

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

**CARLOS EDMUNDO DE ABREU E LIMA IPAR**

**DESENVOLVIMENTO DE MATÉRIA-PRIMA PARA IMPRESSÃO  
TRIDIMENSIONAL A PARTIR DE REJEITOS GEMOLÓGICOS DE  
ÁGATA**

**Porto Alegre  
2011**

**CARLOS EDMUNDO DE ABREU E LIMA IPAR**

**DESENVOLVIMENTO DE MATÉRIA-PRIMA PARA IMPRESSÃO  
TRIDIMENSIONAL A PARTIR DE REJEITOS GEMOLÓGICOS DE  
ÁGATAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design, ênfase em Design e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

**Orientador:** Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

**Co-orientador:** Prof. Dr. Juliano Tonezer da Silva

**Porto Alegre  
2011**

Carlos Edmundo de Abreu e Lima Ipar

Dissertação de mestrado apresentada e defendida como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Design, pelo Programa de Pós-Graduação em Design e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Defendida e aprovada em 09/12/2011.

---

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira  
PGDesign – UFRGS

---

Co-Orientador: Prof. Dr. Juliano Tonezer da Silva  
ICEG – UPF

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Flavio José Lorini  
PGDesign – UFRGS

---

Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann  
Instituto de Geociências – UFRGS

---

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel  
FEAR – UPF

***Dedicatória***

*Aos meus pais, Marlene e Carlos Alberto,  
minha tia-mãe, Maria Helena,  
irmã Flavia e meu sobrinho Matheus,  
e a minha namorada, Jéssica.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela graça da vida.

À minha família, pelo apoio incondicional, pelas dificuldades superadas, pelas palavras de apoio, pelo carinho e amor que me passa a cada dia.

A minha namorada Jéssica, pelo amor e compreensão, pelo apoio e incentivo e também por ter participado ativamente deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Ney Ferreira, pelos ensinamentos, desafios e por me ajudar a não perder o foco.

Ao meu co-orientador e grande amigo, Prof. Juliano, pelo apoio em todas as situações, e sobretudo, por não me deixar desistir.

A todo o Programa de Pós Graduação em Design, professores e funcionários, pelos ensinamentos, auxílio e pelo excelente serviço prestado a nós alunos.

Aos colegas de mestrado, pelas experiências compartilhadas.

Aos colegas do Centro Tecnológico: Jéssica, Billy, Hislie, Matheus Lau, Fernanda, Jonas, Bebeto, Rafael, Wilson, Felipe e Bernardo, pela convivência diária e também por, de uma forma ou de outra, contribuíram comigo no desenvolvimento neste trabalho.

A todo pessoal do LdSM e do LACER da UFRGS, que sempre me atendeu com muito empenho e dedicação.

Ao CNPq, FAPERGS, Ministério da Ciência e Tecnologia e Prefeitura Municipal de Soeldade/RS, pelos recursos financeiros disponibilizados.

E a todos, que de uma forma ou de outra contribuíram comigo e a equipe de trabalho, possibilitando a concretização do nosso trabalho.

A todos vocês, muito obrigado.

“Não sei o que possa parecer aos olhos do mundo, mas aos meus pareço apenas ter sido como um menino brincando à beira-mar, divertindo-me com o fato de encontrar de vez em quando um seixo mais liso ou uma concha mais bonita que o normal, enquanto o grande oceano da verdade permanece completamente por descobrir à minha frente.”

Isaac Newton

## RESUMO

A indústria de pedras preciosas de Soledade/RS e região gera 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 propõe uma técnica para efetuar a reutilização de rejeitos oriundos do beneficiamento da ágata e transformá-los em matéria-prima para a fabricação de objetos via impressão tridimensional a jato de tinta (3DP). Através da utilização de metodologia adequada para moagem e classificação dos rejeitos, foi possível obter pó com granulometria adequada ao processo. Foram efetuadas duas formulações de matéria-prima, utilizando o método de aglutinação orgânico, com material de ligação misturado ao pó e líquido de deposição reologicamente simples. Foram efetuados testes de bancada para interação entre o pó e o aglutinante, testes em equipamento de prototipagem rápida e confecção de corpos de prova, que mais tarde foram submetidos a medição e ensaios de resistência mecânica à flexão a 4 pontos. Das análises efetuadas, a primeira formulação não foi considerada satisfatória, pois teve grandes deformações durante a construção e manipulação e pós-tratamento. Já a segunda formulação alcançou a mesma resistência mecânica do material disponibilizado pelo fabricante, com coerência nas formas geométricas e desvios dimensionais reduzidos. Com a utilização desta nova matéria-prima, estima-se que o custo final de fabricação das peças seja reduzido em até 70%, viabilizando a utilização do processo por empresas de micro e pequeno porte.

Palavras chave: 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' grounds and may damage the environment. The gem with largest volume of processing in the region is the agate. This work is a review of the reuse of wastes of agate as raw materials for inkjet three-dimensional printing (3DP). 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. Two formulations of raw material were made, using the organic binding method with the binder material mixed into the powder and using the deposition simple rheological liquid. Bench tests were performed for powder binder interaction, and equipment was used for produce of test specimens which were later subjected to measurement and testing of mechanical strength. Based on the analysis the first formulation was not considered acceptable as it had large deformations during construction, manipulation and post-treatment. The second formulation reached the same mechanical strength of the manufacturer material with consistency in geometric shapes and dimensional deviation. Using this new raw material the estimated final cost of parts manufacturing is reduced by 70% making the use of the process available to micro and small businesses.

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

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Depósito de rejeitos em empresa de Pedras Preciosas de Soledade/RS.....	5
Figura 2 – Mapa gemológico da região sul do Brasil. (Juchem et al. 2009).....	10
Figura 3 – Frente de extração de Ágata em Garimpo de Salto do Jacuí/RS.....	14
Figura 4 – Lotes de Classificação de geodos de Ágata. ....	15
Figura 5 – Máquinas utilizadas no corte de geodos de Ágata. ....	16
Figura 6 – Tingimento de ágata em pequena empresa de Soledade/RS.....	18
Figura 7 – Lixamento e polimento de ágatas em empresa de Soledade/RS.....	18
Figura 8 – Rejeitos gemológicos de ágata. ....	19
Figura 9 – Princípio básico de funcionamento da Prototipagem Rápida. (Adaptado de Volpato et al. 2007). ....	22
Figura 10 – Modelos confeccionados em equipamento de PR de alta resolução (BQZ, 2010). .....	23
Figura 11 – Equipamentos do sistema 3DP.....	26
Figura 12 – Esquema do processo de 3DP (Adaptado de Volpato et al, 2007).....	26
Figura 13 – Peças fabricadas utilizando o sistema 3DP. ....	27
Figura 14 – Objetos cerâmicos fabricado em sistema 3DP (Fonte: Balistreri, 2010). ....	30
Figura 15 – Componentes da unidade de fabricação.....	39
Figura 16 – Processo de moagem dos rejeitos de ágatas.....	42
Figura 17 – Metodologia de formulação da matéria-prima. ....	43
Figura 18 – Representação esquemática do ensaio de resistência mecânica à flexão a quatro pontos. ....	44
Figura 19 – Digitalizador tridimensional e superfície digitalizada. ....	45
Figura 20 – Análise de FT-IR efetuado no aglutinante disponibilizado pelo fabricante (líquido de deposição). ....	48
Figura 21 – Análise granulométrica da matéria-prima a base de gesso. ....	49
Figura 22 – Análise mineralógica da matéria-prima a base de gesso.....	49
Figura 23 – Análise MEV da matéria prima disponibilizado pelo fabricante. ....	51
Figura 24 – EDS das matéria-prima disponibilizada pelo fabricante.....	52
Figura 25 – Análise MEV do rejeito de ágata submetido ao processo de moagem. ....	54
Figura 26 – EDS do rejeito de ágata moído. ....	55
Figura 27 – Testes de bancada de interação entre pó e aglutinante.....	57
Figura 28 – Sequência de fabricação dos CP's, pó MPAG01, taxa de saturação 20%. ....	59
Figura 29 – Conjunto de CP's fabricados durante o ensaio. ....	60
Figura 30 – Comparativo de deformações dos CP's de MPAG01.....	62
Figura 31 – Testes de bancada de interação entre pó e aglutinante da MPAG02. ....	65
Figura 32 – Conjunto de CP's do pó MPAG02 após período de cura. ....	66
Figura 33 – Comparativo de deformações dos CP's da MPAG02.....	68
Figura 34 – Projeto 3D das peças da análise geométrica. ....	70
Figura 35 – Peças fabricadas para análise geométrica. ....	71
Figura 36 – Digitalização tridimensional das peças fabricadas.....	71
Figura 37 – Análise geométrica da peça 01 entre os materiais e o projeto 3D. ....	72
Figura 38 – Análise geométrica da peça 02 entre os materiais e o projeto 3D. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exportação brasileira do setor de gemas e joias no período de 2009 a 2010. ....	11
Tabela 2 – Participação do Estado do Rio Grande do Sul na exportação brasileira de gemas e metais preciosos.....	12
Tabela 3 – Dados referenciais da EXPOSOL.....	13
Tabela 4 – Resultado da análise de EDS. ....	52
Tabela 5 – Análise granulométrica das amostras de rejeitos moídos de ágatas. ....	53
Tabela 6 – Resultado da análise EDS do rejeito de ágata moído. ....	55
Tabela 7 – Formulações de matéria-prima desenvolvidas. ....	56
Tabela 8 – Teste de bancada MPAG01. ....	58
Tabela 9 – Pesagem do processo de infiltração dos CP's. ....	61
Tabela 10 – Tabela dimensional dos CP's fabricados MPAG01.....	62
Tabela 11 – Ensaio de resistência à flexão a 4 pontos realizados nos CP's da MPAG01. ....	63
Tabela 12 – Teste de bancada MPAG02. ....	66
Tabela 13 – Pesagem do processo de infiltração dos CP's de MPAG02.....	67
Tabela 14 – Tabela dimensional dos CP's fabricadosde MPAG02. ....	68
Tabela 15 – Ensaio de resistência à flexão a 4 pontos realizados nos CP's da MPAG02. ....	69
Tabela 16 – Custos relativos à fabricação de peças com o pó ZP131®.....	74
Tabela 17 – Custos relativos a fabricação de peças com o pó MPAG02. ....	76
Tabela 18 – Comparativo de valores finais de fabricação em ZP131® e MPAG02.....	77

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo da classificação dos rejeitos gemológicos. ....	20
Quadro 2 – Sumário de alguns sistemas de PR (Adaptado de Voltato et al., 2007) .....	25
Quadro 3 – Influência do tamanho e formato das partículas nas etapas do processo (Adaptado de Utela et al., 2010).....	33
Quadro 4 – Resumo das metodologias de aglutinação (Adaptado de Utela et al. 2010).....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS

3DP – Impressão Tridimensional  
AEP – Agência de Educação Profissional  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
CAD – Computer Aided Design  
CP's – Corpos-de-prova  
CTPGJRS – Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul  
DWS – Digital Wax System  
EDS – Energia Dispersiva de Espectroscopia de raios-X  
EXPOSOL – Exposição Feira de Soledade  
FDM – Modelagem por Fusão e Deposição  
FT-IR - Espectrometria de Infravermelho por Transformada de Fourier  
IBGM – Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos  
LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos  
LdSM – Laboratório de Design e Seleção de Materiais  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
MP – Matéria-prima  
MPAG01 – Matéria-prima de rejeitos de ágata formulação 01  
MPAG02 – Matéria-prima de rejeitos de ágata formulação 02  
PR – Prototipagem Rápida  
SINDIPEDRAS – Sindicato das Indústrias de Joalherias, Mineração, Lapidação, Beneficiamento, Transformação de Pedras Preciosas do Rio Grande do Sul  
SLA – SL – Estereolitografia  
SPL – Sistema Produtivo Local  
STL – Formato de arquivo de malha triangular  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
UPF – Universidade de Passo Fundo  
XF1 – Experimental Fluid 1  
XRD – Difração de raios-X  
ZB60® - Matéria-prima para impressão 3D em líquido  
ZP131® - Matéria-prima para impressão 3D em pó

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Contextualização.....	1
1.2.	Delimitação do tema .....	3
1.3.	Formulação do problema .....	3
1.3.1.	Hipóteses .....	3
1.4.	Objetivos.....	4
1.4.1.	Objetivo geral .....	4
1.4.2.	Objetivos específicos .....	4
1.5.	Justificativa e relevância da pesquisa .....	4
1.6.	Metodologia.....	6
1.7.	Estrutura do trabalho.....	7
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1.	O setor brasileiro de Gemas e Joias .....	9
2.2.	Beneficiamento de pedras preciosas no RS .....	13
2.2.1.	Extração de ágata.....	13
2.2.2.	Beneficiamento de ágata.....	15
2.3.	Rejeitos gemológicos .....	18
2.4.	Prototipagem Rápida.....	21
2.4.1.	Funcionamento .....	21
2.4.2.	Aplicações .....	22
2.4.3.	Classificação .....	24
2.4.4.	Sistemas de PR: Características, vantagens e limitações .....	24
2.5.	Sistema de Impressão Tridimensional – 3DP.....	25
2.5.1.	Etapas do sistema 3DP .....	28
2.5.2.	Precisão das peças fabricadas no sistema 3DP.....	28
2.6.	Desenvolvimento de matérias-primas customizadas para o sistema 3DP .....	30
2.6.1.	Especificação das características finais da peça .....	31
2.6.2.	Formulação do Pó.....	32
2.6.3.	Seleção do método de aglutinação .....	33
2.6.4.	Formulação do líquido de deposição .....	35
2.6.5.	Interação pó-aglutinante .....	36
2.6.6.	Pós-processamento .....	36
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1.	Características técnicas do equipamento disponível.....	38
3.2.	Técnicas para caracterização do sistema de matéria-prima .....	39
3.3.	Processo de moagem e classificação dos rejeitos .....	41
3.4.	Metodologia de desenvolvimento de matéria-prima.....	42
4.	RESULTADOS .....	47
4.1.	Caracterização do sistema de matéria prima do fabricante.....	47
4.1.1.	Caracterização do líquido de deposição .....	47
4.1.2.	Caracterização do pó base .....	48
4.2.	Tamanho e formato das partículas moídas de rejeitos de ágatas .....	53

4.3.	Desenvolvimento da matéria-prima.....	56
4.3.1.	Formulação do primeiro sistema de matéria-prima – MPAG01 .....	56
4.3.2.	Testes de bancada da MPAG01 .....	57
4.3.3.	Confecção de corpos de prova – MPAG01 .....	58
4.3.4.	Caracterização tecnológica dos CP's de pó MPAG01 .....	61
4.3.5.	Formulação do segundo sistema de matéria-prima – MPAG02.....	64
4.3.6.	Testes de bancada da MPAG02.....	65
4.3.7.	Confecção de corpos de prova – MPAG02 .....	66
4.3.8.	Caracterização tecnológica dos CP's de pó MPAG02 .....	67
4.4.	Viabilidade financeira.....	73
4.4.1.	Custos associados ao sistema 3DP .....	74
4.4.2.	Custos para obtenção da matéria-prima a partir de rejeitos de ágata .....	75
5.	CONCLUSÃO.....	79
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros.....	81
6.	BIBLIOGRAFIA .....	83
	ANEXO 1 – Tabelas de ensaios e dados coletados .....	87

# 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresentam-se a contextualização, formulação do problema e das hipóteses, a definição dos objetivos, a justificativa e relevância do trabalho, a metodologia aplicada no projeto e cronograma. Por fim, é apresentada a estrutura do trabalho.

## 1.1. Contextualização

A intensificação da concorrência entre as empresas, aliada à crescente evolução dos produtos contemporâneos, vem exigindo reduções de tempo no processo de desenvolvimento de produtos, juntamente com o aumento da qualidade, competitividade e redução de custos. Essas ações envolvem vários aspectos, tanto gerenciais como da inserção de ferramentas e técnicas inovadoras que auxiliam no processo. (CHUA et al., 2003).

O protótipo de um produto ou componente é crucial para o seu desenvolvimento. Permite que diversas análises possam ser efetuadas, facilitando a comunicação entre os envolvidos no projeto e possibilitando a identificação de falhas de forma precoce. A utilização de protótipos pode ser encontrada desde a antiguidade e tem sofrido constantes alterações e inovações, principalmente a partir dos anos 80, com o advento da utilização de softwares CAD e do surgimento dos processos de prototipagem e manufatura rápida (VOLPATO et al., 2007).

Segundo Volpato et al. (2007), 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 “fatiamento” de um modelo tridimensional projetado via CAD. A Impressão 3D é apenas uma das inúmeras variações de processos de PR disponíveis no mercado. É uma ferramenta de fabricação digital direta, em que um líquido aglutinante é impresso seletivamente em um leito contendo material pulverulento, conforme as definições do modelo CAD. (UTELA et al. 2009b).

Uma das inúmeras aplicações para a PR está localizada no setor de Gemas e Joias, onde as empresas, principalmente as de menor porte, encontram um grande obstáculo a ser vencido, que separa o projeto do “Designer” e a fabricação tradicional de joias e artefatos. A PR se apresenta como uma ponte sólida para ligar o caminho entre estas duas etapas, reduzindo as limitações existentes e viabilizando a criação de produtos diferenciados e com maior valor agregado.

A cidade de Soledade/RS, onde se desenvolve este projeto, é conhecida internacionalmente como “Capital das Pedras Preciosas”. O setor de Gemas e Joias é responsável por grande parte da economia do município, possuindo atualmente, cerca de 180 (cento e oitenta) empresas e mais de 1.000 (um mil) empregos diretos (MARTINS, 2009).

O Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul (CTPGJRS) adquiriu, com o apoio financeiro do Ministério da Ciência e Tecnologia e da Prefeitura Municipal de Soledade/RS, um equipamento de PR via Impressão 3D a Jato de Tinta (3DP). Assim, através do subsídio de tecnologia, espera-se a popularização e utilização destas por empresas do SPL<sup>1</sup> de Gemas e Joias do Rio Grande do Sul. Mesmo assim os insumos e materiais recomendados pelo fabricante do equipamento possuem um custo bastante expressivo.

Em uma abordagem ecológica, a preocupação com o meio ambiente tem cada vez mais espaço nos meios industrial e acadêmico, em função das exigências sociais e governamentais. O setor de Gemas e Joias também se inclui nesse contexto, pois acaba gerando quantidade expressiva de rejeitos em seus processos de beneficiamento.

A estratégia de aumento da produtividade dos recursos naturais inclui o reaproveitamento e reutilização de rejeitos industriais. O uso de rejeitos gemológicos da indústria de beneficiamento de pedras preciosas como matéria-prima para a PR pode diminuir os custos associados ao processo, além de possibilitar a criação de novos produtos.

Recentemente, pesquisadores do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Washington conseguiram efetuar com sucesso a substituição do material de impressão, em um equipamento de mesmo fabricante e modelo do adquirido pelo CTPGJRS. Neste estudo, foram testadas diversas formulações com materiais distintos, incluindo materiais cerâmicos, como o vidro (UTELA et al. 2009a, MARCHELLI et al. 2011). É com

---

<sup>1</sup> SPL: Sistema Produtivo Local

base nesses estudos que se encontrou a inspiração e motivação para a realização desta pesquisa.

## **1.2. Delimitação do tema**

Segundo Chua et al. (2003) existem mais de 20 tipos de equipamentos de PR disponíveis no mercado, que se diferenciam basicamente pela forma e estado físico da matéria-prima (processos baseados em líquido, sólido e pó).

O equipamento disponível para a execução dos experimentos é a Impressora 3D ZPrinter 310 Plus®, fabricada pela empresa ZCorporation®, situada nos Estados Unidos. Este equipamento utiliza como matéria-prima material pulverulento (pó) e está instalado na sede do CTPGJRS, em Soledade/RS. O funcionamento do sistema, assim como suas características técnicas, estão descritos nas seções 2.5 e 3.1.

Os objetivos deste trabalho vão de encontro com a reutilização dos rejeitos gemológicos gerados no beneficiamento de pedras preciosas, em especial a ágata, efetuando as transformações necessárias a este material, ou seja, reduzindo estes rejeitos a forma de pó, possibilitando então a substituição da matéria-prima comercializada pelo fabricante do equipamento por um material com menor custo.

## **1.3. Formulação do problema**

Como o sistema de Impressão 3D pode ser utilizado para a fabricação de protótipos e artefatos, utilizando como matéria-prima rejeitos gemológicos da indústria de gemas e joias da região de Soledade/RS?

### **1.3.1. Hipóteses**

- A moagem adequada de rejeitos gemológicos da Indústria de Pedras Preciosas possibilita a utilização deste na formulação de uma matéria-prima de impressão 3D.
- É possível fabricar artefatos e protótipos, de alto nível de complexidade, via impressão 3D, utilizando matéria-prima oriunda de rejeitos de pedras preciosas.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo geral**

Desenvolver uma formulação de matéria-prima para impressão 3D de artefatos cerâmicos a partir de rejeitos gemológicos da indústria de pedras preciosas de Soledade/RS, com vista ao surgimento de um novo segmento de mercado para o SPL de Gemas e Joias, permitindo a fabricação de artefatos 3D.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- conhecer o estado da arte da tecnologia de impressão, seus materiais principais e propriedades físico-químicas;
- estudar os métodos de obtenção de matérias-primas de impressão 3D;
- efetuar a caracterização físico-química dos rejeitos que serão utilizados;
- desenvolver as formulações adequadas de matéria-prima de impressão 3D com base em rejeitos de pedras preciosas;
- obter protótipos fabricados via Impressão 3D com a matéria-prima desenvolvida;
- caracterizar os produtos obtidos;
- avaliar a viabilidade econômica do processo resultante.

## **1.5. Justificativa e relevância da pesquisa**

O município de Soledade/RS, cidade pólo do SPL de Gemas e Joias do Rio Grande do Sul, consolidou-se, nos últimos anos, como centro estadual no beneficiamento, comercialização e exportação de pedras preciosas. No município está instalada a sede do SINDIPEDRAS (*Sindicato das Indústrias de Joalherias, Mineração, Lapidação, Beneficiamento, Transformação de Pedras Preciosas do Rio Grande do Sul*), uma agência de aperfeiçoamento profissional do SENAI-RS, atuação sistemática do SEBRAE-RS, um campus da Universidade de Passo Fundo e a sede do CTPGJRS.

Incentivados pela política econômica, o segmento de pedras preciosas baseou-se por muitos anos apenas na exportação de gemas brutas, com muito pouco ou nenhum beneficiamento. Atualmente, a crescente desvalorização do dólar e a forte concorrência dos países asiáticos têm incentivado o crescimento do setor joalheiro e de artefatos.

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 – Depósito de rejeitos em empresa de Pedras Preciosas de Soledade/RS.**

A utilização do resíduo gerado no beneficiamento de pedras preciosas como matéria-prima para outros processos de beneficiamento, além de amenizar a questão ambiental, pode conferir ao SPL de Gemas e Joias uma nova gama de produtos, já que o processo de Impressão 3D pode construir praticamente qualquer tipo de objeto, independente de sua complexidade, de maneira totalmente automatizada e rápida, principalmente se comparado com a produção artesanal do mesmo tipo de produtos.

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. Assim, será possível efetuar uma grande diversificação de produtos, aquecendo o mercado atual e provendo novas fontes de emprego e renda.

Por fim, a utilização deste material, abundante na região de Soledade/RS, pode ser visualizada como uma alternativa, aliando o reaproveitamento de material considerado descartável com a popularização da utilização da 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 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.

## **1.6. Metodologia**

O desenvolvimento da pesquisa foi realizado em etapas, algumas sequenciais e outras em paralelo, descritas a seguir.

**Etapa 1** – Fundamentação Teórica: fase onde foram buscados os referenciais teóricos para o desenvolvimento do projeto de pesquisa. Os seguintes temas foram abordados:

- beneficiamento de pedras preciosas e seus resíduos resultantes;
- prototipagem rápida;
- impressão 3D via jato de tinta;
- sistemas de matérias-primas customizadas de 3DP.

**Etapa 2** – Estudo do equipamento disponível: fase onde estão foram estudadas e descritas as características do sistema de prototipagem rápida disponível. Além disso, foram efetuados experimentos com matéria-prima padrão. Engloba as seguintes sub etapas:

- descrição dos componentes e potencialidades da máquina;
- caracterização da matéria-prima – análises química, granulométrica, mineralógica e MEV-EDS.

**Etapa 3** – Desenvolvimento de nova matéria-prima: a partir dos estudos realizados, foram desenvolvidas as formulações de matéria-prima, além da execução de experimentos. Compreende os seguintes passos:

- definição dos pré-requisitos para a matéria-prima a ser desenvolvida;
- moagem dos resíduos de pedras preciosas;
- caracterização da matéria-prima desenvolvida – análises granulométrica, MEV-EDS;
- testes de aglutinação;
- confecção de corpos de prova;

**Etapa 4** – Caracterização tecnológica: fase onde os corpos de prova obtidos a partir das formulações foram avaliados quanto às propriedades desejadas.

- avaliação dos corpos de prova – resistência mecânica, desvios dimensionais e geométricos.

**Etapa 5** – Viabilidade econômica: fase onde as formulações desenvolvidas foram avaliadas economicamente, verificando a sua viabilidade de utilização.

## **1.7. Estrutura do trabalho**

Este trabalho está organizado em 6 capítulos. No capítulo 1 (aqui descrito) são apresentados os conceitos fundamentais ao seu entendimento, como a contextualização, a formulação do problema e hipóteses de pesquisa, justificativa e relevância do trabalho.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos teóricos necessários para a realização da pesquisa, englobando uma revisão bibliográfica acerca do setor de gemas e jóias, seus processos de beneficiamento e resíduos resultantes, assim como os principais processos de

prototipagem rápida. Também, estão descritos, de maneira mais aprofundada, o sistema de impressão tridimensional e o desenvolvimento de matérias-primas customizadas para impressão 3D.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, como as técnicas de caracterização e análises efetuadas e também é descrita a metodologia de moagem e formulação da matéria-prima.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos durante a execução do trabalho, da caracterização do sistema de matéria-prima disponibilizado pelo fabricante e todas as etapas cumpridas durante o desenvolvimento do trabalho em ordem cronológica.

O capítulo 5 apresenta as conclusões sobre o trabalho realizado e algumas considerações sobre trabalhos futuros. O capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas. Nos anexos, estão apresentadas algumas tabelas de dados registrados durante a execução do trabalho e planilhas de apoio a cálculos efetuados.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são descritos os referenciais teóricos buscados para a execução do trabalho. Primeiramente, é apresentado um panorama sobre o setor de Gemas e Joias e uma descrição sobre os processos de beneficiamento de ágatas encontrados em empresas do município de Soledade/RS. Em seguida, apresenta-se uma revisão sobre a Prototipagem Rápida, com ênfase no processo de Impressão 3D, seu estado da arte, o funcionamento da Impressora 3D disponível no CTPGJRS. Por fim, apresentam-se estudos correlatos encontrados sobre o desenvolvimento de sistemas customizados de matérias-primas para 3DP.

### **2.1. O setor brasileiro de Gemas e Joias**

O Brasil é, atualmente, um dos maiores fornecedores mundiais de gemas de cor, sendo conhecido pela qualidade, diversidade e dimensão dos minerais produzidos. Estima-se que o país seja responsável por cerca 1/3 do volume de gemas no mundo, excetuados o diamante, rubi e safira, e deste volume, cerca de 80% é exportado, tanto em bruto como lapidado (IBGM, 2008).

Há ocorrência de pedras preciosas em quase todo o Brasil, mas a maior parcela da produção é concentrada nos estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Bahia, Goiás, Pará e Tocantins. Na região sul do país, as gemas mais conhecidas e de maior volume de produção são a Ágata e a Ametista, sendo que Estado do Rio Grande do Sul é considerado um dos maiores fornecedores destes materiais para o mercado internacional. Nesta região também são encontrados importantes depósitos de opala, rubi, safira, diamante, serpentinito e madeira petrificada (JUCHEM et al., 2009 e 2010). A Figura 2 mostra as ocorrências gemológicas na região sul do Brasil.

O SPL de Gemas e Joias gaúcho é considerado um dos 5 maiores do setor no país. Envolve toda a cadeia produtiva, desde a extração das gemas das jazidas até o beneficiamento e comercialização dos produtos finais, sejam eles joias, gemas brutas ou artefatos (BATISTI & TATSCH, 2008). No Brasil, estima-se que exista cerca de 2.170 indústrias ligadas à cadeia produtiva de Gemas e Joias, e, considerando as empresas de varejo, este número pode chegar

a 18.170 empresas. Este universo é formado, principalmente, por micro e pequenas empresas, que representa cerca de 95% deste total (IBGM, 2008).

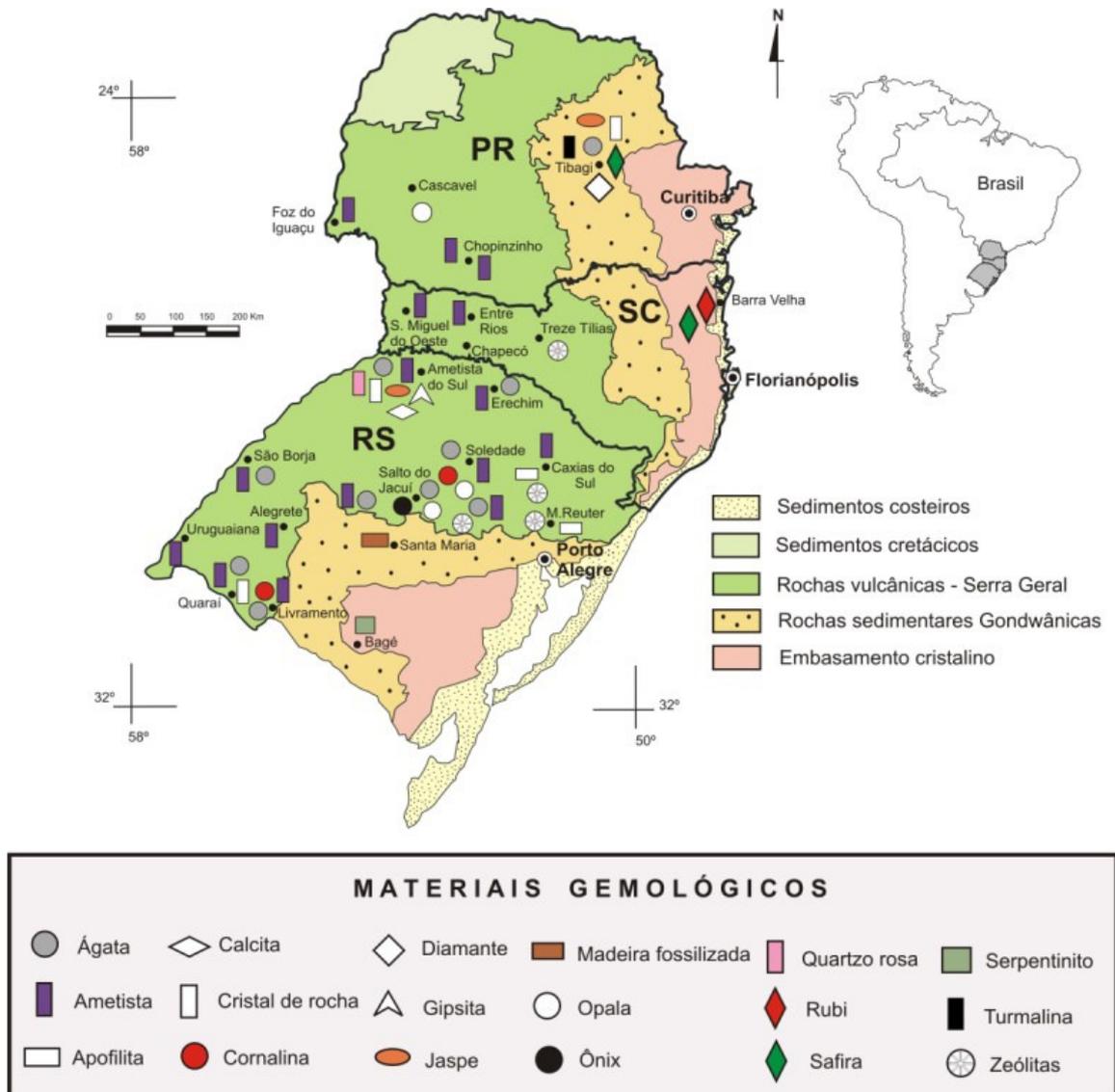


Figura 2 – Mapa gemológico da região sul do Brasil. (Juchem et al. 2009).

A indústria gaúcha de pedras preciosas também é caracterizada por muitas micro e pequenas empresas, refletindo o cenário nacional. As grandes empresas dominam o mercado de comercialização, sendo que as pequenas empresas se especializam em fabricar certos tipos de produtos para atender as demandas das empresas maiores, o que gera um grande nível de informalidade no setor (COSTENARO, 2005).

Historicamente, a maior parcela das gemas produzidas no Estado do Rio Grande do Sul é exportada em bruto, ou recebe pouco beneficiamento (JUCHEM et al. 2009). Os produtos beneficiados no Estado são também repetitivos e sem diferencial inovador, girando

em torno de pedras brutas (geodos, druzas ou cristais), pedras serradas (para a fabricação de encostos de livros, cinzeiros, chaveiros), artefatos simples (esferas, porta copos, cabos de talheres, porta velas) e também, em menor número, gemas lapidadas (BATISTI & TATSCH, 2008). A Tabela 1 mostra um levantamento efetuado pelo IBGM sobre os números de exportação brasileira do setor de gemas e joias no período de 2009 a 2010. Já a Tabela 2 mostra a participação Gaúcha nas exportações do Setor, no período de 2007 a 2008.

**Tabela 1 – Exportação brasileira do setor de gemas e joias no período de 2009 a 2010.**

<b>Principais Itens</b>	<b>2010</b>	<b>2009</b>	<b>2010/09</b>
Pedras em Bruto	US\$ 19.763	US\$ 41.494	27%
Pedras Lapidadas	US\$ 45.173	US\$ 36.406	9%
Obras e Artefatos de Pedras	US\$ 8.898	US\$ 8.668	3%
Prata em Barra, Fios, etc	US\$ 5.992	US\$ 1.248	380%
Ouro em Barras, Fios e Chapas	US\$ 960.880	US\$ 690.730	39%
Produtos de Metais Preciosos p/ Indústria	US\$ 51.121	US\$ 49.471	3%
Joalheria / Ourivesaria Metais Preciosos	US\$ 61.474	US\$ 54.285	13%
Folheados de Metais Preciosos	US\$ 32.949	US\$ 24.415	35%
Outros Resíduos e Desperdícios de Metais	US\$ 66.245	US\$ 33.567	97%
Bijuterias de Metais Comum	US\$ 10.222	US\$ 9.910	3%
Outros Produtos	US\$ 6.608	US\$ 113	5.748%
<b>Total</b>	<b>US\$ 1.269.325</b>	<b>US\$ 929.505</b>	<b>37%</b>

Fonte: MDIC/SECEX/DEPLA.

Elaboração: IBGM, 2010.

Observando o cenário nacional, houve crescimento das exportações de gemas lapidadas e artefatos no período considerado e uma diminuição de exportações de gemas em bruto, indicando uma tendência de renovação do foco do setor. Já no Rio Grande do Sul, apesar de também existir este aumento, este foi menos expressivo (os períodos considerados foram diferentes devido à disponibilidade dos dados pelo IBGM), contudo, estima-se que estas cifras poderiam ser muito maiores se houvessem mais investimentos em tecnologia e inovação no beneficiamento.

Segundo Juchem et al. (2009) “A lapidação de gemas para uso em joalheira é pequena se comparado com o volume da produção”. Costa (2007) salienta que os processos de beneficiamento de gemas no Vale do Taquari (RS) são artesanais e de baixíssima automação. Já Costenaro (2005) destaca que o setor de Gemas e Joias sofre uma forte concorrência dos países asiáticos, principalmente China e Taiwan, pois estes países possuem mão-de-obra abundante e de baixo custo, o que faz com que seus produtos sejam mais competitivos do que os produzidos no Estado.

**Tabela 2 – Participação do Estado do Rio Grande do Sul na exportação brasileira de gemas e metais preciosos.**

<b>Principais Itens</b>	<b>2008</b>	<b>2007</b>	<b>2007/08</b>
Pedras em Bruto	US\$ 2.901	US\$ 2.662	9%
Pedras Lapidadas	US\$ 5.740	US\$ 5.540	4%
Obras e Artefatos de Pedras	US\$ 1.839	US\$ 1.769	4%
Ouro em Barras, Fios e Chapas	US\$ 0	US\$ 0	0%
Produtos de Metais Preciosos p/ Indústria	US\$ 0	US\$ 0	0%
Joalheria / Ourivesaria Metais Preciosos	US\$ 135	US\$ 106	27%
Folheados de Metais Preciosos	US\$ 1.343	US\$ 1.455	-8%
Bijuterias de Metais Comum	US\$ 1.844	US\$ 1.392	32%
Outros Produtos	US\$ 6	US\$ 0	0%

Fonte: MDIC/SECEX/DEPLA.

Elaboração: IBGM, 2010.

Historicamente, as cidades de Lajeado e Estrela foram precursoras das pequenas “fabriquetas” de beneficiamento de pedras no Estado, oriundas da vocação dos imigrantes alemães da região de Idar-Oberstein, capital alemã da indústria de gemas. Os alemães dominavam as técnicas de extração e beneficiamento de gemas no início do século XX, e devido as dificuldades financeiras 1ª guerra mundial, várias famílias estabeleceram-se no Rio Grande do Sul. A partir do final da década de 70, houve um deslocamento da indústria de Lajeado para Soledade, por estar mais próxima das regiões produtoras e por contar com mão-de-obra mais barata (COSTENARO, 2005).

Após este deslocamento, desenvolveu-se um verdadeiro pólo de indústrias no setor de pedras preciosas, sendo que o município de Soledade/RS (cidade pólo do SPL de Gemas e Joias do Rio Grande do Sul) consolidou-se, nos últimos anos, como centro estadual no beneficiamento, comercialização e exportação de pedras preciosas.

O município de Soledade também se destaca pela organização de uma das maiores feiras de pedras preciosas da América Latina, que faz parte de um evento denominado EXPOSOL. A Tabela 3 mostra a evolução dos números da Exposol nos últimos anos.

Tabela 3 – Dados referenciais da EXPOSOL.

Ano de realização	EXPOSOL - Exposição Feira de Soledade					
	Dados Gerais do Evento		Feira de Pedras Preciosas Expositores			
	Expositores	Visitantes	Pedras em Bruto	Jóias e Artefatos	Serviços	TOTAL
2007	580	120.000	53	8	6	67
2008	720	100.000	41	13	2	56
2009	720	120.000	27	17	2	46
2010	720	145.000	35	27	9	65

Fonte: SINDIPEDRAS<sup>2</sup>.

Pode-se visualizar o fortalecimento do setor joalheiro do Rio Grande do Sul, assim como o crescimento da demanda por produtos de maior grau de beneficiamento. Além de possuírem maior valor agregado que as pedras comercializadas em bruto, a cadeia produtiva de jóias e artefatos gera emprego e renda para um número maior de pessoas, utiliza-se de maior nível de tecnologia e possibilita que o produto seja vendido também no mercado interno, e não seja destinado exclusivamente à exportação.

## 2.2. Beneficiamento de pedras preciosas no RS

O beneficiamento de pedras preciosas envolve diversas etapas e subgrupos de serviços. Segundo o IBGM (2008), a cadeia produtiva de Gemas, Jóias e afins:

*... compreendem desde a extração mineral, a indústria de lapidação, artefatos de pedras, a indústria joalheira e de folheados, bijuterias, os insumos, matérias-primas e as máquinas e equipamentos usados no processo de produção, além das estratégias de marketing e a incorporação do design aos produtos...*

No Estado do Rio Grande do Sul, esta cadeia divide-se em microrregiões, onde em cada uma destas agrupa-se um determinado tipo ou grupo de atividades, de acordo com a vocação local e recursos disponíveis.

### 2.2.1. Extração de ágata

No Estado do Rio Grande do Sul, existe ocorrência de diversos minerais, como o Serpentino oriundo de Bagé, e uma das maiores florestas petrificadas do mundo, localizada na

<sup>2</sup> Informação recebida via e-mail.

região de São Pedro do Sul, porém, os depósitos de ágata e ametista são os mais conhecidos e de maior produção no estado (JUCHEM et al, 2009 e 2010).

Os principais depósitos de ágata estão localizados no distrito mineiro de Salto do Jacuí, na região central do estado, porém, diversos depósitos são explorados na extensão que vai de Salto do Jacuí à Soledade (JUCHEM et al, 2009 e 2010; OLIVEIRA et al. 2010). A exploração ocorre em garimpos a céu aberto, com o auxílio de retro-escavadeiras que efetuam o corte do terreno enquanto os garimpeiros fazem a coleta dos geodos aflorados. A Figura 3 mostra uma frente de lavra em Salto do Jacuí, onde se pode visualizar como é efetuado o processo de extração.



**Figura 3 – Frente de extração de Ágata em Garimpo de Salto do Jacuí/RS.**

Os trabalhadores utilizam os garfos da retro-escavadeira para que a terra fique mais solta e possibilite erodir o solo. Em seguida, utiliza-se a pá do equipamento para empurrar o solo, enquanto os garimpeiros fazem a procura dos geodos. Quando algum deles avista um geodo ou um grupo destes, comunica ao operador da retro-escavadeira através de um sinal e este interrompe o avanço, possibilitando a coleta destes geodos. O processo se repete.

Quando é efetuada a coleta de um número significativo de geodos, estes são transportados para outra parte do garimpo, onde são classificados de acordo com seu tamanho e qualidade (COSTENARO, 2005). A classificação é executada manualmente conforme a experiência dos garimpeiros, que partem uma “lasca” do geodo para visualizar o seu interior. A Figura 4 A mostra um lote de geodos antes da classificação, e a Figura 4 B uma pilha de material gemológico classificado como refugo.



A – Lote por classificar

B – Pilha de rejeitos

**Figura 4 – Lotes de Classificação de geodos de Água.**

De acordo com alguns proprietários dos garimpos, a maior parte do volume extraído é exportado diretamente para países asiáticos, mas também uma parcela do volume desta extração é vendido para as fábricas de Soledade e Lajeado, para abastecer a produção de artefatos e gemas lapidadas.

Para Tessman (2009), o “Mix de produtos fabricados em água é bastante variado, porém, os produtos são repetitivos, com pouca ou nenhuma inovação tecnológica, ficando distante das tendências mundiais do mercado”, fato que se comprova ao visitar as grandes empresas que comercializam os produtos na região de Soledade/RS.

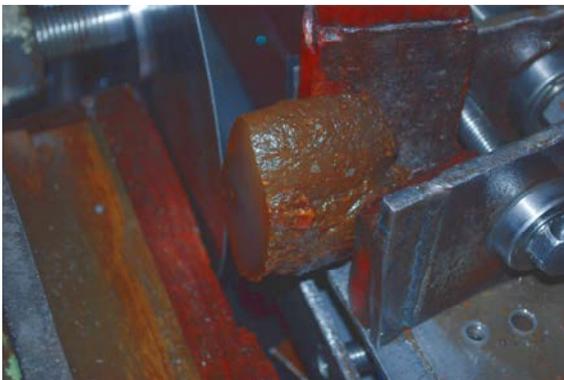
### **2.2.2. Beneficiamento de água**

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).

O principal material gemológico beneficiado no município é a água. Os processos de beneficiamento realizados pelas 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 (TUBINO, 1998; COSTA, 2007). Este contexto envolve várias etapas e pormenores, que se estendem desde a extração (já descrita na seção 2.2.1) ou compra da matéria-prima até a obtenção do produto manufaturado e sua comercialização. Segundo Tubino (1998) e Costenaro (2005), os processos podem variar conforme o tipo ou qualidade da pedra, mas geralmente envolvem etapas pré-definidas,

utilizando-se do maquinário já instalado, e se divide em 3 (três) etapas distintas: corte de geodos, tingimento e acabamento.

**Corte dos geodos:** A primeira etapa do processo (corte) se inicia com a seleção dos geodos que serão beneficiados, os quais são submetidos a uma lavagem, a fim de retirar o excesso de areia e argila. Após, estes são deslocados até o setor de corte, para serem serrados em chapas de diversos tamanhos, onde se pode utilizar tanto máquinas automáticas como semi-automáticas (Figura 5). O corte é feito através de serras diamantadas no interior das máquinas, lubrificadas a óleo diesel. As chapas são lavadas com o auxílio de um detergente industrial para efetuar a remoção dos resíduos de óleo das chapas, sendo posteriormente lavadas com água corrente e secas ao sol.



A – Detalhe de fixação de um geodo no equipamento de serrar.



B – Conjunto de máquinas de serrar instaladas em uma fabriquetta de Soledade/RS.

**Figura 5 – Máquinas utilizadas no corte de geodos de Ágata.**

O corte de geodos é responsável pela produção de grande volume de resíduos. Segundo Laimer (2008) os principais resíduos gerados no processo de corte das gemas são: cascalho, pó de pedra, xispa, barro, água com óleo, água com detergente e poeira. O maior volume de resíduos é proveniente do material retirado do geodo pela serra, que se mistura com o óleo diesel lubrificante, contaminando e inutilizando-o depois de certo período de trabalho.

Em algumas fábricas, este lodo é misturado manualmente com água, a fim de promover a separação do óleo diesel, a fim de reaproveitá-lo, e em outras, esta mistura é feita em uma betoneira. Segundo algumas empresas, é possível reaproveitar cerca de 50% do óleo diesel utilizado em cada máquina, e o ciclo de vida de uma carga de óleo na máquina varia entre 3 a 7 dias, dependendo do volume da máquina e da frequência de utilização.

Além dos resíduos gerados no processo, outra forma de rejeitos produzidos durante o processo de corte são as chapas quebradas, com trincas ou de qualidade inferior que não possuem valor comercial expressivo, e acabam se acumulando em tonéis e caixas pela fábrica. Estes rejeitos são, na maioria, misturados a outros refugos de produção e vendidos por preços bastante reduzidos, e são utilizados para a produção de pequenos artefatos, pingentes e chaveiros.

**Tingimento:** O tratamento termo-químico, popularmente chamado de tingimento, é a segunda etapa deste processo de beneficiamento. As chapas que saem da etapa de corte são novamente classificadas, sendo que algumas não são encaminhadas ao tingimento, devido a suas características visuais ou de preenchimento (massa). O tingimento tem por objetivo melhorar e ressaltar características ópticas das gemas, através da infiltração de produtos químicos nas porosidades da pedra, garantindo assim uma diversificada linha de cores (ROISENBERG & VILASBÔAS, 2010).

Segundo Brum & Silva (2010), as ágatas submetidas ao tingimento recebem tratamento específico para cada cor desejada, ou seja, cada cor tem o processo e materiais específicos. As cores mais utilizadas para o tingimento são o azul, verde, vermelho, rosa, roxo e verde claro. Em geral o processo demora de oito dias (tingimento orgânico) a vinte dias (tingimento inorgânico), sendo que as pedras podem ficar imersas em solução desejada por cerca de 15 dias em alguns casos. A Figura 6 apresenta recipientes de imersão de ágatas em pequena empresa de Soledade/RS.

Os principais resíduos gerados nesta etapa, segundo Laimer (2008) são grandes volumes de água com ácidos diversos, corantes, sabão, álcool e anilina. Algumas empresas possuem estação de tratamento para estes. Ainda, as empresas de menor porte, que não possuem estação de tratamento própria, podem estocar os seus resíduos e enviar a um local adequado de tratamento, como a AEP SENAI de Soledade-RS.



Figura 6 – Tingimento de ágata em pequena empresa de Soledade/RS.

**Acabamento:** A terceira e última etapa do processo é o acabamento, ou lixamento e polimento, como o processo é popularmente chamado. A princípio, esta etapa consiste em usinar as chapas de ágata em lixadeiras, processo que gera elevado volume de pó (Figura 7). As chapas são prensadas manualmente contra a lixa, até que se obtenha uma superfície lisa e adequada.



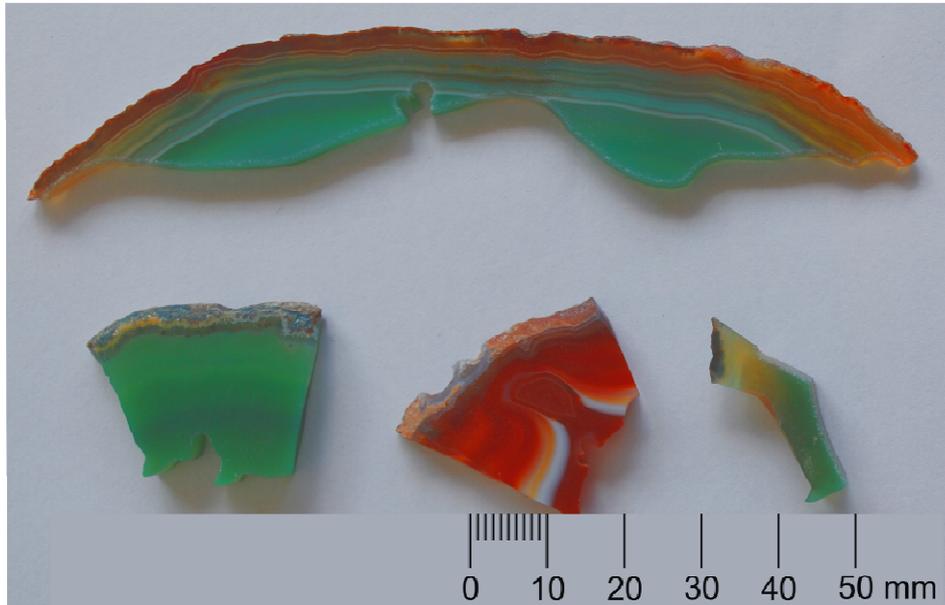
Figura 7 – Lixamento e polimento de ágatas em empresa de Soledade/RS.

O polimento fino é realizado em peças mais finas e delicadas, e é realizado em rodas expansivas e em feltros com o auxílio de abrasivos (trípoli). Segundo Costenaro (2005) esta é a etapa mais rudimentar de todo o processo, e que necessita de maior nível de aprimoramento, devido a baixa produtividade e qualidade final questionável.

### **2.3. Rejeitos gemológicos**

Para a formulação da matéria-prima foram utilizados rejeitos oriundos do beneficiamento de ágata, sobretudo pedaços trincados, quebrados de pequeno tamanho

(Figura 8) ou sobras da fabricação de formatos diversos. 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 8 – Rejeitos gemológicos de ágata.**

A grande diferença entre os rejeitos está no seu estado de beneficiamento. Podem ser encontrados rejeitos totalmente brutos, classificados ainda no garimpo (Figura 4 B) e que estão livres de qualquer contaminação com produtos químicos. Rejeitos oriundos das etapas de corte, lixamento e polimento podem conter óleo diesel (utilizado na lubrificação e refrigeração do processo de corte) e grãos abrasivos que se desprendem das ferramentas. Porém, o maior nível de contaminação se constata em rejeitos tingidos, pois as colorações são obtidas através de processos distintos, sendo expostos a produtos químicos e temperaturas elevadas por determinados períodos de tempo. O Quadro 1 mostra um resumo desta classificação.

**Quadro 1 – Resumo da classificação dos rejeitos gemológicos.**

<i>Processo</i>	<i>Tipo de rejeito</i>	<i>Possíveis contaminantes</i>	<i>Imagem</i>
<b>Extração</b>	Lascas e pedaços de baixa qualidade	Não possui	
<b>Corte</b>	Cascas, pedaços trincados, sobras	Óleo lubrificante	
<b>Lixamento</b>	Peças trincadas e quebradas	Carbureto de silício e outros abrasivos	
<b>Polimento</b>	Peças trincadas e quebradas	Trípoli e outros abrasivos	
<b>Tingimento</b>	Peças defeituosas, trincadas e quebradas	Produtos químicos diversos	
<b>Corte a jato de água</b>	Negativos, rebarbos, sobras	Abrasivo de corte (granada)	

## **2.4. Prototipagem Rápida**

A Prototipagem Rápida (PR) é um processo de fabricação baseado nos princípios de adição de material. A construção é feita a partir da sobreposição de camadas planas sucessivas, oriundos de um modelo geométrico tridimensional previamente projetado em um sistema CAD. Dessa forma, é possível compor uma peça complexa de maneira precisa, rápida, automatizada e flexível, a partir do modelo sólido gerado no sistema CAD (CHUA et al. 2003).

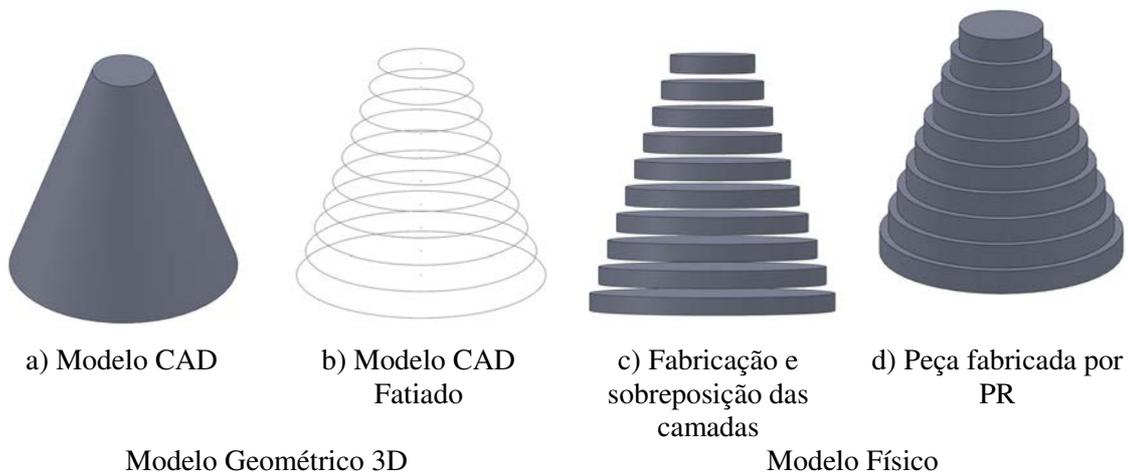
Para Gorni (2001), as tecnologias de PR possuem diversas vantagens em muitas aplicações, comparados aos processos convencionais de fabricação como o fresamento e o torneamento, permitindo a rápida criação de protótipos concretos. Segundo este autor, a economia de tempo e de custos proporcionada pela aplicação da PR na construção de modelos é da ordem de 70 a 90%.

Segundo Volpato et al. (2007), diversas denominações são aplicáveis às técnicas de PR, como Manufatura por Camada (*Layer Manufacturing*), Fabricação Forma Livre (*Solid Freeform Fabrication*) Manufatura de Bancada (*Desktop Manufacturing*) e Manufatura Acrescendo Material (*Material Ingress Manufacturing*). Porém, a denominação original é a que mais tem prevalecido.

O primeiro sistema comercial de PR foi o processo de Estereoligrafia (*StereoLithography Apparatus - SLA*), da empresa americana 3D Systems. Após este lançamento, inúmeras outras tecnologias de PR foram desenvolvidas, sendo que atualmente, mais de 20 diferentes sistemas de PR são comercialmente conhecidos (Chua et al. 2003).

### **2.4.1. Funcionamento**

Mesmo com tantas tecnologias diferentes, todos os sistemas de PR baseiam-se no princípio de manufatura por camada, ou seja, a máquina de prototipagem divide o modelo geométrico virtual 3D do objeto em camadas paralelas equidistantes entre si, e vai produzindo o objeto sólido a partir da adição sucessiva dessas camadas (Figura 9).



**Figura 9 – Princípio básico de funcionamento da Prototipagem Rápida. (Adaptado de Volpato et al. 2007).**

Por serem baseadas no mesmo princípio, os sistemas de PR apresentam etapas de processo bastante similares. Conforme Volpato et al, (2007), de uma maneira geral, os sistemas de PR compreendem as seguintes etapas:

- 1º) Obtenção do modelo 3D, a partir de softwares CAD (modelagem 3D) ou ainda através da digitalização tridimensional;
- 2º) Geração da geometria da peça no padrão triangular STL<sup>3</sup>;
- 3º) Verificação da integridade dos arquivos de dados;
- 4º) Planejamento do processo – fatiamento, definição das áreas de suporte e estratégias de deposição de material;
- 5º) Fabricação (construção do protótipo);
- 6º) Pós-processamento – Cura, limpeza e acabamento.

#### 2.4.2. Aplicações

Os sistemas de PR podem ser aplicados nos mais diversos ramos da indústria, como nas engenharias automotiva e aeronáutica, marketing, arquitetura e design, além de possuir grande potencial para utilização nos estudos paleontológicos e de restaurações e também como ferramenta de apoio à educação (CARVALHO, 1999).

<sup>3</sup> O formato de arquivo STL foi criado pela empresa 3D Systems, juntamente com o processo de Estereolitografia, e é utilizado pela maioria dos sistemas de PR (Volpato et al. 2007).

No setor joalheiro, a inserção da PR no processo produtivo proporciona um diferencial de qualidade e inovação. As primeiras experiências relatadas por Chua et al. (2003), ocorreram no final dos anos 90. Porém, a qualidade das peças finais não atendia as exigências do mercado, necessitando muitas operações de acabamento. Além disso, o nível de precisão necessário e os materiais utilizados na época não se adequavam plenamente ao processo.

Contudo, houve um avanço significativo das tecnologias de PR, o que proporcionou o desenvolvimento de equipamentos próprios para serem utilizados na joalheria, como a linha DigitalWax®, da empresa italiana DWS. Estes equipamentos funcionam pelo princípio de Estereolitografia (ver seção 2.4.4), possuindo uma resolução que pode chegar a 0,01 milímetros. Os modelos são fabricados em resinas específicas, que podem ser usadas tanto para produzir uma peça piloto (para a fabricação do molde de silicone) como ser utilizada diretamente na árvore de fundição (BQZ, 2010). A Figura 10 mostra exemplos de peças fabricadas com este equipamento.



**Figura 10 – Modelos confeccionados em equipamento de PR de alta resolução (BQZ, 2010).**

Volpato et al. (2007), relata que a utilização de sistemas de PR na joalheria permite que a liberdade de criação que ocorre a mão livre possa ser transferida para o meio virtual e utilizada na confecção da peça final, pois como os sistemas de PR trabalham com a adição de materiais, torna-se possível fabricar geometrias complexas, que são inviáveis ou não alcançadas por processos convencionais. Além disso, como os custos associados à fabricação de matrizes e pilotos por processos convencionais são elevados, a redução de custos proporcionada pela utilização da PR também viabiliza a produção de pequenos lotes e de peças exclusivas pelo processo de Fundição por Cera Perdida (CHUA et al. 2003).

### 2.4.3. Classificação

Existem inúmeros sistemas comerciais de PR disponíveis, que se utilizam de diferentes métodos de deposição de material, mas funcionando através do mesmo princípio. A fim de organizar estes muitos sistemas e agrupá-los conforme características semelhantes, Chua et al. (2003) propuseram uma categorização levando em conta o estado inicial da matéria-prima utilizada para fabricação: líquido, sólido e pó.

**Processos Baseados em Líquido:** a matéria-prima encontra-se no estado líquido e através de um processo de cura é convertido em sólido com a ajuda de laser ou luz ultravioleta.

**Processos Baseados em Sólidos:** o material encontra-se no estado sólido, podendo estar em forma de filamento, rolo, laminado, ou grânulos.

**Processos Baseados em Pó:** possuem propriedades intermediárias entre o sólido e o líquido. Para o seu processamento, pode ser utilizado o laser ou até mesmo um jato de tinta, no qual é liberado um aglutinante na composição do protótipo.

Esta classificação é importante, pois separa os diferentes sistemas através de uma de suas diferenças mais evidentes. Apesar disto, somente esta análise não possibilita a escolha de um ou outro grupo para uma determinada aplicação, já que, devido aos muitos meios de deposição disponíveis, a resolução entre dois sistemas de mesmo grupo pode variar significativamente, inviabilizando a sua utilização. Além disso, outros fatores devem ser levados em conta, como a natureza do material processado, o custo associado a este material, a capacidade produtiva, entre outros.

### 2.4.4. Sistemas de PR: Características, vantagens e limitações

Segundo Lino e Neto (200?), não existem processos de PR ideais, ou seja, cada sistema apresenta suas vantagens e limitações referentes a uma determinada aplicação. Características como acabamento superficial, resistência do material da peça final e necessidade de pós-processamento são peculiares a cada sistema, e mesmo estes separados em grupos, estas informações são necessárias para a escolha do melhor sistema para cada finalidade desejada.

Na literatura foram encontrados diversos trabalhos acadêmicos que tinham por objetivo comparar as propriedades de diversos sistemas de PR e verificar a sua aplicabilidade. O mais completo comparativo encontrado foi descrito por Volpato et al. (2007). O Quadro 2 mostra um resumo, elaborado no trabalho citado, em que estão reunidas diversas informações sobre os sistemas de PR disponíveis comercialmente.

**Quadro 2 – Sumário de alguns sistemas de PR (Adaptado de Voltato et al., 2007)**

Sistema de PR	Sigla	Fabricante	Princípio base	Custo do protótipo	Precisão	Acabamento Superficial
Estereolitografia	SL, SLA	3D Systems	Líquido	Alto	Alta	Excelente
InkJet Polyjet	IJP	Objet	Líquido	Médio	Média	Bom
Modelagem por Fusão e Deposição	FDM	Stratasys	Sólido	Médio-Alto	Média	Regular
Manufatura Laminar de Objetos	LOM	Cubic	Sólido	Baixo	Baixa	Ruim
Tecnologia em Lâminas de Papel	PLT	Kira	Sólido	Baixo	Baixa	Ruim
Sinterização Seletiva a Laser	SLS	3D Systems	Pó	Alto	Média	Bom
Impressão 3D a Jato de Tinta	3DP	Z Corporation	Pó	Baixo	Baixa	Regular
Impressão 3D de Metais	3DP ProMetal	Ex One	Pó	-	Baixa	Regular

Segundo Utela et al (2010), o sistema de Impressão Tridimensional a Jato de Tinta (3DP) é o que melhor se adapta a utilização de matérias-primas customizadas, além de ser o único sistema disponível que se utiliza de matéria-prima em forma de pó (possibilita a utilização de rejeitos sólidos como matéria-prima) e que não necessita de laser (viabiliza a utilização da tecnologia com menor investimento). Por ter maior relevância para este trabalho, sendo o sistema escolhido para o desenvolvimento da pesquisa, é descrito com maiores detalhes na seção 2.5.

## **2.5. 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). Equipamento semelhante a este foi adquirido pelo CTPGJRS e disponibilizado para uso na pesquisa (Figura 11).



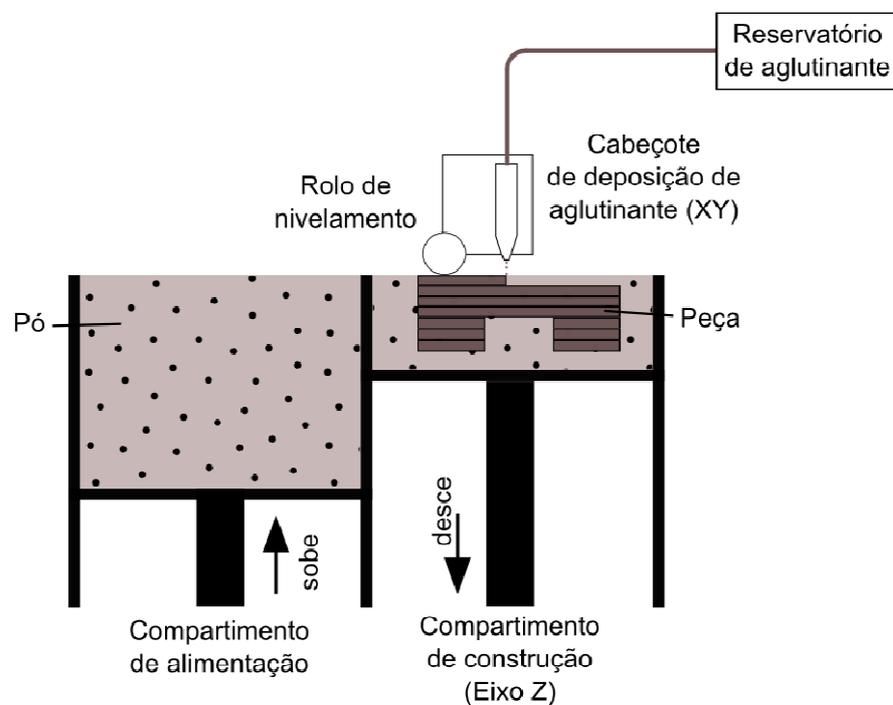
A – Equipamento 3DP



B – Estação de limpeza e reciclagem do pó

**Figura 11 – Equipamentos do sistema 3DP.**

O sistema 3DP utiliza-se de matéria-prima em forma de pó. É 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. 2009b). A Figura 12 mostra um esquema do processo.

**Figura 12 – Esquema do processo de 3DP (Adaptado de Volpato et al, 2007).**

No sistema 3DP, existem dois compartimentos, um de alimentação de matéria-prima e outro de construção. O pó é transportado da alimentação e é espalhado sobre a plataforma de

construção da máquina através de um rolo de nivelamento. Em seguida, um cabeçote de impressão (o mesmo utilizado em impressoras convencionais a jato de tinta) 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 (VOLPATO et al. 2007). A Figura 13 mostra algumas peças fabricadas com o sistema 3DP.

Chua et al. (2003), afirma que o sistema 3DP é o processo de PR mais rápido disponível no mercado. Outros benefícios citados por Volpato et al. (2007) 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, Utela et al. (2009b) enfatizam que 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.



**Figura 13 – 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<sup>4</sup> disponíveis e o seu alto custo (VOLPATO et al. 2007; UTELA et al. 2009b). Apesar disto, este sistema proporciona uma potencialidade singular de desenvolvimento de novas matérias primas, pois

---

<sup>4</sup> O fabricante disponibiliza algumas opções de matérias primas: a base de cerâmicas, de polímeros elastoméricos, celulose, gesso, entre outros (Z Corporation, 2007).

o principal pré-requisito para um material ser utilizado como base é a sua capacidade de ser levado a forma de pó, característica fundamental para a execução deste trabalho.

### **2.5.1. Etapas do sistema 3DP**

Muitas etapas do processo de fabricação via PR são genéricas a todos os sistemas, como os procedimentos já descritos na seção 2.4.1. Porém, cada sistema possui particularidades e cuidados especiais diferentes, devido às diferenças entre o estado inicial da matéria-prima, de como esta foi processada (laser, aglutinante, cola, mudança de estado físico, etc.) que devem ser levados em conta.

Um modelo 3D é gerado, em software CAD ou através de digitalização 3D. Em seguida, o modelo 3D é transformado em uma malha triangular e exportado em formato \*.stl, o que possibilita o fatiamento. De posse da malha triangular e das curvas de níveis, o usuário pode verificar a integridade dos dados, efetuar as correções necessárias, e simular a construção da peça. Nesta etapa é possível identificar possíveis erros de construção para reduzir a perda de material.

A construção da peça é uma etapa totalmente automatizada, sendo que a principal tarefa do usuário é preparar o equipamento para a construção, através do nivelamento dos compartimentos.

Após a impressão, é necessário aguardar cerca de uma hora (período de pré-cura) para eliminar o excesso de líquido e possibilitar o manuseio e facilitar as operações de pós-processamento. Estas operações incluem a limpeza da peça, onde se retira o pó excedente com o auxílio de jatos de ar comprimido e pincéis, e a infiltração.

A infiltração é efetuada utilizando uma resina a base de cianoacrilato, que confere maior resistência mecânica ao material ao entrar nas porosidades da peça. Ainda, podem ser executadas operações de lixamento e pintura (alguns equipamentos já fazem a impressão do objeto em cores, eliminando esta operação), conforme se desejar (UTELA et al. 2009b).

### **2.5.2. Precisão das peças fabricadas no sistema 3DP**

As peças fabricadas pelo sistema 3DP apresentam algumas características peculiares, entre as quais se podem destacar a anisotropia, o efeito degrau e os desvios dimensionais e de

forma, que afetam diretamente na precisão das peças fabricadas por este sistema (VOLPATO et al. 2007).

Os **desvios dimensionais e de forma** são, sem dúvida, os que causam maiores problemas na obtenção da peça final. A precisão dimensional é um grande desafio no sistema 3DP, pois depende não só das configurações do equipamento, mas também de fatores ambientais e operacionais que podem afetar nas propriedades físicas da matéria-prima, causando deformações na peça final. Segundo Dimitrov (2005), existem diversos fatores que influenciam na precisão dimensional dos objetos fabricados por Impressão 3D, dentre os quais pode se destacar:

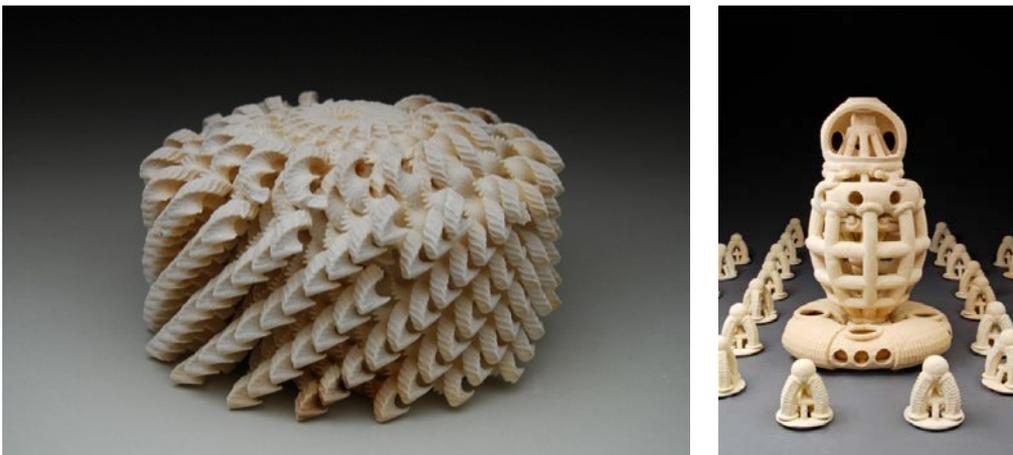
- natureza do material utilizado;
- tamanho das peças desejadas;
- orientação de construção em relação aos diferentes eixos;
- características geométricas e topologia da peça;
- espessura de parede – cascas e sólidos;
- pós-processamento;
- agente infiltrante.

Tomando por base estas considerações, nota-se que a fabricação de uma peça ou produto pelo sistema 3DP é mais complexa do que aparenta em uma análise inicial. O material e o meio de aglutinação utilizado no sistema influenciam diretamente no projeto do modelo CAD da peça, pois através disso que serão definidos parâmetros como a espessura mínima de parede e a relação estrutural que permita a utilização de partes suspensas em determinados locais do modelo. Além disso, a orientação de construção interfere não somente na resistência mecânica da peça final, mas também nos processos de retirada, limpeza e infiltração. Ainda, segundo o fabricante, as peças fabricadas pelo sistema 3DP podem sofrer retração ou encolhimento após a construção, alterando formas e dificultando possíveis encaixes.

## **2.6. Desenvolvimento de matérias-primas customizadas para o sistema 3DP**

O sistema 3DP disponível no CTPGJRS 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 matéria-prima a base de gesso, utilizada para a produção de modelos conceituais, uma a base de amido, para utilização em processo de Fundição por Cera Perdida, uma polimérica que dá ao modelo impresso uma aparência emborrachada e uma utilizada para a fundição direta de metais (Z CORPORATION, 2007).

Porém, mesmo com toda 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 matéria-prima, possibilitando a aplicação desta tecnologia não só associada ao desenvolvimento de produtos, mas também atendendo a outros segmentos, como as artes plásticas (Figura 14).



**Figura 14 – Objetos cerâmicos fabricados em sistema 3DP (Fonte: Balistreri, 2010).**

Foram encontrados inúmeros trabalhos de desenvolvimento de MP de 3DP para aplicação na área da saúde. A maior parte dos trabalhos tratava da aplicação do 3DP para a fabricação de “scaffolds” (OLIVEIRA et al. 2007, LEUKERS et al. 2005 e 2006, KHALYFA et al. 2007) para a reconstrução óssea, assim como a fabricação de próteses dentárias (UTELA et al. 2010).

O desenvolvimento de matérias primas customizadas para o sistema 3DP envolve um grande número de variáveis. Para Utela et al. (2010) este processo pode significar um grande desafio, dado as numerosas decisões que devem ser tomadas acerca de pós, aglutinantes, impressão e pós-processamento. Este mesmo autor também propôs uma metodologia para o desenvolvimento de matérias-primas para 3DP, onde descreve 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 das 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. (2009b e 2010), por terem importância fundamental para este trabalho, serão descritas mais detalhadamente a seguir.

### **2.6.1. Especificação das características finais da peça**

Essa é uma decisão crucial para que o processo de desenvolvimento seja concluído com sucesso, onde é definido 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.

A primeira decisão se concentra na possibilidade da peça final ser porosa ou totalmente densa. 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. Dessa forma, evitam-se processos desnecessários e pouco eficientes, como a sinterização a altas temperaturas.

### **2.6.2. 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, 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 (sic UTELA et al. 2009b e 2010) 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  $\mu\text{m}^5$  ou maiores, utiliza-se pó no estado seco. Partículas menores que 5 $\mu\text{m}$  podem ser depositadas secas ou molhadas. Pós menores que 1  $\mu\text{m}$  podem se ligar por forças de Van der Waal, 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. O Quadro 3 mostra algumas características que afetam o processo de impressão em relação ao tamanho e formato dos pós.

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

---

<sup>5</sup>  $\mu\text{m}$ : micrometro, equivale a 1 milésimo de milímetro.

**Quadro 3 – Influência do tamanho e formato das partículas nas etapas do processo (Adaptado de Utela et al., 2010).**

<b>Tamanho</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Partículas Grandes</b>	Podem ser depositados no estado seco, menor área superficial por volume, grandes poros facilitam a penetração do aglutinante.	Partículas grandes estabelecem mínimas espessuras de camada.
<b>Partículas Pequenas</b>	Aumenta o grau de sinterabilidade, baixa rugosidade superficial, camadas mais finas, melhor acabamento de pequenos detalhes.	Difíceis de espalhar, se aglomeram por forças de Van der Waals, podem se deformar durante a deposição de aglutinante.
<b>Forma</b>		
<b>Esférica</b>	Tende a fluir bem, baixa fricção interna.	
<b>Facetada/Anisotrópica</b>	Potencializa a taxa de empacotamento.	Alto grau de fricção interna dificulta o espalhamento.

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.

### **2.6.3. Seleção do método de aglutinação**

Definida a especificação do pó, é necessário efetuar a seleção do método de aglutinação e a formulação do aglutinante apropriado. Segundo Utela et al., (2010), 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 diversas metodologias de aglutinação disponíveis. O Quadro 04 mostra um resumo destas metodologias, elaborado por Utela et al., (2010).

Para selecionar a metodologia de aglutinação mais adequada, utilizam-se alguns critérios, como o local onde o aglutinante é inserido no processo, os resíduos deixados na peça final e as limitações do material.

**Quadro 4 – Resumo das metodologias de aglutinação (Adaptado de Utela et al. 2010).**

<i>Metodologia</i>	<i>Características</i>	<i>Exemplo</i>
<b>Ácido-Base</b>	Sistema de dois componentes	Revestimentos eletrolíticos ácido-básico de polivinila
	Liga a maioria dos materiais	
	Decompõe-se termicamente para deixar pouco resíduo	
<b>Hidratação</b>	O pó é ligado quando hidratado	Cimentos
	Permite o uso de líquidos reologicamente simples	
	O Comportamento de ligação pode ser alterado com a adição de catalisadores	
<b>Inorgânico</b> Colóides Polímeros pré-cerâmicos Suspensões sólidas	Tipicamente incorporados na peça final	Nitrato de Alumínio
	Muitas vezes requerem tratamento térmico	Óxido de Alumínio
		Sílica Coloidal
<b>Sais de metais</b>	Trabalha com a maioria dos materiais,	Nitrato de prata, Aço ferramenta com sulfato de cobre
	Três vias de ligação:	
	Recristalização do sal,	
	Redução de sal para depósito de metal,	
	Deslocamento de sal para depósito de metal (material reação específica)	
<b>Orgânicos</b> Carboidratos Polímeros	Liga a maioria dos materiais	Resina butiral
	Decompõe-se termicamente para deixar pouco resíduo	Resina polimérica
		Polivinil
		Polissiloxanos
		Maltodextrina
<b>Mudança de fase de materiais</b>	Material derrete, penetra no pó, e liga o pó quando re-solidifica	2-methylpropane-2-OL
	Pós-processamento limitado a temperaturas abaixo da temperatura de fusão do material aglutinante	
<b>Solventes</b>	Funciona somente em polímeros	Clorofórmio liga poliésteres biodegradáveis Misturas PLLGA-Sal
	Pode ser misturado ao equilíbrio de ligação e secagem características	
<b>Alteração do comportamento térmico do material pulverulento</b>	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

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.

#### **2.6.4. 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.

Estas características são dependentes das propriedades reológicas do líquido, principalmente de sua viscosidade, tensão superficial e tamanho das partículas suspensas. A viscosidade e tensão superficial precisam estar em intervalos aceitáveis para que o cabeçote de impressão possa gerar as gotas corretamente. Partículas suspensas possuem uma limitação de tamanho, pois partículas muito grandes podem causar o entupimento do cabeçote, sendo que é aconselhável que as partículas sejam pelo menos 100 vezes menores que o diâmetro da abertura do cabeçote.

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.

Quando o líquido de deposição possuir as características adequadas, podem ser efetuados os testes de impressão. Estes incluem a geração, volume, frequência de deposição, trajetória e movimento das gotas.

### **2.6.5. Interação pó-aglutinante**

Deve-se 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 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 à 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 queda das gotas e a erosão causada por esta 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 reprodutibilidade destes através da produção de várias peças ao mesmo tempo, assim como a influência dos eixos de construção.

### **2.6.6. 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.

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 nas porosidades da peça por 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 ou conferir propriedades visuais a esta.

A metodologia de desenvolvimento de matéria-prima para impressão 3D encontrada na literatura e descrita neste capítulo serviu como base para a construção da metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho. Os materiais e métodos utilizados estão descritos no capítulo a seguir.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo está descrito detalhadamente como foi realizada a pesquisa, sobretudo quanto a técnicas e procedimentos. Inicialmente, são descritas as características técnicas do equipamento disponível para uso no CTPGJRS, seguidos pela descrição dos rejeitos gemológicos e o procedimento de moagem e classificação. Por fim é apresentada a metodologia de formulação da matéria-prima.

#### ***3.1. Características técnicas do equipamento disponível***

O sistema de PR disponível para a realização da pesquisa é um equipamento 3DP, modelo Z310 Plus, fabricado pela empresa ZCorporation (ver seção 2.5). Este equipamento caracteriza-se por utilizar matéria-prima em forma de pó. Possui as seguintes características técnicas (dados fornecidos pelo fabricante):

- monocromático – é capaz de fabricar peças com apenas uma cor sólida;
- resolução de impressão – 300 x 450 dpi;
- capacidade máxima de construção – 203 x 254 x 203 milímetros;
- espessura de camada – varia entre 0,089 e 0,203 milímetros;
- compatível com formatos de arquivo \*.STL.

O sistema é composto por duas unidades distintas: Uma onde a peça é impressa e outra onde é efetuada a limpeza e infiltração da peça, já demonstrados na Figura 11.

A unidade de fabricação (Figura 15) possui diversos componentes. O aglutinante é armazenado em uma garrafa acondicionada na tampa superior do equipamento. A cama de impressão é formada pela superfície dos compartimentos de alimentação e construção. A estação de serviços é responsável pela limpeza do cabeçote de impressão durante o processo. Ainda, o equipamento possui dois reservatórios para acondicionamento de resíduos, um para a purga do excesso de líquido aglutinante e outro para o pó que é dispensado durante a deposição das camadas.



**Figura 15 – Componentes da unidade de fabricação.**

A matéria-prima de impressão é colocada no compartimento de alimentação e o rolo de nivelamento espalha e nivela o pó sobre o compartimento de construção. O pó excedente cai em uma câmara, onde fica armazenado para ser posteriormente reaproveitado. O cabeçote de impressão fica no mesmo carro que transporta o rolo, sendo este o responsável pela deposição de aglutinante no lugar correto da cama.

A unidade de limpeza e reciclagem possui um compressor de ar, equipado com pistola e um aspirador de pó. Possui uma câmara com tampa envidraçada, onde é possível efetuar a retirada do pó excedente das peças e limpeza do equipamento, sendo este sugado e armazenado pelo aspirador e pode ser reutilizado posteriormente.

### **3.2. Técnicas para caracterização do sistema de matéria-prima**

Segundo Oliveira (2008), a matéria-prima ZP131® é um compósito a base de gesso. Porém, o custo associado a este material é bastante elevado, sendo que um recipiente de 10kg chega a custar aproximadamente R\$ 2.900,00<sup>6</sup> (cerca de R\$ 290,00/kg, enquanto o líquido aglutinante é vendido a aproximadamente R\$ 2.470,00 em um recipiente de 3,8 litros.

<sup>6</sup> Cotação efetuada em Julho de 2011.

Comparativamente, o custo do gesso comum utilizado em construção civil é R\$ 3,50/kg, e o revestimento para fundição por cera perdida, de boa qualidade e bastante refinado, chega a aproximadamente R\$ 250,00, porém em um recipiente de 45kg (cerca de R\$ 5,50/kg).

Levando em consideração o alto valor associado ao produto e a fim de obter algumas informações básicas para o desenvolvimento do trabalho, foram efetuadas algumas análises na matéria-prima disponibilizada pelo fabricante do equipamento. Nestas análises, foram verificadas características como o formato e tamanho de grão e composição química das partículas e também a composição do líquido aglutinante.

Para a caracterização do líquido de deposição ZB60®, foi utilizada a técnica de **Espectrometria de Infravermelho por Transformada de Fourier (FT-IR)**, em equipamento localizado no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS. A análise de FT-IR pode ser usada para obter um espectro infravermelho da absorção, emissão, fotocondutividade ou espalhamento Raman de um gás, sólido ou líquido, sendo que os dados obtidos podem ser comparados aos de um banco de dados, possibilitando assim a identificação do material da amostra analisada.

Para caracterização do pó ZP131® foram utilizadas diversas técnicas, como análise granulométrica para a identificação do tamanho médio das partículas, análise mineralógica e química, para a identificação dos compostos e também uma análise de MEV-EDS para a identificação do formato das partículas e dos elementos químicos presentes na amostra.

Para a **análise granulométrica**, foi utilizado o método de espelhamento de difração à laser no equipamento CILAS 1180, disponível do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. A faixa de detecção do equipamento situa-se entre 0,04µm a 2500µm. O método consiste na interação entre um feixe de radiação e um conjunto de partículas suspensas em um fluido. As amostras são dispersas em água e submetidas à agitação ultrasom para desaglomeração.

Para a **análise mineralógica**, foi utilizado o método de difração de raios-X (XRD), para a identificação das fases que compõe o material. Foi efetuada no Laboratório de Difractometria de Raio X, da Geoquímica da UFRGS.

A **análise química** foi realizada pelo ACME Laboratory, Canada. Consiste tipicamente de duas etapas que compreende a extração dos elementos desejados em uma solução e determinação por análise de elemento instrumental da solução. O laboratório utiliza dois princípios de determinação: ICP-ES e ICP-MS. No ICP-ES são medidas as ondas de luz

e intensidade de luz para determinar quais os elementos que estão presentes na solução e as quantidades de cada um. Já no ICP-MS são medidas as concentrações de elemento através da contagem de átomos de cada elemento presente na solução.

Para a **análise MEV-EDS** foi utilizado o equipamento Hitachi TM 3000, do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS, com magnificação de até 30.000X e aceleração de voltagem variável de 5kV e 15kV. O microscópio eletrônico de varredura (**MEV**) produz imagens de alta ampliação (até 300.000x) e alta resolução, através da emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 KV. A técnica de energia dispersiva de espectroscopia de raios-X (**EDS**) é utilizada para a análise elementar ou a caracterização química da amostra.

### **3.3. Processo de moagem e classificação dos rejeitos**

Para reduzir os rejeitos gemológicos a forma de pó, estes necessitam passar por um processo de moagem. O procedimento de moagem está demonstrado na Figura 16, onde primeiramente, os rejeitos (A) foram reduzidos a pedaços menores (C) de aproximadamente 10 milímetros com auxílio de ferramenta de impacto (B). Em seguida, foi efetuada a medição da massa de bolas e de rejeito, sendo que a moagem foi executada com massa de bolas (D) aproximadamente igual à massa de rejeitos. Por fim, os rejeitos e as bolas foram colocados dentro de dois frascos (E e F) e fixados no mecanismo do moinho (G). Este mecanismo faz com que o material e as bolas se atritem e sejam esmagados, reduzindo os rejeitos ao formato de pó.

Após a moagem, o rejeito foi peneirado, a fim de eliminar partículas muito grosseiras e que pudessem causar problemas no processo de impressão, e também para homogeneizar melhor o tamanho dos grãos. O pó resultante da moagem foi submetido à passagem em peneiras com abertura 40 mesh<sup>7</sup>, 80 mesh, 120 mesh, 200 mesh. 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).

---

<sup>7</sup> Mesh – Corresponde ao número de aberturas por polegada linear presente em uma peneira, ou seja, quanto maior o número “mesh”, menor serão as aberturas pelas quais as partículas devem passar.



**Figura 16 – Processo de moagem dos rejeitos de ágatas.**

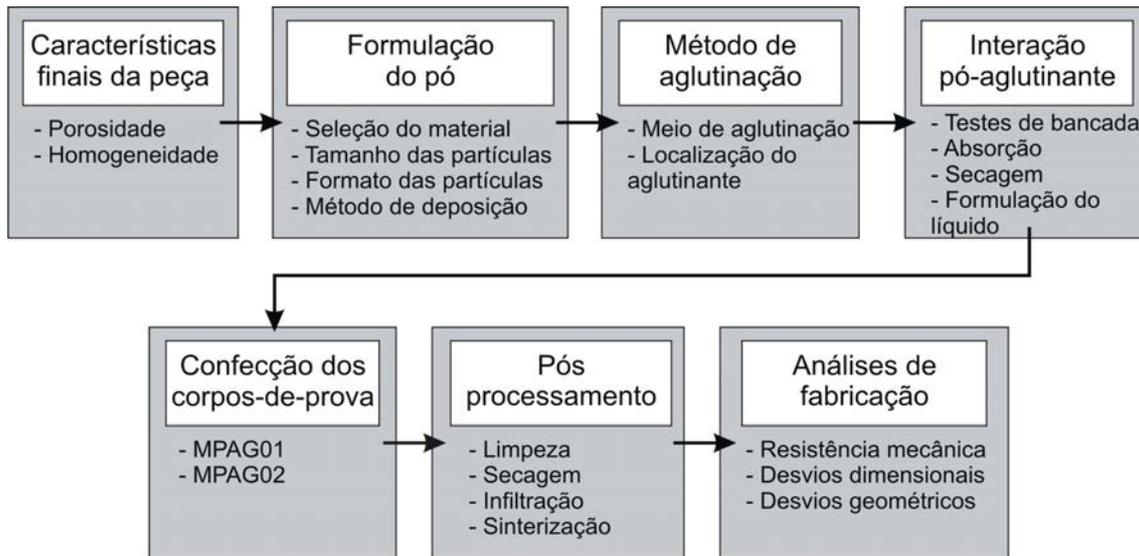
Desta forma, foi possível efetuar a moagem e reduzir e classificar os rejeitos de ágatas até o tamanho desejado, ou seja, entre 20  $\mu\text{m}$  e 80  $\mu\text{m}$ .

### **3.4. Metodologia de desenvolvimento de matéria-prima**

A metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho teve como base os conceitos descritos na seção 2.6, adaptados à realidade local. As etapas e procedimentos utilizados estão resumidos no fluxograma apresentado na Figura 17.

Dos parâmetros apresentados na Figura 17, apenas o material base (objeto do trabalho), o método de deposição do pó (equipamento) e o formato das partículas (decorrente do sistema de moagem e da natureza do material) são fixos e não podem ser alterados. O restante das decisões tomadas e a suas justificativas são descritas a seguir.

Quanto às características finais da peça, foi decidido que estas podem apresentar porosidade, a fim de facilitar a etapa de moagem e classificação, e também não necessitam ser compostas apenas por um material, possibilitando assim a utilização de materiais adjacentes como agentes de aglutinação ligantes e resinas de infiltração para o aumento da resistência mecânica final.



**Figura 17 – Metodologia de formulação da matéria-prima.**

Quanto à formulação do pó, o material (rejeitos de ágata), método de deposição (estado seco) e formato das partículas (aleatório) são fixos. Desta forma, só se pode controlar o tamanho das partículas, que devem ser maiores do que 20  $\mu\text{m}$  (devido a deposição no estado seco) e menores do que 66  $\mu\text{m}$  (1/3 da máxima espessura de camada do equipamento). Contudo, a classificação foi efetuada com uma peneira 200 mesh (abertura de 74  $\mu\text{m}$ ).

Quanto à aglutinação, foi selecionado o método orgânico, com agente aglutinante localizado junto ao pó base e ativado pelo líquido de deposição, por este ser um método que se aplica a grande maioria dos materiais, ser mais acessível quanto ao custo e mais fácil de ser encontrado, não utilizar-se de produtos controlados e necessitar de um líquido de deposição reologicamente mais simples.

A interação entre o pó e o aglutinante foi testada, inicialmente, através de testes de bancada, visando encontrar uma aproximação da taxa de saturação de líquido de deposição antes de iniciar os testes no equipamento. Foram observados parâmetros como absorção do pó e tempo de secagem, utilizando dois líquidos de ativação: ZB60® (fornecido pelo fabricante) e o XF1 (desenvolvido por Ganter, 2009b). Com isso, não foi necessário efetuar a formulação de um novo líquido de deposição.

A partir dos testes de bancada e dos testes iniciais de impressão, foi possível efetuar a confecção de alguns corpos-de-prova. Foram formulados dois sistemas de matéria-prima e testados 6 taxas diferentes de deposição em cada, totalizando 48 (quarenta e oito) CP's com cada sistema de matéria-prima. Os CP's foram projetados para possibilitar a análise de

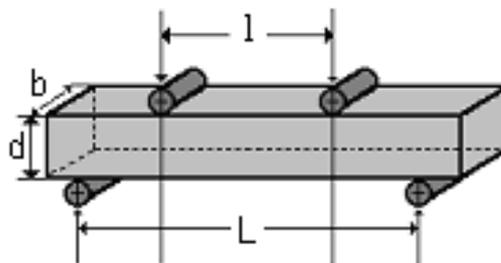
resistência mecânica à flexão a quatro pontos. Possuem formato de uma barra de seção quadrada, com dimensões nominais de 10mm x 10mm x 50mm.

Depois de fabricadas no equipamento 3DP, as peças necessitavam de um período de descanso no próprio equipamento (variando entre uma e duas horas), para eliminar o excesso de líquido de deposição e também de um período de secagem em estufa (de duas a vinte e quatro horas), a fim de eliminar toda a umidade da peça fabricada e permitir a sua manipulação para limpeza e retirada do excesso de pó.

Nesta fase, foi escolhido efetuar o processo de infiltração para o aumento de resistência, por este ser mais simples de ser executado e não depender de parâmetros de queima ainda desconhecidos. As peças foram infiltradas em resina de cianoacrilato de baixíssima viscosidade, sendo que estas foram mergulhadas em um recipiente contendo a resina.

A última etapa do desenvolvimento de matéria-prima é a caracterização tecnológica dos produtos obtidos. Esta tem por objetivo verificar as propriedades resultantes, como resistência mecânica, tolerâncias dimensionais e geométricas e a rugosidade superficial, que tem influência direta nas limitações do material.

A resistência mecânica foi medida através 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. Uma representação esquemática do ensaio é apresentado na Figura 18. A equação 1 correlaciona os parâmetros empregados no cálculo da resistência mecânica.



**Figura 18 – Representação esquemática do ensaio de resistência mecânica à flexão a quatro pontos.**

$$\sigma = \frac{3 P(L-l)}{2 bh^2} \quad (1)$$

Sendo,

$\sigma$  = tensão de ruptura, em MPa;

P = carga de ruptura, em N;

b = base do corpo de prova, em mm;

h = altura do corpo de prova, em mm;

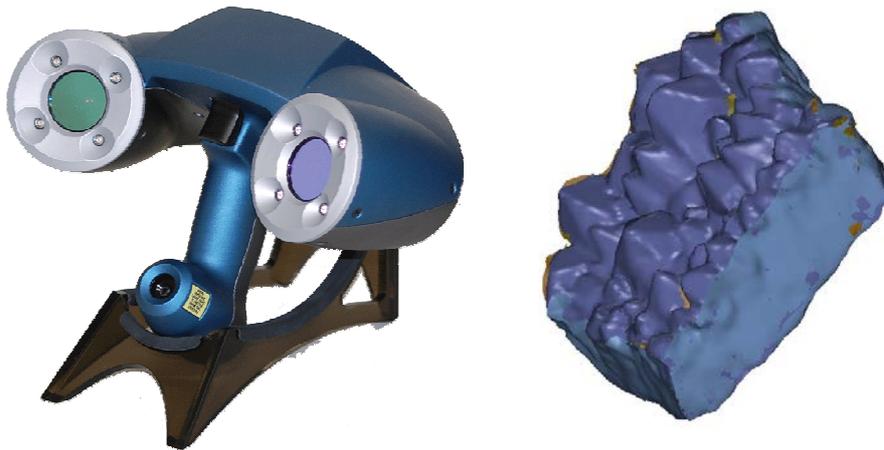
l = distância entre apoios superiores, em mm;

L = distância entre os apoios inferiores, em mm.

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

Os desvios de forma foram verificados através da digitalização de duas geometrias fabricadas com a matéria-prima desenvolvida e também com a matéria-prima do fabricante.

O processo de digitalização tridimensional consiste em desenvolver modelos virtuais a partir de objetos reais (SOUZA, 2010). O digitalizador utilizado neste trabalho é o REVScan® 3D, com resolução volumétrica de 20  $\mu\text{m}$ . A Figura 19 mostra uma imagem do digitalizador e uma superfície digitalizada por este.



**Figura 19 – Digitalizador tridimensional e superfície digitalizada.**

É um equipamento portátil e de operação manual, onde a varredura sobre o objeto nos eixos XY é feita pelo próprio operador e os dados são capturados através de duas câmeras de vídeo que detectam dois feixes de laser. Essa varredura gera uma nuvem de pontos que posteriormente deve ser tratada em software, para criação de uma superfície em arquivo STL,

por exemplo. O software utilizado para tratamento da nuvem de pontos, neste trabalho, é o 3DReshaper, onde é possível realizar operações como filtragem, suavização e preenchimento de falhas da superfície até a obtenção do modelo final e posteriormente, a montagem e comparação entre a superfície digitalizada e o projeto CAD 3D.

Destaca-se que esta metodologia, proposta por Utela et al. (2009b e 2010), adaptada à realidade desta pesquisa, foi fundamental para o bom andamento do trabalho. O capítulo a seguir mostra os resultados obtidos durante estas análises e também das análises de caracterização.

## **4. RESULTADOS**

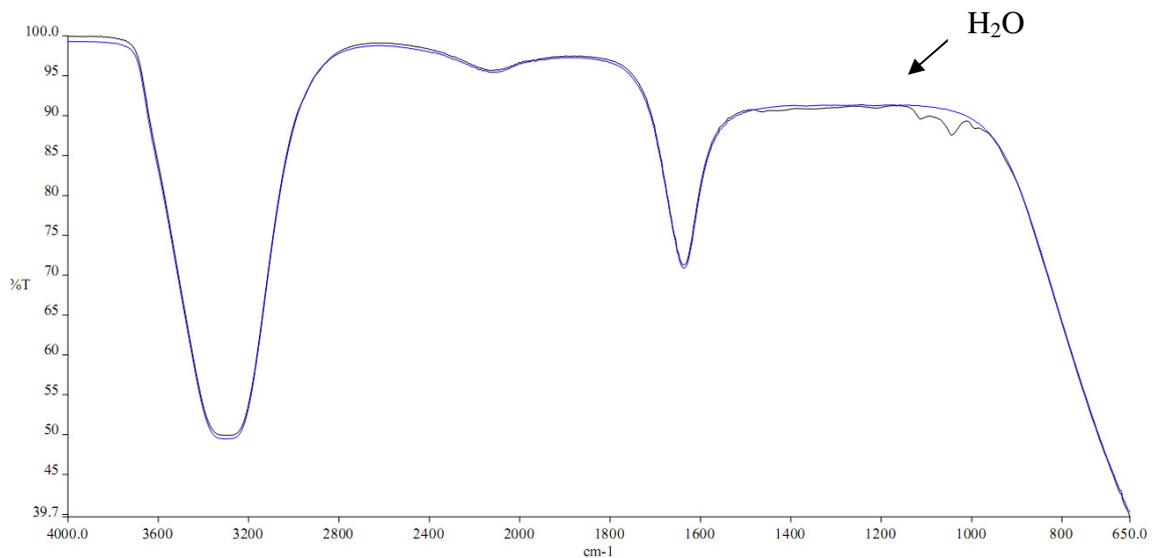
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a execução do trabalho. Primeiramente, é descrita a caracterização do sistema de matéria-prima do fabricante do equipamento. Em seguida, são apresentados os resultados do desenvolvimento da nova matéria-prima, que passa pela moagem dos rejeitos, formulação, testes de bancada, confecção dos corpos-de-prova, secagem, infiltração e testes de resistência mecânica e desvios geométricos das duas formulações desenvolvidas.

### ***4.1. Caracterização do sistema de matéria prima do fabricante***

As seções a seguir apresentam os resultados obtidos nas análises de caracterização efetuadas.

#### **4.1.1. Caracterização do líquido de deposição**

Para efetuar a identificação do líquido de deposição disponibilizado pelo fabricante (ZB60 ®) foi realizada uma análise através de FT-IR, no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS. O resultado pode ser visualizado na Figura 20.



**Figura 20 – Análise de FT-IR efetuada no aglutinante disponibilizado pelo fabricante (líquido de deposição).**

A comparação da curva de espectrometria obtida na análise de FT-IR efetuada no líquido de deposição identificou que esta é muito semelhante com a curva da água, tendo apenas algumas pequenas diferenças, que não puderam ser identificadas nesta análise.

#### **4.1.2. Caracterização do pó base**

Foram efetuadas diversas análises para identificação das características do pó de impressão, incluindo ensaios de granulometria, mineralogia, análise química e de microscopia eletrônica de varredura.

A análise granulométrica foi efetuada no equipamento CILAS 1180, disponível do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. O resultado da análise pode ser visualizado na Figura 21.

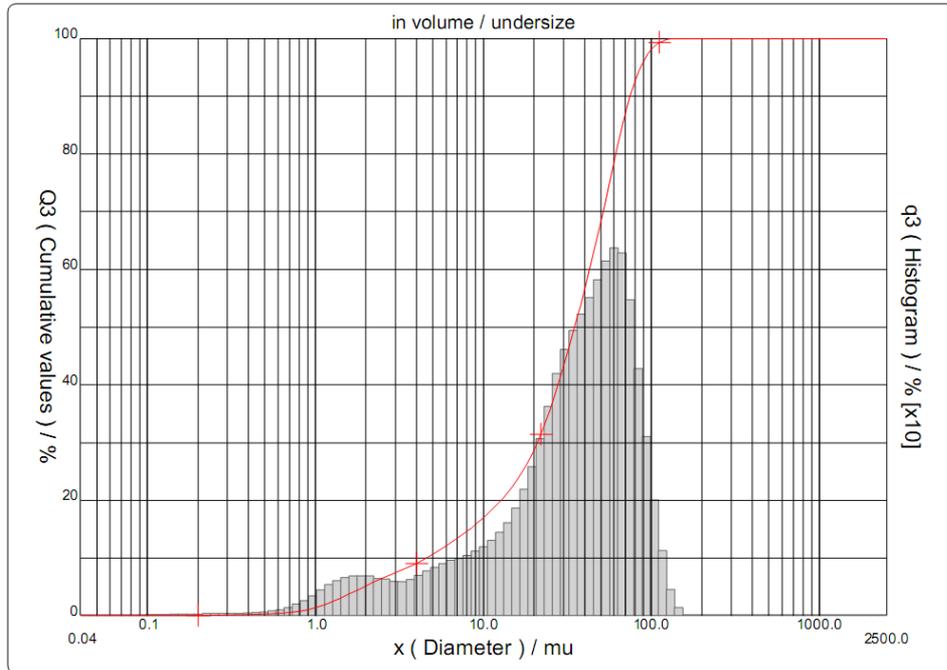


Figura 21 – Análise granulométrica da matéria-prima a base de gesso.

Foi possível identificar que a matéria-prima possui uma granulação bastante fina, sendo que o diâmetro médio das partículas fica na ordem de  $38,33\mu\text{m}$ , tendo ocorrências de partículas na faixa de  $4,56\mu\text{m}$  a  $74,78\mu\text{m}$ .

A análise mineralógica foi efetuada no Laboratório de Difratomia de Raio X, da Geoquímica da UFRGS, utilizando o método de difração de raios-X (XRD). O resultado pode ser visualizado na Figura 22.

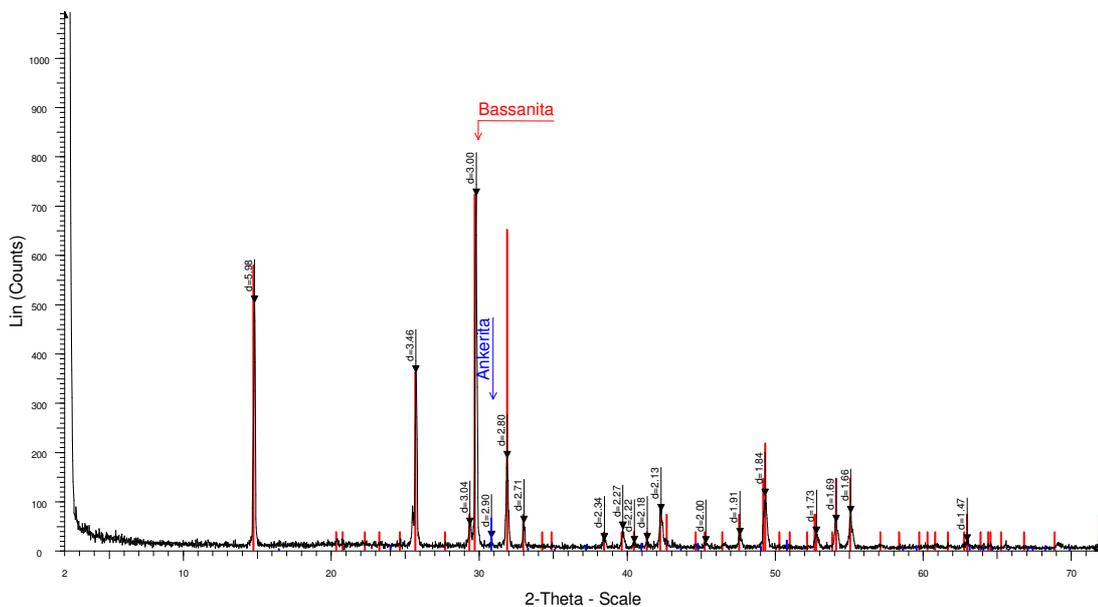


Figura 22 – Análise mineralógica da matéria-prima a base de gesso.

Dois minerais distintos foram identificados nesta análise, sendo eles bassanita e ankerita. A fim de obter maiores informações sobre estes minerais, foi efetuada uma consulta no site Web Mineral.

Os dados coletados do mineral **bassanita** são:

- **Fórmula química:**  $2\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})$ , com a presença de 27,61% de cálcio, 0,69% de hidrogênio, 22,09% de enxofre e 49,60% de oxigênio. Os compostos são: CaO – 38,63%;  $\text{H}_2\text{O}$  – 6,21%;  $\text{SO}_3$  – 55,16%;
- **Sistema cristalino:** ortorrômbico;
- **Densidade:** 2,7.

Os dados coletados do mineral **anquerita** são:

- **Fórmula química:**  $\text{Ca}(\text{Fe}^{++}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$ , com a presença de 19,42% de cálcio, 3,53% de magnésio, 2,66% de manganês, 16,24% de ferro e 11,64% de carbono. Os compostos são: CaO – 27,17%; MgO – 5,86%; MnO – 3,44%; FeO 20,89%;  $\text{CO}_2$  – 42,65%;
- **Sistema cristalino:** trigonal – romboédrico;
- **Densidade:** 3,1.

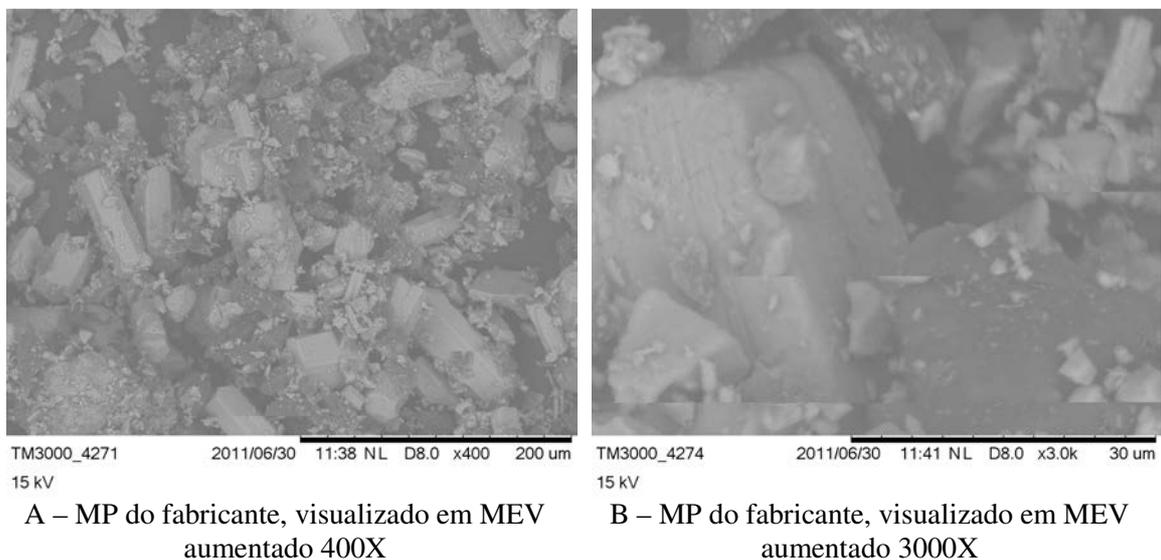
A fim de comparação, também foram coletados dados do mineral gipsita, que é a matéria-prima utilizada para a fabricação de gesso.

- **Fórmula química:**  $2\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})$ , com a presença de 23,28% de cálcio, 2,34% de hidrogênio, 18,62% de enxofre e 55,76% de oxigênio. Os compostos são: CaO – 32,57%;  $\text{H}_2\text{O}$  – 20,93%;  $\text{SO}_3$  – 46,50%;
- **Sistema cristalino:** monoclinico;
- **Densidade:** 2,3.

A bassanita e a gipsita possuem a mesma fórmula química e os mesmos elementos, sendo que as diferenças encontram-se basicamente nas proporções dos elementos e na estrutura cristalina. O mineral anquerita também possui sua composição baseada em cálcio.

A análise química, realizada pelo ACME Lab, Canadá, mostrou somente CaO como óxido realmente importante, com alto teor de carbono (C), composição esta correspondente a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), ainda com a presença de enxofre (S) e carbono (C) como óxidos.

As análises de MEV-EDS foram efetuadas no equipamento Hitachi TM 3000, do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS. A matéria-prima disponibilizada pelo fabricante (pó) possui 2 tipos de partículas: uma maior, com tamanho aproximado de  $30\mu\text{m}$  e com formato regular hexagonal alongado, e outra menor, com tamanho aproximado de  $5\mu\text{m}$  e formato irregular (anisotrópico), porém mais aproximado de um formato esférico. A Figura 23 mostra uma ampliação de 400X em A e de 3000X em B.



**Figura 23 – Análise MEV da matéria prima disponibilizado pelo fabricante.**

Juntamente com a análise de MEV, foi efetuada também uma análise de EDS na matéria-prima disponibilizada pelo fabricante. A Figura 24 apresenta uma ampliação de 3000X efetuada pelo equipamento para efetuar a análise das amostras de matérias-primas. Já a Tabela 4 apresenta os resultados obtidos na análise.

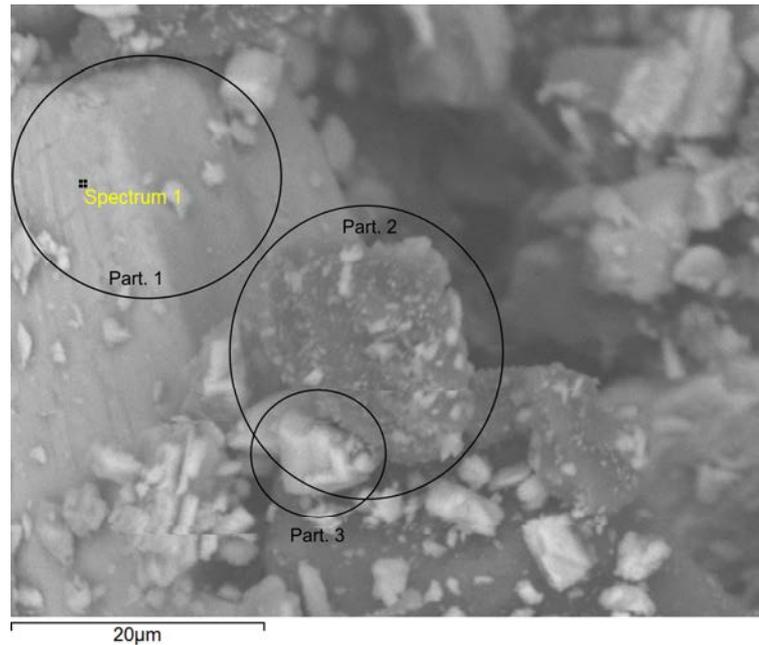


Figura 24 – EDS das matéria-prima disponibilizada pelo fabricante.

Na matéria-prima do fabricante, foram encontrados 3 (três) tipos de partículas com características diferentes, em função do tamanho e formato. Segundo dados do Oliveira (2008), esta matéria-prima é baseada em gesso (sulfato de cálcio di-hidratado de composição química  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Tanto as partículas 1 e 3 (Figura 24 A) resultaram em elementos e proporção adequada ao gesso. Porém, já na partícula 2, foram encontrados grande quantidade de carbono, caracterizando a presença de uma substância não identificada.

Tabela 4 – Resultado da análise de EDS.

	<i>Elementos</i>	<i>Perc. em Peso (%)</i>	<i>Perc. Atômico (%)</i>		<i>Elementos</i>	<i>Perc. em Peso (%)</i>	<i>Perc. Atômico (%)</i>
Part. 1	Carbono	8.775	13.860	Part. 3	Carbono	12.480	18.685
	Oxigênio	57.737	68.466		Oxigênio	60.215	67.682
	Enxofre	15.384	9.102		Enxofre	12.322	6.911
	Potássio	0,16	0,078		Cálcio	14.983	6.722
	Cálcio	17.944	8.494				
Part. 2	Carbono	51.375	61.024				
	Oxigênio	39.870	35.553				
	Enxofre	3.655	1.626				
	Potássio	0,085	0,031				
	Cálcio	4.686	1.668				
	Titânio	0,329	0,098				

Tomando por base os resultados indicados pelas análises efetuadas, chega-se a conclusão de que a matéria-prima disponibilizada pelo fabricante é baseada em gesso (cuja matéria-prima de fabricação é a gipsita), pois indícios deste foram encontrados nas análises mineralógica, química e EDS. Isto, ligado ao fato de que a análise de FT-IR do líquido aglutinante ter resultado em um composto a base de água sugere que o sistema de aglutinação utilizado na matéria-prima disponibilizada pelo fabricante é a Hidratação, também indicado por Utela et al. (2010) e apresentado no Quadro 4 (apresentado no Capítulo 2).

A análise mineralógica mostrou um tamanho médio de partícula de 38  $\mu\text{m}$  (equivalente a 400 mesh), porém, com ocorrência de partículas de até 74,78  $\mu\text{m}$  (equivalente a 200mesh), sugerindo que a classificação com uma peneira 200 mesh, apesar de não ser completamente ideal, não causa grandes problemas ao resultado final do processo. Além disso, a análise MEV mostrou que existe uma grande irregularidade no tamanho e no formato das partículas no pó disponibilizado pelo fabricante, que apesar de apresentarem um formato de prisma hexagonal alongado, tem uma excelente deposição no estado seco, comprovando que o formato das partículas é o fator de menor importância na depositabilidade.

#### **4.2. Tamanho e formato das partículas moídas de rejeitos de ágatas**

Para determinar qual o tempo adequado de moagem para se obter a granulação desejada (entre 20  $\mu\text{m}$  e 80  $\mu\text{m}$ ), duas amostras de material foram submetidas ao processo de cominuição no moinho excêntrico, sendo coletadas 3 amostras de material moído de cada frasco, com intervalo de moagem de uma hora entre cada coleta. Estas amostras foram submetidas a análises granulométricas, e os resultados são apresentados na Tabela 5. O método utilizado já foi descrito na seção 3.2.

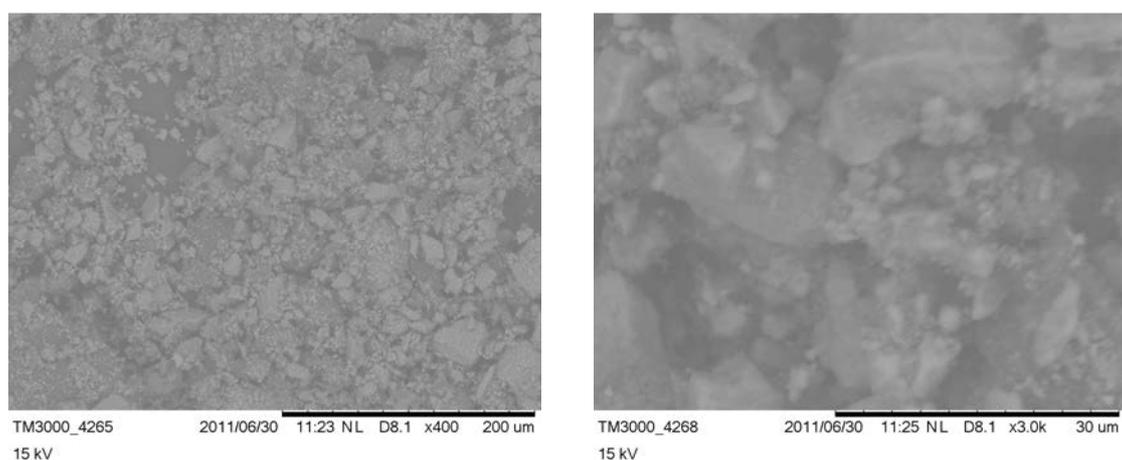
**Tabela 5 – Análise granulométrica das amostras de rejeitos moídos de ágatas.**

<i>Tempo de moagem</i>	<i>Diâmetro médio da amostra do Frasco 1</i>	<i>Diâmetro médio da amostra do Frasco 2</i>	<i>Diâmetro médio da MP do fabricante</i>
1 hora	14,24 $\mu\text{m}$	24,50 $\mu\text{m}$	
2 horas	10,45 $\mu\text{m}$	11,78 $\mu\text{m}$	38,33 $\mu\text{m}$
3 horas	9,67 $\mu\text{m}$	11,08 $\mu\text{m}$	

Com base nestes resultados, observou-se que existe uma diferença no tamanho da partícula resultante nos dois frascos, com o mesmo tempo de moagem. Atribui-se a discrepância ao fato de que pode haver alguma irregularidade entre a energia de moagem entre os dois frascos, como número de rotações por minuto, por exemplo.

Observou-se que mesmo a amostra retirada com o menor tempo de moagem (uma hora) já era menor do que o tamanho de partícula mínima desejada no frasco 1 e menor do que a metade do tamanho das partículas do pó do fabricante. Desta forma, para a moagem do restante do pó foi utilizado um tempo de moagem inferior, com aproximadamente 40 minutos.

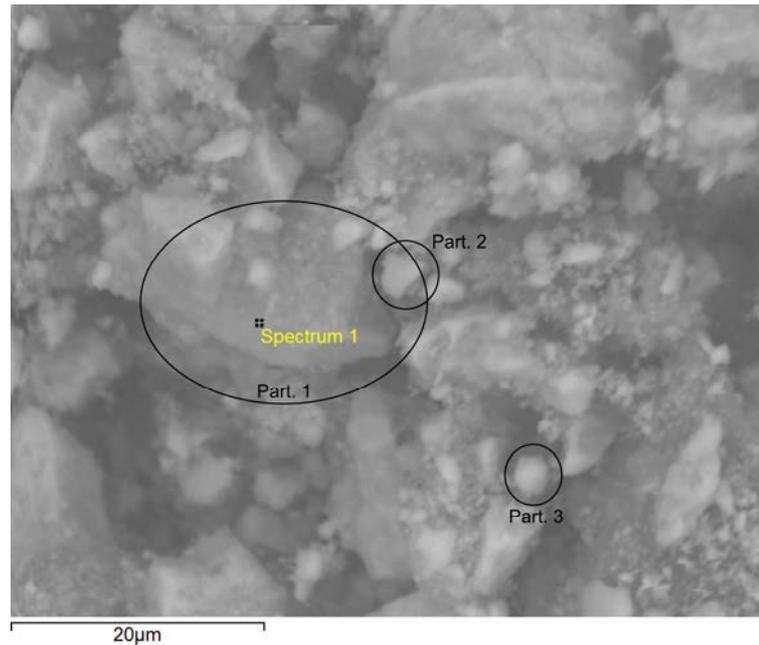
Do mesmo experimento, também foi coletada uma amostra de material e submetida à análise de MEV-EDS, a fim de verificar o formato das partículas resultantes do processo de moagem e comprovar a sua composição química. A Figura 25 mostra uma ampliação de 400X em A e de 3000X em B.



**Figura 25 – Análise MEV do rejeito de ágata submetido ao processo de moagem.**

Observa-se na Figura 25 A (ampliação de 400X) que o tamanho médio das partículas é menor que o tamanho médio do pó do fabricante, e que o formato das partículas é bastante irregular. Atribui-se ao reduzido tamanho das partículas o fato de que a amostra foi coletada depois de 3 horas de moagem. Quanto ao formato resultante (Figura 25 B), acredita-se que sofre maior influência pela característica do material do que pelo processo de moagem, pois durante a fratura inicial com ferramenta de impacto, as partículas resultantes também possuíam formato bastante irregular.

O resultado da análise de EDS teve por objetivo comprovar a utilização do rejeito de ágata. A Figura 26 apresenta uma ampliação de 3000X efetuada pelo equipamento para efetuar a análise da amostra, e a Tabela 6 apresenta os resultados obtidos na análise.



**Figura 26 – EDS do rejeito de ágata moído.**

**Tabela 6 – Resultado da análise EDS do rejeito de ágata moído.**

	<i>Elementos</i>	<i>Percentual em Peso</i>		<i>Percentual atômico</i>	
<b>Part. 1</b>	Carbono	9.727	%	14.373	%
	Oxigênio	59.845	%	66.386	%
	Alumínio	0,504	%	0,332	%
	Silício	29.923	%	18.909	%
<b>Part. 2</b>	Carbono	12.037	%	17.684	%
	Oxigênio	56.969	%	62.832	%
	Alumínio	0,420	%	0,275	%
	Silício	30.574	%	19.209	%
<b>Part. 3</b>	Carbono	17.964	%	24.996	%
	Oxigênio	58.243	%	60.840	%
	Alumínio	0,266	%	0,165	%
	Silício	23.526	%	13.999	%

Foram identificadas três partículas diferentes em formato e tamanho. A análise de EDS mostra elementos relativos à utilização de rejeitos de ágata (composição baseada em sílica – SiO<sub>2</sub>) nas três partículas analisadas, sendo que as diferenças baseiam-se simplesmente no formato e tamanho.

Com base nestes resultados, definiu-se que o tempo de moagem dos rejeitos para a obtenção de partículas entre 20 µm e 80 µm em 40 minutos, sendo que o formato das

partículas, apesar de irregular, foi considerado satisfatório e apto para o processo de impressão 3D.

### 4.3. Desenvolvimento da matéria-prima

Durante a execução do trabalho, foram desenvolvidas duas formulações de matéria-prima, sendo que a primeira teve como função comprovar a viabilidade do processo e a segunda melhorar o acabamento e as características técnicas da primeira. Todos os procedimentos realizados durante o trabalho são descritos, em ordem cronológica, nas seções seguintes.

**Tabela 7 – Formulações de matéria-prima desenvolvidas.**

<i>Matéria-prima</i>	<i>Componentes</i>	<i>Quantidade (%)</i>
<b>MPAG01</b>	Rejeitos de ágata	66,67
	Maltodextrina	16,66
	Açúcar refinado	16,66
<b>MPAG02</b>	Rejeitos de ágata	90,00
	Maltodextrina	5,00
	Açúcar refinado	5,00

#### 4.3.1. Formulação do primeiro sistema de matéria-prima – MPAG01

Com base na metodologia apresentada na Figura 17, foram cumpridas as etapas descritas a seguir.

- **Características finais da peça:** Podem apresentar porosidade e não necessitam ser compostas por apenas um material.

- **Formulação do pó:** Material (ágata), o método de deposição (estado seco) e o tamanho das partículas (maiores que 20  $\mu\text{m}$  e menores que 80  $\mu\text{m}$ ).

- **Método de aglutinação:** Com base nos dados do Quadro 4, foi escolhido o método de aglutinação orgânico, por este conseguir obter sucesso com a maioria dos tipos de materiais, decompor termicamente para deixar pouco resíduo e ser mais acessível e fácil de encontrar, além de ser de baixo custo.

Para isso, foi utilizado como base uma formulação proposta por Ganter et al. (2009a) que utilizavam o mesmo método de aglutinação (orgânico), substituindo o material base

(vidro moído) por rejeitos moídos de ágata e mantendo as mesmas proporções de material aglutinante. Utilizaram-se os seguintes materiais e proporções:

- 1.000 gramas de rejeitos moídos de ágata – 66,67%;
- 250 gramas de açúcar refinado – 16,66%;
- 250 gramas de maltodextrina<sup>8</sup> – 16,66%.

Assim, a aglutinação foi efetuada com aglutinantes sólidos misturados ao pó, sendo que o líquido de deposição teve por função apenas ativar a reação ao ser depositado. Com essa formulação, foi possível obter a aglutinação em bancada, através de mistura manual.

#### 4.3.2. Testes de bancada da MPAG01

A interação entre o pó e o aglutinante foi inicialmente testada através de mistura manual em recipientes plásticos. Uma imagem do teste de bancada é ilustrada na Figura 27.

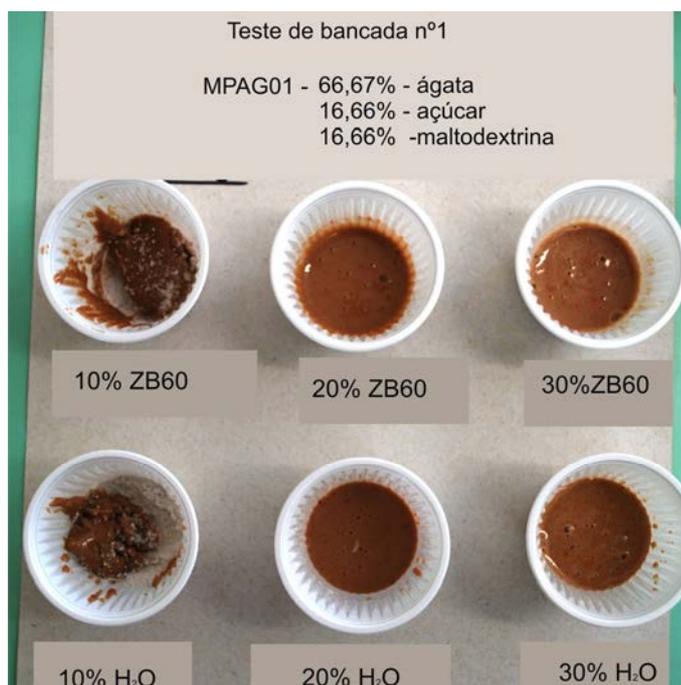


Figura 27 – Testes de bancada de interação entre pó e aglutinante.

O objetivo geral deste ensaio foi obter uma aproximação na taxa de saturação de líquido de deposição. Foram observadas propriedades como a absorção e secagem do líquido de deposição e a taxa de saturação de líquido aproximada. Para este teste foi utilizado o pó

<sup>8</sup> A maltodextrina ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> é um carboidrato complexo, proveniente da conversão enzimática do amido do milho. É utilizada como suplemento alimentar por praticantes de atividades físicas.

formulado MPAG01 com 3 (três) diferentes taxas de saturação de líquido de ativação do aglutinante e 2 (dois) líquidos de ativação diferentes: o líquido fornecido pelo fabricante ZB60® e água.

A massa de pó foi medida com balança digital, de resolução de 1g. Foram inseridos em cada recipiente 10 g de pó e 1 ml, 2 ml e 3 ml para as taxas de saturação de 10%, 20% e 30% respectivamente. O volume de líquido foi medido com uma seringa, de resolução 1ml. Os resultados da análise podem ser observados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Teste de bancada MPAG01.**

<i>Líquido/taxa de saturação</i>	<i>Absorção</i>	<i>Tempo de secagem</i>
ZB60®/10%	Absorveu parte do pó	~ 1 hora
ZB60®/20%	Absorveu todo o pó	~ 24 horas
ZB60®/30%	Absorveu todo o pó	Não secou
H2O/10%	Absorveu parte do pó	~ 2 horas
H2O/20%	Absorveu todo o pó	~ 24 horas
H2O/30%	Absorveu todo o pó	Não secou

Deste ensaio foi possível observar que, para os dois líquidos de deposição, a taxa aproximada de líquido para volume da peça fica entre 10% e 20%, pois, como pode ser observado na Figura 27, na taxa de 10% de líquido, nem todo o volume de líquido foi absorvido pelo pó, e a secagem ocorreu em cerca de uma hora. Com 20% de saturação, todo o líquido foi absorvido pelo pó, porém, a secagem demorou cerca de um dia. Quanto à taxa de 30%, em ambos os líquidos a mistura apresentou-se demasiadamente líquida e não ocorreu secagem.

Para testes no equipamento com o pó MPAG01, foi escolhido utilizar o líquido de deposição fornecido pelo fabricante (ZB60®), devido às suas propriedades reológicas (viscosidade e presença de impurezas) serem adequadas ao cabeçote de deposição, a fim de evitar entupimentos e danificação do equipamento, que poderia ocorrer com a utilização de água convencional.

#### **4.3.3. Confecção de corpos de prova – MPAG01**

Para definir a taxa ideal de saturação do líquido de deposição, foram confeccionados alguns corpos de prova (CP's) no equipamento 3DP. Para isso tomou-se por base os

resultados obtidos nos testes de bancada, sendo então efetuados testes com 6 (seis) diferentes taxas de deposição de líquido: 10%, 12%, 14%, 16%, 18% e 20% de volume de líquido em função do volume de pó. A efeitos comparativos, a taxa de saturação do sistema de MP disponibilizada pelo fabricante é de 30% de líquido.

Os CP's fabricados foram projetados para possibilitar a sua análise quanto a resistência mecânica à flexão à 4 pontos (Norma ASTM C – 133/97), no formato de uma barra de seção quadrada de dimensões 10mm x 10mm x 50 mm (milímetros). A Figura 28 mostra a sequência de fabricação dos CP's.

Os corpos de prova foram fabricados no equipamento de 3DP e permaneceram em pré-cura por duas horas no próprio equipamento antes de sua retirada. A pré-cura tem por objetivo eliminar o excesso de umidade das peças, possibilitando o seu manuseio. Foram fabricados 8 corpos de prova para cada taxa de líquido de deposição, num total de 48 CP's.



A – CP's(20%) sendo retirados da cama de impressão



B – CP's (20%) já retirados da cama de impressão



C – CP's (20%) em secagem adicional em estufa



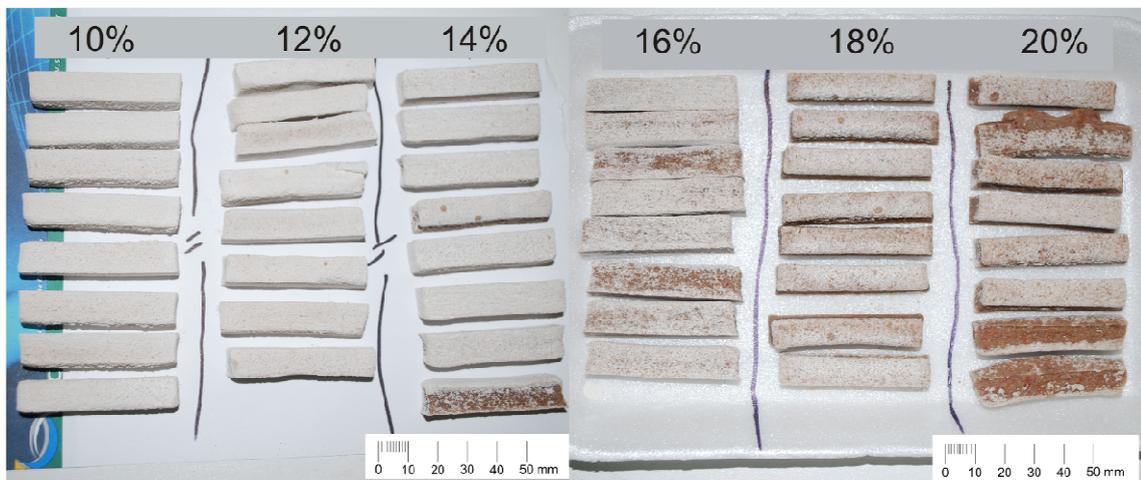
D – CP's (20%) após 24 horas de cura em estufa

**Figura 28 – Sequência de fabricação dos CP's, pó MPAG01, taxa de saturação 20%.**

Com o auxílio de um pincel suave, os CP's foram cuidadosamente retirados do equipamento 3DP, pois estes ainda não estavam totalmente rígidos (principalmente os CP's com a taxa de 20%), sendo que qualquer descuido causava deformidades, conforme pode ser observado na Figura 28 B.

Ao observar que os CP's não possuíam rigidez suficiente para serem manipulados sem sofrer deformações, estes foram submetidos a mais um processo de secagem em uma estufa (fabricada especificamente para tal), onde os CP's permaneceram por um período de 24 horas, a uma temperatura de aproximadamente 50°C (Figura 28 C). Ao final deste período, observou-se que os corpos de prova estavam com o exterior totalmente seco e passíveis de serem manipulados, com cuidado, sem sofrer deformações. A Figura 28 D apresenta os CP's de 20% após seu período de 24 horas de cura.

A fabricação dos CP's do pó MPAG01, com todas as taxas de líquido de deposição testadas neste ensaio seguiu a mesma metodologia descrita anteriormente. Durante a fabricação, foi possível observar que a medida que a taxa de deposição era reduzida, a retirada e o manuseio dos CP's tornava-se mais fácil e com menor risco de deformações, pois os CP's tornavam-se mais resistentes e secos e com maior estabilidade dimensional e geométrica. A única exceção ocorreu na taxa de 10%, onde o material perdia-se mais facilmente com o uso de maior força. Contudo, esta configuração foi a que apresentou melhor estabilidade dimensional. A Figura 29 mostra todos os CP's fabricados.



**Figura 29 – Conjunto de CP's fabricados durante o ensaio.**

Para conferir maior resistência mecânica aos CP's, estes poderiam ser submetidos a dois processos: infiltração ou sinterização. Devido a facilidade e menor custo de execução foi escolhido o processo de infiltração.

Os CP's foram submetidos a infiltração com resina polimérica (cianoacrilato de baixíssima viscosidade), sendo submersos em um recipiente contendo a resina por cerca de 2

segundos, para que esta se infiltrasse na superfície dos CP's por capilaridade, entrando para o interior do material.

A fim de medir a influência da penetração da resina na resistência mecânica dos CP's, estes foram pesados antes e depois de serem submetidos à infiltração. Dessa forma, foi possível observar a quantidade em peso de resina nos CP's. A medição foi efetuada com uma balança de precisão, de resolução 0,1 grama. Os dados referentes à medição são mostrados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Pesagem do processo de infiltração dos CP's.**

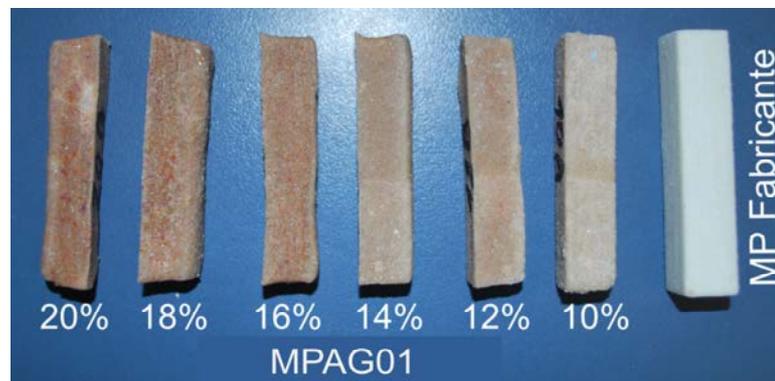
<i>Taxa de saturação</i>	<i>Massa média das barras [g]</i>			<i>Perda de infiltrante [%]</i>
	<i>Sem infiltrante</i>	<i>Com infiltrante</i>	<i>Variação [%]</i>	
<b>20%</b>	6,9	7,2	4,3	30,8
<b>18%</b>	6,6	6,9	4,3	37,2
<b>16%</b>	5,9	6,6	10,1	20,8
<b>14%</b>	5,1	6,4	20,2	8,7
<b>12%</b>	4,4	5,6	20,8	6,1
<b>10%</b>	4,2	5,8	28,0	3,1

Desta medição, pode-se observar que quanto menor o percentual de líquido de deposição (taxa de saturação), maior a quantidade (absoluta e em percentual) de infiltrante foi absorvido pelos CP's. A coluna “Variação” da Tabela 9 indica em termos percentuais, o aumento de peso gerado no processo de infiltração, enquanto a coluna “Perda de infiltrante”, da mesma tabela, indica a quantidade de infiltrante que se volatilizou ou foi perdida como excesso. Essa medição foi efetuada através da pesagem do recipiente antes e depois do mergulho do CP's e posteriormente subtraindo este valor do efetivamente absorvido pelo CP's. Durante os ensaios de resistência mecânica, ficou evidente o papel do infiltrante nesta propriedade.

#### **4.3.4. Caracterização tecnológica dos CP's de pó MPAG01**

Os CP's fabricados a partir do pó MPAG01 foram analisados segundo algumas características, entre elas, o formato e deformação dos CP's, a retração dimensional e a resistência mecânica de flexão a quatro pontos.

Quanto ao formato das peças fabricadas quando se utiliza a MP do fabricante, este sempre obedece aos formatos e dimensões previstos no modelo CAD, sendo que o pó MPAG01 apresentou alguns problemas com deformações, sobretudo causadas pela retração na seção transversal e pela fragilidade das peças antes de serem infiltradas. Os CP's com maior percentual de líquido de deposição sofreram maiores deformações, enquanto os CP's com menor percentual de líquido de deposição não deformaram tão facilmente. Atribui-se isto a um maior grau de dissolução das partículas de açúcar e maltodextrina nos CP's de mais taxa de líquido de deposição. A Figura 30 mostra uma imagem comparativa entre os CP's, que foram fabricadas a partir da mesma geometria CAD.



**Figura 30 – Comparativo de deformações dos CP's de MPAG01.**

A retração dimensional foi quantificada através da medição simples dos CP's com um paquímetro analógico de resolução 0,05 mm. A dimensão nominal (projetada) dos CP's era 10mm x 10mm x 50mm. A Tabela 10 a seguir mostra as dimensões médias dos CP's, e a Tabela A1 do ANEXO 1 mostra todas as medições realizadas.

**Tabela 10 – Tabela dimensional dos CP's fabricados MPAG01.**

	Dimensão nominal	Qtd. CP's	h [mm]	Desvio Padrão	l [mm]	Desvio Padrão	d [mm]	Desvio Padrão
			10,00		10,00		10,00	
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

Através da Tabela 10, pode-se observar os efeitos causados pelo líquido de deposição na cama de impressão, pois ocorre na maioria dos CP's um aumento dimensional na altura "h" (eixo Z do equipamento) e retração dimensional de "l" e "d" (eixos X e Y do equipamento), com grande diferença entre os valores médios medidos e também altos índices de desvio padrão. Pode-se observar também que a variação dimensional é maior nos CP's com maior percentual de líquido de deposição (maior desvio padrão), onde em alguns casos, a diferença para a dimensão nominal chegou a 2,70mm. As dimensões mais homogêneas encontraram-se nos grupos de 10%, 12% e 16% de líquido de deposição.

Foram efetuados em 25 amostras dos CP's fabricados com o pó MPAG01, ensaio de resistência mecânica à flexão a 4 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 dados médios obtidos durante o ensaio são apresentados na Tabela 11. Na Tabela A2 do ANEXO 1 estão registrado todos os dados coletados durante o ensaio.

**Tabela 11 – Ensaio de resistência à flexão a 4 pontos realizados nos CP's da MPAG01.**

		Qtd. CP's	Força de ruptura média [N]	Desvio Padrão	Deslocamento máx. médio [mm]	Desvio Padrão	Tensão de ruptura média [MPa]	Desvio Padrão
MP Fabricante			<b>311,62</b>		<b>0,827</b>		<b>7,01</b>	
Taxa de saturação	10%	5	198,08	46,35	0,51	0,18	4,49	1,06
	12%	5	146,44	24,86	0,42	0,06	3,70	0,64
	14%	5	272,36	106,61	0,58	0,14	5,63	2,20
	16%	5	116,71	59,14	0,88	0,58	2,45	1,22
	18%	5	59,50	32,59	1,44	0,40	1,34	0,65

Os ensaios resultaram em uma grande variação na força necessária para o rompimento do material. Contudo, pode-se concluir que os melhores resultados foram obtidos nas amostras cujo percentual de líquido de deposição era 14%, tendo como força máxima média das amostras 272,363 N, porém, com um alto desvio padrão.

A estes resultados atribui-se o fato de que estas amostras absorveram praticamente 20% do seu peso em infiltrante, causando um grande acréscimo de resistência ao material. Porém, levando em consideração este critério, de que o aumento da quantidade infiltrada aumentaria também a resistência mecânica do material, as amostras com menor percentual de

líquido de deposição deveriam ter maior grau de resistência, pois absorveram quase 30% de seu peso em infiltrante.

No entanto, observou-se durante os ensaios que todas as amostras falharam em um ponto concentrador de tensão que se localizava no encontro das duas etapas de imersão do CP na resina, fato que não ocorreu nos CP's de taxa de saturação de 14%, pois esta interface não era tão evidente. Acredita-se que se o processo de infiltração resultasse em CP's totalmente homogêneos, os CP's de 10% de líquido de deposição poderiam ter resultados melhores por permitirem maior quantidade de infiltração da resina.

Em comparativo com a MP do fabricante, apenas uma amostra do CP do pó MPAG01 resultou em maior resistência mecânica. Porém, a média permaneceu em cerca de 85% da resistência deste. Acredita-se que este valor pode ser maior a medida que os resultados geométricos dos CP's forem mais homogêneos, fato que se comprovou durante os ensaios de resistência da MPAG02 (descrita a seguir).

Os CP's de taxa de saturação de líquido de 20% não tiveram resultados confiáveis, pois não tinham rigidez suficiente para gerarem fratura, e durante os ensaios acabavam sendo esmagados sem falhar. Por este motivo foram desconsiderados deste ensaio.

A amostra 14D resultou na maior resistência mecânica, sendo superior inclusive do que a amostra da MP do fabricante. Observa-se uma queda brusca na resistência quanto ao aumento de 14% para 16% e 18% na taxa de saturação de líquido, pelo fato de estes permitirem pouca absorção de infiltrante.

#### **4.3.5. Formulação do segundo sistema de matéria-prima – MPAG02**

Como os resultados referentes ao primeiro sistema de matéria-prima não foram considerados plenamente satisfatórios, foi efetuado uma nova formulação para tentar corrigir os problemas apresentados nos ensaios de fabricação. Nesta fase, recorreu-se a nova busca em base de dados a fim de encontrar soluções para problemas semelhantes. Segundo Marchelli et al. (2011), durante os testes iniciais realizados em seu trabalho, verificou-se que as peças fabricadas utilizando maltodextrina e açúcar como agentes aglutinantes ao vidro moído sofriam grande grau de deformação e retração, sendo que a solução encontrada foi diminuir os percentuais destes materiais na mistura com vidro. Desta forma, seguiu-se a recomendação proposta por Marchelli et. al. (2011).

A etapa de formulação do segundo sistema de matéria-prima seguiu os mesmos requisitos fundamentais, com tamanho e formato das partículas e características finais da peça. Quanto ao método de aglutinação, este continuou sendo orgânico, porém, ao invés de utilizar o líquido de deposição do fabricante, foi utilizada uma mistura de água destilada e álcool isopropílico, denominada XF1. Segundo Ganter (2009b) esta mistura possui as propriedades reológicas necessárias à cabeça de impressão utilizada no equipamento, porém custa cerca de 1% do valor do líquido de deposição do fabricante.

Desta forma, a segunda tentativa de aglutinação utilizou as seguintes proporções:

- 900 gramas de rejeitos moídos de ágata – 90%;
- 50 gramas de açúcar refinado – 5%;
- 50 gramas de maltodextrina – 5%.

#### 4.3.6. Testes de bancada da MPAG02

Foi efetuado teste de bancada também para a formulação MPAG02. Para este teste foi utilizado o pó formulado MPAG02 com 3 (três) diferentes taxas de saturação de líquido de ativação do aglutinante e o líquido de deposição XF1. Uma imagem do teste de bancada pode ser visualizada na Figura 31.

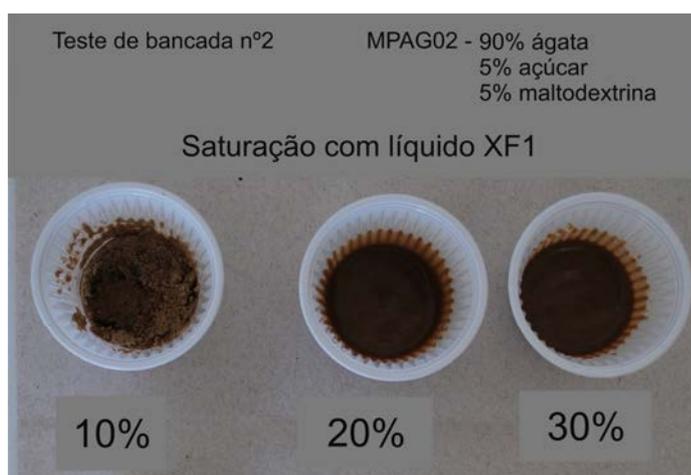


Figura 31 – Testes de bancada de interação entre pó e aglutinante da MPAG02.

A massa de pó foi medida com balança digital, de resolução de 1 g. Já o volume de líquido foi medido com uma seringa, de resolução 1 ml. Os resultados da análise foram registrados e são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Teste de bancada MPAG02.

Líquido/taxa de saturação	Absorção	Tempo de secagem
XF1/10%	Absorveu parte do pó	~ 1/2 hora
XF1/20%	Absorveu todo o pó	~ 24 horas
XF1/30%	Absorveu todo o pó	~ 48 horas

Deste ensaio foi possível observar que, para os dois líquidos de deposição, a taxa aproximada de líquido para volume da peça também fica entre 10% e 20%, como na MPAG01. Porém, observou-se que a absorção total do líquido no pó MPAG02, nas taxas de 5% e 10% foi mais rápida do que no pó MPAG01.

#### 4.3.7. Confecção de corpos de prova – MPAG02

Novamente foram confeccionados CP's para definir a taxa ideal de saturação do líquido de deposição. Tomou-se por base os resultados obtidos nos testes de bancada, sendo então efetuados testes com 6 (seis) diferentes taxas de deposição de líquido: 10%, 12%, 14%, 16%, 18% e 20% de volume de líquido em função do volume de pó. Os CP's fabricados com a MPAG02 seguiram os mesmos procedimentos realizados e descritos na seção 4.3.3. Foram fabricados 8 corpos de prova para cada taxa de líquido de deposição, num total de 48 CP's.

Os CP's fabricados possuíam maior rigidez que os anteriores, e quando submetidos à secagem em estufa, verificou-se que estes ficavam totalmente secos em aproximadamente duas horas. A Figura 32 apresenta os CP's após período de cura.

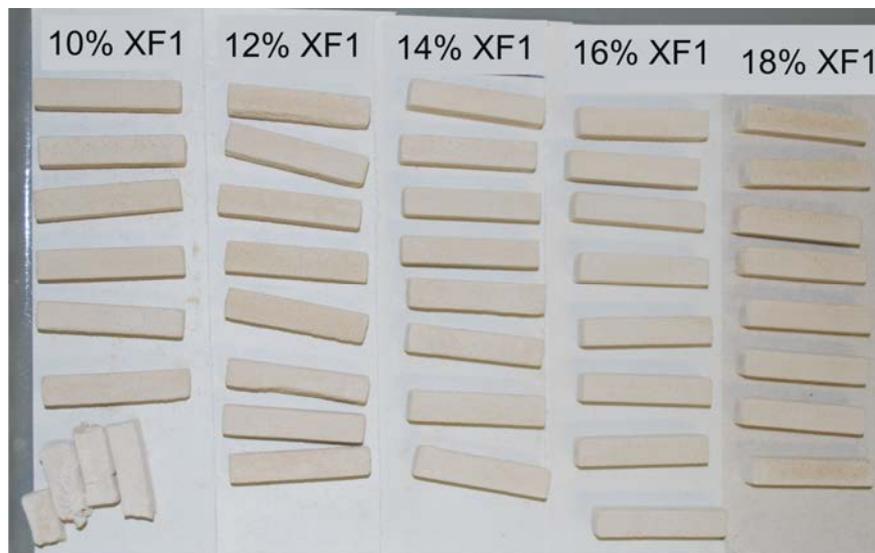


Figura 32 – Conjunto de CP's do pó MPAG02 após período de cura.

Os CP's do pó MPAG02 foram submetidos à infiltração com resina polimérica (cianoacrilato de baixíssima viscosidade), utilizando-se do mesmo procedimento realizado nos CP's anteriores, inclusive a medição da massa da resina infiltrada. Os dados referentes à medição são mostrados na Tabela 13.

**Tabela 13 – Pesagem do processo de infiltração dos CP's de MPAG02.**

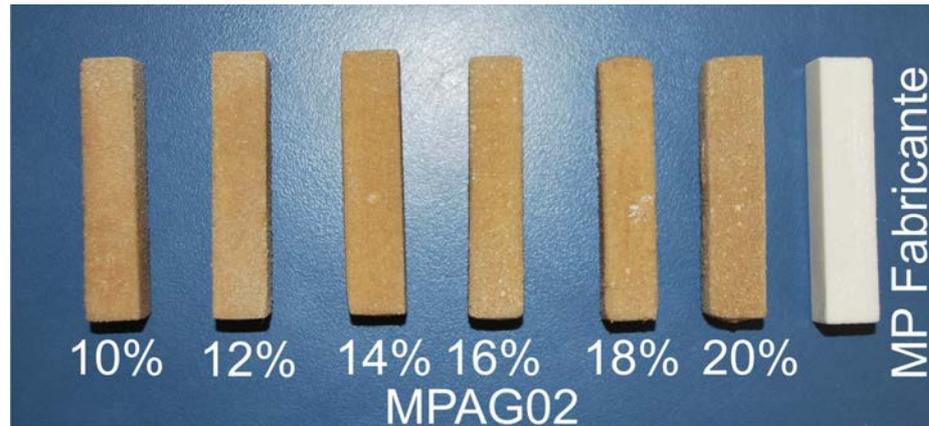
Taxa de saturação	Massa média das barras			
	Sem infiltrante [g]	Com infiltrante [g]	Variação [%]	Perda de infiltrante [%]
20%	4,7	6,1	22,4	28,2
18%	4,5	5,7	20,6	50,4
16%	4,2	5,4	21,3	32,6
14%	4,3	5,7	23,0	21,7
12%	4,2	5,4	22,9	21,8
10%	3,9	5,2	25,4	22,3

Desta medição, pode-se observar que entre a mesma taxa de saturação, os CP's apresentavam massa praticamente constante, com variação absoluta máxima de 0,2 gramas. Também se observou que o percentual de resina infiltrada nos CP's permaneceu na faixa de 20% a 25%, independente da taxa de saturação dos CP's. Vale ressaltar que a resina encontrava-se, visualmente, com maior viscosidade, devido a ser reutilizada de outras infiltrações. Este fato pode ser observado através da coluna “Perda de infiltrante”, que indica alto índice de perda, chegando a média de 50,45% na taxa de saturação de 18%.

#### **4.3.8. Caracterização tecnológica dos CP's de pó MPAG02**

Os CP's fabricados a partir do pó MPAG02 foram analisados com os mesmos critérios utilizados no pó MPAG01: formato, deformação e retração dimensional e resistência mecânica de flexão a quatro pontos. No entanto, como os CP's do pó MPAG02 se mostraram mais estáveis, foi efetuada uma comparação geométrica entre algumas peças fabricadas com este pó, com o pó ZP131® e seus respectivos modelos 3D.

Quanto ao formato das peças fabricadas, observou-se uma melhoria expressiva da MPAG02 em relação a MPAG01, pois os CP's mantiveram o formato do projeto virtual e não sofreram deformações visíveis a olho nu (Figura 33).



**Figura 33 – Comparativo de deformações dos CP's da MPAG02.**

A medição dos CP's com paquímetro também mostrou a melhoria na fidelidade ao modelo projetado. A dimensão nominal dos CP's era 10mm x 10mm x 50mm. A Tabela 14 a seguir mostra as dimensões médias dos CP's e a Tabela A3 do ANEXO 1 mostra todos os resultados medidos.

Pode-se observar, através da Tabela 14, que a fabricação dos CP's com o pó MPAG02 resultou em peças de dimensões uniformes e representativas do modelo 3D, com dimensões mais próximas à dimensão nominal e com desvio padrão bastante reduzido, se comparado com as medições efetuadas na MPAG01. Mesmo assim, pode-se observar o efeito do aumento da dimensão no eixo Z do equipamento (h). A isto, se atribui o fato de o líquido de deposição ultrapassar as camadas abaixo da desejada, aglutinando mais pó do que deveria. Porém, esta configuração (MPAG02) mostrou-se muito mais estável do ponto de vista dimensional, sendo que a variação dimensional, em todos os grupos de CP's, permaneceu menor que 0,50 mm em quase todos os grupos medidos.

**Tabela 14 – Tabela dimensional dos CP's fabricados de MPAG02.**

		Qtd. De CP's	h [mm]	Desvio Padrão	l [mm]	Desvio Padrão	d [mm]	Desvio Padrão
Dimensão nominal			10,00		10,00		10,00	
Taxa de saturação	10%	6	10,40	0,032	10,11	0,196	49,25	0,122
	12%	8	10,77	0,070	10,24	0,210	49,64	0,095
	14%	8	11,04	0,152	10,20	0,128	49,80	0,164
	16%	8	10,79	0,159	10,29	0,062	49,98	0,160
	18%	8	10,86	0,130	10,38	0,075	49,95	0,345
	20%	8	11,01	0,168	10,51	0,019	49,89	0,367

Assim como efetuado com a MPAG01, foram efetuados, em 25 amostras dos CP's fabricados com o pó MPAG02, ensaio de resistência mecânica à flexão a 4 pontos, seguindo a mesma metodologia aplicada anteriormente. Os dados médios obtidos durante o ensaio são apresentados na Tabela 15. Na Tabela A4 do ANEXO 1 estão registrados todos os dados coletados durante o ensaio.

**Tabela 15 – Ensaio de resistência à flexão a 4 pontos realizados nos CP's da MPAG02.**

		Qtd. CP's	Força de ruptura média [N]	Desvio Padrão	Deslocamen to máx. médio [mm]	Desvio Padrão	Tensão de ruptura média [MPa]	Desvio Padrão
<b>MP Fabricante</b>			<b>311,62</b>		<b>0,827</b>		<b>7,01</b>	
<b>Taxa de saturação</b>	10%	5	362,22	30,50	1,00	0,17	7,46	0,39
	12%	5	274,82	28,78	1,06	0,15	5,21	0,57
	14%	5	316,67	42,27	1,05	0,16	5,84	0,79
	16%	5	319,23	30,12	1,01	0,06	5,94	0,66
	18%	5	278,33	24,96	1,05	0,07	5,09	0,37
	20%	5	311,76	63,13	0,91	0,12	5,34	0,84

Como pode ser observado na Tabela 15, fica evidente a melhoria causada pela mudança nos parâmetros de formulação da matéria-prima, sendo que os resultados foram bastante próximos aos observados a matéria-prima do fabricante. Ainda, a relação de resina infiltrada no material contribui significativamente para a resistência mecânica, sendo que os CP's com taxa de saturação de 10%, que absorveram 25% de seu peso em infiltrante, tiveram resistência mecânica à flexão média bastante superior as outras amostras e também à matéria-prima do fabricante.

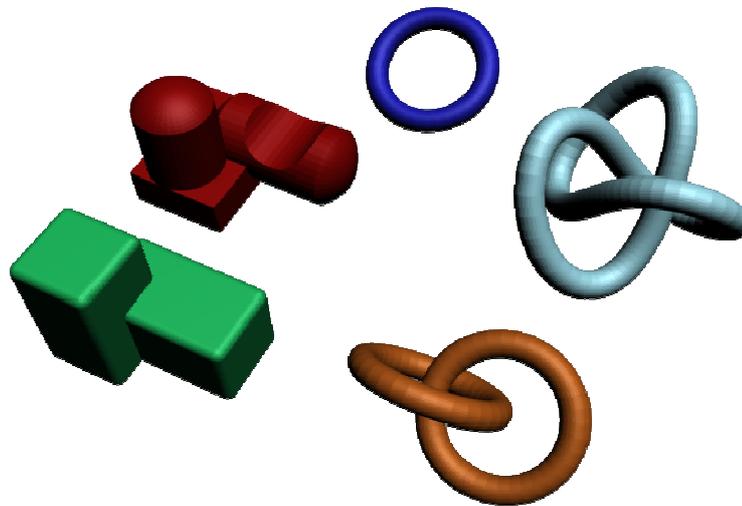
Durante o processo de infiltração dos CP's de MPAG02, foram tomados cuidados especiais para que não houvessem zonas de concentração de tensão. Desta forma, observou-se que as fraturas não mais ocorriam em pontos visivelmente concentrados no centro dos CP's, mas sim próximos aos pontos de pressão dos ensaios, o que mostra maior coerência e confiabilidade nos resultados.

Levando-se em conta apenas a resistência mecânica, o melhor resultado obtido foi com o grupo de saturação 10%. Porém, durante a manipulação dos CP's observou-se que este era mais frágil e perdia material mais facilmente, sendo que duas amostras foram quebradas antes da infiltração. Já os CP's de 16% (segunda maior média de resistência mecânica)

mostraram-se muito úmidos durante a manipulação, sendo que a sua limpeza era dificultada sobretudo na parte inferior, pois o líquido tendia a descer mais camadas do que o desejado, aumentando assim o volume de pó aglutinado.

Desta forma, aliando resistência mecânica e facilidade de manipulação, concluiu-se que a taxa ideal de saturação de XF1 para a formulação MPAG02 foi de 14%, pois permite facilidade de limpeza e resistência mecânica aproximadamente igual à matéria prima do fabricante.

Como os resultados obtidos com a confecção dos CP's da segunda formulação de matéria-prima mostraram-se melhores e mais confiáveis, com melhor estabilidade dimensional e geométrica, para verificar e quantificar a fidelidade geométrica das peças fabricadas com a MPAG02, foram fabricadas peças com arranjo geométrico mais complexo. O projeto 3D das geometrias é mostrado na Figura 34. As mesmas peças também foram fabricadas utilizando o material do fabricante (ZP131®), a fim de efetuar um comparativo entre os dois materiais.



**Figura 34 – Projeto 3D das peças da análise geométrica.**

Para fabricação das peças com a MPAG02 utilizou-se taxa de saturação de 14% de líquido de deposição, com duas horas de pré-cura no equipamento e duas horas de secagem em estufa. Após, foi efetuada limpeza das peças com o auxílio de um pincel macio e jatos de ar comprimido e por fim estas foram infiltradas em resina de cianoacrilato. A Figura 35 mostra as peças fabricadas em MPAG02 (marrons) e em ZP131® (brancas), lado a lado.



**Figura 35 – Peças fabricadas para análise geométrica.**

Da fabricação foi possível constatar que as peças que possuíam menor volume (3, 4 e 5), apesar de mais frágeis durante a retirada da cama de impressão, eram limpas com maior facilidade e não sofriam deformações durante a infiltração, semelhante ao que ocorreu na fabricação dos CP's. Porém, as peças de maior volume (1 e 2) apresentaram dificuldade durante a remoção do pó não aglutinado, sobretudo na parte inferior e nos detalhes, causando grandes deformações nestes locais. Atribui-se a isto o fato de que as peças maiores recebem maior volume de aglutinante, e este pode ter demorado a secar ou contaminado o pó que não deveria ser aglutinado, deixando-o úmido.

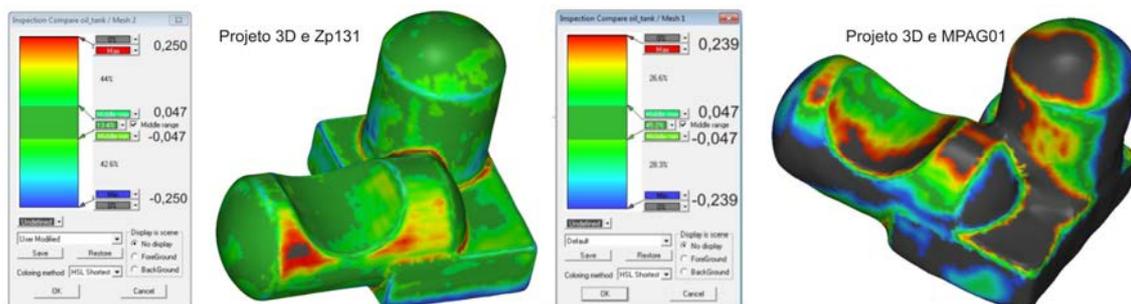
As peças 1 e 2 foram digitalizadas com o auxílio de um scanner 3D (REVScan 3D) com resolução de 0,2 mm e submetidas a uma análise de forma, a fim de verificar as deformidades resultantes do processo de fabricação. Para isso, foram efetuadas comparações entre as peças fabricadas com o ZP131® e o projeto 3D, as peças fabricadas com a MPAG02 e o projeto 3D e por fim entre as peças fabricadas com ZP131® e MPAG02. As superfícies digitalizadas são mostradas na Figura 36, e as análises comparativas na Figura 37 e na Figura 38.



**Figura 36 – Digitalização tridimensional das peças fabricadas.**

Pode-se observar na Figura 36 que as peças fabricadas com ZP131® possuem a superfície com formato mais regular do que as fabricadas com a MPAG02, onde se pode visualizar claramente as deformações decorrentes da limpeza da peça final e das deformações causadas pelo processo de infiltração.

Com análise geométrica pode-se quantificar os desvios de forma que ocorrem em toda a superfície das peças. Para isto, a malha obtida na digitalização tridimensional foi sobreposta com a malha do projeto 3D e utilizando a ferramenta de inspeção foi possível obter as imagens apresentadas neste trabalho. Com a inspeção, a superfície é colorida de acordo com as distâncias relativas às duas malhas, sendo que a cor verde indica o maior nível de proximidade, e as cores azul e vermelho as mais distantes. Quando o objeto apresenta superfície na cor cinza indica que a deformação não pode ser medida pela análise, pois ultrapassa os parâmetros indicados (neste caso, aproximadamente 0,25 mm para mais e para menos).



**Figura 37 – Análise geométrica da peça 01 entre os materiais e o projeto 3D.**

A Figura 37 mostra, à esquerda, a análise comparativa entre o projeto 3D e a peça 01 fabricada com o pó ZP131®. Pode-se observar que não houve grandes deformações, sendo que as maiores diferenças encontram-se nas bordas causados pela perda de material durante a limpeza e pelo excesso de infiltrante em alguns pontos. Já à direita da mesma figura, apresenta-se a análise geométrica da peça fabricada com o pó MPAG02 e o projeto 3D, onde se pode visualizar a grande deformação sofrida pelo modelo fabricado, sendo superior a 0,25mm nas faixas em cinza.

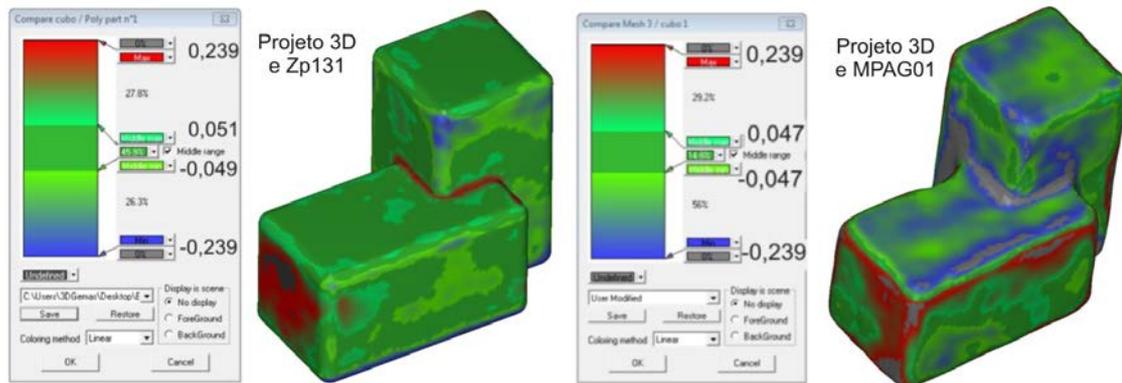


Figura 38 – Análise geométrica da peça 02 entre os materiais e o projeto 3D.

A Figura 38 à esquerda apresenta a análise comparativa entre o projeto 3D e a peça 02 fabricada com o pó ZP131®, onde se podem observar os mesmos defeitos da peça 01, como a perda de material nas bordas e um pouco de excesso nas juntas e superfícies planas. À direita, a análise entre o projeto 3D e a peça 02 fabricada com o pó MPAG02, mostrando que esta resultou em uma peça um pouco melhor que anterior (menor quantidade de superfície cinza), apesar de ter um grande defeito próximo à junta.

Apesar dos defeitos apresentados, considera-se que a fabricação destas peças foi satisfatória, pois todas seguiram, de forma bastante próximas, o seu projeto 3D. As peças 3, 4 e 5 fabricadas com o pó MPAG02 possuem qualidade igual às fabricadas com pó ZP131®, diferindo apenas pela cor final. Já as peças 1 e 2, as deformações causadas pelo excesso de líquido aglutinante podem ser atenuadas alterando os parâmetros de deposição deste, depositando menor quantidade de líquido no centro das peças e maior nas bordas (casca), método este também utilizado pelo pó ZP131®.

#### 4.4. Viabilidade financeira

A grande desvantagem do sistema de 3DP é o alto custo associado à sua matéria-prima e, conseqüentemente, as peças finais fabricadas por este processo, para um contexto de micro e pequenas empresas. Desta forma, o desenvolvimento deste trabalho deve contemplar além da reutilização de um material que não está sendo utilizado, a redução dos custos associados ao processo. Desta forma, é de crucial importância verificar a viabilidade financeira da nova matéria-prima.

#### 4.4.1. Custos associados ao sistema 3DP

Basicamente, sem levar em conta o custo inicial do equipamento e apenas os custos referentes aos insumos de fabricação, têm-se os seguintes itens:

- pó para impressão ZP131® – R\$ 0,37 por cm<sup>3</sup>
- líquido de deposição ZB60® – R\$ 0,65 por ml;
- cabeça de impressão – R\$ 0,11 por ml depositado
- infiltrante – R\$ 0,15 por grama

Tomando por base estes valores e sem levar em conta a mão-de-obra dispensada para a operação do equipamento, os custos finais de fabricação de algumas peças são mostrados na Tabela 16.

**Tabela 16 – Custos relativos à fabricação de peças com o pó ZP131®.**

Peça	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Custos para impressão em ZP131®				
		Pó	Líquido	Cabeçote	Infiltrante	TOTAL
<b>1 – retangular</b>	23,60	R\$ 8,73	R\$ 4,60	R\$ 0,78	R\$ 0,71	<b>R\$ 14,82</b>
<b>2 – cilíndrica</b>	25,00	R\$ 9,25	R\$ 4,88	R\$ 0,83	R\$ 0,75	<b>R\$ 15,70</b>
<b>3 – argola dupla</b>	5,28	R\$ 1,95	R\$ 1,03	R\$ 0,17	R\$ 0,16	<b>R\$ 3,32</b>
<b>4 – argola simples</b>	2,64	R\$ 0,98	R\$ 0,51	R\$ 0,09	R\$ 0,08	<b>R\$ 1,66</b>
<b>5 – torus knot</b>	11,51	R\$ 4,26	R\$ 2,24	R\$ 0,38	R\$ 0,35	<b>R\$ 7,23</b>
<b>Maquete CT – 1:150</b>	297,86	R\$ 110,21	R\$ 58,08	R\$ 9,83	R\$ 8,94	<b>R\$ 187,06</b>
<b>Peça de calibração</b>	385,23	R\$ 142,54	R\$ 75,12	R\$ 12,71	R\$ 11,56	<b>R\$ 241,92</b>

\* Peças de 1 a 5 - Figura 35.

Desta forma, pode-se observar que, mesmo para peças pequenas, como a argola simples e a dupla, tem-se um custo de fabricação elevado se comparado ao seu tamanho. No caso da fabricação de uma maquete de aproximadamente 200 mm x 100 mm x 69 mm (escala aproximada de 1:150) o custo para fabricação chega a R\$ 187,06, e se esta for confeccionada em escala 1:50, pode chegar a custar R\$ 10.500,00 (volume de 16.845 cm<sup>3</sup>). Já a peça de calibração, utilizada para corrigir efeitos de “bleed” e que segundo o fabricante deve ser executado ao menos uma vez ao mês, tem um custo de aproximadamente R\$ 241,92. Estes números mostram a inviabilidade de utilização da tecnologia em seu estado atual por empresas de micro e pequeno porte, sobretudo aos altos gastos com matéria-prima.

#### 4.4.2. Custos para obtenção da matéria-prima a partir de rejeitos de ágata

A utilização de matéria-prima baseada em rejeitos de ágata se torna uma alternativa para reduzir os custos do processo e torná-lo acessível a um maior grupo de empresas. Durante a realização deste trabalho, todos os processos realizados foram registrados em planilhas, sendo coletados dados referentes a tempo de realização de cada procedimento e também o seu percentual de aproveitamento, para desta forma, poder mensurar o custo de obtenção da nova matéria-prima, mesmo que a nível experimental.

Os dois principais processos realizados para a obtenção da matéria prima foram a moagem dos rejeitos e a classificação destes através de peneiramento. Durante a execução dos processos de moagem, foram registrados os dados referentes à massa de rejeitos que entrava no moinho, sendo que estes eram submetidos a moagem por 40 minutos, e então era retirado todo o volume dos frascos, sendo medido a massa de pó moído e a massa não moída de rejeitos. Disto, resultou que o aproveitamento médio do processo de moagem foi de 46%, com desvio padrão de 7,2%.

Para determinar o aproveitamento do processo de classificação por peneiras, foram realizados 5 testes de peneiramento. Para cada teste, foram utilizados 100 gramas de pó moído, sendo que estes foram classificados nas peneiras 20, 40, 80, 120 e 200 mesh. Para cada peneira classificada, foi medida a massa de pó que não ultrapassava a peneira, e ao final da peneira 200 mesh, foi medida a massa de pó que passou por esta, ou seja, possui granulometria menor que 200 mesh. Deste ensaio, resultou que o aproveitamento médio do processo de classificação por peneiramento foi de 57,4%, com desvio padrão de 14,5%.

Desta forma, para a produção de 1kg de pó para uso como matéria-prima de impressão 3D, na formulação MPAG02, utiliza-se 90% de pó de rejeitos. Considerando os aproveitamentos médios dos processos de moagem e peneiramento, para a obtenção de 900 gramas de pó de rejeitos de ágata com granulometria menor do que 200 mesh seria necessário a moagem de aproximadamente 3,4 kg de rejeitos (aproveitamento de 46% na moagem e 57,4% no peneiramento). Considerando a potência do motor do moinho e do peneirador eletromagnético como 1 CV, o número de ciclos necessários para a moagem (9 ciclos) e o número de ciclos necessário para o peneiramento (15 ciclos), tem-se um custo de aproximadamente R\$ 2,20 em energia consumida<sup>9</sup> para a produção de 900 gramas de pó.

---

<sup>9</sup> Tarifa B1 – Residencial da RGE em 05/10/2011 – R\$ 0,41/KWh

Considerando ainda que o custo com depreciação e manutenção dos equipamentos seja de aproximadamente R\$ 1,00 por hora de trabalho (valor arbitrado), e o tempo necessário para obter as 900 gramas desejadas seja de 7,3 horas, têm-se um custo de R\$ 7,30. Além disso, o custo dos outros componentes da matéria-prima, maltodextrina e açúcar refinado, são respectivamente, R\$ 15,90 e R\$ 10,90 por kg<sup>10</sup>, sendo utilizados 50 gramas de cada um, tem se o custo de R\$ 0,79 e R\$ 0,54. Assim, o custo total para a produção de 1 kg de pó de matéria-prima para impressão 3D a base de rejeitos de ágata, em nível experimental, sem levar em conta os custos com mão-de-obra e impostos que poderão incidir sobre ele pode ser mensurado em aproximadamente R\$ 10,83, cerca de 3,73% do valor do pó ZP131®.

Neste sentido, o líquido de deposição utilizado (XF1), proposto por Ganter (2009b), também pode ser quantificado. A sua confecção utiliza-se de 76,67% de água destilada e 23,33% de álcool isopropílico, que custam R\$ 6,00/litro e R\$ 15,00/litro<sup>11</sup>, respectivamente. Logo, o custo aproximado para a produção de 1 litro deste líquido, novamente sem levar em conta os custos com mão-de-obra e impostos, fica em torno de R\$ 8,10, aproximadamente 1,2% do valor do líquido ZB60®.

Desta forma, os custos de confecção com o pó MPAG02 e o líquido XF1, sem dados relativos a mão-de-obra e impostos, das mesmas peças já mensuradas na Tabela 16 são mostrados na Tabela 17.

**Tabela 17 – Custos relativos a fabricação de peças com o pó MPAG02.**

Peça	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Custos para impressão em MPAG02				
		Pó	Líquido	Cabeçote	Infiltrante	TOTAL
<b>1 – retangular</b>	23,60	R\$ 0,20	R\$ 0,03	R\$ 0,78	R\$ 0,71	R\$ 1,72
<b>2 – cilíndrica</b>	25,00	R\$ 0,21	R\$ 0,03	R\$ 0,83	R\$ 0,75	R\$ 1,82
<b>3 – argola dupla</b>	5,28	R\$ 0,05	R\$ 0,01	R\$ 0,17	R\$ 0,16	R\$ 0,38
<b>4 – argola simples</b>	2,64	R\$ 0,02	R\$ 0,00	R\$ 0,09	R\$ 0,08	R\$ 0,19
<b>5 – torus knot</b>	11,51	R\$ 0,10	R\$ 0,01	R\$ 0,38	R\$ 0,35	R\$ 0,84
<b>Maquete CT – 1:150</b>	297,86	R\$ 2,55	R\$ 0,34	R\$ 9,83	R\$ 8,94	R\$ 21,65
<b>Peça de calibração</b>	385,23	R\$ 3,30	R\$ 0,44	R\$ 12,71	R\$ 11,56	R\$ 28,00

Observa-se claramente uma redução nos custos, com o valor final associado às peças em cerca de 11% do original, utilizando a matéria-prima desenvolvida neste trabalho,

<sup>10</sup> Maltodextrina comprada em farmácia local e açúcar comprado em mercado local, ambos em julho de 2011.

<sup>11</sup> Água e álcool comprados em farmácia local em setembro de 2011.

conforme os dados comparativos apresentados na Tabela 18. Ainda, mesmo que o custo de obtenção das peças com a matéria-prima desenvolvida neste trabalho, incluindo mão-de-obra, impostos e outras despesas não mensuradas, seja três vezes maior, o custo final de fabricação das peças ficará em 30% do valor alcançado com o uso do sistema de matéria-prima do fabricante. Desta forma, comprava-se a viabilidade técnica e financeira da substituição da matéria-prima no processo de impressão tridimensional.

**Tabela 18 – Comparativo de valores finais de fabricação em ZP131® e MPAG02.**

<i>Peça</i>	<i>Volume [cm<sup>3</sup>]</i>	<i>Custo em ZP 131®</i>	<i>Custo em MPAG02</i>	<i>Percentual</i>
<b>1 – retangular</b>	23,60	R\$ 14,82	R\$ 1,72	11,6%
<b>2 – cilíndrica</b>	25,00	R\$ 15,70	R\$ 1,82	11,5%
<b>3 – argola dupla</b>	5,28	R\$ 3,32	R\$ 0,38	11,4%
<b>4 – argola simples</b>	2,64	R\$ 1,66	R\$ 0,19	11,4%
<b>5 – torus knot</b>	11,51	R\$ 7,23	R\$ 0,84	11,6%
<b>Maquete CT – 1:150</b>	297,86	R\$ 187,06	R\$ 21,65	11,6%
<b>Peça de calibração</b>	385,23	R\$ 241,92	R\$ 28,00	11,5%

Ressalta-se que nesse caso, foram utilizados os dados coletados durante o procedimento experimental. Para a utilização desta metodologia em escala industrial, recorreu-se a literatura para verificar a estimativa do consumo energético da moagem de quartzo em um moinho de bolas. Segundo Tavares (2003), uma boa estimativa do consumo energético na moagem em moinhos de bolas e de barras pode ser obtida usando a “Lei de Bond”, relacionada por

$$E_{moagem} = 10Wi \left( \frac{1}{\sqrt{d_p}} - \frac{1}{\sqrt{d_f}} \right) \quad (2)$$

Onde:

$Wi$  – índice de trabalho do material  $\left[ \frac{kWhr}{ton} \right]$

$d_p$  – tamanho da partícula resultante do processo [mm]

$d_f$  – tamanho da partícula de alimentação do processo [mm]

Considerando o índice de trabalho do quartzo, de 16,5  $\left[ \frac{kWhr}{ton} \right]$  (TAVARES, 2003), o tamanho de partícula inicial de 30 mm e o tamanho de partícula final de 0,040 mm, aplicando

a equação 2, tem-se que a energia de moagem para este caso é de  $794,87 \left[ \frac{kWhr}{ton} \right]$ , ou seja,  $0,794 \left[ \frac{kWhr}{kg} \right]$ , sendo que o custo energético associado seria de R\$ 0,32/kg, reduzindo ainda mais o custo energético (experimental R\$ 2,20) associado a obtenção da matéria-prima indicando que o processo pode ser ainda mais vantajoso se aplicado em maior escala.

## 5. CONCLUSÃO

O estudo sobre o setor de gemas e joias permitiu conhecer a dimensão econômica e o papel do município de Soledade/RS neste setor, assim como o nível tecnológico dos processos de beneficiamento. O beneficiamento de ágata é comumente encontrado nas pequenas indústrias da cidade, utilizando a mesma tecnologia trazida pelos alemães na metade do século, causando grandes volumes de rejeitos e desperdício de material gemológico.

A Prototipagem Rápida é uma tecnologia recente, que pode auxiliar não somente no projeto, mas também na fabricação de produtos, sobretudo para a construção de objetos complexos e obras de arte. O sistema 3DP é uma alternativa para a utilização de rejeitos de forma simples e eficaz. A descrição detalhada de uma metodologia para o desenvolvimento de matérias-primas customizadas ao sistema 3DP foi de fundamental importância para determinar as etapas e procedimentos necessários para alcançar o sucesso deste trabalho.

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

Quanto à resolução do problema formulado, sobre a possibilidade de fabricação de artefatos e protótipos utilizando como matéria-prima rejeitos de materiais gemológicos, neste caso a ágata, pode-se concluir que das duas hipóteses inicialmente levantadas, uma foi completamente verificada e comprovada, sendo que a segunda hipótese foi parcialmente comprovada. Seguem as seguintes conclusões:

- A revisão da literatura e o uso de metodologia adequada possibilitaram a seleção dos materiais e a determinação dos requisitos do equipamento, sendo que através do controle dos processos de moagem e classificação foi possível obter pó a partir dos rejeitos de ágata com tamanho adequado ao processo de impressão tridimensional;
- A fabricação de protótipos e artefatos de alta complexidade não pode ser totalmente comprovada, pois ainda se fazem necessários alguns ajustes na formulação da matéria-prima, sobretudo quanto à taxa de saturação de líquido de deposição, que pode ser alterada para obter melhorias nas propriedades das

peças finais. Contudo, protótipos de baixa e média complexidade já puderam ser confeccionados, com fidelidade geométrica e baixo índice de desvios dimensionais.

As análises de caracterização realizadas indicaram que o material disponibilizado pelo fabricante do equipamento não possui componentes especiais, sugerindo apenas que este possui um processo de fabricação refinado e com alto controle de qualidade. Mesmo assim, os materiais são comercializados por um preço elevado, que inviabiliza por muitas vezes a sua utilização. Contudo, a análise do material possibilitou ampliar o conhecimento sobre o processo, facilitando as etapas de formulação da nova matéria-prima.

Os processos e equipamentos utilizados para a moagem e classificação dos rejeitos mostraram-se eficazes, pois foi possível moer e selecionar apenas as partículas do tamanho desejado e adequado ao processo. Contudo, a obtenção de grande quantidade de volume de material em pó mostrou-se dispendiosa quanto ao tempo necessário para a operação e manuseio dos equipamentos. Ciclos de moagem de 40 minutos foram utilizados, porém com baixa quantidade de material moído e com aproveitamento de cerca de 45%, cada ciclo resultava em baixa produção de material moído. Os ciclos de peneiramento foram rápidos e eficientes em peneiras mais grosseiras, contudo mostravam-se cada vez mais demorados a cada vez que a malha tinha suas aberturas reduzidas. Esta foi, sem dúvida, a grande dificuldade encontrada durante a execução do trabalho.

O desenvolvimento das duas formulações de matéria-prima concretizou a idealização da proposta, tornando realidade a utilização dos rejeitos gemológicos no processo de impressão 3D. Os testes de bancada possibilitaram a aproximação da taxa de saturação, em ambos os casos, entre 10% e 20%, sendo que a comprovação da taxa de saturação ideal de 14% foi possível após a interligação dos resultados das análises dimensionais, resistência mecânica e pós-processamento.

A formulação MPAG01 mostrou-se incapaz de reproduzir as formas geométricas do modelo CAD, sofrendo muitas deformações e causando grandes dificuldades para sua manipulação e pós-processamento, com elevado tempo de secagem adicional e baixa absorção de infiltrante, o que ocasionou baixa resistência mecânica. Já a formulação MPAG02 mostrou-se mais consistente, com maior fidelidade na reprodução das geometrias, maior facilidade de manipulação, menor tempo de secagem e maior facilidade na limpeza e infiltração, além de apresentar o mesmo nível de resistência mecânica observada no material

do fabricante. Dessa forma, a formulação MPAG02 pode ser considerada plenamente satisfatória.

A confecção de protótipos de baixa e média complexidade foi efetuada para a realização dos ensaios de fidelidade geométrica, e pode ser considerada satisfatória. Mesmo que as peças com maior volume (1 e 2 da Figura 35) tenham sofrido deformações com os processos de limpeza e infiltração, as demais peças ficaram claramente fidedignas ao projeto 3D. Ressalta-se a peça 5, que possui geometria bastante peculiar foi fabricada com sucesso.

A análise de viabilidade financeira demonstrou que a matéria-prima desenvolvida neste trabalho produz peças finais com aproximadamente 70% de economia em relação à matéria-prima disponibilizada pelo fabricante, mostrando que esta aplicação não é somente viável, mas também uma alternativa coerente e concreta para a redução dos custos do processo de impressão 3D .

Do ponto de vista ambiental, a utilização de rejeitos sólidos não aproveitados pelo setor pode auxiliar o setor a encontrar o caminho do desenvolvimento sustentável, conferindo ao setor uma nova gama de produtos, diversificando o mercado atual e proporcionando a geração de emprego e renda.

### **5.1. Sugestões para trabalhos futuros**

Com o intuito de dar continuidade ao trabalho aqui iniciado, sugerem-se a seguir alguns assuntos que merecem maior investigação e aprimoramento:

- Utilização de rejeitos de outras fontes de beneficiamento, como por exemplo, do processo de rolagem de pedras, onde o rejeito já está na forma de pó, podendo assim reduzir ou eliminar a etapa de moagem;
- Aprimoramento da taxa de saturação de deposição de líquido, com a introdução da variável centro/casca, onde se utilizam diferentes taxas de deposição no centro e na casca do objeto fabricado, reduzindo o volume de líquido de deposição e o tempo de secagem deste;
- Aprimoramento da relação entre agentes aglutinantes e pó base, testando também outras substâncias como agente aglutinador;

- Efetuar pós-processamento via sinterização e comparar as propriedades resultantes com as obtidas com o processo de infiltração;
- Reduzir a rugosidade e melhorar o acabamento superficial das peças finais;

O conhecimento gerado durante o desenvolvimento deste trabalho pode servir de base para a sua continuidade, que ao reduzir os custos associados a um processo inovador possibilita a inclusão de micro e pequenas empresas desenvolverem novos produtos. Além disso, ao efetuar a reutilização de um material antes descartado, agrega-se valor aos rejeitos através do seu co-processamento, aumentando a produtividade dos recursos naturais e contribuindo com toda a cadeia produtiva de Gemas e Joias.

## 6. BIBLIOGRAFIA

3D SYSTEMS. **How does 3D printing work?** Disponível em <printin3d.com/how-does-3d-printing-work>. Acesso em 20/10/2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – C – 133/97 Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories.**

BALISTRERI, John. Neocubic and Geocubic. Disponível em: <http://johnbalistreriarist.com/neocubic-and-geocubic/>. Acesso em: 08/11/2010.

BATISTI, Vanessa S., TATSCH, Ana L., **O APL gaúcho de gemas e joias: infra-estrutura produtiva, educacional e institucional.** Estudos setoriais, cadeias produtivas, sistemas locais de produção. Disponível em: <<http://aplicativos.fipe.org.br/enaber/pdf/99.pdf>> São Leopoldo, 2008.

BQZ INTERNATIONAL. **Rapid Prototyping using laser stereolithography.** Treinamento do processo de Fundição por Cera Perdida e Estereolitografia. Minas Gerais, 2010.

BRUM, Irineu A.S. de; SILVA, Rodrigo A. **Sistemas de tingimento de gemas.** In: HARTMANN, Léo A.; SILVA, Juliano T. **Tecnologias para o setor de gemas e joias.** Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2010. p 205-217.

CARVALHO, Jonas. Prototipagem Rápida. Disponível em <[http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos\\_port/pag\\_conhec/prototipagem.html](http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/prototipagem.html)>. Acesso em 20/10/2010.

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.** 2007. 130 f. Dissertação. 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.** 2005. 95 f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.  
DIMITROV, D. WIJCK, W. SCHREVE, K. BEER, N. **Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing.** South Africa. Rapid Prototyping Journal. 2005.

GANTER, Mark. **Xtra White Ceramic. 2009a** Disponível em: <<http://open3dp.me.washington.edu/2009/09/xtra-white-ceramic>>. Acesso em 26/10/2011.

\_\_\_\_\_. **XF1 (eXperimental Fluid) – 400 class. 2009b** Disponível em: <<http://open3dp.me.washington.edu/2009/09/xf1-experimental-fluid---400-class/>>. Acesso em 26/10/2011.

GORNI, Antônio A. **Prototipagem Rápida: O Que É, Quem Faz e Por Que Utilizá-la.** Revista Plástico Industrial, 2001. p 230-239.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS. **Boletim Referencial de Preços.** Brasília: Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM). 2005.

\_\_\_\_\_. **Exportação Brasileira do Setor de Gemas e Metais Preciosos.** Brasília: Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM) 2010. Disponível em: <[www.ibgm.com.br](http://www.ibgm.com.br)>. Acesso em 04/10/2010.

\_\_\_\_\_. **Manual de Lapidação Diferenciada de Gemas.** Brasília: Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM). 2009. 48 p.

\_\_\_\_\_. **O Setor de Gemas e Joias no Brasil.** Brasília: Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM). 2008.

JUCHEM, Pedro .L., BRUM, Tânia M. M., FISCHER, Adriane C., LICCARDO, Antonio, CHODUR, Nelson L. **Potencial Gemológico Da Região Sul Do Brasil.** I Seminário sobre Design e Gemologia de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul. Anais. Soledade, 2009.

JUCHEM, Pedro .L., BRUM, Tânia M. RIPOLL, Victor. **O Laboratório de Gemologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.** In: HARTMANN, Léo A.; SILVA, Juliano T. **Tecnologias para o setor de gemas e joias.** Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2010. p 133-147.

KHALIFA, A. VOGT, S; WEISSER, J. GRIMM, G. RECHTENBACH, A. MEYER, W; SCHNABELRAUCH, M. **Development of a new calcium phostate powder-binder system for the 3D printing of a patient specific implants.** Journal of materials science: Materials in medicine. 2007.

LAIMER, Viviane R. **Avaliação do Desempenho Ambiental das Empresas Associadas ao Sindipedras de Soledade-RS.** 2008. 143 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2008.

LEUKERS, B; IRSEN, St. H; HÖCKLING, Chr; TILLE, C; SEITZ, H. **Bioceramic granulates for use in 3D printing: process engineering aspects.** Mat.-wiss. U. Werkstofftech. 2006.

LEUKERS, Barbara; GÜLKAN, Hülya; IRSEN, Stephan; MILZ, Stefan; TILLE, Carten; SCHIEKER, Mattias; SEITZ. **Hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering made by 3D printing.** Journal of materials science: materials in medicine 16. 2005. 1121-1124.

LINO, F. Jorge; NETO, Rui J. **A prototipagem rápida na indústria nacional**. Porto, FEUP [200?]. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~falves/Prototipagem.pdf>>. Acesso em: 29/09/2010.

MARCHELLI, Grant; PRABHAKAR, Renuka; STORTI, Duane; GANTER, Mark. **The guide to glass 3D printing: developments, methods, diagnostics and results**. Seattle, USA. Rapid Prototyping Journal. 2011.

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.

OLIVEIRA, Marcelo F. de. **Aplicações da Prototipagem Rápida em Projetos de Pesquisa**. 2008. 128 f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.

OLIVEIRA, Marcelo F.; MAIA, Izaque A.; NORITOMI, Pedro Y. NARGI, Giampero C.; SILVA, Jorge V. L.; FERREIRA, Betina M. P.; DUEK, Eliana A. R. **Construção de Scaffolds para engenharia tecidual utilizando prototipagem rápida**. Revista Matéria. V. 12, n. 2, pp. 373-382, 2007. Disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10858>>

OLIVEIRA, Mariana P.; ELESBÃO, Taiane; RASEIRA, Cristine; IPAR, Carlos E.; DUARTE, Lauren; KINDLEIN, Wilson; FERREIRA, Ney; SILVA, Juliano T.; **Panorama do Setor de Gemas e Materiais Gemológicos do Rio Grande do Sul**. 5º Workshop Design & Materiais. Anais. São Paulo, 2010.

ROISENBERG, Ari; VILASBÔAS, Fernanda da Silva. **Impacto ambiental do beneficiamento de ágatas na região de Soledade/RS**. In: HARTMANN, Léo A.; SILVA, Juliano T. **Tecnologias para o setor de gemas e joias**. Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2010. p 193-204.

SILVA, Anderson. **Mineração de Geodos em Ametista do Sul**. In: HARTMANN, Léo A.; SILVA, Juliano T. **Tecnologias para o setor de gemas e joias**. Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2010. p 233-246.

SINDIPEDRAS. Re: Histórico das empresas expositoras da Exposol. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <[ipar@upf.br](mailto:ipar@upf.br)> em set. 2010.

SOUZA, Eduardo P. **Contribuição ao estudo da aplicação da digitalização tridimensional para o design e a lapidação de gemas**. 2010.121 f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Design e Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

STRATASYS. **Products**. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/en/Products.aspx>> Acesso em: 20/10/2010.

TAVARES, L.M. Um novo método para o Cálculo da Eficiência Energética de Moinhos Industriais. Rio de Janeiro. Revista Matéria. 2003.

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.** 2009. 112 f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Design e Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

TUBINO, Luis. **Tratamento industrial da ágata em bruto no estado do Rio Grande do Sul.** 1998. 177p. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

UTELA, B.; STORTI, D.; ANDERSON, R.; GANTER, M. **The Printed Pot.** Seattle, USA. Academic Search Premier. 2009a.

\_\_\_\_\_. **A review of process development for new material systems in three dimensional printing (3DP).** Seattle, USA. Journal of Manufacturing Processes. 2009b.

\_\_\_\_\_. **Development Process for Custom Three Dimensional Printing (3DP) Material Systems.** Seattle, USA. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2010.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações.** 1ª Edição. São Paulo. Editora Edgard Blücher. 2007.

WEBMINERAL. **Mineralogy Database.** Disponível em <[www.webmineral.com](http://www.webmineral.com)>. Acesso em: 24/11/2010.

WOHLERS. Terry. **Wohlers Report 2001 Reveals Growth Figures and Forecasts in the RP Industry.** Wohlers Associates. Disponível em <[www.wohlersassociates.com](http://www.wohlersassociates.com)>. Acesso em 15/10/2010.

Z CORPORATION. **Z printer 310 plus hardware manual.** Z Corporation, Burlington, MA, 2007.

## ANEXO 1 – Tabelas de ensaios e dados coletados

Tabela A1 – Medição dimensional dos CP's fabricados em MPAG01.

Taxa de saturação de líquido de deposição	10%			12%			14%			
	CP	h (mm)	l (mm)	d (mm)	h (mm)	l (mm)	d (mm)	h (mm)	l (mm)	d (mm)
	1	10,15	9,35	47,80	9,95	9,15	46,80	10,45	10,00	48,25
	2	10,45	9,40	48,00	9,9	8,85	46,00	10,65	9,90	48,05
	3	10,25	9,30	47,95	9,70	9,05	47,20	10,25	9,45	47,05
	4	10,50	9,55	48,60	10,00	9,40	Queb	10,30	8,70	46,45
	5	10,25	9,50	49,00	9,70	8,90	45,30	10,60	9,90	48,45
	6	10,20	9,45	47,80	10,35	9,30	45,70	10,65	10,00	48,65
	7	10,60	9,45	48,10	9,90	9,30	Queb	10,25	8,90	46,15
	8	10,55	10,10	Queb	9,75	8,65	46,75	10,15	8,90	46,30
	<b>Média</b>	<b>10,37</b>	<b>9,51</b>	<b>48,18</b>	<b>9,91</b>	<b>9,08</b>	<b>46,29</b>	<b>10,41</b>	<b>9,47</b>	<b>47,42</b>
Taxa de saturação de líquido de deposição	16%			18%			20%			
	CP	h (mm)	l (mm)	d (mm)	h (mm)	l (mm)	d (mm)	h (mm)	l (mm)	d (mm)
	1	10,70	10,45	46,95	11,10	9,00	47,10	12,15	8,15	49,55
	2	10,35	9,60	47,65	11,05	9,40	47,55	10,00	9,40	50,00
	3	10,25	8,95	47,55	11,20	8,70	47,35	9,80	9,35	47,15
	4	10,80	9,60	47,55	10,30	9,35	46,85	10,45	9,90	48,90
	5	11,05	9,40	46,55	9,60	9,15	48,60	10,25	9,05	46,25
	6	9,95	9,10	47,00	10,65	9,00	47,95	10,30	10,10	48,00
	7	10,45	9,15	46,40	9,75	9,20	48,45	10,25	9,45	47,70
	8	10,95	9,10	46,55	10,70	9,10	46,40	12,70	8,40	49,65
	<b>Média</b>	<b>10,56</b>	<b>9,42</b>	<b>47,03</b>	<b>10,54</b>	<b>9,11</b>	<b>47,53</b>	<b>10,74</b>	<b>9,23</b>	<b>48,40</b>

**Tabela A2 – Resultados do ensaio de resistência mecânica à flexão a 4 pontos dos CP's fabricados em MPAG01.**

CP	Força máxima (N)	Desloc. máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)
10A	262,205	0,826	5,910
10B	216,651	0,470	4,960
10C	140,754	0,430	3,290
10D	169,134	0,374	3,610
10E	201,647	0,436	4,640
<b>Média</b>	<b>198,078</b>	<b>0,507</b>	<b>4,482</b>
<b>DP</b>	<b>46,351</b>	<b>0,181</b>	<b>1,058</b>
12A	166,202	0,397	4,390
12B	177,376	0,400	4,410
12C	117,119	0,345	3,150
12D	140,095	0,484	3,160
12E	131,448	0,470	3,410
<b>Média</b>	<b>146,448</b>	<b>0,419</b>	<b>3,704</b>
<b>DP</b>	<b>24,861</b>	<b>0,057</b>	<b>0,644</b>
14A	237,219	0,601	5,380
14B	244,403	0,528	4,940
14C	287,875	0,527	5,710
14D	441,202	0,799	9,090
14E	151,118	0,439	3,030
<b>Média</b>	<b>272,363</b>	<b>0,579</b>	<b>5,630</b>
<b>DP</b>	<b>106,612</b>	<b>0,136</b>	<b>2,195</b>

CP	Força máxima (N)	Desloc. máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)
16A	81,515	1,786	1,830
16B	122,125	1,020	2,450
16C	42,621	0,830	1,060
16D	198,95	0,446	4,350
16E	138,338	0,308	2,600
<b>Média</b>	<b>116,710</b>	<b>0,878</b>	<b>2,458</b>
<b>DP</b>	<b>59,137</b>	<b>0,582</b>	<b>1,219</b>
18A	113,805	1,046	2,460
18B	59,684	1,736	1,170
18C	55,702	1,373	1,260
18D	34,364	1,097	0,880
18E	33,927	1,968	0,910
<b>Média</b>	<b>59,496</b>	<b>1,444</b>	<b>1,336</b>
<b>DP</b>	<b>32,593</b>	<b>0,401</b>	<b>0,649</b>

<b>MP Fab.</b>	<b>311,62</b>	<b>0,827</b>	<b>7,01</b>
----------------	---------------	--------------	-------------

Tabela A3 – Medição dimensional dos CP's fabricados em MPAG02.

Taxa de saturação de líquido de deposição	10%			12%			14%		
	CP	h (mm)	l (mm)	d (mm)	h (mm)	l (mm)	d (mm)	h (mm)	l (mm)
1	10,35	10,10	49,00	10,85	10,10	49,70	11,00	10,15	49,85
2	10,40	10,50	49,30	10,80	10,30	49,75	10,90	10,15	49,65
3	10,40	10,00	49,30	10,80	10,50	49,50	10,90	10,20	50,00
4	10,40	10,00	49,30	10,75	10,40	49,70	11,10	10,00	49,95
5	10,45	10,05	49,30	10,75	10,15	49,65	11,00	10,30	49,90
6	10,40	10,00	49,30	10,70	10,00	49,70	10,95	10,40	49,75
7	Quebr.	Quebr.	Quebr.	10,85	10,00	49,60	11,15	10,30	49,50
8	Quebr.	Quebr.	Quebr.	10,65	10,50	49,50	11,35	10,10	49,80
<b>Média</b>	<b>10,40</b>	<b>10,11</b>	<b>49,25</b>	<b>10,76</b>	<b>10,24</b>	<b>49,63</b>	<b>11,04</b>	<b>10,20</b>	<b>49,80</b>
<b>Amplitude</b>	<b>0,10</b>	<b>0,50</b>	<b>0,30</b>	<b>0,20</b>	<b>0,50</b>	<b>0,25</b>	<b>0,45</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>
Taxa de saturação de líquido de deposição	16%			18%			20%		
	CP	h (mm)	l (mm)	d (mm)	h (mm)	l (mm)	d (mm)	h (mm)	l (mm)
1	11,00	10,40	49,75	11,00	10,20	49,55	11,25	10,50	50,00
2	10,75	10,30	50,00	10,90	10,40	50,30	10,90	10,55	50,30
3	10,90	10,25	49,90	10,90	10,40	50,20	11,15	10,50	49,70
4	10,95	10,25	50,10	11,00	10,35	50,40	11,00	10,50	50,20
5	10,50	10,35	50,00	10,80	10,45	50,00	10,75	10,50	49,60
6	10,75	10,30	49,80	10,80	10,40	49,55	10,95	10,50	49,30
7	10,75	10,30	50,25	10,90	10,40	50,00	11,10	10,50	50,15
8	10,70	10,20	50,00	10,60	10,40	49,60	Queb.	Queb.	Queb.
<b>Média</b>	<b>10,78</b>	<b>10,29</b>	<b>49,97</b>	<b>10,86</b>	<b>10,37</b>	<b>49,95</b>	<b>11,01</b>	<b>10,50</b>	<b>49,89</b>
<b>Amplitude</b>	<b>0,50</b>	<b>0,20</b>	<b>0,50</b>	<b>0,40</b>	<b>0,25</b>	<b>0,85</b>	<b>0,50</b>	<b>0,05</b>	<b>1,00</b>

**Tabela A4 – Resultados do ensaio de resistência mecânica à flexão a 4 pontos dos CP's fabricados em MPAG01.**

CP	Força máxima (N)	Desloc. máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)		CP	Força máxima (N)	Desloc. máximo (mm)	Tensão máxima (MPa)
10A	390,188	0,9117	8,001		16A	334,668	1,102	6,060
10B	386,151	0,9229	7,555		16B	285,037	0,9283	5,293
10C	365,297	0,9821	7,599		16C	347,877	1,0589	6,466
10D	314,156	1,3152	7,023		16D	288,272	0,9931	5,234
10E	355,331	0,894	7,144		16E	340,303	0,9825	6,697
<b>Média</b>	<b>362,2246</b>	<b>1,00518</b>	<b>7,464174</b>		<b>Média</b>	<b>319,2314</b>	<b>1,01296</b>	<b>5,949887</b>
<b>DP</b>	<b>30,504</b>	<b>0,176433</b>	<b>0,391283</b>		<b>DP</b>	<b>30,12728</b>	<b>0,068059</b>	<b>0,667192</b>
12A	248,464	1,022	4,699		18A	283,655	1,0055	5,136
12B	285,475	1,0325	5,360		18B	296,919	1,0887	5,472
12C	278,91	1,3305	5,465		18C	243,982	1,148	4,551
12D	245,833	0,9807	4,570		18D	304,596	0,9555	5,382
12E	315,420	0,9405	5,958		18E	262,507	1,0903	4,916
<b>Média</b>	<b>274,8204</b>	<b>1,06124</b>	<b>5,210448</b>		<b>Média</b>	<b>278,3318</b>	<b>1,0576</b>	<b>5,091498</b>
<b>DP</b>	<b>28,78151</b>	<b>0,154864</b>	<b>0,574224</b>		<b>DP</b>	<b>24,96979</b>	<b>0,076399</b>	<b>0,37206</b>
14A	302	1,2819	5,805		20A	408,963	0,7834	6,560
14B	320	0,9624	5,885		20B	269,977	0,9807	4,799
14C	253,971	0,895	4,589		20C	251,969	1,0923	4,377
14D	344,3	0,9862	6,210		20D	338,093	0,8305	5,744
14E	363,763	1,1715	6,745		20E	289,846	0,8848	5,233
<b>Média</b>	<b>316,675</b>	<b>1,0594</b>	<b>5,847004</b>		<b>Média</b>	<b>311,7696</b>	<b>0,91434</b>	<b>5,342502</b>
<b>DP</b>	<b>42,27656</b>	<b>0,161142</b>	<b>0,794352</b>		<b>DP</b>	<b>63,13251</b>	<b>0,123613</b>	<b>0,849025</b>