UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL

Giovani Fávero

OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DE PÓ DE OSSO LIOFILIZADO BOVINO PARA USO EM IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL

Passo Fundo
2016

Giovani Fávero

OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DE PÓ DE OSSO LIOFILIZADO BOVINO PARA USO EM IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL

Orientador: Prof. Dr. Leandro de Freitas Spinelli

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo
2016

Giovani Fávero

OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DE PÓ DE OSSO LIOFILIZADO BOVINO PARA USO EM IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 16 de setembro de 2016.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Leandro de Freitas Spinelli
Orientador

Professor Doutor Carlos Roberto Galia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Nilson Luiz Maziero
Universidade de Passo Fundo

Dedico este trabalho para todas as pessoas que de muitas formas me incentivaram e principalmente me ajudaram direta e indiretamente para que fosse possível a concretização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela motivação e ajuda durante este período de estudos, estes que ficavam ansiosos esperando com uma saborosa e deliciosa comida em cada viagem minha de retorno da UPF para Chapecó-SC.

À minha namorada, companheira do meu dia a dia e também de viagens até a UPF, por ter a paciência e compreensão nos momentos de desafio em que estive envolvido na resolução das tarefas dos estudos.

Ao professor orientador Spinelli pelos momentos de orientação, motivação e confiança depositada em mim, obrigado por tudo.

Ao professor Dr. Carlos Galia, pelo apoio necessário ao desenvolvimento desta pesquisa e participação na banca examinadora desta dissertação.

Aos professores Nilson Maziero e Charles pelos conselhos, sugestões e ensinamentos repassados no exame de qualificação e defesa deste estudo.

Ao Fernando Pagnussato do HCPA/UFRGS, pela participação na liofilização e fornecimento do OLB.

Ao professor Carlos Edmundo, pelo compartilhamento de experiências e materiais, além de esclarecimento de dúvidas relacionadas ao procedimento experimental realizado em sua dissertação.

A Secretaria de Estado da Educação do Estado de Santa Catarina pela concessão de bolsa de estudos do Programa de Bolsas Universitárias – PROGRAMA UNIEDU PÓS-GRADUAÇÃO, coordenado pela Diretoria de Educação Superior Fundação.

A toda equipe de técnicos laboratoristas da UPF pelo atendimento cordial e prestativo para realização dos ensaios laboratoriais e demais esclarecimentos necessários para concretização deste estudo.

A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação, pelos auxílios, ensinamentos e serviços prestados a nós alunos.

Aos colegas de trabalho eng. Daniel Espig e o eng. Silvio Teston, por terem cooperado tecnicamente no desenvolvimento desse trabalho, fica registrado o agradecimento.

Aos colegas professores e estagiários dos laboratórios do SENAI Chapecó, que auxiliaram em tarefas laboratoriais necessárias para conclusão deste estudo.

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito.”

Chico Xavier

RESUMO

O desenvolvimento de matérias-primas (MP) atípicas para uso em equipamentos de Prototipagem Rápida (PR) que possuem tecnologia de impressão 3DP tem ampliado as áreas de aplicação destes equipamentos. O osso liofilizado bovino (OLB), MP atípica proposta neste estudo, é encontrado em vários formatos e opções de marcas disponíveis para uso nas áreas da medicina, odontologia e veterinária, como implantes e enxertos ósseos. Baseado neste cenário o presente trabalho teve por objetivo processar blocos retangulares de OLB através do desenvolvimento de uma metodologia e da construção de equipamentos adaptados para a cominuição dos blocos. Esta metodologia mostrou-se eficiente na transformação dos blocos em pó fino de OLB e possibilitou a replicação do processo de cominuição desenvolvido para o estudo. Ainda, foi realizada a caracterização do pó virgem ZP 131® e do pó fino de OLB através de técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS) e análise granulométrica. As curvas médias granulométricas para os pós ensaiados utilizaram a técnica de interpolação Spline Cúbica de Akima, resultando pontos convergentes entre as curvas dos pós analisados. Os pós apresentaram características semelhantes, atendendo o requisito mínimo de resolução de impressão do equipamento 3DP. A análise estatística aplicada para os pós revelou que o pó fino de OLB apresentou menor dispersão em relação ao outro pó e atingiu parâmetros adequados para uso em impressão 3DP.

Palavras-chave: Impressora 3DP. Moagem. Pó. Osso Liofilizado Bovino. Granulometria.

ABSTRACT

The development of raw material (MP) atypical for use in Rapid Prototyping equipment (PR) which have 3DP printing technology has expanded the application areas such equipment. Lyophilized bovine bone (OLB), atypical MP proposed in this study is found in various formats and options of brands available for use in medicine, dentistry and veterinary medicine, as bone implants and grafts. Based on this scenario, this study aimed to process rectangular block OLB by developing a methodology and construction equipment adapted for the comminution of the blocks. This methodology proved to be efficient in processing blocks OLB fine powder and allowed replication of the comminution process developed for the study. Still, it was carried out the characterization of virgin powder ZP 131® and OLB fine powder by scanning electron microscopy technique (SEM), X-Ray Spectroscopy Energy Dispersion (EDS) and particle size analysis. The average grain size curves for the tested powders used the Spline interpolation technique Cúbica of Akima, resulting convergence between the curves of the powders analyzed. The post had similar characteristics, meeting the minimum requirement print resolution of 3DP equipment. The statistical analysis applied to the powders revealed that the OLB fine powder showed less dispersion in relation to the other powdered and reached appropriate parameters for use in printing 3DP.

Keywords: 3DP printer. Milling. Powder. Lyophilized Bovine Bone. Granulometry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Protótipo funcional resultante da impressão 3D. 6
Figura 2 – Construção de um avião modelo Airbus 350 utilizando a impressão 3D. 7
Figura 3 – Principio de funcionamento da tecnologia de impressão 3DP. 9
Figura 4 – Exemplo de objeto impresso utilizando a tecnologia 3DP. 10
Figura 5 – Modelo comparativo digital e físico do objeto impresso na impressora 3DP. 11
Figura 6 – Etapas sequenciais para obtenção de modelos impressos em sistemas 3DP. 11
Figura 7 – Maquete residencial impressa utilizando o sistema de impressão 3D FDM. 12
Figura 8 – Etapas da metodologia para desenvolvimento de MP para sistemas 3DP. 13
Figura 9 – Representação esquemática usual de um moinho de bolas universal. 17
Figura 10 – Partes setoriais constituintes de um osso bovino. 21
Figura 11 - Utilização de enxerto ósseo bovino em bloco aplicado em osso atrofiado. 24
Figura 12 - Teste de bancada utilizando liquido aglutinante e a formulacão de receitas. 27
Figura 13 - Moinho de bolas proposto no estudo de Nos (2011). 29
Figura 14 - Moinho de bolas construído nas diretrizes propostas por Paula et al. (2014). 30
Figura 15 – Tarefas pertencentes a primeira fase do procedimento experimental do estudo. . 32
Figura 16 – Tarefas pertencentes a segunda fase do procedimento experimental do estudo... 32
Figura 17 – Equipamentos pertencentes à impressora Z310 Plus. 33
Figura 18 – Procedimento de pesagem e de peneiramento para os pós deste estudo. 35
Figura 19 – Protótipo construído para britagem de blocos de OLB. 38
Figura 20 – Modelo virtual revisado do triturador de engrenagens helicoidais. 38
Figura 21 – Modelo virtual e físico do moinho de bolas proposto ao estudo. 40
Figura 22 – Circuito eletrônico PWM proposto para uso no moinho de bolas. 41
Figura 23 – Modelo virtual revisado do moinho de bolas utilizado no experimento. 42
Figura 24 – Etapas e procedimentos necessários ao desenvolvimento do experimento. 44
Figura 25 - Análise MEV do pó virgem de ZP 131® utilizado na impressora 3DP. 47
Figura 26 – Análise físico-química do pó virgem de ZP 131® utilizado na impressora 3DP. 48
Figura 27 - Análise EDS do pó virgem ZP 131® utilizado na impressora 3DP. 49
Figura 28 - Análise MEV do pó de reuso ZP 131® utilizado na impressora 3DP. 50
Figura 29 – Análise físico-química do pó de reuso ZP 131® utilizado na impressora 3DP. .. 51

Figura 30 - Análise EDS do pó de reuso ZP 131® utilizado na impressora 3DP. 52
Figura 31 – Interior do equipamento 3DP modelo ZPrinter 310 Plus. 53
Figura 32 – Resultado obtido após peneiramento do pó virgem de ZP 131®. 54
Figura 33 – Dimensão do bloco de OLB..... 56
Figura 34 – Triturador de engrenagens helicoidais construido e adaptado para o estudo. 57
Figura 35 – Massa de partículas sólidas de OLB após britagem. 58
Figura 36 – Moinho de bolas de baixo custo projetado e construído para este estudo..... 58
Figura 37 – Detalhe do interior do cilindro de moagem do equipamento construído. 59
Figura 38 – Massa de pó fino de OLB obtida após o peneiramento..... 60
Figura 39 - Análise MEV do pó fino de OLB resultante do peneiramento mecânico..... 61
Figura 40 – Análise físico-química do pó de OLB resultante do peneiramento mecânico..... 62
Figura 41 – Análise EDS do pó de OLB resultante do peneiramento mecânico..... 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Influência do tamanho das partículas na etapa do processo de 3DP. 14
Tabela 2 - Influência do formato das partículas de pó na etapa do processo de 3DP..... 15
Tabela 3 – Dureza e densidade de materiais comumente empregados para a moagem com moinho de bolas. 18
Tabela 4 - Dados do Geistlich Bio-Oss® e do osso humano. 22
Tabela 5 – Determinações encontradas no estudo de Galia et al. (2009). 23
Tabela 6 - Granulometria de OLB dispoível comercialmente..... 25
Tabela 7 – Formato disponível e custo de aquisição de OLB. 26
Tabela 8 – Composição das receitas elaboradas para uso na 3DP. 27
Tabela 9 – Valores calculados para definição da engrenagem helicoidal. 37
Tabela 10 – Valores calculados para dimensionamento do moinho de bolas. 40
Tabela 11 – Valores obtidos no ensaio granulométrico do pó virgem de ZP 131®. 55
Tabela 12 – Valores obtidos no ensaio granulométrico do pó de OLB. 64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva média resultante da análise granulométrica do pó virgem de ZP 131®..... 55
Gráfico 2 – Curva média resultante da análise granulométrica do pó de OLB..... 65
Gráfico 3 – Curva média do pó virgem de ZP 131® e o pó de OLB. 66
Gráfico 4 – Box-plot da massa de pó virgem ZP 131® e o pó de OLB e peneiras..... 68
Gráfico 5 – Box-plot da massa de pó virgem de ZP 131® e o pó de OLB e peneira 400 mesh. 69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões
3DP	*Tree Dimension Printer*
CAD	*Computer Aided Design*
PR	Prototipagem Rápida
OLB	Osso Liofilizado Bovino
OLH	Osso Liofilizado Humano
ANVISA	Agencia Nacional de Vigilância Sanitária
MP	Matéria-Prima
UPF	Universidade de Passo Fundo
RS	Rio Grande do Sul
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
EDS	*Energy Dispersive X Ray Spectroscopy*
SLA	Estereolitografia
FDM	Deposição de Material Fundido
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
LOM	Manufatura de Objetos Laminados
LENS	Fabricação da Forma Final a Laser
STL	*Stereolitography*
EUA	Estados Unidos da América
PVC	Cloreto de Polivinila
AISI	*American Iron and Steel Institute*
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FTIR	*Fourier Transform Infrared Spectrometry*
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
RPM	Rotações por Minuto
PWM	*Pulse-Witdth Modulation*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2.1 Cenário e Aplicações de Prototipagem Rápida 5
2.1.1 Princípio de Funcionamento das Máquinas de PR e do Sistema 3DP 8
2.1.2 Etapas de Impressão pelo Sistema 3DP 10
2.2 Desenvolvimento de Matérias-Primas Customizadas para o Sistema 3DP 12
2.2.1 Formulação do Pó 14
2.3 Britagem e Moagem: Finalidade e Equipamentos 15
2.4 Enxerto Ósseo em Seres Humanos 19
2.5 Osso Liofilizado Bovino 20
2.5.1 Características do OLB 22
2.5.2 Disponibilidade Comercial de OLB 23
2.6 Estudos Relevantes para o Trabalho 26
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 32
3.1 Características Técnicas do Equipamento 3DP Disponível 33
3.2 Técnicas para Caracterização do Pó ZP 131® e do Pó de OLB 34
3.3 Características dos Equipamentos Construídos e Adaptados para Cominuição de Blocos Retangulares de OLB 36
3.4 Definição de Metodologia Experimental 44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 46
4.1 Caracterização da MP Comercializada para Impressora 3DP: Pó ZP 131® 46
4.2 Características dos Blocos Retangulares de OLB 56
4.3 Equipamentos Construídos para Cominuição de Blocos Retangulares de OLB 57
4.4 Caracterização da MP Atípica Resultante: Pó de OLB 60
4.5 Comparativos de Resultados – Pó ZP 131® e Pó de OLB 66
5. CONCLUSÕES 71
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 72
7. REFERÊNCIAS 73
APÊNDICE A – Desenho Técnico do Equipamento Engrenagens Helicoidais 81
APÊNDICE B – Desenho Técnico do Equipamento Moinho de Bolas 85
APÊNDICE C – Circuito Eletrônico PWM para Controle de Motor DC 89

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de matérias-primas (MP) atípicas para uso em equipamentos de Prototipagem Rápida (PR) que possuem a tecnologia de impressão em três dimensões (3DP), na qual um cabeçote de impressão de jato de tinta se move através de um leito de pó, vem ganhando destaque em pesquisas acadêmicas. Segundo Ipar (2011), um destes fatores é o alto custo devido à importação para aquisição de MP produzidas pelos fabricantes de impressoras 3DP. Para o autor, outro fator impactante é a falta de alternativas no comércio de MP de diferentes materiais destinadas a estas impressoras, limitando o uso da impressora 3DP para algumas áreas da engenharia.

Dentre as pesquisas acadêmicas para elaboração de MP atípica no Brasil destaca-se o estudo de Ipar (2011). Neste estudo o autor conseguiu elaborar uma MP atípica através do emprego de uma metodologia para moagem e classificação dos rejeitos minerais a fim de transformá-los em pó com granulometria adequada ao processo de impressão 3DP. O autor utilizou este pó misturado ao pó de Maltodextrina que resultou na receita de MP atípica, utilizada na impressão de lotes de corpos de prova na impressora 3DP.

Recentemente, pesquisadores do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Washington, nos Estados Unidos da América (EUA) conseguiram efetuar com sucesso a substituição do material de impressão em uma impressora 3DP de mesmo modelo e fabricante do equipamento que se encontra disponível para uso na Universidade de Passo Fundo (UPF), em Passo Fundo, no Estado do Rio Grande do Sul. Os autores testaram diversas formulações com materiais distintos como o vidro e o osso, incluindo materiais cerâmicos.

Atualmente na área da medicina estão disponíveis várias opções de biomateriais. Dentre as pesquisas disponíveis nesta área, destacam-se os enxertos xenógenos, principalmente os de origem bovina. Alicerçado na abundância, baixo custo do osso bovino e no processamento mecânico e químico adequado, empresas vêm produzindo biomateriais com osso bovino como substituto ósseo (Sanada et al., 2003).

No Brasil podemos encontrar para aquisição o osso liofilizado bovino (OLB) em blocos com vários formatos e opções de marcas, além da opção em pó com tamanho mínimo de suas partículas em 100 µm. Entretanto, estas características não atendem aos requisitos exigidos pelos equipamentos de impressão que utilizam tecnologia 3DP.

Apesar do cenário acima exposto, os meios acadêmicos em geral no Brasil possuem apenas registros experimentais referentes à confecção de parafusos de OLB, os quais foram submetidos ao processo de fabricação mecânica por usinagem para transformação de ossos bovinos em parafusos. Ainda, o processamento de blocos retangulares de OLB ao estado de pó fino ainda não foi visualizado nos registros acadêmicos experimentais do Brasil, fator este decisivo para motivação e desenvolvimento deste estudo.

Com o propósito deste estudo em elaborar uma MP atípica para uso em impressora 3DP é necessário que o material sólido esteja disponível no formato de pó fino. O método para redução do tamanho de partículas sólidas é conhecido por cominuição. O método de cominuição compreende o processo de britagem e de moagem comumente utilizada na área de mineração. Com o emprego destes processos é possível fragmentar e reduzir as partículas de materiais sólidos, transformando-os em pó fino. Neste processo a etapa de moagem das partículas dos materiais sólidos é a que apresenta maior relevância. A moagem é uma técnica amplamente utilizada nos trabalhos industriais e laboratoriais no processamento de fármacos, minérios, fertilizantes, alimentos, metais, tintas, argamassas, materiais refratários, cerâmicas, óxidos, catalisadores, entre outros produtos.

Na realização deste trabalho utilizaram-se técnicas de cominuição através do emprego de equipamentos que foram adaptados com o objetivo de estabelecer metodologia para processar blocos retangulares de OLB a fim de transformá-lo em pó fino. Os equipamentos construídos e adaptados para este estudo auxiliaram o processo de britagem, que representa a fragmentação dos blocos retangulares de OLB, e o processo de moagem, que equivale à redução de tamanho dos fragmentos dos blocos retangulares de OLB, transformando-o em pó fino. O desenvolvimento dos equipamentos construídos e adaptados para este estudo foi baseado nos trabalhos de Paula et al. (2014) e de Nos (2011). A função destes equipamentos, bem como, as suas características para este estudo serão detalhadas na seção 3.3. Referente a elaboração e definição da metodologia desenvolvida para realização dos trabalhos neste estudo, foi considerada a metodologia e experiências compartilhadas no estudo de Ipar (2011), sendo apresentada em maior nível de detalhamento na seção 3.4.

Baseado no intuito deste trabalho em elaborar uma MP atípica para uso em equipamentos de impressão que utilizam tecnologia 3DP, adotou-se como referência padrão de características o pó disponível no Laboratório de Manufatura da UPF. Este pó é denominado comercialmente pelo nome ZP 131®. A seleção deste pó, submetido à execução

dos experimentos laboratoriais, ocorre devido ao mesmo ser o insumo comumente utilizado como MP no equipamento de impressão 3DP, modelo ZPrinter 310 Plus®, fabricado nos EUA pela empresa Z Corporation. Além do equipamento, esta empresa produz este e outros pós para uso nesta impressora.

Inicialmente, para caracterização química do pó ZP 131®, considerou-se as informações disponíveis no estudo de Ipar (2011). Em seu estudo o autor revelou que o pó ZP 131® possui formulação química a base de gesso. Esta informação é relevante para o desenvolvimento de MP atípica para uso em impressoras 3DP devido ao pó ZP 131® ser produzido pelo fabricante do equipamento.

Dentre as características desejáveis para uma MP atípica para uso em impressora 3DP está a dimensão da partícula sólida do pó. Esta característica pode ser avaliada através da técnica de peneiramento mecânico, comumente chamada de ensaio de granulometria. Este ensaio permite identificar a característica física apresentada pelo pó através da curva granulométrica. O comportamento da curva granulométrica está relacionado à retenção de partículas em peneiras que possuem abertura de malha com tamanho conhecido e normatizado. A massa particulada retida na peneira indica que as partículas possuem tamanho maior que a abertura da malha da peneira em uso.

Diante do acima exposto, para este estudo, não se pode dispensar as características físico-químicas do pó ZP 131® e do pó fino resultante do processamento de blocos retangulares de OLB. Estas informações são vitais para avaliar se o pó fino de OLB está adequado aos requisitos granulométricos exigidos em impressoras 3DP. No entanto, outra proposição a ser verificada neste estudo é se a curva granulométrica do pó fino de OLB poderá indicar se o mesmo é compatível para uso como MP atípica no equipamento de impressão 3DP sem o acréscimo de aditivos, diferentemente dos resultados obtidos no estudo realizado pelos pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica do campus da Universidade de Washington e de Ipar (2011).

Referente aos equipamentos industrializados e disponíveis nos laboratórios da UPF e que foram utilizados na execução deste experimento estão: Balança de Precisão, Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), Energia Dispersiva por Raios X (EDS), Agitador e Conjunto de Peneiras Granulométricas. A finalidade destes equipamentos, bem como, as suas características serão detalhadas na seção 3.2.

O objetivo geral deste trabalho é processar blocos retangulares de OLB a fim de transformá-los em pó fino, estabelecendo assim uma metodologia através do emprego de equipamentos adaptados para fins de obtenção de característica granulométrica compatível apropriada para uso em equipamentos que possuem tecnologia de impressão 3DP.

O tema abordado nesta dissertação é parte de uma linha de pesquisa em biomateriais do Laboratório de Bioengenharia, Biomecânica e Biomateriais da UPF em parceria com o Banco de Multitecidos do Hospital das Clínicas de Porto Alegre (HCPA), localizado no município de Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul.

O presente trabalho apresenta a seguinte estrutura: no capitulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre PR, moinhos, características de OLB, trabalhos relevantes realizados sobre construção de moinhos e o desenvolvimento de MP atípica para impressoras 3DP; no capitulo 3, é discutido o procedimento experimental adotado no trabalho, ou seja, são apresentadas as análises laboratoriais realizadas ao pó ZP 131® e para o pó de OLB, além dos equipamentos utilizados para a realização dos trabalhos; no capitulo 4, são apresentados os resultados obtidos nessa dissertação; no capítulo 5 são discutidas as conclusões desse trabalho e por fim no capítulo 6 são apresentados alguns itens para a realização na sequência deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são descritos os referenciais teóricos necessários à execução deste trabalho. A sequência a seguir apresenta os cenários, aplicações e características de sistemas de PR com aprofundamento no funcionamento de equipamentos de impressão que possuem a tecnologia 3DP. Além disso, é apresentada uma metodologia para elaboração de MP atípica para impressoras 3DP, bem como a importância da moagem na granulometria de pós. Também se encontra a importância e aplicação de enxertos ósseos em humanos e as características físicas e químicas do enxerto de OLB e sua disponibilidade comercial. Por fim, apresenta-se o estudo atual correlato ao tema desta pesquisa, com ênfase em experimentos relacionados ao desenvolvimento de MP atípica transformado em pó de rejeitos minerais e de osso, usadas em equipamentos 3DP na impressão de modelos físicos, além do desenvolvimento de equipamentos de bancada adaptados para britagem e moagem de materiais sólidos.

2.1 Cenário e Aplicações de Prototipagem Rápida

Segundo Pereira (2006), os sistemas de PR surgiram em 1987 com a introdução da tecnologia de estereolitografia. Atualmente são empregadas várias técnicas de engenharia em PR. Existem aproximadamente 40 fabricantes que fazem máquinas de PR e que podem ser classificadas em 10 principais categorias de tecnologia no mundo inteiro. As máquinas de prototipagem 3D são classificadas em relação ao tipo de funcionamento, ou seja, baseado em líquidos, sólidos ou pó (Romeiro Filho, 2010). Dentre estes, as principais categorias de tecnologia são:

- ✓ Estereolitografia (SLA);
- ✓ Sinterização Seletiva a Laser (SLS);
- ✓ Deposição de Material Fundido (FDM);
- ✓ Impressão em Três Dimensões (3DP);
- ✓ Manufatura de Objetos Laminados (LOM);
- ✓ Fabricação da Forma Final a Laser (LENS).

Alguns destes equipamentos possibilitam a confecção de protótipos funcionais, ou seja, a impressão do protótipo do produto que possua algumas funcionalidades do produto original e permita uma interação, mesmo que simulada, destas funcionalidades (Nascimento, 2013). Um exemplo do protótipo funcional é apresentado na Figura 1.

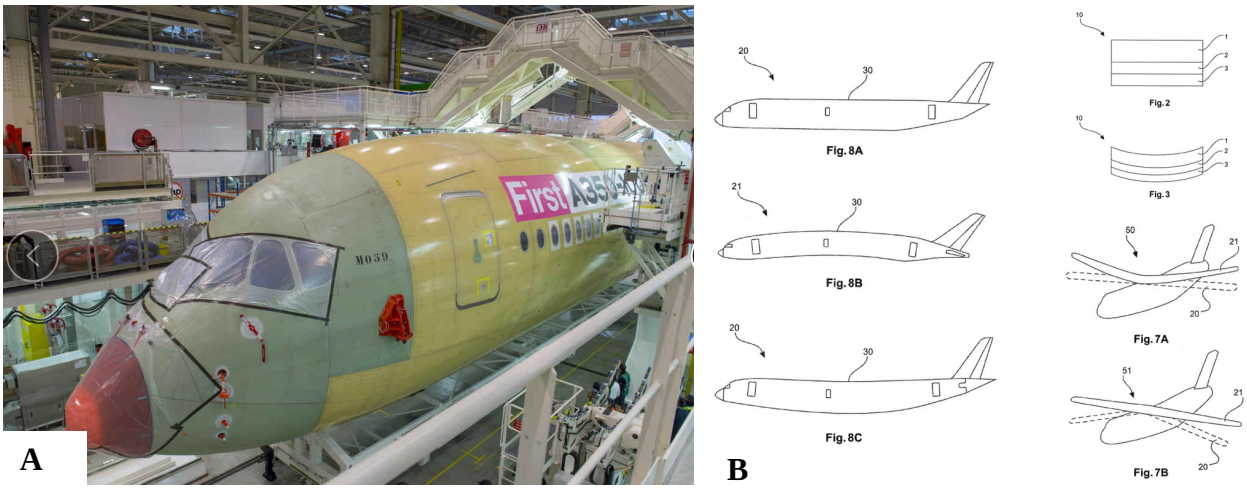
Figura 1 – Protótipo funcional resultante da impressão 3D.

Fonte: Stratasys, 2015.

Segundo Souza et al. (2003) uma das principais aplicações da PR é na verificação de novos projetos, quando estes se encontram numa fase embrionária ou mesmo avançada de concepção. Em todos os processos de PR recorre-se a um desenho em três dimensões assistido por computador (3D CAD) que é traduzido para um ficheiro com extensão STL (*Stereolitography*), no qual todas as superfícies do modelo são convertidas em triângulos.

Recentemente Russon (2016) descreveu sobre o registro de uma patente para um novo processo de impressão 3D revolucionário. Segundo a autora, atualmente uma empresa aeroespacial francesa realizou o registro de uma patente que tornaria possível imprimir peças externas de uma aeronave inteira de uma só vez a partir de vários metais. A montagem das peças resultantes da impressão 3D para esta aeronave é visualizada na Figura 2 (A). O desenho do conjunto de peças para a aeronave é visualizado na Figura 2 (B).

Figura 2 – Construção de um avião modelo Airbus 350 utilizando a impressão 3D.



Fonte: Russon, 2016.

Na área da engenharia Biomédica, recorrendo a técnicas de prototipagem é possível fabricar vários tipos de modelos anatômicos e réplicas de implantes com fins educacionais ou para melhor entender determinada patologia de um paciente. Para Antas et al. (2008) os modelos impressos em máquinas de PR, dependendo das técnicas disponíveis, podem ser feitos de papel, cera, cerâmicos, plástico ou metal. Além disso, o autor revela que estes modelos podem ser produzidos sem necessidade de acabamento e de várias cores ou posteriormente sofrer estas operações de acabamento e pintura, de forma a facilitar a sua visualização. Outra aplicação de PR é na área educacional fabricando réplicas de implantes por um valor muito inferior ao do implante.

De acordo com Oliveira e Gonçalves (2014), nos últimos anos as impressoras 3D tornaram-se financeiramente acessíveis para pequenas e médias empresas, levando a prototipagem da indústria pesada para o ambiente de trabalho. Além disso, nestas máquinas é possível simultaneamente depositar diferentes tipos de materiais. Esta tecnologia é utilizada em diversos ramos de produção, como em joalheria, calçado, design de produto, arquitetura, automotivo, aeroespacial e indústrias de desenvolvimento médico, odontológico e veterinário.

Segundo Cooper (2015), atualmente os pesquisadores estão trabalhando o uso da tecnologia de impressão 3D em uma máquina de fabricação de moléculas para simplificar química complexa. Ainda, a autora destaca que devido aos avanços das técnicas de PR, em atenção à impressão 3D, é possível imprimir desde próteses a corações, rins e outros órgãos vitais humanos.

Dentre as principais tecnologias de PR atualmente disponíveis em estudos acadêmicos destaca-se o emprego da tecnologia 3DP presente em impressoras. Diante disso, a seguir será abordado em maior nível de detalhes o funcionamento da tecnologia 3DP.

2.1.1 Princípio de Funcionamento das Máquinas de PR e do Sistema 3DP

De acordo com Teixeira (2015) a impressão 3D tem início a partir do nada, ou seja, começa adicionando materiais, camada por camada, até que o modelo impresso esteja pronto. O tempo de uma impressão 3D varia de acordo com o tamanho do modelo a ser impresso, podendo levar de poucos minutos a muitas horas.

A PR, também conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia de manufatura aditiva. Genericamente todos os processos de PR começam com a obtenção de um design virtual criado por softwares de modelagem ou CAD. A próxima etapa é enviar arquivo CAD para a máquina de impressão 3D para a mesma ler os dados do desenho em CAD e iniciar o depósito de camadas sucessivas de material líquido, em pó ou folha, criando o modelo físico a partir de uma série de seções transversais. Essas camadas, que correspondem à seção transversal virtual do modelo em CAD, são combinadas automaticamente para criar a forma final. (Stratasys, 2015).

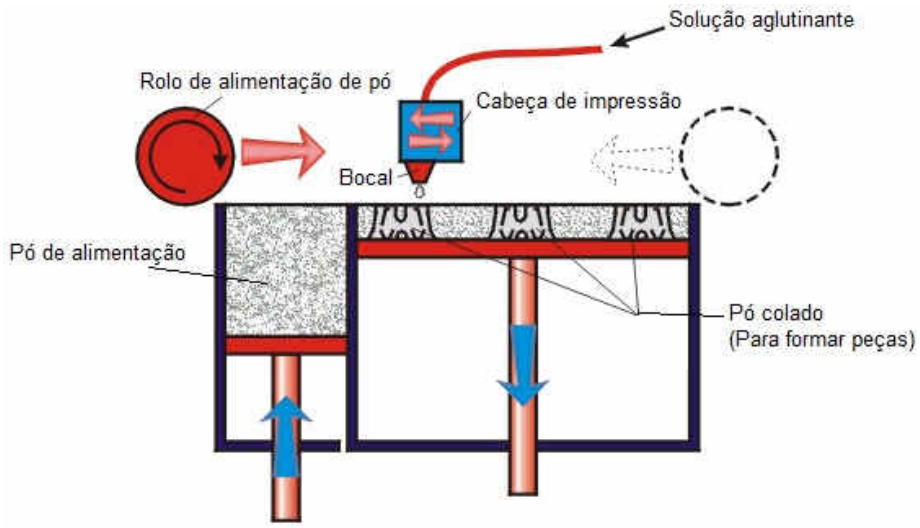
Segundo Byun e Lee (2006) a PR usa uma interface de dados padrão, implementada como o formato de arquivo STL, para converter arquivos elaborados em software de CAD para a máquina de prototipagem 3D. O arquivo STL se aproxima a forma de uma peça ou de um conjunto através de facetas triangulares.

A tecnologia de impressão presente em um modelo de máquina com tecnologia 3DP foi desenvolvido nos EUA pela empresa Carbon3D Inc, localizada em Redwood City. Esta máquina permite que objetos cresçam a partir de um meio líquido continuamente, em vez de ser construído camada por camada, como têm sido desde anos 90. Isto representa uma abordagem fundamentalmente nova para a impressão 3D. De acordo com Tumbleston et al. (2015) esta tecnologia de impressão permite que os produtos prontos para uso sejam feitos 25 a 100 vezes mais rápido do que outros métodos e cria geometrias anteriormente inatingíveis, abrindo oportunidades para a inovação, não só na área da saúde e medicina, mas também em outras grandes indústrias como automotiva e de aviação.

Para Grimm (2005) o princípio de funcionamento de um equipamento de impressão que utiliza a tecnologia de 3DP apresenta as seguintes características:

Impressão 3DP – é um processo de fabricação aditiva que envolve a distribuição de material sólido em pó em uma plataforma de impressão. A cabeça de impressão libera um agente aglutinante da mesma forma que uma impressora libera a tinta no papel. O agente aglutinante une as partículas de pó e as solidifica em pontos específicos. A cabeça de impressão respeita o modelo virtual 3D e imprime somente a área desejada. Quando uma camada é formada, a plataforma da impressão é rebaixada a uma medida que é igual à espessura da camada. Todo o processo é repetido até que todas as camadas tenham sido concluídas. O produto final é aquecido para completar o processo de solidificação. Em seguida, o produto é limpo para remover qualquer excesso de pó. Os principais compartimentos e componentes presentes em impressoras que utilizam a tecnologia 3DP são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Principio de funcionamento da tecnologia de impressão 3DP.



Fonte: Adaptado de UNI, 2015.

Outra característica relevante de impressoras 3DP é o tipo de pó empregado como MP, destacando-se: metais ferrosos como aço inoxidável; metais não ferrosos como o Bronze; Elastômeros; Compósitos e Cerâmicas (Cunico, 2015).

Segundo Stratasys (2015) a impressão baseada na tecnologia 3DP é semelhante à impressão a jato de tinta, mas, em vez de jatear gotas de tinta sobre o papel, as impressoras 3DP injetam camadas de um fotopolímero em pó misturado a um líquido curável sobre uma bandeja de montagem. O exemplo de objeto impresso utilizando esta tecnologia é apresentado na Figura 4. Observa-se na Figura 4 o pó, o leito de impressão e a geometria do modelo físico impresso com a tecnologia 3DP.

Figura 4 – Exemplo de objeto impresso utilizando a tecnologia 3DP.

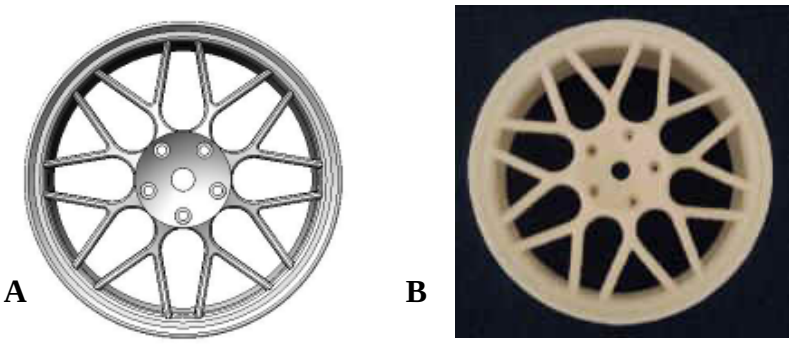
Fonte: Steiner, 2013.

Bertol (2008) descreve que geometrias de modelos podem ser obtidas utilizando um programa de modelação sólida (CAD) ou pela conversão de arquivos obtidos de *scanners* 3D, de Tomografia Computadorizada ou de Ressonância Magnética, permitindo que objetos com formas complexas oriundas diretamente de dados digitais tridimensionais possam ser utilizadas para obtenção direta de protótipos sólidos.

2.1.2 Etapas de Impressão pelo Sistema 3DP

Segundo Volpato (2007) para obtenção de modelos físicos resultantes de máquinas de impressão 3DP é necessário conhecimento e preparação para as seguintes etapas: modelagem virtual do objeto, MP a ser utilizada, aglutinante do pó, impressão 3D do modelo virtual, limpeza e infiltração para cura do modelo físico impresso. A Figura 5 é um exemplo resultante destas etapas.

Figura 5 – Modelo comparativo digital e físico do objeto impresso na impressora 3DP.

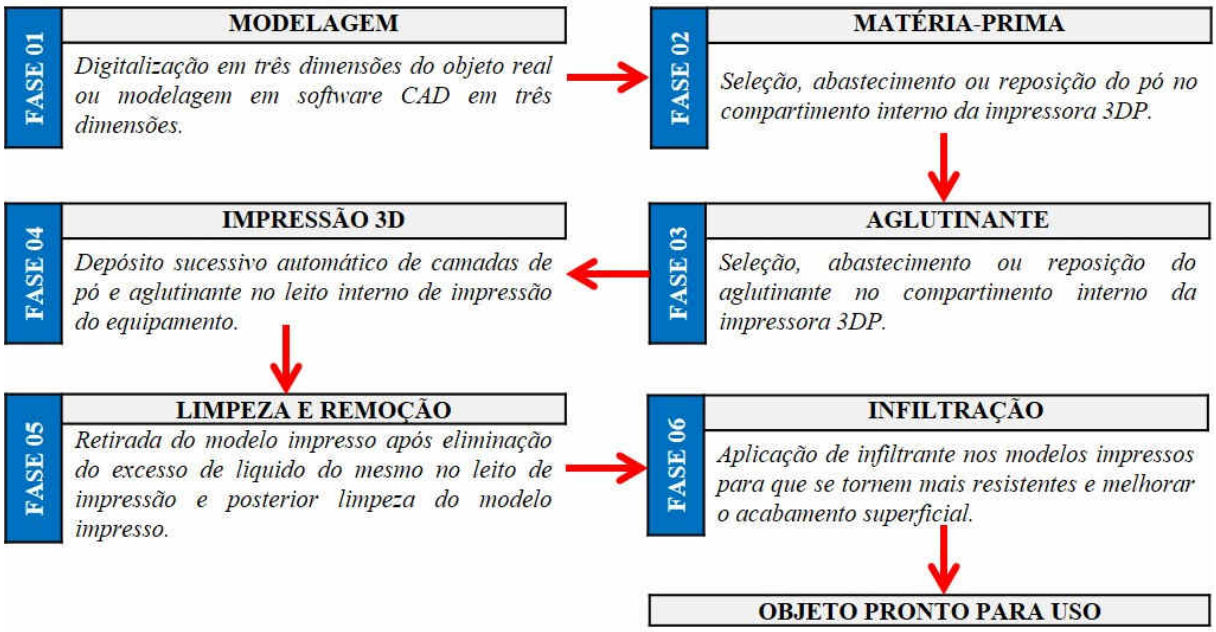


A - Modelo virtual do objeto; B – Objeto impresso no sistema 3DP.

Fonte: Adaptado de Sielski et al., 2010.

Salmoria (2007) descreve as etapas e respectiva sequência em que ocorrem no ciclo em impressoras 3DP para a impressão de objetos. Estas etapas bem como sua finalidade são apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Etapas sequenciais para obtenção de modelos impressos em sistemas 3DP.



Fonte: Adaptado de Salmoria, 2007.

Por fim, Salmoria (2007) afirma que após a realização de etapas, apresentadas na Figura 6, e cuidados necessários, o modelo físico impresso estará pronto para uso.

2.2 Desenvolvimento de Matérias-Primas Customizadas para o Sistema 3DP

O equipamento que possui a tecnologia 3DP disponível na UPF-RS é o equipamento modelo ZPrinter 310 Plus®, fabricado nos EUA pela Z Corporation. No ano de 2012 a Z Corporation foi adquirida pela empresa 3D Systems, com sua sede localizada em Rock Hill, sul do Estado da Carolina, EUA.

Atualmente o fabricante deste equipamento disponibiliza algumas opções de MP, para as mais variadas aplicações. Dentre estas, destacam-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).

Ipar (2011) relata em seu estudo que apesar de existir uma gama de combinações disponíveis de MP para uso em impressoras 3DP, algumas aplicações mais específicas que poderiam se utilizar desta tecnologia não são totalmente atendidas pelos materiais produzidos pelo fabricante do equipamento, além de ter custo elevado. Segundo o autor, o alto custo que ocorre no Brasil é devido às tarifações e impostos oriundos da importação destas MP.

Diante disso, o autor afirma que estes fatores impulsionam a pesquisa e o desenvolvimento de novas formulações de MP, possibilitando a aplicação desta tecnologia não só associada ao desenvolvimento de produtos, mas também atendendo a outros segmentos, como a arquitetura através de impressão de maquetes arquitetônicas, visualizada no exemplo apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Maquete residencial impressa utilizando o sistema de impressão 3D FDM.

Fonte: Boa impressão 3D, 2015.

Atualmente, foram encontrados inúmeros trabalhos de desenvolvimento de MP para uso em máquinas 3DP, tendo destaque os que são aplicados na área da saúde. A maioria destes trabalhos tratava da aplicação de máquinas 3DP para a fabricação de *"scaffolds"* (Oliveira et al., 2007; Leukers et al., 2005 e Khalyfa et al., 2007) para a reconstrução óssea, assim como a fabricação de próteses dentárias (Utela et al., 2010).

Para Ipar (2011), o desenvolvimento de MP atípica para uso em impressoras 3DP envolve um grande número de variáveis. Utela et al. (2010) afirma que este processo pode significar um grande desafio, dado as numerosas decisões que devem ser tomadas acerca de pós, aglutinantes, impressão e pós-processamento. Em síntese este mesmo autor também propôs uma metodologia para o desenvolvimento de matérias-primas para 3DP, onde descreve as etapas na Figura 8.

Figura 8 – Etapas da metodologia para desenvolvimento de MP para sistemas 3DP.

Fonte: Adaptado de Utela et al., 2010.

Por sua vez Ipar (2011) relata que algumas destas etapas descritas contêm sub-etapas e propriedades que devem ser levadas em conta durante o processo de desenvolvimento de MP atípica para uso em impressoras 3DP. Dentre as etapas pertencentes à metodologia apresentada na Figura 8 e inspirado no objetivo geral deste estudo, a seguir será somente abordada em maior nível de detalhes a etapa de formulação de pó para uso em impressoras 3DP.

2.2.1 Formulação do Pó

Segundo Ipar (2011) 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. Referente ao processo de impressão 3DP, o autor descreve que o corpo do modelo impresso possui seu volume composto por: de 30-75% de pó, 10% de aglutinante e o restante de espaços vazios.

Para Utela et al. (2008 e 2010) a depositabilidade é a propriedade mais importante do pó e é influenciada diretamente pelo tamanho e formato das partículas. Para os autores a depositabilidade pode ser efetuada com o pó molhado ou seco, dependendo do tamanho das partículas. Ipar (2011) afirma que grãos com tamanho de 20 μm ou maiores, deve-se utilizar o pó no estado seco e para partículas menores que 5 μm podem ser depositadas secas ou molhadas. Os pós que possuem dimensões menores que 1 μm podem se ligar por forças de *Van der Waal*, e a deposição mecânica não é adequada (Utela et al., 2010).

Ipar (2011) esclarece que 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. Algumas características que afetam o processo de impressão, em relação ao tamanho dos pós, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Influência do tamanho das partículas na etapa do processo de 3DP.

Tamanho	Vantagens	Desvantagens
Partículas Grandes	-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.
Partículas Pequenas	-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.

Fonte: Adaptado de Utela et al., 2010.

As características influenciadas no processo de impressão 3DP devido ao formato das partículas do pó são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Influência do formato das partículas de pó na etapa do processo de 3DP.

Forma	Vantagens	Desvantagens
Esférica	-Tende a fluir bem. -Baixa fricção interna.	-Não informado.
Facetada / Anisotrópica	-Potencializa a taxa de empacotamento.	-Alto grau de fricção interna. -Dificulta o espalhamento.

Fonte: Adaptado de Utela et al., 2010.

Combinações de pós de diferentes tamanhos podem ser utilizadas para aumentar a densidade do corpo do modelo impresso, 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 (Ipar, 2011). Para o autor o tamanho e geometria das partículas do pó podem comprometer a resistência, qualidade e aparência de modelos impressos em sistemas 3DP.

De acordo com os argumentos apresentados no estudo de Utela et al. (2010) e Ipar (2011) verifica-se que a redução do tamanho das partículas de materiais sólidos através de processo de moagem inadequado pode comprometer as propriedades granulométricas desejáveis para o pó que se propõem o uso em impressoras 3DP.

Baseado no propósito deste estudo que é de utilizar técnicas de cominuição para transformar blocos retangulares de OLB em pó fino com características granulométricas aceitáveis para uso em impressoras com tecnologia 3DP, a seguir será transcrito em nível maior de detalhamento as características e processos do método de cominuição de materiais sólidos.

2.3 Britagem e Moagem: Finalidade e Equipamentos

A cominuição é o ato ou efeito de cominuir, fragmentar, espedaçar (Ferreira, 2010). Carvalho (2012) afirma que existem duas grandes áreas de cominuição, a saber, a britagem e a moagem. Varela (2011) descreve que a etapa de britagem e de moagem são responsáveis pela

redução granulométrica e adequação do tamanho de partícula aos processos de classificação e concentração subsequentes. Entre os inúmeros fatores que influenciam a escolha e, consequentemente, o desempenho dos equipamentos utilizados na britagem e moagem, encontram-se as características físicas das MP minerais, como a dureza, a abrasividade e a coesividade.

Segundo Figueira et al. (2004), a britagem é considerada o primeiro processo de fragmentação, e também o mais importante na cominuição de minérios. Este processo pode ser repetido diversas vezes por diferentes tipos de equipamentos, até se obter um material adequado à alimentação da moagem. Há um grande número de variedades de britadores, sendo que os mais comuns são os seguintes: mandíbulas, giratório, cônicos, rolo simples, rotativo, rolo duplo, impacto e martelos, (Figueira et al., 2004).

Caso a granulometria desejada não seja atingida no primeiro processo (britador primário), o material resultante desta primeira britagem é encaminhado ao britador secundário, onde geralmente a granulometria desejada é alcançada. Após isso, o material é direcionado à moagem. (Figueira et al., 2004).

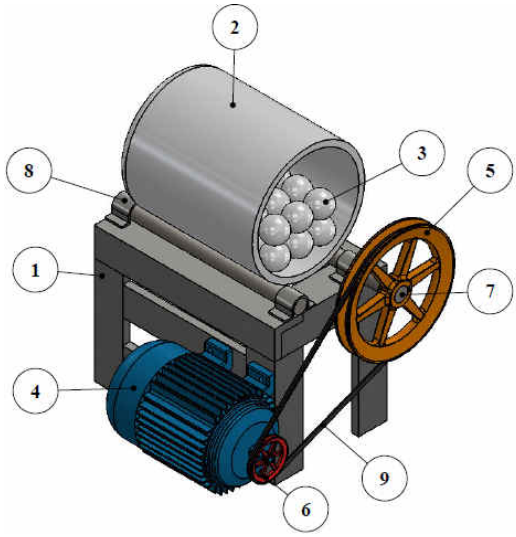
Considerada como a sequência natural do processo de britagem, a moagem é a chamada fragmentação fina, que representa o último estágio da redução granulométrica na cominuição de MP, como por exemplo, minérios. Neste processo as partículas são reduzidas pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, a um tamanho adequado à liberação do mineral, geralmente a ser concentrado nos processos subsequentes. Ela é realizada por meio da utilização de moinhos de cilíndricos (bolas, barras ou seixos) ou moinhos de martelo, sendo os cilíndricos os mais utilizados. Moinhos cilíndricos de bolas utilizam bolas como meio moedor e são utilizados para moagens mais finas. Moinhos cilíndricos de barras são utilizados para moagem mais grossa e utilizam barras como meio moedor. Também suportam uma alimentação grossa de até 50 mm, alguns também os consideram como máquinas de britagem fina. Por ser responsável pela fragmentação mais fina do minério, a moagem também é o processo mais oneroso dentro da cominuição, gerando custos altos, de acordo com o tamanho das partículas de minério resultantes do processo. (Figueira et al., 2004).

Segundo Paula et al. (2014) a construção de um moinho de bolas pode envolver um custo baixo devido ao aspecto de simplicidade construtiva, além de permitir duas formas de moagem: processo seco e processo úmido.

Baseado nisso, indústrias, laboratórios e universidades confeccionam suas próprias versões de moinhos de bolas, as quais nem sempre apresentam adequadas características de trabalho, baixas eficiências e alta contaminação de produtos finais.

Paula et al. (2014) descreve que o moinho de bolas tem uma concepção de projeto simplificada devido ao princípio construtivo. A representação esquemática comumente empregada na construção de moinhos de bola é apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Representação esquemática usual de um moinho de bolas universal.



01) Estrutura; 02) Jarro de moagem; 03) Meio de moagem (esferas); 04) Motor; 05) Polia movida; 06) Polia motora; 07) Rolos de apoio e tração; 08) Mancais; 09) Correia.

Fonte: Adaptado de Paula et al., 2014.

Alguns materiais nanotecnológicos, como nanotubos de carbonos, partículas nanométricas de óxidos, nitretos, hidretos e carbetos também têm sido confeccionados por uma variante deste gênero, chamada de moinho de bolas de alta energia (Chen, 2006 e Soni 2000). Os autores descrevem que para esta situação utilizam-se longos regimes de operação e ímãs próximos ao moinho visando à obtenção de maiores energias de impacto das colisões entre as esferas em função da atração entre a esfera metálica e o magneto.

Outra aplicação De acordo com Tullberg (2004), Rodriguez (2007) e Bernhardt (2010), o moinho de bolas também é utilizado como reator para sínteses sem solvente. Em alguns casos pode-se adicionar ao moinho determinados fluidos que favoreçam o processo de moagem. Esse procedimento é também chamado de moagem por via úmida. Em outros

estudos consultados ocorreram relatos dos autores que a moagem via úmida apresentou produtos de menor granulometria do que aqueles processados por via seca.

Para Paula et al. (2014) os materiais empregados no corpo moedor e do meio de moagem são decisivos no desempenho do moinho de bolas. Os autores orientam que a escolha dos materiais empregados no corpo moedor e do meio de moagem deve levar em consideração a propriedade de dureza dos materiais. A Tabela 3 apresenta os valores de dureza e densidade de alguns materiais, na escala Mohs, os quais podem servir de referência para a escolha de alguns destes materiais.

Tabela 3 – Dureza e densidade de materiais comumente empregados para a moagem com moinho de bolas.

Material	**Composição**	**Dureza**	**Densidade**
Vidro	Variável	5,5-7	2,4-2,8
Aço Inox*	Fe:C:Cr:Ni	5,5-6	8
Ágata	SiO_2	6,5	2,5-2,7
Porcelana	Variável	6-8	2,6**
Zircônia	ZrO_2	6,5	5,7
Alumina	Al_2O_3	8-9	3,97
Carbeto de Tungstênio	CW	9	14-15

*Para o aço inox AISI 304, bastante difundido no comércio / indústria, sua dureza na escala Rockwell B é aproximadamente 80. / **Valores obtidos pela média ponderal de suas composições.
Fonte: Adaptado de Paula et al., 2014.

No estudo de Paula et al. (2014), os autores descrevem que os sólidos de maior densidade favorecem a eficiência do processo de moagem em função da esfera densa causar maior impacto sobre o material durante a queda, ou seja, maior energia de colisão.

Estudos realizados sobre moinhos recomendam que para obtenção de melhores resultados de moagem, o volume de amostra juntamente com as esferas inseridas, deve estar próximo a 50% do volume do jarro de moagem. Neste caso, o estudo de Paula et al. (2014) recomenda que a quantidade de esferas adequada para uma moagem sob maior eficiência deve estar próxima a 20% do volume total do jarro de moagem. Por essa razão, um jarro normalmente suporta adequadamente cerca de 30% em volume de amostra.

Referente à construção de moinhos, foram encontrados diversos estudos que descrevem metodologias para projeto e construção de moinho de bolas para uso em laboratórios, tendo destaque os trabalhos dos autores Paula et al. (2014) e Nos (2011).

2.4 Enxerto Ósseo em Seres Humanos

A enxertia óssea em humanos tem sido usada no tratamento cirúrgico de um amplo espectro de doenças músculo-esquelético, como artroplastias totais, cirurgias do trauma, artrodeses vertebrais, ressecções de tumor e várias cirurgias pediátricas (Mozella et al., 2005).

Para Peltoniemi et al., (2002) não existe o material para enxertia dito ideal, e segundo os autores o osso autógeno é consagrado na literatura mundial como o que consegue reunir características mais próximas do ideal devido ao mesmo possuir como principal vantagem um potencial de integração ao sítio receptor com mecanismos de formação óssea de osteogênese, osteoindução e osteocondução. Entretanto, baseando-se em revisão de literatura recente, as pesquisas são unânimes em afirmar que a desvantagem do osso autógeno ocorre devido há necessidade de se ter outra área cirúrgica, chamada de área doadora.

Segundo Magini (2006) uma área doadora é a região maxilo-mandibular, sendo que as principais áreas doadoras extrabucais são os ossos ilíacos e a calvária. Os autores descrevem que outras partes do corpo humano podem ser doadoras como o mento, ramo e coronóide mandibular, embora forneçam menor quantidade óssea, no caso de cirurgias odontológicas.

Segundo Bauer e Muschler (2000) existe diversos tipos de enxertos e eles se dividem em 5 tipos, basicamente:

- Autógenos, retirados do próprio organismo;
- Aloplásticos, de origem sintética;
- Alógeno ou homólogo, doadores da mesma espécie;
- Xenógeno ou heterólogo, doadores de espécie diferente, por exemplo, bovina;
- Engenharia genética, que estimula a formulação óssea sem a necessidade de áreas doadoras.

Apesar de enxertos ósseos autógenos serem amplamente aceitos como padrão para o tratamento de defeitos ósseos, os implantes homógenos, heterógenos e os substitutos ósseos sintéticos têm sido amplamente estudados como uma alternativa aos enxertos, segundo relatado nos estudos dos autores Cancian et al. (1999), Davies (2003) e Von Arx et al. (2001) e Galia et al. (2009).

Dentre as várias opções disponíveis atualmente de biomateriais de enxerto, o enxerto xenógeno de origem bovina tem-se mostrado como uma alternativa para as mais diversas especialidades possibilitando, em muitos casos, a diminuição ou a eliminação do uso de materiais de origem biológica, havendo uma variedade de estudos que sustentam as suas indicações, dentre eles se destacam os estudos de Galia et al. (2008; 2009 e 2011).

Segundo Almeida Filho et al. (2007) e Cheung (2005) a importância do tecido ósseo no âmbito médico e odontológico é tão grande que as estatísticas mostram que mais de 500 mil enxertias são realizadas anualmente nos EUA e 2,2 milhões no mundo inteiro para o reparo de defeitos ósseos, fazendo com que esse tecido seja o segundo mais transplantado na atualidade. Com isso, cada vez mais se faz necessária à utilização de bancos de ossos.

Dessa forma o enxerto xenógeno, especificamente enxerto liofilizado de origem bovina, é uma opção que vem sendo utilizada em diversas áreas médicas. Para Sugihara et al. (1999), isto ocorre em razão da fácil obtenção, grande disponibilidade e alta similaridade com o osso humano.

2.5 Osso Liofilizado Bovino

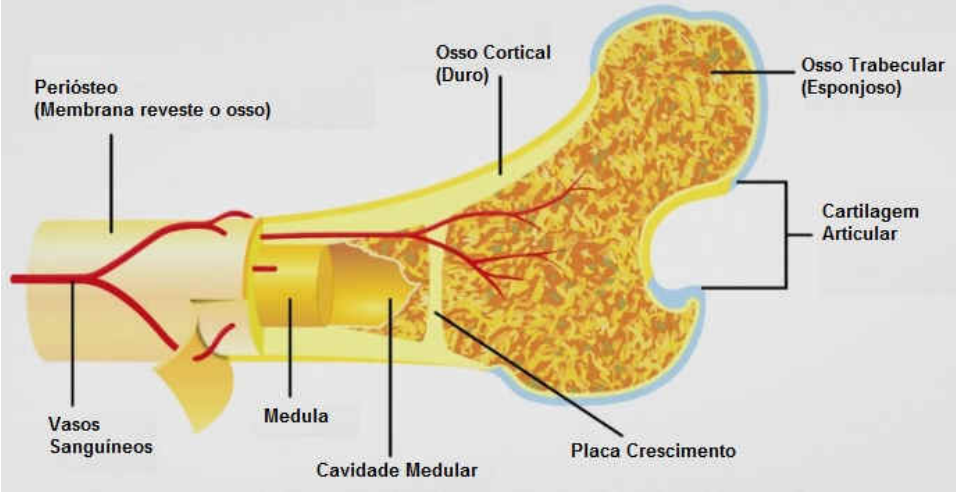
Macedo et al. (1999) relatam que a utilização de osso bovino como enxerto em seres humanos vem cada vez mais aumentando em razão dos bons resultados notados e também pela fácil obtenção e disponibilidade de grandes quantidades de enxerto.

A produção de osso bovino para uso em enxertos é um procedimento especial ao qual deve seguir protocolos internacionais existentes para transformação biomedicinal do osso bovino. Entre esses métodos está a liofilização, a qual foi desenvolvido um protocolo por Galia et al. (1999). Este protocolo permite o processamento, a esterilização e o armazenamento de enxertos ósseos homólogos e mesmo heterólogos, principalmente de origem bovina, aumentando assim, o leque de opções de tecidos implantáveis.

Segundo Orsi (2007) os enxertos não autólogos exigem processos de preparo, como a liofilização, com o objetivo de diminuir a imunogenicidade, diminuir o risco de transmissão de doenças do doador para o receptor, e facilitar o armazenamento do material. O processo de liofilização elimina o componente celular do enxerto ósseo, suprimindo com isso a sua capacidade osteogênica. Os enxertos ósseos liofilizados mantêm somente a capacidade de osteocondução e, dependendo do processamento empregado, de osteoindução.

Os enxertos xenógenos podem ser produzidos a partir de osso bovino cortical ou medular. Na Figura 10 pode-se observar a região cortical e medular presente nos ossos, além de outras partes que o compõem.

Figura 10 – Partes setoriais constituintes de um osso bovino.



Fonte: Adaptado de Zazzle, 2015.

Entretanto uma das limitações associada à utilização dos enxertos xenógenos está relacionada a aspectos culturais e religiosos, além da possibilidade de transmissão de doenças. Porém, em contradição, foi demonstrada ausência do Fator de Transformação do Crescimento Beta (TGF-Beta) e de quantidades substanciais de proteínas no biomaterial por Benke et al. (2001) tornando-o seguro para a utilização em humanos. Oliveira et al. (1999) ressalta a importância de se levar em consideração que o osso bovino possui disponibilidade praticamente ilimitada e, se processado adequadamente, mantém grande similaridade físico-química e estrutural com o humano.

2.5.1 Características do OLB

Oliveira et al. (1999) destacam em seu estudo as principais características do OLB. Segundo o autor o osso bovino possui composição química, porosidade, tamanho, forma e comportamento biológico semelhante ao humano, fornecendo estrutura de suporte e osteocondução, além de prover alto conteúdo de cálcio e fósforo, os quais são essenciais para a neoformação do tecido ósseo.

Para Su-Gwan et al. (2001) o substituto ósseo comercial da marca Geistlich Bio-Oss® é uma hidroxiapatita bovina mineral, que apresenta cristalinidade e composição química semelhante ao osso mineral natural e devido as suas propriedades osteocondutoras, atua como uma armação permitindo a neoformação de capilares, de tecido perivascular e migração de células oriundas do leito receptor.

Na tabela 4 é possível verificar os dados técnicos fornecidos pela empresa suíça Geistlich Pharma, com sede em Zurique, fabricante do Geistlich Bio-Oss®, a qual apresenta a caracterização físico-química de enxerto humano e o enxerto bovino industrializado e comercializado, permitindo a comparação de características físico-químicas entre ambos.

Tabela 4 - Dados do Geistlich Bio-Oss® e do osso humano.

Características	**Osso humano (%)**	**Geistlich Bio-Oss® (%)**
Área de superfície interna	50-90	97
Porosidade (%)	70-80	60
Tamanho dos cristais (nm)	10-60	10-60
Características químicas (índice de Ca/P)	2,03	2,03

Fonte: Adaptado de Souza et al., 2001.

Richardson (1999) destaca que este substituto ósseo Bio-Oss® é biocompatível e não induz resposta imune local ou sistêmica. Baseado neste cenário, Galia et al. realizaram no ano de 2009 um estudo a fim de determinar as características físico-químicas dos enxertos ósseos liofilizados bovinos. Neste estudo os autores verificaram as similaridades físico-químicas por meio de análises orgânicas e minerais de ossos liofilizados humanos e bovinos produzidos a partir de um protocolo de processamento desenvolvido pelos próprios autores. Segundo os autores do estudo, o osso bovino foi o escolhido por dois motivos básicos: para permitir melhor uniformidade da amostra e sua crescente utilização como enxerto ósseo em humanos.

Neste estudo os autores determinaram as composições presentes em amostras de ossos humanos e bovinos liofilizados. O resultado deste estudo é apresentado na tabela 5.

Tabela 5 – Determinações encontradas no estudo de Galia et al. (2009).

Determinações encontradas	Osso humano (%)	OLB (%)
Nitrogênio (TKN)	4,30	4,30
Fósforo total	11,90	11,90
P_2O_5 total	27,10	27,20
Cálcio total	24,06	23,70
Ca/P	2,06	1,99
Sódio total	0,57	0,46
Cinzas	64,80	64,30
Cloretos	1,30	1,30

Fonte: Adaptado de Galia et al., 2009.

Baseado nas determinações apresentadas na Tabela 5, os autores não encontraram nenhuma diferença estatisticamente significativa observada entre ossos bovinos e humanos avaliados após o processo de liofilização. Além disso, este estudo possibilitou aos autores validar o protocolo desenvolvido pelos próprios e posteriormente comparar os resultados obtidos com outros estudos no período.

Por fim, o estudo qualitativo sobre as características físicas e químicas de ossos liofilizados bovinos e humanos desenvolvido por Galia et al (2009) demonstraram estatisticamente que estes ossos mantêm virtualmente todas as características similares ao osso humano, levando a um produto final com boa biocompatibilidade.

2.5.2 Disponibilidade Comercial de OLB

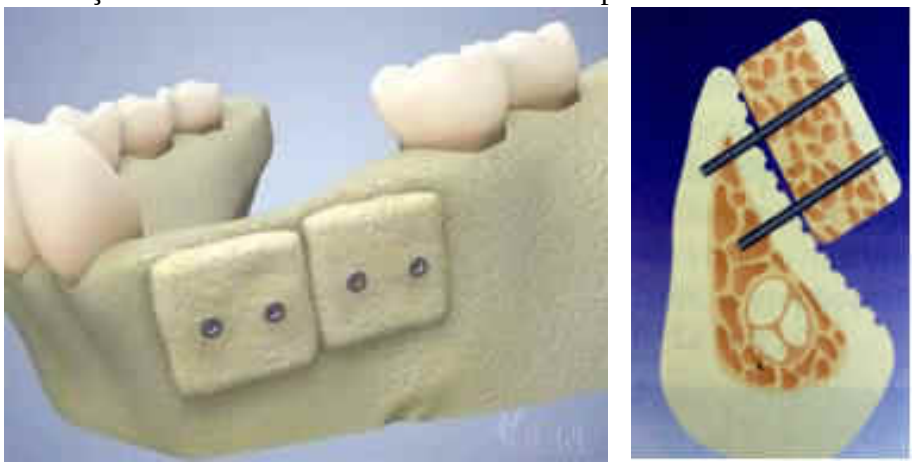
Atualmente é possível encontrar várias opções de marcas e formatos disponíveis de OLB para uso em implantes e enxertos ósseos em humanos. Uma das opções comerciais nacionais de OLB é o produto da marca Orthogen®. A empresa fabricante deste produto é a Genius®, divisão de biomateriais da Baumer® localizada no município de Mogi Mirim,

Estado de São Paulo. Segundo informações disponibilizadas pelo fabricante, o produto Orthogen® é um enxerto ósseo liofilizado integral de origem bovina que mantém em função de seu processamento, as características físico-químicas do osso *in natura*. Além disso, o fabricante afirma que este produto foi testado amplamente em projetos de pesquisas em diversas áreas da cirurgia ortopédica, sendo mais de 800 pacientes beneficiados com sua aplicação clínica. Entre estes estudos destaca-se a pesquisa de Galia et al. (2009), no qual os pesquisadores realizaram a caracterização físico-química de enxerto humano e do enxerto bovino industrializado da marca Orthogen®. O resultado desta pesquisa é apresentado na Tabela 5 e também se encontra disponível no site do fabricante do produto Orthogen®.

Outra opção comercial de OLB encontrada é o da marca Bonefill®, fabricado pela empresa Bionnovation Biomedical, localizada no município de Bauru, no Estado de São Paulo. Segundo informações do fabricante, este produto possui grânulos médios, que, aglutinado com sangue do próprio paciente forma uma matriz mineral com poros adequados para a proliferação endotelial e grânulos compactados sobre a região óssea preparada.

Além disso, o fabricante do produto da marca Bonefill® afirma que este é um produto implantável, utilizado por profissionais da odontologia em procedimentos de falhas ósseas onde se deseja remodelação óssea. Um exemplo de aplicação deste enxerto é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Utilização de enxerto ósseo bovino em bloco aplicado em osso atrofiado.



Fonte: Adaptado de Cosmos Clínica Odontológica, 2015.

O fabricante do Bonefill® descreve que este enxerto ósseo consiste em estrutura mineral retirada de osso do fêmur bovino e que apresenta estrutura semelhante à do osso humano em sua porção inorgânica visando auxiliar a reconstituição óssea.

Para obtenção do Bonefill® o fabricante afirma que o osso bovino fresco é desnaturado e triturado, recebendo uma sequência de banhos que solubilizam as estruturas orgânicas como, por exemplo, células remanescentes, fibras e proteínas, permanecendo assim somente a porção mineral evitando a indução de possíveis processos imunogênicos no organismo.

Outra informação disponibilizada pelo fabricante é que seus produtos constituídos por osso bovino mineralizado e utilizados em enxertos têm expectativa de remodelação entre 3 e 6 meses. Portanto, o fabricante do Bonefill® apresenta este produto como sendo um material biocompatível e que apresenta granulação adequada, além de características osseocondutoras que visam auxiliar nos processos de regeneração óssea.

Referente a disponibilidade comercial de OLB no formato de partículas sólidas, foi encontrado o produto da marca Bonefill®. Para este produto, o tipo de granulometria disponível comercialmente está classificado em fina, média e grossa, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Granulometria de OLB dispoível comercialmente.

Tipos de Granulação	**Granulometria**	**Quantidade**
Granulação Fina	0,10 a 0,60 mm	0,50 g
Granulação Média	0,60 a 1,50 mm	0,50 g
Granulação Grossa	1,50 a 2,50 mm	0,50 g

Fonte: Bionnovation Implantes e Biomateriais, 2015.

Baseado na disponibilidade no mercado nacional e para fins de verificação de valores comerciais para aquisição de OLB, a Tabela 7 apresenta o formato disponível e o valor de aquisição de OLB.

Tabela 7 – Formato disponível e custo de aquisição de OLB.

Descrição	**Qtde/ Embalagem**	***Valor**
Enxerto Ósseo Orthogen® em bloco 05 mm x 15 mm x 15 mm	01 unidade	US$ 60,11 a US$ 65,29
Enxerto Ósseo Orthogen® particulado Granulometria 0,25 mm x 0,50 mm	1,0 cm³	US$ 74,21
Enxerto Ósseo Orthogen® particulado Granulometria 0,25 mm x 0,50 mm	0,5 cm³	US$ 46,36
Enxerto Ósseo Orthogen® particulado Granulometria 0,75 mm x 0,10 mm	1,0 cm³	US$ 80,53

Fonte: Consulta realizada em 06/2016 no site Dental Cremer.

*Valor considerando frete grátis para o município de Passo Fundo - RS.

*Cotação de moeda considerada em 15/06/2016 onde US$ 1,00 = R$ 3,4768.

Por fim, verifica-se que o OLB está disponível comercialmente em formato particulado ou em bloco retangular.

2.6 Estudos Relevantes para o Trabalho

Ipar (2011) relata em seu estudo que utilizou rejeitos gemológicos de Ágata, um tipo de Quartzo, e os transformou em pó para uso na impressora 3DP, modelo ZPrinter 310 Plus®. Neste estudo, o autor realizou a caracterização físico-química do pó denominado comercialmente de ZP 131®. Este pó é produzido pelo fabricante do equipamento é a MP comumente utilizada na impressora 3DP. Outro ensaio laboratorial realizado no estudo de Ipar (2011) compreendeu dois testes de bancada utilizando mistura de pó de rejeitos de mineração, Maltodextrina e açúcar refinado e posteriormente a adição de líquido aglutinante. Este aglutinante é denominado comercialmente de ZB 60® e também é produzido pelo fabricante da impressora 3DP. Referente a Maltodextrina, ela é encontrada comercialmente na forma de pó branco ou colorido e é composto por uma mistura de vários oligômeros de glicose.

Referente à impressão de modelos físicos utilizando pó de osso como MP em equipamento de impressão com tecnologia 3DP, no ano de 2011 pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica do campus da Universidade de Washington, EUA,

realizaram experimentos de impressão 3D utilizando como MP um pó de osso. Neste experimento os autores não revelaram detalhes sobre a origem e tipo de pó de osso que utilizaram na impressão. Segundo os autores para este experimento houve a necessidade da elaboração de duas receitas de MP para uso na impressora 3DP e que estas foram testadas inicialmente em bancada. A formulação destas receitas e sua composição são apresentadas na Tabela 8.

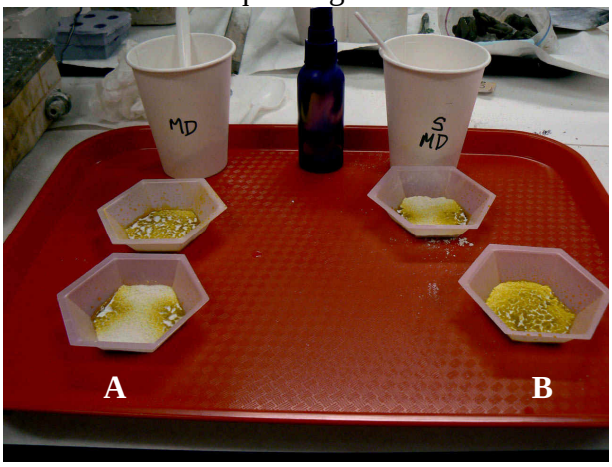
Tabela 8 – Composição das receitas elaboradas para uso na 3DP.

Fórmula	Composição
Receita 01	-Pó de osso – 5 partes em peso. -Açúcar em pó 12x – 1 parte em peso. -Maltodextrina – 1 parte em peso.
Receita 02	-Pó de osso – 4 a 5 partes em peso. -UF cola de resina de plástico – 1 parte em peso.

Fonte: Adaptado de Open 3DP, 2011.

As fórmulas descritas na Tabela 8 resultaram em testes de bancada realizadas pelos autores. O resultado do teste em bancada para a receita 1 é visualizado na Figura 12 (A) e a Figura 12 (B) apresenta o resultado do teste referente a receita 2.

Figura 12 - Teste de bancada utilizando liquido aglutinante e a formulacão de receitas.



Fonte: Adaptado de Open 3DP, 2011.

Após a definição da fórmula da MP e de testes em bancada, os pesquisadores carregaram a impressora 3DP com uma mistura de pó de osso e uma solução ligante existente.

Em seguida, os mesmos realizaram testes de impressão utilizando a primeira receita (Figura 12 A) sendo que o resultado obtido não foi satisfatório devido às peças impressas apresentaram baixa resistência. Segundo os pesquisadores, estas peças impressas eram tão fracas que qualquer contato causava a sua quebra, não sendo possível remover suas partes do leito da impressora. Neste caso, os pesquisadores observaram que a mistura de pó de osso (receita 1) espalhou-se muito bem, produzindo um acabamento de superfície agradável no plano de impressão, ou seja, na cama de impressão.

Devido aos problemas apresentados na resistência dos modelos impressos obtidos com a receita 1 (Figura 12 A), os pesquisadores realizaram novos testes utilizando outros adesivos com alta força de colagem. Neste caso, eles utilizaram cola de madeira solúvel em água e com o objetivo de aumentar a resistência adicionaram a esta cola a resina de ureia formaldeído. Referente a esta resina, trata-se de uma substância termoendurecivel opaca que quando adicionada a produtos adesivos, tais como cola de madeira, a resina forma uma liga, que ultrapassa a força da madeira.

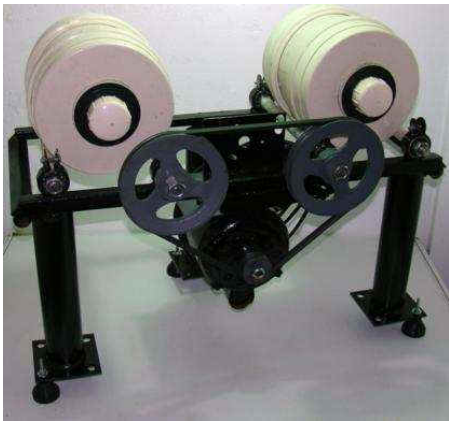
Por fim, os pesquisadores realizaram um teste rápido de impressão na máquina 3DP utilizando como MP a formulação da receita 2 (Figura 12 B) e a resina de ureia formaldeído adicionada a cola de madeira, resultando em aumento da resistência dos modelos impressos obtidos com a receita 2, quando comparado ao resultado da receita 1.

Já para os estudos referentes à construção de moinhos para uso em laboratórios, Nos (2011) desenvolveu o projeto de produto de um moinho de bolas de baixo custo. O resultado do estudo de Nos (2011) está atrelado a construção de um equipamento que poderá ser utilizado na obtenção de uma granulometria bastante fina de um material sólido particulado. Neste caso, a solução técnica do equipamento adotada pelo autor foi baseada em um moinho de bolas, sendo considerada esta opção a que apresenta melhores características para este fim.

Nos (2011) realizou cálculos técnicos relacionados à transmissão de força do motor para o jarro de moagem e descreveu os materiais utilizados na construção do moinho. Dentre os principais materiais utilizados se destacam: esferas de aço inoxidável, cilindros de cloreto de polivinila (PVC) e alumínio. O autor afirma que o desenvolvimento e construção deste equipamento, apresentado na Figura 13, obteve alta eficiência e desempenho em relação a um baixo custo *versus* benefício, devido à reutilização de materiais descartados. Ainda, o autor afirma que a solução apresentada em seu estudo para um moinho de bolas de baixo custo é

possível através do emprego de materiais comumente encontrado em ferragens e até mesmo sobras de materiais (reciclagem).

Figura 13 - Moinho de bolas proposto no estudo de Nos (2011).



Fonte: Nos, 2011.

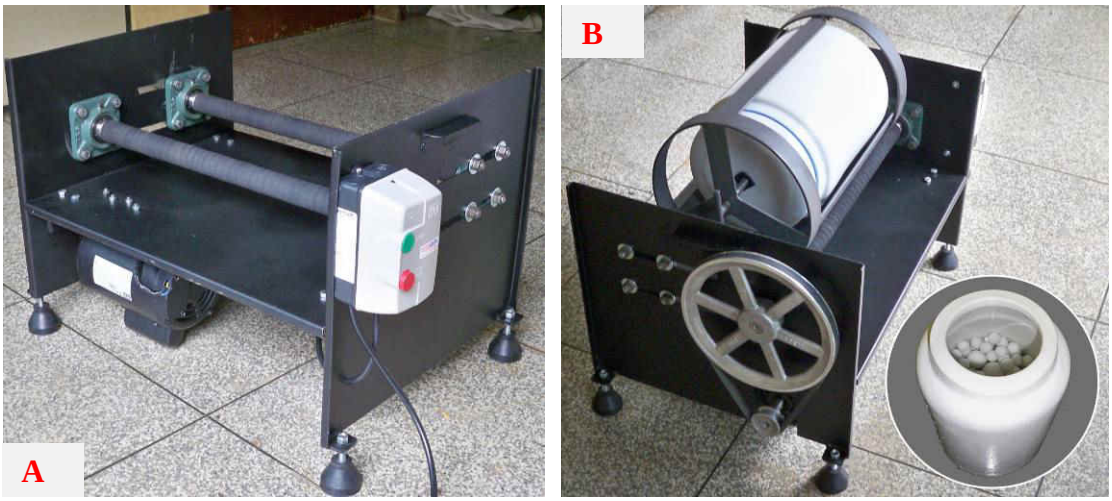
Outro estudo relevante ao projeto e construção de moinho de bolas adaptados para uso em laboratórios é de Paula et al. (2014). Este estudo apresenta uma metodologia para dimensionamento de um moinho de bolas universal. Além disso, os autores recomendam materiais e demais observações a serem consideradas no dimensionamento e montagem de um moinho.

Segundo Paula et al. (2014) para a minimização de resíduos de moagem na amostra final é interessante que o jarro e as esferas de um moinho sejam confeccionados com o mesmo material, e, além disso, é importante que este material seja mais duro que a amostra. Têm-se observado que alguns moinhos são montados de forma que o jarro seja de polietileno de alta densidade (PVC) e as esferas de aço, como é o caso do moinho de bolas proposto no estudo de Nos (2011). Paula et al. (2014) considera que estes materiais são de fácil acesso, mas que essa utilização deve ser evitada por aqueles que desejarem um mínimo de resíduo de moagem no material final, uma vez que essa diferença de dureza culmina em riscos do material menos duro, desgastando-o e contaminando o produto final.

Dentre os materiais comumente utilizados na construção de moinhos de bolas, os jarros e esferas de porcelana apresentam um custo benefício atraente, tendo uma dureza suficiente para a moagem de diversos materiais e, por essa razão, Paula et al. (2014) utilizou jarros de porcelana de 1, 3 e 5 Litros (Chiarotti, São Paulo, Brasil), juntamente com esferas de porcelana de 13, 19 e 25 mm e ferragens apropriadas para a vedação do jarro. A estrutura

principal do moinho, o motor elétrico e o comando de acionamento do equipamento são apresentados na Figura 14 (A). O interior do jarro de moagem e demais detalhes de sua fixação são visualizados na Figura 14 (B).

Figura 14 - Moinho de bolas construído nas diretrizes propostas por Paula et al. (2014).



Fonte: Adaptado de Paula et al., 2014.

O moinho confeccionado por Paula et al. (2014), apresentado na Figura 14, foi utilizado na moagem de prata metálica em pó, visando à obtenção de flocos de prata. Nesse caso, foram inseridos no corpo moedor 200g de prata em pó e após 24h de moagem obtiveram os flocos de prata com área superficial média de 1,25 m^2/g e granulometria inferior a 15 µm, atingindo parâmetros desejáveis pelos autores.

Além da moagem de prata, Paula et al. (2014) realizaram a moagem de outro material. Nesta aplicação, eles utilizaram 300g de grafite comercial de diâmetro médio de 100 µm submetidos à moagem por via úmida, por 12h, resultando em partículas de diâmetro médio de 27 µm, observado em análise granulométrica realizada por difração a laser. Ademais, os autores afirmam que o moinho construído nas diretrizes propostas no estudo atende adequadamente às demandas laboratoriais, e já está em operação a mais de dois anos, apresentando baixas margens de contaminação, robustez, alta qualidade, sendo sua construção de baixo custo e fácil manutenção. Por fim, os autores concluem que moinhos deste tipo são eficientes moedores quando as esferas empregadas apresentam o mesmo tamanho e que a construção deste moinho pode ser direcionada a moagem de materiais específicos de alta

dureza, sendo que o moinho, confeccionado pelos autores, efetua moagens adequadas em materiais de dureza inferior a 6 Mohs.

Portanto, a revisão literária teve a finalidade de adotar diretrizes que auxiliem na elaboração de metodologia e construção de equipamentos adaptados para o processamento, em pequena escala, de blocos retangulares de OLB. Diante disso, verificou-se as características físico-químicas do enxerto bovino liofilizado manufaturado em escala semi-industrial proveniente do protocolo por Galia et al. (2009) e dos fabricantes de enxertos ósseos.

Neste capítulo foi apresentada a revisão literária sobre a tecnologia de impressão 3DP, enxerto ósseo liofilizado bovino, método de cominuição de materiais sólidos e estudos relevantes que se mostram mais adequados a este trabalho.

Por fim, comprovou-se através da revisão literária que a impressão 3DP utilizando como MP o pó de osso é possível.

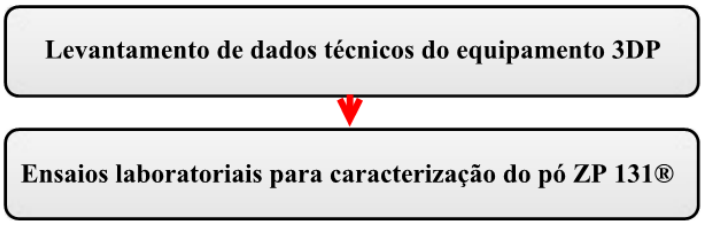
O desenvolvimento experimental deste trabalho é apresentado no próximo capitulo.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são esclarecidos os equipamentos, materiais e a metodologia experimental adotada para o trabalho. Inicialmente é apresentado o planejamento das tarefas que compreende o presente estudo. Na sequência é apresentada a característica técnica do equipamento 3DP disponível na UPF. Posteriormente tem-se a descrição das técnicas adotadas para caracterização do pó ZP 131® e o pó fino de OLB. Ainda, são detalhados os equipamentos adaptados utilizados na transformação de blocos retangulares de OLB em pó fino através do método de cominuição. Por fim é apresentada a definição da metodologia experimental deste estudo.

O planejamento inicial estabeleceu as tarefas necessárias para o desenvolvimento da metodologia experimental deste estudo, sendo estas tarefas divididas e organizadas em duas fases. As tarefas iniciais correspondentes à primeira fase da metodologia experimental resultantes deste planejamento são apresentadas na Figura 15.

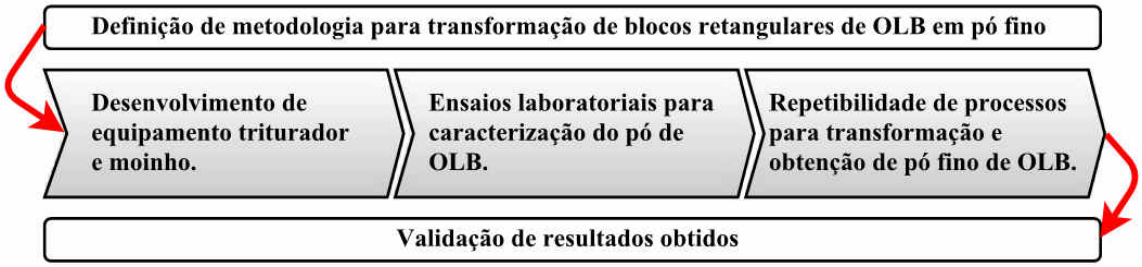
Figura 15 – Tarefas pertencentes a primeira fase do procedimento experimental do estudo.



Fonte: Autor, 2016.

Para prosseguimento do planejamento deste estudo foram definidas as tarefas sequenciais correspondentes a segunda fase da metodologia experimental. A Figura 16 apresentada estas tarefas, além da ordem em que elas foram realizadas.

Figura 16 – Tarefas pertencentes a segunda fase do procedimento experimental do estudo.



Fonte: Autor, 2016.

A seguir é abordado em nível maior de detalhamento as características técnicas e procedimentos adotados desenvolvimento da metodologia experimental deste estudo.

3.1 Características Técnicas do Equipamento 3DP Disponível

O equipamento de PR disponível para uso na UPF, no município de Passo Fundo-RS, possui a tecnologia de impressão 3DP, modelo Z 310 Plus, fabricado nos EUA pela empresa Z Corporation. Este equipamento caracteriza-se por utilizar MP em forma de pó. Segundo dados fornecidos pelo fabricante do equipamento 3DP, as características técnicas do equipamento são:

- ✓ Monocromático – é capaz de fabricar peças com apenas uma cor sólida;
- ✓ Resolução de impressão – 300 x 450 dpi;
- ✓ Capacidade máxima de construção – 203 mm x 254 mm x 203 mm;
- ✓ Espessura de camada – varia entre 0,089 mm e 0,203 mm;
- ✓ Compatível com formatos de arquivo *.STL.

Outra característica deste equipamento é o fato dele ser composto por duas unidades distintas: Uma onde a peça é impressa (Figura 17 B) e outra onde é efetuada a limpeza e infiltração da peça (Figura 17 A).

Figura 17 – Equipamentos pertencentes à impressora Z310 Plus.

A) Cabine de limpeza e infiltração; B) Máquina para impressão 3DP.

Fonte: Autor, 2015.

Neste equipamento, a unidade de fabricação possui diversos componentes, dentre eles o reservatório de líquido aglutinante (Figura 17 B). O aglutinante é armazenado em uma garrafa acondicionada na tampa superior do equipamento.

Referente a cama de impressão, ela 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.

A MP 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.

Relativo a unidade de limpeza e reciclagem (Figura 17 A), ela possui um compressor de ar, equipado com pistola e um aspirador de pó. Esta unidade 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 Pó ZP 131® e do Pó de OLB

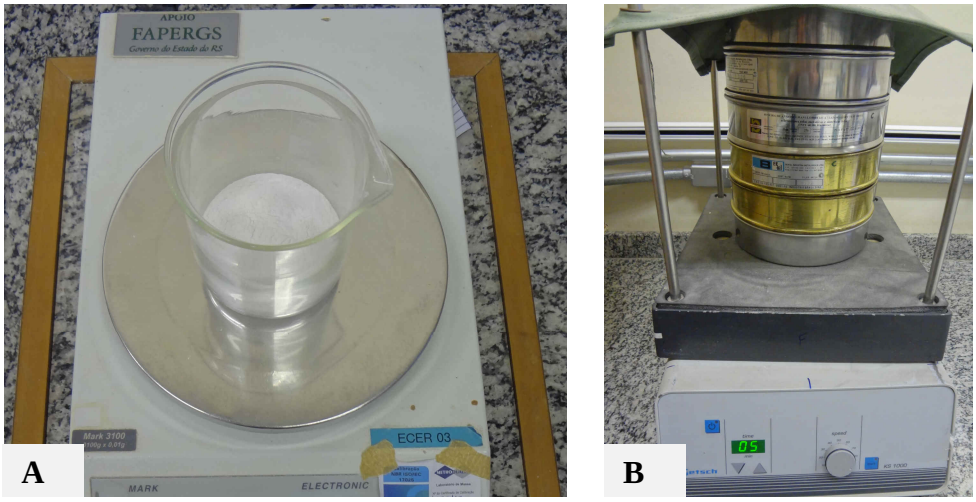
Na impressão de modelos físicos de objetos no equipamento 3DP comumente se utiliza como MP o pó ZP 131®. Segundo Oliveira (2008), este pó é um compósito a base de gesso. Portanto, verifica-se na literatura consultada que o gesso é uma rocha sulfetada, com fórmula química $Ca[SO_4]_{\bullet}2H_2O$.

Diante disso, optou-se inicialmente em efetuar análises físico-químicas no pó ZP 131® e posteriormente no pó fino resultante da cominuição dos blocos retangulares de OLB. Isto possibilitou obter informações básicas sobre o pó ZP 131®, produzido pelo fabricante do equipamento 3DP. Estas informações resultaram em características desejáveis para o desenvolvimento da MP atípica proposta neste estudo.

Em análises efetuadas para o pó ZP 131® e o pó fino de OLB, foram verificadas características como o formato, tamanho e a composição química das partículas dos pós. Na caracterização destes pós, para a identificação do tamanho médio das partículas foi utilizada a técnica de análise granulométrica e para a identificação do formato das partículas e dos elementos químicos presentes em cada amostra foi utilizada a técnica de análise de MEV-EDS.

Para realização da análise granulométrica do pó ZP 131® e do pó fino de OLB, foi utilizado o Laboratório de Alimentos da UPF, localizado em Passo Fundo-RS. Este laboratório possui os equipamentos destinados a análises granulométricas de farinhas, sementes, dentre outros. Nesta análise foram selecionadas cinco peneiras granulométricas padrão ABNT/ASTM, uma tampa e um fundo coletor. Estes itens foram empilhados verticalmente no agitador magnético em ordem crescente de malha (Mesh), de cima para baixo, sendo: 170 Mesh (abertura de malha = 88 µm), 200 Mesh (abertura de malha = 74 µm), 270 Mesh (abertura de malha = 53 µm), 325 Mesh (abertura de malha = 44 µm), e 400 Mesh (abertura de malha = 37 µm), conforme apresentado na Figura 18 (B). A seleção do Mesh destas peneiras levou em consideração o intervalo aproximado do tamanho das partículas resultantes da microscopia eletrônica realizada no pó ZP 131®. Outro fator que foi considerado nesta escolha foi motivado pelos resultados apresentados no estudo de Ipar (2011).

Figura 18 – Procedimento de pesagem e de peneiramento para os pós deste estudo.



Fonte: Autor, 2016.

O primeiro pó submetido à análise granulométrica foi o ZP 131®, sendo utilizados 15 gramas deste pó para cada ciclo de peneiramento. Na Figura 18 (A) verifica-se a pesagem desta massa com o auxílio de balança de precisão. Em seguida esta massa de pó foi inserida na primeira peneira granulométrica (Mesh 170). Com a finalidade de aumentar a passagem das partículas do pó, durante o processo de agitação promovido pelo peneiramento mecânico, foram utilizados dois cubos de borracha no interior de cada peneira. Posteriormente o agitador magnético foi ligado com tempo de funcionamento regulado em cinco minutos. Todo o procedimento de pesagem e de peneiramento, anteriormente descrito, foi replicado para outras duas amostras do pó ZP 131®, resultando no peneiramento de três amostras de pó.

Para o pó de OLB foram replicados os procedimentos e técnicas utilizadas para o pó ZP 131®, ou seja, repetiu-se o valor da massa em cada ciclo, o procedimento de pesagem, de peneiramento e a quantidade de repetições para pó de OLB.

A realização dos procedimentos e técnicas anteriormente descritos resultou em dados necessários para elaboração da média e do desvio padrão de cada análise granulométrica, além da elaboração da curva média granulométrica de cada pó analisado.

Para a análise MEV-EDS destes pós foi utilizada o equipamento Zeiss Axio Scope A1 disponível no Laboratório de Engenharia Mecânica da UPF, localizado em Passo Fundo-RS. Este equipamento possui magnificação de até 300 mil vezes e aceleração de voltagem variável de 5kV e 15kV. Portanto, com auxilio deste equipamento é possível obter imagens de alta ampliação 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) foi utilizada para a caracterização química das amostras.

3.3 Características dos Equipamentos Construídos e Adaptados para Cominuição de Blocos Retangulares de OLB

Para reduzir os blocos retangulares de OLB à forma de pó fino houve a necessidade da construção e uso de equipamentos destinados ao processo de cominuição destes blocos. O primeiro equipamento, construído e adaptado para uso no processo de britagem, teve como finalidade a fragmentação destes blocos. O outro equipamento, construído e adaptado para

uso no processo de moagem, foi utilizado na transformação destes fragmentos em pó fino de OLB.

Para o equipamento destinado ao processo de britagem usaram-se como critério de seleção, para esta demanda, as seguintes características: regime de trabalho constante, suportar cargas elevadas, alto rendimento, durabilidade, ocupar um espaço reduzido e produzir baixo nível de ruído. Dentre as técnicas que são utilizadas neste processo e que melhor atende aos critérios de seleção deste estudo optou-se pelo uso de um sistema composto por engrenagens de dentes helicoidais. O sistema selecionado baseia-se em um par de engrenagens helicoidais, calculadas conforme os valores apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores calculados para definição da engrenagem helicoidal.

Item calculado	Valor obtido	Unidade
Módulo	3,0*	-
Nº dentes	18,0**	-
Ø primitivo	54,0	mm
Ø externo	60,0	mm
Ø interno	47,0	mm
Ø base	50,74	mm
Passo	9,42	mm
Espessura circular e vão	4,71	mm
Altura cabeça do dente	3,0	mm
Altura pé do dente	3,5	mm
Altura do dente	6,5	mm
Folga pé do dente	0,5	mm
Raio máximo pé do dente	0,9	mm
Raio mínimo pé do dente	0,79	mm
Raio recomendado pé do dente	0,84	mm
Raio maior do dente	7,86	mm
Raio menor do dente	3,27	mm

*Relação entre o diâmetro primitivo e o número de dentes da engrenagem.

**Valor corresponde ao total de unidades.

Fonte: Autor, 2015.

Para validação do sistema selecionado optou-se pela confecção de um protótipo. Na Figura 19 é apresentada a concepção do protótipo utilizado em testes de britagem dos blocos retangulares de OLB.

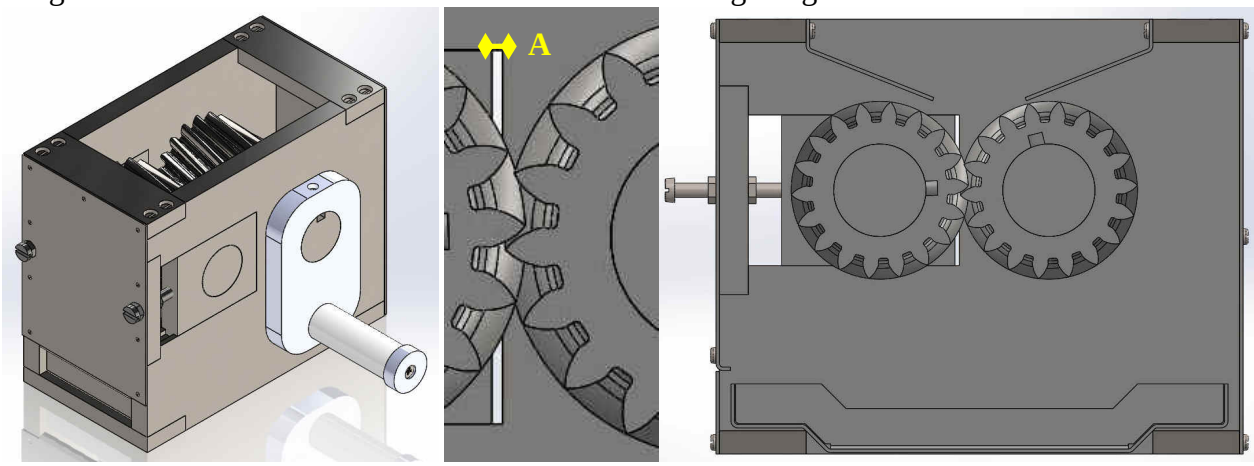
Figura 19 – Protótipo construído para britagem de blocos de OLB.

Fonte: Autor, 2015.

Dentre os testes para validação da solução adotada, foi estabelecido e verificado o parâmetro de regulagem do afastamento entre os dentes da engrenagem helicoidal. O valor da distância utilizada que apresentou resultados satisfatórios na fragmentação de blocos foi o valor de 1,5mm.

A revisão do protótipo (Figura 19) resultou no modelo virtual do triturador de engrenagens helicoidais, apresentado na Figura 20. Neste modelo virtual, o valor do afastamento entre os dentes pode ser conferido na Figura 20 no local indicado pela letra A. Outros detalhes técnicos sobre o modelo virtual revisado do protótipo do equipamento estão disponíveis no Apêndice A.

Figura 20 – Modelo virtual revisado do triturador de engrenagens helicoidais.



Fonte: Autor, 2015.

Na etapa de britagem, os blocos retangulares de OLB foram pesados em balança de precisão para fins de verificação de massa a ser processada e posteriormente inseridos no interior do equipamento triturador de engrenagens helicoidais. Esta massa foi inserida três vezes no equipamento para reprocessamento.

O reprocessamento desta massa foi realizado mediante a alteração do valor inicial do afastamento entre os dentes da engrenagem do equipamento. O valor do afastamento ajustado para o primeiro ciclo foi de 1,5mm. Para os outros dois ciclos de reprocessamento, o valor deste afastamento foi reduzido em 0,25 mm para cada ciclo.

Para fins de verificação de retenção de massa no interior do equipamento, foi efetuada a medição da massa das partículas de OLB resultante do reprocessamento final do ciclo de britagem. A diferença resultante do valor desta verificação foi considerada insignificante em relação a massa total dos blocos de OLB (mensurada anteriormente), ou seja, a diferença entre a massa final e inicial de OLB foi inferior a 1% e, portanto, desprezível para este estudo.

Em relação a redução a forma de pó dos fragmentos resultantes da britagem dos blocos retangulares de OLB, estes necessitaram passar por um processo de moagem. O critério de seleção, para esta demanda, considerou: características de regime de trabalho constante, suportar cargas alternadas, durabilidade, possuir sistema fechado de moagem, estado de moagem a seco, baixo custo para confeccioná-lo e que ocupe um espaço reduzido.

Dentre as opções de técnicas disponíveis, em estudos consultados relacionados a este fim, e que melhor atende a estes requisitos, foi selecionado um sistema de moinho fechado composto por cilindro de moagem com esferas. Este sistema é comumente utilizado em setores de mineração e laboratórios para reduzir em uma granulometria fina as partículas sólidas de vários tipos de materiais.

O sistema do moinho selecionado baseia-se em diretrizes propostas no estudo de Nos (2011) e de Paula et al. (2014). O equipamento construído e adaptado para este estudo é composto por um cilindro e tampos em PVC, motor elétrico, correia, rodízios e estrutura metálica.

Os cálculos dos parâmetros utilizados para este moinho são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores calculados para dimensionamento do moinho de bolas.

Item calculado	Valor obtido	Unidade
Volume cilindro de moagem	6.280,0	cm^3
Velocidade crítica	97,51	rpm
Velocidade considerada (*70% velocidade crítica)*	68,26	rpm
Volume ocupado carga moedora	31,1*	-
Massa meio de moagem	4,41	kg
Quantidade esferas Ø 1/2"	80**	-
Quantidade esferas Ø 20mm	115**	-
Massa total esferas (Ø 1/2"+Ø 20mm)	4,42	kg
Potência mínima do motor	41,02	W

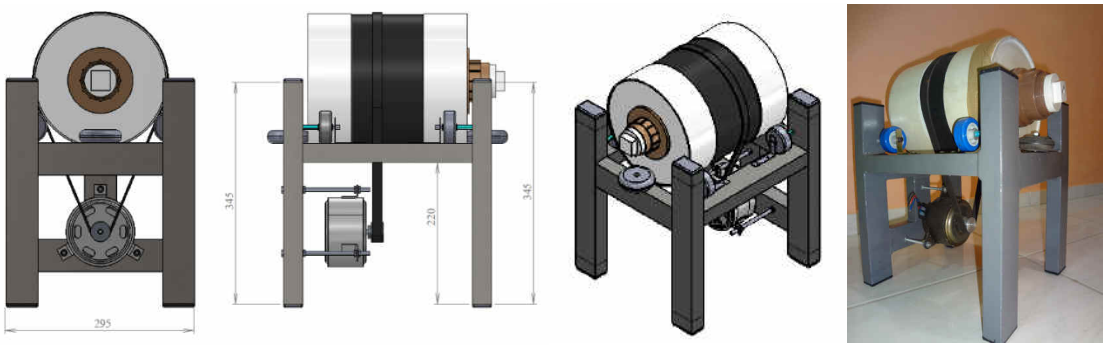
*Valor em porcentagem.

**Valor corresponde ao total de unidades.

Fonte: Autor, 2015.

Neste equipamento, o volume da massa de partículas sólidas usada no processo de moagem pode ser considerado baixo, quando comparado a soluções de moinhos disponíveis comercialmente. A concepção inicial deste equipamento suprimiu o uso adicional de polias e eixos, estes que são comumente utilizados para reduzir a velocidade de rotação entre o eixo do motor e o cilindro de moagem. Isto ocorreu devido a inclusão de um sistema eletrônico para controle de rotação do eixo do motor. Além disso, a construção do moinho de bolas adaptado para este estudo apresentou baixo custo para aquisição de materiais, sendo que alguns destes são materiais reciclados, visualizados na Figura 21.

Figura 21 – Modelo virtual e físico do moinho de bolas proposto ao estudo.

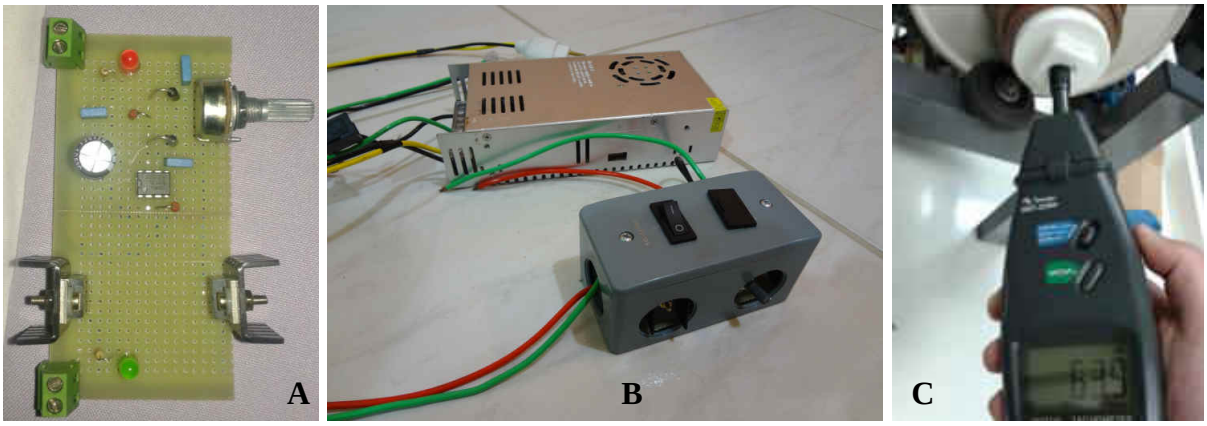


Fonte: Autor, 2015.

No moinho de bolas, o cilindro de moagem necessita ter rotação suficiente para que as esferas que estão no interior do cilindro colidam com o material e a parede do cilindro. Diante

disso, foi desenvolvido um circuito eletrônico que teve como finalidade controlar a rotação do cilindro de moagem, permitindo o ajuste necessário da rotação do eixo do motor elétrico para correto funcionamento do sistema, sem causar danos ao motor elétrico de corrente continua. O circuito eletrônico confeccionado responsável pelo controle da rotação do eixo do motor é chamado de *Pulse-Width Modulation* (PWM - Modulação por Largura de Pulso). Este circuito é apresentado na Figura 22(A). Referente ao diagrama do circuito eletrônico PWM e outros detalhes técnicos deste circuito estão disponíveis no Apêndice C. A fonte chaveada utilizada para alimentação de energia elétrica de corrente continua para o circuito eletrônico PWM é visualizada na Figura 22(B).

Figura 22 – Circuito eletrônico PWM proposto para uso no moinho de bolas.



A) Placa e componentes do circuito eletrônico PWM - 12Vdc, B) Circuito eletrônico PWM conectado a fonte de alimentação - entrada 220V e saída 12Vdc, C) Valor medido no eixo do cilindro de moagem com auxílio de Tacômetro.

Fonte: Autor, 2015.

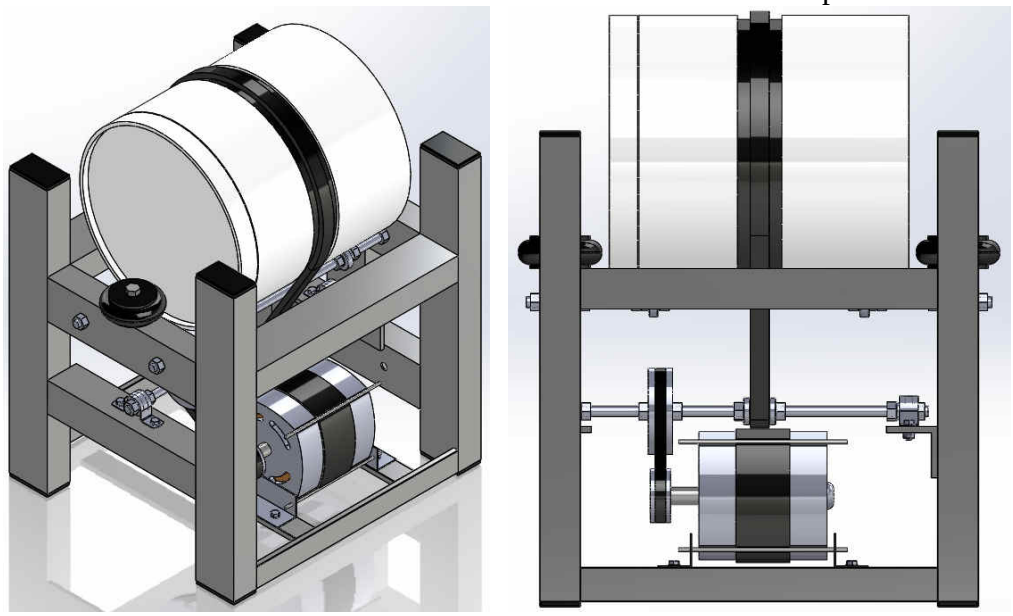
Para medir e ajustar a rotação do cilindro no circuito PWM, utilizou-se um tacômetro. Este equipamento permite medir as rotações por minuto de um motor ou de um eixo. Inicialmente, os testes para medições da rotação no cilindro de moagem foram realizados sem o uso da carga de esferas de aço e de massa de partículas de OLB. Neste caso, o valor médio obtido da rotação no eixo do cilindro de moagem foi de 63,9 rpm, conforme observado na Figura 22 (C).

Os testes de funcionamento do equipamento com plena carga de massa de esferas de aço e de partículas sólidas fragmentadas de OLB resultaram em valores divergentes significativamente em relação ao desejado para a rotação no cilindro de moagem. A provável

causa do surgimento desta anomalia ao longo do tempo de funcionamento do equipamento está associada à carga dinâmica da massa inserida e o circuito PWM. Neste caso, o circuito eletrônico apresentou aquecimento excessivo de componentes resultando na queima de alguns destes componentes, impossibilitando a finalização de testes de moagem e também de repetibilidade de ciclos usando este equipamento.

Outro problema constatado para o moinho construído está relacionado à retirada de materiais contidos no interior do cilindro de moagem. Para este caso verificou-se que a solução apresentada por Nos (2011) se mostrou inadequada devido à retenção de pó fino no interior do cilindro, além da dificuldade de acesso para limpeza e inspeção. Diante disso, foram realizadas alterações no equipamento a fim corrigir os problemas relatados e permitir a repetibilidade de ciclos de moagem. O modelo virtual do moinho de bolas contendo estas alterações é visualizado na Figura 23. Outros detalhes técnicos deste equipamento estão disponíveis no Apêndice B.

Figura 23 – Modelo virtual revisado do moinho de bolas utilizado no experimento.



Fonte: Autor, 2016.

Portanto, a revisão do moinho de bolas contemplou alterações e melhorias relevantes no cilindro de moagem e no sistema de polias, sendo este último o responsável pela redução da velocidade de rotação entre o eixo do motor e o cilindro de moagem. Estas alterações possibilitaram a realização de testes para fins de verificação da repetibilidade do processo de

moagem. Referente aos testes para definição do tempo de moagem e funcionamento do equipamento revisado, verificou-se que o tempo de duração do ciclo de moagem que atende a finalidade deste estudo é de 1h e 30min.

Na etapa de moagem, a massa das partículas sólidas fragmentadas de OLB e as esferas de aço foram pesadas em balança de precisão para fins de verificação de massa a ser processada e também a verificação da massa retida no interior do cilindro do moinho após cada um dos três ciclos de moagem realizados. Em seguida a massa de partículas e de esferas foi inserida no interior do cilindro de moagem, sendo submetido ao processo de moagem com tempo de duração de 1h 30min. Ao término do primeiro ciclo de moagem, a massa de pó de OLB foi retirada do interior do cilindro de moagem e efetuada a medição do peso desta massa. Todo o procedimento de pesagem e de moagem, anteriormente descrito, foi repetido para o segundo e terceiro ciclo de moagem concomitante aos ciclos de britagem já descritos nesta seção.

Após cada ciclo de moagem das partículas sólidas de OLB, a diferença no valor resultante verificado da massa processada de OLB foi considerado insignificante em relação a massa total das partículas sólidas de OLB (mensurada anteriormente), ou seja, a diferença entre a massa final e inicial de OLB foi inferior a 1,64% e, portanto, não impactante para este estudo.

Em seguida, a massa processada de OLB foi submetida a análise granulométrica através do peneiramento mecânico, conforme já abordado na seção 3.2 deste estudo. Cabe ressaltar que não houve a seleção ou classificação das partículas desta massa para uso na análise granulométrica. Com isto foi possível de verificar a presença de partículas que possuíam dimensões acima de 100 μm oriundas do processo de moagem.

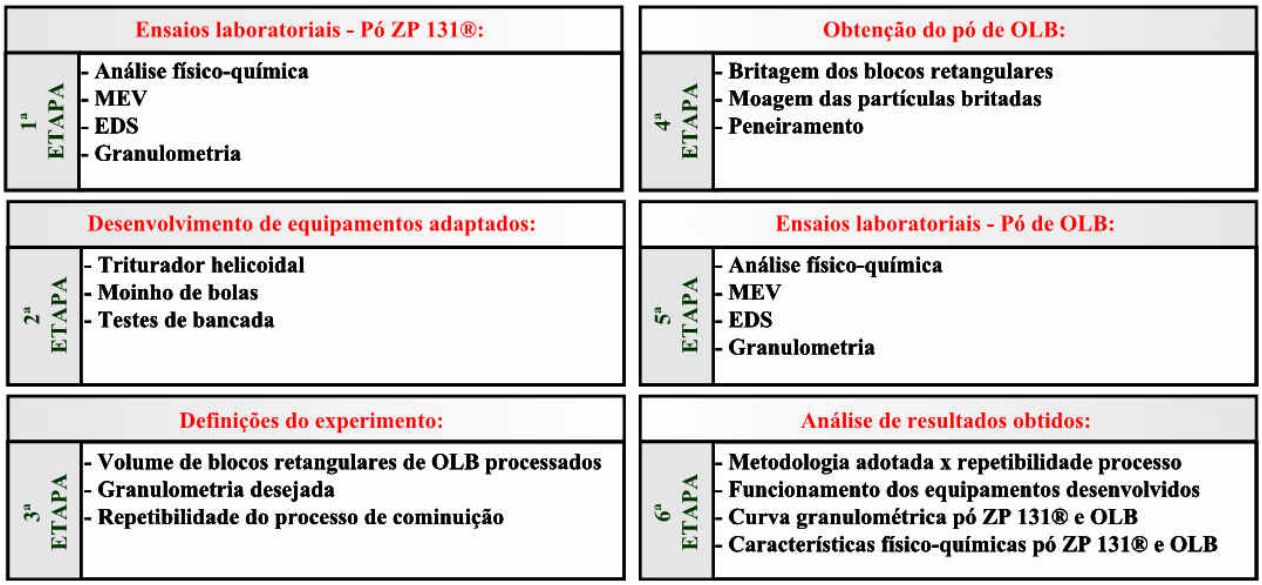
Desta forma, foi possível realizar a repetibilidade do método de cominuição de blocos retangulares de OLB através do emprego de equipamentos adaptados no processo de britagem e de moagem a fim de reduzir e classificar o pó fino de OLB através do peneiramento até o tamanho desejado, ou seja, partículas com dimensões menores que 37 μm.

Por fim, é apresentada em nível maior de detalhamento a metodologia desenvolvida e adotada para obtenção e avaliação da MP atípica proposta neste estudo.

3.4 Definição de Metodologia Experimental

A definição e desenvolvimento da metodologia experimental utilizada neste estudo teve como premissa os conceitos e relatos de experiências dos autores Utela et al. (2010) e Ipar (2011), que já foram apresentados em nível maior de detalhamento na seção 2.2 e 2.6 deste estudo. Estes conceitos foram adaptados à necessidade deste trabalho, sendo que as tarefas e demais procedimentos necessários ao desenvolvimento do experimento são apresentados, sucintamente em ordem sequencial, na Figura 24.

Figura 24 – Etapas e procedimentos necessários ao desenvolvimento do experimento.



Fonte: Autor, 2016.

Dentre as etapas descritas na Figura 24, apenas o material base (objeto do trabalho) e o formato das partículas (decorrente do sistema de moagem e da natureza do material) são fixos e não podem ser alterados. Neste caso, em razão da fácil obtenção e grande disponibilidade, optou-se pelo uso de um biomaterial proveniente de osso integral liofilizado de origem bovina. O restante das decisões tomadas e a suas justificativas são descritas a seguir.

Quanto à formulação do pó, o material (blocos retangulares de OLB), método de moagem (estado seco) e formato das partículas (aleatório) são fixos. Desta forma, só se pode controlar o tamanho das partículas, que devem ser maiores que 20 µm (devido à deposição no estado seco) e menores do que 66 µm (1/3 da máxima espessura de camada do equipamento 3DP). Contudo, a classificação final da massa de pó fino de OLB desejado foi efetuada com

uma peneira padrão ABNT/ASTM que possui tamanho de malha com abertura de 37 μm (400 Mesh).

Demais condições de funcionamento do equipamento triturador de engrenagens helicoidais e do moinho de bolas, além da metodologia e parâmetros de repetibilidade já foram definidas e apresentadas na seção 3.3 deste estudo, permanecendo inalteráveis.

A elaboração de curva granulométrica do pó ZP 131® e do pó resultante de OLB será possível a partir da classificação da massa destes pós através do peneiramento mecânico, obedecendo a técnicas e procedimentos que já foram definidos e apresentados na seção 3.2 deste estudo. Isto se torna necessário para conhecer a distribuição granulométrica destes pós.

Para elaboração da curva granulométrica do pó ZP 131® e do pó fino de OLB utilizou-se a técnica de interpolação de Akima Spline, resultando na curva Spline Cúbica. Este método de interpolação é rápido, eficiente, estável e requer informações sobre os pontos nas vizinhanças do intervalo de interpolação para definir os coeficientes de polinômio cúbico.

Relativo à análise estatística, o tipo de gráfico adotado para a análise empírica de dados é o Box-plot. A variável a ser analisada é o valor da massa do pó virgem ZP 131® e do pó fino de OLB. O fator de interesse é o tamanho de abertura da malha das peneiras utilizadas neste estudo. O gráfico resultante será utilizado na comparação visual entre os pós.

No capitulo a seguir é apresentado o resultado obtido após a realização da metodologia e procedimentos experimentais descritos nesta seção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

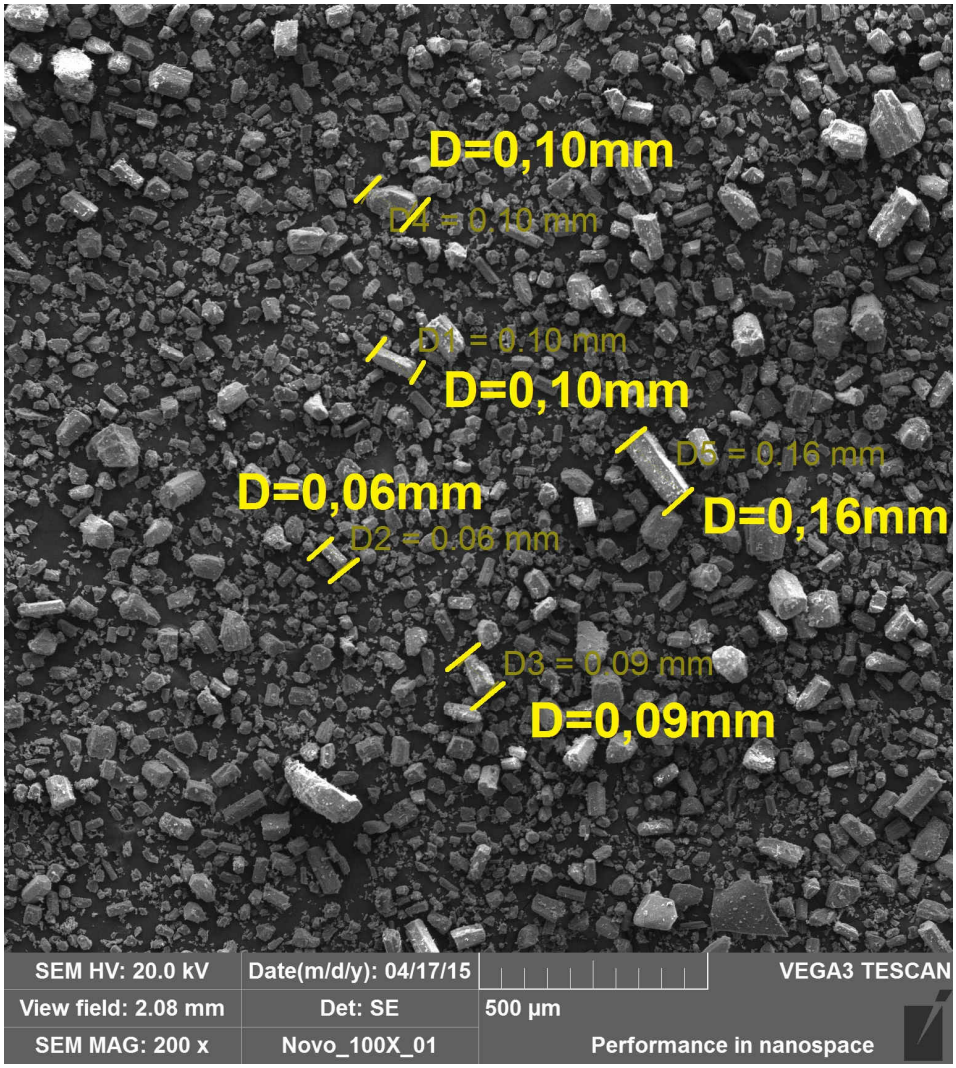
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos após a realização da metodologia e procedimentos experimentais propostos na seção anterior deste estudo. Primeiramente, é apresentada a caracterização e avaliação físico-química do pó ZP 131®, além da curva granulométrica resultante para este pó. Na sequência são apresentados os equipamentos construídos e adaptados para uso na transformação dos blocos retangulares de OLB em pó fino. Posteriormente é apresentado o pó fino resultante da metodologia de cominuição aplicada aos blocos retangulares de OLB, além da caracterização, avaliação físico-química e a curva granulométrica resultante para este pó. Por fim é apresentado, de modo comparativo, o resultado da avaliação estatística entre o pó ZP 131® e o pó fino de OLB.

4.1 Caracterização da MP Comercializada para Impressora 3DP: Pó ZP 131®

O passo inicial do estudo foi à caracterização microscópica do pó ZP 131®. Esta análise foi realizada de acordo com as condições de armazenamento em que o pó se encontrava. Neste caso foram identificadas duas condições e por consequência divididos, resultando em duas amostras de pó ZP 131®. A primeira amostra analisada no microscópio corresponde ao pó novo que é utilizado na reposição do mesmo no leito da impressora, chamado neste estudo de pó virgem. Este pó foi retirado no interior da embalagem original do produto. A segunda amostra analisada em microscópio foi obtida através da retirada de pó no interior do leito da impressora 3DP, ou seja, pó excedente e reutilizado pela impressora, chamado neste estudo de pó de reuso.

Na Figura 25 verificam-se as dimensões aproximadas das partículas do pó virgem utilizado na reposição de MP na impressora 3DP.

Figura 25 - Análise MEV do pó virgem de ZP 131® utilizado na impressora 3DP.

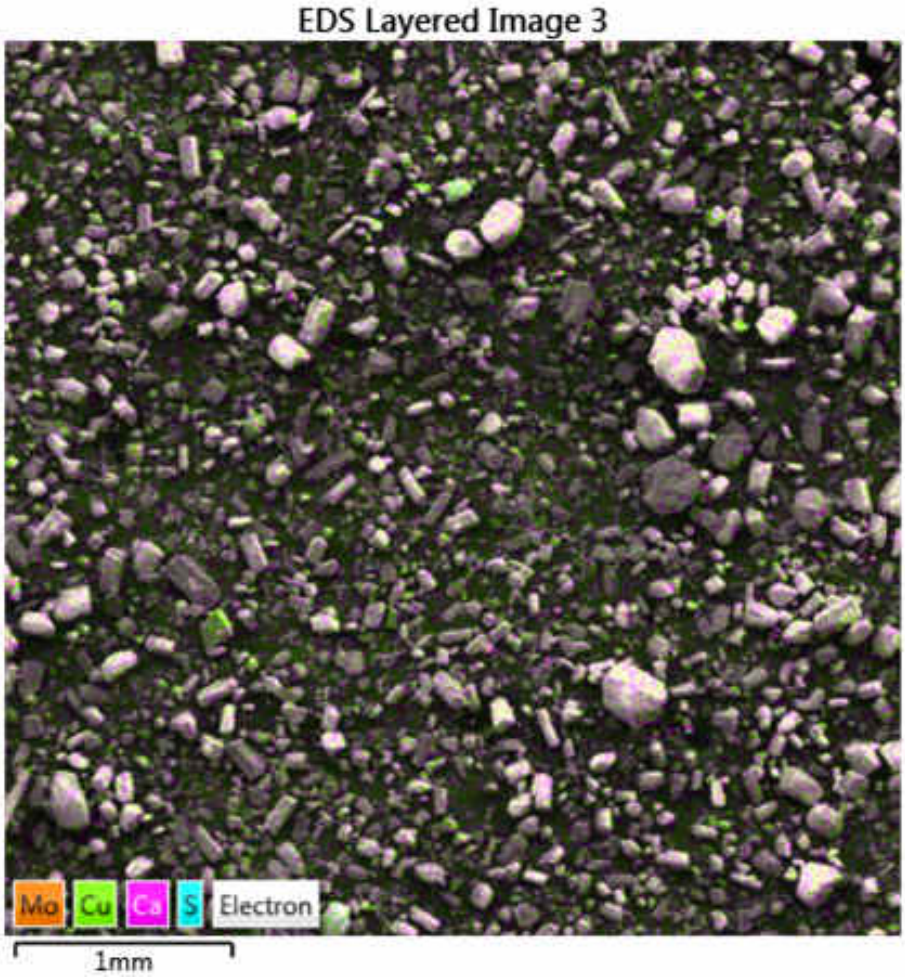


Fonte: Autor, 2015.

No estudo da caracterização microscópica deste material, revelado na Figura 25, observa-se que as partículas do pó virgem ZP 131® apresentam tamanhos variados. Com o auxílio de software foram realizadas medições do comprimento de algumas partículas deste pó. O critério de seleção das partículas de pó mensuradas levou em consideração a geometria, sendo selecionadas visualmente algumas partículas de pó que apresentavam geometrias menores e outras maiores. O maior valor do comprimento das partículas analisadas que foi encontrado é de 160 µm e o menor valor é 60 µm.

A Figura 26 apresenta o resultado da análise EDS aplicada na região da Figura 25. Esta análise permitiu a imediata identificação e mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos desejados.

Figura 26 – Análise físico-química do pó virgem de ZP 131® utilizado na impressora 3DP.

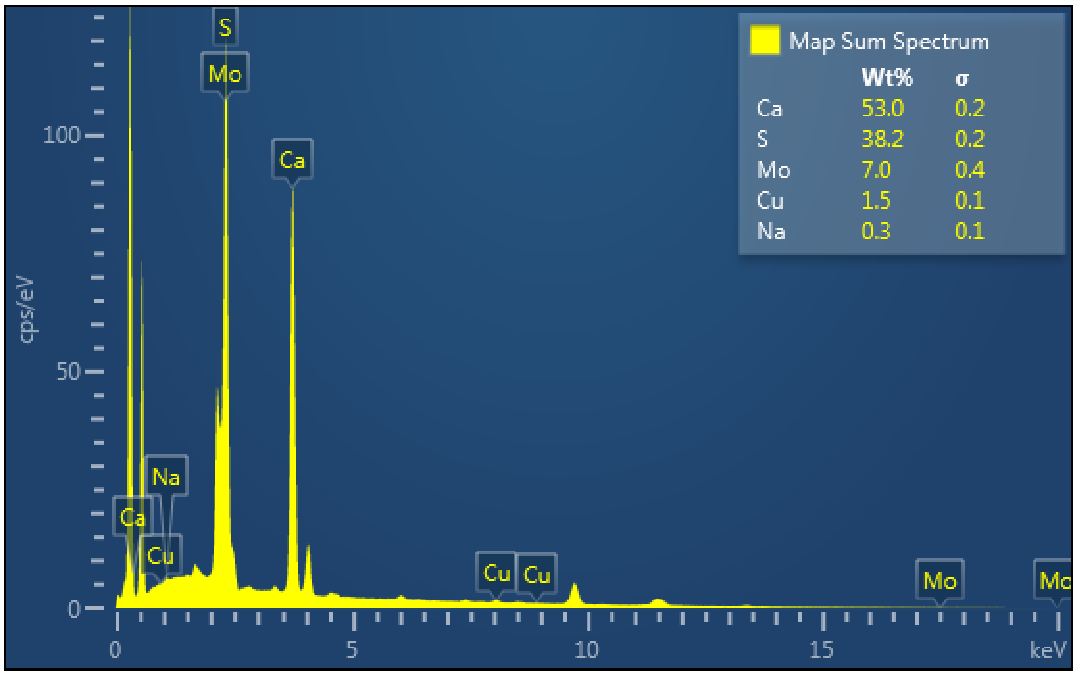


Fonte: Autor, 2015.

O resultado da análise EDS apresentada na Figura 26 revela os principais elementos químicos presentes na região analisada da amostra do pó virgem. Na Figura 26 é possível identificar a presença dos elementos químicos Molibdênio (Mo), Cobre (Cu), Cálcio (Ca) e Enxofre (S).

Com o auxílio e uso da técnica de contraste de cores e a legenda indicadas na Figura 26, constatou-se que os elementos químicos Ca e S são predominantes, ou seja, apresentam maiores concentrações na região analisada da amostra de pó virgem. Outros elementos químicos identificados e seus percentuais podem ser visualizados na Figura 27.

Figura 27 - Análise EDS do pó virgem ZP 131® utilizado na impressora 3DP.



Fonte: Autor, 2015.

Os valores correspondentes a concentração dos elementos químicos identificados na Figura 27, confirmam a predominância do elemento químico Ca que corresponde a 53% e 38,2% do elemento químico S presente na região analisada. No espectro apresentado através da Figura 27 verifica-se a presença do elemento Sódio (Na) em menor concentração na amostra analisada.

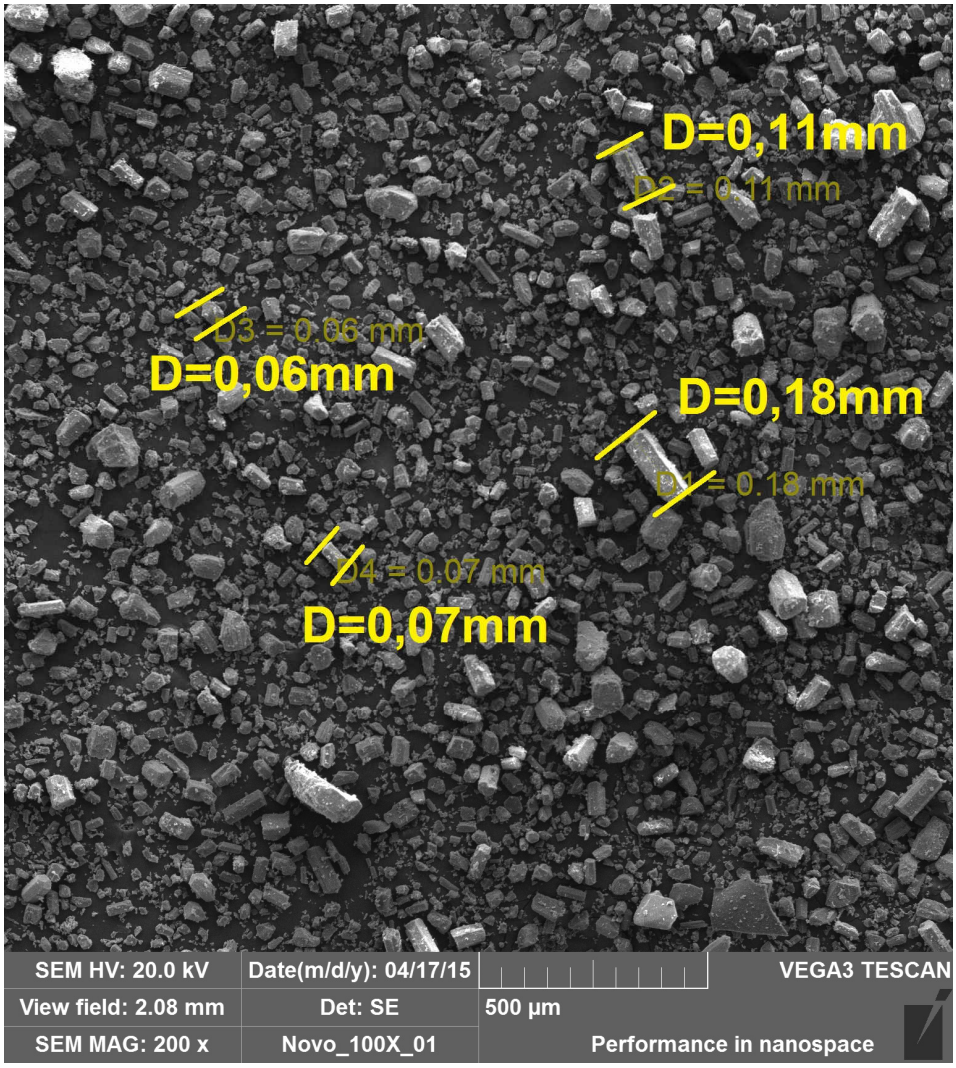
Baseado nos resultados disponíveis no estudo de Ipar (2011) referentes a análise EDS do pó ZP 131®, verificou-se que o autor identificou os elementos químicos C, O, S, K e Ca. Além disso, o autor concluiu que este pó é a base de gesso, sendo a formula química do gesso Ca[SO4]●2H2O. Portanto, comparando o resultado da análise EDS apresentado na Figura 27 e no estudo de Ipar (2011), verifica-se que somente os elementos químicos Ca e S são coincidentes entre as amostras analisadas nos estudos. Diante disso, supõe-se que a presença de Mo na amostra analisada neste estudo ocorreu devido ao contaminante de fonte externa à embalagem do produto. Neste caso, supõe-se que durante o manuseio de utensílios no interior da embalagem, estes apresentavam partículas de Mo, e que estas partículas tenham se desprendido, provocado à contaminação deste pó.

Referente a presença de Cu, admite-se o surgimento deste elemento químico na amostra analisada devido ao pó ZP 131® não ser condutivo elétrico e neste caso para ser

realizado a análise EDS deste pó, a superfície do material da amostra deve ser coberta com uma camada de material condutivo, sendo para este caso o cobre utilizado para este fim.

Para a amostra correspondente ao pó de reuso foram realizadas análises MEV e EDS idênticas ao que foram aplicadas para o pó virgem. O resultado obtido no MEV e as dimensões aproximadas das partículas do pó de reuso são revelados na Figura 28.

Figura 28 - Análise MEV do pó de reuso ZP 131® utilizado na impressora 3DP.



Fonte: Autor, 2015.

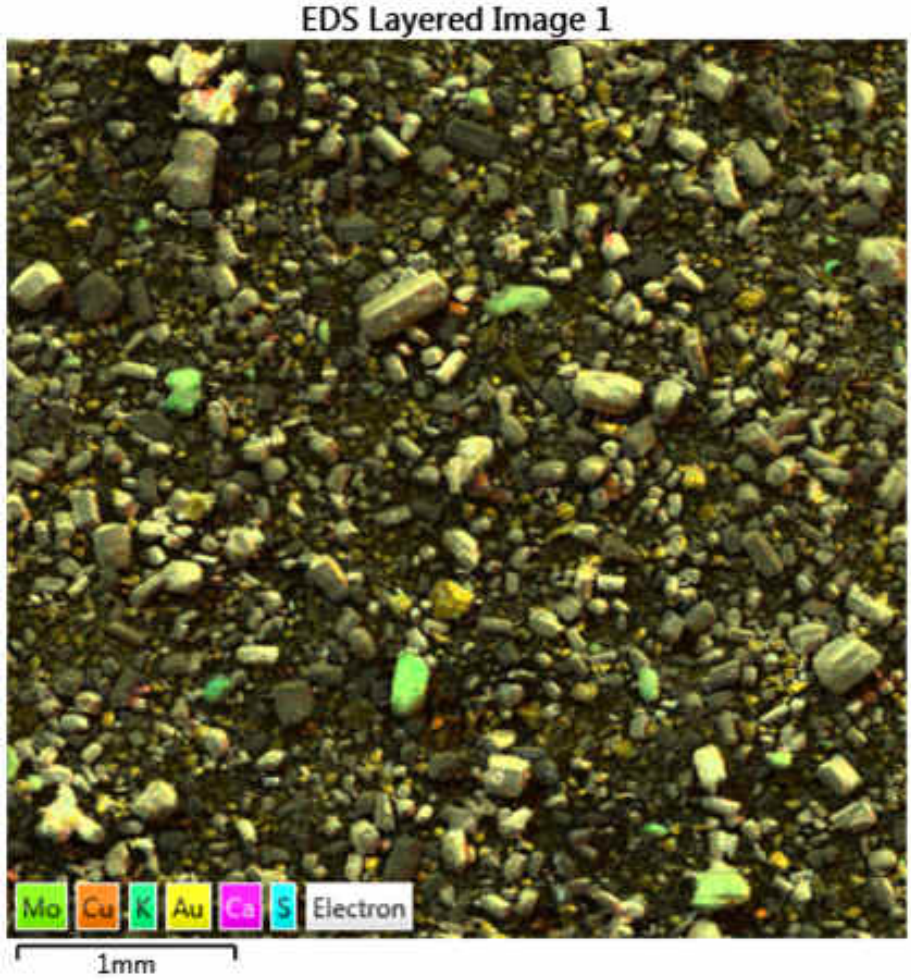
O resultado apresentado na Figura 28 revela que as partículas do pó de reuso visualmente apresentam geometrias irregulares maiores quando estas são comparadas com as partículas do pó virgem, reveladas na Figura 25. Diante disso, é possível afirmar para pó virgem e o pó de reuso que existem dois tipos de partículas: um maior com formato regular

hexagonal alongado, e outra menor, com formato irregular (anisotrópicos), porém mais aproximado de um formato esférico. Portanto, esta diferença de granulometrias entre o pó virgem e o pó de reuso mostra que há uma grande variação de granulometrias aceitáveis para a MP comumente utilizada em impressões 3DP.

Referente às dimensões das partículas do pó de reuso verifica-se na Figura 28 que foram encontrados valores entre 60 μm e 180 μm.

O resultado da análise EDS apresentado na Figura 29 revela os elementos químicos que foram identificados na amostra do pó de reuso.

Figura 29 – Análise físico-química do pó de reuso ZP 131® utilizado na impressora 3DP.



Fonte: Autor, 2015.

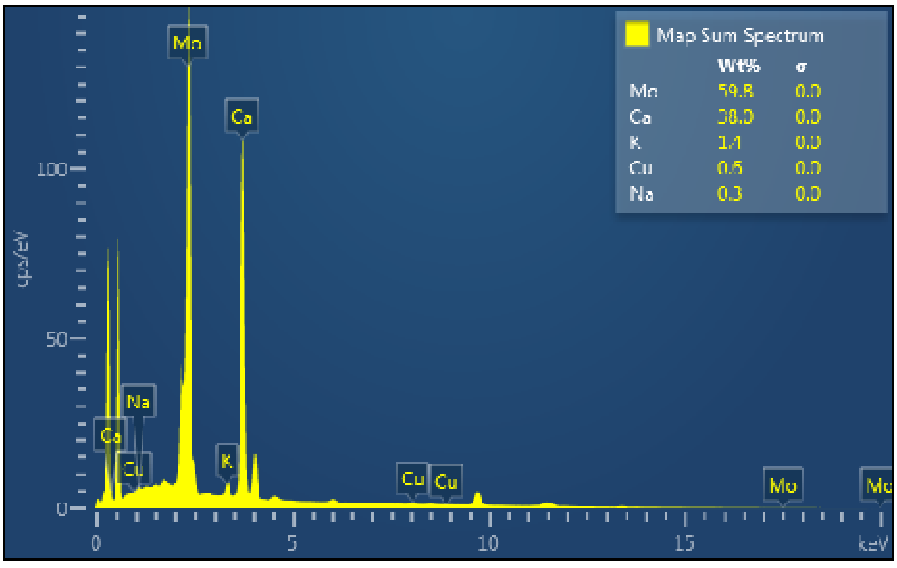
Em relação a composição química da amostra de reuso, através do resultado apresentado na Figura 29, verifica-se que os elementos químicos predominantes na amostra

foram: Mo, Cu, K, Au, Ca e S. Comparando o resultado da análise EDS entre a Figura 26 e a Figura 29, constatou-se que a amostra de reuso apresentou, em sua composição química, a presença de dois elementos químicos diferentes dos elementos identificados para o pó virgem. Neste caso a presença do elemento químico Au indica que a amostra possui contaminação provocada pelo procedimento de preparo e cobertura da amostra com metal. Portanto, este passo visa prover ou aumentar a condutividade da superfície da amostra através de uma fina camada (com até 20-30 nm de espessura) de metal, de preferência, ouro ou ouro-paládio.

Comparando o resultado da análise EDS apresentado na Figura 29 e no estudo de Ipar (2011), verifica-se que somente os elementos químicos Ca, S e K são coincidentes entre as amostras analisadas nos estudos.

No resultado da análise EDS realizada para o pó de reuso apresentada na Figura 30, foi identificada a presença do elemento químico Sódio (Na). Comparando o resultado da análise EDS disponível na Figura 27, Figura 30 e do estudo de Ipar (2011) verifica-se que somente as amostras de pós, analisadas no presente estudo, possuem a presença do elemento químico Na. Diante disso, supõem que a presença deste elemento químico, nas amostras analisadas, pode ter ocorrido através de contaminação externa provocada involuntariamente pela transpiração e contato do operador do equipamento com o pó durante o processo de retirada do material.

Figura 30 - Análise EDS do pó de reuso ZP 131® utilizado na impressora 3DP.

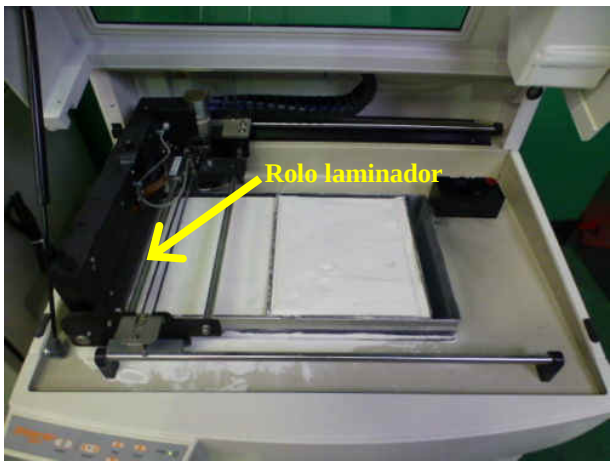


Fonte: Autor, 2015.

Com base nas informações apresentadas na Figura 30 verifica-se a presença dos seguintes elementos químicos: Mo 59,8%; Ca 38,0%; K 1,4%, Cu 0,6% e Na 0,3%.

Para esta amostra analisada, constatou-se que o teor de Mo identificado na região da amostra analisada foi maior, quando comparado com o resultado obtido para o pó virgem (Figura 27), este que apresentou menor percentual. Diante disso, deduz-se que a presença do elemento químico Mo identificada no pó de reuso surgiu no interior do equipamento 3DP através do atrito do rolo laminador situado no interior do equipamento, resultando na contaminação da amostra analisada. Este rolo laminador pode ser observado na Figura 31.

Figura 31 – Interior do equipamento 3DP modelo ZPrinter 310 Plus.



Fonte: Autor, 2015.

O rolo laminador identificado na Figura 31 é confeccionado em aço resistente ao desgaste. Neste caso o elemento químico Mo é utilizado em aços para aumentar a resistência ao desgaste. Diante disso, supõem que ocorreu o desprendimento de partículas oriundas do desgaste do mecanismo interno do equipamento 3DP, sendo esta suposição aceita para justificar o alto teor de Mo presente na amostra do pó de reuso retirada no interior do equipamento.

Na amostra de pó virgem analisada também foi identificada a presença de Mo em menor percentual quando comparado com o percentual identificado para o pó de reuso. Para o pó virgem, verificou-se que a contaminação ocorreu entre o procedimento de retirada de pó no interior da embalagem do produto e a inserção deste no interior da impressora. Diante disso, se presume que a fonte geradora desta contaminação ocorreu devido à utilização de utensílio plástico semelhante a uma concha de cereais usada na retirada da amostra de pó no interior da

embalagem do produto. Neste caso foi identificado que este utensílio foi utilizado, primeiramente, na retirada da amostra de pó de reuso no interior do leito de impressão do equipamento 3DP, creditando-se a este utensílio a fonte geradora de contaminação no pó virgem de ZP 131®.

No peneiramento mecânico foi utilizado somente à amostra de pó virgem, devido este material apresentar menor dispersão granulométrica e quantidade menor de contaminantes. Este peneiramento possibilitou a obtenção de dados que foram utilizados na elaboração da curva granulométrica do pó virgem de ZP 131®. A massa resultante deste peneiramento é visualizada na Figura 32.

Figura 32 – Resultado obtido após peneiramento do pó virgem de ZP 131®.

Fonte: Autor, 2015.

A massa resultante do peneiramento mecânico apresentou partículas com dimensões inferiores 38 µm, ou seja, partículas de pó com tamanho menor que a abertura da malha de 38 µm (Mesh 400) utilizada na última peneira.

Em cada ciclo de peneiramento foi utilizada a carga de massa de pó virgem de 15 gramas. Ao total foram realizados três ciclos de peneiramento. Após a execução dos ciclos de peneiramento mecânico, foram calculados os valores médios de massa de pó virgem ZP 131®. Os valores corrigidos calculados de massa retida e de massa passante para cada peneira podem ser visualizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores obtidos no ensaio granulométrico do pó virgem de ZP 131®.

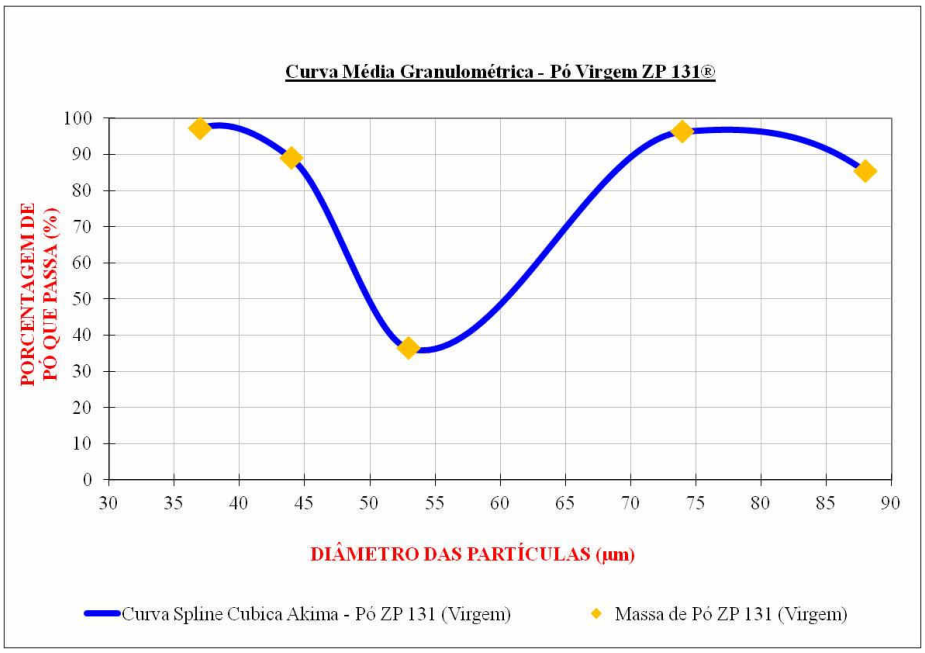
Abertura da malha	Massa Média dos Ensaios (g)	Desvio Médio (DM)	Desvio Padrão σ	% Massa Retida	% Massa Passante
88 µm	2,19	0,05	0,06	14,69	85,31
74 µm	0,55	0,14	0,15	3,73	96,27
53 µm	9,47	0,08	0,08	63,59	36,41
44 µm	1,64	0,08	0,09	11,04	88,96
37 µm	0,41	0,04	0,05	2,76	97,24
Recipiente de coleta (Fundo)	0,62	0,06	0,07	4,19	95,81
Totais	**14,89 gramas**			**100,00%**	**100,00%**

Fonte: Autor, 2015.

Observa-se na Tabela 11 que a quantidade maior de massa retida ocorreu na terceira peneira. Esta peneira possui abertura de malha de 53 µm (Mesh 270). A massa média total depositada no fundo coletor resultante do peneiramento é de 0,62 gramas, equivalente a 4,19% do total da massa média utilizada nesta análise.

Os dados informados na Tabela 11 foram utilizados na elaboração do Gráfico 1. Este gráfico revela a distribuição granulométrica do pó virgem, possibilitando a determinação da sua característica física.

Gráfico 1 – Curva média resultante da análise granulométrica do pó virgem de ZP 131®.



Fonte: Autor, 2016.

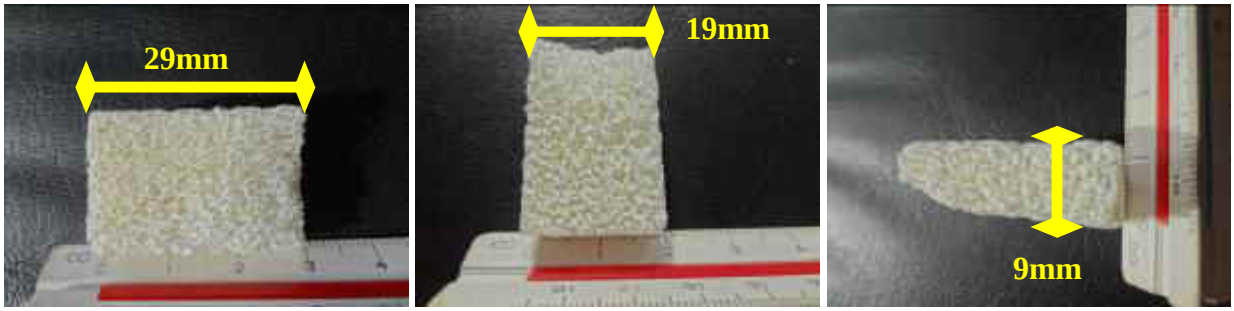
De acordo com o Gráfico 1 é possível identificar as dimensões das partículas do pó virgem, sendo esta característica utilizada como referência e padrão para o desenvolvimento e avaliação do pó obtido através do processamento de blocos retangulares de OLB.

4.2 Características dos Blocos Retangulares de OLB

Os blocos retangulares de osso bovino utilizados neste estudo já se encontravam liofilizados através de técnicas de processamento estabelecidas em protocolo desenvolvido por Galia et al. (2009). Além destes blocos ter como característica a presença de vazios (porosidade), eles apresentam formatos geométricos irregulares e consequentemente dimensões variadas resultando em volumes diferentes para cada bloco.

Diante destas informações verifica-se que este material é anisotrópico. Esta característica foi considerada no desenvolvimento do equipamento responsável pela britagem destes blocos. As dimensões aproximadas consideradas destes blocos para o dimensionamento do equipamento de britagem são: comprimento 29 mm, largura 19 mm e altura 9 mm, observado estes valores na Figura 33.

Figura 33 – Dimensão do bloco de OLB.



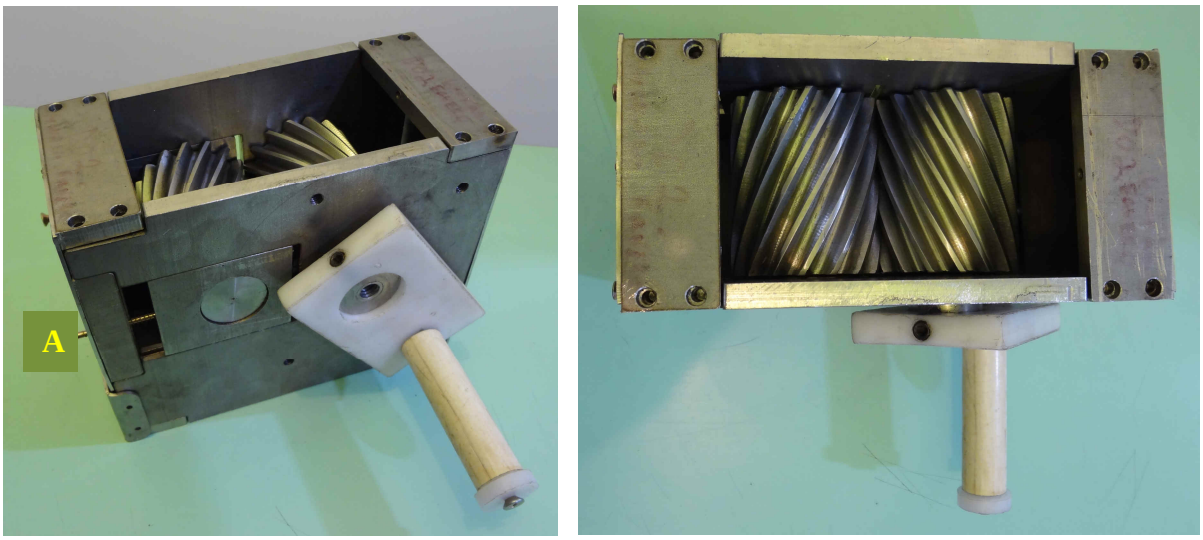
Fonte: Autor, 2015.

Na mensuração da massa destes blocos foi utilizada uma balança de precisão de seis casas decimais, possibilitando estimar o peso próprio do OLB. Como exemplo, o bloco apresentado na Figura 33 possui massa de 2,28 gramas, sendo neste caso considerado a precisão de duas casas decimais.

4.3 Equipamentos Construídos para Cominuição de Blocos Retangulares de OLB

O equipamento construído neste estudo e adaptado para uso no processo de britagem dos blocos retangulares de OLB é visualizado na Figura 34. Este equipamento realiza a fragmentação dos blocos retangulares de OLB e foi construído após a revisão realizada no protótipo do triturador de engrenagens helicoidais, conforme já abordado na seção 3.3 deste estudo. O resultado obtido com o uso deste triturador foi satisfatório no processo de fragmentação destes blocos. Para este equipamento as engrenagens, eixos e chapas foram confeccionados com material de Aço Inox AISI 304. Isto se deve ao fato desta liga de aço apresentar propriedades físico-químicas superiores aos aços comuns, sendo a alta resistência à oxidação atmosférica a sua principal característica. Para elevar a resistência ao desgaste do material utilizado no triturador, foi realizado o tratamento térmico adequado nos dentes das duas engrenagens helicoidais.

Figura 34 – Triturador de engrenagens helicoidais construido e adaptado para o estudo.



Fonte: Autor, 2015.

O triturador de engrenagens helicoidais possibilita a regulagem do afastamento entre os eixos das engrenagens. Esta regulagem é realizada através de dois parafusos que são indicados a sua localização na Figura 34 (A). Para uso do equipamento, depois de realizada a regulagem, estes parafusos devem permanecer travados para evitar alteração do afastamento entre os dentes das engrenagens.

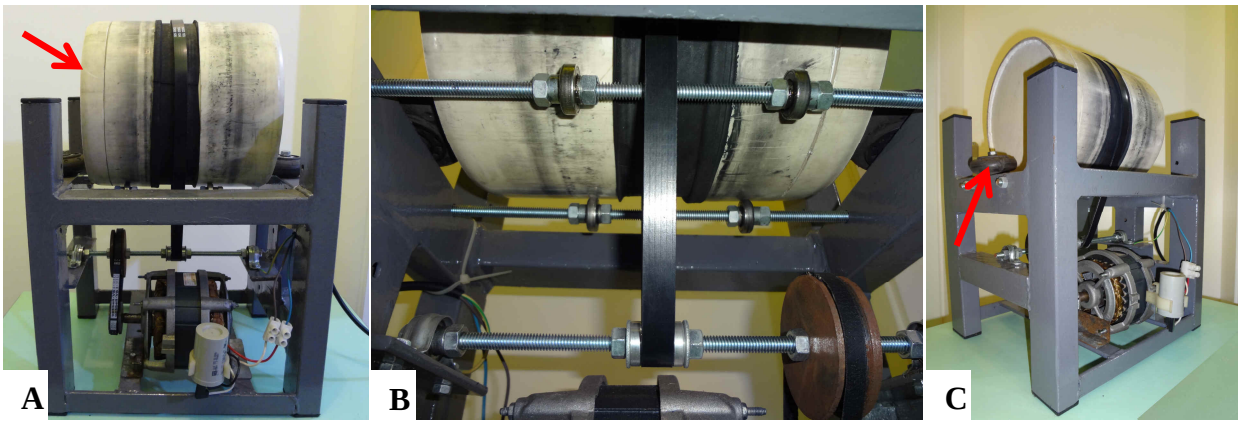
A massa de partículas sólidas resultantes do processo de britagem dos blocos retangulares de OLB é visualizada na Figura 35. Após o processo de britagem, a dimensão média das partículas sólidas de OLB resultantes foi de 160 µm.

Figura 35 – Massa de partículas sólidas de OLB após britagem.

Fonte: Autor, 2015.

Outro equipamento confeccionado e adaptado para este estudo é o moinho de bolas visualizado na Figura 36. Este equipamento realiza a moagem dos fragmentos resultantes do processo de britagem dos blocos retangulares e foi construído após a revisão realizada para o protótipo do moinho de bolas, conforme já abordado na seção 3.3 deste estudo. Portanto o moinho de bolas visualizado na Figura 36 possui estrutura metálica, polias redutoras, correias, eixos com rolamentos para sustentação do cilindro de moagem, cilindro e tampas (caps) em PVC, motor elétrico monofásico e esferas lisas de aço equivalente à norma SAE 52100.

Figura 36 – Moinho de bolas de baixo custo projetado e construído para este estudo.

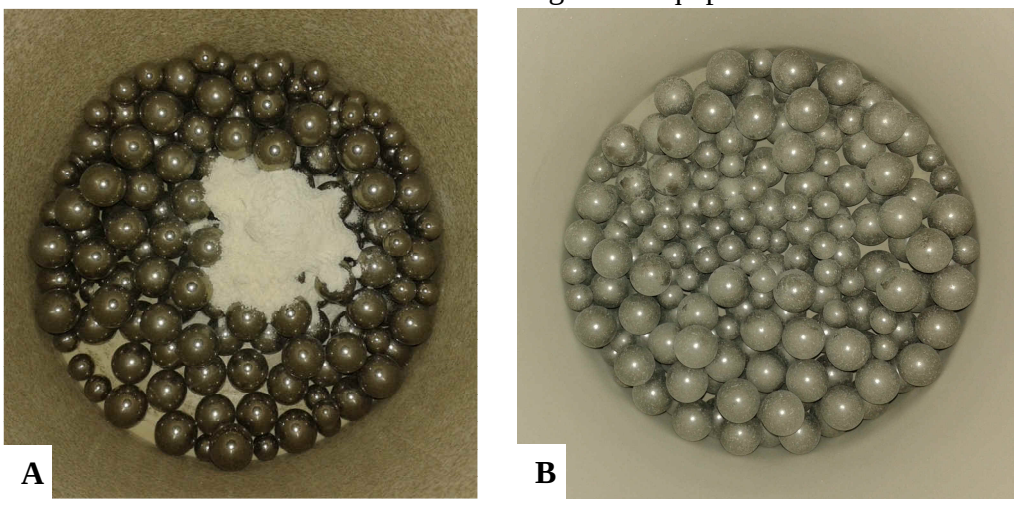


Fonte: Autor, 2015.

Para inserir a massa de fragmentos de OLB (Figura 35) no interior do cilindro de moagem torna-se necessária a remoção da tampa de PVC indicado na Figura 36 (A). O detalhe do sistema de transmissão da rotação do motor elétrico para o cilindro de moagem é visualizado na Figura 36 (B). Neste moinho o cilindro de moagem pode ser retirado mediante a remoção de parafuso e rodízio instalado entre as duas extremidades da estrutura, conforme indicado na Figura 36 (C).

Conforme apresentado na Figura 37 (A) a massa de partículas sólidas resultantes do processo de britagem dos blocos retangulares de OLB foi inserida juntamente com as esferas de aço no interior do leito de moagem. A moagem destas partículas foi executada com massa de bolas superior em dez vezes à massa das partículas de OLB.

Figura 37 – Detalhe do interior do cilindro de moagem do equipamento construído.



A) Esferas de aço e massa de partículas sólidas de OLB, B) Interior do cilindro do moinho após ciclo de moagem.

Fonte: Autor, 2016.

Por fim, a moagem da massa de fragmentos sólidos de OLB resultou na transformação destas partículas em pó. O resultado da moagem e transformação em pó é visualizado na Figura 37 (B).

As esferas de aço e o pó resultante da moagem foram retirados do interior do cilindro de moagem. Em seguida este pó foi submetido ao peneiramento mecânico conforme procedimento já abordado na seção 3.2 deste estudo. Este peneiramento resultou na separação das partículas para obtenção do pó fino de OLB.

O pó fino de OLB depositado no fundo coletor do conjunto de peneiras é visualizado na Figura 38.

Figura 38 – Massa de pó fino de OLB obtida após o peneiramento.

Fonte: Autor, 2016.

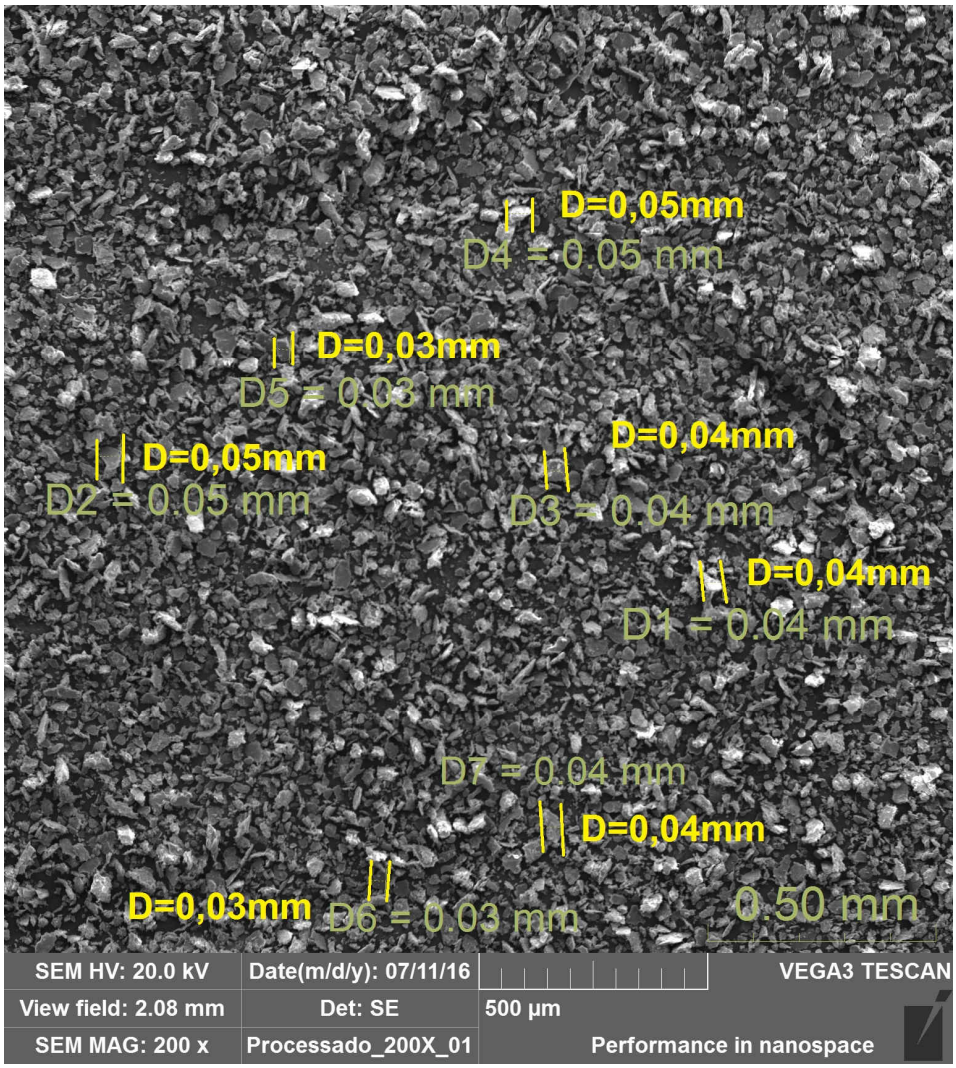
A seguir será apresentado o resultado obtido através da caracterização do pó fino de OLB obtido neste estudo.

4.4 Caracterização da MP Atípica Resultante: Pó de OLB

A caracterização microscópica do pó fino resultante da cominuição de blocos retangulares de OLB foi realizada de acordo com as condições em que o pó fino se encontrava após o peneiramento mecânico.

A Figura 39 permite verificar as dimensões aproximadas das partículas do pó fino de OLB.

Figura 39 - Análise MEV do pó fino de OLB resultante do peneiramento mecânico.



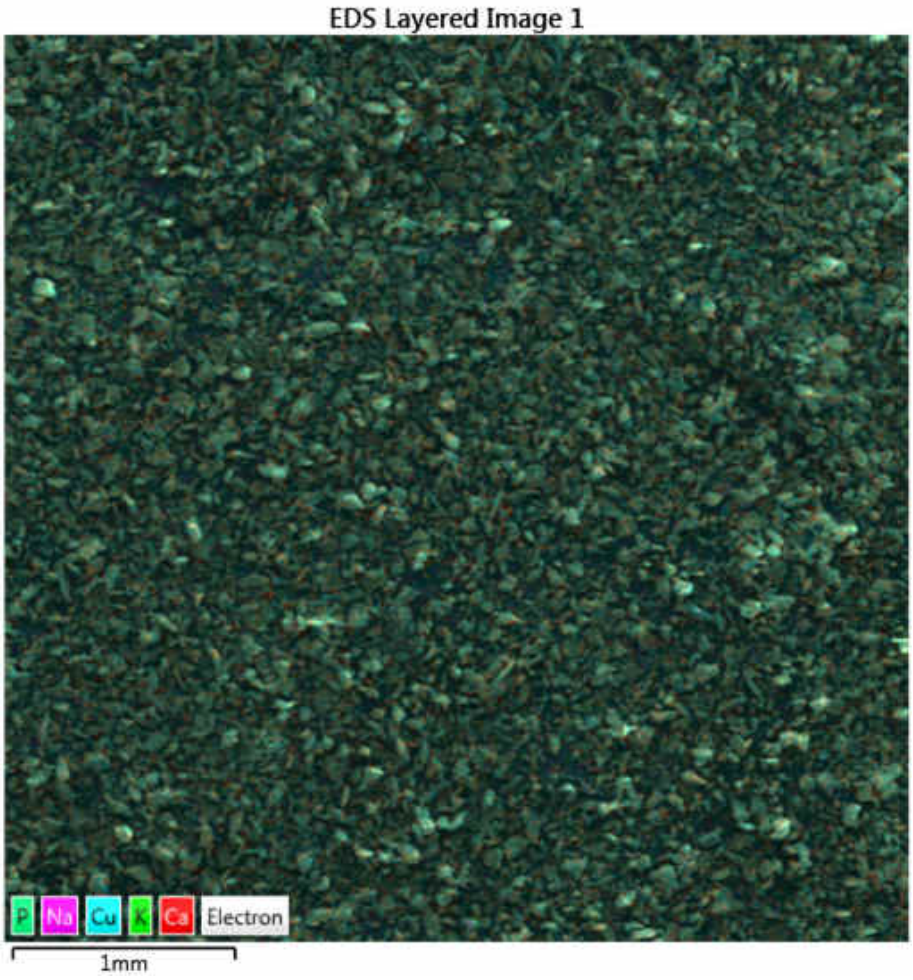
Fonte: Autor, 2016.

Analisando a Figura 39 observa-se que as partículas deste pó apresentam geometria semelhante a flocos. Com o auxílio de software foram realizadas medições do comprimento de algumas partículas deste pó. O critério de seleção destas partículas foi o mesmo adotado para o pó ZP 131®. O valor encontrado foi entre 30 µm a 50 µm para as partículas que foram selecionadas e mensuradas. Comparando os valores obtidos na Figura 39 para o pó fino de OLB com o resultado observado na Figura 25 para pó ZP 131®, verificou-se que as partículas do pó fino de OLB apresentaram intervalo de valores menores em relação as suas dimensões. Este intervalo menor de variação na dimensão do pó fino de OLB supostamente ocorreu devido ao processo de moagem. Neste caso a moagem possibilitou a redução do tamanho inicial dos fragmentos britados que eram de 160 µm para partículas com tamanhos aproximados entre 30 µm a 50 µm.

Através da comprovação da existência de variação granulométrica aceitável pelo equipamento 3DP, conforme já apresentado na seção 4.1 deste estudo, verificou-se que a variação granulométrica obtida para o pó de OLB está inserida entre o intervalo granulométrico apresentado pelo pó ZP 131® no estado virgem e de reuso.

O resultado da análise EDS aplicada ao pó fino de OLB permitiu a imediata identificação e mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos desejados para este pó, conforme visualizado na Figura 40.

Figura 40 – Análise físico-química do pó de OLB resultante do peneiramento mecânico.



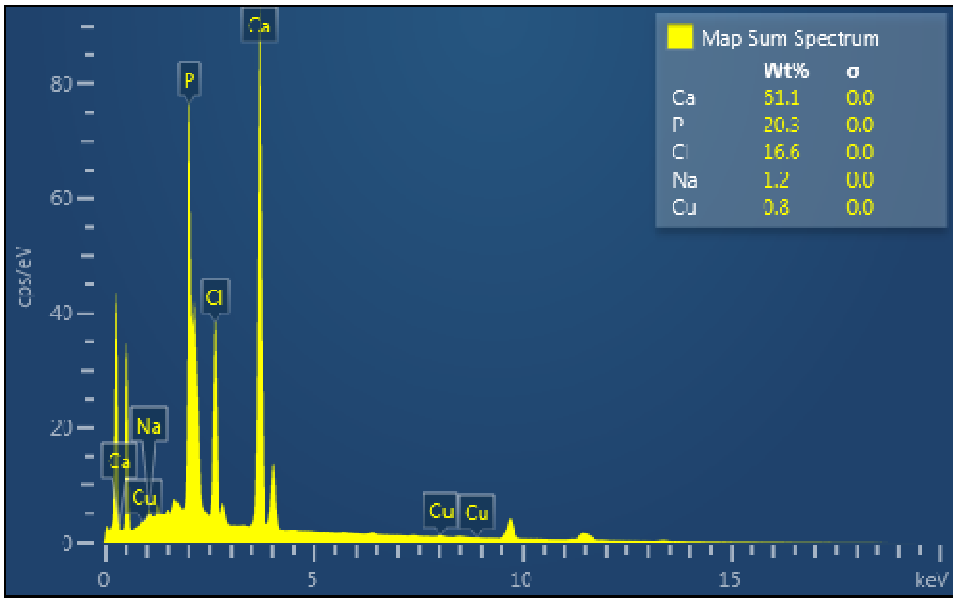
Fonte: Autor, 2016.

Em relação aos elementos químicos revelados na Figura 40 constatou-se que o pó fino de OLB apresentou os elementos Fósforo (P), Sódio (Na), Cobre (Cu), Potássio (P) e Cálcio (Ca). A presença do elemento químico Cu supostamente ocorreu devido à contaminação

oriunda de fonte externa, explicada anteriormente na seção 4.1 neste estudo. Portanto, a composição química desta amostra é constituída por elementos químicos isolantes, a qual necessitou de recobrimento com material condutor de cargas elétricas. Somente com a realização deste procedimento de preparo da amostra de pó fino de OLB foi possível realizar a análise no MEV. Este procedimento é comumente chamado de metalização da amostra e sendo utilizado o elemento químico Cu para recobrir a superfície da amostra, tornando-a condutora de cargas elétricas. Ainda para este pó, existia a possibilidade da presença de elementos químicos associados a uma a suposta contaminação oriunda do desgaste provocado pelo atrito entre as esferas de aço ou entre o material do corpo do cilindro. Diante disso, verificou-se que esta proposição não é verdadeira para esta amostra devido ao resultado da análise EDS não ter identificado e revelado a presença de elementos químicos associados ao material das esferas de aço e cilindro em PVC.

De acordo com as informações apresentadas na Figura 41 o elemento químico Ca possui maior valor de concentração na região da amostra analisada. Entretanto, o resultado referente à concentração de elementos químicos presentes nas amostras analisadas neste estudo corresponde ao valor percentual aproximado.

Figura 41 – Análise EDS do pó de OLB resultante do peneiramento mecânico.



Fonte: Autor, 2016.

Os elementos químicos descritos na Tabela 5 oriundos do estudo de Galia et al. (2009), ao ser comparado com os elementos químicos identificados na Figura 41, constatou-se que são idênticos, ou seja, o pó fino de OLB apresentou os mesmos elementos químicos expostos na Tabela 5. No estudo de Galia et al. (2009) os autores identificaram a presença de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Cálcio (Ca) e Sódio (Na) nas amostras analisadas de OLB. Portanto, esta coincidência era desejada no resultado dos elementos químicos identificados em ambos os estudos. Isto ocorre devido ao fato de serem utilizados para este estudo os blocos retangulares de OLB de mesma procedência e características dos materiais utilizados e analisados no estudo de Galia et al. (2009). Cabe resaltar que os percentuais dos elementos químicos encontrados para este estudo através da análise EDS e no estudo de Galia et al. (2009) não devem ser comparados devido aos estudos utilizarem métodos e técnica diferentes para caracterização das amostras analisadas.

A Tabela 12 apresenta os valores médios de massa de pó de OLB calculados após a execução do peneiramento mecânico realizado com carga de massa de pó de OLB de 15 gramas. Com o auxilio da Tabela 12 visualizamos os valores corrigidos de massa retida e de massa passante em cada peneira.

Tabela 12 – Valores obtidos no ensaio granulométrico do pó de OLB.

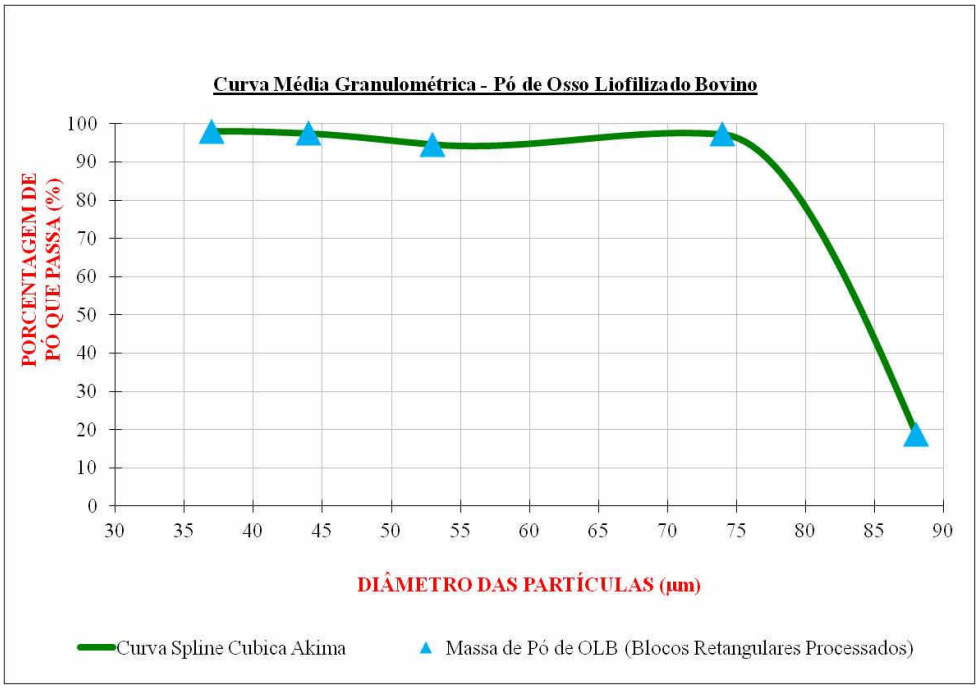
Abertura da malha	**Massa Média dos Ensaios (g)**	**Desvio Médio (DM)**	**Desvio Padrão σ**	**% Massa Retida**	**% Massa Passante**
88 µm	11,44	0,05	0,08	81,13	18,87
74 µm	0,38	0,01	0,02	2,73	97,27
53 µm	0,75	0,01	0,01	5,35	94,65
44 µm	0,35	0,01	0,01	2,48	97,52
37 µm	0,27	0,01	0,01	1,91	98,09
Recipiente de coleta (Fundo)	0,90	0,01	0,02	6,38	93,62
Totais	**14,10 gramas**			**100,00%**	**100,00%**

Fonte: Autor, 2016.

Observa-se na Tabela 12 que a maior quantidade de massa de pó de OLB retida no ensaio ocorreu na primeira peneira com abertura de malha de 88 µm (Mesh 170). Referente à massa média total do pó resultante do peneiramento que se encontrava depositado no fundo coletor é inferior a uma grama, ou seja, equivalente a 6,38% do total da massa média de pó de OLB utilizada nesta análise.

Os valores apresentados na Tabela 12, resultantes da análise granulométrica para o pó de OLB, foram utilizados na elaboração da curva granulométrica. Com base nestas informações, o Gráfico 2 revela a distribuição granulométrica do pó de OLB, possibilitando a determinação da sua característica física.

Gráfico 2 – Curva média resultante da análise granulométrica do pó de OLB.



Fonte: Autor, 2016.

A curva granulométrica visualizada no Gráfico 2 revela as dimensões das partículas do pó de OLB. Baseado na curva disponível no Gráfico 2 verifica-se que as partículas de pó de OLB resultantes possuem dimensões inferiores a 37 µm.

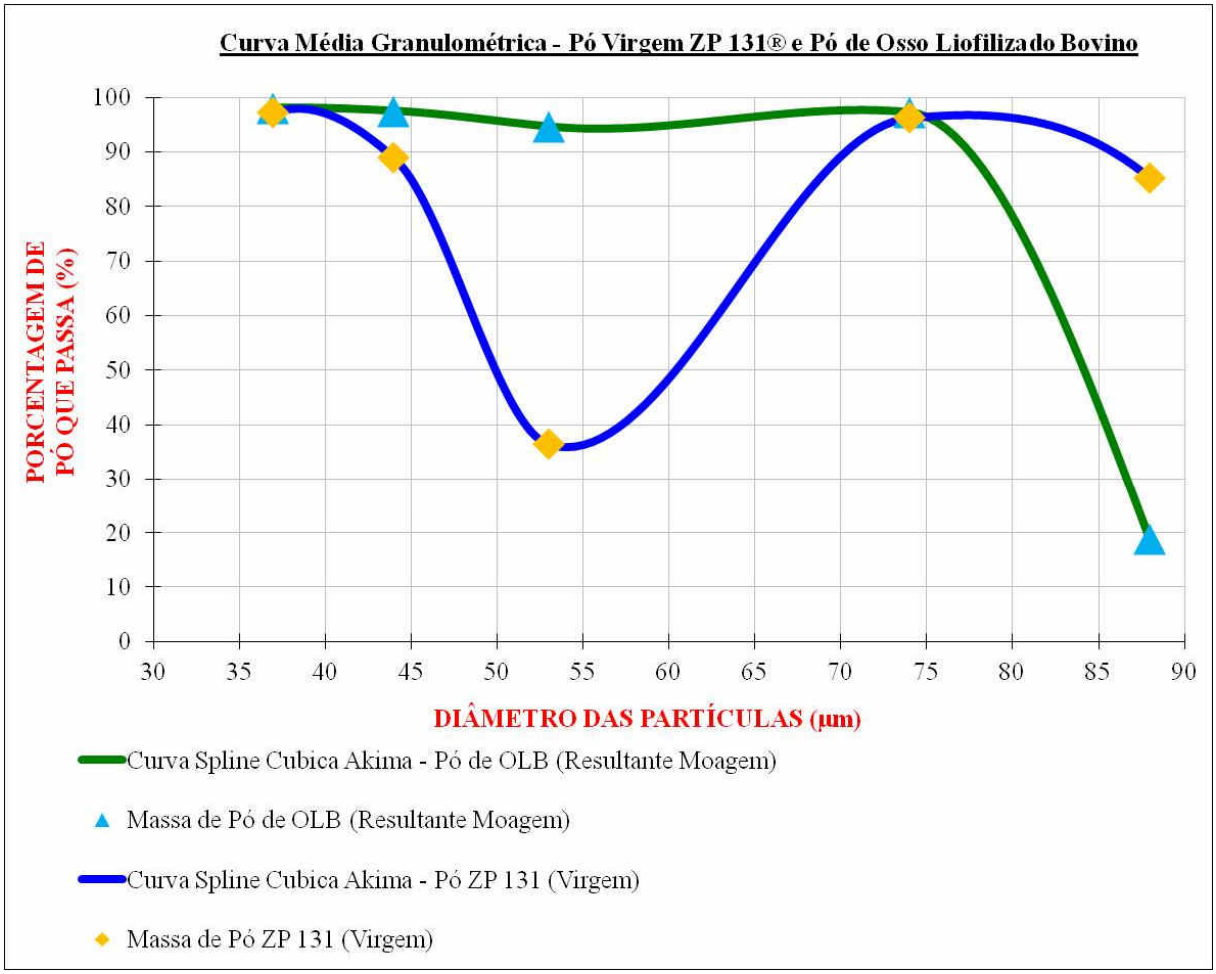
Por fim, a curva granulométrica resultante para o pó de OLB possibilita validar a metodologia desenvolvida e proposta neste estudo para transformação de blocos retangulares de OLB em pó fino.

4.5 Comparativos de Resultados – Pó ZP 131® e Pó de OLB

Baseado nos resultados individuais obtidos para o pó virgem ZP 131® e o pó de OLB, revelados na seção 4.1 e 4.4 deste trabalho, a seguir será apresentada a análise comparativa de características físicas entre estes pós.

A primeira análise comparativa realizada foi a sobreposição entre a curva média granulométrica obtida para o pó virgem ZP 131® e do pó de OLB. Esta análise comparativa permite verificar se a distribuição granulométrica do pó fino de OLB, objeto deste estudo, apresenta características equivalentes que estão presentes no pó virgem ZP 131®. A sobreposição da curva média granulométrica destes pós é visualizada no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Curva média do pó virgem de ZP 131® e o pó de OLB.



Fonte: Autor, 2016.

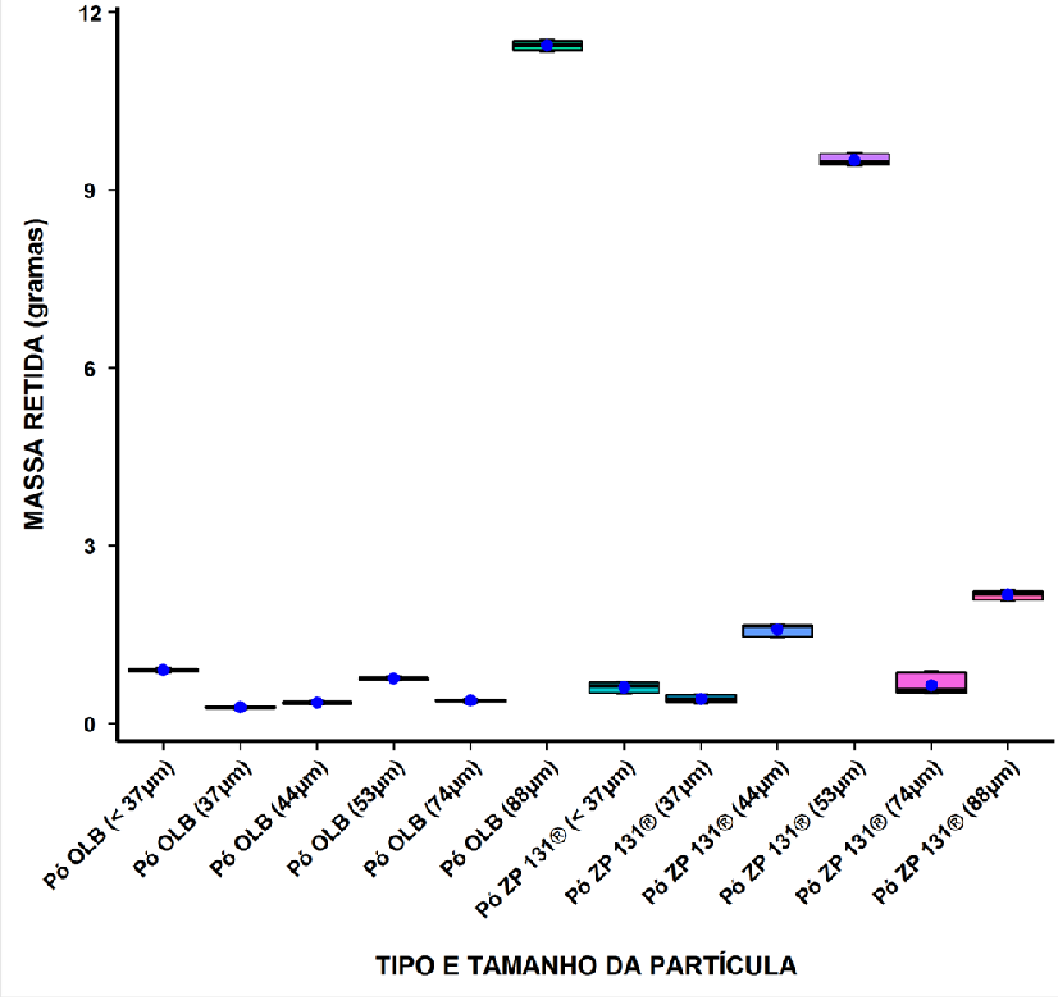
Neste caso, o método de interpolação adotado foi igual para os pós, possibilitando a comparação entre as curvas médias granulométricas. Diante disso, baseado nas curvas ilustradas no Gráfico 3, verificou-se que a tendência de convergência entre estas curvas ocorreu apenas entre os pontos das peneiras, que possuem abertura de malha de 37 µm e 74 µm. Além disso, identificou-se a ocorrência de uma discordância entre os pós no ponto pertencente à peneira, que possui abertura de malha de 53 µm. Neste caso, supõe-se que esta discordância apresentada pelo pó virgem ZP 131® pode ser proposital, indicando uma probabilidade de uso de agregados pelo fabricante deste pó para que esta MP tenha condições de uso em impressoras 3DP. Diante disso, através das análises físico-químicas realizadas nas amostras deste pó, não foi possível evidenciar qual é o elemento químico agregado que supostamente ocasionou a distorção da curva granulométrica deste material. Além disso, verifica-se que a quantidade de pó virgem ZP 131® retida na terceira peneira, malha com abertura de 53 µm, é de 63,59% em relação à massa total peneirada, sendo esta quantidade superior em comparação à quantidade de pó de OLB retida nesta peneira.

Para o pó fino de OLB, constatou-se que a retenção maior da massa de partículas ocorreu na primeira peneira, malha com abertura de 88 µm, correspondendo a 81,13% da massa total peneirada. Pode-se atribuir este fato ao processo de moagem dos fragmentos das partículas britadas de OLB. Neste caso verificou-se que algumas partículas apresentavam dimensões iniciais acima de 160 µm e, portanto, não tiveram sua dimensão reduzida significativamente para que fosse possível que estas partículas atravessassem a malha da primeira peneira, que possui abertura de malha de 88 µm. Entretanto, outra suposição sobre estas partículas não possuírem o tamanho desejado, através do processo de moagem, está relacionada à característica da matéria de OLB. Trata-se de um material anisotrópico que em certas propriedades física serão diferentes conforme as diferentes direções, como exemplo, a atuação de forças do processo de moagem aplicadas aos materiais. Além disso, pode-se supor que a dureza do material utilizado para o cilindro de moagem tenha contribuído para que estas partículas não fossem reduzidas ao tamanho da partícula de pó desejada.

A análise estatística utilizou os valores de massa do pó fino de OLB e do pó virgem ZP 131®, além do tamanho de abertura de malha das peneiras usadas. O tipo de gráfico adotado na análise empírica destes dados foi o Box-plot. Através do software estatístico Action Stat 3.1 foi possível inserir os dados e selecionar o gráfico diagrama de caixa. A mediana e os

valores extremos das amostras analisadas são indicadas através da análise estatística ilustrada no Gráfico 4.

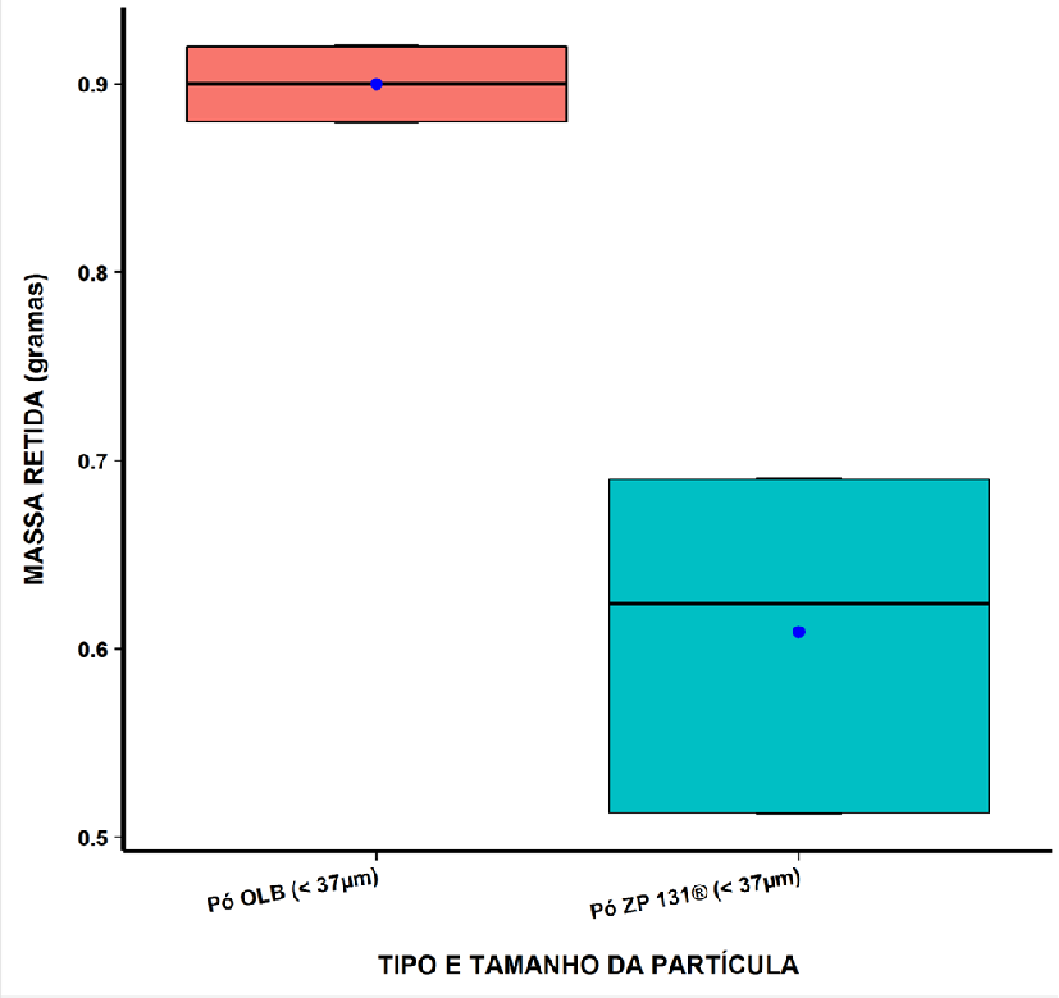
Gráfico 4 – Box-plot da massa de pó virgem ZP 131® e o pó de OLB e peneiras.



Fonte: Autor, 2016.

Outra análise estatística realizada utilizou somente os valores da massa das partículas de cada pó que apresentaram dimensões inferiores a 37 µm. Neste caso, optou-se em avaliar estatisticamente se o pó de OLB apresentou granulometria equivalente em relação ao pó virgem ZP 131®. O resultado desta análise estatística pode ser visualizado no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Box-plot da massa de pó virgem de ZP 131® e o pó de OLB e peneira 400 mesh.



Fonte: Autor, 2016.

Através da análise de dados estatísticos para fins de validação de características físicas do pó de OLB em relação ao pó ZP 131®, no resultado apresentado no Gráfico 5 não foram encontrados valores discrepantes em relação aos pontos fora dos limites de cada pó analisado. Ainda, verificou-se que a mediana do pó de OLB está equidistante dos extremos, sendo considerado estatisticamente simétrico. Em relação à mediana do pó ZP 131® verificou-se que este não está equidistante dos extremos sendo considerado estatisticamente assimétrico.

Entretanto, através do Gráfico 5 observa-se a discrepância entre os valores resultantes de massa para cada grupo de pó analisado. Ainda, verificou-se que o pó de OLB apresenta estatisticamente menor dispersão em relação ao pó virgem ZP 131®. Isto pode indicar que o pó de OLB apresenta uma distribuição mais uniforme das dimensões de suas partículas

quando comparadas aos do pó virgem ZP 131®, sendo esta característica desejável em uma MP atípica destinada ao uso em impressoras 3DP.

Por fim, sem a realização de testes de impressão utilizando o pó de OLB como MP no equipamento 3DP não é possível confirmar se a curva granulométrica resultante é apropriada ou inadequada, ou seja, se o pó de OLB é apto ou necessita da adição de agregados em sua formulação. Neste caso somente a impressão irá esclarecer. Além disso, a eficiência dos equipamentos construídos e utilizados no procedimento experimental deste estudo não foi avaliada, permitindo futuramente ser testadas alternativas visando à eficiência de moagem.

5. CONCLUSÕES

Com o auxílio de equipamentos construídos e adaptados para este estudo foram processados blocos retangulares de OLB, transformando-os em pó, estabelecendo assim uma metodologia para fins de obtenção das características granulométricas desejadas e semelhantes com o pó comumente utilizados como MP em impressoras 3DP.

A variação dimensional verificada nos blocos de OLB não interfere no processo de cominuição destes, em especifico o processo de britagem. Isto ocorre devido esta variação ser contemplada na etapa de desenvolvimento do projeto deste equipamento.

Dentre os métodos de interpolação disponíveis para elaboração de curvas granulométricas, verificou-se que o Spline Akima é o método de interpolação que apresentou melhor resultado na elaboração da curva granulométrica do pó ZP 131® e para o pó de OLB.

Comprovou-se através de curvas médias granulométricas que as características físicas do pó de OLB e do pó ZP 131® apresentam granulometrias semelhantes, sendo essa característica o requisito principal para que o pó obtido neste estudo seja utilizado como MP atípica no equipamento 3DP, modelo Z310 Plus e marca ZCorporation.

Os equipamentos construídos foram adaptados para uso na transformação de blocos retangulares de OLB em pó. Além disso, foi avaliada estatisticamente a compatibilidade entre o pó fino de OLB e o pó ZP 131®.

O pó fino de OLB atende o requisito mínimo de resolução do equipamento 3DP, em especifico, na deposição de pó no leito de impressão. Portanto, comprovou-se que o pó de OLB atingiu parâmetros adequados para uso em aplicações tecnológicas.

Em relação à proposição inicial deste estudo pode-se afirmar que é possível que blocos retangulares de OLB sejam transformados e reduzidos a pó, além de apresentar uma distribuição das dimensões de suas partículas mais uniforme quando comparadas ao pó ZP 131® produzido pelo fabricante do equipamento 3DP.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerimos como continuação do projeto de pesquisa:

a) Testes do pó de OLB: Realizar experimentos de bancada para verificação de biocompatibilidade do liquido aglutinante usado em equipamentos 3DP ou se este necessita da introdução de agregados. Idem para o líquido infiltrante.

b) Testes de impressão 3DP: Utilizar o pó de OLB na impressão de modelos físicos para verificar se este pó é apto ou necessita da introdução de agregados.

c) Impressão 3DP: Utilizar o pó de OLB na impressão de corpos de prova cilíndricos para verificação de propriedades mecânicas e comparação com o estudo de Macedo et al. (1999) e Galia et al. (2009). Neste estudo além da porosidade e desvio dimensional de modelos físicos impresso poderá ser verificado a presença de contaminante provocado pela impressora.

d) Imagens de tomografia: Utilizar imagens de falhas ósseas oriundas de tomografias para modelagem CAD e posterior impressão de enxerto utilizando pó de OLB, permitindo o estudo deste com alternativa no tratamento de falhas ósseas onde se deseja remodelação óssea.

e) Cilindro moedor e esferas: Alterar material do cilindro de PVC para material cerâmico, idem para esferas a fim de verificar a eficiência da moagem. Poderá ser testado um cilindro cônico.

f) Triturador com engrenagens helicoidais: Para processamento de volumes significativos de blocos retangulares de OLB, utilizar motor elétrico e controles para automação do equipamento, eliminando a necessidade de força gerada manualmente;

g) Avaliar modificações do sistema de moagem para evitar contaminantes.

h) Unir os sistemas de britagem e moagem para processamento em série.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA FILHO, Edson de et al. Biomateriais: deposição de hidroxiapatita sobre superfície de Ti-cp modificada por aspersão térmica. **Química Nova**, p. 1129-1232, 2007.

ANTAS, Ana Filipa; LINO, F. Jorge; NETO, Rui. Utilização das tecnologias de prototipagem rápida na área médica. In: **Proceedings of the**. 2008.

BAUER, T.C.; MUSCHLER, G.F. Bonegrafts Materials In. **Clinical Orthopedics and Related Research** 2000;21:10-27.

BENKE, D.; OLAH, A.; MÖHLER, H. Protein-chemical analysis of Bio-Oss bone substitute and evidence on its carbonate content. **Biomaterials**, v. 22, n. 9, p. 1005-1012, 2001.

BERNHARDT, Franziska et al. Solvent-free and time-efficient Suzuki–Miyaura reaction in a ball mill: the solid reagent system KF–Al2O3 under inspection. **Beilstein journal of organic chemistry**, v. 6, n. 1, p. 7, 2010.

BERTOL, Liciane Sabadin. **Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção de materiais no design de implantes personalizados**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

BIONNOVATION IMPLANTES E BIOMATERIAIS. Artigos. **Aumento do rebordo alveolar por matriz óssea indutora**. Disponível em: <http://www.bionnovation.com.br /aumentodorebordo.html>. Acesso em Mar.: 2015.

BOA IMPRESSÃO 3D. **Impressora 3D Stella**. Figura 7. Disponível em: <http://boaimpressao3d.com.br/shop/impressora3d/impressora-3d-stella/>. Acesso em: Ago. 2015.

BYUN, Hong-Seok; LEE, Kwan H. Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 22, n. 1, p. 69-80, 2006.

CANCIAN, D. C. et al. Use of BioGran and Calcitite in bone defects: histologic study in monkeys (Cebus apella). **Int J Oral Maxillofac Implants**, v. 14, n. 6, p. 859-64, 1999.

CARVALHO, Mariana Xavier Sans de. **Equipamentos de Fragmentação: Uma Revisão Avaliando Circuitos Alternativos para a Moagem de Finos**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

CHEN, Y. Carbon Nanotechnology: Recent Developments in chemistry, physics, materials sciences and device applications; Dai, L., ed.; **Elsevier Science: Amsterdam**, 2006, cap 3.

CHEUNG, Catherine. The future of bone healing. **Clinics in podiatric medicine and surgery**, v. 22, n. 4, p. 631-641, 2005.

COOPER, Macrina. **How 3D Printing Could End The Deadly Shortage Of Donor Organs**. Jan. 2015. Artigo. Disponível em: <http://www.huffingtonpost.com/2015/03/01/3d-printed-organs-regenerative-medicine_n_6698606.html>. Acesso em: Jul 2016.

COSMOS CLINICA ODONTOLOGICA. **Enxerto Ósseo Cosmos Clínica Odontológica Uberlandia.** Figura 11. Out. 2012. Disponível em: <http://cosmosclinica.com.br/blog/sem-categoria/exerto-osseo-uberlandia/>. Acesso em: Ago. 2015.

CUNICO, Marlon Wesley Machado. **Impressoras 3D: O novo Meio Produtivo**. Concep3d Pesquisas Científicas, 2015.

DAVIES, John E. Understanding peri-implant endosseous healing. **Journal of dental education**, v. 67, n. 8, p. 932-949, 2003.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário da língua portuguesa**. 5. ed. Curitiba: Positivo, 2010. 2222 p. / 86 p. 1v. il. ISBN 978-85-240-4074-0. 11.513.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. Cominuição. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minérios**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2004. Capítulo 4, páginas 113-194.

GALIA, Carlos Roberto et al. Uso de enxerto ósseo homólogo e heterólogo em diáfise femoral de ratos: comparação entre enxerto ósseo congelado e liofilizado. **Revista brasileira de ortopedia**. São Paulo. Vol. 40, n. 3 (mar. 2005), p. 141-146, 2005.

GALIA, Carlos Roberto et al. In vitro and in vivo evaluation of lyophilized bovine bone biocompatibility. **Clinics**, v. 63, n. 6, p. 801-806, 2008.

GALIA, Carlos Roberto et al. Caracterização físico-química de ossos liofilizados de origem bovina e humana. **Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões**. Rio de Janeiro. Vol. 36, n. 2 (2009), p. 157-160, 2009.

GALIA, Carlos Roberto et al. Caracterização físico-química do enxerto de osso bovino liofilizado. **Revista brasileira de ortopedia**. Rio de Janeiro. Vol. 46, n. 4 (2011), p. 444-451, 2011.

GRIMM, T. **Choosing the Right RP System: A study of seven RP systems**, 2005.

IPAR, Carlos Edmundo de A. L. **Desenvolvimento de matéria-prima para impressão tridimensional a partir de rejeitos gemológicos de ágata.** Dissertação. Porto Alegre, 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KHALYFA, Alaadien et al. Development of a new calcium phosphate powder-binder system for the 3D printing of patient specific implants. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 18, n. 5, p. 909-916, 2007.

LEUKERS, Barbara et al. Hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering made by 3D printing. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 16, n. 12, p. 1121-1124, 2005.

MACEDO, Carlos Alberto de Souza et al. Comparação da resistência à compressão do osso bovino congelado e liofilizado. **Rev. bras. ortop**, v. 34, n. 9/10, p. 529-534, 1999.

MAGINI, Ricardo de Souza; COURA, Gustavo dos Santos. **Enxerto ósseo no seio maxilar: estética e função**. São Paulo: Livraria Santos Editora, 2006.

MOZELLA, A. P. et al. Análise epidemiológica da obtenção, processamento e utilização de enxertos homólogos pelo banco de tecidos. **R Into**, v. 3, n. 1, p. 34-40, 2005.

NASCIMENTO, Thiago. **A importância dos protótipos no desenvolvimento de sistemas**. Nov. 2013. Artigo. Disponível em: <http://thiagonasc.com/desenvolvimento-web/a-importancia-dos-prototipos-no-desenvolvimento-de-sistemas>. Acesso em: Set. 2015.

NOS, Gustavo. **Projeto de Produtos: Moinho de Bolas de Baixo Custo**. Monografia. Lajeado (RS). Univates; 2011.

OLIVEIRA, Rodrigo Cardoso de et al. Efeito da temperatura de desproteinização no preparo de osso cortical bovino microgranular: avaliação microscópica e bioquímica da resposta celular em subcutâneo de ratos. **Rev. Fac. Odontol**. Bauru, v. 7, n. 3/4, p. 85-93, 1999.

OLIVEIRA, Marcelo F. et al. Construção de Scaffolds para engenharia tecidual utilizando prototipagem rápida. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, p. 373-382, 2007.

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, Frederico Fernandes de; GONÇALVES, Rogério Sales. Projeto conceitual de um robô para pintura predial. Part II - National Congress Section III – Robótica, Atuadores e Sensores. **ABCM Symposium Series in Mechatronics** - Vol. 6, 2014.

OLIVEIRA, Thálisson de. **Uma breve visão sobre Boxplot**. Nov. 2011. Artigo. Disponível em: <http://blog.thalissonoliveira.com.br/?p=532>. Acesso em: Ago. 2016.

OPEN 3DP. **Bone Yard - 3DP in Bone.** Mar. 2011. Artigo. Disponível em: <http://depts.washington.edu/open3dp/>. Acesso em: Mar. 2015.

ORSI, Victor Vieira et al. Osso liofilizado bovino não-desmineralizado com células-tronco mesenquimais para engenharia tecidual: estudo experimental em sítio heterotópico. **Rev Bras Cir Craniomaxilofac**, v. 10, n. 4, p. 133-9, 2007.

ORTHOGEN. **Orthogen®**. Catálogo Características Comerciais. Disponível em: <http://www.odontomedicalrs.com.br/folder _orthogen.pdf>. Acesso em: Set. 2015.

PAULA, Lucas F. de et al. Diretrizes para a construção de um moinho de bolas para a moagem de sólidos em laboratórios. **Quim. Nova**, v. 37, n. 4, p. 736-739, 2014.

PELTONIEMI, Hilkka et al. The use of bioabsorbable osteofixation devices in craniomaxillofacial surgery. **Oral Surgery**, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, v. 94, n. 1, p. 5-14, 2002.

PEREIRA, S. P. **Estudo comparativo dos processos de prototipagem rápida via estereolitografia e deposição de material fundido com prototipagem convencional no desenvolvimento de produtos plásticos**. 66p. Trabalho de conclusão de curso (Tecnólogo em Processos de Produção) Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, Centro Paula Souza – FATEC, São Paulo, 2006.

PORTAL ACTION. **Manual action**. Disponível em <http://www.portalaction.com.br /manual-action>. Acesso em: Ago. 2016.

RICHARDSON, C. R. et al. Clinical evaluation of Bio-Oss®: a bovine-derived xenograft for the treatment of periodontal osseous defects in humans. **Journal of clinical periodontology**, v. 26, n. 7, p. 421-428, 1999.

RODRIGUEZ, Belen; BRUCKMANN, Angelika; BOLM, Carsten. A highly efficient asymmetric organocatalytic aldol reaction in a ball mill. **Chemistry–A European Journal**, v. 13, n. 17, p. 4710-4722, 2007.

ROMEIRO FILHO, Eduardo; FERREIRA, Cristiano Vasconcellos. **Projeto do produto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 376 p.

RUSSON, Mary Ann. **Airbus Files Revolutionary Patent For 3D Printing an Aircraft's Exterior in Its Entirety. International Bussiness Times**. Mai. 2016. Artigo. Disponível em: <http://www.ibtimes.co.uk/airbus-files-revolutionary-patent-3d-printing-aircrafts-exterior -its-entirety-1562187?scid=brand_20160527_62075986&adbid=101541983 80109770&adbpl =fb&adbpr=12707004769>. Acesso em: Ago. 2016.

SALMORIA, Gean V. et al. Prototipagem rápida por impressão 3D com resinas fotocuráveis: uma análise sobre as tecnologias disponíveis no mercado nacional. **Anais do 9o Congresso Brasileiro de Polímeros**, v. 9, p. 360-367, 2007.

SANADA, Jefferson Tomio et al. Análise histológica, radiográfica e do perfil de imunoglobulinas após implantação de enxerto de osso esponjoso bovino desmineralizado em bloco em músculo de ratos. **J. appl. oral sci**, v. 11, n. 3, p. 209-215, 2003.

SIELSKI, Cristian et al. **Impressão 3D – Prototipagem**. Relatório [Graduação]. Set. 2010. Disponível em: < http://www.ebah.com.br/content/ABAAABI-QAG/relatorio-final-prototipagem>. Acesso em: Jun. 2015.

SONI, P. R. Mechanical alloying: fundamentals and applications. **Cambridge Int Science Publishing**, 2000.

SOUZA, E.; TOFANO, G.; ALVES, M.A.; KNUPP, V. **Biomateriais.** Vitoria: Associação Brasileira de Odontologia; 2001.

SOUZA, Mauren Abreu de; CENTENO, Tania Mezzadri; PEDRINI, Hélio. Integrando reconstrução 3D de imagens tomográficas e prototipagem rápida para fabricação de modelos médicos. **Rev. bras. eng. biomed**, v. 19, n. 2, p. 103-115, 2003.

STEINER, BARBARA. SSBrasil. **A Controversa Impressão 3D.** Mai. 2013. Figura 4. Disponível em: <http://www.ssbrasil.com.br/blog/a-controversa-impressao-3d/>. Acesso em: Jun. 2015.

STRATASYS. **O que é prototipagem rápida**. Catálogo. Disponível em: <http://www.stratasys.com/br/resources/rapid-prototyping>. Acesso em: Mar. 2015.

SU-GWAN, Kim; HAK-KYUN, Kim; SUNG-CHUL, Lim. Combined implantation of particulate dentine, plaster of Paris, and a bone xenograft (Bio-Oss®) for bone regeneration in rats. **Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery**, v. 29, n. 5, p. 282-288, 2001.

SUGIHARA, S. et al. Histopathology of retrieved allografts of the femoral head. **Bone & Joint Journal**, v. 81, n. 2, p. 336-341, 1999.

TEIXEIRA, Ana Beatriz Melo. **Tudo sobre impressões 3D**. 2015. Livro Eletrônico. Disponível em: <http://labs.mil.up.pt/blogs/impressaom3d/wp-content/uploads/sites/8/2015/12/ebook.pdf>. Acesso em: Mai. 2016.

TULLBERG, Erik; PETERS, Dan; FREJD, Torbjörn. The Heck reaction under ball-milling conditions. **Journal of organometallic chemistry**, v. 689, n. 23, p. 3778-3781, 2004.

TUMBLESTON, John R. et al. Continuous liquid interface production of 3D objects. **Science**, v. 347, n. 6228, p. 1349-1352, 2015.

UNI. **Major RP Technologies.** Figura 3 Disponível em: <http://www.uni.edu/~rao/rt/major_tech.htm>. Acesso em: Set. 2015.

UTELA, Ben et al. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP). **Journal of Manufacturing Processes**, v. 10, n. 2, p. 96-104, 2008.

UTELA, Ben R. et al. Development process for custom three-dimensional printing (3DP) material systems. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 132, n. 1, p. 011008, 2010.

VARELA, J.J. Critérios de seleção de britadores aplicados ao processamento mineral, **Anais XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e metalurgia Extrativa**, Salvador-BA-Brasil, 8 p., 2011.

VOLPATO, Neri (Ed.). **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. Edgard Clucher, 2007.

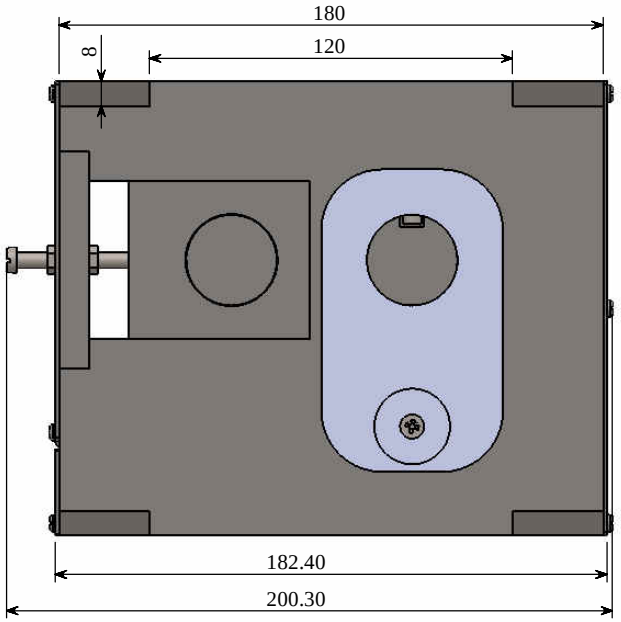
VON ARX, Thomas et al. Lateral ridge augmentation using different bone fillers and barrier membrane application. **Clinical oral implants research**, v. 12, n. 3, p. 260-269, 2001.

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

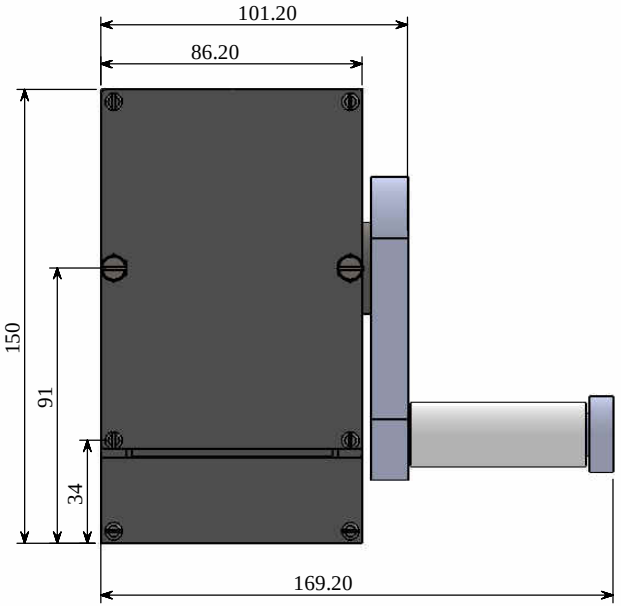
ZAZZLE. **Diagrama de Seção Transversal de um Osso Humano GE Poster**. Figura 10. Disponível em: < http://www.zazzle.com.br/diagrama_de_secao_transversal_de_um_osso_humano_ge _poster- 228363436352561953>. Acesso em: Out. 2015.

APÊNDICE A – Desenho Técnico do Equipamento Engrenagens Helicoidais

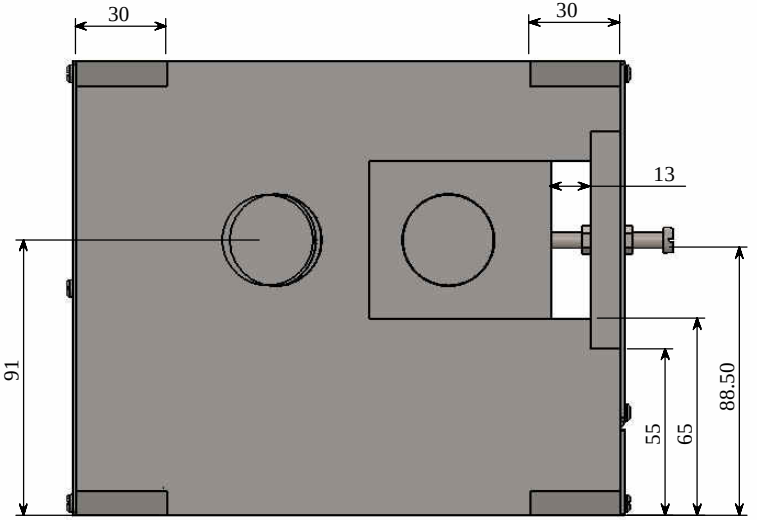
TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. REPRODUÇÃO ADMITIDA, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO PRÉVIA E REFERÊNCIA À FONTE DE INFORMAÇÃO.



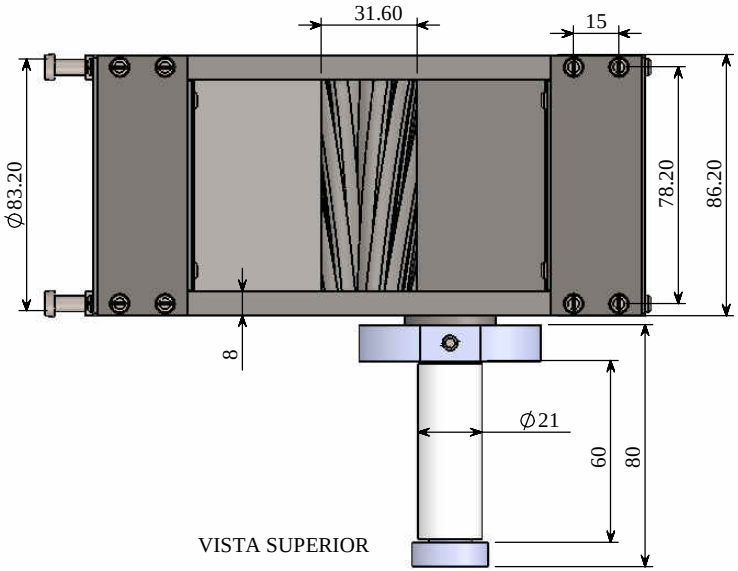
VISTA FRONTAL



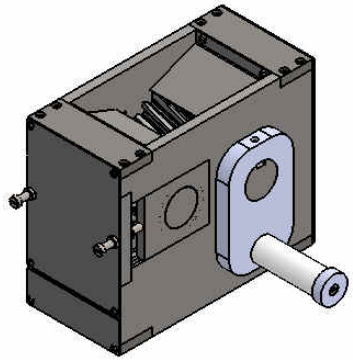
VISTA LATERAL ESQUERDA



VISTA POSTERIOR



VISTA SUPERIOR



PERSPECTIVA

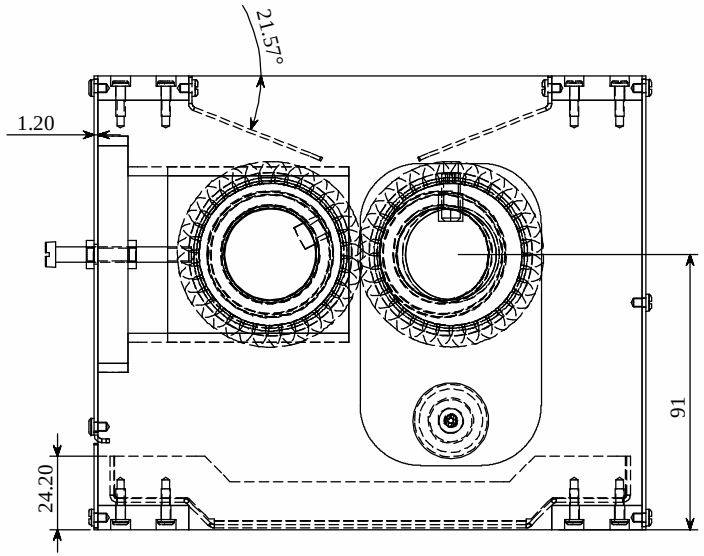
UPF

Universidade de Passo Fundo

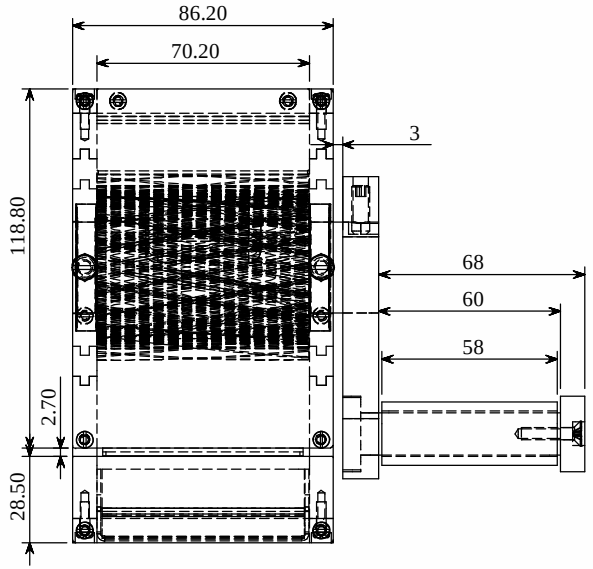
Mestrado Profissional em Projeto e Processos de Fabricação

Descrição: Triturador Engrenagens Helicoidais - Vistas Visíveis Sombreadas			Escala: 1:2,5
Desenho: Giovani Fávero	Data: 10/04/2016	Folha: 01/03	Projeção:

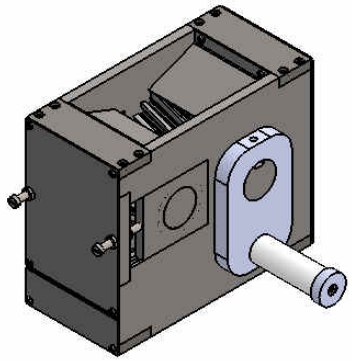
TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. REPRODUÇÃO ADMITIDA, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO PRÉVIA E REFERÊNCIA À FONTE DE INFORMAÇÃO.



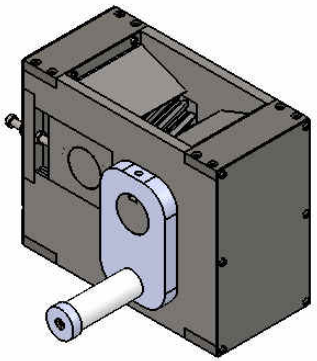
VISTA FRONTAL

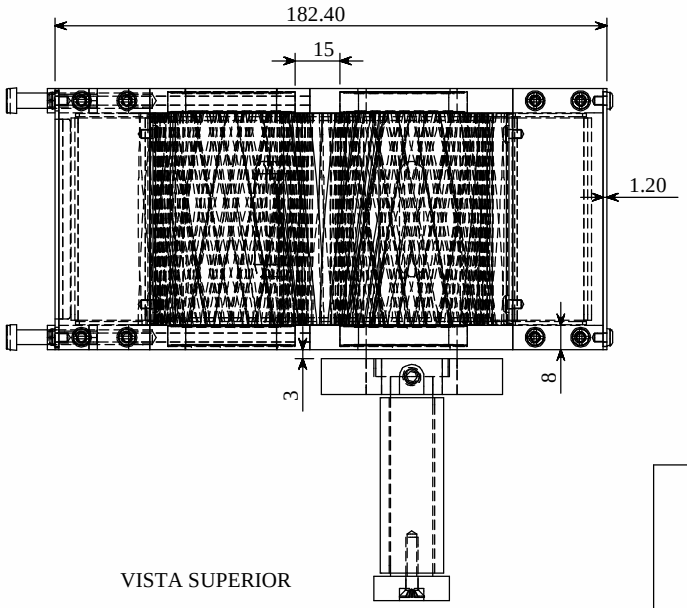


VISTA LATERAL ESQUERDA



PERSPECTIVAS

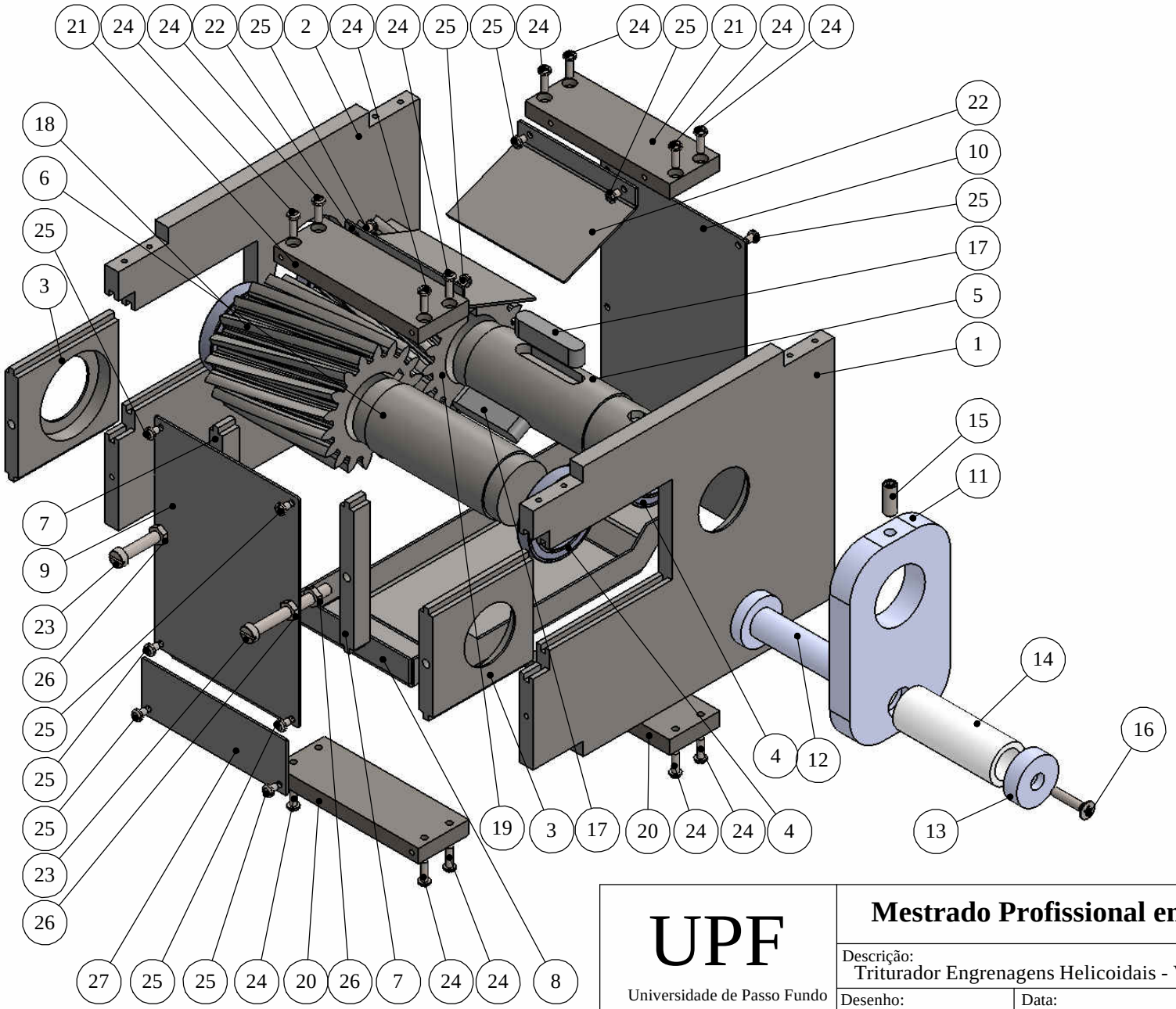




VISTA SUPERIOR

UPF Universidade de Passo Fundo	**Mestrado Profissional em Projeto e Processos de Fabricação**			
	Descrição: Triturador Engrenagens Helicoidais - Vistas Ocultas e Perspectivas			Escala: 1:2,5
	Desenho: Giovani Fávero	Data: 10/04/2016	Folha: 02/03	Projeção:

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. REPRODUÇÃO ADMITIDA, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO PRÉVIA E REFERÊNCIA À FONTE DE INFORMAÇÃO.



Nº Item	Descrição	Qtde
1	Lateral Direita Longitudinal Estrutura	1
2	Lateral Esquerda Longitudinal Estrutura	1
3	Mancal Regulavel Rolamento	2
4	Rolamento 6806	4
5	Eixo Motor	1
6	Eixo Movido	1
7	Guia Fuso de Regulagem	2
8	Bandeja Coletora	1
9	Protecao Lateral Direita	1
10	Protecao Lateral Esquerda	1
11	Haste	1
12	Manopla	1
13	Tampa Manopla	1
14	Tubo Manopla	1
15	Parafuso Sem Cabeça Sextavado Interno Ponta Plana M6x16	1
16	Parafuso Cabeça Chata Philips M4x20	1
17	Chaveta	2
18	Engrenagem Helicoidal Direita	1
19	Engrenagem Helicoidal Esquerda	1
20	Guia Transversal Inferior Estrutura	2
21	Guia Transversal Superior Estrutura	2
22	Rampa Interna	2
23	Parafuso Cabeça Fendida M5x45	2
24	Parafuso Cabeça Fendida M3x10	16
25	Parafuso Cabeça Fendida M3x4	16
26	Porca M5	4
27	Protecao Inferior Lateral Direita	1

UPF

Universidade de Passo Fundo

Mestrado Profissional em Projeto e Processos de Fabricação

Descrição: Triturador Engrenagens Helicoidais - Vista Explodida

Escala: 1:2,5

Desenho: Giovani Fávero

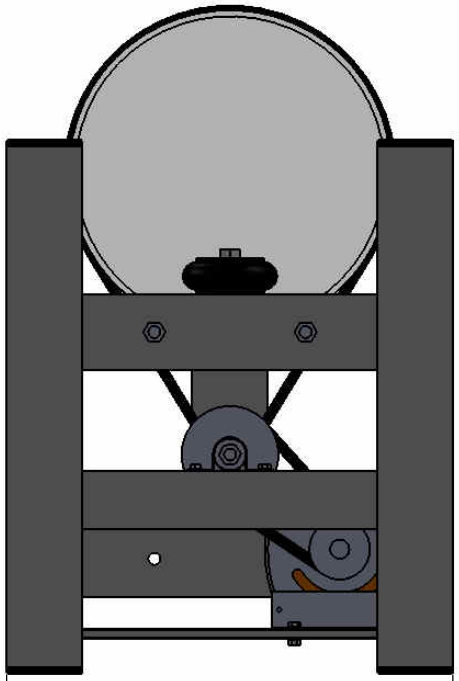
Data: 10/04/2016

Folha: 03/03

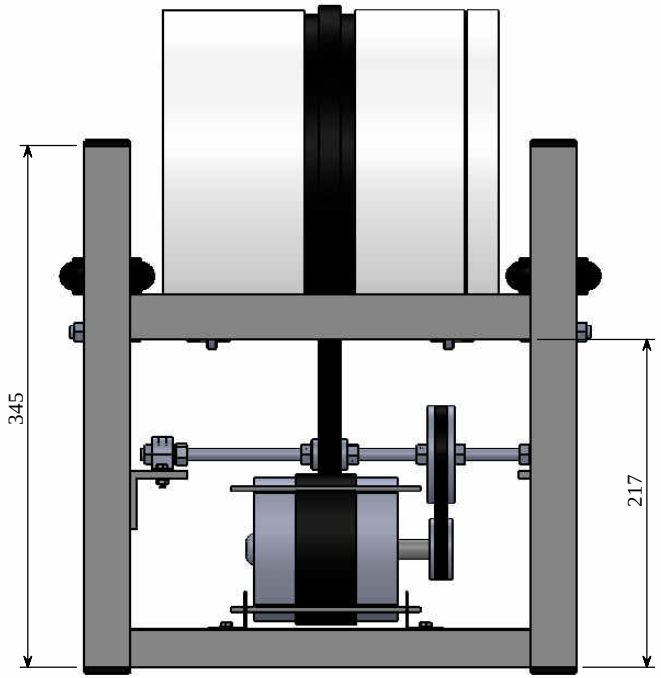
Projeção:

APÊNDICE B – Desenho Técnico do Equipamento Moinho de Bolas

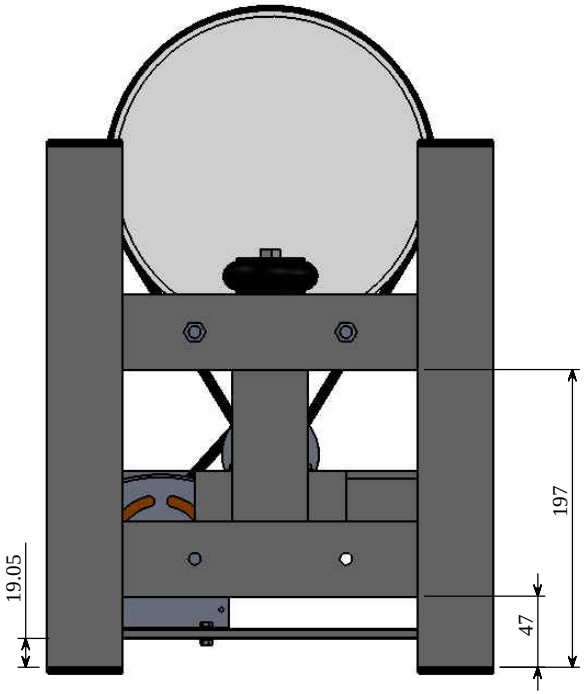
TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. REPRODUÇÃO ADMITIDA, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO PRÉVIA E REFERÊNCIA À FONTE DE INFORMAÇÃO.



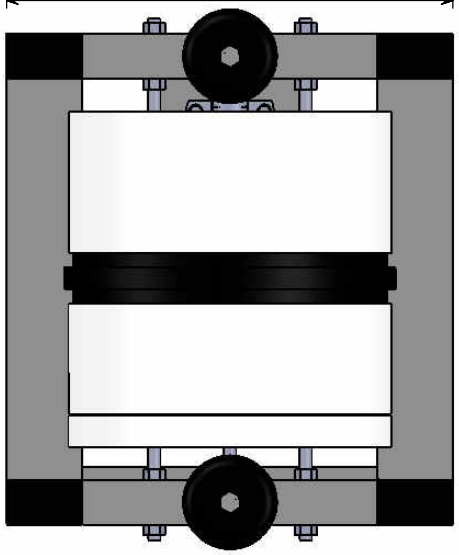
VISTA LATERAL DIREITA



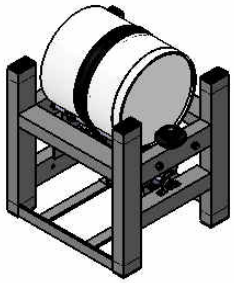
VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL ESQUERDA



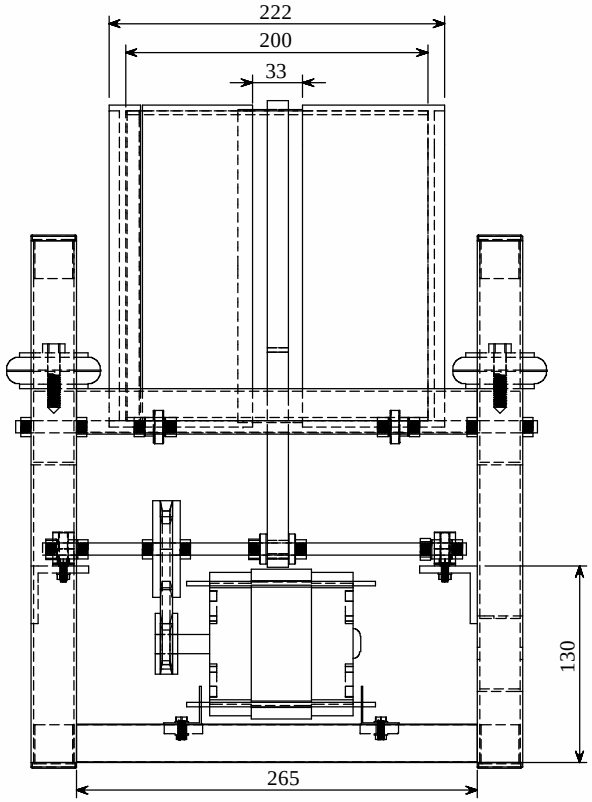
VISTA SUPERIOR



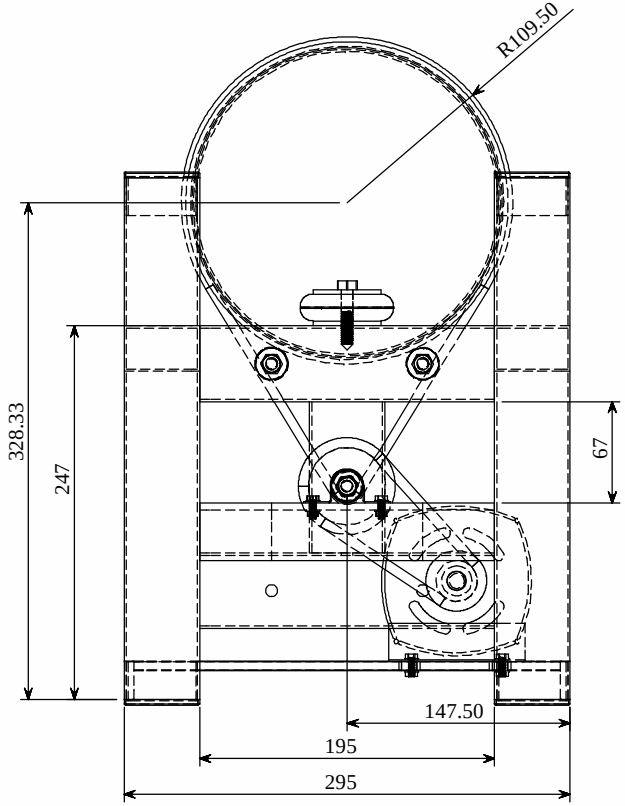
PERSPECTIVA

UPF Universidade de Passo Fundo	**Mestrado Profissional em Projeto e Processos de Fabricação**			
	Descrição: Moinho de Bolas Adaptado - Vistas Visiveis Sombreadas			Escala: 1:5
	Desenho: Giovani Fávero	Data: 29/07/2016	Folha: 01/10	Projeção:

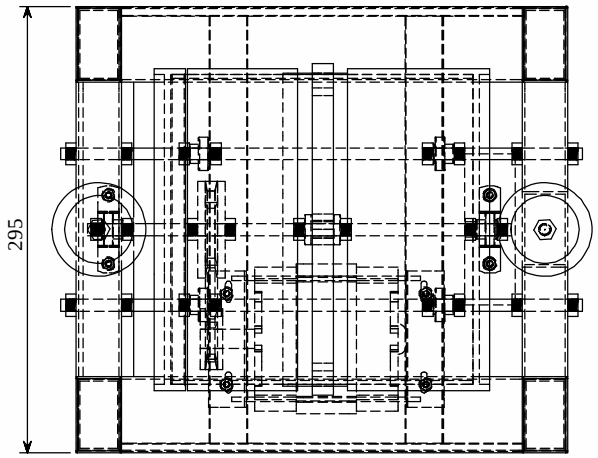
TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. REPRODUÇÃO ADMITIDA, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO PRÉVIA E REFERÊNCIA À FONTE DE INFORMAÇÃO.



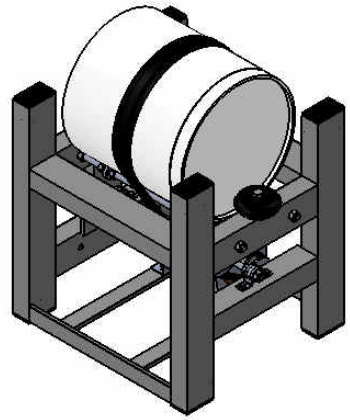
VISTA FRONTAL



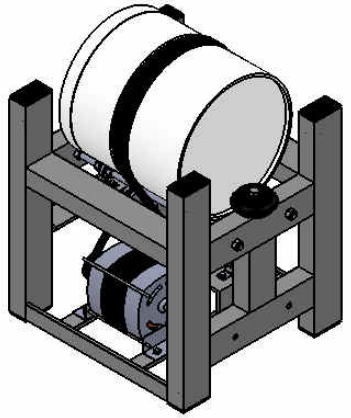
VISTA LATERAL ESQUERDA



VISTA SUPERIOR



PERSPECTIVAS



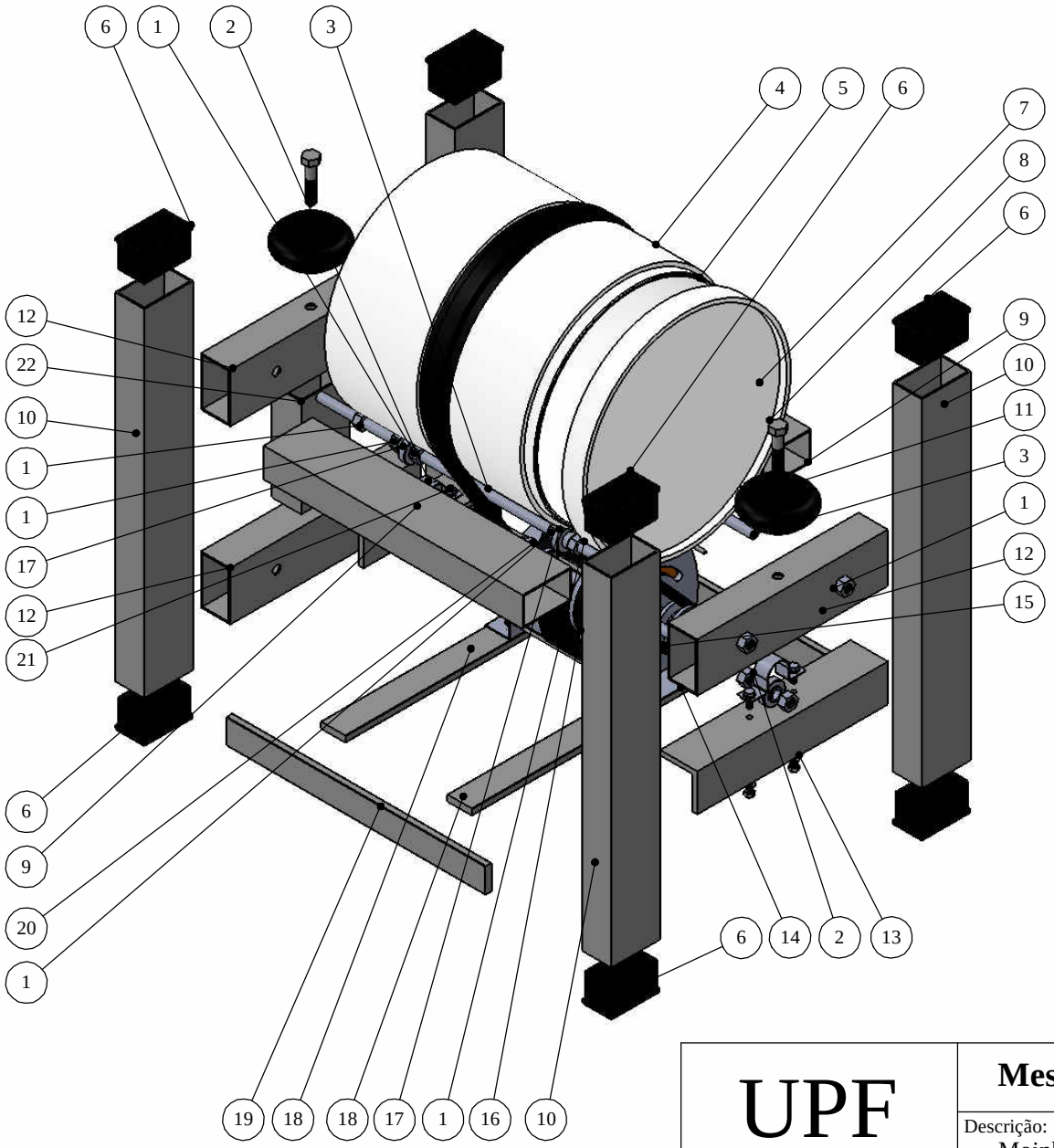
UPF

Universidade de Passo Fundo

Mestrado Profissional em Projeto e Processos de Fabricação

Descrição: Moinho de Bolas Adaptado - Vistas Ocultas e Perspectivas			Escala: 1:5
Desenho: Giovani Fávero	Data: 29/07/2016	Folha: 02/10	Projeção:

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. REPRODUÇÃO ADMITIDA, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO PRÉVIA E REFERÊNCIA À FONTE DE INFORMAÇÃO.



Nº Item	Descrição	Qtde
1	Porca Sextavada 5.16	24
2	Abracadeira Tipo U 1.2	2
3	Eixo Rolamento Cilidro Moinho - Barra Roscada 5.16x350mm	2
4	Camisa Fixa Cilindro Moinho - Cap 200mm Cortado	1
5	Cilindro Moinho - Tubo PVC 200mm	1
6	Tampa Plastica Retangular - 50x30mm	8
7	Tampa Removivel Cilindro Moinho - Cap 200mm Cortado	1
8	Parafuso Sextavado Rosca Soberba 5.16x35	2
9	Tubo Retangular 50x30 L265mm	2
10	Tubo Retangular 50x30 L345mm	4
11	Rodizio Guia	2
12	Tubo Retangular 50x30 L195mm	3
13	Cantoneira Abas Iguais - 1+1.2x3.16 L195mm	1
14	Cantoneira Abas Iguais Suporte Motor Eletrico	2
15	Polia Correia V D40mm	1
16	Correia V	1
17	Rolamento 608Z	6
18	Ferro Chato 1x1.4 L288.5mm	2
19	Ferro Chato 1x1.4 L265mm	2
20	Polia Correia Plana	1
21	Parafuso Sextavado M4x15mm	8
22	Tubo Retangular 50x30 L100mm	1
23	Camisa de Borracha - Cilindro Moinho	1
24	Arruela M4	16
25	Correia Plana	1
26	Polia Correia V D64mm	1
27	Porca Sextavada M4	8
28	Motor Eletrico 1.4 CV	1
29	Cantoneira Abas Iguais - 1+1.2x3.16 L100mm	1
30	Tampa Fixa Cilindro Moinho - Cap 200mm	1
31	Eixo Polias - Barra Roscada 5.16x300mm	1

UPF

Universidade de Passo Fundo

Mestrado Profissional em Projeto e Processos de Fabricação

Descrição: Moinho de Bolas Adaptado - Vista Explodida

Escala: 1:5

Desenho: Giovani Fávero

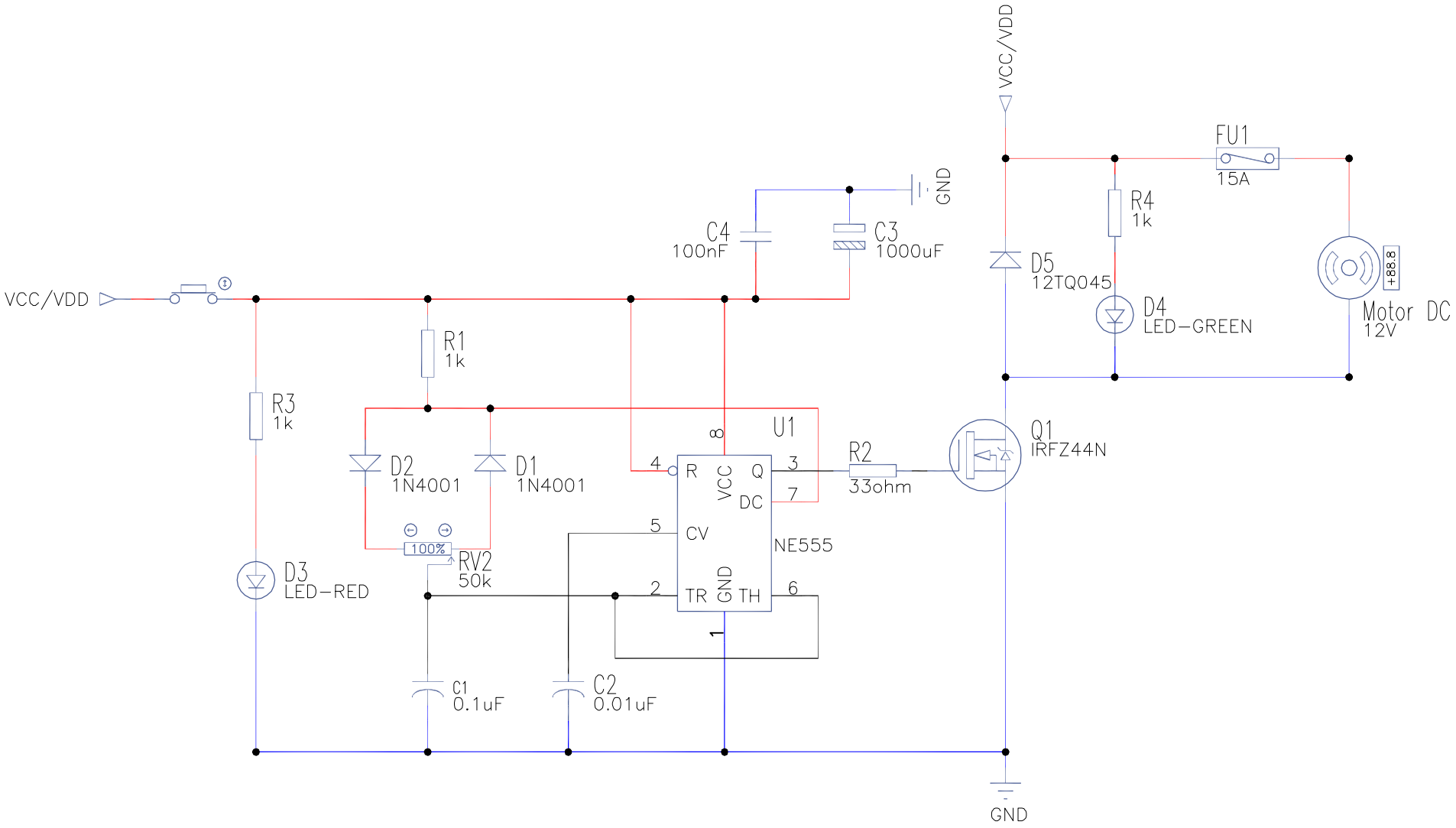
Data: 29/07/2016

Folha: 03/10

Projeção:

APÊNDICE C – Circuito Eletrônico PWM para Controle de Motor DC

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. REPRODUÇÃO ADMITIDA, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO PRÉVIA E REFERÊNCIA À FONTE DE INFORMAÇÃO.



UPF Universidade de Passo Fundo	Mestrado Profissional em Projeto e Processos de Fabricação			
	Descrição: Circuito Eletrônico PWM p/ Controle de Motor DC 12V			Escala: S/ Escala
	Desenho: Giovani Fávero	Data: 08/10/2015	Folha: 01/01	Projeção: