

REVISÃO DA METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE MATÉRIA-PRIMA PARA IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL

METODOLOGY REVIEW FOR DEVELOPMENT OF THREE-DIMENSIONAL PRINTING RAW MATERIAL

Carlos Edmundo A. L. Ipar^{1,2}, Fernanda S. Vilasboas¹, Jéssica C. Bisinella¹, Ney F. Ferreira², Juliano T. Silva¹
¹Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul, Universidade de Passo Fundo – Campus Soledade, UPF.

E-mail: ipar@upf.br; fernandavilasboas@gmail.com; 117095@upf.br; tonezer@upf.br

² Programa de Pós-Graduação em Design e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. E-mail: neyferr@gmail.com

RESUMO

As indústrias de beneficiamento de pedras preciosas de Soledade/RS e região geram, em seus processos de beneficiamento, grande quantidade de rejeitos gemológicos, que acabam sendo depositados nos pátios das empresas, podendo causar danos ao meio ambiente. A gema de maior volume de beneficiamento na região é a ágata. Este trabalho tem como objetivo efetuar a reutilização de rejeitos oriundos do beneficiamento da ágata e transformá-los em matéria-prima para a fabricação via impressão tridimensional a jato de tinta (3DP). Um dos objetivos do presente estudo é efetuar a moagem destes rejeitos, transformando em material pulverulento (pó) de tamanho e formato adequado ao processo para desenvolver uma formulação de matéria-prima que permita a fabricação de artefatos cerâmicos 3D. Para isso, deve-se efetuar a formulação do pó, a seleção do método de aglutinação, formulação do líquido de deposição, testes de interação pó-aglutinante e escolha dos processos de pós-processamento.

Palavras-chaves: Impressão tridimensional; pedras preciosas; desenvolvimento de matéria-prima.

ABSTRACT

The gem processing industries of Soledade/RS and region generate a large amount of waste, which is eventually deposited in the companies' yards and may damage the environment. The gem with largest volume of processing in the region is agate. This work aims to process and reuse of wastes of agate as raw materials for inkjet three-dimensional printing (3DP). Thus, we intend to grind the waste into a powdery material (powder), with size and shape suitable for the process, to formulate a raw material that allows the fabrication of 3D ceramic artifacts. To do this, it is necessary to make the powder formulation, the selection of agglutination method, formulation of the liquid deposition, interaction tests of powder binder and the evaluation of post-processing techniques.

Keywords: Three-dimensional printing, gems, development of raw material.

1. INTRODUÇÃO

O setor de Gemas e Joias, dentro de seu processo de extração e beneficiamento, acaba gerando quantidade expressiva de resíduos sólidos, principalmente na forma de refugos, peças semi-acabadas, pouco beneficiadas, que por conterem impurezas, defeitos de formação e fabricação possuem valor comercial baixo. Estes resíduos são armazenados e acabam formando grandes pilhas de rejeitos de dezenas de toneladas nos pátios das empresas, como pode ser observado na Figura 1.



Figura 1: Pilha de rejeitos em empresa de Pedras Preciosas de Soledade/RS.

Desta forma, vislumbram-se alternativas que buscam solucionar alguns dos problemas enfrentados hoje pela indústria de gemas e joias, promovendo o aproveitamento de rejeito gerado e a possibilidade de agregar valor econômico-social, de forma ambientalmente correta. Uma dessas alternativas é a moagem desses rejeitos para aplicação na impressão 3D de artefatos cerâmicos. Além disso, pequenos refugos podem ser reaproveitados para este fim, desde que seja possível efetuar a sua redução a um estado pulverulento.

A utilização deste material, abundante na região de Soledade/RS, pode ser visualizada como uma boa alternativa, aliando o reaproveitamento de material considerado descartável com a popularização da utilização da Prototipagem Rápida (PR), possibilitando a redução dos custos de matéria-prima e criando alternativas de mercado. A fabricação de artefatos e protótipos utilizando rejeitos da indústria de pedras preciosas pode viabilizar o surgimento de um novo segmento de mercado, com o surgimento de produtos diferenciados e com impacto de apelo ambiental. Ainda, se a utilização destes rejeitos como matéria-prima para o sistema 3DP se mostrar economicamente viável, pode beneficiar a utilização desta tecnologia por outros setores da indústria, aumentando o consumo de pó e reduzindo o impacto ambiental associado aos rejeitos.

Em virtude desses fatos, a Universidade de Passo Fundo (UPF), através do Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul (CT Pedras) e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), através do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) e o Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE), submeteram e obtiveram aprovação do projeto “Moagem de rejeitos da Indústria de Beneficiamento de Pedras Preciosas para aplicação na indústria cerâmica, construção civil e impressão 3D de artefatos cerâmicos”, no Edital MCT/CT-Mineral/VALE/CNPq n° 12/2009. Este trabalho faz parte de uma das linhas de pesquisa deste projeto, referente à Impressão 3D de artefatos cerâmicos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção são abordados os referenciais teóricos utilizados na elaboração do trabalho. Inicialmente apresenta-se uma breve descrição do processo de beneficiamento de ágatas e dos rejeitos gemológicos resultantes deste processo. Em seguida, apresenta-se a tecnologia de Prototipagem Rápida e o sistema de Impressão Tridimensional via jato de tinta. Por fim, descreve-se a metodologia de desenvolvimento de novos sistemas de matéria-prima para impressão 3D, utilizada para a sequência do trabalho.

2.1 Beneficiamento de ágatas

O beneficiamento de Pedras Preciosas constitui uma importante parcela da economia de diversos municípios gaúchos. Destaca-se a cidade de Soledade-RS, município de cerca de 30.000 habitantes, que possui cerca de 180 empresas atuando no setor, em sua grande maioria micro e pequenas empresas (Martins, 2009).

A principal gema beneficiada no município é a Ágata. Os processos de beneficiamento realizados por estas micro e pequenas empresas e por profissionais autônomos são geralmente primários, tais como: corte e lapidação dos geodos, martelação das pedras, artesanato mineral e fabricação de artefatos de baixa complexidade (Costa, 2009). Este contexto envolve várias etapas e pormenores, que se estendem desde a extração ou compra da matéria-prima até a obtenção do produto manufaturado e sua comercialização. Os processos podem variar conforme o tipo ou qualidade da pedra, mas geralmente envolvem etapas pré-definidas, como corte, tingimento, lixamento e polimento (Figura 2 a), utilizando-se do maquinário já instalado (Costenaro, 2005). Alguns produtos fabricados em ágatas podem ser visualizados na Figura 2 b.



Figura 2: Etapas do beneficiamento e artefatos confeccionados em ágatas.

A linha de produtos comercializados é bastante variada, mas geralmente possuem baixa complexidade, e baixo grau de inovação tecnológica (Tessman, 2009). As atividades de beneficiamento (processos) não evoluíram com o passar dos anos e os produtos resultantes possuem acabamento e qualidade questionáveis (Costenaro, 2005) sendo necessária a inserção de novas tecnologias para a melhoria dos processos produtivos.

2.2 Rejeitos gemológicos

Durante as etapas do beneficiamento e a confecção de artefatos, existe uma grande quantidade de material perdido ou rejeitado em virtude de sua baixa qualidade ou defeitos inerentes ao processo e a estrutura de formação do material. O objetivo deste trabalho é efetuar a formulação da matéria-prima a partir dos rejeitos gemológicos oriundos do beneficiamento de ágatas, sobretudo pedaços trincados e quebrados de pequeno tamanho (Figura 3). Estes rejeitos poderão vir de qualquer dos processos de beneficiamento, tanto do corte de chapas, lixamento, polimento e beneficiamento posterior, como corte de formar e recorte com jato d'água.

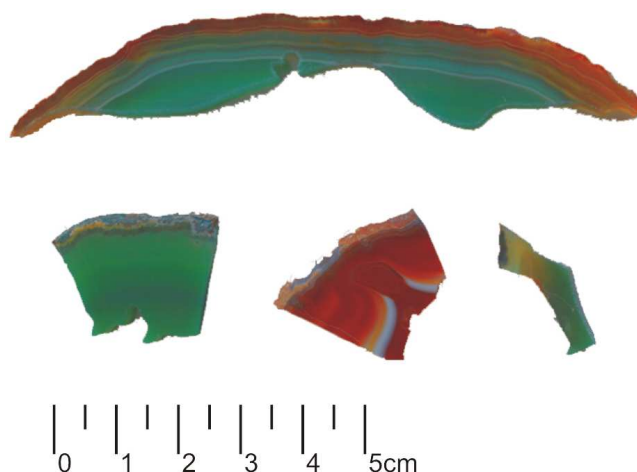


Figura 3 - Rejeitos gemológicos de ágata.

Podem ser encontrados rejeitos totalmente brutos, classificados ainda no garimpo e que estão livres de qualquer contaminação com produtos químicos. Rejeitos oriundos das etapas de corte, lixamento e polimento podem conter óleo (utilizado na lubrificação e refrigeração do processo de corte) e grãos abrasivos que se desprendem das ferramentas. Porém, o maior nível de contaminação deve ser encontrado em rejeitos tingidos, pois diferentes cores são obtidas através de processos diferenciados, sendo expostos a produtos químicos e temperaturas elevadas por diferentes períodos de tempo (Laimer, 2008). O Quadro 1 mostra um resumo desta classificação.

Quadro 1: Classificação dos rejeitos gemológicos.

Processo	Tipo de rejeito	Possíveis contaminantes	Imagem
Extração	Lascas e pedaços de baixa qualidade, pontas	Não possui	
Corte	Cascas, pedaços trincados, sobras, quebrados	Óleo lubrificante	

Quadro: Classificação dos rejeitos gemológicos (Continuação).

Processo	Tipo de rejeito	Possíveis contaminantes	Imagem
Lixamento	Peças trincadas e quebradas	Carbureto de silício, pó de esmeril e outros abrasivos	
Polimento	Peças trincadas e quebradas	Trípoli e outros abrasivos	
Tingimento	Peças defeituosas, trincadas e quebradas	Produtos químicos diversos	
Corte a jato de água	Negativos, rebarbos, sobras	Abrasivo de corte (granada)	

A partir desta classificação, os rejeitos serão separados para a moagem posterior (seção 3.2).

2.3 Prototipagem rápida

A Prototipagem Rápida (PR) pode ser definida como um processo de adição de material através da sobreposição de camadas planas sucessivas, obtidas previamente através de um processo de “fatiamiento” de um modelo tridimensional projetado via CAD (Volpato et al., 2007). Mesmo com tantas tecnologias diferentes, todos os sistemas de PR baseiam-se no princípio de manufatura por camada, ou seja, a máquina divide o modelo geométrico 3D do objeto em camadas paralelas equidistantes entre si, e produz o objeto sólido a partir da adição e sobreposição sucessiva dessas camadas (Figura 4).

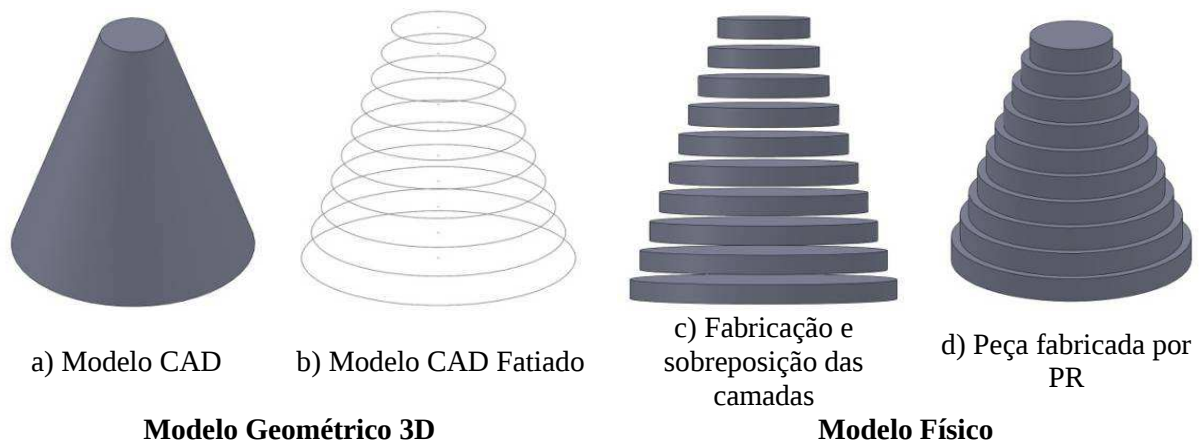


Figura 4 - Princípio básico de funcionamento da Prototipagem Rápida. (Adaptado de Volpato, et al. 2007).

Existem atualmente mais de 20 tipos diferentes de sistemas de prototipagem rápida, sendo que a principal diferença entre eles é o estado inicial da matéria-prima utilizada para fabricação: Líquido, Sólido e Pó. (Chua et al., 2003). Os sistemas de prototipagem rápida baseados em líquido e sólido utilizam-se de laser, ferramentas de corte e aquecimento para efetuar a construção das peças (Volpato et al., 2007), o que limita a utilização de certos materiais, inclusive a ágata. Já o sistema 3DP utiliza pó, ligado através de um líquido aglutinante (Z Corporation., 2007), que possibilita a utilização de qualquer material transformado em pó (Volpato et al., 2007).

2.3.1 Sistema de Impressão Tridimensional – 3DP

Este sistema de PR foi desenvolvido em 1995, no MIT (Massachusetts Institute of Technology) nos Estados Unidos. O primeiro equipamento foi comercializado em 1996 (Z Corporation, 2007), sendo que um equipamento semelhante foi adquirido pelo CT-Pedras em 2010 e está sendo utilizado na pesquisa.

O sistema 3DP utiliza matéria-prima em forma de pó. Consiste em uma ferramenta para fabricação digital direta, em que um aglutinante é depositado (através de um cabeçote de impressão a jato de tinta convencional) sobre uma cama contendo matéria-prima (pó), a partir de um modelo CAD previamente fatiado e sem a intervenção de energia laser (Utela et al., 2009). O esquema do processo 3DP está demonstrado na Figura 5.

No sistema 3DP, existem dois compartimentos, um de alimentação de matéria-prima e outro de construção. O pó é transportado da alimentação e é espelhado sobre a plataforma de construção da máquina através de um rolo de nivelamento. Em seguida, um cabeçote deposita um material aglutinante sobre a camada, correspondente à curva de nível gerada pelo fatiamento. Após, o compartimento de construção se abaixa e uma nova camada é depositada, sendo que o processo se repete até que toda a peça esteja construída. Este sistema não necessita de estruturas de suporte, pois o próprio pó não aglutinado confere sustentação à peça (Z Corporation, 2007).

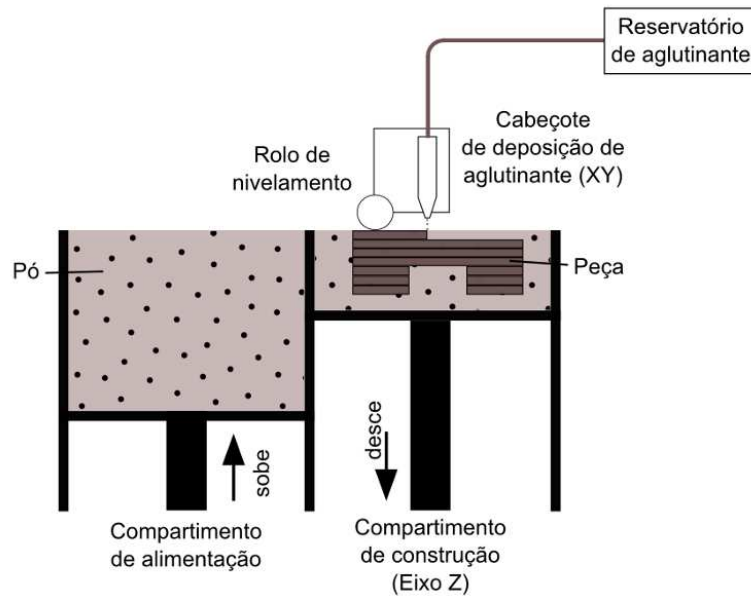


Figura 5 - Esquema do processo de 3DP (Adaptado de Volpato, et al. 2007).

O sistema 3DP é o processo de PR mais rápido disponível no mercado (Chua et al., 2003). Outros benefícios citados por Volpato, et. al. [6] e Chua, et al. [7] são: não utilizar laser, não necessitar de suportes, a reutilização completa da matéria-prima e a possibilidade de fabricar peças em cores nos modelos mais avançados. Além disso, a principal vantagem do sistema 3DP é a capacidade de aproveitar o trabalho de outras áreas tecnológicas e adaptá-las com sucesso, principalmente quanto a utilização de materiais metálicos e cerâmicos (Utela et al., 2009). A Figura 6 mostra algumas peças fabricadas com o sistema 3DP.



Figura 6 - Peças fabricadas utilizando o sistema 3DP.

Quanto às limitações do equipamento, pode-se citar o limite da funcionalidade das peças, o acabamento superficial poroso, a pouca diversidade de matérias-primas disponíveis e o seu alto custo (Volpato et al., 2007 & Utela et al., 2009). Apesar disso, este sistema proporciona uma potencialidade singular de desenvolvimento de novas matérias primas (Utela et al., 2009), pois o principal pré-requisito para um material ser utilizado como base é a sua capacidade de ser transformado em pó, característica fundamental para a execução deste trabalho.

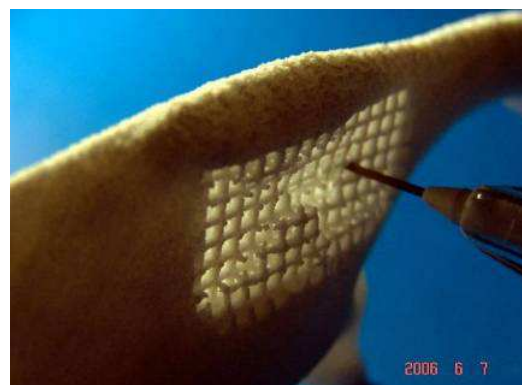
2.4 Desenvolvimento de sistemas de matérias-primas para impressão 3D

O sistema 3DP disponível no CT-Pedras é equipamento Z310 plus, fabricado pela empresa norte-americana Z Corporation®. O fabricante disponibiliza algumas opções de matérias-primas, para as mais variadas aplicações. Dentre estas, destaca-se uma formulação de matéria-prima a base de gesso, utilizada para a produção de modelos conceituais, uma formulação a base de amido, para utilização em processo de Fundição por Cera Perdida (Investment Casting), uma formulação polimérica que dá ao modelo impresso uma aparência emborrachada e uma formulação utilizada para a fundição direta de metais (Z Corporation, 2007).

Porém, mesmo com toda essa gama de combinações disponíveis, algumas aplicações mais específicas, que poderiam se utilizar desta tecnologia, não são totalmente atendidas pelos materiais fornecidos pelo fabricante, além de ter custo elevado (sobretudo no Brasil, devido às tarifas e impostos). Estes fatores impulsionam a pesquisa e o desenvolvimento de novas formulações de matérias-primas, possibilitando a aplicação desta tecnologia não só associada ao desenvolvimento de produtos, mas também atendendo a outros segmentos, sobretudo artes plásticas (Balistreri, 2010) e medicina (Oliveira, 2007) (Figura 7).



Objetos cerâmicos para artes plásticas fabricados por Balistreri



Scaffolds fabricados em nylon por Oliveira

Figura 7: Aplicações de objetos fabricados via prototipagem rápida.

Segundo Utela, et al (2010), o desenvolvimento de matérias primas customizadas para o sistema 3DP envolve um elevado número de variáveis. Este desenvolvimento pode significar um grande desafio, dado as numerosas decisões que devem ser tomadas acerca de materiais, aglutinantes, impressão e pós-processamento. Neste mesmo trabalho, também foi descrita uma metodologia para o desenvolvimento de matérias-primas para 3DP, onde descreve que este desenvolvimento requer que sejam efetuadas as seguintes etapas:

- Definição das características finais da peça;
- Formulação do pó;
- Seleção do método de aglutinação;
- Formulação do líquido de deposição;
- Interação pó-aglutinante;
- Pós-processamento.

Ainda, algumas destas etapas antes descritas contém sub-etapas e propriedades que devem ser levadas em conta durante o processo de desenvolvimento. Estas etapas propostas por Utela et al., [9] e [12], por terem importância fundamental para este trabalho, serão descritas detalhadamente nas seções a seguir.

2.4.1 *Especificação das características finais da peça*

Esta é uma decisão crucial para que o processo de desenvolvimento seja concluído com sucesso. Nesta etapa se define se a peça final poderá apresentar certo grau de porosidade ou se deve ser totalmente densa, sendo então tomadas decisões quanto ao tamanho das partículas necessárias, métodos de deposição e pós-processamento.

Peças porosas podem ser fabricadas diretamente, sem necessidade de pós-processamento, ou ainda recebendo a infiltração de algum tipo de resina. A segunda importante decisão é a homogeneidade do material, e neste caso, elementos de liga (ponto de fusão mais baixo, por exemplo) podem ser adicionados a formulação do pó, possibilitando o preenchimento das porosidades e contribuindo para o aumento da densidade. Ainda, se o objetivo for obter uma peça de apenas um material, deve-se reduzir o tamanho das partículas a fim de facilitar a sinterização. Estas decisões auxiliam a utilizar materiais e métodos adequados, facilitando os processos e consequentemente evitam-se processos desnecessários e pouco eficientes, como a sinterização a altas temperaturas.

2.4.2 *Formulação do Pó*

A formulação do pó envolve a seleção de materiais, o dimensionamento do tamanho dos grãos, a seleção de usar ou não aditivos com o pó e o método de deposição do pó, além de testes para o aperfeiçoamento da peça. Logo após a impressão, o corpo verde possui seu volume composto por: de 30-75% de pó, 10% de aglutinante e o restante de espaços vazios.

A depositabilidade – capacidade de ser depositado em camadas - é a propriedade mais importante do pó, e é influenciada diretamente pelo tamanho e formato das partículas. Pode ser efetuada com este molhado ou seco, dependendo do tamanho das partículas. Para grãos de 20 μ m ou maiores, utiliza-se pó no estado seco. Partículas menores que 5 μ m podem ser depositadas secas ou molhadas. Pós menores que 1 μ m podem se ligar por forças de Van der Waals, e a deposição mecânica não é adequada. A forma da partícula é menos importante que o seu tamanho, mas formatos esféricos têm uma aderência melhor na forma seca, possuindo baixo atrito interno.

Combinações de pós de diferentes tamanhos podem ser utilizados para aumentar a densidade do corpo verde, pois as partículas menores se colocam nos interstícios dos maiores. Aditivos podem ser adicionados ao pó para melhorar a depositabilidade, comportamento de impressão e pós-processamento e propriedades finais da peça.

Os métodos de deposição de pó são geralmente fixados pelo equipamento de impressão. O objetivo é obter uma deposição e nivelamento suaves, com espessura uniforme no menor tempo possível. Deposições a seco são preferidas por serem mais simples e rápidas. A espessura de cada camada espalhada deve ser, pelo menos, 3 (três) vezes maior do que as maiores partículas de pó.

2.4.3 *Seleção do método de aglutinação*

Após a obtenção do pó, é necessário efetuar a seleção do método de aglutinação e a formulação do aglutinante apropriado. O primeiro passo é verificar se existe a necessidade de se desenvolver um novo aglutinante, pois esta é uma etapa que pode dispensar grande tempo.

Existem diversos critérios para selecionar o aglutinante, baseados no local onde o aglutinante é localizado fisicamente no processo, nos resíduos deixados na peça final e nas limitações do material. Quanto à localização do aglutinante, este pode estar presente no líquido depositado pelo cabeçote de impressão ou estar misturado no pó. Aglutinantes totalmente líquidos têm a vantagem de poder ser usados para variados tipos de pó, porém tendem a entupir o cabeçote de impressão mais

frequentemente. Já aglutinantes misturados ao material pulverulento na cama de impressão interagem com o líquido depositado pelo cabeçote de impressão ativando o aglutinante, permitindo a utilização de um líquido inerte.

Quanto ao resíduo deixado pelo aglutinante, este pode deixar completamente a peça após a fabricação (aglutinantes voláteis, como o clorofórmio) ou contribuir com a resistência mecânica final da peça, pela deposição e mistura de materiais estruturais, como nitrato de alumínio.

Quanto às limitações do material, se o aglutinante necessitar passar por um tratamento térmico, deve-se levar em conta de que este tratamento pode afetar a estrutura do material pulverulento, como uma troca de fase, por exemplo.

Existem diversas metodologias de aglutinação disponíveis. O Quadro 02 mostra um resumo destas metodologias, demonstrado por Utela et al. (2010).

Quadro 2 – Metodologias de aglutinação (Adaptado de Utela et. al., 2010).

Metodologia	Características	Exemplo
Ácido-Base	Sistema de dois componentes Liga a maioria dos materiais Decompõe-se termicamente para deixar pouco resíduo	Revestimentos eletrolíticos ácido-básico de polivinila
Hidratação	O pó é ligado quando hidratado Permite o uso de líquidos reologicamente simples O comportamento de ligação pode ser alterado com a adição de catalisadores	Cimentos
Inorgânico	Tipicamente incorporados na peça final Muitas vezes requerem tratamento térmico	Nitrato de Alumínio, Óxido de Alumínio, Sílica Coloidal
Sais de metais	Trabalha com a maioria dos materiais, Três vias de ligação: Recristalização do sal, Redução de sal para depósito de metal, Deslocamento de sal para depósito de metal (material reação específica).	Nitrato de prata, Aço ferramenta com sulfato de cobre
Orgânicos	Liga a maioria dos materiais, decompõe-se termicamente para deixar pouco resíduo	Resina butiral, Resina polimérica, Polivinil, Maltodextrina
Mudança de fase de materiais	Material derrete, penetra no pó, e liga o pó quando re-solidifica Pós-processamento limitado a temperaturas abaixo da temperatura de fusão do material aglutinante	2-methylpropane-2-OL
Solventes	Funciona somente em polímeros Pode ser misturado ao equilíbrio de ligação e secagem características	Clorofórmio liga poliésteres biodegradáveis
Alteração do comportamento térmico do material pulverulento	Seletivamente altera as características térmicas do pó A impressão resulta em um aquecimento não uniforme do pó e posterior fusão controlada / sinterização / aglutinação. Requer uma compreensão completa de material de duas características térmicas	Flocos de metal Tetraetilortossilicato

2.4.4 *Formulação do líquido de deposição*

A mais importante característica do líquido é a confiabilidade de deposição, isto é, o líquido deve ser capaz de ser depositado continuamente. Além disso, o líquido deve ser capaz de penetrar na camada superior e também na camada logo abaixo desta, promovendo assim a aderência entre as camadas. Deve promover uma secagem rápida, a fim de aumentar a taxa de construção de camadas e com isso a velocidade do processo.

Duas características comportamentais do líquido de deposição devem ser testadas e são de fundamental importância. A primeira é a re-hidratação, pois o líquido deve ser facilmente solúvel nele mesmo, a fim de poder dissolver possíveis entupimentos. A segunda tem a ver com a estabilidade do líquido, ou seja, a capacidade deste manter as suas propriedades, como pH, viscosidade e tensão superficial ao longo do tempo.

Interação pó-aglutinante

O próximo passo é verificar como a combinação formulada interage entre si. A peça final deve ser capaz de manter as formas originais quando seca, ter resistência a verde o suficiente para poder ser manuseada e poder ser quebrada, ao invés de apenas ruir. Estas características podem ser verificadas através de alguns testes, descritos a seguir.

A compatibilidade do sistema pode ser verificada através de um teste de bancada realizado fora do equipamento 3DP. Com o auxílio de uma seringa, pode-se depositar manualmente o líquido sobre o pó e observar os efeitos, que devem incluir rápida absorção do líquido e a existência de pequenos seixos de material agregado após a evaporação total do líquido. Outro teste de bancada possível é efetuado misturando manualmente o sistema com diferentes taxas pó-aglutinante, obtendo pequenas barras que podem ser examinadas quando secas. Estas barras são analisadas quanto a sua resistência a verde e capacidade de quebra, a fim de definir a taxa ideal para a impressão.

No equipamento 3DP, são efetuados os testes de impressão. Primeiramente, é necessário verificar a confiabilidade de deposição do líquido, se este consegue dissolver possíveis entupimentos e depositar o líquido nos locais desejados, e que este possa se espalhar e ser absorvido adequadamente. Também, a balística e erosão da deposição devem ser analisadas, pois podem aumentar significativamente a rugosidade superficial da peça impressa.

Após a execução das análises iniciais na cama de impressão, são efetuadas as análises referentes à geração de geometrias pelo cabeçote de deposição. Deve-se começar pelas geometrias mais simples, como blocos e cubos, para posteriormente efetuar testes com geometrias mais complexas, com diversas paredes planas, curvas e canais suspensos. Deve-se analisar também a reprodutibilidades destes através da produção de várias peças ao mesmo tempo, assim como a influência dos eixos de construção.

2.4.5 *Pós-processamento*

Os últimos procedimentos depois de efetuada a impressão da peça é a retirada desta do compartimento de construção do equipamento, a retirada do pó excedente, infiltração e sinterização da peça final. Ainda, podem ser executadas operações de acabamento, como lixamento, pintura e revestimento com outros materiais.

Antes da retirada da peça do compartimento de construção, deve-se esperar um período de tempo determinado (variando para cada material), chamado de pré-cura, que serve para retirar o excesso de umidade da peça fabricada. Esta desumidificação pode ser acelerada com o auxílio de luz visível, aquecimento, vácuo e diferenças de pressão.

A retirada da peça do compartimento de construção é efetuada com auxílio de jatos de ar comprimido e aspiradores de pó. Todo o pó que não recebeu a ativação do aglutinante fica solto no

compartimento, podendo ser facilmente retirado. Peças com poucos detalhes podem ser retiradas manualmente (utilizando os dedos, pincéis e espátulas) com cuidado. Peças mais delicadas e com maior nível de complexidade necessitam de maior cuidado, sendo que geralmente utilizam-se jatos de ar de pouca intensidade e um aspirador de pó. Retirada do compartimento de construção, a peça deve ser levada para a estação de reciclagem, onde o pó excedente é retirado com auxílio de pincéis de maior rigidez e jatos de ar de maior intensidade.

A sinterização pode ser usada para aumentar a resistência mecânica da peça, e consiste no aquecimento da peça a uma determinada temperatura e permanência nesta temperatura por um determinado tempo. Este processo depende das propriedades do material (ou dos materiais) utilizado na formulação do pó, do tamanho e formato das partículas. Estas propriedades influenciam diretamente no tempo e temperatura necessários para a sinterização e variam de acordo com cada material.

A infiltração é a etapa onde um líquido penetra na peça através de suas porosidades, através de capilaridade. A infiltração tem por finalidade aumentar a resistência mecânica da peça, através do preenchimento dos espaços vazios no interior da peça. Podem ser utilizados líquidos infiltrantes de baixa e de alta temperatura, sendo os mais comuns o cianoacrilato de baixíssima viscosidade (para o material a base de gesso) e a cera de baixa temperatura de fusão (material a base de amido).

Operações de acabamento, como lixamento, pintura e revestimento da peça podem ser utilizadas para melhorar / conferir propriedades visuais a esta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A partir dos estudos teórico práticos realizados, é possível iniciar o desenvolvimento da matéria-prima. Para isso, será utilizada a metodologia proposta por Utela et al. (2009 & 2010), modificada por algumas adaptações inerentes as particularidades deste caso.

3.1 Pré-requisitos

O material base utilizado para a formulação será ágata, por ser esta a gema de maior volume de beneficiamento encontrado na região de Soledade e ser o objeto deste estudo.

O método de deposição no estado seco é pre-definido pelo equipamento.

O tamanho das partículas deve ser compatível com a espessura de camada e o método de deposição desejados. Para deposição no estado seco se recomenda utilizar partículas maiores do que 20 μ m. Contudo, o tamanho das partículas não deve exceder 1/3 da espessura da camada desejada, pois isso dificulta a deposição e a homogeneidade da camada. Considerando uma camada de 100 μ m, o tamanho máximo das partículas fica na faixa de 34 μ m, sendo que o tamanho final deve variar entre 20 e 34 μ m.

O formato esférico das partículas facilita a deposição no estado seco, sendo preferido. Após efetuar testes de depositabilidade, será avaliada a necessidade do uso de aditivos.

3.2 Obtenção do pó a partir de rejeitos de ágata

Para reduzir os rejeitos gemológicos a forma de pó, estes necessitam passar por um processo de moagem. Primeiramente, serão quebrados em pedaços menores (aproximadamente 1 centímetro) com auxílio de ferramenta de impacto, para posteriormente passarem por um moinho excêntrico, conhecido como “moinho periquito” (Figura 8). Este moinho é equipado com jarros de 0,5 litros e em seu interior possui diversas esferas (bolas), que são responsáveis pelo esmagamento do material.

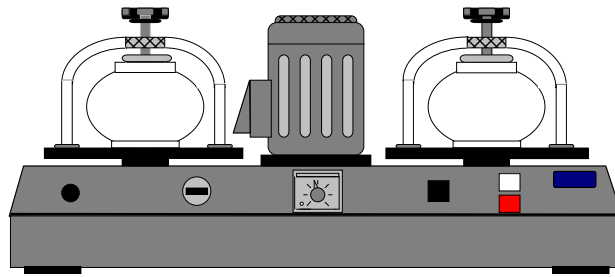


Figura 8 - Moinho de bolas excêntrico tipo periquito.

Após um período de tempo dentro do moinho, o rejeito é peneirado a fim de se obter a granulção desejada. Para obter partículas com tamanho variando entre 20 e 34 μ m é necessário utilizar uma peneira de granulometria 400 mesh (abertura de 38 μ m) podendo ser feita manualmente ou com o auxílio de um peneirador.

3.3 Formulação do sistema de matéria-prima

A formulação do pó envolve a seleção do material, o dimensionamento das partículas, a seleção dos aditivos e do método de deposição. Um resumo da metodologia pode ser visualizado na Figura 9.

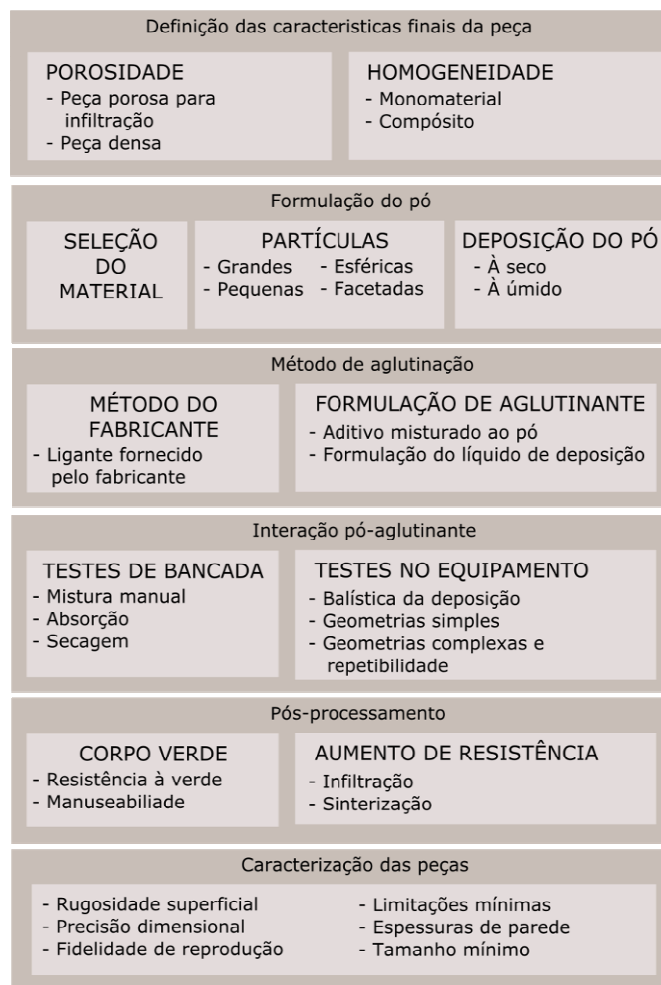


Figura 9 - Metodologia para formulação da matéria-prima.

Quanto às características finais da peça, estas podem apresentar porosidade e não necessitam ser compostas por apenas um material. Já a etapa de formulação do pó coincide com a definição de alguns pré-requisitos, como o material (ágata), o método de deposição (estado seco) e consequentemente o tamanho das partículas (maiores que 20 μm e menores que 34 μm).

Quanto à aglutinação, inicialmente será utilizado o método fornecido pelo fabricante, inclusive com o mesmo líquido de deposição. Em um segundo momento, serão efetuados testes adicionais, principalmente com o uso de aglutinantes orgânicos misturados ao pó (como o PVA e maltodextrina, por exemplo) e ativados pela deposição do líquido, a fim de obter um ligante de menor custo.

A interação entre o pó e o aglutinante será inicialmente testada através de mistura manual em testes de bancada, onde serão observadas propriedades como a absorção e secagem do líquido de deposição e a taxa de mistura aproximada. Posteriormente serão efetuados testes no equipamento, a fim de verificar os efeitos balísticos da queda do líquido na cama de impressão, assim como parâmetros relativos a absorção, secagem e taxa de deposição do líquido de deposição. Testes de construção de geometrias simples e complexas servirão de bases para as análises subsequentes.

Durante o pós-processamento será avaliado se a resistência a verde da peça confere auto-sustentação (para a peça não ruir com o seu próprio peso) e ainda se permite sua manipulação sem deformações ou quebras. Caso necessário, serão utilizados mecanismos de aumento de resistência, como a infiltração e sinterização.

Por fim, será efetuada a caracterização das peças fabricadas com o uso desta matéria-prima, medindo a resistência mecânica, acabamento superficial e precisão dimensional. Ainda, serão efetuados testes que permitam identificar as limitações mínimas, como tamanho mínimo das peças construídas e espessura de parede mínima.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O município de Soledade/RS depende economicamente das atividades de beneficiamento de pedras preciosas, e possui papel fundamental sobre a participação gaúcha e brasileira no mercado mundial. Contudo, os processos de beneficiamento utilizados atualmente necessitam da inserção de tecnologia necessária para o aumento da produtividade e qualidade de seus produtos.

A utilização da PR pode beneficiar o setor como um todo, desde a criação de novos produtos como no reaproveitamento de rejeitos, agregando valor a materiais gemológicos antes desvalorizados.

No ponto de vista ambiental, a utilização de rejeitos sólidos não aproveitados pelo setor pode auxiliar o setor a encontrar o caminho para o desenvolvimento sustentável, conferindo ao setor uma nova gama de produtos, diversificando o mercado atual e proporcionando a geração de emprego e renda.

Espera-se, que ao final desta pesquisa, seja possível fabricar produtos no sistema 3DP, utilizando rejeitos de pedras preciosas, de qualidade semelhante aos obtidos com o uso da matéria-prima fornecida pelo fabricante do equipamento.

Agradecimentos

Aos órgãos financiadores, CNPq, MCT e Fundo Setorial Mineral (CT-Mineral), que através do Edital MCT/CT-Mineral/VALE/CNPq nº 12/2009 por disponibilizar os recursos financeiros necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BALISTRERI, John. Neocubic and Geocubic. <http://johnbalistreriartist.com>. Acesso em: 08/11/2010.
- CHUA ,C. K. LEONG, K. F. LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 2nd Edition. Singapore. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2003.
- COSTA, Manfred. Beneficiamento de Pedras Preciosas no Vale do Taquari – Diagnóstico e Modelo para Análise e Redução de Perdas nos Processos Produtivos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.
- COSTENARO, Alessandra. Indústrias de Pedras Preciosas: Um Estudo dos Fatores Competitivos em Empresas de Soledade-RS. Programa de Pós Graduação em Administração, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.
- LAIMER, Viviane R. Avaliação do Desempenho Ambiental das Empresas Associadas ao Sindipedras de Soledade-RS. Programa de Pós Graduação em Engenharia. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2008.
- MARTINS, Montserrat. S. Diagnóstico Operacional das Empresas Beneficiadoras de Pedras de Soledade/RS. Soledade/RS. Relatório da Disciplina Estágio Curricular do Curso de Engenharia Mecânica da UFSM. 2009.
- OLIVEIRA, M.F., MAIA, I.A., NORITOMI,P.Y., et al. “Construção de Scaffolds para engenharia tecidual utilizando prototipagem rápida”. Revista Matéria, v. 12, n. 2, pp. 373-382, 2007.
- TESSMAN, Camila S. Importância do Binômio Design e Engenharia no Beneficiamento de Rejeito Mineral de Opala e Ágata na Produção de Camafeus por Usinagem CNC. Programa de Pós Graduação em Design e Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.
- UTELA, B. STORTI, D. ANDERSON, et al. “A review of process development for new material systems in three dimensional printing (3DP)”. Journal of Manufacturing Processes. v.10 pp 96-104, 2009.
- UTELA, B. STORTI, D. ANDERSON, R. et al. “Development Process for Custom Three Dimensional Printing (3DP) Material Systems.” Journal of Manufacturing Science and Engineering. V.132, pp 11008-1 – 11008-9. Feb.2010
- VOLPATO, N. Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações. 1ª Edição. São Paulo. Editora Edgard Blücher. 2007.
- Z CORPORATION. Z printer 310 plus hardware manual. Z Corporation, Burlington, MA, 2007.