e processamento do material gemológico ágata. Apesar da abundância de material, a maioria dos objetos produzidos apresenta baixo grau de inovação e tem, em comum, a utilização de processos que envolvam baixa tecnologia. A ágata é geralmente exportada em estado bruto ou apresentando baixo grau de processamento. 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. A metodologia empregada para a realização deste estudo contemplou a 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, com diferentes geometrias, buscando identificar larguras e espessuras possíveis de ser aplicada com a técnica de corte por jato d'água. Os experimentos mostraram que a largura de linha mínima permitida é de 2,0 mm enquanto que a espessura mínima de chapa considerada adequada para este processo é de 3,5 mm.

**Palavras-chave:** Design, Usinagem CNC, Corte por jato d'água CNC, Ágata.

## Contribution to the Study of Development of Complex Forms Agate Products Using Water Jet Cutting Process

### Abstract

Rio Grande do Sul State, Brazil, has important regions of extraction and processing of agate. Despite the abundance of gem materials, most of the objects produced in the different companies show low innovation degree and have in common that they seldom are manufactured using new technological processes. Agate is usually exported as raw material or showing low manufactured degree. 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: evaluation of the industrial 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) and development of complex forms agate products. Twenty-four machining tests were carried out, with different geometries, trying to identify widths and thicknesses which can be applied with water jet cutting technology. The experiments showed the minimal line width is 2,0 mm whereas the minimal suitable plate thickness for that process is 3,5 mm.

**Keywords:** Design, CNC Machining, Water Jet Cutting CNC, Agate.

## 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.

Entre os materiais que geram desejo e fascínio nos seres humanos estão os metais e as pedras preciosas. Nos processos de corte de gemas, como a ágata, os processos mecânicos mais antigos com discos cortantes apresentam muitas restrições de corte em formatos complexos e peças com detalhes vazados, além de muitas falhas dimensionais. A diminuição das falhas associadas à precisão dimensional das gemas lapi-

dados 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.

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.

O objetivo deste trabalho é 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. Primeiramente são investigados os processos de beneficiamento já utilizados nos pólos de extração do Estado do Rio Grande do Sul. Depois são realizados experimentos em laboratório através do processo de usinagem convencional e através do corte de ágata por jato d'água visando definir 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). É também verificada a possibilidade de usinagem da ágata em formas geométricas complexas através do emprego destes processos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir é feita uma breve descrição sobre o beneficiamento de gemas e ocorrência de materiais gemológicos no Estado do Rio Grande do Sul, em especial a ágata. Também é realizada uma revisão da literatura sobre essa substância gemológica, onde são descritas suas principais propriedades e tipos de tratamentos de cor. É descrito ainda o processo convencional de usinagem por comando numérico computadorizado (CNC) e também o processo de usinagem não convencional, feito através de jato d'água.

### 2.1 Beneficiamento de gemas no Rio Grande do Sul

No Rio Grande do Sul estão concentradas as maiores jazidas de ágata e ametista, o que faz do estado o maior produtor e exportador destes minerais [9]. 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 [1], 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 tolem, em parte, a liberdade criativa do designer.

Devido ao inexpressivo acesso às tecnologias de beneficiamento, a ágata gaúcha tem sua comercialização, em grande 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 [9].

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.

O beneficiamento de gemas gaúchas, segundo Costa [1], 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 [2]. 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.



Figura 1: Mapa Gemológico da Região Sul do Brasil indicando localização geográfica de materiais gemológicos bem como seu contexto geológico. Modificado de Juchem et al. [6].

### 2.2 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 [6].

O Mapa (Figura 1) 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.

### 2.2.1 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.



Figura 2: Mina de extração de ágata, apresentando orifícios de entrada para verificação de ocorrências (galerias), localizada no Município Salto do Jacuí.



Figura 3: Geodo de ágata.

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 [9].

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 [9].

Quando a cavidade formada nas rochas vulcânicas, apresenta parte de seu interior total ou parcialmente preenchido, é denominada geodo (Figura 3). O geodo pode apresentar ainda água em seu interior [7].

Os geodos ocorrem em formas arredondadas e ovóides e com dimensões médias entre 20 e 50 cm de diâmetro (Figura 4), embora não seja incomum a ocorrência de geodos maiores [6].



Figura 4: Geodos de ágata extraídos da mina de Salto do Jacuí.

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 [7].



Figura 5: Chapas de ágata tratadas por tingimento.

### 2.3 A ágata (substância gemológica)

A ágata se caracteriza por apresentar estrutura bandada, com camadas de cor, espessura e porosidade diferentes [5]. Se-

gundo Hall [4], 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 calcedônia. Os tratamentos de cor são comuns para ágata devido 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 (Figura 5).

As chapas de ágata podem ter sua cor realçada também por tratamentos térmicos, o aquecimento pode intensificar a cor sem a inclusão de corantes (Figura 6).

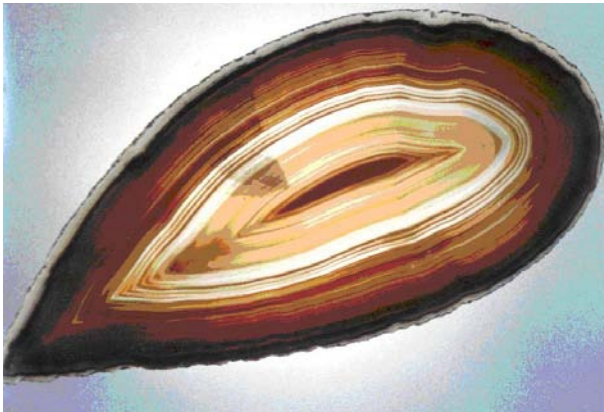


Figura 6: Chapa de ágata tratada termicamente para realçar a cor [Adaptado de Brum [9]].

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 se estuda 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 7 apresenta amostras de minerais segundo a referida escala.



Figura 7: Escala de dureza dos minerais segundo Mohs. [Modificado de Hall [4]].

#### 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 [2]. 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 [2] 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 (atrato, 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 conseqüência, 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 [4], 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 [8], estudos envolvendo ensaios de usinagem CNC em opala e ágata, representam inovações no processo de beneficiamento de materiais gemológicos. Este processo apresenta como ponto crítico o desgaste das fresas.

#### 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 [3], 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 (rubi ou safira) e diamante por sua alta dureza. A safira e o rubi apresentam dureza 9,0 na escala Mohs e o diamante apresenta dureza 10 na referida escala [8].

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 WJC 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 [3], 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 ágata, 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. 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 150 a 420 MPa, causando um elevado desgaste do mesmo.

### 3. PESQUISA DE CAMPO

Trata-se da etapa de reconhecimento dos procedimentos de corte de gemas 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 (Figura 8).



Figura 8: 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 9). O Setor de acabamento é bastante empoeirado, os funcionários estavam utilizando máscaras como equipamento de segurança.



Figura 9: 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 (Figura 10).

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 11).



Figura 10: Imagem do setor de polimento e acabamento de ágata [Fotografia de Álvaro Scur].



Figura 11: Imagem de objetos produzidos com utilização de chapas de ágata no SENAI – RS em Soledade [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 (Figura 12).



Figura 12: Imagem de objetos produzidos com utilização de chapas de ágata SENAI-RS em Soledade [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 (Figura 13).

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.



Figura 13: Chapas tingidas – etapa de secagem [Fotografia de Álvaro Scur].

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 (Figura 14), metalização de cristais e outros.

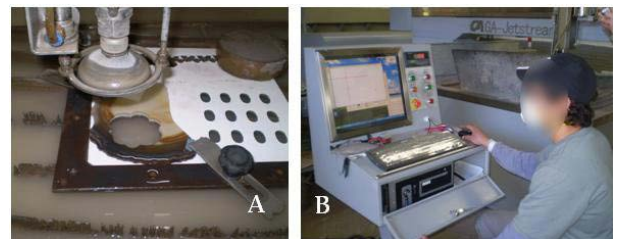


Figura 14: Em A) Equipamento para corte de chapa de ágata por jato d’água, em B) operador controlando o processo por computador.

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.

#### 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL REALIZADA

A seguir é descrita a metodologia experimental adotada durante os ensaios de usinagem convencional e não convencional (corte por jato d'água), os quais foram executados em ágata. Primeiramente será mostrado o aparato experimental utilizado, seguido das espessuras e formas de chapas de ágata que foram testadas durante o processo de corte por jato d'água. O objetivo destes experimentos é verificar quais as possibilidades e ou configurações geométricas possíveis de ser produzidas e qual é a ferramenta tecnológica mais adequada (usinagem convencional ou não convencional).

##### 4.1 Usinagem convencional CNC

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) (Figura 15). 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).

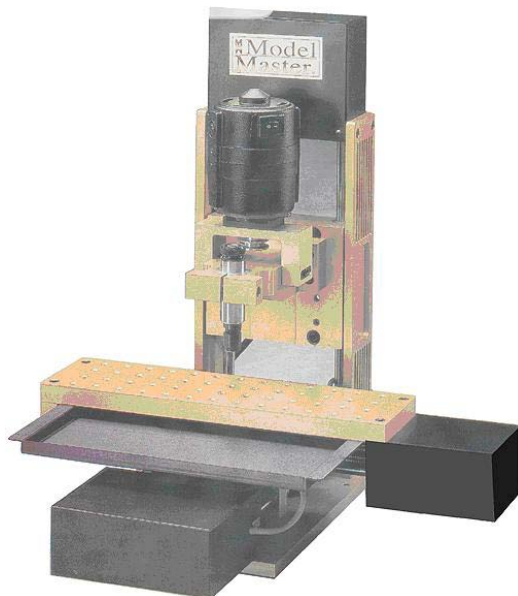


Figura 15: Equipamento para usinagem convencional CNC, Model Master.

Os parâmetros de operação 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 experimento foi realizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

##### 4.2 Usinagem não convencional por jato d'água com abrasivos

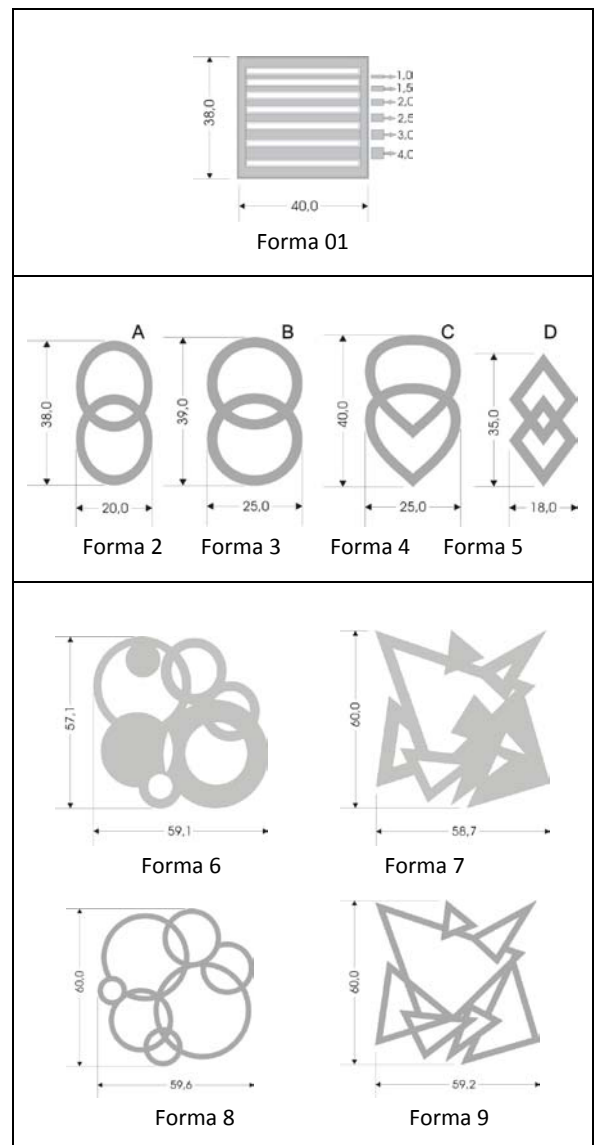
Os ensaios seguintes a tecnologia usada foi de corte por jato d'água com abrasivos, foram feitos com ágata, em chapas de espessuras variadas. Foi utilizado o equipamento da marca Jetstream CNC (Figura 16). No trabalho foi utilizado jato d'água de alta pressão por volta de 390 MPa, enquanto que a máquina funciona com 30 CV de potência e dois pistões

hidráulicos. Estes experimentos foram realizados em Gaurama, RS, na empresa Belapedra.



Figura 16: Equipamento para usinagem por jato d'água CNC da marca Jetstream.

Tabela 1: Formas geométricas utilizadas nos ensaios de corte por jato d'água.



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. A ponta de safira é substituída a cada 50 horas de uso. Após a saída da água

são agregadas ao fluxo finas partículas abrasivas, com tamanho de grão 0,3 mm. O jato de água cortante de diâmetro de 1,2 mm é utilizado para espessuras de chapas de ágata de aproximadamente 5 mm.

#### 4.2.1 Espessuras das chapas de ágata

O objetivo de variar a espessura das chapas de ágata é estabelecer uma espessura mínima para que o produto final não apresentasse peso excessivo e por outro lado não fosse frágil demais, tendendo à quebra. As espessuras experimentadas foram 5; 4,5; 4,0; 3,5 e 2,5 mm. As chapas ensaiadas não estavam lixadas e nem polidas.

#### 4.2.2 Formas usinadas

Nove formas foram desenvolvidas para os ensaios, as quais estão mostradas na Tabela 1.

A primeira forma foi projetada a partir de formas geométricas simples, no caso o retângulo, que envolve o corte retilíneo (forma 1 da Tabela 1). Para os ensaios seguintes, foram desenvolvidas formas de complexidade média (formas 2 a 5 da Tabela 1) e de maior complexidade, envolvendo cortes arredondados e em formato de triângulos de ângulos variados (formas 6 a 9 da Tabela 1).

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Abrangem os ensaios com usinagem CNC convencional e não convencional.

### 5.1 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 (Figura 17). O tempo de duração do ensaio foi de 2 horas.



Figura 17: Ensaio de usinagem convencional. Em A) Chapa de ágata com espessura de 3,0 mm, mostrando a trajetória do desbaste (pontilhado) e em B) ferramenta diamantada.

### 5.2 Usinagem não convencional por jato d'água

Foram executados um total de 23 ensaios, variando a espessura de chapa, largura das linhas e também a geometria, conforme as formas mostradas no capítulo 4.2.2. As chapas de ágata utilizadas nos ensaios foram apenas serradas, sem terem sido submetidas a processos de lixamento 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.

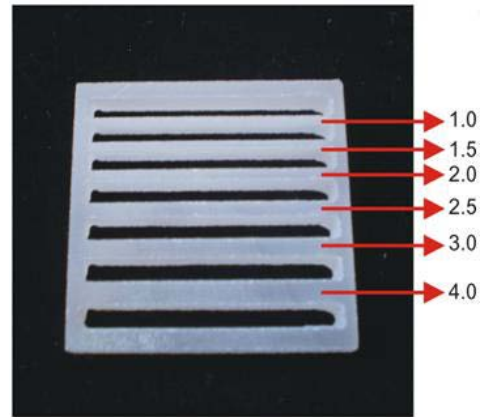


Figura 18: Usinagem de chapa de espessura 5mm (forma 01): resultado satisfatório.

No primeiro ensaio foi utilizada uma chapa de 5,0 mm de espessura e com 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 quais as possibilidades de usinagem do material em diferentes larguras de linhas. O tempo de ensaio de corte foi de 3:30 minutos. A chapa de ágata ensaiada, de 5mm de espessura, não lascou e nem quebrou nem mesmo nas larguras mais finas, tendo portanto um resultado satisfatório para todas as larguras (Figura 18).

No segundo ensaio, a espessura da chapa utilizada foi de 4,5 mm. Nesta situação, a linha com largura de 1,0 mm lascou, apresentando irregularidades em sua superfície, enquanto as demais espessuras apresentaram resultado satisfatório (Figura 19).

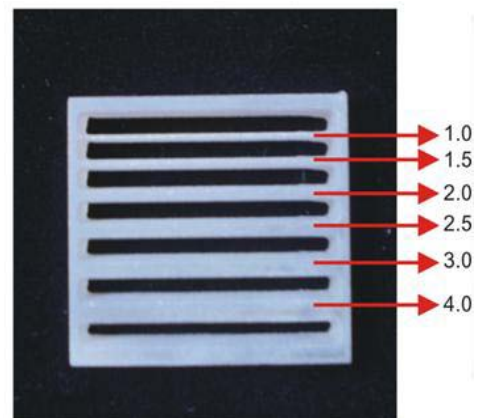


Figura 19: Usinagem de chapa de espessura 4,5 mm (forma 01): resultado satisfatório, exceto para largura de 1mm.

No terceiro ensaio com a forma 01, utilizando chapa de espessura 3,5 mm, as linhas com larguras de 1,0 mm e 1,5 mm apresentaram irregularidades. Já a linha com 2,0 mm de largura apresentou resultado satisfatório assim como as demais 3 larguras (Figura 20).

No quarto ensaio com a forma 01, utilizando chapa de espessura 2,5 mm, a linha de largura 1,0 mm quebrou. As demais larguras de linhas apresentaram irregularidades e defeitos na parte superior das linhas (Figura 21).

Os ensaios de 1 a 4 acima apresentados serviram para definir a espessura de chapa e largura de linha que podem ser



usinadas. Assim, a espessura de chapa de 2,5 mm foi considerada inadequada, assim como as larguras de linha de 1,0 mm e 1,5 mm. A largura mínima satisfatória é portanto de 2 mm, sendo por isso definida para o desenvolvimento dos demais desenhos.

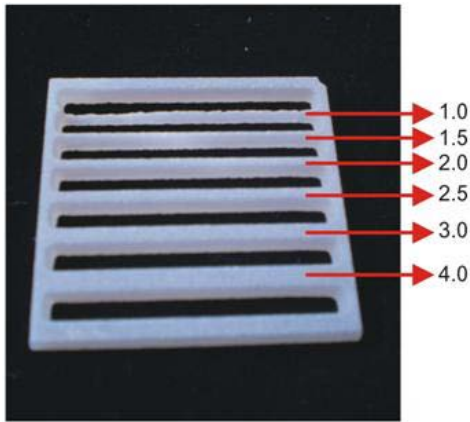


Figura 20: Usinagem de chapa de espessura 3,5 mm (forma 01): resultado satisfatório, exceto larguras 1 e 1.5mm.

Nos ensaios de números 5, 6, 7 e 8 formas vazadas e interpenetradas foram usinadas (Figura 22).

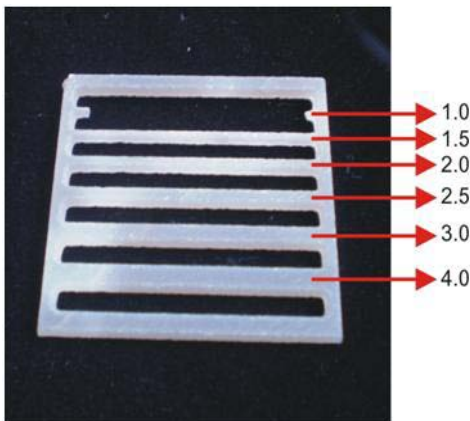


Figura 21: Usinagem de chapa de espessura 2,5 mm (forma 01): resultado insatisfatório.

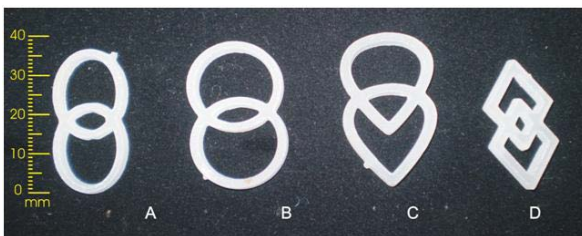


Figura 22: Usinagem de chapa de espessura de 5 mm (Formas 2, 3, 4, 5): resultado satisfatório.

A espessura de chapa utilizada nos ensaios 5, 6, 7 e 8 foi de 5,0 mm enquanto a largura de linha foi de 2 mm.

No quinto ensaio foi utilizada a forma 02, com tamanho de peça 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 utilizado foi 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 utilizado foi 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 foi de 35 x 18 cm e a duração do ensaio foi de 1:50 minutos. Os ensaios 5, 6, 7 e 8 apresentaram resultados satisfatórios.

O nono, décimo, décimo primeiro e décimo segundo ensaios foram realizados com a forma 08 (Figura 23), composta por círculos vazados com largura de linha 2,0 mm. As espessuras de chapas ensaiadas foram de 4,5; 4,0; 3,5; e 2,5, respectivamente. O tempo de operação foi de 6 minutos para cada ensaio. Esses ensaios apresentaram resultado satisfatório.

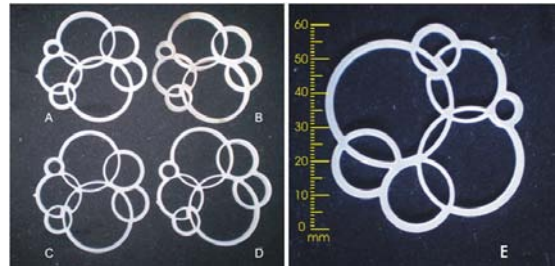


Figura 23: Usinagem de círculos vazados (forma 8). Ensaios com diferentes espessuras de chapas, em (A) 4,0 mm, em (B) 4,5, em (C) 3,5mm e em (D) 2,5 mm. Em (E) peça com régua indicando tamanho.

Nos ensaios números 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 2,5 mm, a peça ensaiada apresentou fragilidade, ocasionando a quebra durante o processo de corte (Figura 24). Resultado que corrobora com os resultados encontrados para formas lineares simples apresentado na Figura 21.

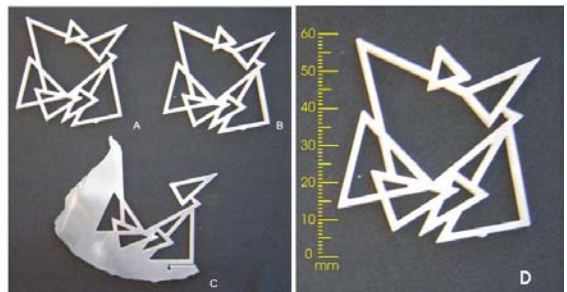


Figura 24: Usinagem de triângulos vazados (forma 09). Em (A) ensaio com espessura de 4,0 mm, em (B) espessura de 3,5, em (C) espessura de 2,5mm. Em (D) peça com régua indicando tamanho.

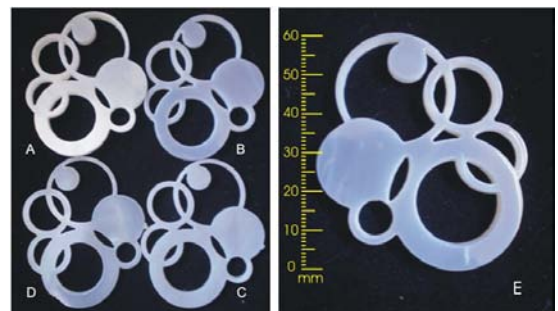


Figura 25: Usinagem de círculos cheios e vazados com larguras de linha variadas (forma 06) em espessuras de chapa variadas, em (A) 5,0 mm, em (B) 4,5mm, em (C) 3,5 e em (D) 2,5mm. Em (E) peça com régua indicando o tamanho.

Nos ensaios números 16, 17, 18, com a forma 06, composta por círculos cheios e vazados e 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 pode ocasionar a quebra da peça (Figura 25). A duração destes ensaios foi de 5:00 minutos cada um.

A Figura 26 apresenta uma imagem ampliada da peça rachada.

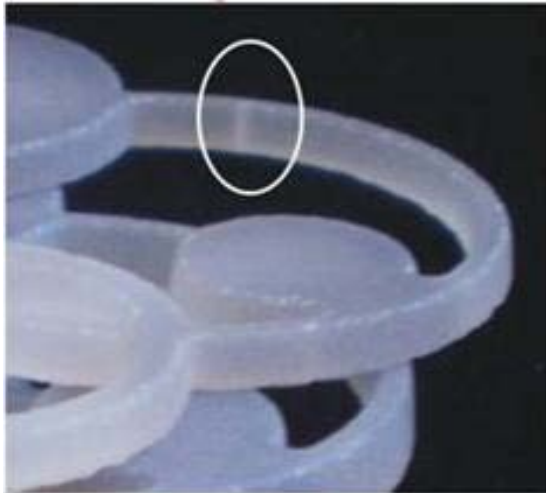


Figura 26: Rachadura apresentada no ensaio de número 19, com chapa de espessura 2,5 mm.

Os ensaios 20, 21, 22 e 23 foram usinados de acordo com a forma 07, composta por triângulos cheios e vazados com diferentes espessuras de linhas. As espessuras de chapas ensaiadas foram 5,0; 4,5; 3,5 e 2,5 mm que equivalem, respectivamente, aos ensaios 20, 21, 22 e 23. Esses ensaios apresentaram resultado satisfatório para todas as espessuras de chapa ensaiadas (Figura 27). A duração do processo de usinagem para essa forma foi de 4:26 minutos cada um.

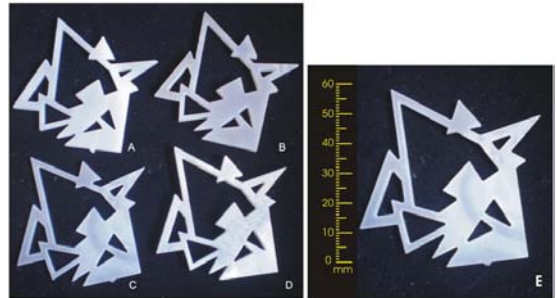











Figura 27: Usinagem de geometria composta por triângulos cheios e vazados com larguras de linha variadas (Forma 07). Espessuras de chapa variadas, em (A) 5,0 mm, em (B) 4,5mm, em (C) 3,5mm e em (D) 2,5mm. Em (E) peça com régua indicando o tamanho.

Quadro 1: Quadro resumo dos ensaios de usinagem não convencional por jato d'água.

ENSAIO	FORMA	ESPESSURA	FORMA	RESULTADO	TEMPO	
01	Forma 01	5,0 mm	Simples linear Larguras de 1; 1.5, 2, 2.5, 3 e 4mm.		3:30 min	
02		4,5 mm				Satisfatório
03		3,5 mm				Satisfatório, exceto largura de 1mm
04		2,5 mm				Satisfatório, exceto larguras 1 e 1.5mm
05	Forma 02	5,0 mm	Complexidade média – ovais Largura 2mm		Satisfatório	2:00 min
06	Forma 03	5,0 mm	Complexidade média – círculos Largura 2mm		Satisfatório	2:00 min
07	Forma 04	5,0 mm	Complexidade média – gota Largura 2mm		Satisfatório	2:00 min
08	Forma 05	5,0 mm	Complexidade média – losangos Largura 2mm		Satisfatório	1:50 min
09	Forma 08	4,5 mm	Complexa círculos vazados Largura de 2mm		Satisfatório	6:00 min
10		4,0 mm			Satisfatório	
11		3,5 mm			Satisfatório	
12		2,5 mm			Satisfatório	
13	Forma 09	4,0 mm	Complexa Triângulos vazados. Largura de 2mm		Satisfatório	5:30 min
14		3,5 mm			Satisfatório	
15		2,5 mm			Insatisfatório	
16	Forma 06	5,0 mm	Complexa círculos cheio, vazado. Larguras diversas		Satisfatório	5:00 min
17		4,5 mm			Satisfatório	
18		3,5 mm			Satisfatório	
19		2,5 mm			Insatisfatório	
20	Forma 07	5,0 mm	Complexa triângulos		Satisfatório	

21	4,5 mm	cheio, vazado. Larguras diversas	Satisfatório	4:26 min
22	3,5 mm		Satisfatório	
23	2,5 mm		Satisfatório	

O quadro 1 mostra, de forma sistemática, os 23 ensaios realizados, relacionando formas, espessura, tempos e os resultados.

## 6. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Sobre formatos complexos do ponto de vista de relevos em 3d, sabe-se que o processo de usinagem convencional CNC pode proporcionar uma maior complexidade. Por isso, esse processo é muito utilizado para confecção de camafeus, ainda que com as desvantagens relacionadas ao tempo demasiadamente extenso e o desgaste de ferramentas. Porém, para as geometrias e condições ensaiadas neste trabalho, não se obteve êxito através deste processo, uma vez que a ferramenta apresentou desgaste excessivo já na primeira usinagem. Dessa forma, não foi possível estabelecer uma comparação direta entre os 2 processos.

Durante o processo de corte por jato d'água, os tempos dos ensaios entre as formas com extremos pontiagudos (compostas por triângulos) foram significativamente menor do que os tempos de usinagem para as formas com extremos arredondados (compostas por círculos), especialmente para as peças com formas complexas (ensaios 9 ao 23).

Embora o processo de usinagem por jato d'água permita cortes em formas complexas, existem limitações por tratar-se de um corte por feixe "passante" que não permite desbastes. Além disso, esse processo possui uma espessura de chapa e largura mínimas permitidas de serem fabricadas. O presente trabalho mostrou resultados satisfatórios para a espessura de chapa de 2,5mm, como nos ensaios 12 e 23, porém insatisfatório para os ensaios 4, 15 e 19. Isso leva a conclusão de que a espessura mínima de chapa possível de ser usinada por esse processo é de 3,5mm. Quanto à largura mínima de linha, os testes 1, 2, 3 e 4, realizados com a forma 01, serviram para definir esse parâmetro. Assim, como as larguras de 1mm e/ou de 1,5mm apresentaram irregularidades ou quebras durante alguns ensaios (como em 2, 3 e 4) a largura mínima de linha ficou definida em 2mm. Com base neste resultado, os demais ensaios (do 5 ao 23) utilizaram esse parâmetro para usinagem pelo processo de corte por jato d'água.

## 7. 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 gemos 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.

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. 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.

Através da metodologia aplicada nos ensaios pode-se afirmar que no processo de corte por jato d'água, a largura de linha mínima permitida é de 2,0 mm e pode ainda ser realizada com larguras maiores.

Pode-se afirmar que a tecnologia estudada é aplicável ao material ágata ampliando possibilidades de realizar cortes em formas complexas.

## REFERÊNCIAS

- [1]. COSTA, M. *Beneficiamento de Pedras Preciosas no Vale do Taquari – Diagnóstico e Modelo para Análise e Redução de Perdas nos Processos Produtivos*. 2007. 130p. Dissertação (Mestrado em engenharia), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [2]. FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1986, 751 p.
- [3]. GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes and systems*. Prentice Hall, 1996.
- [4]. HALL, K. *Pedras Preciosas: um guia ilustrado com mais de 130 variedades de gemas*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.
- [5]. IBGM - Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC); Políticas e Ações para a Cadeia Produtiva de Gemas e Jóias. Brasília: Brisa, 2005.
- [6]. JUCHEM, P.L., BRUM, T.M.M., FISCHER A. C., LICCARDO A.: CHODUR, N. L. *Potencial Gemológico da Região Sul do Brasil. I Seminário Sobre Design e Gemologia de Pedras, Gemas e Jóias do RS*. UPF Editora. Soledade, 2009.
- [7]. LAMACHIA, F. *Pedras preciosas do Brasil*. São Paulo: Editora do Autor, 2006.
- [8]. SCHUMANN, W. *Gemas do Mundo*. São Paulo: Disal, 2006, 279 p.
- [9]. TESSMANN, C. S. *Importância do Binômio Design e Engenharia no Beneficiamento de Regeito Mineral de Opala e Ágata na Produção de Camafeus por Usinagem CNC*. 2009. 109p. Dissertação (Mestrado em Design), Progra-

ma de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.