

## IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL A PARTIR DE REJEITOS DE ÁGATA

### THREE-DIMENSIONAL PRINTING USING AGATA'S WASTES

Carlos Edmundo de Abreu e Lima<sup>1</sup>, Jéssica Cardoso Bisinella<sup>2</sup>, Ney Francisco Ferreira<sup>3</sup>, Juliano Tonezer da Silva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Professor Assistente na Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Doutorando em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

E-mail: engedmundo@gmail.com

<sup>2</sup>Arquiteta e Urbanista, Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo.

E-mail: jessicabisinella@gmail.com

<sup>3</sup>Professor Associado do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

E-mail: neyferr@gmail.com

<sup>4</sup>Professor Titular do Instituto de Ciências Exatas e Geociências, da Universidade de Passo Fundo.

E-mail: tonezer@upf.br

#### RESUMO

Este artigo apresenta a técnica utilizada para a obtenção de matéria-prima para impressão em três dimensões (3D) com rejeitos do processo produtivo da fabricação de produtos de ágata. Os rejeitos são classificados e moídos até serem transformados em pó, com granulometria aproximada de 200 *mesh*, e servem como base para a matéria-prima que se utiliza de maltodextrina e açúcar como aglutinante sólido. Foram realizados testes de saturação e a fabricação de 48 corpos de prova, que foram submetidos a análises dimensionais e de resistência mecânica. Nos corpos de prova fabricados com 14% líquido de saturação, a resistência mecânica média observada foi de 5,84 MPa –segundo ensaio de flexão a quatro pontos– e o desvio dimensional observado ficou entre 0,2 a 1,2 mm. Observou-se que a taxa de saturação se mostrou adequada para a fabricação de peças pequenas e com espessuras de parede de 5 a 10 mm, com baixo nível de detalhes superficiais. Os resultados demonstrados servem como base para o aprimoramento da matéria-prima em desenvolvimento, sobretudo para o acabamento final das peças, confiabilidade e reprodução de pequenos detalhes e para o tamanho das peças fabricadas. O artigo apresenta o processo de impressão 3D como uma alternativa para o aproveitamento de rejeitos e agregação de valor ao material antes rejeitado e que não poderia ser aproveitado de outra forma.

**Palavras-chave:** Impressão tridimensional, desenvolvimento de matéria-prima, rejeitos de ágata.

#### ABSTRACT

This paper presents a technique used to obtain raw material for three-dimensional (3D) printing from agate's manufacturing wastes. Through the use of appropriate methodology for grinding and classification of waste it was possible to obtain powder with a particle size indicated to the process, approximately 200 mesh, and serves as the basis for the raw material that uses maltodextrin and sugar as a solid binder. Saturation testing and manufacturing of 48 specimens, which were subjected to dimensional analysis and mechanical strength were performed. The test specimens made with 14% liquid saturation, the average strength observed was 5.84 MPa and the dimensional deviation was between 0.2 and 1.2 mm. It was observed that this saturation rate was adequate for manufacture of small parts and with the wall thickness of 5 to 10 mm, with low surface detail. The results presented here serve as a basis for improvement of raw material for development, especially for the finishing of parts, reliability and reproduction of small details and the size of the fabricated parts. The work presents the process of 3D printing as an alternative to the reuse of wastes and adding value to the material before rejected and could not be passed otherwise.

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

#### 1 – INTRODUÇÃO

Uma metodologia para o desenvolvimento de novos sistemas de matéria-prima foi descrita por Utela *et al.* (2008). Nela, os autores detalham os principais passos para a utilização de materiais alternativos como base para a impressão 3D, e também demonstram alguns parâmetros que devem ser observados para o processo seja eficiente, que parte desde as especificações do equipamento que se deseja utilizar, o tamanho das partículas, a formulação do pó e o aglutinante, bem como os métodos de interação e aglutinação entre o pó, o líquido de deposição e o aglutinante. Ainda, os mesmos autores descrevem detalhadamente em outro artigo (UTELA *et al.*, 2010) os

principais processos de aglutinação e quais são indicados para cada processo em específico.

A aplicação de matéria-prima com base em vidro foi apresentada por Marchelli *et al.* (2011), onde obtiveram resultados satisfatórios na fabricação de peças com geometria simples e complexas, comprovando que o processo de impressão 3D tem um grande potencial para o reaproveitamento de materiais.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo principal buscar uma forma de agregar a utilização do rejeito gerado na fabricação de artefatos de pedras preciosas com a tecnologia de impressão 3D, possibilitando uma alternativa de aproveitamento de um material que vem sendo descartado e causa prejuízo às

indústrias que trabalham com ágatas, de forma a agregar valor econômico-social e de forma ambientalmente correta por meio da possibilidade de desenvolvimento de novos produtos.

Neste artigo é descrito como foi realizado o processo de transformação do material, bem como a fabricação de pequenas peças via impressão 3D utilizando como matéria-prima principal os rejeitos oriundos do processo de beneficiamento de ágata. Acredita-se que esta técnica pode resultar em aproveitamento de um material que está sendo descartado, além de agregar valor a rejeitos industriais de forma sustentável.

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo geral deste trabalho foi realizar o desenvolvimento de um sistema de matéria-prima para impressão tridimensional utilizando-se de rejeitos da indústria de beneficiamento de pedras preciosas, neste caso em especial, de Ágata. As seções seguintes apresentam os materiais e as principais técnicas utilizadas durante a realização do estudo.

### 2.1 Sistema de Impressão 3D utilizado

O sistema de Prototipagem Rápida (PR) utilizado neste estudo foi um equipamento 3DP, modelo Z310 Plus (Z CORPORATION, 2007). O equipamento caracteriza-se por utilizar matéria-prima em forma de pó, sendo este aglutinado por meio da deposição de um líquido sobre uma cama de material. Possui as seguintes características técnicas: monocromático, resolução de impressão – 300 x 450 dpi; capacidade máxima de construção de 203 x 254 x 203 milímetros; espessura de camada variável entre 0,089 e 0,203 milímetros.

A escolha deste sistema de impressão tridimensional foi fundamentada nas afirmações de Chua *et al.* (2003), Utela *et al.* (2008) e Marchelli *et al.* (2011):

- A tecnologia permite a utilização como matéria-prima de qualquer material que possa ser transformado em pó;

- É a tecnologia mais rápida de prototipagem disponível no mercado atual;

- É possível realizar a substituição e a criação de sistemas de matérias primas alternativas, com os mais diversos materiais.

A partir da compreensão e análise destas afirmações foram iniciados os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento.

### 2.2 Rejeitos de pedras preciosas

As indústrias de beneficiamento de pedras preciosas do APL de gemas e joias do Rio Grande do Sul geram, em seus processos produtivos, grandes quantidades de rejeitos que por terem baixo valor comercial, não são aproveitados. Dentre as pedras preciosas que se beneficiam no município, destaca-se a ágata, pedra preciosa com grande ocorrência na região do APL, comercializada e beneficiada por mais de 70% das empresas locais (MARTINS, 2009).

De acordo com Costa (2007), os processos de beneficiamento realizados em empresas de beneficiamento de pedras preciosas são geralmente primários, tais como: corte em chapas, martelação de pedras, artesanato e fabricação de artefatos de baixa complexidade. Estes processos geram quantidades expressivas de resíduos sólidos, principalmente na forma de refugos, peças semiacabadas ou pouco beneficiadas. Estes materiais possuem baixo valor e raramente são comercializados, sendo então armazenados, formando grandes pilhas (conforme Figura 1) com dezenas de toneladas nos pátios das empresas.

Figura 1 – Rejeitos de ágatas



Este material caracteriza-se por tamanhos e formato bastante irregulares. A pilha mostrada na Figura 1-A é apenas de material classificado como rejeito na fase de

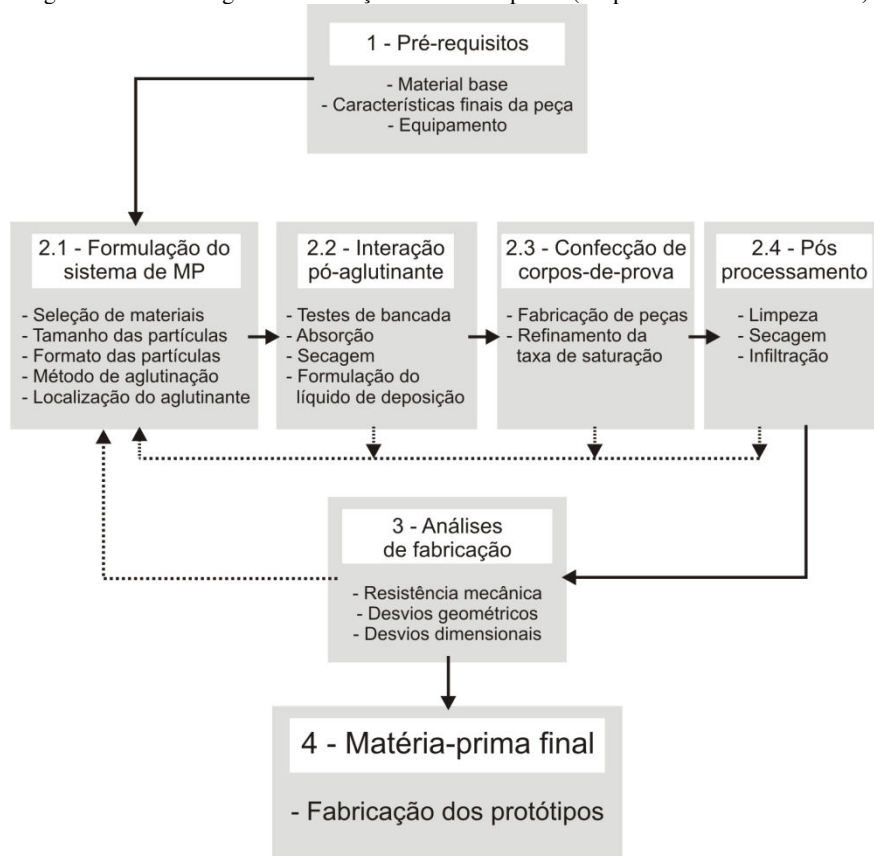
extração, e possui cerca de 2 m de altura. Na Figura 1-B são mostradas as sobras oriundas do processo de corte de formatos diversos.

### 2.3 Metodologia

Segundo Utela *et al.* (2010), o desenvolvimento de matérias-primas customizadas para o sistema 3DP envolve

um grande número de variáveis, e pode significar um grande desafio, dado as numerosas decisões que devem ser tomadas acerca de pós, aglutinantes, impressão e pós-processamento. A metodologia de trabalho utilizada, adaptada do trabalho de Utela *et al.* (2010) é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Metodologia de formulação da matéria-prima (adaptado de Utela *et al.* 2010)

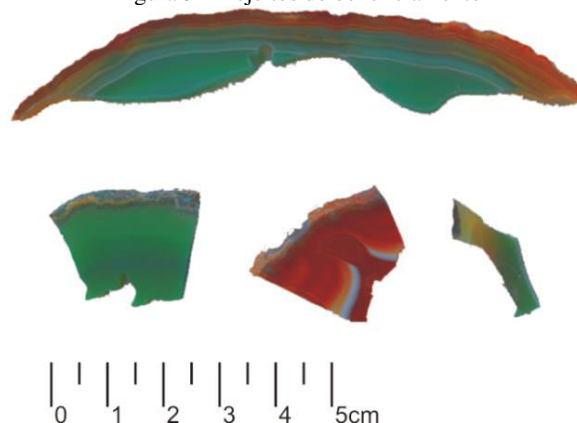


A matéria-prima desenvolvida foi denominada de MPAG02. Iniciou-se o trabalho com a definição dos pré-requisitos (item 1 da Figura 2), por meio da definição das características finais da peça. Neste caso foi decidido que as peças poderiam apresentar porosidade e não precisavam ser homogêneas, possibilitando assim a utilização de materiais adjacentes como agentes de aglutinação, fundentes e resinas de infiltração para o aumento da resistência mecânica final.

Em função do material desejado (rejeitos de ágata) e o equipamento utilizado (método de deposição a seco) efetuou-se a formulação do sistema (item 2.1, Figura 2). Segundo Utela *et al.* (2010), o tamanho das partículas devem ser maiores do que 20 µm (devido à deposição no estado seco) e menores do que 80 µm (1/3 da máxima espessura de camada do equipamento).

Para a composição da matéria-prima MPAG02 foram utilizados rejeitos gemológicos oriundos do beneficiamento de ágata, sobretudo pedaços trincados, quebrados de pequeno tamanho (conforme Figura 3) ou sobras da fabricação de formatos diversos.

Figura 3 – Rejeitos do beneficiamento



Os rejeitos gemológicos foram cominuídos com o auxílio de um moinho de bolas excêntrico do tipo “periquito” durante um período de quarenta minutos, sendo assim transformados em pó. A classificação do pó foi efetuada por peneiramento, a fim de eliminar partículas

grosseiras e que pudessem causar problemas no processo de impressão e danos ao equipamento, e também para homogeneizar o tamanho dos grãos. Para isso, foi utilizado um agitador eletromagnético, sendo as peneiras dispostas da malha com maior abertura (40 *mesh*) até a malha com menor abertura (200 *mesh*). Dessa forma foi possível efetuar a moagem e reduzir e classificar os rejeitos de ágatas até o tamanho desejado, ou seja, entre 20  $\mu\text{m}$  e 80  $\mu\text{m}$ , tamanho adequado ao processo.

O método de aglutinação utilizado foi o orgânico (Utela *et al.* 2010), que possui agente aglutinante (Maltodextrina e Açúcar) misturado ao material em pó, sendo a aglutinação ativada pelo líquido de deposição. Este método foi escolhido pela sua ampla aplicabilidade, baixo custo e acessibilidade, além de não utilizar produtos controlados e líquidos de deposição reologicamente mais simples.

A interação entre o pó e o aglutinante (Item 2.2 da Figura 2) pode ser verificada por meio da realização do teste de bancada. Neste ensaio, é efetuada uma mistura manual entre os componentes do sistema de matéria-prima, a fim de verificar uma taxa aproximada da saturação do líquido de deposição com a matéria-prima em pó, permitindo assim os ensaios no equipamento e facilitando a fabricação das peças. Neste estudo, foi utilizado como líquido de deposição a mistura XF1, desenvolvida por Ganter *et al.* (2011) para ensaios de impressão tridimensional em equipamentos semelhantes.

A partir dos dados obtidos nos ensaios de bancada puderam ser realizados os testes no equipamento de impressão tridimensional. Foram projetados corpos de prova para possibilitar a análise de resistência mecânica à flexão a quatro pontos (segundo a norma técnica ASTM C – 133/97), com formato de uma barra de seção quadrada, com dimensões nominais de 10 mm x 10 mm x 50 mm.

Para a finalização dos corpos de prova, estes foram submetidos à limpeza manual com pincel macio, secagem em estufa a 45°C por 24 horas e infiltração com resina de cianoacrilato de baixíssima viscosidade (Pós-processamento, item 2.4 da Figura 2).

Por fim, os corpos de prova foram submetidos a análises de caracterização tecnológica, por meio de análises de desvios dimensionais, geométricos e resistência mecânica à flexão a quatro pontos. Com base nos resultados obtidos, foram fabricadas peças com outras geometrias, sendo que duas delas foram submetidas à comparação geométrica, por meio de digitalização tridimensional.

#### 2.4 Ensaios de caracterização tecnológica

A resistência mecânica foi medida por meio do ensaio de flexão a quatro pontos. Este ensaio foi baseado na norma técnica ASTM C – 133/97 e efetuado em uma máquina de ensaios universal ATS modelo 1105 C, disponível no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS.

Os desvios dimensionais foram verificados por meio da medição dos CP com paquímetro analógico, de resolução 0,05 mm, comparando as dimensões destes com as dimensões nominais.

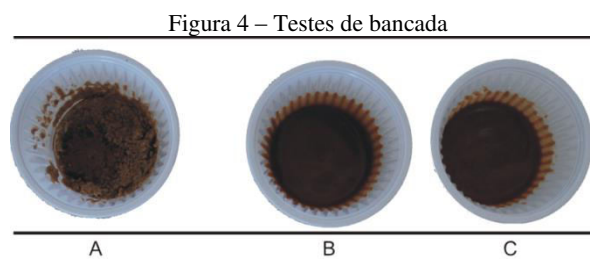
Os desvios de forma foram verificados por meio da digitalização de duas geometrias fabricadas com a matéria-prima desenvolvida e também com a matéria-prima de referência. O digitalizador utilizado neste trabalho foi o REVScan @ 3D, com resolução volumétrica de 20  $\mu\text{m}$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos neste estudo, bem como uma análise detalhada dos mesmos.

#### 3.1 Interação pó-aglutinante

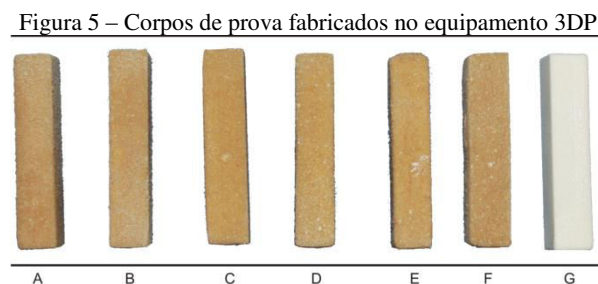
A verificação da interação entre o material base (ágata em pó), o aglutinante sólido (maltodextrina e açúcar) e o líquido de deposição (XF1) puderam ser observados por meio da realização de um teste de bancada, conforme mostrado na Figura 4.



No teste observou-se que a taxa de 30% (Figura 4-C), a mistura resultante ficou homogênea, porém muito líquida, sendo que o tempo necessário para a sua secagem ficou na ordem de 24 horas. Na taxa de 20% (Figura 4-B), a mistura ficou homogênea e líquida, com secagem em cerca de 30 minutos. Na taxa de 10% (Figura 4-A), a mistura não ficou totalmente homogênea, pois o líquido não conseguiu dissolver todo o material em pó. Desta forma, verificou-se que a taxa de saturação adequada para os testes no equipamento encontrava-se entre 10% e 20%.

#### 3.2 Confeção dos corpos de prova

A partir dos dados obtidos nos testes de bancada, foi efetuada a fabricação dos corpos de prova no equipamento 3DP (item 2.3 da Figura 2). Foram produzidas peças com taxas de saturação entre 10% e 20%, em intervalos de 2%. Efetuou-se a fabricação de oito corpos de prova em seis diferentes taxas de saturação, totalizando 48 corpos de prova. Um exemplar de cada grupo de corpos de prova é apresentado na Figura 5.





Na Figura 5 é mostrado um exemplar de cada taxa de saturação (na Figura 5: 10% em A, 12 % em B, 14% em C, 16% em D, 18% em E, e 20% em F), comparado com a mesma geometria fabricada com a matéria-prima nativa do equipamento (Figura 5-G). Pode-se observar que os corpos de prova com menor taxa de saturação (A, B e C) estavam visivelmente com menor deformação geométrica.

### 3.3 Análises de caracterização tecnológica

Foram realizadas algumas análises de fabricação para definir onde poderiam ser aplicadas no processo (item 3 da Figura 2). Comparando as dimensões dos corpos de prova com as dimensões nominais foi possível obter alguns

dados importantes. Os desvios dimensionais máximos ficaram na ordem de 0,5 a 0,9 milímetros no sentido transversal das barras e de 0,75 mm no eixo longitudinal, sendo que com os desvios médios foram de 0,28 e 0,73 mm no sentido transversal e 0,25 mm no eixo longitudinal. Estes desvios, analisados separadamente da geometria, não são significativos, pois o processo necessita de calibração quanto aos efeitos de “bleeding” (Z CORPORATION, 2007), sendo que o fenômeno também é observado na utilização da matéria-prima de referência, com desvios dimensionais de mesma magnitude. Um resumo com os desvios medidos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela dimensional dos CP fabricados a partir da MPAG02

	Qtde.	h [mm]	D. P.	l [mm]	D. P.	d [mm]	D. P.	
	10,00		10,00		10,00			
	Dimensão nominal							
Taxa de saturação	10%	7	10,34	0,17	9,42	0,08	48,17	0,45
	12%	6	9,89	0,24	8,98	0,23	46,29	0,73
	14%	8	10,41	0,20	9,46	0,55	47,41	1,04
	16%	8	10,56	0,37	9,41	0,48	47,02	0,50
	18%	8	10,54	0,61	9,11	0,22	47,53	0,76
	20%	8	10,73	1,07	9,22	0,67	48,40	1,33

Contudo, quando se observa a forma dos corpos de prova, detecta-se que alguns desvios são visualmente mais acentuados nas taxas de saturação maiores, como 18% e 20% (Figuras 5-E e 5-F), onde se pode visualizar o efeito do *bleeding* no eixo axial dos corpos de prova, e também na parte de baixo da construção, devido à aglutinação de material que estava abaixo das camadas iniciais de fabricação.

Os ensaios de resistência mecânica de flexão a 4 pontos foram realizados em 30 dos 48 corpos de prova fabricados no equipamento 3DP (5 amostras de cada taxa de saturação), sendo escolhidos os que apresentavam melhor condição estrutural e menores desvios geométricos visíveis. Os dados resultantes do ensaio foram compilados e processados, sendo que uma síntese destes dados está apresentada na Figura 6.

De acordo com estes dados, a maior resistência mecânica média (362,22 N) foi obtida com a taxa de saturação de 10%, assim como a maior tensão de ruptura média (7,46 MPa), sendo estas médias superiores até mesmo do que a observada com a MP de referência do equipamento. Observa-se também uma tendência de redução da resistência mecânica com o aumento da taxa de saturação, que pode ser atribuída a redução do volume de infiltrante absorvido pelos corpos de prova. Isto pode ser atribuído ao fato de que, em maiores taxas de saturação existe uma maior dissolução do aglutinante, tornando a massa mais densa e com menos poros. A peça impressa demora mais para secar e o aglutinante dissolvido dificulta a absorção do infiltrante pela matéria-prima, tornando a peça menos resistente.

Destaca-se, também, que o desvio padrão da distribuição de força de ruptura pode ser considerado elevado, variando de 24 N a 60 N. Este fato pode ser atribuído as irregularidades dimensionais das amostras e, também, ao processo de infiltração de cianoacrilato (submersão), pois nem sempre é possível garantir a mesma espessura de penetração nas peças infiltradas, devido à variações na temperatura ambiente e degradação do infiltrante.

Neste caso, considerando apenas a resistência mecânica, o melhor resultado obtido foi com o grupo de saturação 10%. Porém, durante a manipulação dos corpos de prova, estes eram mais frágeis e perdiam material (pó) mais facilmente, sendo que duas amostras foram quebradas antes mesmo da infiltração. Nos corpos de prova de 16% (segunda maior média de resistência mecânica) detectou-se muita umidade durante a manipulação, sendo que o processo de limpeza era dificultado, sobretudo na região inferior dos corpos de prova. Pode-se atribuir esse fator a maior quantidade de líquido de aglutinação, que desceu mais camadas do que o desejado, aumentando assim o volume de pó aglutinado. Este mesmo defeito foi observado nas taxas de saturação de 18% e 20%.

Desta forma, aliando resistência mecânica e facilidade de manipulação, a taxa ideal de saturação para a formulação MPAG02 foi definida em 14%, pois permite facilidade de limpeza e agrega resistência mecânica aproximadamente igual à matéria-prima de referência, além de manter um desvio dimensional menor do que 0,5 mm.

Figura 6 – Ensaio de resistência à flexão a 4 pontos realizados nos corpos de prova da MPAG02

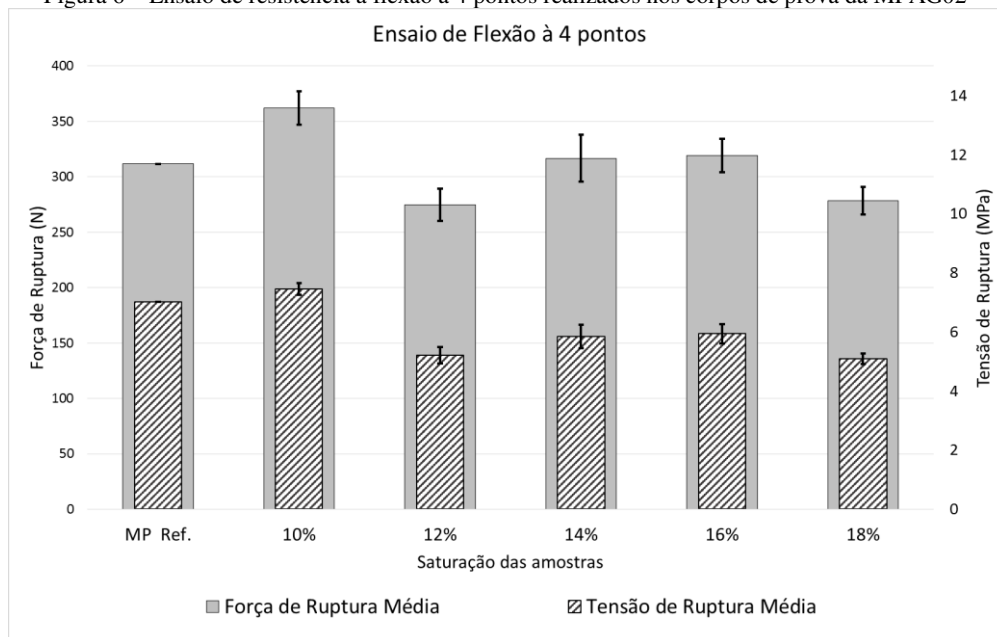
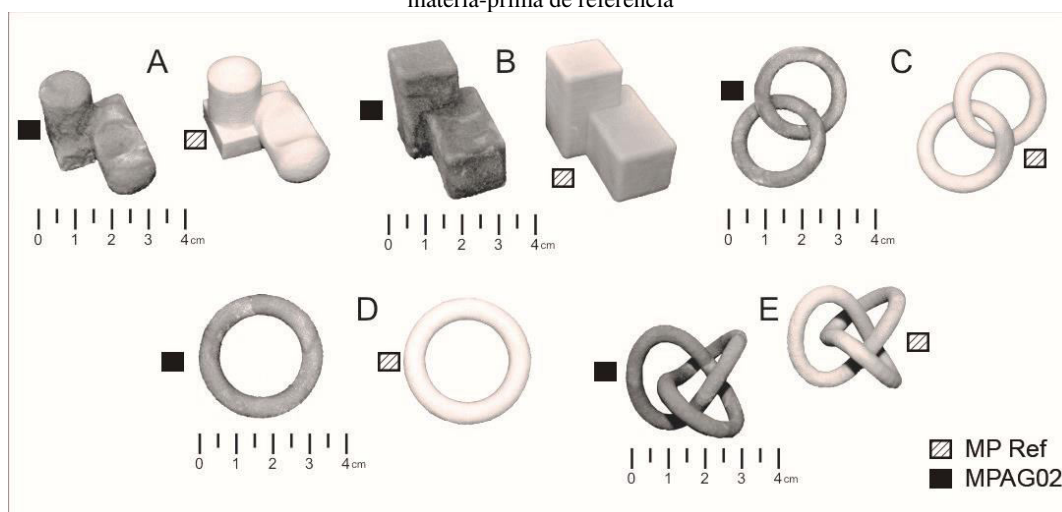


Figura 7 – Peças fabricadas no equipamento 3DP. Os retângulos posicionados ao lado de cada peça indicam a matéria-prima utilizada na fabricação de cada objeto, sendo os retângulos totalmente preenchidos indicam a MPAG02, e os retângulos hachurados representam a matéria-prima de referência



### 3.4 Fabricação de geometrias 3D

Com a taxa de saturação de líquido de deposição de 14%, foram efetuada a fabricação de cinco diferentes peças utilizando a MPAG02 (item 4 da Figura 2), apresentadas na Figura 7.

As peças C, D e E da Figura 7 apresentaram formato e acabamento superficial visualmente muito próximo ao mesmo formato fabricado com a MP de referência. Já nas peças A e B, observa-se uma grande taxa de deformação e rugosidade superficial, que foi acentuado após o processo de infiltração. Atribui-se essa deformação ao excesso de líquido de aglutinação, que pode ter se espalhado e causado o efeito de “bleeding” na impressão. Além disso,

observou-se um forte aumento na temperatura da peça durante o processo de infiltração, o que pode indicar algum tipo de reação química exotérmica durante o processo, liberando gases que podem prejudicar o acabamento superficial. Contudo, estes fenômenos não foram medidos e acompanhados sistematicamente, ainda não foi possível comprová-los.

### CONCLUSÕES

A partir deste trabalho comprova-se que é possível efetuar a substituição da matéria-prima de impressão tridimensional de referência por rejeitos moídos de ágata, para impressão de objetos de média complexidade, desde

que estes rejeitos sejam devidamente classificados e separados em tamanho adequado ao equipamento de impressão tridimensional. Neste artigo foi apresentado que peças de média e baixa complexidade e com dimensões de aproximadamente 50 mm podem ser fabricadas com material oriundo de rejeitos do beneficiamento de ágata.

Espera-se que, por meio do aprimoramento da matéria-prima em desenvolvimento, principalmente em termos de qualidade superficial e confiabilidade dimensional, seja possível conduzir o uso da impressão tridimensional como meio de fabricação de produtos diferenciados para o APL de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul.

#### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela disponibilização dos recursos por meio do Edital 12/2009 – CT Mineral.

#### REFERÊNCIAS

- CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Rapid prototyping: Principles and applications**. 2<sup>nd</sup> Edition. Singapore. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2003.
- COSTA, M. **Beneficiamento de pedras preciosas no Vale do Taquari – Diagnóstico e modelo para análise e redução de perdas nos processos produtivos**. 2007. 130 f. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2007.
- GANTER, M. **Xtra white ceramic**. 2011. Disponível em: <<http://open3dp.me.washington.edu/2009/09/xtra-white-ceramic>>. Acesso em: 26 out. 2011.
- \_\_\_\_\_. **XF1 (eXperimental Fluid) – 400 class**. 2011. Disponível em: <<http://open3dp.me.washington.edu/2009/09/xf1-experimental-fluid-400-class/>>. Acesso em: 26 out. 2011.
- MARCHELLI, G.; PRABHAKAR, R.; STORTI, D.; GANTER, M. The guide to glass 3D printing: developments, methods, diagnostics and results. Seattle, USA. **Rapid Prototyping Journal**, v. 17, n. 3, p. 187-194, 2011. <http://dx.doi.org/10.1108/13552541111124761>.
- MARTINS, M. S. **Diagnóstico operacional das empresas beneficiadoras de pedras de Soledade, RS**. Soledade, RS. Estágio Curricular do Curso de Engenharia Mecânica da UFSM. 2009.
- UTELA, B. R.; STORTI, D.; ANDERSON, R. L.; GANTER, M. A review of process development for new material systems in three-dimensional printing (3DP). Seattle, USA. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 10, n. 2, p. 96-104, July, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2009.03.002>.
- \_\_\_\_\_. Development process for custom three-dimensional printing (3DP) material systems. Seattle, USA. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 132, n. 1, January 2010, 9 p. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4000713>.
- Z CORPORATION. **Z printer 310 plus hardware manual**. Z Corporation, Burlington, MA, USA, 2007.