UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

MARCOS PAULO GONÇALVES PEDROSO

PROJETO DE MÁQUINA DE USINAGEM DE ESFERAS CERÂMICAS VERDES

São Carlos
2015

MARCOS PAULO GONÇALVES PEDROSO

PROJETO DE MÁQUINA DE USINAGEM DE ESFERAS CERÂMICAS VERDES

Proposta de dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan.

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE DISPONÍVEL JUNTO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA DA EESC-USP.

São Carlos

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Gonçalves Pedroso, Marcos Paulo
G635p Projeto de máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes / Marcos Paulo Gonçalves Pedroso; orientador Carlos Alberto Fortulan. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto Mecânico -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. usinagem por abrasão. 2. usinagem à verde. 3. projeto mecânico. 4. esferas cerâmicas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCOS PAULO GONÇALVES PEDROSO.**

Título da dissertação: "Projeto de máquina de usinagem de esferas cerâmicas a verde".

Data da defesa: 28/08/2015

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Associado **Carlos Alberto Fortulan (Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	Aprovado
Prof. Associado **Rafael Salomão** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Dr. **Cesar Renato Foschini** (Universidade Estadual Paulista"Júlio de Mesquita Filho" – UNESP - Bauru)	APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

“... por estarem todas as suas
extremidades a igual distância do centro, a
mais perfeita das formas e mais semelhante a
si mesma ...”

Platão

RESUMO

PEDROSO, M. P. G., **Projeto de máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

O presente trabalho trata do projeto e da fabricação de uma mini máquina para usinagem de esferas cerâmicas verdes. Esferas de cerâmicas avançadas encontram grande aplicação em componentes de alta precisão como rolamentos híbridos ou como a cabeça de próteses de quadril. A grande demanda pelas esferas de cerâmicas avançadas nesses componentes se deve à combinação única de suas propriedades tais como: alta estabilidade dimensional, alta dureza, baixo coeficiente de expansão térmica, biocompatibilidade (bioinerte) e alta resistência mecânica à compressão. No entanto o alto desempenho só será alcançado se as esferas tiverem tolerâncias estreitas (dimensão e forma) e acabamento superficial ultrafino. Esse trabalho objetiva o projeto e a fabricação de um protótipo de mini máquina para usinagem de esferas cerâmicas prensadas de até 30 mm de diâmetro. O desenvolvimento do projeto foi dirigido por uma metodologia de projeto mecânico e após definição do conceito foi gerado um pré-projeto virtual seguido da fabricação de um protótipo, o conceito é composto por três rebolos, sendo dois de arraste que, tendo velocidades e direções de giro variáveis, promovem a variação do eixo de giro das esferas, parâmetro necessário para atingir baixo desvio de esfericidade. *Blanks* esféricos em zircônia foram conformados por prensagem isostática e usinados no protótipo construído. As esferas passaram pela caracterização metrológica através da medição de esfericidade, circularidade e acabamento superficial.

Palavras-chave: usinagem por abrasão, usinagem à verde, projeto mecânico, esferas cerâmicas

ABSTRACT

PEDROSO, M. P. G., **Design of a grinding machine of green ceramic balls**–School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

This work deals with the design and manufacturing of a mini machine for grinding of green ceramic balls. Balls of advanced ceramics find wide application in high-precision components such as hybrid bearings or as bearings of hip prostheses. The large demand for advanced ceramic balls in these components is due to their unique combination of properties such as high dimensional stability, high hardness, low coefficient of thermal expansion, biocompatibility (bio inert) and high compressive strength. However the high performance can only be achieved if the balls have narrow tolerances (size and shape) and ultra-fine surface finish. This work aims to design and manufacture a mini prototype machine to obtain a green ceramic balls up to 30 mm in diameter. The project development was driven by a mechanical design methodology and after the concept generation a virtual pre-design has been generated followed by manufacturing a prototype, the initial concept is composed of three wheels, two of drag that having variables turning speeds and directions, promote a random orbital effect in the balls necessary to reduce the sphericity error. Spherical zirconia blanks were shaped by isostatic pressing and machined in the built prototype. The balls were characterized by measuring sphericity error and surface roughness.

Keywords: grinding, green machining, mechanical design, ceramic balls

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Prótese de quadril, em (a) projeto modular de prótese do quadril (disponível em <http://www.medicinadoquadril.com.br/protese_do_quadril.php>, acessado em 01/11/2014) e em (b) radiografia mostrando prótese implantada (disponível em <http://interfisio.com.br/especialidade/?reumatologia/imagens>, acessado em 01/11/2014)..28

Figura 2 - Próteses de quadril com diferentes materiais, em (a) articulação metal-polietileno, em (b) articulação metal-metal, Em (c) articulação cerâmica-polietileno e em (d) articulação cerâmica-cerâmica (SCHWARTSMANN et al., 2012).....29

Figura 3 - Desenho esquemático de rolamento de esferas (Disponível em <http://www.simulacao.eesc.usp.br/dtm/curso1/aula_10.pdf>. Acessado em 03/11/2014).....30

Figura 4 – Rolamento de esferas, em (a) híbrido (disponível em < http://portuguese.alibaba.com/product-free/hybrid-bearings-107755495.html>, acessado em 03/11/2014) e em (b) totalmente cerâmico (disponível em <http://portuguese.precision-ballbearings.com/chinask_608_z_ceramic_ball_bearings_hybrid_ceramic_bearings_sk_608_z_ceramic_bearing-1816913.html>, acessado em 03/11/2014).....31

Figura 5 – Processo corrente de produção de peças cerâmicas (SCHELLER, 1994).....33

Figura 6 – Ilustração esquemática do corte transversal de um vaso de pressão com molde preenchido (FORTULAN, PURQUERIO; 1997).....34

Figura 7 – Variação da densidade local em peças cerâmicas conformadas por diferentes métodos, em (a) por prensagem isostática e em (b) por prensagem uniaxial (RICHERSON, 2006).....34

Figura 8 – Sistemas de travamento da tampa do vaso utilizados, em (a) rosca, em (b) rosca seccionada, em (c) pino, em (d) grampo em "O", em (e) grampo em "C" e em (f) "*clover leaf*" (FORTULAN et al., 2014).....36

Figura 9 – Diferentes prensas isostáticas do Laboratório de Tribologia e Compósitos, em (a) travamento com grampo em "O" e em (b) travamento com rosca e com "*clover leaf*".....37

Figura 10 – Molde para prensagem isostática via úmido, em (a) desenho esquemático e em (b) molde fabricado com corpos de prova prensados (PURQUERIO,2010).....37

Figura 11 – Influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial R_z, em (a) influência do avanço f e em (b) influência da velocidade de corte v_c (MARGARIDO,2011).....40

Figura 12 – Influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial R_z e na força de corte, em (a) influência da velocidade de corte v_c, em (b) influência do avanço f e em (c) influência da profundidade de corte a (adaptado de MAIER; MICHAELI, 1997).....40

Figura 13 – Etapas para a fabricação de esferas de aço para rolamentos (SCHAEFFLER).....44

Figura 14 – Método de usinagem de esferas de aço para rolamentos, em (a) diagrama esquemático (adaptado de KANG,2001) e em (b) desenho do mecanismo (adaptado de US6171179, 2001).....45

Figura 15 - Grandezas utilizadas para o estudo do movimento das esferas com canal em V concêntrico (adaptado de KUROBE et. al.,1996).....45

Figura 16 – Métodos de usinagem de esferas, em (a) eixos oblíquos entre os discos de alimentação e corte e em (b) eixos reversos entre os discos de alimentação e corte (US5301470 A, 1994).....46

Figura 17 – Esquema do método de usinagem de esferas cerâmicas com fluido magnético (adaptado de ZHANG et. al.,2004).....47

Figura 18 - Princípio de funcionamento de usinagem de esferas cerâmicas com canal em V concêntrico com três rebolos, em (a) diagrama esquemático (adaptado de KANG, 2001) e em (b) desenho do mecanismo (CN101579840 B).....48

Figura 19 – Método de usinagem com dois rebolos excêntricos, em (a) diagrama esquemático em vista frontal (adaptado de KANG,2001) e em (b) diagrama esquemático em vista superior (adaptado de KANG,2001).....49

Figura 20 – Usinagem de esferas cerâmicas com centro, em (a) esquema da máquina e em (b) esfera femoral.....50

Figura 21 – Perfil da peça real representado entre os círculos ideais definidos pela tolerância.....51

Figura 22 – Gráfico resultante da medição de circularidade da cabeça de prótese de quadril em máquina de medir por coordenadas (SOUZA, 2011).....52

Figura 23 – Composição resultante na textura de superfície (SOUZA, 2011).....52

Figura 24 – Medição de rugosidade de esfera femoral com contato. (SOUZA, 2011).....53
Figura 25 - Diagrama lógico da função de projeto.....56
Figura 26 – Estrutura funcional da máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes.....56
Figura 27 – Esboço em CAD da máquina de usinagem de esferas cerâmicas. Em (a) vista isométrica. Em (b) exibição da face inferior da mesa.....61
Figura 28 – Seqüência de operações para a fabricação da esfera com os respectivos diâmetros anterior e posterior a cada etapa da fabricação, $Ø_{im}$ é o diâmetro interno do molde, $Ø_{pcs}$ é o diâmetro do prensado com sobre-material, $Ø_{pss}$ é o diâmetro do prensado sem sobre-material, $Ø_{s}$ é o diâmetro do sinterizado e $Ø_{prod}$ é o diâmetro do produto.....62
Figura 29 – Montagem do molde da peça de elastômero, em (a) vista em corte com a chamada de cada peça e em (b) modelo CAD 3D.....63
Figura 30 – Vista em corte da matriz elastomérica mostrando os diâmetros interno e externo e o diâmetro da garganta.....64
Figura 31 – Montagem do molde da esfera, em (a) vista em corte com a chamada de cada peça e em (b) vista em corte do modelo CAD.....64
Figura 32 – Montagem do molde da tampa, em (a) vista em corte com a chamada de cada peça e em (b) vista em corte do modelo CAD 3D mostrando a concavidade formada na base da tampa.....65
Figura 33 – Definição do sistema de referência inercial I e móvel B1.....66
Figura 34 – Sistemas de referência inercial I, móvel B1 e móvel B2.....66
Figura 35 – Vista isométrica da máquina de usinagem de esferas cerâmicas.....74
Figura 36 – Desenho da máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes com dimensões principais, em (a) vista lateral e em (b) vista frontal.....75
Figura 37 – Vista do conjunto da mesa de granito sintético com chamada para os componentes, em (a) destaque para face superior e em (b) destaque para a face inferior.....76
Figura 38 – Conjunto de usinagem em CAD.....77
Figura 39 – Dimensões principais do conjunto de usinagem, em (a) vista frontal e em (b) vista lateral.....78
Figura 40 – Conjunto de arraste, em (a) vista em corte com chamada para as pecas e em (b) vista com dimensões máximas.....79

Figura 41 – Conjunto de acionamento, em (a) chamada dos componentes e em (b) dimensões máximas.....80
Figura 42 – Vista mostrando corte no plano vertical da máquina, em (a) vista mostrando a máquina completa e em (b) detalhe da usinagem das esferas.....81
Figura 43 – Perfil de movimento utilizado para dimensionamento dos motores acionadores dos rebolos de arraste.....82
Figura 44 – Definição das inércias do sistema.....83
Figura 45 – Curva de torque para motor KTC HT23 400. (Disponível em < http://www.kalatec.com.br/wp-content/uploads/2015/02/Motor_Passo_Nema_HT231.pdf>. Acessado em 03/03/2015).....85
Figura 46 – Desenho da montagem do molde da mesa da máquina com chamada para as principais peças.....87
Figura 47 – Montagem do molde para a fabricação da mesa de granito sintético, em (a) molde aberto e em (b) molde fechado.....88
Figura 48 – Etapas para fabricação da mesa da máquina, em (a) britas de granito e resina epóxi, em (b) mistura dos componentes, em (c) preenchimento do molde, em (d) vibração, em (e) extração e em (f) mesa fabricada.....89
Figura 49 – Eixos externo e interno fabricados, em (a) ambos e (b) eixo externo com rolamento e labirinto montados.....90
Figura 50 – Montagem do eixo interno no conjunto do eixo externo.....91
Figura 51 – Montagem de componentes, em (a) rolamentos e labirinto externo na mesa e em (b) conjunto de arraste.....91
Figura 52 – Etapas na montagem dos motores e transmissão de movimento, em (a) vista posterior da mesa com conjunto de arraste, em (b) fixação de polia ao eixo externo, em (c) fixação de polia ao eixo interno e em (d) montagem das correias e motores de passo.....92
Figura 53 - Montagem da máquina, em (a) montagem da estrutura metálica e em (b) montagem da coluna.....93
Figura 54 – Montagem da máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes.....93
Figura 55 – Peças prototipadas utilizadas para a fabricação dos moldes utilizados na conformação das partes elastoméricas e esfera de rolamento.....94
Figura 56 – Fabricação da matriz elastomérica, em (a) molde aberto, em (b) injeção de silicone e em (c) molde aberto com o silicone curado.....95

Figura 57 – Fabricação da tampa elastomérica.....95
Figura 58 – Molde para prensagem isostática das esferas, em (a) peças constituintes do molde e em (b) molde montado.....96
Figura 59 – Prensagem isostática da esfera, em (a) extração do molde e em (b) extração da esfera.....97
Figura 60 – Estação de trabalho para a usinagem de esferas cerâmicas.....97
Figura 61 - Medição de rotação dos discos de arraste, em (a) preparação dos discos e em (b) medição do disco interno com sistema em repouso.....98
Figura 62 – Gaiola separadora das esferas.....99
Figura 63 – Rotações aplicadas aos motores acionadores dos rebolos de arraste, em (a) disco externo e em (b) disco interno.....101
Figura 64 – Parâmetros da cinemática da esfera, em (a) ângulo de giro e em (b) velocidade angular em relação ao eixo instantâneo.....102
Figura 65 – Ângulos de giro para as esferas, em (a) ângulos de giros iguais e em (b) esfera produzida com lóbulo devido ao ângulo de giro constante.....103
Figura 66 - Rotações aplicadas aos motores acionadores dos rebolos de arraste, em (a) disco externo e em (b) disco interno.....105
Figura 67 - Parâmetros da cinemática da esfera, em (a) ângulo de giro e em (b) velocidade angular em relação ao eixo instantâneo.....106
Figura 68 – Caracterização metrológica, em (a) acabamento superficial e em (b) circularidade.....107
Figura 69 – Imagem da topografia da esfera prensada.....108
Figura 70 – Esfera prensada, em (a) foto, em (b) superfície ao microscópio laser, em (c) medida de circularidade e em (d) perfil de medição de rugosidade.....109
Figura 71 - Imagem da topografia da esfera usinada em desbaste.....111
Figura 72 – Esfera usinada em desbaste, em (a) foto, em (b) superfície ao microscópio laser, em (c) medida de circularidade e em (d) perfil de medição de rugosidade.....112
Figura 73 – Esfera usinada em acabamento, em (a) foto, em (b) superfície ao microscópio laser, em (c) medida de circularidade e em (d) perfil de medição de rugosidade.....115

Figura 74 – Esfera sinterizada, em (a) foto, em (b) superfície ao microscópio ao laser, em (c) medida de circularidade e em (d) perfil de medição de rugosidade.....117
Figura 75 – Evolução dos parâmetros Ra de acabamento superficial e esfericidade durante o processo de fabricação da esfera cerâmica.....119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das propriedades dos aços AISI 52100 e M50 e do Si_3N_4.....31

Tabela 2 – Comparação de desempenho entre diferentes projetos de máquina de usinagem de esferas.....50

Tabela 3 – Combinação de variantes aplicada ao método de variação do eixo das esferas.....57

Tabela 4– Combinação de variantes aplicada ao acionamento dos rebolos de arraste.....58

Tabela 5– Combinação de variantes aplicada ao sistema de transmissão de movimento.....58

Tabela 6– Combinação de variantes aplicada ao acionamento da carga compressiva nas esferas.....59

Tabela 7– Combinação de variantes aplicada para a estrutura da máquina.....59

Tabela 8 – Grandezas utilizadas para a determinação dos parâmetros cinemáticos do movimento da esfera.....100

Tabela 9 – Valores medidos do parâmetro Ra para a esfera prensada.....110

Tabela 10 – Valores medidos de erro de circularidade para a esfera prensada.....110

Tabela 11 – Valores medidos do parâmetro Ra para a esfera usinada em desbaste.....113

Tabela 12 – Valores medidos de erro de circularidade para a esfera usinada em desbaste.....113

Tabela 13 – Valores medidos do parâmetro Ra para a esfera usinada em acabamento.....116

Tabela 14 – Valores medidos de erro de circularidade para a esfera usinada em acabamento.....116

Tabela 15 – Valores medidos do parâmetro Ra para a esfera sinterizada.....118

Tabela 16 – Valores medidos de erro de circularidade para a esfera sinterizada.....118

LISTA DE SÍMBOLOS

Owv_j - valor global da variante j

w_i - fator de importância do critério i

v_{ij} - sub-valor da variante j em relação ao critério i

x_i - valor global ponderado

$v_{máx}$ - valor máximo de todas as variantes.

R_A – distância entre o eixo de rotação do rebolo de corte e o contato com a esfera

R_B – distância entre o eixo de rotação do rebolo de arraste externo e o contato com a esfera

R_C – distância entre o eixo de rotação do rebolo de arraste interno e o contato com a esfera

R_e – raio da esfera

ω_A – rotação do rebolo de corte

ω_B – rotação do rebolo de arraste externo

ω_C – rotação do rebolo de arraste interno

θ – ângulo de giro da esfera

α – ângulo entre a face do canal em “V” em contato com a esfera e a vertical

SUMÁRIO

RESUMO.....9

ABSTRACT.....11

LISTA DE FIGURAS.....13

LISTA DE TABELAS.....19

LISTA DE SÍMBOLOS.....21

1. INTRODUÇÃO.....25

1.1. Objetivos.....25

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....27

2.1. Esferas cerâmicas – função.....27

2.1.1. Próteses de quadril.....27

2.1.2. Mancais de rolamentos.....30

2.2. Esferas cerâmicas – fabricação.....32

2.2.1. Prensagem isostática.....33

2.2.2. Usinagem de cerâmica verde.....38

2.3. Metodologia de projeto.....41

2.3.1. Projeto informacional.....42

2.3.2. Projeto conceitual.....42

2.3.3. Projeto preliminar.....43

2.3.4. Projeto detalhado.....43

2.4. Máquinas de usinagem de esferas.....43

2.5. Validação.....51

2.5.1. Medição de circularidade.....51

2.5.2. Medição de acabamento superficial.....52

3. MATERIAIS E MÉTODOS.....55

3.1. Projeto da máquina.....55

3.1.1. Projeto informacional.....55
3.1.2. Projeto conceitual.....55
3.2. Projeto do molde.....61
3.3. Cinemática das esferas.....65
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....73
4.1. Projeto da máquina.....73
4.1.1. Projeto preliminar.....73
4.1.2. Projeto detalhado.....81
4.2. Fabricação e montagem da máquina.....86
4.3. Fabricação e montagem do molde.....94
4.4. Validação.....96
4.4.1. Usinagem.....97
4.4.2. Caracterização metrológica.....107
5. CONCLUSÕES.....121
5.1. Trabalhos futuros.....122
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....123

1. INTRODUÇÃO

As cerâmicas avançadas estão presentes em diversas áreas em aplicações que se coadunam com suas conhecidas propriedades: resistência a altas temperaturas (revestimento de fornos, vasos de reação, trocadores de calor), resistência ao desgaste e a ambientes corrosivos (rolamentos, juntas, válvulas), alta dureza (insertos para usinagem), propriedades elétricas (cerâmicas diéletricas, semicondutoras, supercondutoras), propriedades óticas (fibra ótica, lentes), bioinércia (implante dentário, de quadril), etc. Em muitas aplicações as cerâmicas podem substituir metais e outros materiais. Contudo, os métodos atuais de usinagem de cerâmicas permanecem onerosos (MARINESCU, 2006). Portanto a pesquisa e o desenvolvimento de métodos de usinagem de cerâmicas se mostram necessários para que a alta demanda sobre os materiais cerâmicos seja atendida de maneira viável.

Esferas cerâmicas são componentes utilizados em aplicações tradicionais como elementos em torres de catálises, em moinhos de bolas e em aplicações de precisão como os elementos de rolamentos, apalpadores de equipamentos de medição e esferas de implante de quadril.

A usinagem de peças cerâmicas é realizada principalmente por meio de ferramentas de diamante e devido à fragilidade do material cerâmico, danos como trincas superficiais e subsuperficiais são causados na peça, diminuindo sua resistência mecânica (BUKVIC; SANCHEZ, 2010). O processo de usinagem é onerado devido à utilização de máquinas-ferramenta de alta rigidez e da ferramenta de corte diamantada (STRAKNA et al., 1996).

Como alternativa pode-se realizar a usinagem das peças cerâmicas num estágio anterior ao processo de sinterização, na chamada usinagem de cerâmica verde. Esta operação é de baixo consumo energético, de grande capacidade de remoção de material, capaz de produzir superfícies complexas e não exige ferramentas extremamente duras.

1.1. **Objetivos**

Este trabalho objetiva o projeto de uma mini máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes seguindo a metodologia de projeto mecânico. É esperada a fabricação de um protótipo e a sua validação através da usinagem de esferas cerâmicas verdes de 30 mm de diâmetro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os seguintes temas: função das esferas cerâmicas, fabricação das esferas cerâmicas, metodologia de projeto mecânico, projetos de máquinas de usinagem de esferas cerâmicas e a caracterização metrológica necessária para a validação da fabricação das esferas.

A primeira seção, função das esferas cerâmicas, mostra o contexto ao qual as esferas pertencem, seus diferentes usos e dois usos de precisão em maior detalhe: as esferas utilizadas nas próteses de quadril e as esferas utilizadas em mancais de rolamentos.

A segunda seção, fabricação das esferas cerâmicas verdes, mostra o processo de fabricação da esfera desde a conformação do pó cerâmico, sendo necessário o projeto do molde para a formação do compactado, até a usinagem das esferas verdes.

A terceira seção, metodologia de projeto mecânico, trata da metodologia utilizada para o projeto de máquinas, passa pelas quatro fases do projeto: informacional, conceitual, preliminar e detalhado.

A quarta seção, caracterização metrológica, que é utilizada para validação do projeto, mostra os conceitos de acabamento superficial e circularidade, parâmetros essenciais para avaliação do produto, e as diferentes formas de medição dessas grandezas.

2.1. Esferas cerâmicas - função

As esferas cerâmicas são componentes utilizados em aplicações tradicionais como as esferas com elementos em torres de catálises e em moinhos de bolas e em aplicações de precisão como os elementos rolantes de mancais de rolamentos, apalpadores de equipamentos de medição e esferas de implante de quadril.

2.1.1. Próteses de quadril

Uma aplicação de destaque das esferas cerâmicas é a prótese de quadril utilizada na artroplastia total do quadril, em que uma esfera faz o papel da cabeça do fêmur quando esta está danificada, a esfera forma um par tribológico com uma peça com superfície côncava fixada no acetábulo e garante a mimetização da articulação. A Figura 1 mostra em (a) a estrutura modular, tipo de projeto mais utilizado para as próteses de quadril, formada pela haste que é fixada ao fêmur com ou sem a utilização de cimento acrílico (polimetilmetacrilato) para auxílio da fixação do componente, pela esfera unida à haste através de um cone padronizado segundo norma F1636-95 da ASTM e um componente com

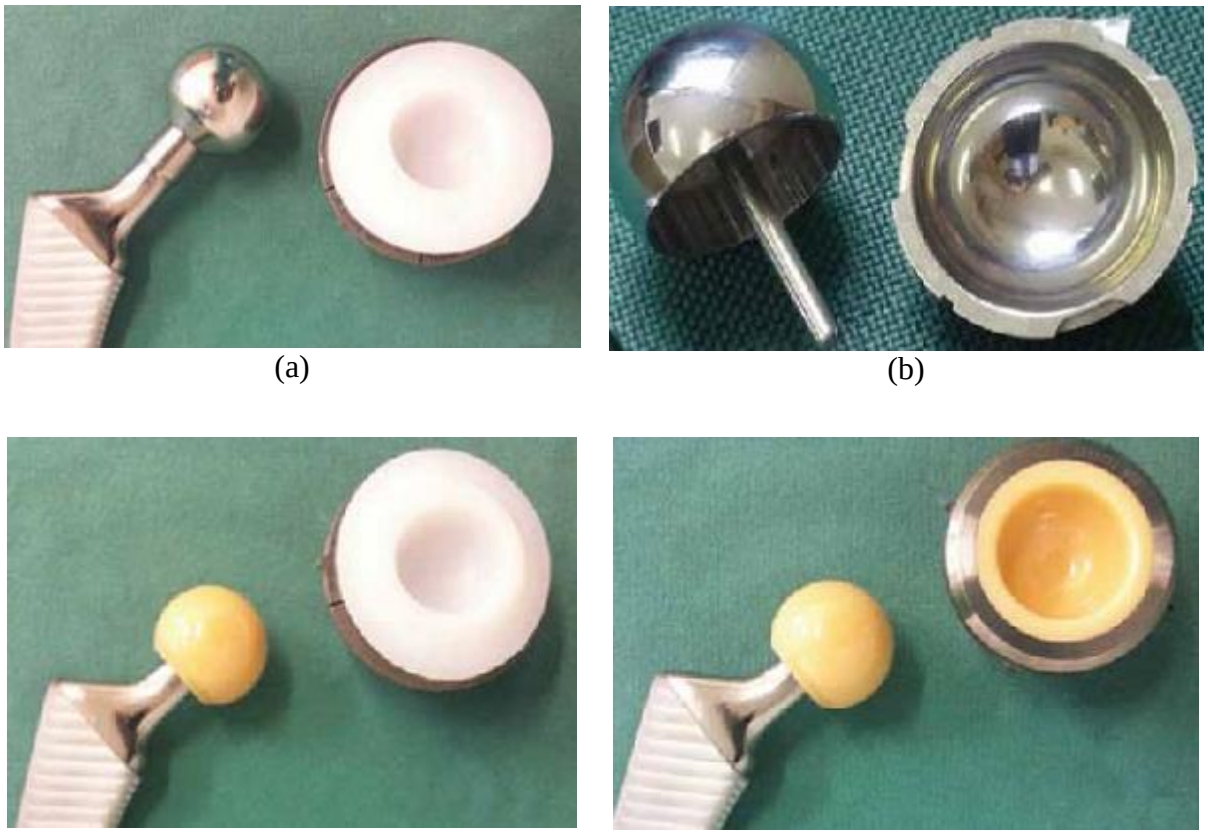
superfície côncava fixado ao acetábulo. A Figura 1 mostra em (b) a radiografia de uma pessoa com uma prótese de quadril implantada.

(a) (b)

Figura 1 - Prótese de quadril, em (a) projeto modular de prótese do quadril (disponível em <http://www.medicinadoquadril.com.br/protese_do_quadril.php>, acessado em 01/11/2014) e em (b) radiografia mostrando prótese implantada (disponível em <http://interfisio.com.br/especialidade/?reumatologia/imagens>, acessado em 01/11/2014).

Segundo Richerson (2006) essa tecnologia foi pioneira utilizando uma haste metálica com uma esfera metálica em uma das pontas. A moderna artroplastia total do quadril teve início na década de 1960 quando Charnley sugeriu uma haste femoral com cabeça em aço inoxidável articulada com um implante acetabular de polietileno de alta densidade, ambos fixados ao osso com cimento de polimetilmetacrilato (SCHWARTSMANN et al., 2012).

As falhas dos implantes estão associadas ao desgaste do par tribológico, sendo as partículas liberadas pelo desgaste responsáveis por reações biológicas (AMBROSIO et al., 1996). Dependendo do par tribológico utilizado o desgaste poderá ser acentuado. Atualmente os projetos utilizam diferentes materiais para as partes da prótese, como pode ser observado na Figura 2 que mostra diferentes conceitos da utilização de materiais em cada componente, em (a) articulação metal-polietileno, em (b) articulação metal-metal, em (c) articulação cerâmica-polietileno e em (d) articulação cerâmica-cerâmica.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 2 - Próteses de quadril com diferentes materiais, em (a) articulação metal-polietileno, em (b) articulação metal-metal, Em (c) articulação cerâmica-polietileno e em (d) articulação cerâmica-cerâmica (SCHWARTSMANN et al., 2012).

O polietileno de ultra-alto peso molecular é formado através da polimerização do etileno e é excelente material para os implantes ortopédicos, pois é biocompatível, proporciona baixo atrito e é resistente ao desgaste (HARKESS; DANIELS, 2006). Uma limitação da articulação metal-polietileno é o desgaste elevado, que produz muitas partículas de polietileno que causam reações biológicas que podem levar à osteólise, a reabsorção de massa óssea, e posterior perda de fixação do implante (HARKESS; CROCKARELL, 2008).

Os metais mais utilizados em aplicações de implantes estruturais são o aço inoxidável, ligas de cobalto-cromo-molibdênio e titânio e suas ligas. O aço inoxidável possui como vantagens o baixo custo e a facilidade de usinagem, porém a resistência à corrosão é limitada. As ligas de cobalto-cromo-molibdênio possuem grande resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas mas apresentam a usinagem dificultada. As ligas de titânio apresentam excelente biocompatibilidade, alta resistência estrutural, baixa densidade e alta resistência à corrosão, mas como desvantagem apresentam baixa resistência ao desgaste (DONACHIE, 1998). A articulação metal-metal apresenta a vantagem do desgaste reduzido,

porém com o passar do tempo ocorre o aumento de íons, como cobalto e cromo, no sangue dos pacientes, o que pode ocasionar efeitos nocivos.

A prótese cerâmica de alumina exibe vantagens no longo prazo, pois apresenta maior durabilidade e menor chance de ocorrência de osteólise quando comparada à prótese metal-polietileno. Baixo atrito, alta resistência ao desgaste e boa biocompatibilidade são características determinantes para sua utilização (MURPHY; ECKER; TANNAST, 2006). A reatibilidade biológica das partículas resultantes do desgaste, denominadas debris, da alumina parece ser menor que a dos debris de polietileno (FISHER et al., 2005).

2.1.2. Mancais de rolamentos

Mancais de rolamento são elementos de máquinas largamente utilizados para o apoio de eixos e a separação dos elementos rotativos dos estacionários (WANG; SNIDLE; GU, 2000). O rolamento é formado basicamente por duas pistas, interna e externa, os elementos rolantes, que podem ser esféricos, cilíndricos ou cônicos, e uma gaiola separadora dos elementos rolantes, conforme mostra a Figura 3.

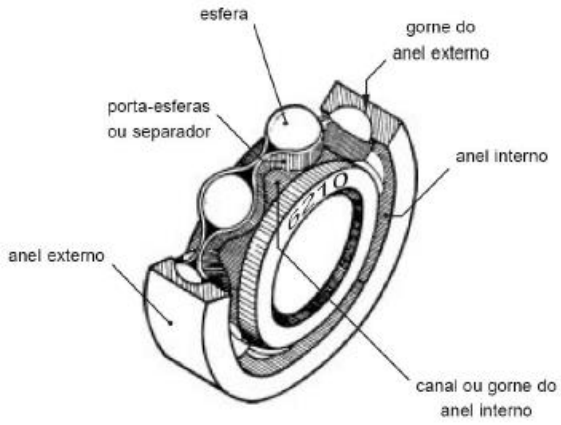


Figura 3 - Desenho esquemático de rolamento de esferas (Disponível em <http://www.simulacao.eesc.usp.br/dtm/curso1/aula_10.pdf>. Acessado em 03/11/2014).

Richerson (2006) enumera alguns critérios que um material utilizado para a fabricação de elementos rolantes deve satisfazer: ser duro ou tenaz para resistir as altas cargas de contato, deve ser capaz de ser fabricado com acabamento superficial ultra fino e tolerâncias estreitas a um custo razoável e deve operar com um baixo coeficiente de atrito em relação as pistas (interna e externa). Apesar de os elementos rolantes dos rolamentos tradicionais serem feitos de materiais como aço AISI 52100 ou M50 tentativas foram feitas para se fabricar rolamentos com elementos rolantes de cerâmica, utilizando alumina e carberto de silício, porém esses materiais falharam catastroficamente por fratura frágil. Segundo Richerson

(2006) o sucesso veio na década de 1970, ao se utilizar nitreto de silício prensado isostaticamente à quente, esse processo de fabricação elevou a tenacidade à fratura do material a valores 50% maiores que os da alumina e do carbeto de silício. Rolamentos totalmente cerâmicos ou com apenas os elementos rolantes em material cerâmico, os denominados rolamentos híbridos, vem, desde então, sendo desenvolvidos e testados. A Figura 4 mostra os dois tipos de rolamentos.

(a) (b)

Figura 4 – Rolamento de esferas, em (a) híbrido (disponível em < http://portuguese.alibaba.com/product-free/hybrid-bearings-107755495.html>, acessado em 03/11/2014) e em (b) totalmente cerâmico (disponível em <http://portuguese.precision-ballbearings.com/chinask_608_z_ceramic_ball_bearings_hybrid_ceramic_bearings_sk_608_z_ceramic_bearing-1816913.html>, acessado em 03/11/2014).

Tabela 1 – Comparação das propriedades dos aços AISI 52100 e M50 e do Si_3N_4

Propriedades	AISI 52100	M50	Si_3N_4
Densidade (kg/m^3)	7800	7800	3160
Dureza (HRC)	66	64	78
Módulo elástico (GPa)	210	200	320
Módulo de Poisson	0,28	0,28	0,26
Coeficiente de expansão térmica (x 10^{-6}/°C)	10,9	12,3	2,9
Máxima temperatura (°C)	180	320	1000

Fonte: (WANG; SNIDLE; GU, 2000)

Observando a Tabela 1 percebe-se a condição vantajosa do material cerâmico, pois apresenta as propriedades da densidade e do coeficiente de expansão térmica

significativamente menores que os dos metais, a dureza é maior, assim como o módulo de elasticidade e a temperatura máxima de trabalho.

Em rolamentos híbridos de alta precisão, as esferas cerâmicas exibem vantagens em condições críticas de alta velocidade, alta carga, alta temperatura e meio hostil (KANG; HADFIELD, 2001). Neste caso as propriedades desejáveis das cerâmicas são: a alta dureza, a alta resistência ao desgaste, a resistência maior à compressão do que à tração unidas à possibilidade de obtenção de ultra fino acabamento superficial. As tolerâncias estreitas de circularidade e acabamento superficial não apenas diminuem o atrito, como resultam em uma operação que permite velocidades até 80% maiores que as alcançadas em rolamentos com esferas metálicas pois impões menor vibração; já a baixa densidade das cerâmicas diminui o consumo de energia em 15 a 20% do consumo alcançado com os rolamentos com esferas metálicas (RICHERSON, 2006) e a predominância de esforços compressivos nos elementos rolantes aproveitam o máximo das propriedades mecânicas da cerâmica.

2.2. Esferas cerâmicas – fabricação

Visto como ciência, o processamento de cerâmica é uma sequência de operações que propositadamente e sistematicamente muda os aspectos físicos e químicos da estrutura, denominados características do sistema. As propriedades em cada estágio são uma função das características do sistema em cada estágio e da pressão e da temperatura do ambiente (REED, 1995).

A maioria dos processos de fabricação de cerâmica começa com o pó finamente moído. O pó tem sua forma definida através de algum dos seguintes processos de conformação: prensagem uniaxial ou isostática, extrusão, injeção no molde, *tape forming* e *slip casting*. Nesse estágio é formado o compacto que precisa ser densificado por um processamento em alta temperatura. Após a densificação, componentes que necessitam de tolerâncias estreitas devem ainda ser usinados (RICHERSON, 2006). A Figura 5 ilustra o processamento do material cerâmico.

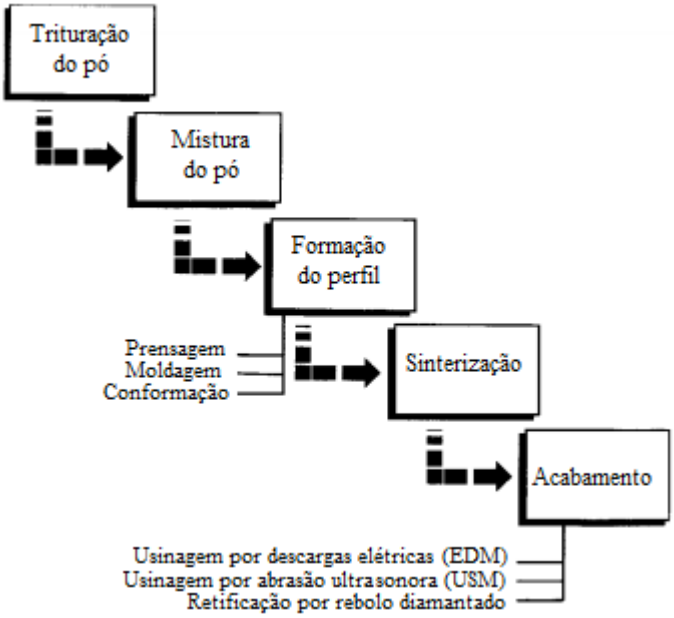


Figura 5 – Processo corrente de produção de peças cerâmicas (SCHELLER, 1994).

Conforme mostrado pela Figura 5, nos métodos correntes de produção de cerâmica os pós são triturados e misturados, podem ser adicionados aglomerantes e aditivos para melhoria das etapas de conformação e sinterização. Os pós são então prensados em moldes para a formação de peças verdes, que são então sinterizadas para atingir os valores desejados de dureza e densidade (SCHELLER, 1994). Após a sinterização a usinagem de acabamento é realizada para atingir os valores desejados de acabamento superficial e de tolerâncias de dimensão e forma.

2.2.1. Prensagem isostática

A prensagem isostática é um processo de conformação que utiliza fluido pressurizado para conformar o material de trabalho, que se encontra dentro de um molde elastomérico, alojado em um vaso de pressão. O fluido pressiona o material em todas as direções, o que confere características uniformes à peça (REED, 1995). Conforme Richerson (2006) "a aplicação da pressão em múltiplas direções alcança maior uniformidade de compactação e aumenta a possibilidade de formas". A Figura 6 mostra esquematicamente o processo.

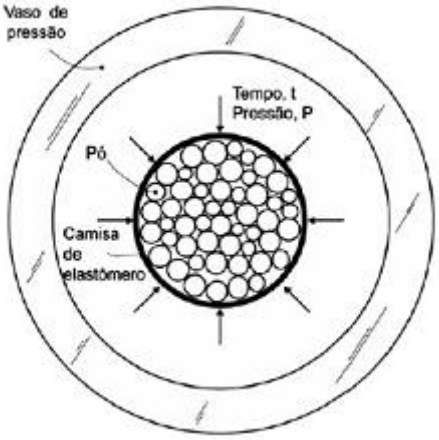


Figura 6 – Ilustração esquemática do corte transversal de um vaso de pressão com molde preenchido (FORTULAN, PURQUERIO; 1997).

Na prensagem uniaxial devido ao atrito entre o material de trabalho e o molde ocorrem gradientes de pressão, que ocasionam gradientes de densidade na peça conformada. Em uma etapa posterior de sinterização as regiões mais densas sofrerão menor retração que as regiões menos densas, causando o aparecimento de tensões internas que contribuem para o surgimento e a propagação de defeitos. Na prensagem isostática os gradientes de densidade são fortemente reduzidos, o que aumenta a qualidade do produto obtido (RICHERSON, 2006) . A Figura 7 compara os dois métodos de prensagem, mostrando as distribuições de densidade em várias regiões de um cadinho de paredes finas, fabricado em (a) pela prensagem isostática e em (b) pela prensagem uniaxial.

(a) (b)

Figura 7 – Variação da densidade local em peças cerâmicas conformadas por diferentes métodos, em (a) por prensagem isostática e em (b) por prensagem uniaxial (RICHERSON, 2006).

Observando-se a Figura 7 percebe-se que o cadinho fabricado pela prensagem uniaxial exibe uma variação de densidade de 1,44 a 1,80 g/cm^3, enquanto o cadinho fabricado pela prensagem isostática exibe uma variação de densidade de 1,91 a 1,95 g/cm^3; a melhoria

na uniformidade da densidade em toda a peça fabricada pela prensagem isostática é claramente percebida.

A prensagem isostática pode ser realizada de duas maneiras: à frio ("*cold isostatic pressing*", CIP) ou à quente ("*hot isostatic pressing*", HIP). A prensagem isostática à frio é utilizada principalmente para a conformação do pó antes de uma densificação que será realizada por sinterização ou prensagem isostática à quente. Esse tipo de prensagem é dividido em duas categorias: via úmido ("*wet bag*") ou via seco ("*dry bag*"). Na via úmido o operador tem contato com o fluido de trabalho nas etapas de alimentação e descarga dos moldes. Vários tipos de moldes podem ser colocados nos vasos, o que favorece a produção de peças grandes, complexas e diversificadas, porém, em baixa produção. Na via seco a tampa do molde é a própria tampa do vaso, o que favorece a produção de formas simples e peças menores, porém, em maiores quantidades, ou seja, elevadas taxas de produção podem ser alcançadas com a automatização do processo (REED, 1995). Richerson (2006) cita que a prensagem isostática à quente é utilizada para que ocorra um aumento na uniformidade do material devido a eliminação dos efeitos de fricção com a parede do molde e orientação preferencial, resultando em resistência mais elevada. As pressões e temperaturas utilizadas são mais elevadas, tornando a compactação mais completa e aumentando a flexibilidade na seleção da composição (RICHERSON, 2006). Aplicam-se pressões da ordem de 100 a 200 MPa e utilizam-se temperaturas da ordem de 2200 °C. Um gás inerte, geralmente argônio ou hélio, é utilizado como fluido sob pressão.

A prensa isostática é composta, basicamente, pelo vaso de pressão, a tampa do vaso com seu sistema de travamento, a unidade hidropneumática, válvulas e a estrutura. As peças são prensadas através da bomba hidropneumática que transfere e eleva a pressão do ar proveniente de um compressor para o fluido de trabalho, que é uma mistura de água e óleo solúvel. Esse fluido pressiona o material de trabalho dentro dos vasos de pressão, que devem ser equipados com um sistema de segurança e trabalhar muito abaixo do seu limite de resistência (FORTULAN; PURQUERIO, 1997). O sistema de fechamento dos vasos é de extrema importância para o funcionamento adequado da máquina e para a segurança do processo. A Figura 8 mostra os diversos tipos de travamento das tampas nos vasos utilizados.

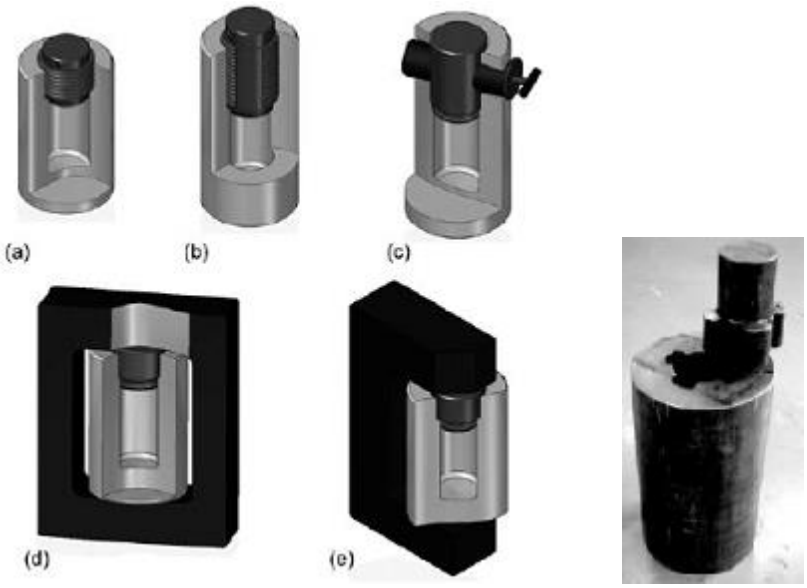


Figura 8 – Sistemas de travamento da tampa do vaso utilizados, em (a) rosca, em (b) rosca seccionada, em (c) pino, em (d) grampo em "O", em (e) grampo em "C" e em (f) "*clover leaf*" (FORTULAN et al., 2014).

Conforme mostrado pela Figura 8 os principais sistemas utilizados para fechamento e trava da tampa são baseados em: rosca; rosca seccionada que tem a operação facilitada, porém exige maiores dimensões de vaso e tampa; pino trava, onde a usinagem do furo transversal exige precisão e também maiores dimensões do vaso e da tampa; grampo, onde uma estrutura externa suporta as cargas, neste caso tanto o vaso quanto a tampa tem dimensões reduzidas, porém a máquina tem o tamanho aumentado devido a presença da estrutura externa que, para algumas operações de automação se torna uma opção atrativa, grampo em "O" e grampo em "C" (FORTULAN et al., 2014).

A Figura 9 mostra duas prensas isostáticas existentes no Laboratório de Tribologia e Compósitos, da EESC.

(a) (b)

Figura 9 – Diferentes prensas isostáticas do Laboratório de Tribologia e Compósitos, em (a) travamento com grampo em "O" e em (b) travamento com rosca e com "*clover leaf*".

Segundo Purquerio (2010) "o projeto de moldes para prensagem isostática é uma etapa de grande compromisso para com a qualidade do produto. As concentrações de tensões e os defeitos do prensado devem ser minimizados nesta etapa". O molde é formado pela estrutura rígida que suporta a estrutura flexível e dá passagem ao fluido pressurizado e a estrutura flexível que contém o pó e é deformada pelo fluido.

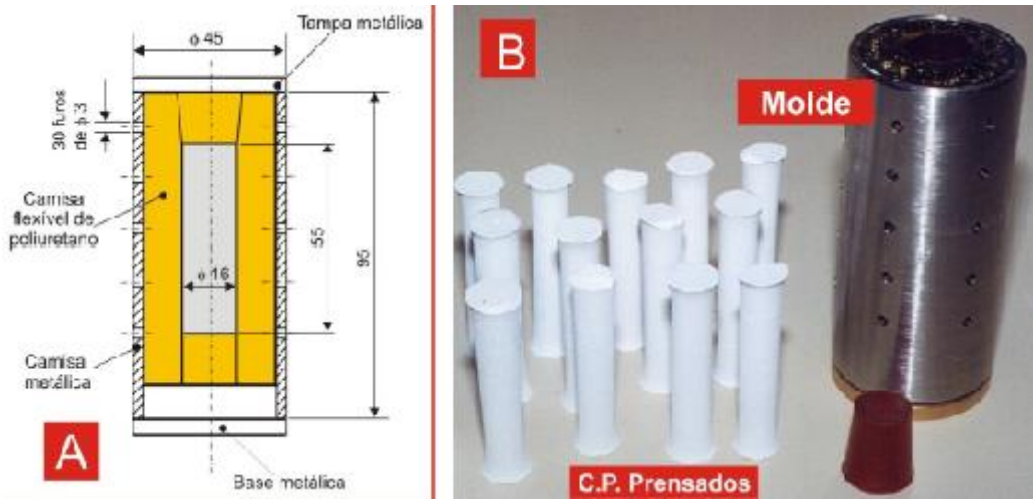


Figura 10 – Molde para prensagem isostática via úmido, em (a) desenho esquemático e em (b) molde fabricado com corpos de prova prensados (PURQUERIO,2010).

A Figura 10 mostra em (a) um desenho esquemático de um corte longitudinal de um molde cilíndrico para prensagem isostática via úmido, formado pela camisa de material rígido e a camisa do material flexível, uma base e uma tampa de material rígido. Em (b) é mostrado

o molde fabricado com alguns corpos de prova prensados. A camisa externa de material rígido é furada para a passagem do fluido pressurizado.

Para o projeto do molde é preciso levar em consideração a retração que ocorre no material devido às etapas de prensagem e de sinterização. Além disso, deve ser considerado o sobrematerial deixado para a usinagem do compactado e para a usinagem de acabamento após o processo de sinterização. A definição de retração é mostrada na equação (1), a partir do rearranjo dos termos determina-se o diâmetro inicial $Ø_i$ a partir do diâmetro final $Ø_f$ e da retração R do processo. Para o processo de usinagem determina-se o diâmetro inicial $Ø_i$ a partir do diâmetro final $Ø_f$ e do sobrematerial através da equação (2):

$$R = \frac{Ø_i - Ø_f}{Ø_i} \rightarrow Ø_i = \frac{Ø_f}{1-R} \tag{1}$$

$$Ø_i = Ø_f + s \tag{2}$$

Conforme Wrege (2000) "entre os materiais utilizados destacam-se alguns polímeros rígidos e o aço para a confecção de estruturas rígidas bem como borrachas naturais ou poliuretanas para a fabricação da estrutura flexível".

2.2.2. Usinagem de cerâmica verde

O objetivo do processo de usinagem é permitir que o produto final alcance as especificações de dimensão, forma e acabamento superficial requeridas (REED, 1995). As peças cerâmicas podem ser usinadas em diferentes estágios de seu processo de fabricação. A usinagem pode ser realizada após a sinterização, antes da sinterização, mas após uma pré-queima em uma temperatura menor que a temperatura de sinterização na chamada usinagem de cerâmica branca ou pode ser realizada sem nenhum tratamento térmico na chamada usinagem de cerâmica verde .

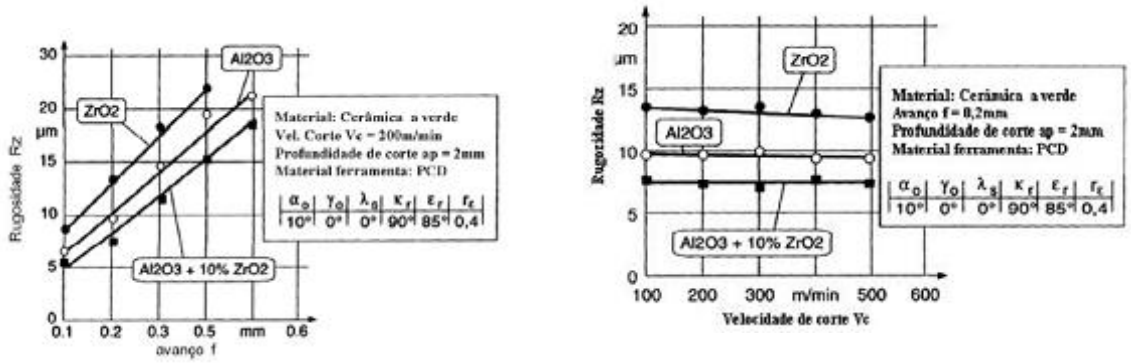
A usinagem realizada após a sinterização ocorre para a correção da distorção que afeta as dimensões, a forma e o acabamento superficial. Após a queima a cerâmica apresenta alta dureza e baixa tenacidade, o que dificulta a remoção do material. A usinagem deve ser realizada com baixas taxas de remoção de material para minimizar a introdução de defeitos superficiais e sub superficiais que diminuem a resistência da peça. O processo de usinagem nesse estágio é caracterizado como lento, devido as baixas taxas de remoção, e oneroso, devido a necessidade de se utilizar ferramentas diamantadas (REED,1995).

Na usinagem da cerâmica branca a peça é submetida a uma pré-queima (60-70% da temperatura de sinterização) e é então usinada. Conforme Jahanmir, dependendo da temperatura utilizada na pré-queima a peça pode alcançar vários graus de resistência acima da resistência da peça verde, facilitando o manuseio. A pré-queima realiza uma melhoria das propriedades mecânicas da peça, que aumentam, tornando o manuseio e a fixação facilitados sem o aumento excessivo da dureza da peça, que dificulta a usinagem.

A usinagem de peças cerâmicas realizada antes do processo de sinterização é denominada usinagem da peça verde, esse processo é caracterizado pelo baixo consumo energético e grande capacidade de remoção de material, devido a baixa resistência mecânica da cerâmica nesse estado. No caso de lotes de tamanhos reduzidos ou quando existe uma variedade de peças a usinagem da peça verde oferece considerável vantagem em termos de qualidade, eficiência e flexibilidade (JAHANMIR,). Através da usinagem da peça verde pode-se alcançar tolerâncias adequadas de dimensão, forma e acabamento superficial e, assim, a necessidade da usinagem das peças sinterizadas pode ser reduzida, economizando-se recursos humanos e materiais (ZHANG et al., 2004). Além dos custos, outra vantagem em se reduzir a necessidade de usinagem após a sinterização está relacionada à resistência das peças, pois essa usinagem, em que a peça é submetida a grandes tensões, tende a introduzir defeitos críticos sub-superficiais.

Gonçalves Júnior (2013) e Bukvic (2010) realizaram experimentos através da usinagem de compactos verdes em fresadoras com ferramenta de ponta única e chegaram a conclusão de que o acabamento superficial da peça verde tem influência direta na peça sinterizada, sendo que a usinagem do compactado é benéfica na redução da rugosidade da peça sinterizada (GONÇALVES JÚNIOR; FOSCHINI, 2013).

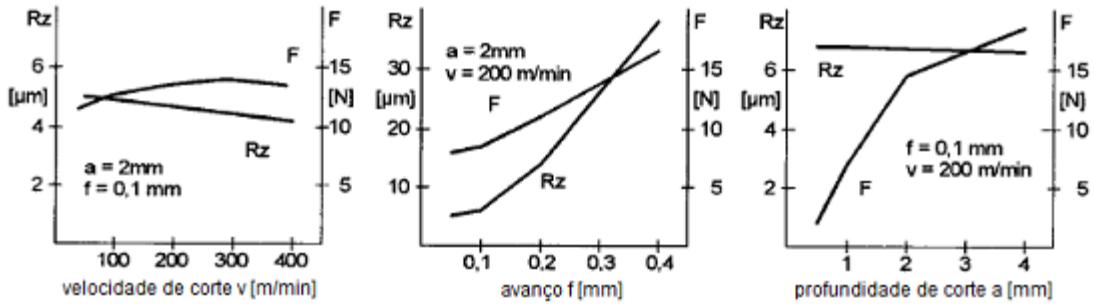
Experimentos foram realizados por Jahanmir para o estudo da influência dos parâmetros de usinagem avanço, profundidade de corte e velocidade de corte no acabamento superficial de peças verdes e brancas usinadas. A matéria prima utilizada foi alumina (Al_2O_2) e zircônia (ZrO_2). Os gráficos mostrados na Figura 11 mostram as relações estudadas. Na Figura 11 em (a) são mostradas as curvas que relacionam o avanço com a rugosidade superficial R_z da peça. O gráfico mostra o aumento da rugosidade superficial R_z com o aumento do avanço. Na Figura 11 em (b) é mostrada a independência da rugosidade superfial R_z com a velocidade de corte utilizada.



(a) (b)

Figura 11 – Influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial R_z, em (a) influência do avanço f e em (b) influência da velocidade de corte v_c (MARGARIDO,2011).

Maier e Michaeli (1997) realizaram experimentos em torneamento para a determinação da influência dos parâmetros de usinagem velocidade de corte, avanço e profundidade de corte na rugosidade superficial R_z e na força de corte. A Figura 12 mostra os resultados obtidos, em (a) a não dependência da velocidade de corte com a rugosidade superficial R_z e com a força de corte, em (b) a relação direta do aumento da rugosidade superficial R_z e da força de corte com o avanço e em (c) a não dependência da rugosidade superficial R_z com a profundidade de corte apesar da relação direta da força de corte com a profundidade de corte. Portanto, para um processo econômico de usinagem com acabamento superficial suficiente a capacidade de usinagem pode ser aumentada através da velocidade de corte ou da profundidade de corte (MAIER; MICHAELI, 1997).



(a) (b) (c)

Figura 12 – Influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial R_z e na força de corte, em (a) influência da velocidade de corte v_c, em (b) influência do avanço f e em (c) influência da profundidade de corte a (adaptado de MAIER; MICHAELI, 1997).

Máquinas de usinagem convencionais como fresadoras, tornos e retificadoras podem ser utilizadas para a usinagem da peça verde, porém algumas modificações são necessárias. Enquanto as baixas forças envolvidas nas operações da usinagem da peça verde significam

que a máquina ferramenta não requer tão alto grau de rigidez como, por exemplo, o das operações de usinagem de metais, consideravelmente mais esforço é requerido para encapsular as guias e os rolamentos. Quando o compactado é usinado, os longos cavacos que usualmente estão associados a operações da usinagem de metais estão ausentes, partículas de pó são produzidas. A remoção desse pó da área de trabalho é vital para a segurança, o progresso do processo, a finalização da usinagem e a vida da ferramenta (JAHANMIR,1999). O coletor de pó é essencial, pois tanto os trabalhadores quanto os equipamentos devem estar protegidos do pó, além disso o volume de material removido pode ser depositado nas superfícies da máquina/ferramenta e *blank* e interferir na qualidade da usinagem (REED, 1995).

Geralmente a peça a ser usinada deve estar rigidamente fixada no equipamento de usinagem, numa mesa ou num eixo árvore. Como neste estado a resistência mecânica é muito baixa, a rigidez muito alta e a fragilidade também alta, pontos de contato podem causar enorme concentração de tensões e fraturar o corpo ou a superfície dele. Quando a fixação for feita por grampos ou braçadeiras deve-se projetá-los para que a área de contato seja maximizada para reduzir as tensões de contato. Peças furadas são normalmente suportadas por um mandril rotativo. Pinças e fixação a vácuo podem ser utilizadas (REED, 1995).

2.3. Metodologia de projeto

Desenvolver e projetar são atividades de interesse da engenharia que abrangem quase todos os campos da atividade humana, aplicam leis e conhecimentos das ciências naturais, se apoiam no conhecimento prático especializado, são em grande parte exercidas sob responsabilidade pessoal e criam os pressupostos para a concretização de idéias da solução (PAHL et al., 2005). A fundamentação do projeto em uma metodologia significa planejar concretamente as etapas do desenvolvimento.

Todo o processo do projeto é fortemente iterativo e as etapas são realimentadas a cada passo por novas informações. Quase todos os projetos são adaptativos ou evolutivos. Parte-se de um produto ou grupo de produtos existente. O objetivo para a retomada pode ser o aprimoramento do desempenho, a redução de custo ou a adaptação a mudanças nas condições do mercado (ASHBY, 2012).

2.3.1. Projeto informacional

A primeira fase do desenvolvimento do projeto é denominada projeto informacional, nessa fase deve-se identificar os requisitos do projeto, as necessidades as quais o produto deve atender. Deve-se buscar uma sentença que expresse a necessidade a ser atendida, porém de maneira neutra em relação a algum princípio de solução.

2.3.2. Projeto conceitual

A segunda fase é denominada projeto conceitual, nela busca-se a formação de um conceito que atenda os requisitos, através de uma análise generalizada das funções que o produto deve realizar, da busca de princípios físicos e soluções tecnológicas que cumpram essas funções e da comparação entre as diversas combinações formadas (PAHL et. al, 2005).

No projeto conceitual pode-se definir uma função global a qual o produto deve atender, a função global é uma função que reúne todas as demais funções (sub-funções) que um produto pode ter (PAHL et. al, 2005). A partir dessa função pode-se construir o diagrama lógico do produto, um diagrama em forma de bloco em que as entradas e saídas na forma de matéria, energia e sinais são explicitadas. O fluxo de matéria é representado por uma seta mais espessa, o fluxo de energia por uma seta mais estreita e o fluxo de sinais por uma seta tracejada.

A partir da definição da função global, a estrutura funcional do produto é construída, essa estrutura mostra na forma de árvore as ramificações da função global em funções secundárias, terciárias e assim por diante, até as funções elementares. A estrutura funcional deixa claro quais ações devem ser realizadas na máquina porém sem a influência de métodos de solução, pois as funções são escritas de maneira geral e neutra, através de um verbo e um substantivo (PAHL et. al, 2005).

Um método de tomada de decisão que pode ser utilizado para comparar diferentes soluções que atendam as funções especificadas na estrutura funcional é o método da combinação de variantes, nesse método diferentes princípios de solução são utilizados para atender cada função, e critérios são estabelecidos para se avaliar comparativamente a forma que cada princípio atende a função (TAVARES, 1995). Os critérios utilizados dependem da função avaliada, como exemplos gerais tem-se custo, manutenção, disponibilidade de itens comerciais. Os critérios são pontuados de acordo com o nível de importância dos mesmos para a realização da função global e então os critérios são hierarquizados. A pontuação pode

seguir a escala de que 1 significa muito baixa importância do critério para a realização da função global e 5 significa alto nível de importância do critério

Cada variante deve então ser pontuada de acordo com a forma que atende determinado critério. Os pontos podem ser escolhidos de acordo com a escala que determina ser 1 a forma péssima com o qual a variante atende ao critério e 5 a forma excelente. Por exemplo, na determinação de um motor elétrico o custo de um servo motor é elevado, portanto ele pode ter 2 como pontuação, enquanto um motor de passo teria 4, pois o custo de um motor de passo é bem menor que o de um servo motor.

A partir da determinação dos sub-valores para cada variante calcula-se o valor global de determinada variante através da Equação 3:

$$Owv_j = \sum w_i . v_{ij} \tag{3}$$

Depois calcula-se o valor global ponderado, através da Equação 4:

$$x_i = \frac{\sum w_i . v_{ij}}{v_{máx} . \sum w_i} \tag{4}$$

2.3.3. Projeto preliminar

A terceira fase é denominada projeto preliminar, nessa fase uma análise das possíveis soluções encontradas é realizada e busca-se a validação do conceito através da produção de modelos experimentais: os protótipos.

2.3.4. Projeto detalhado

A próxima fase é denominada projeto detalhado, nessa fase descrições e especificações de engenharia são produzidas e documentadas para a fabricação do produto. O conceito não sofre modificações profundas, porém ajustes finos são feitos.

2.4. Máquinas de usinagem de esferas

O estudo da usinagem de esferas começa com o estudo da usinagem de esferas de aço para a fabricação de rolamentos. Na década de 1950 teve início o estudo da usinagem de esferas de rolamento através da publicação de vários artigos que analisavam os efeitos de condições de usinagem como a forma do canal para o alojamento das esferas, materiais para a

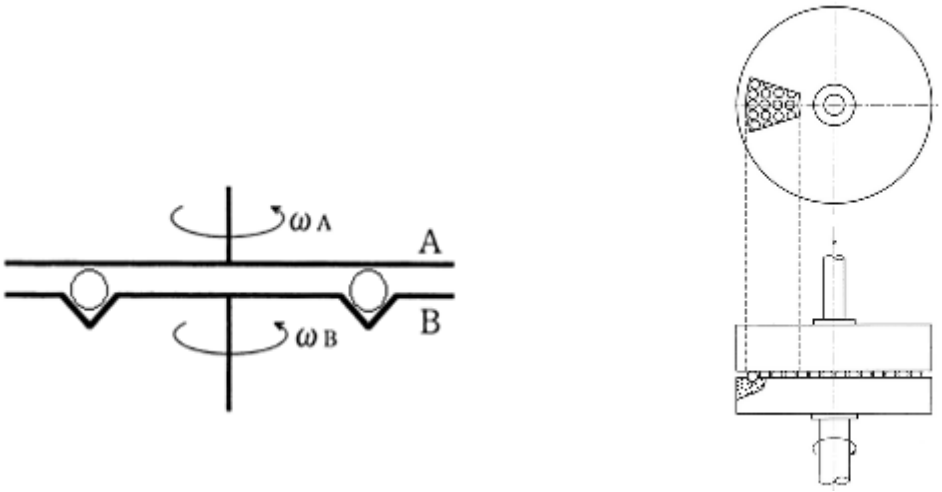
ferramenta de corte, fluido de usinagem e carga de usinagem na taxa de remoção de material e na esfericidade dos produtos (MA, 2013). A Figura 13 mostra a sequência das etapas realizadas para a fabricação de esferas de rolamento de aço.

Figura 13 – Etapas para a fabricação de esferas de aço para rolamentos (SCHAEFFLER).

Conforme mostrado pela Figura 13 a fabricação começa com o corte de cilindros para a conformação das esferas através de prensagem, como mostrado em (b). A esfera conformada apresenta uma rebarba ao redor de um diâmetro equatorial e calotas nos pólos, essas marcas são retiradas através de usinagem de desbaste, geralmente efetuada com dois discos paralelos de ferro fundido. No disco inferior há canais para alojamento das esferas, um disco gira e o outro permanece estacionário. As esferas são peridicamente retiradas da zona de usinagem entre os discos e retornam com uma orientação diferente, para que a usinagem seja realizada por toda a superfície da esfera. Após as esferas alcançarem a medida desejada elas são temperadas para o aumento da dureza e da resistência mecânica. Após o tratamento térmico as esferas são então retificadas, lapidadas e polidas para a melhora do acabamento superficial e diminuição do erro de circularidade.

Inagaki e Abe[1] (1976 apud Ma, 2013, p. 3) realizaram experimentos com 14 tipos de máquinas para a fabricação de esferas para rolamentos e chegaram a conclusão de que o sistema que utiliza o método da usinagem com a face plana de um rebolo era o método que alcançava os melhores resultados em termos de esfericidade e acabamento superficial das esferas. Utilizando abrasivos #500, rotação do rebolo de arraste abaixo de 100 rpm, rebolo de corte parado e tempo de fabricação de 50 horas alcançaram uma taxa de redução do diâmetro de 0,3 µm/min, esfericidade de 1 µm e rugosidade superficial média de 0,1 µm. A Figura 14 mostra o conceito e um exemplo do método de usinagem com a face plana de um rebolo.

[1] K. Inagaki, K. Abe. Evaluation of performance of minute sphere grinders prepared for trial (in Japanese), Report of Science and measurement research institute. Tohoku University 1976, 25, 1, 49-65.



(a) (b)

Figura 14 – Método de usinagem de esferas de aço para rolamentos, em (a) diagrama esquemático (adaptado de KANG,2001) e em (b) desenho do mecanismo (adaptado de US6171179, 2001).

A Figura 14 mostra em (a) o diagrama esquemático da usinagem de esferas e em (b) o mecanismo da usinagem de esferas com a face plana de um rebolo, nesse método o disco B é o disco de arraste responsável pelo movimento das esferas que no momento da usinagem ficam alojadas em canais em "V" concêntricos, o rebolo de corte A pode girar ou permanecer estacionário, em qualquer caso o rebolo de corte A aplica uma carga vertical comprimindo as esferas.

A Figura 15 mostra as grandezas utilizadas para o estudo do movimento das esferas aplicado ao método de usinagem do canal em "V" concêntrico.

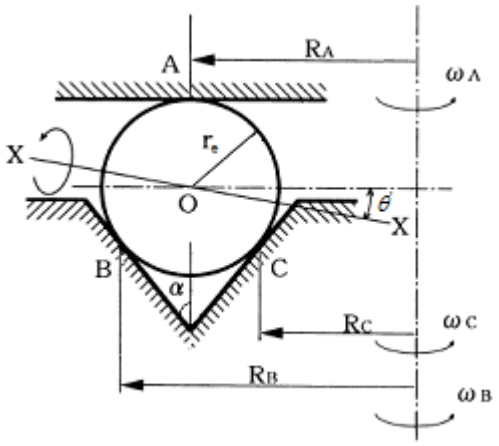
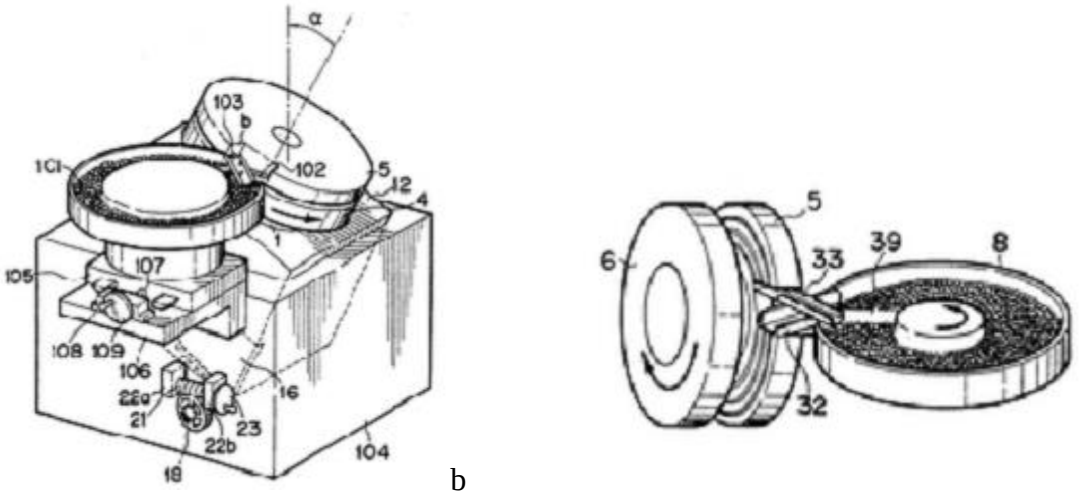


Figura 15 - Grandezas utilizadas para o estudo do movimento das esferas com canal em V concêntrico (adaptado de KUROBE et. al.,1996).

Considerando as esferas e os rebolos corpos rígidos e a ausência de escorregamento, através do equacionamento da cinemática do movimento da esfera, foi encontrado o valor do ângulo de giro das esferas (nessa equação definido entre o eixo de rotação instantâneo da esfera e a horizontal) para o sistema com dois rebolos da Figura 14 (LEE; HWANG; CHIOU, 2006a; ZHANG et al., 2004), ele é mostrado pela Equação 5.

$$\theta' = arctg\left(\frac{R_e.sen\alpha}{R_A}\right) \tag{5}$$

Observando a Equação 6 percebe-se que o ângulo de giro é determinado pelo raio da esfera, pelo raio do rebolo de arraste e pelo ângulo do canal em V, ou seja, quase não muda durante o processo. Portanto as trilhas de usinagem são círculos concêntricos, o que resulta na usinagem não uniforme das esferas. As esferas precisam sair e entrar novamente no espaço entre os dois discos para que sua orientação seja alterada e a usinagem atinja a maior parte possível da superfície, para que o acabamento superficial e a esfericidade resultantes sejam adequados (LEE; HWANG; CHIOU, 2006b). A Figura 16 mostra dois possíveis métodos para se realizar a alimentação das esferas: em (a) eixos oblíquos entre os discos da zona de usinagem e de movimentação e em (b) eixos reversos, com a superfície do rebolo de corte no plano vertical.



(a) (b)

Figura 16 – Métodos de usinagem de esferas, em (a) eixos oblíquos entre os discos de alimentação e corte e em (b) eixos reversos entre os discos de alimentação e corte (US5301470 A, 1994).

Com o desenvolvimento dos materiais cerâmicos, esferas cerâmicas de precisão gradualmente substituíram as esferas de aço em aplicações de alta velocidade, alta temperatura, ambiente hostil e aeroespaciais. Contudo, a fabricação das esferas cerâmicas de precisão ainda utiliza os equipamentos tradicionais. Na década de 1980 pesquisas foram realizadas para o desenvolvimento de novos métodos e equipamentos de usinagem de esferas cerâmicas (MA, 2013).

Umehara e Kato[2] (1988 apud Ma, 2013, p. 3) publicaram um artigo no ano de 1988 em que expunham a tecnologia da usinagem de esferas cerâmicas com fluido magnético. Conforme mostrado pela Figura 17, as esferas são alojadas na célula de usinagem, imersas no fluido magnético, assim como os abrasivos e um disco, sendo todos os sólidos de material não ferromagnético. O reservatório se encontra sobre uma base na qual existem barras magnetizadas, com seus pólos norte apontando alternadamente para cima e para baixo. O campo magnético resultante que atravessa o fluido produz uma força vertical para cima que age sobre todos os materiais não ferromagnéticos, assim, as esferas são forçadas contra o eixo e empurradas pelo disco. Conforme o eixo gira, as partículas abrasivas promovem a usinagem das esferas (UMEHARA et al., 2006). Após 3 horas de usinagem utilizando abrasivos #400 foi obtido uma taxa de redução de diâmetro de 12 µm/min, esfericidade de 0,14 µm e acabamento superficial médio de 0,01 µm.

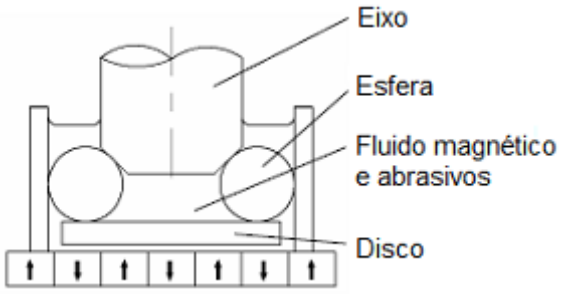
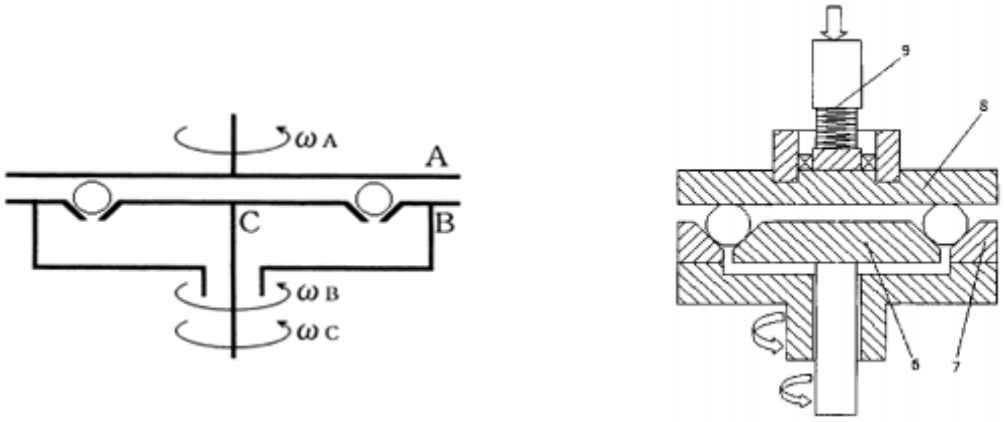


Figura 17 – Esquema do método de usinagem de esferas cerâmicas com fluido magnético (adaptado de ZHANG et. al.,2004).

Em 1996 Kurobe, Kakuta e Onada realizaram uma modificação do aparato mostrado na Figura 14 através da divisão do rebolo inferior de arraste em dois rebolos separados com rotações independentes, conforme mostrado pela Figura 18 (KUROBE; KAKUTA; ONODA, 1996).

[2] N. Umehara, K. Kato. A study on magnetic fluid grinding: 1st report, the effect of the floating pad on removal rate of Si3N4 balls (in Japanese). Trans. JSME 1988, 54, 1599-1604.



(a) (b)

Figura 18 - Princípio de funcionamento de usinagem de esferas cerâmicas com canal em V concêntrico com três rebolos, em (a) diagrama esquemático (adaptado de KANG, 2001) e em (b) desenho do mecanismo (CN101579840 B).

Através da aplicação das mesmas hipóteses ao movimento das esferas do sistema da Figura 18 chega-se a uma nova expressão para o ângulo de giro, conforme mostrado pela Equação 6 (KUROBE; KAKUTA; ONODA, 1996).

$$\theta' = arctg\left[\frac{R_A R_B\left(\omega_B-\omega_A\right)sen\alpha - R_A R_C\left(\omega_C-\omega_A\right)sen\alpha + R_A R_C\left(\omega_B-\omega_C\right)}{R_A R_B\left(\omega_B-\omega_A\right)\cos\alpha + R_A R_C\left(\omega_C-\omega_A\right)\cos\alpha}\right] \quad (6)$$

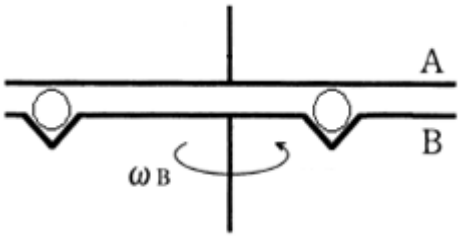
Conforme mostrado pela Equação 6 o ângulo de giro depende não apenas da geometria do equipamento, mas também das velocidades angulares dos três rebolos. Portanto o ângulo de giro pode ser controlado através da composição das rotações dos três pontos de contato da esfera. Com a diminuição do ângulo de giro ocorre o aumento da taxa de remoção de material, devido ao aumento da distância de deslizamento na superfície de contato entre a esfera e o rebolo de corte (KUROBE; KAKUTA; ONODA, 1996).

Kurobe, Kakuta e Onada[3] (1997 apud Ma, 2013, p. 3) através desse método produziram esferas com esfericidade de 2,5 µm e um acabamento superficial médio de 0,1 µm.

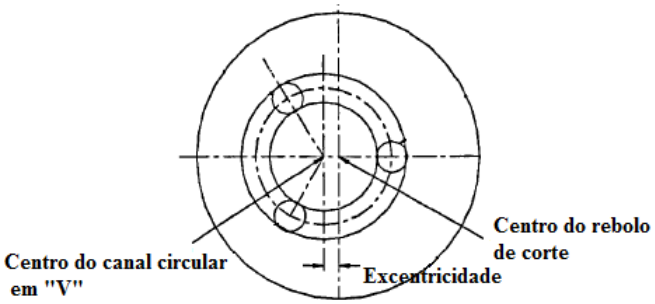
Outra modificação no conceito tradicional da usinagem com dois rebolos com faces paralelas foi realizada por Kang e Hadfield em 2001 ao promoverem a existência de

[3] T. Kurobe, H. Kakuta, M. Onoda. Spin angle control lapping of balls (2nd Report) -Lapping of silicon nitride ball- (in Japanese). J. JSPE 1997, 63, 5, 726-730.

excentricidade entre o eixo de giro do rebolo de arraste e o eixo geométrico do canal em “V”, conforme mostrado pela Figura 19. Nessa configuração o rebolo de corte permanece parado. Devido à presença da excentricidade ocorre o aumento e a diminuição da velocidade de circulação das esferas, que deslizam entre os rebolos, e o ângulo de giro muda continuamente. A carga vertical sobre cada esfera também muda continuamente (KANG, 2001). A taxa de remoção de material é de 2 a 8 vezes maior que o método tradicional da usinagem com canal em “V” concêntrico com dois rebolos (ZHANG et al., 2004).



(a)

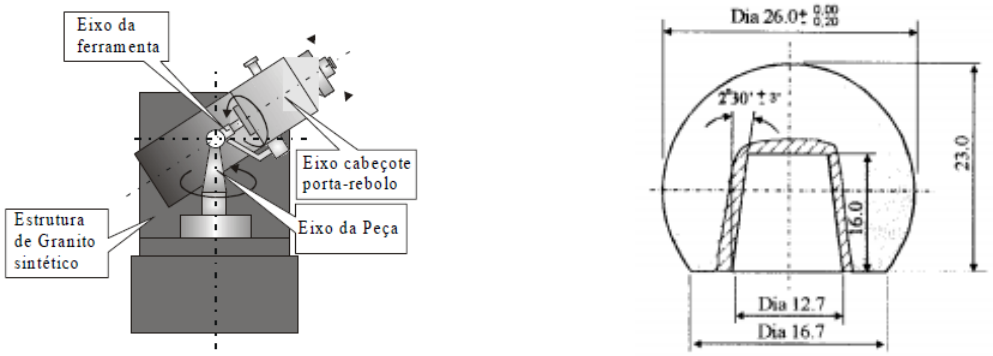


(b)

Figura 19 – Método de usinagem com dois rebolos excêntricos, em (a) diagrama esquemático em vista frontal (adaptado de KANG,2001) e em (b) diagrama esquemático em vista superior (adaptado de KANG,2001).

Os resultados obtidos através da aplicação desse método de usinagem foram: 0,09 µm de esfericidade e 0,004 µm de acabamento superficial médio (KANG; HADFIELD, 2001).

Todos os métodos de usinagem de esferas apresentados são classificados como métodos de usinagem sem centro, pois as esferas não são fixadas a nenhuma peça e são movimentadas livremente. Para a fabricação específica de esferas cerâmicas para implante de quadril foi desenvolvido um método para a usinagem de esferas cerâmicas com centro, conforme mostrado pela Figura 20.



(a) (b)

Figura 20 – Usinagem de esferas cerâmicas com centro, em (a) esquema da máquina e em (b) esfera femoral.

Conforme mostrado pela Figura 20 (a) a usinagem da esfera é realizada através de três movimentos: rotação do eixo da peça, onde a esfera se encontra alojada, oscilação do eixo cabeçote porta-rebolo e rotação do eixo da ferramenta. A esfera femoral não é maciça, conforme mostrado em (b), existe um furo para a fixação da haste femoral, esse furo é então utilizado para a fixação da esfera no eixo da peça. As esferas produzidas com esse método alcançaram rugosidade superficial de 0,14 µm e erro de circularidade de 5 µm (WREGE; PURQUERIO, 2001) . A desvantagem do método é o alto tempo necessário para a produção de uma única esfera.

A Tabela 2 reúne os desempenhos dos diferentes projetos de máquinas para a usinagem de esferas.

Tabela 2 – Comparação de desempenho entre diferentes projetos de máquina de usinagem de esferas.

Projeto	Ano	Rugosidade (µm)	Esfericidade (µm)
Canal em “V” concêntrico	1976	0,1	1
Usinagem com fluido magnético	1988	0,01	0,14
Controle do ângulo	1997	0,1	2,5
Canal em “V” excêntrico	2000	0,004	0,09
Usinagem com centro	2000	0,14	5

2.5. Validação

Para a validação da máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes o acabamento superficial e a circularidade das esferas produzidas devem ser medidos. Após a usinagem do compactado as esferas devem ser sinterizadas e usinadas para a correção das distorções. Porém o acabamento superficial e a circularidade das esferas a verde têm impacto direto nas características das esferas sinterizadas. Quanto melhores forem os resultados obtidos na usinagem das peças verdes, menor será a distorção resultante da sinterização e, portanto, menor será a necessidade da usinagem de acabamento.

2.5.1. Medição de circularidade

O desvio de circularidade "é o desvio do perfil de circularidade medido em relação a um perfil de circularidade ideal" e o valor deste desvio é "a diferença entre o maior raio e o menor raio do perfil medido; estes raios devem ser medidos em relação ao mesmo ponto". A Figura 21 mostra a relação entre o perfil real da peça e os círculos ideais.

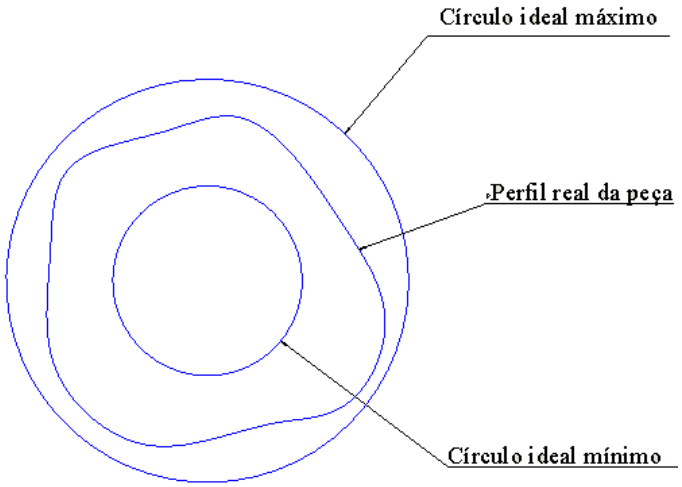


Figura 21 – Perfil da peça real representado entre os círculos ideais definidos pela tolerância.

A medição da circularidade é regulada por normas técnicas, que especificam o modo de se efetuar as medições.

Diversos métodos podem ser utilizados para a medição da circularidade de uma peça, como o círculo dos mínimos quadrados, o círculo mínimo circunscrito, o círculo da mínima zona e o círculo máximo inscrito.

A circularidade pode ser medida em uma máquina de medição de forma ou máquina de medir por coordenadas, o resultado é um gráfico como o mostrado na Figura 22.

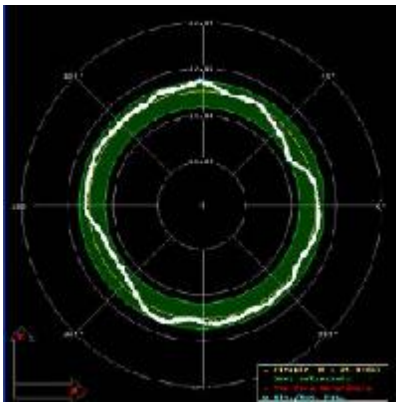


Figura 22 – Gráfico resultante da medição de circularidade da cabeça de prótese de quadril em máquina de medir por coordenadas (SOUZA, 2011).

Segundo a norma ISO 7206-2:2011 o desvio de esfericidade para cabeças femorais de metal ou de cerâmica deve ter um valor de separação radial não maior que 10µm (SOUZA,2011).

2.5.2. Medição de acabamento superficial

As superfícies de peças sempre apresentam irregularidades mesmo as que parecem perfeitamente lisas e polidas tanto ao tato quanto a visão. O grau de irregularidade depende do processo de fabricação e da existência de erros de alinhamento ou fixação na máquina. A irregularidades podem ser divididas em erros macro geométricos e erros micro geométricos. Os erros macro geométricos são os erros de forma e ondulações existentes na superfície da peça. Os erros micro geométricos são os erros provocados pela ferramenta na superfície da peça e são conhecidos como rugosidade. A textura da superfície é a composição dos erros de forma, ondulações e rugosidade na peça.

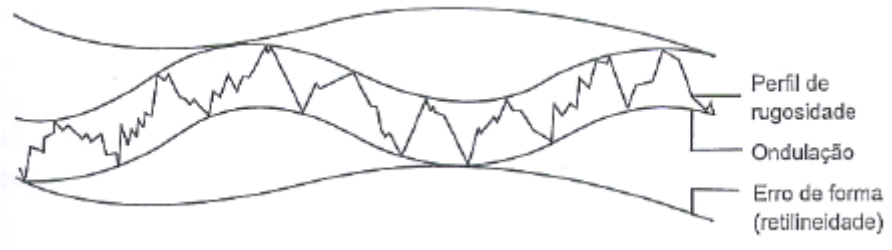


Figura 23 – Composição resultante na textura de superfície (SOUZA, 2011).

A Figura 23 mostra a textura de uma superfície como composta pelo erro de forma, ondulação e rugosidade.

A medição da rugosidade é especificada por norma e a ABNT utiliza o sistema M, sistema da linha média, no qual todas as grandezas de medição da rugosidade são definidas a partir do conceito da linha média: linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento de amostragem L. Existem diversos sistemas de cálculo da rugosidade baseados na profundidade da rugosidade como desvio médio aritmético (R_a), desvio médio quadrático (R_q), altura das irregularidades de 10 pontos (R_z), altura máxima das irregularidades ($R_{máx)}$ e profundidade média (R_p) (AGOSTINHO, RODRIGUES, LIRANI; 1977).

Os instrumentos para medição de rugosidade podem ser divididos entre os instrumentos que operam com conato e os sem contato. O perfilômetro por contato é um método tradicional de medição da rugosidade superficial, a medição de uma esfera femoral através de um perfilômetro por contato é mostrada na Figura 24.

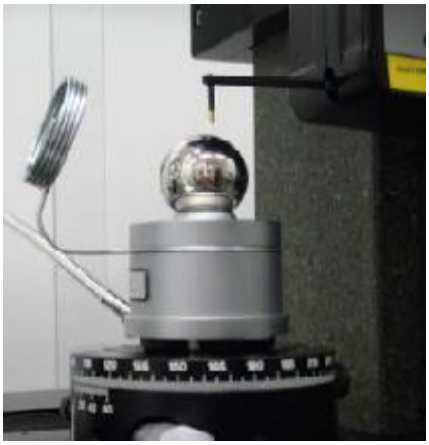


Figura 24 – Medição de rugosidade de esfera femoral com contato. (SOUZA, 2011).

Na medição do acabamento superficial de cabeças femorais cerâmicas ao se utilizar um comprimento de amostragem de 0,08 mm, o valor R_a não deve ser maior que 0,02 µm (SOUZA, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata da descrição do projeto da máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes que utiliza algumas ferramentas da metodologia de projeto mecânico e segue a divisão do projeto em quatro etapas consecutivas. Na sequência o processo do projeto do molde para a prensagem das esferas cerâmicas é abordado e finalmente é elaborada uma descrição da movimentação da esfera.

3.1. Projeto da máquina

O projeto da máquina de usinagem de esferas cerâmicas seguiu a abordagem de divisão do processo em quatro etapas: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. No projeto informacional os requisitos de projeto são levantados através do estudo da literatura em artigos e patentes de máquinas de usinagem de esferas cerâmicas. No projeto conceitual o conceito da máquina é definido através de ferramentas da metodologia de projeto como a combinação de variantes e quadro morfológico.

3.1.1. Projeto informacional

Na fase denominada projeto informacional pesquisas foram realizadas com o objetivo do conhecimento dos princípios de solução e métodos utilizados para a usinagem de esferas cerâmicas. A pesquisa foi realizada através da leitura de artigos acadêmicos que estudam os métodos de usinagem de esferas e patentes que mostram diferentes princípios de solução.

Como requisito de projeto, a partir dos princípios de funcionamento dos modelos existentes de máquinas para a usinagem de esferas, conclui-se que a usinagem de esferas implica na remoção de material através da ferramenta de corte e na variação espacial do eixo de giro da esfera, através da variação eficiente do eixo de giro chega-se a melhores resultados tanto da esfericidade quanto do acabamento superficial do produto. Também foi considerado que a usinagem de esferas implica na coleta do pó gerado no processo, para seu reaproveitamento na fabricação de outras peças.

3.1.2. Projeto conceitual

Para o início do projeto conceitual elaborou-se o diagrama lógico do processo de usinagem de esferas cerâmicas mostrado na Figura 25:

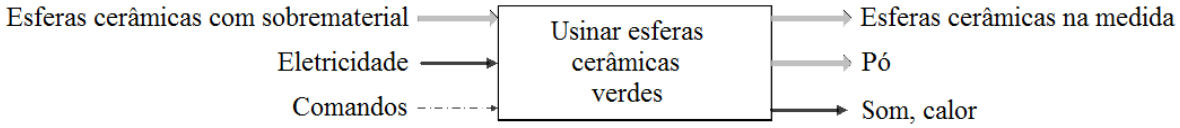


Figura 25 - Diagrama lógico da função de projeto.

O diagrama lógico mostrado na Figura 25 estabelece a função global de projeto como um bloco que tem como entradas as esferas cerâmicas com sobrematerial, eletricidade e comandos e como saídas as esferas cerâmicas na medida desejada, pó coletado do processo de usinagem para a fabricação de outras esferas e som e calor como energia dissipada.

A partir da função global da máquina, usinar esferas cerâmicas verdes, pode-se desdobrar as funções secundárias necessárias a realização da função global e outras sub-funções necessárias para realização das secundárias. A Figura 26 mostra a função global composta por três funções secundárias: variar orientação das esferas, retirar material das esferas e coletar o pó gerado no processo. A função secundária variar orientação das esferas é composta pela função transmitir movimento, a função secundária retirar material das esferas cerâmicas é composta por duas sub-funções: aplicar carga compressiva e movimentar ferramenta de corte, essa sub-função é ainda composta pela sub-função transmitir movimento e a última função secundária, coletar o pó, é composta pelas sub-funções remover o pó e armazenar o pó.

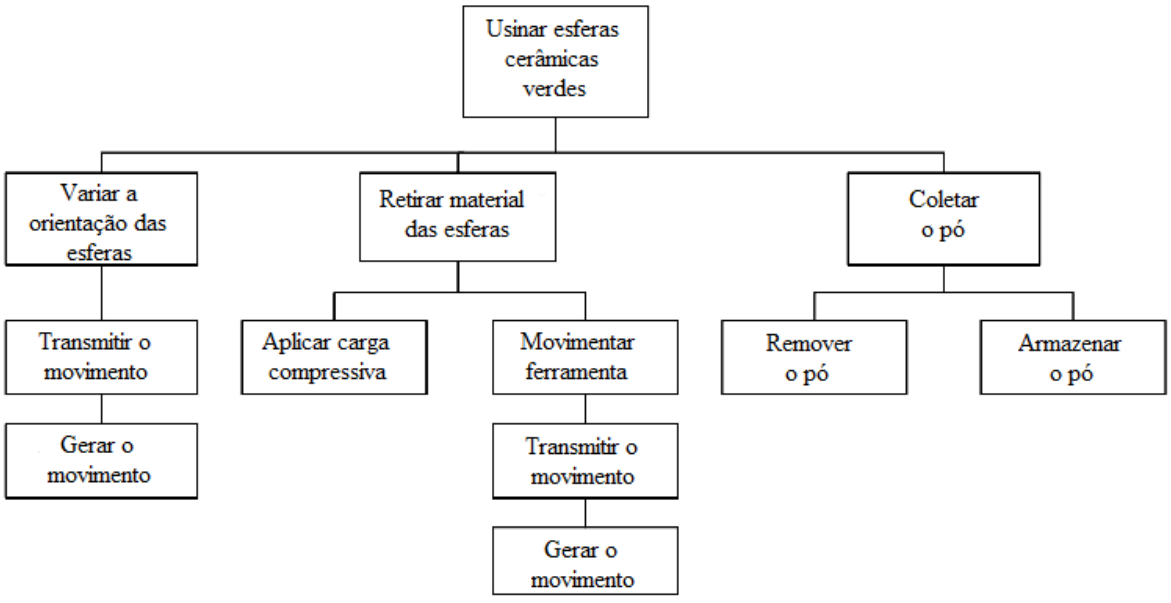


Figura 26 – Estrutura funcional da máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes.

Para a análise dos princípios de solução que atendam as funções consideradas na Figura 26 foi utilizado o método da combinação de variantes. Cada função sob análise teve alguns critérios considerados.

A primeira função considerada, variar a orientação das esferas cerâmicas, pode ser realizada através da circulação das esferas entre a zona de usinagem e o ambiente externo, pode ser realizada através do sistema que controla as rotações de dois rebolos de arraste independentes e pode ser realizada através da existência de excentricidade entre o canal circular em "V" e o eixo da ferramenta de corte. O primeiro sistema de variação da orientação do eixo das esferas foi denominado externo, o segundo sistema controle de rebolos e o terceiro sistema de excentricidade. Os critérios considerados foram custo, montagem, fabricação, eficiência e manutenção. A Tabela 3 mostra a aplicação do método da combinação de variantes para variação de orientação das esferas.

Tabela 3 – Combinação de variantes aplicada ao método de variação do eixo das esferas.

		Externo		Controle rebolos		Excentricidade	
Critério	**Peso do critério**	**V1**	**WixV1**	**V2**	**WixV2**	**V3**	**WixV3**
Custo	5	2	10	3	15	4	20
Montagem	3	3	9	4	12	5	15
Fabricação	3	4	12	3	9	5	15
Eficiência	4	3	12	4	16	4	16
Manutenção	3	3	9	4	12	5	15
Somatória	18	15	52	18	64	23	81
Valor global	-	0,57		0,71		0,9	

Pela análise da Tabela 3 conclui-se que o sistema que utiliza a excentricidade é o mais vantajoso, sendo o sistema externo o pior desempenho. Nesse projeto foi utilizada uma combinação do sistema de controle de rebolos e o sistema com excentricidade.

Para a movimentação dos rebolos de arraste é necessário definir do tipo de acionamento. Podem ser utilizados motores de passo, servo motores ou motores de corrente alternada. Os critérios utilizados foram custo, montagem, nível de complexidade do controle, controle de variação da velocidade do motor, precisão e torque. A Tabela 4 mostra a aplicação do método da combinação de variantes para o acionamento do sistema de movimentação dos rebolos de arraste.

Tabela 4– Combinação de variantes aplicada ao acionamento dos rebolos de arraste.

		Motor de passo		Servo motor		Corrente alternada	
Critério	**Peso do critério**	**V1**	**WixV1**	**V2**	**WixV2**	**V3**	**WixV3**
Custo	5	4	20	2	10	5	25
Montagem	3	3	9	2	6	2	6
Complexidade	4	4	16	3	12	5	20
Variação velocidade	4	4	16	5	20	2	8
Precisão	5	4	20	5	25	2	10
Torque	3	3	9	5	15	4	12
Somatória	24	22	90	22	88	20	81
Valor global	-	0,75		0,73		0,68	

A próxima função considerada, transmitir o movimento, pode ser realizada com a utilização de engrenagens, correia ou corrente. Os critérios considerados foram o custo, montagem, disponibilidade de itens comerciais, precisão e manutenção. A Tabela 5 mostra a aplicação do método da combinação de variantes para a transmissão do movimento.

Tabela 5– Combinação de variantes aplicada ao sistema de transmissão de movimento.

		Engrenagens		Correia dentada		Corrente	
Critério	**Peso do critério**	**V1**	**WixV1**	**V2**	**WixV2**	**V3**	**WixV3**
Custo	5	3	15	4	20	4	20
Montagem	3	3	9	4	12	4	12
Itens comerciais	3	5	15	5	15	5	15
Precisão	4	3	12	5	20	5	20
Manutenção	3	3	9	5	15	5	15
Somatória	18	17	60	23	82	23	82
Valor global	-	0,67		0,91		0,91	

Pela análise da Tabela 5 percebe-se que houve empate entre as pontuações da correia dentada e corrente. Ambas apresentam as mesmas características de manutenção facilitada, itens disponíveis comercialmente a baixo custo e alta precisão.

A próxima função considerada, retirar material das esferas cerâmicas, foi atendida com um cabeçote de retificadora disponível no LTC, nesse cabeçote é fixado rebolo de corte para a retificação das esferas cerâmicas.

A próxima função considerada, aplicar carga compressiva, pode ser realizada através de acionamento manual, com motor elétrico, pneumático ou hidráulico. Os critérios considerados foram o custo, montagem, fabricação, disponibilidade de itens comerciais, precisão e manutenção. A Tabela 6 mostra a aplicação do método da combinação de variantes para o acionamento da carga compressiva nas esferas.

Tabela 6– Combinação de variantes aplicada ao acionamento da carga compressiva nas esferas.

		Manual		Motor elétrico		Pneumático		Hidráulico	
Critério	**Peso do critério**	**V1**	**WixV1**	**V2**	**WixV2**	**V3**	**WixV3**	**V4**	**WixV4**
Custo	5	5	25	4	20	4	20	2	10
Montagem	3	4	12	4	12	4	12	3	9
Fabricação	3	2	6	4	12	4	12	4	12
Itens comerciais	3	2	6	4	12	4	12	4	12
Precisão	4	2	8	5	20	4	16	4	16
Manutenção	3	4	12	4	12	4	12	3	9
Somatória	21	19	69	25	88	24	84	20	68
Valor global	-	0,66		0,84		0,80		0,65	

A análise da Tabela 6 mostra que a maior pontuação no acionamento da carga compressiva nas esferas foi obtida pelo motor elétrico. Devido à necessidade de controle da carga aplicada o motor elétrico foi escolhido para o acionamento da carga compressiva nas esferas.

A estrutura da máquina também foi analisada através do método da combinação de variantes. As variantes selecionadas foram: estrutura feita de perfis de alumínio, metal fundido, metal soldado (metalon) ou granito sintético. Os critérios utilizados foram o custo, a montagem, a disponibilidade de itens comerciais e a rigidez estática e dinâmica. A Tabela 7 mostra a aplicação do método da combinação de variantes para a estrutura da máquina.

Tabela 7– Combinação de variantes aplicada para a estrutura da máquina.

		Perfil de alumínio		Metal fundido		Metal soldado		Granito sintético	
Critério	**Peso do critério**	**V1**	**WixV1**	**V2**	**WixV2**	**V3**	**WixV3**	**V4**	**WixV4**
Custo	5	4	20	2	10	5	25	4	20
Montagem	3	4	12	2	6	4	12	2	6
Itens comerciais	3	5	15	2	6	5	15	2	6
Rigidez	5	2	10	4	20	3	15	5	25
Somatória	16	15	57	10	42	17	67	13	57
Valor global	-	0,71		0,53		0,84		0,71	

A análise da Tabela 7 mostra que o metal soldado alcançou a maior pontuação, seguido do perfil de alumínio e do granito sintético, que estão empatados, e por último o metal fundido. Para a fabricação da estrutura da máquina foi utilizado o metal soldado e a base foi feita de granito sintético, devido a sua propriedade de alto amortecimento de vibrações, o que o torna um material de destaque na estrutura de máquinas.

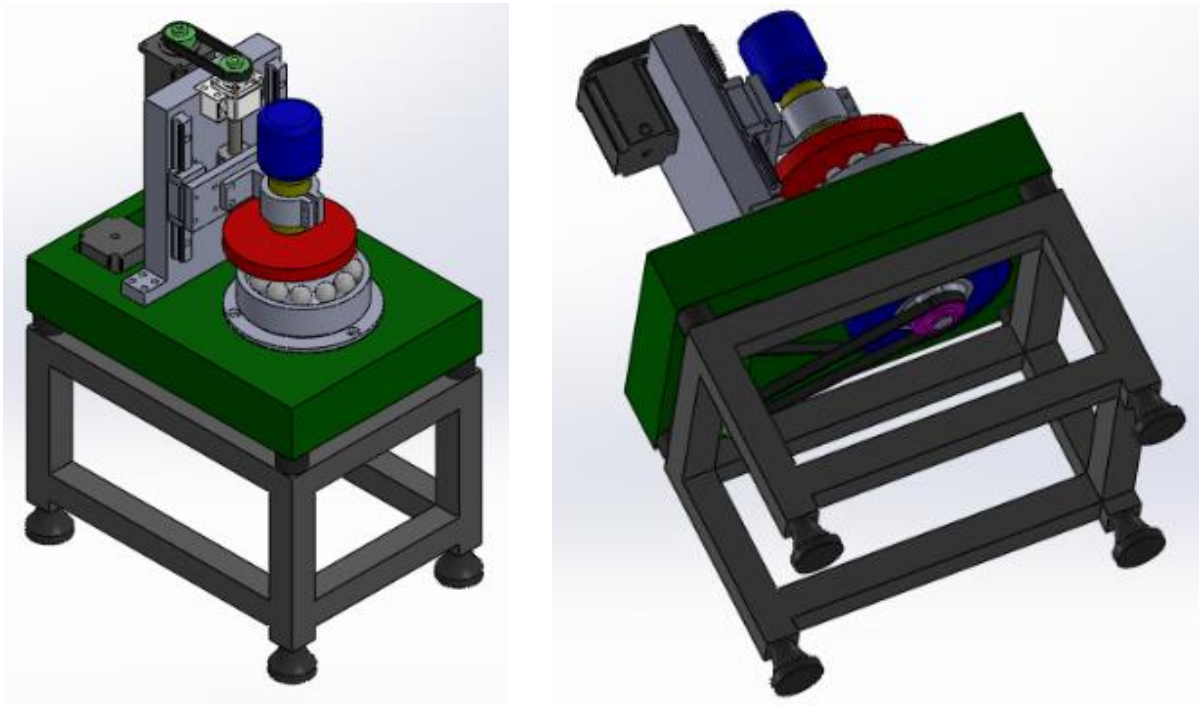
Reunindo as informações obtidas com o método da combinação de variantes é apresentada a matriz morfológica, no Quadro 1.

Quadro 1 – Matriz morfológica para a máquina de usinagem de esferas.

Funções	Princípios de solução			
Variar orientação das esferas	Externo	Controle do ângulo	Excentricidade	
Transmitir movimento de arraste	Engrenagem	Correia dentada	Corrente	Acoplamento
Acionar movimento de arraste	Motor de passo	Servo motor	Motor DC	Motor CC
Retirar material das esferas	Rebolo rígido	Rebolo flexível	Fluido magnético	
Transmitir movimento de corte	Engrenagem	Correia dentada	Corrente	Acoplamento
Acionar movimento de corte	Motor de passo	Servo motor	Motor DC	Motor CC
Aplicar carga compressiva	Manual	Elétrico	Pneumático	Hidráulico
Remover o pó	ar	água		
Estruturar elementos	Perfil de alumínio	Metal fundido	Metal soldado	Granito sintético

A matriz morfológica mostrada no Quadro 1 exibe os princípios de solução considerados para cada variante, e as variantes melhor pontuadas em fundo escuro.

Considerando os resultados encontrados com a aplicação do método da combinação de variantes foi desenhado em CAD Solidworks um esboço para a máquina, mostrado pela Figura 27.



(a) (b)

Figura 27 – Esboço em CAD da máquina de usinagem de esferas cerâmicas. Em (a) vista isométrica. Em (b) exibição da face inferior da mesa.

A Figura 27 mostra o esboço em CAD da máquina de usinagem de esferas cerâmicas com os resultados apontados pelo método da combinação de variantes. A movimentação das esferas é feita por dois rebolos de arraste que são acionados por motores de passo com transmissão por polias e correias. A estrutura da máquina é de metal soldado com a base em granito sintético. O conjunto de usinagem é formado por um cabeçote de retificadora com rebolo como ferramenta de corte, acionado por um motor elétrico de corrente alternada, todo o conjunto é movimentado verticalmente por um motor de passo acoplado a um fuso de esferas com transmissão por polias e correia. Guias lineares são utilizadas no movimento vertical.

3.2. Projeto do molde

Como o diâmetro final das esferas objetivado por esse trabalho é de 22 mm, a sequência de retrações provocadas pela prensagem e sinterização e o sobrematerial para a usinagem das peças verdes e usinagem de acabamento devem ser considerados para o correto dimensionamento do diâmetro do molde elastomérico. Wrege (2000) utilizou 2 mm de sobre

material para a usinagem a verde e 0,1 mm de sobre material para a usinagem de acabamento para a fabricação de esferas de 26 mm de diâmetro.

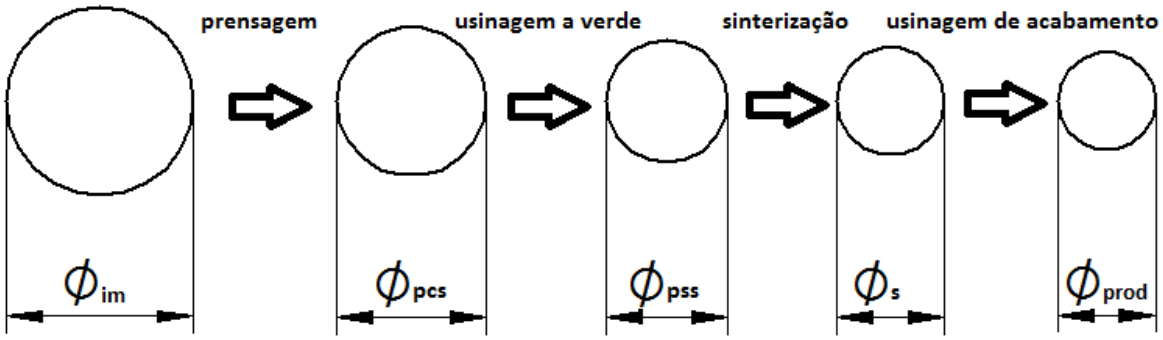


Figura 28 – Seqüência de operações para a fabricação da esfera com os respectivos diâmetros anterior e posterior a cada etapa da fabricação, $Ø_{im}$ é o diâmetro interno do molde, $Ø_{pcs}$ é o diâmetro do prensado com sobre-material, $Ø_{pss}$ é o diâmetro do prensado sem sobre-material, $Ø_{s}$ é o diâmetro do sinterizado e $Ø_{prod}$ é o diâmetro do produto.

A Figura 28 mostra a sequência de operações para a fabricação das esferas cerâmicas, mostrando os diâmetros anterior e posterior das esferas a cada etapa de fabricação. Partindo do diâmetro final de 22 mm e considerando o processo de usinagem de acabamento e um sobrematerial de 0,1 mm através da Equação 2 calculou-se o diâmetro da peça sinterizada:

$$Ø_s = Ø_{prod} + s = 22 + 0{,}10 = 22{,}10\,mm \tag{7}$$

Considerando então o processo de sinterização e sua retração linear característica de 16%, através da Equação 1 calculou-se o diâmetro do prensado sem sobrematerial :

$$Ø_{pss} = \frac{Ø_s}{1 - R_s} = \frac{22{,}10}{1 - 0{,}16} = 26{,}31\,mm \tag{8}$$

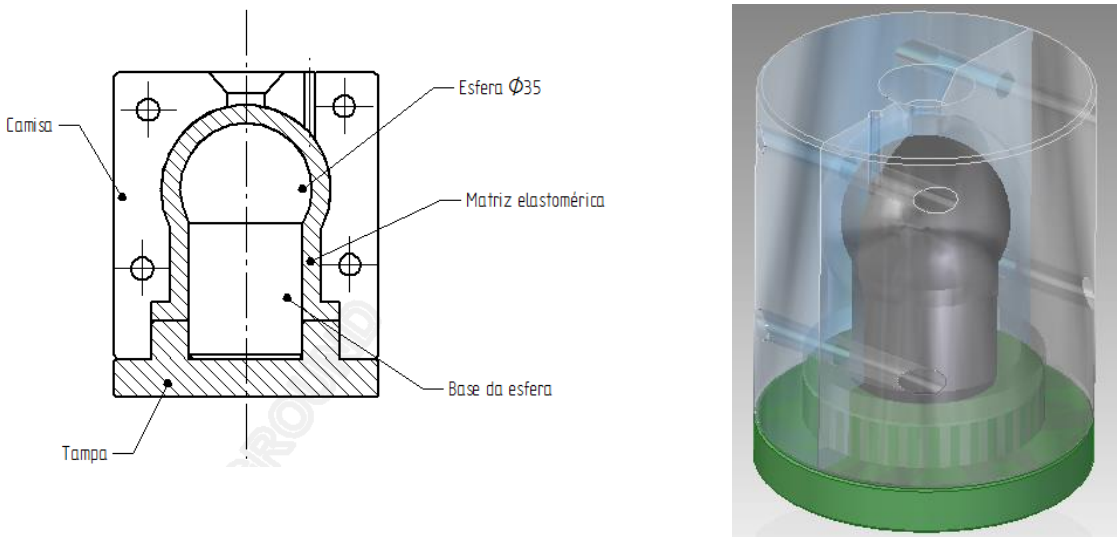
Considerando então o processo de usinagem da peça verde, com sobrematerial de 2 mm no diâmetro, calculou-se o diâmetro do prensado com sobrematerial através da Equação 2:

$$Ø_{pcs} = Ø_{pss} + s = 26{,}31 + 2 = 28{,}31\,mm \tag{9}$$

Considerando então o processo de prensagem isostática e sua retração linear característica de 18%, através da Equação 1 calculou-se o diâmetro interno do molde:

$$Ø_{im} = \frac{Ø_{pcs}}{1 - R_p} = \frac{28,31}{1 - 0,18} = 34,52\,mm \tag{10}$$

A partir do diâmetro do produto final de 22 mm e da sequência de etapas para a fabricação das esferas decidiu-se por utilizar o diâmetro interno da matriz elastomérica de 35 mm, pois foi a esfera de rolamento de diâmetro imediatamente superior a 34,53 mm encontrada. Para a fabricação da matriz elastomérica é necessário o projeto de um molde específico. Para sua fabricação será utilizada uma esfera de rolamento de diâmetro 35 mm que garante o formato esférico ao elastômero.



(a) (b)

Figura 29 – Montagem do molde da peça de elastômero, em (a) vista em corte com a chamada de cada peça e em (b) modelo CAD 3D.

A Figura 29 mostra em (a) um corte do molde para a matriz elastomérica com a chamada das peças utilizadas, uma esfera de rolamento de 35 mm de diâmetro alojada sobre uma base cilíndrica com uma das faces usinada em conicidade para o encaixe da esfera, a base fica sobre uma tampa que tem a função de vedar o conjunto, externamente o molde é fechado através das duas metades da camisa, essa peça é bipartida para a retirada da matriz elastomérica após a solidificação do elastômero, o conjunto é mantido fechado através de pinos inseridos nas metades da camisa. O elastômero é vertido no estado líquido através do furo superior existente na camisa, e toma a forma do molde. Em (b) é mostrado o modelo virtual do molde.

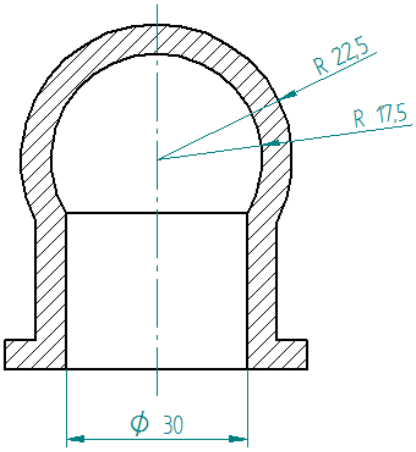
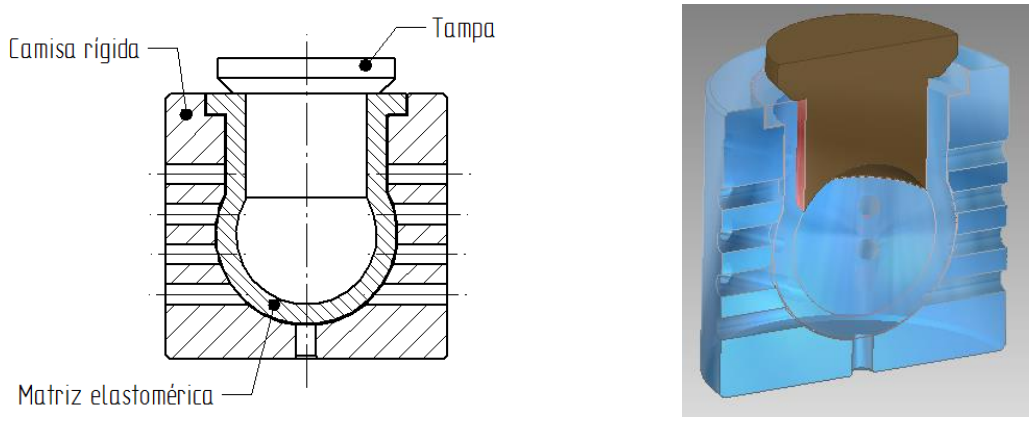


Figura 30 – Vista em corte da matriz elastomérica mostrando os diâmetros interno e externo e o diâmetro da garganta.

A Figura 30 mostra uma vista em corte da matriz elastomérica com o diâmetro interno, externo e o diâmetro da garganta, pelo qual o prensado com sobre material deve passar após a prensagem. Como o diâmetro do prensado com sobre material é menor que 30 mm, o diâmetro de garganta de 30 mm é suficiente para a passagem do prensado.

O molde das esferas cerâmicas é composto da matriz elastomérica, de uma camisa externa em material rígido e de uma tampa também em material elastomérico.

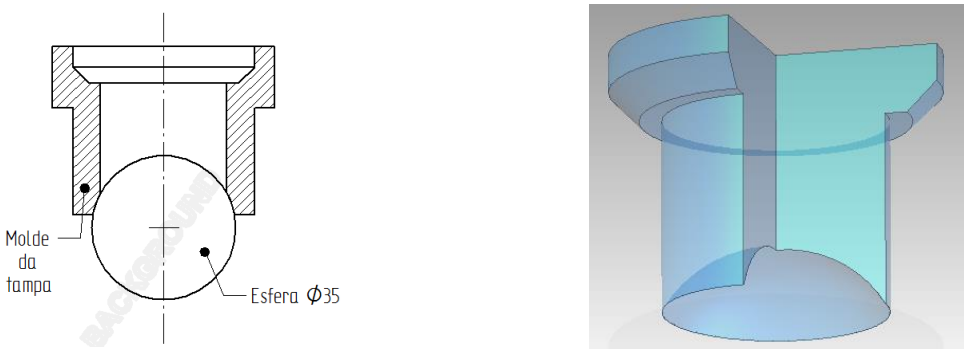


(a) (b)

Figura 31 – Montagem do molde da esfera, em (a) vista em corte com a chamada de cada peça e em (b) vista em corte do modelo CAD.

A Figura 31 mostra em (a) uma vista em corte do molde da esfera com chamada das peças, a matriz elastomérica que aloja o pó cerâmico, a camisa rígida que permite a passagem do fluido pressurizado e sustenta a matriz elastomérica e a tampa elastomérica que fecha o conjunto. Em (b) é mostrada uma vista em corte do modelo CAD 3D.

Para a fabricação da tampa elastomérica também é necessário o projeto de um molde, pois a tampa deve adquirir o formato de calota esférica para a correta conformação do pó. A mesma esfera de rolamento de 35 mm de diâmetro pode ser utilizada.



(a) (b)

Figura 32 – Montagem do molde da tampa, em (a) vista em corte com a chamada de cada peça e em (b) vista em corte do modelo CAD 3D mostrando a concavidade formada na base da tampa.

A Figura 32 mostra em (a) o molde projetado para a conformação da tampa de silicone, o líquido é vertido pela parte superior aberta e o elastômero toma a forma mostrada em (b) com um quarto de peça retirada para a exibição do formato de calota esférica formado na base da tampa para a correta conformação do pó.

3.3. Cinemática das esferas

Para o estudo da cinemática da esfera, foram adotadas as hipóteses de que as esferas e os rebolos de arraste são corpos rígidos e de que não ocorre deslizamento entre ambos. Como o rebolo de corte remove material da esfera, o deslizamento ocorre, a análise da movimentação durante a usinagem deve considerar esse componente. Na presente análise foi realizada uma descrição da movimentação da esfera promovida pelos rebolos de arraste, primeiro passo para a descrição da movimentação durante a usinagem.

Para a presente análise foi utilizada a metodologia dos referenciais em rotação, conforme descrito por Santos (2001). Foi utilizado um sistema de referência inercial I-X,Y,Z tal que o eixo Z coincida com o eixo de simetria do rebolo de arraste interno, e um sistema de referência móvel B1–X1,Y1,Z1 com origem fixada no centro de gravidade da esfera, conforme mostrado pela Figura 33:

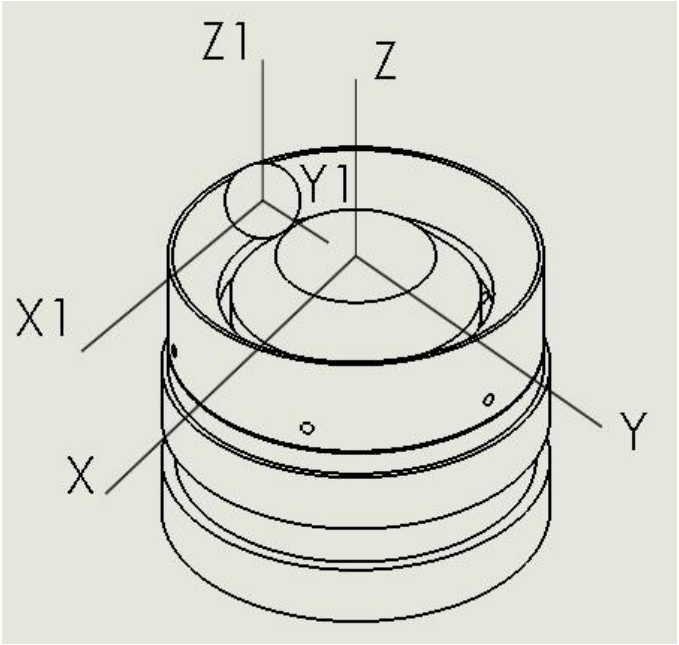


Figura 33 – Definição do sistema de referência inercial I e móvel B1.

O sistema de referência móvel B1 gira em torno do sistema inercial, com velocidade angular $\dot{\gamma}$ de forma que os eixos Z e Z1 se mantenham sempre paralelos.

Para a completa caracterização do movimento, foi ainda utilizado o sistema de referência móvel B2-X2,Y2,Z2; conforme mostrado pela Figura 34:

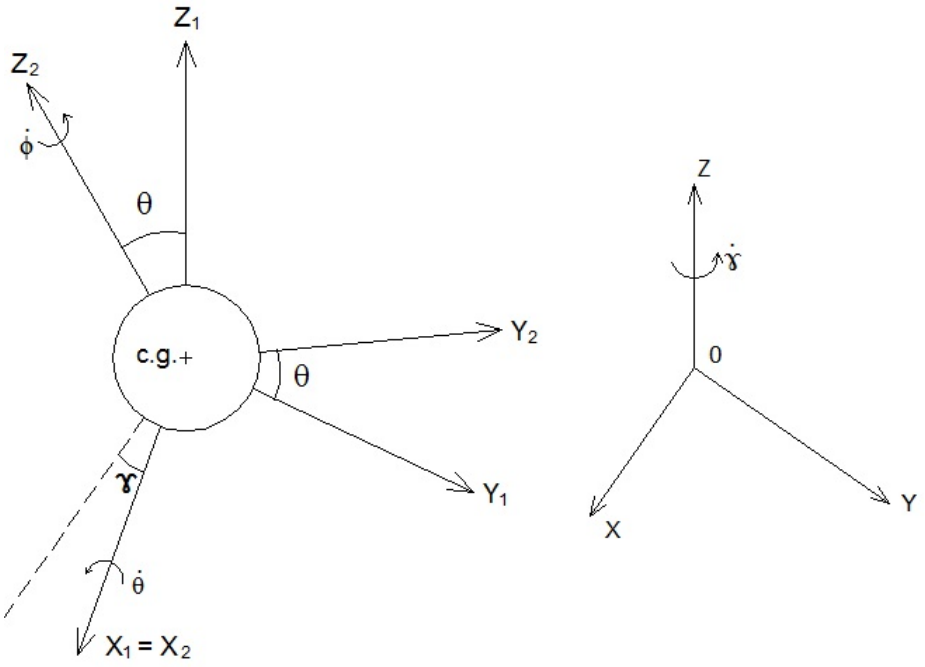


Figura 34 – Sistemas de referência inercial I, móvel B1 e móvel B2.

A Figura 34 mostra que o sistema de coordenadas móvel B2 tem sua origem no centro de gravidade da esfera e seu eixo X2 é coincidente com o eixo X1 e gira em torno deste com velocidade angular $\dot{\theta}$. O eixo Z2 tem a direção do eixo de rotação instantâneo da esfera, que gira com velocidade angular $\dot{\phi}$.

A velocidade angular da esfera em relação a seu centro de gravidade é mostrada pela Equação 11:

$$_{B2}\vec{\Omega} = {}_{B2}\dot{\vec{\theta}} + {}_{B2}\dot{\vec{\phi}} \tag{11}$$

A velocidade angular $\dot{\vec{\theta}}$ representada na base B1 é mostrada pela Equação 12:

$$_{B1}\dot{\vec{\theta}} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{12}$$

Para mudar a representação de $\dot{\vec{\theta}}$ da base B1 para a base B2 é necessário efetuar a multiplicação pela matriz de transformação de coordenadas entre B1 e B2, conforme mostrado pela Equação 13:

$$_{B2}\dot{\vec{\theta}} = T_{\theta} . {}_{B1}\dot{\vec{\theta}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & sen\theta \\ 0 & -sen\theta & \cos\theta \end{pmatrix} . \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{13}$$

A velocidade angular $\dot{\vec{\phi}}$ representada na base B2 é mostrada pela Equação 14:

$$_{B2}\dot{\vec{\phi}} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} \tag{14}$$

A partir das Equações 13 e 14 obteve-se a velocidade angular da esfera em relação a seu centro de massa, conforme mostrado pela Equação 15:

$$ {}_{B2}\vec{\Omega} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} \tag{15} $$

Para representar $\vec{\Omega}$ na base B1 é necessário multiplicar ${}_{B2}\vec{\Omega}$ pela transposta da matriz transformação de coordenadas, conforme mostrado pela Equação 16:

$$ {}_{B1}\vec{\Omega} = T_{\theta}^{t}.{}_{B2}\vec{\Omega} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -sen\theta \\ 0 & sen\theta & \cos\theta \end{pmatrix}.\begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ -\dot{\phi}.sen\theta \\ \dot{\phi}.\cos\theta \end{Bmatrix} \tag{16} $$

Para a representação dos pontos de contato da esfera com os rebolos de arraste foi considerada a nomenclatura mostrada na Figura 15.

A velocidade linear do centro de gravidade da esfera $\vec{v}^{*}$ representada na base B1 é mostrada pela Equação 17:

$$ {}_{B1}\vec{v}^{*} = \begin{Bmatrix} \dot{\gamma}.R_A \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{17} $$

A velocidade linear do ponto C $\vec{v}_C$ representada na base B1 é mostrada pela Equação 18:

$$ {}_{B1}\vec{v}_C = {}_{B1}\vec{v}^{*} + {}_{B1}\vec{\Omega} \times {}_{B1}\vec{r}_C \tag{18} $$

O vetor posição de C em relação ao centro de gravidade da esfera, $\vec{r}_C$, representado em B1, é mostrado pela Equação 19:

$$ {}_{B1}\vec{r}_C = \begin{Bmatrix} 0 \\ r_e.\cos\alpha \\ -r_e.sen\alpha \end{Bmatrix} \tag{19} $$

O produto vetorial da Equação 18 foi calculado conforme mostrado pela Equação 20:

$$ {}_{B1}\vec{\Omega}\times {}_{B1}\vec{r}_C = \begin{vmatrix} \hat{i} & j & k \\ \dot{\theta} & -\dot{\phi}.sen\theta & \dot{\phi}.\cos\theta \\ 0 & r_e.\cos\alpha & -r_e.sen\alpha \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta - \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta \\ \dot{\phi}.r_e.sen\alpha \\ \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha \end{Bmatrix} \quad (20) $$

Portanto calculou-se a velocidade linear do ponto C $\vec{v}_C$ representada na base B1, ela é mostrada na Equação 21:

$$ {}_{B1}\vec{v}_C = \begin{Bmatrix} \dot{\gamma}.R_A \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta - \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta \\ \dot{\phi}.r_e.sen\alpha \\ \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha \end{Bmatrix} = \quad (21) $$

$$ \begin{Bmatrix} \dot{\gamma}.R_A + \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta - \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta \\ \dot{\phi}.r_e.sen\alpha \\ \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha \end{Bmatrix} $$

O ponto C no rebolo de arraste C tem a velocidade mostrada pela Equação 22:

$$ {}_{B1}\vec{v}_C = \begin{Bmatrix} \omega_C.R_C \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (22) $$

Igualando-se as componentes em $\hat{i}$ da velocidade para o ponto C na esfera e no rebolo de arraste interno, para que não ocorra o deslizamento, chegou-se à Equação 23:

$$ \omega_C.R_C = \dot{\gamma}.R_A + \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta - \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta \quad (23) $$

A velocidade linear do ponto B $\vec{v}_B$ representada na base B1 é mostrada pela Equação 24:

$$ {}_{B1}\vec{v}_B = {}_{B1}\vec{v}^{*} + {}_{B1}\vec{\Omega}\times {}_{B1}\vec{r}_B \quad (24) $$

O vetor posição de B em relação ao centro de gravidade da esfera, $\vec{r}_B$, representado em B1, é mostrado pela Equação 25:

$$ {}_{B1}\vec{r}_B = \begin{Bmatrix} 0 \\ -r_e.\cos\alpha \\ -r_e.sen\alpha \end{Bmatrix} \tag{25} $$

O produto vetorial da Equação 24 foi calculado conforme mostrado pela Equação 26:

$$ {}_{B1}\vec{\Omega} \times {}_{B1}\vec{r}_B = \begin{vmatrix} \hat{i} & j & k \\ \dot{\theta} & -\dot{\phi}.sen\theta & \dot{\phi}.\cos\theta \\ 0 & -r_e.\cos\alpha & -r_e.sen\alpha \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta + \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta \\ \dot{\theta}.r_e.sen\alpha \\ -\dot{\theta}.r_e.\cos\alpha \end{Bmatrix} \tag{26} $$

A velocidade linear do ponto B $\vec{v}_B$ representada na base B1 é mostrada pela Equação 27:

$$ {}_{B1}\vec{v}_B = \begin{Bmatrix} \dot{\gamma}.R_A \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta + \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta \\ \dot{\theta}.r_e.sen\alpha \\ -\dot{\theta}.r_e.\cos\alpha \end{Bmatrix} = \tag{27} $$

$$ \begin{Bmatrix} \dot{\gamma}.R_A + \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta + \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta \\ \dot{\theta}.r_e.sen\alpha \\ -\dot{\theta}.r_e.\cos\alpha \end{Bmatrix} $$

O ponto B no rebolo de arraste externo tem a velocidade mostrada pela Equação 28:

$$ {}_{B1}\vec{v}_B = \begin{Bmatrix} \omega_B.R_B \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{28} $$

Igualando-se as componentes em $\hat{i}$ da velocidade para o ponto B na esfera e no rebolo de arraste externo, para que não ocorra o deslizamento, chegou-se à Equação 29:

$$ \omega_B.R_B = \dot{\gamma}.R_A + \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta + \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta \tag{29} $$

Chegou-se então às duas equações que relacionam as velocidades angulares dos rebolos de arraste B e C, que são as entradas aplicadas ao sistema, às saídas que são os parâmetros cinemáticos de movimento da esfera, que são o ângulo de giro θ, a velocidade

angular da esfera $\dot{\phi}$ em torno de seu eixo instantâneo de rotação e a velocidade angular do centro de massa da esfera em torno do eixo Z $\dot{\gamma}$. As duas equações são mostradas juntas:

$$\begin{cases} \omega_B.R_B = \dot{\gamma}.R_A + \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta + \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta & (23) \\ \omega_C.R_C = \dot{\gamma}.R_A + \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta - \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta & (29) \end{cases}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção os tópicos abordados serão o projeto preliminar, com a maior definição da máquina através da escolha de alguns componentes para atender o conceito gerado e o seu completo detalhamento, no tópico projeto detalhado, através do dimensionamento de componentes e desenhos para fabricação e montagem. O tópico fabricação e montagem da máquina mostra as etapas seguidas para a fabricação do protótipo assim como a fabricação e montagem do molde trata da sequência de etapas realizadas para obtenção do molde para a prensagem isostática da esfera. No último tópico, validação, é abordado o ensaio de usinagem realizado, com a definição dos parâmetros e caracterização metrológica, que trata das medições de esfericidade, circularidade e acabamento superficial.

4.1. Projeto da máquina

No projeto preliminar o conceito da máquina definido na etapa anterior foi desenvolvido através da escolha de componentes que atenderam os princípios de solução escolhidos. No projeto detalhado todos os componentes foram completamente especificados e os desenhos de fabricação de peças e montagem dos conjuntos foram realizados para a fabricação da máquina.

4.1.1. Projeto preliminar

Para atender o conceito gerado na etapa projeto conceitual os componentes da máquina precisaram ser especificados. Com os resultados obtidos pelo método da combinação de variantes chegou-se a vários elementos e outros foram escolhidos devido à sua disponibilidade no LTC. A Figura 35 mostra a máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes projetada com chamada para os principais subconjuntos.

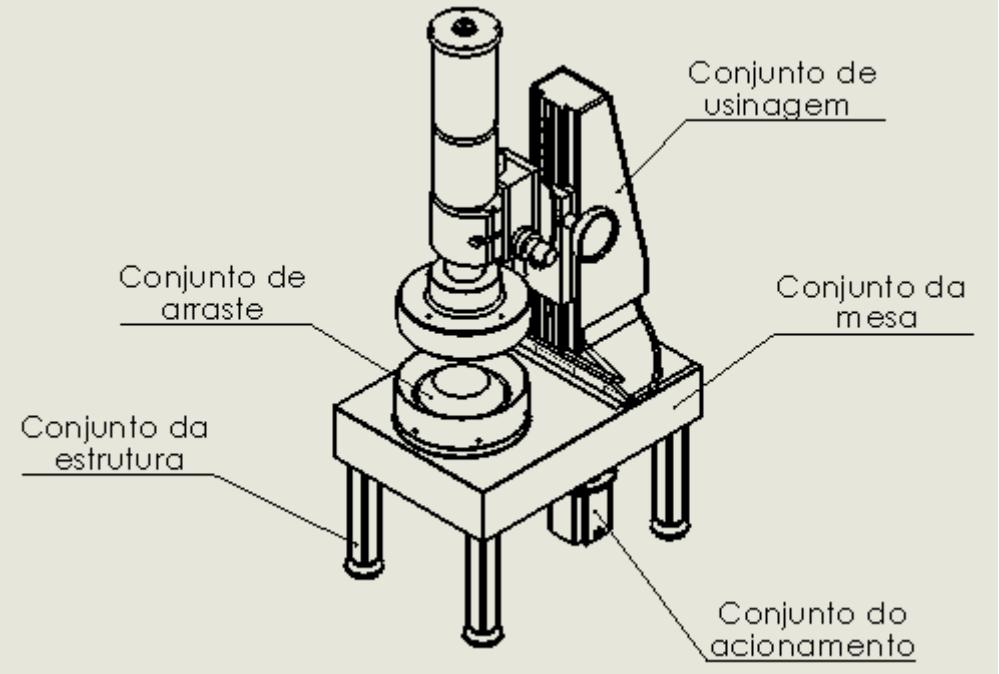
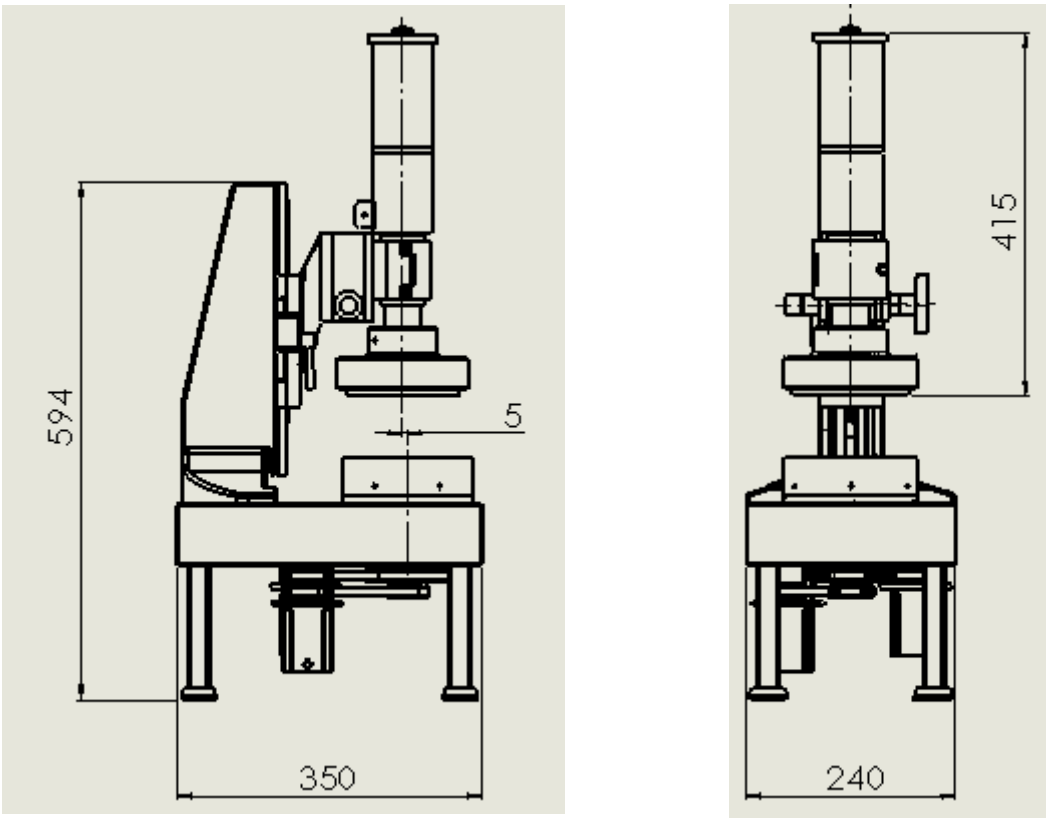


Figura 35 – Vista isométrica da máquina de usinagem de esferas cerâmicas.

A Figura 35 mostra a vista isométrica da máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes com chamada para os cinco subconjuntos: estrutura, mesa, acionamento, arraste e usinagem. Na Figura 36 são mostradas as vistas frontal e lateral da máquina com as dimensões principais e a excentricidade de 5 mm existente entre centro do conjunto de arraste e o centro do rebolo de corte. A distância da excentricidade pode ser alterada até 10 mm com a mudança de um espaçador que centraliza o cabeçote de retificadora.

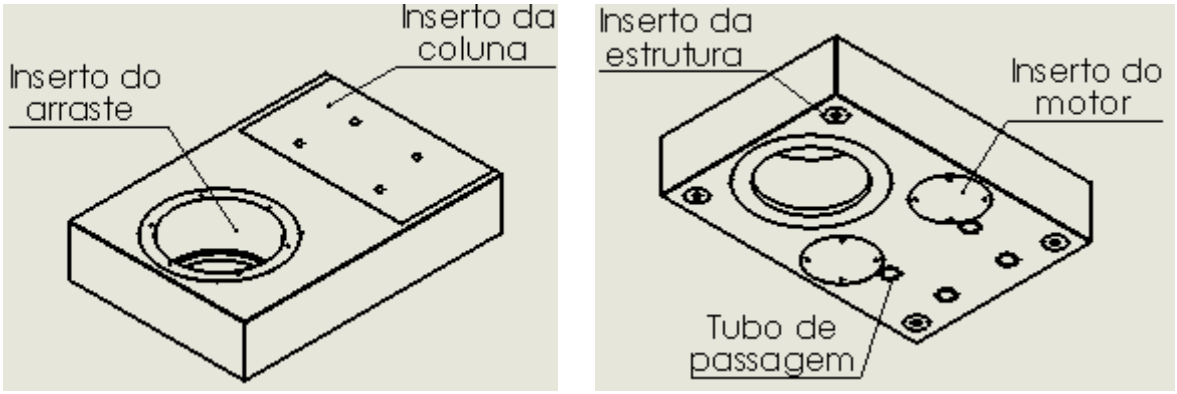


(a) (b)

Figura 36 – Desenho da máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes com dimensões principais, em (a) vista lateral e em (b) vista frontal.

O conjunto da estrutura é formado por quatro barras de metalon de seção quadrada de 1’’ de lado com cilindros soldados internamente, esses cilindros possuem furos roscados para a fixação por parafuso do apoio de borracha em uma extremidade e o inserto da estrutura na mesa, na outra extremidade. O apoio de borracha resiste à carga estática de 50 kg por peça.

O conjunto da mesa é formado pela mesa de granito sintético com os insertos metálicos fixados. Os insertos metálicos têm a função de fixar componentes da máquina e definir sua distância relativa a partir de seu posicionamento na mesa. A Figura 37 mostra o desenho do conjunto da mesa com chamada para os componentes.



(a) (b)

Figura 37 – Vista do conjunto da mesa de granito sintético com chamada para os componentes, em (a) destaque para face superior e em (b) destaque para a face inferior.

Conforme mostrado pela Figura 37 (a) na face superior da mesa são fixados dois insertos: o inserto que aloja o conjunto de arraste e o inserto em que a coluna da máquina é fixada. Na Figura 37 (b) é mostrada a face inferior da mesa na qual os seguintes insertos são fixados: quatro insertos para a fixação da estrutura, dois insertos para a fixação dos motores de passo e os tubos de passagem que permitem a fixação da coluna na mesa através de parafusos.

O conjunto de usinagem sofreu alterações em seu projeto conforme definido pela etapa do projeto conceitual. Não foi possível utilizar a configuração de movimentação vertical por meio de fuso de esfera com guias lineares e acionamento por motor de passo, devido à indisponibilidade do fuso de esferas e das guias lineares. A solução adotada para a movimentação vertical foi uma coluna de acionamento manual com transmissão por cremalheira de dentes inclinados. Essa coluna pertencia a uma máquina antiga que não estava mais em uso e estava disponível no LTC. A Figura 38 mostra o desenho do conjunto de usinagem com chamada para as peças.

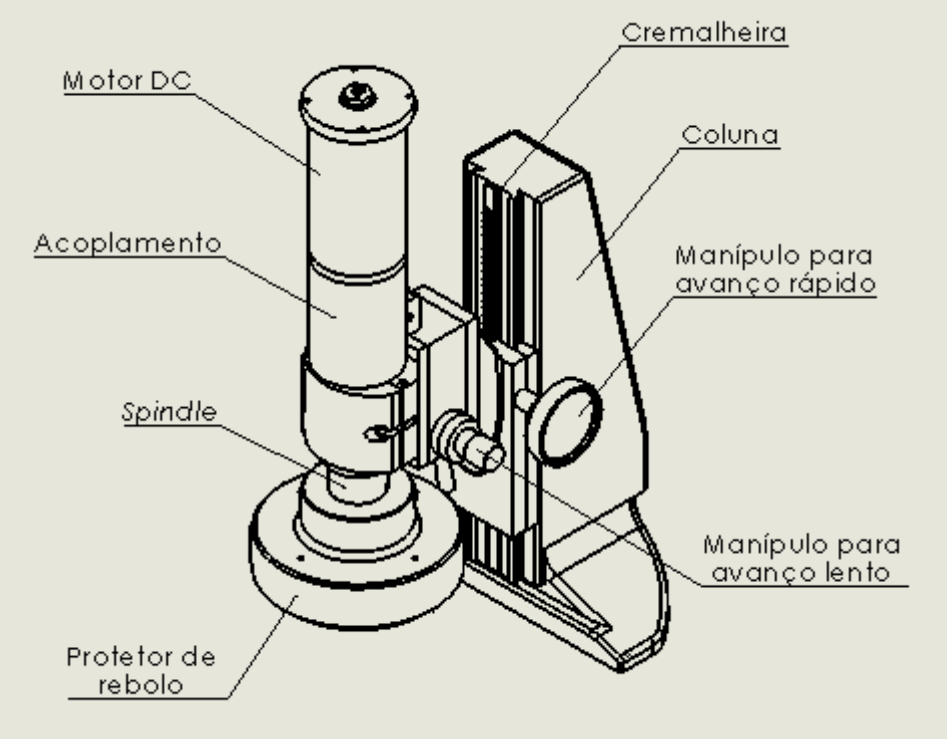
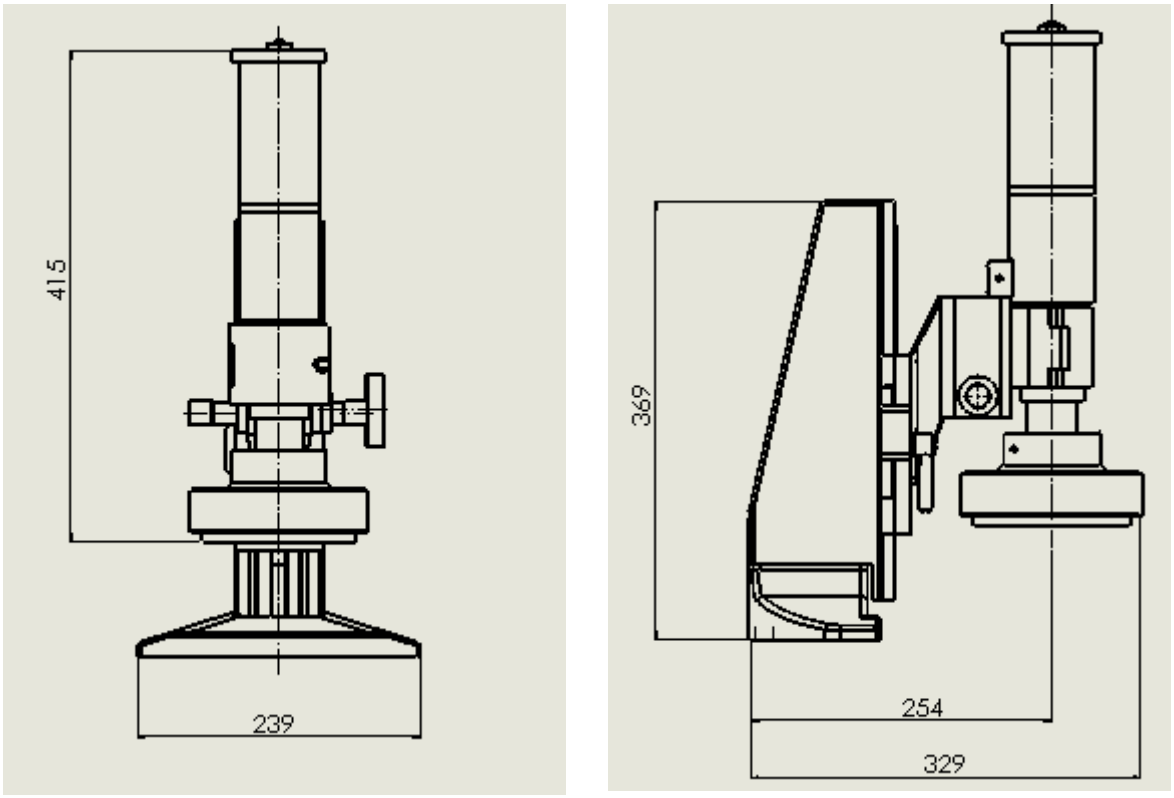


Figura 38 – Conjunto de usinagem em CAD.

Conforme mostrado pela Figura 38 o conjunto de usinagem projetado é formado por um *spindle* (cabeçote de retificadora) acionado por motor DC e transmissão direta de movimento com uso de acoplamento. O rebolo projetado é formado por alma rígida de alumínio e pista abrasiva flexível, sendo o operador protegido pelo protetor de rebolo. A movimentação vertical é realizada com acionamento manual através de manípulo para avanço rápido com transmissão por cremalheira de dentes inclinados, o carro móvel é guiado por guia rabo de andorinha e existe um manípulo de avanço lento com transmissão por came. A Figura 39 mostra as dimensões principais do conjunto de usinagem.

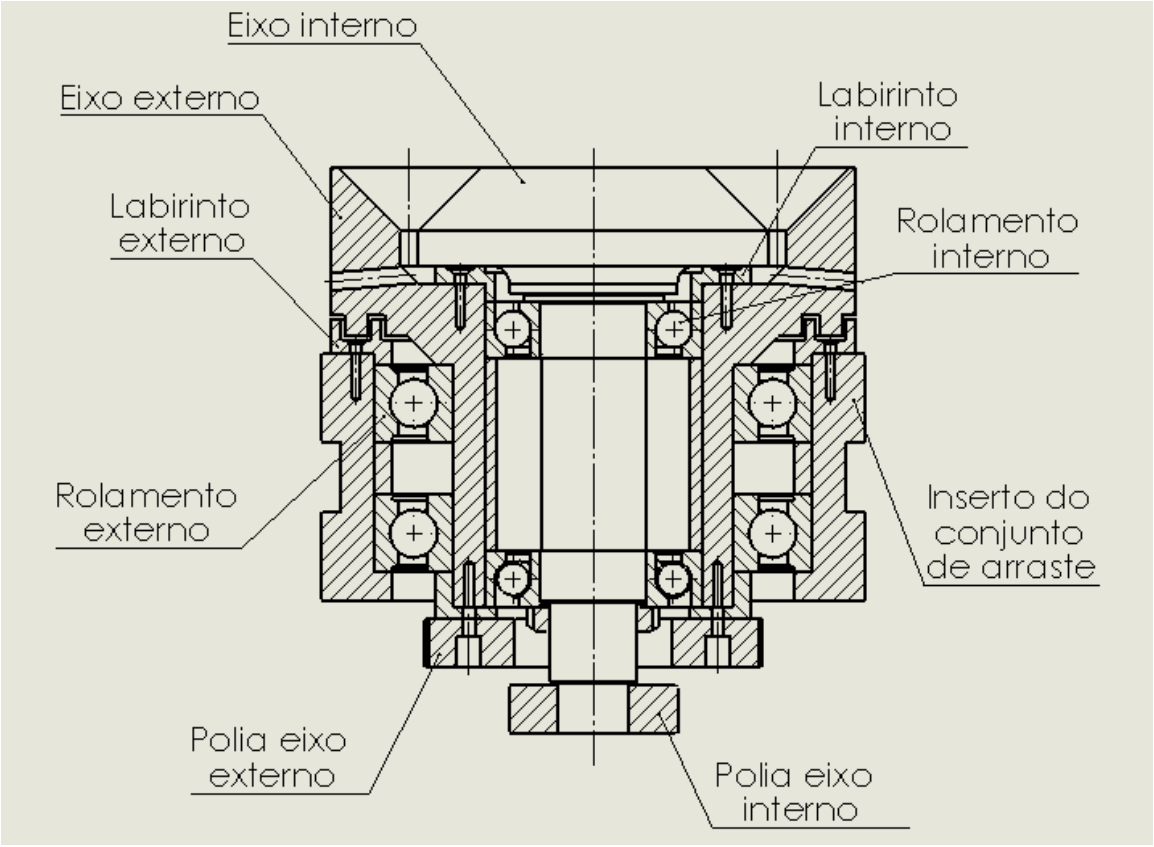


(a) (b)

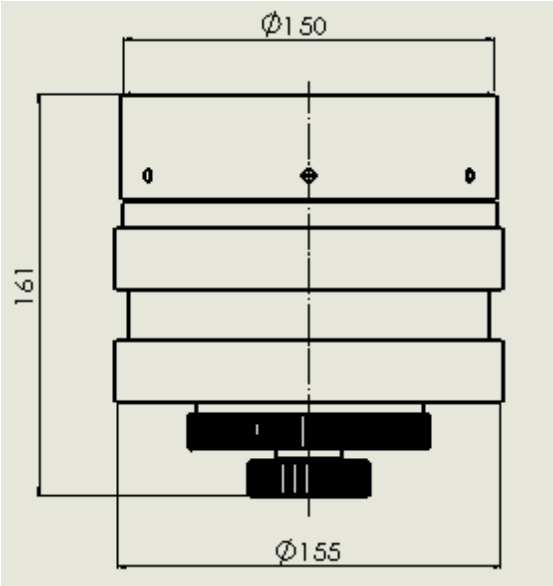
Figura 39 – Dimensões principais do conjunto de usinagem, em (a) vista frontal e em (b) vista lateral.

O conjunto de arraste, responsável pela variação da orientação das esferas, foi projetado com dois rebolos de arraste independentes acionados por motores de passo, é mostrado em corte na Figura 40 com chamada para as peças. O conjunto é formado por um eixo central e um eixo externo que formam o canal em "V". O eixo central é acionado por uma polia modelo XL com 30 dentes fixada com união por chaveta e o eixo externo é acionado pela base através de polia modelo XL com 60 dentes com união por atrito, utilizando-se parafusos para proporcionar o aperto. Mancais de rolamentos são utilizados, do tipo 7206 de contato angular para a ligação entre o eixo externo e o interno e o do tipo 6016 rígido de esferas para a ligação entre o eixo externo e o inserto do conjunto de arraste. Os rolamentos rígidos de esferas são alojados no inserto do conjunto de arraste, fixado na mesa de granito sintético. Para a proteção dos rolamentos foram projetados labirintos que dificultam a entrada do pó gerado no processo no espaço dos rolamentos e também servem de encosto para os mesmos. O labirinto interno é fixado por meio de seis parafusos ao eixo externo e, portanto, gira solidário ao mesmo. O labirinto externo é fixado também com seis parafusos no inserto do arraste e, portanto, permanece fixo. Canais circulares foram projetados nos eixos

interno e externo para que o giro dos mesmos não encontre restrições e para o correto funcionamento do sistema de proteção com labirinto.



(a)

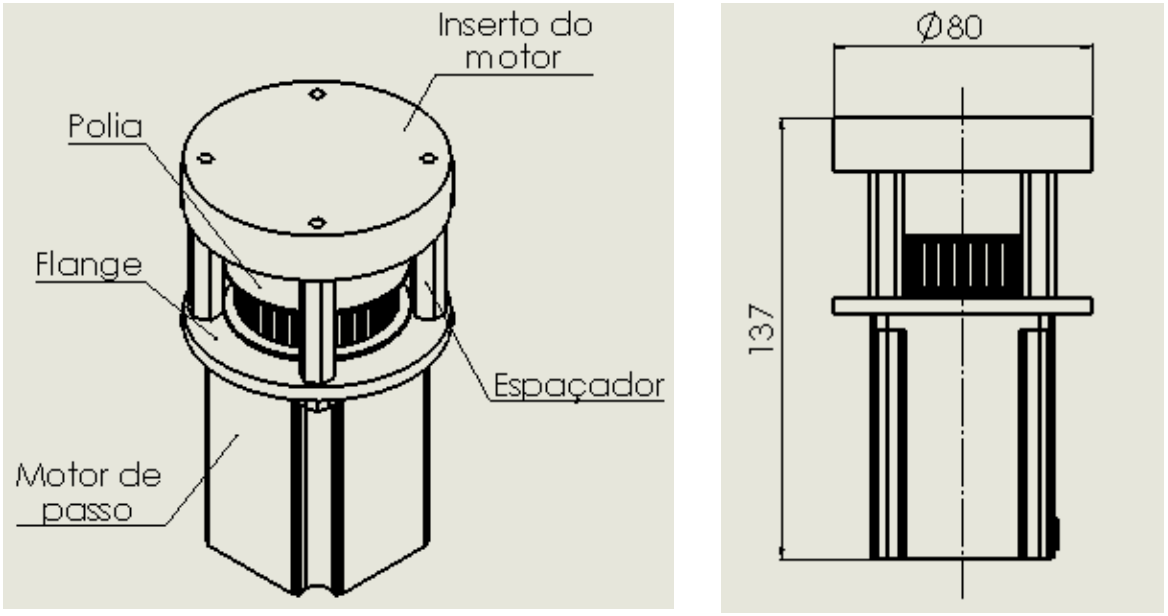


(b)

Figura 40 – Conjunto de arraste, em (a) vista em corte com chamada para as pecas e em (b) vista com dimensões máximas.

Na Figura 40 (b) é mostrada uma vista do conjunto de arraste com suas dimensões máximas.

O conjunto de acionamento é mostrado na Figura 41, em (a) com chamada para as peças e em (b) com as dimensões máximas.

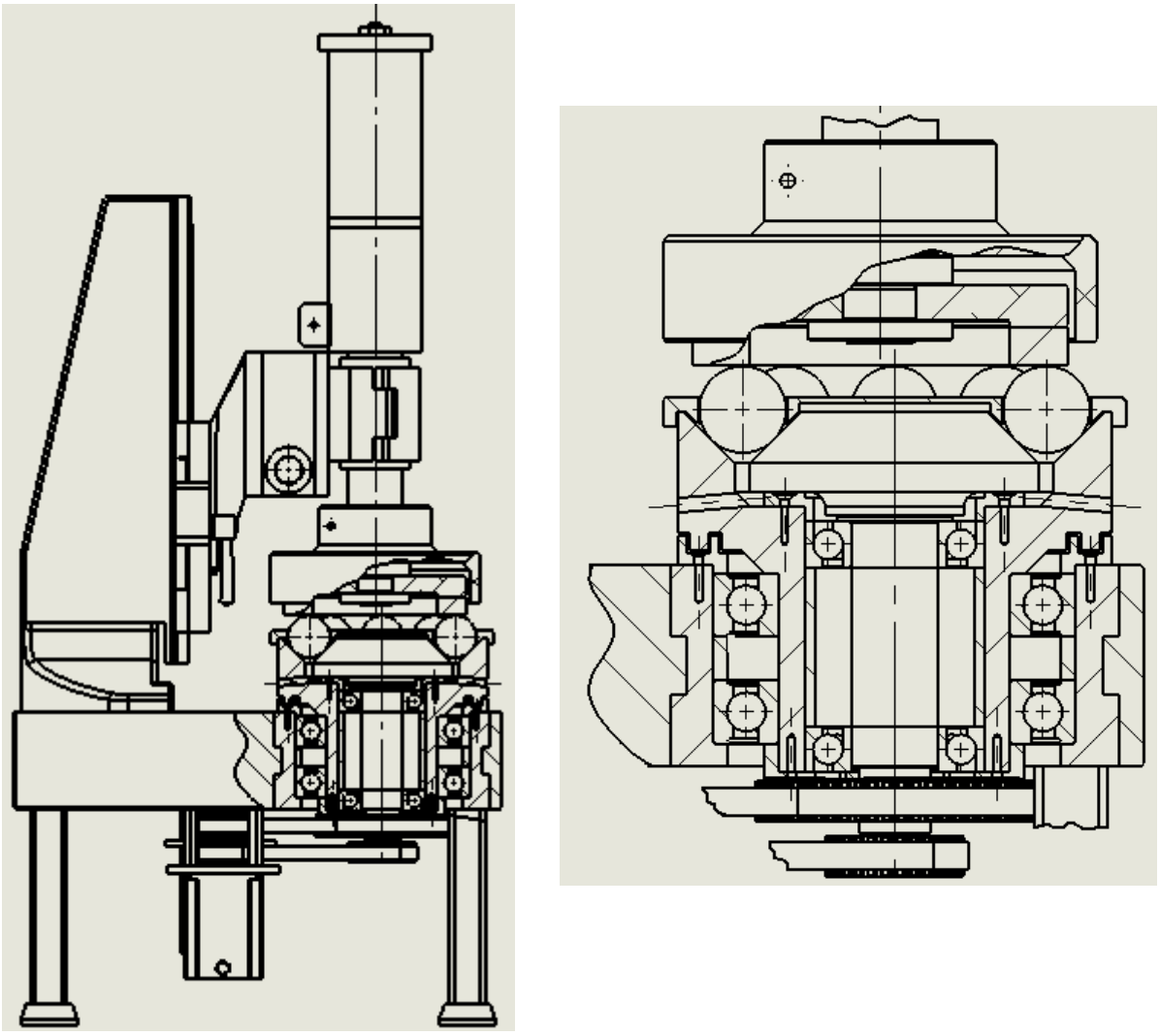


(a) (b)

Figura 41 – Conjunto de acionamento, em (a) chamada dos componentes e em (b) dimensões máximas.

O conjunto de acionamento é formado por motor de passo modelo KTC-HT23-400, polia modelo XL de 30 dentes, flange e espaçador. O inserto do motor mostrado na Figura 41 é apenas para melhor representar a fixação, pois o mesmo se encontra no conjunto da mesa, alojado no granito sintético. Dois conjuntos de acionamento são utilizados, um para cada rebolo de arraste, sendo a única diferença o comprimento dos espaçadores, para regular a altura entre as polias motoras e as movidas. A dimensão de comprimento mostrada na Figura 41 (b) é para o conjunto de acionamento do eixo interno.

A Figura 42 mostra a imagem em corte no plano vertical da usinagem das esferas e a excentricidade existente entre o eixo do cabeçote de retificadora e o eixo do conjunto de arraste.



(a) (b)

Figura 42 – Vista mostrando corte no plano vertical da máquina, em (a) vista mostrando a máquina completa e em (b) detalhe da usinagem das esferas.

A Figura 42 (a) mostra o desenho da máquina com corte parcial no conjunto de arraste e na extremidade do conjunto de usinagem, na Figura 42 (b) é mostrada uma ampliação da região de usinagem. A Figura 42 mostra a usinagem simultânea de 8 esferas com diâmetro inicial de 30 mm.

4.1.2. Projeto detalhado

O projeto detalhado para a máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes é composto pelo dimensionamento dos motores necessários para a movimentação das esferas e pelos desenhos técnicos para a fabricação dos componentes e montagem da máquina. Os desenhos de conjunto da máquina são mostrados no Apêndice A.

Para o dimensionamento dos motores de passo, seguindo o procedimento descrito por Voss (2007), é necessário definir primeiramente a cinemática através da escolha de um perfil de movimento que os rebolos de arraste devem seguir. Yuan *et al.* (2010) realizaram um estudo sobre a usinagem de esferas cerâmicas aplicando um perfil de movimento triangular ao rebolo de arraste externo, seguindo essa abordagem foi considerado um perfil de movimento triangular para o dimensionamento dos motores. O perfil considerado é mostrado na Figura 43.

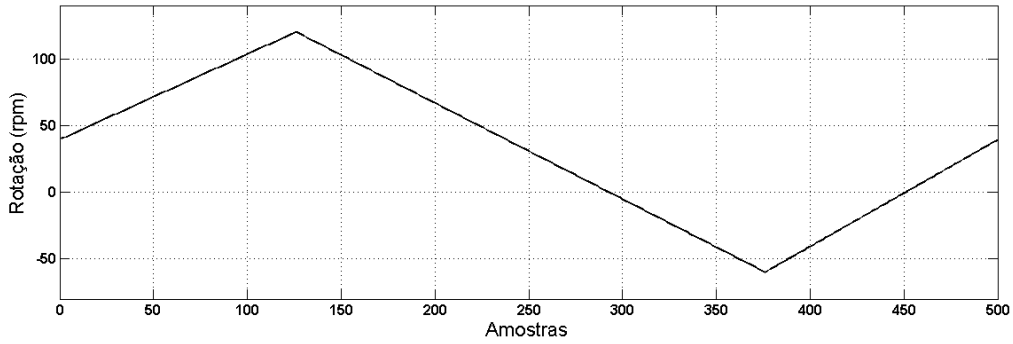


Figura 43 – Perfil de movimento utilizado para dimensionamento dos motores acionadores dos rebolos de arraste.

A Figura 43 mostra o perfil de movimento triangular que foi utilizado para o dimensionamento dos motores que acionam os rebolos de arraste. O perfil tem um pico de 120 rpm, a rotação é diminuída gradualmente até que ocorra a inversão do sentido de giro que chega a -60 rpm, o tempo total do ciclo é de 50 segundos.

O dimensionamento a seguir é baseado em Voss (2007), no caso do movimento ser transmitido do motor para a carga através de uma transmissão por polias e correia. A relação de transmissão é definida como a razão entre a rotação do motor e a rotação do eixo onde se encontra a carga, ela também pode ser utilizada para expressar variações das rotações, rearranjando obteve-se a variação de rotação no motor conforme mostrado pela Equação 30:

$$i = \frac{\Delta n_m}{\Delta n_e} \rightarrow \Delta n_m = i.\Delta n_e \tag{30}$$

A partir da variação de rotação no motor e do tempo em que essa variação ocorre, obtém-se a aceleração angular do motor, de acordo com a Equação 31:

$$\alpha_m = \frac{\pi.\Delta n_m}{30.\Delta t} \tag{31}$$

Após a definição da cinemática a dinâmica foi analisada, essa análise partiu do cálculo da inércia da carga refletida no motor, através da Equação (32):

$$J_{c\to m} = J_{p1} + J_{co\to m} + J_{p2\to m} + J_{e\to m} \tag{32}$$

A inércia da carga refletida no motor é composta pela soma das inércias de todos os elementos: o rotor do motor, a polia p1, solidária ao eixo do motor, a correia, a polia p2 ligada ao eixo, e o eixo, conforme mostrado pela Figura 44.

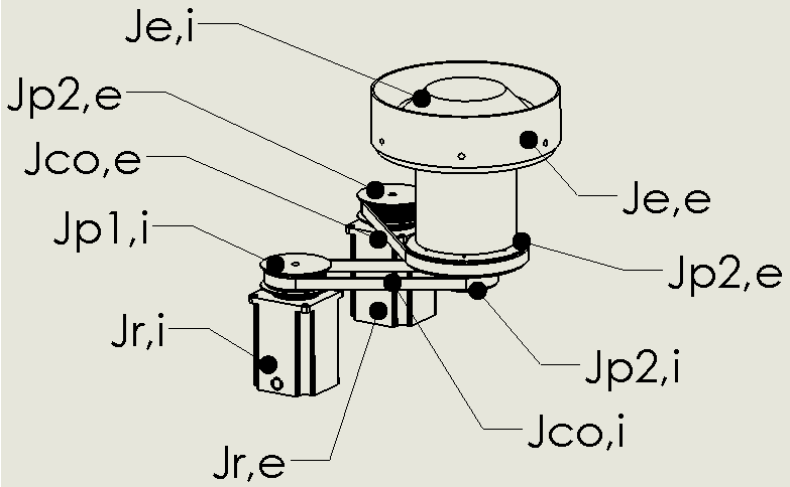


Figura 44 – Definição das inércias do sistema.

A polia p1 tem o mesmo eixo de rotação do motor, todos os outros elementos estão deslocados desse eixo, então as inércias desses elementos devem ser refletidas ao eixo do motor, através da utilização da relação de transmissão, como mostrada na Equação 33, que é uma expansão da Equação 32:

$$J_{c\to m} = J_{p1} + \frac{m_{co}}{\eta}.\left(\frac{d_{p1}}{2}\right)^2 + \frac{J_{p2}}{\eta.i^2} + \frac{J_e}{\eta.i^2} \tag{33}$$

A partir do conhecimento da aceleração angular do motor e da inércia da carga refletida no motor, pode-se calcular o torque de aceleração necessário para a movimentação da carga nas condições cinemáticas determinadas. Para tanto, deve-se escolher um motor, com uma inércia J_r, e o torque de aceleração é então calculado através da Equação 34:

$$T_{ac} = \left(J_r + J_{c\to m}\right).\alpha_m \tag{34}$$

Deve-se ainda calcular o torque *rms*, T_{rms}, que considera o torque durante todo o período em que o perfil de movimento é aplicado, é mostrado na Equação 35:

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{T_1^2.\Delta t_1 + T_2^2.\Delta t_2 + T_3^2.\Delta t_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}} \tag{35}$$

Na Equação 35 o torque *rms* é composto por três componentes porque o perfil de movimento considerado é formado por três segmentos de reta de inclinação (aceleração) constante. Cada componente deve ser formada pelo torque de aceleração e pelo torque de fricção, que é originado na força de atrito entre a esfera e o eixo. Para esse dimensionamento não será considerado o torque de fricção, e cada componente do torque *rms* será exclusivamente o torque de aceleração daquele trecho de movimento. Como o perfil de movimento é formado por segmentos de reta de mesma inclinação, o torque *rms* pode ser simplificado e o valor se torna igual ao do torque de aceleração.

O critério de dimensionamento de motores de passo, segundo Voss (2007), considera que o torque *rms* calculado deve ser menor que metade do torque disponível no motor, na rotação especificada.

Foi então calculado o valor do torque *rms* para os eixos interno e externo.

- **Dimensionamento do motor acionador do eixo interno**

Observando a Figura 43 tem-se que o eixo interno parte de uma rotação de 40 rpm e vai até 120 rpm em 12,5 segundos. A relação de transmissão i é igual a 1. O dimensionamento foi iniciado com a cinemática, aplicando a Equação 30:

$$\Delta n_m = 1.80 = 80\,rpm \tag{36}$$

Utilizando a Equação 31 para o cálculo da aceleração angular do motor:

$$\alpha_m = \frac{\pi.80}{30.12,5} = 0,67\,rad/s^2 \tag{37}$$

Iniciando a etapa da dinâmica, calcula-se a inércia da carga refletida no motor de acordo com a Equação 33. Os dados dimensionais e as inércias dos componentes relativamente ao eixo que passa pelo centro de gravidade foram retirados de software CAD:

$$J_{ci\to m} = 6,65.10^{-6} + \frac{8,3.10^{-3}}{0,9}.(\frac{0,048}{2})^2 + \frac{6,65.10^{-6}}{0,9.1^2} + \frac{1,39.10^{-3}}{0,9.2^2} \quad (38)$$

$$J_{ci\to m} = 1,57.10^{-3}\, kg.m^2$$

Para o cálculo do torque de aceleração, segundo Equação 34, deve-se considerar a inércia do rotor, através do catálogo foi obtida a informação para o modelo de motor considerado:

$$T_{ac,ci} = \left(4,8.10^{-5} + 1,57.10^{-3}\right).0,67 = 1,08.10^{-3}\, N.m \quad (39)$$

A curva de torque x rotação para o modelo de motor considerado foi obtida e é mostrada na Figura 45

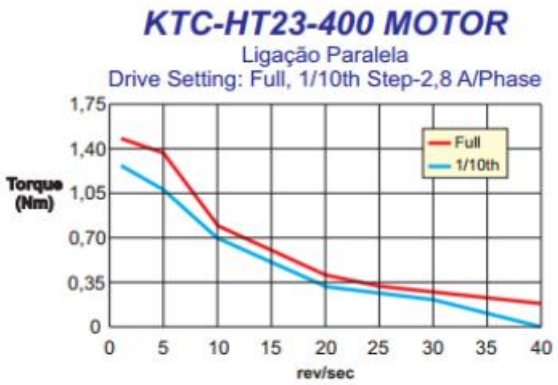


Figura 45 – Curva de torque para motor KTC HT23 400. (Disponível em < http://www.kalatec.com.br/wp-content/uploads/2015/02/Motor_Passo_Nema_HT231.pdf>. Acessado em 03/03/2015).

Analisando a Figura 45, na rotação máxima de 120 rpm, 2 rev/seg, o valor do torque disponível é de 1,4 N.m, muito maior que o torque de aceleração necessário de $1,08.10^{-3}$N.m, o que mostra que o motor poderá ser utilizado, e ainda haverá boa margem para o torque de fricção.

- **Dimensionamento do motor acionador do eixo externo**

As mesmas condições cinemáticas são utilizadas para o dimensionamento do eixo externo. A relação de transmissão i é igual a 2. O dimensionamento foi iniciado com a cinemática, aplicando a Equação 30:

$$\Delta n_m = 2.80 = 160\, rpm \tag{40}$$

Utilizando a Equação 31 para o cálculo da aceleração angular do motor:

$$\alpha_m = \frac{\pi.160}{30.12,5} = 1,34\, rad/s^2 \tag{41}$$

Iniciando a etapa da dinâmica, calcula-se a inércia da carga refletida no motor de acordo com a Equação 33. Os dados dimensionais e as inércias dos componentes relativamente ao eixo que passa pelo centro de gravidade foram retirados de software CAD:

$$J_{ce\to m} = 6,65.10^{-6} + \frac{10.10^{-3}}{0,9}.(\frac{0,048}{2})^2 + \frac{1,09.10^{-4}}{0,9.2^2} + \frac{1,41.10^{-2}}{0,9.2^2} \tag{42}$$

$$J_{ce\to m} = 3,96.10^{-3}\, kg.m^2$$

Para o cálculo do torque de aceleração, segundo Equação 34, deve-se considerar a inércia do rotor, através do catálogo foi obtida a informação para o modelo de motor considerado:

$$T_{ac,ci} = \left(4,8.10^{-5} + 3,96.10^{-3}\right).1,34 = 5,37.10^{-3}\, N.m \tag{43}$$

De forma análoga ao eixo interno, há disponibilidade suficiente do torque do motor considerado realizar a movimentação do eixo externo.

4.2. Fabricação e montagem da máquina

A fabricação e montagem da máquina teve início com a manufatura dos insertos metálicos necessários para a montagem do molde da mesa de granito sintético. A usinagem dos insertos metálicos foi realizada no LAMAFE e na Oficina Mecânica da EESC. A Figura 46 mostra o desenho da montagem do molde com chamada para as principais peças.

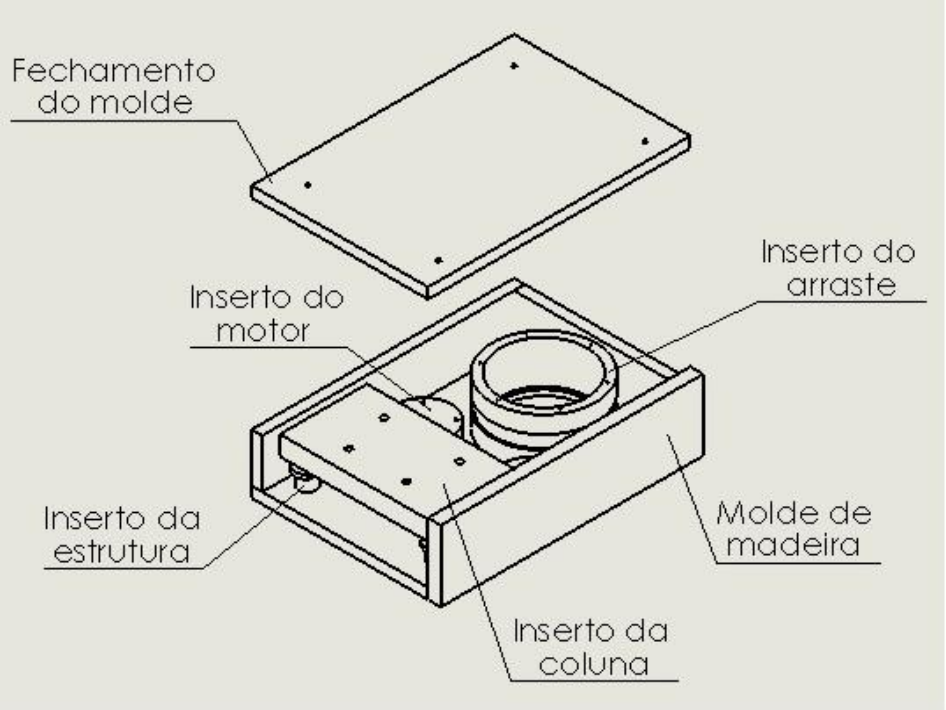
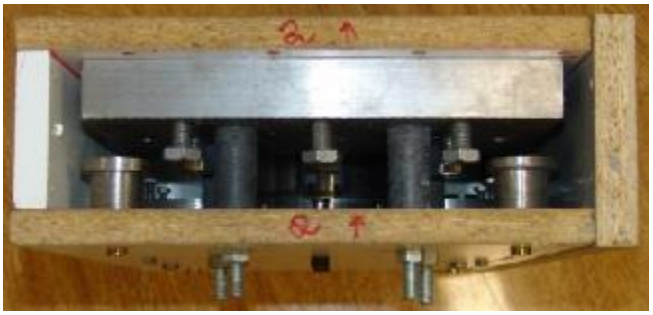


Figura 46 – Desenho da montagem do molde da mesa da máquina com chamada para as principais peças.

O inserto para alojamento do conjunto de arraste foi fabricado a partir de um tarugo de aço SAE 1020, passou pelos processos de torneamento, furação e roscamento. Os dois insertos para a fixação dos motores de passo foram fabricados a partir de tarugo de aço SAE 1020 e passaram pelos processos de corte do tarugo em discos, torneamento, furação e roscamento. O inserto para a fixação da coluna foi fabricado a partir de chapa em aço SAE 1020 e passou pelos processos de fresamento, furação e roscamento. Os insertos para a fixação da estrutura foram fabricados a partir de tarugos de aço SAE 1020 e passaram pelos processos de torneamento, furação, roscamento e corte na serra de fita.

Para a montagem do molde os insertos foram fixados com parafusos nas chapas de madeira, o inserto da coluna foi montado com tubos de PVC para a formação de vazios que permitem a passagem de parafusos de fixação da coluna ao inserto. Parafusos de cabeça sextavada foram utilizados para não permitirem o giro das peças no granito sintético, foram utilizados no insertos de fixação da coluna, de alojamento do conjunto de arraste e de fixação dos motores, os insertos para a fixação da estrutura foram fabricados com um rasgo para impedir o giro. A Figura 47 mostra a montagem do molde em (a) molde aberto e em (b) molde fechado mostrando a abertura por onde é inserido granito sintético.

(a)



(b)

Figura 47 – Montagem do molde para a fabricação da mesa de granito sintético, em (a) molde aberto e em (b) molde fechado.

Para a fabricação do granito sintético foram utilizadas três granulações de brita do granito tipo cinza Mauá: fino – de 0,3 a 1,2 mm; médio – de 2 a 4 mm e grosso – de 7 a 12 mm. Foi utilizada a proporção de 30% grosso, 20% médio e 50% fino pois essa composição resultou na maior densidade de empacotamento, de 1,67 g/cm^3 (RAMOS et al., 2014). A Figura 48 mostra a sequência de etapas realizadas na fabricação da mesa.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 48 – Etapas para fabricação da mesa da máquina, em (a) britas de granito e resina epóxi, em (b) mistura dos componentes, em (c) preenchimento do molde, em (d) vibração, em (e) extração e em (f) mesa fabricada.

Conforme mostrado pela Figura 48, para a fabricação da mesa foram utilizadas britas de granito nas três faixas de granulação comentadas e resina epóxi (a). Os componentes foram misturados (b) e introduzidos no molde pela abertura (c) e em seguida o conjunto foi submetido a vibração (d) para assentamento da mistura por todo espaço disponível. Após 24 h as chapas de madeira foram retiradas (e) e a mesa de granito sintético foi extraída (f).

Paralelamente à usinagem dos insertos foi realizada a fabricação dos eixos interno e externo responsáveis pela movimentação das esferas. O eixo externo foi fabricado a partir de um tarugo de aço SAE 1020 e passou pelos processos de torneamento, furação e roscamento. O eixo interno foi fabricado a partir de um tarugo de aço SAE 1020 e passou pelos processos de torneamento, furação e fresamento para fabricação do rasgo de chaveta. A Figura 49 mostra os eixos fabricados.

(a) (b)

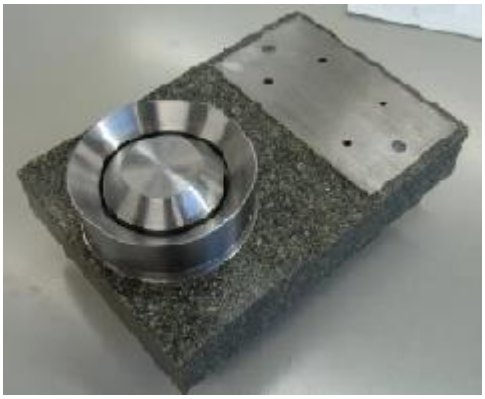
Figura 49 – Eixos externo e interno fabricados, em (a) ambos e (b) eixo externo com rolamento e labirinto montados.

A Figura 49 mostra em (a) os eixos externo e interno fabricados e o primeiro com rolamento montado. A montagem dos rolamentos foi feita através de aplicação de força com uma prensa uniaxial hidráulica, resfriamento dos rolamentos e aquecimento do eixo externo com soprador de ar quente. Em (b) é mostrado o eixo externo com o rolamento e labirinto montados.

Para a inserção do eixo interno no conjunto do eixo externo foi realizado o resfriamento do eixo interno em refrigerador e aquecimento com soprador de ar quente da pista interna dos rolamentos. O conjunto foi montado e colocado de forma invertida sobre uma mesa para acerto da altura, uma porca do tipo KM foi então utilizada para o travamento. A Figura 50 mostra o conjunto montado.

Figura 50 – Montagem do eixo interno no conjunto do eixo externo.

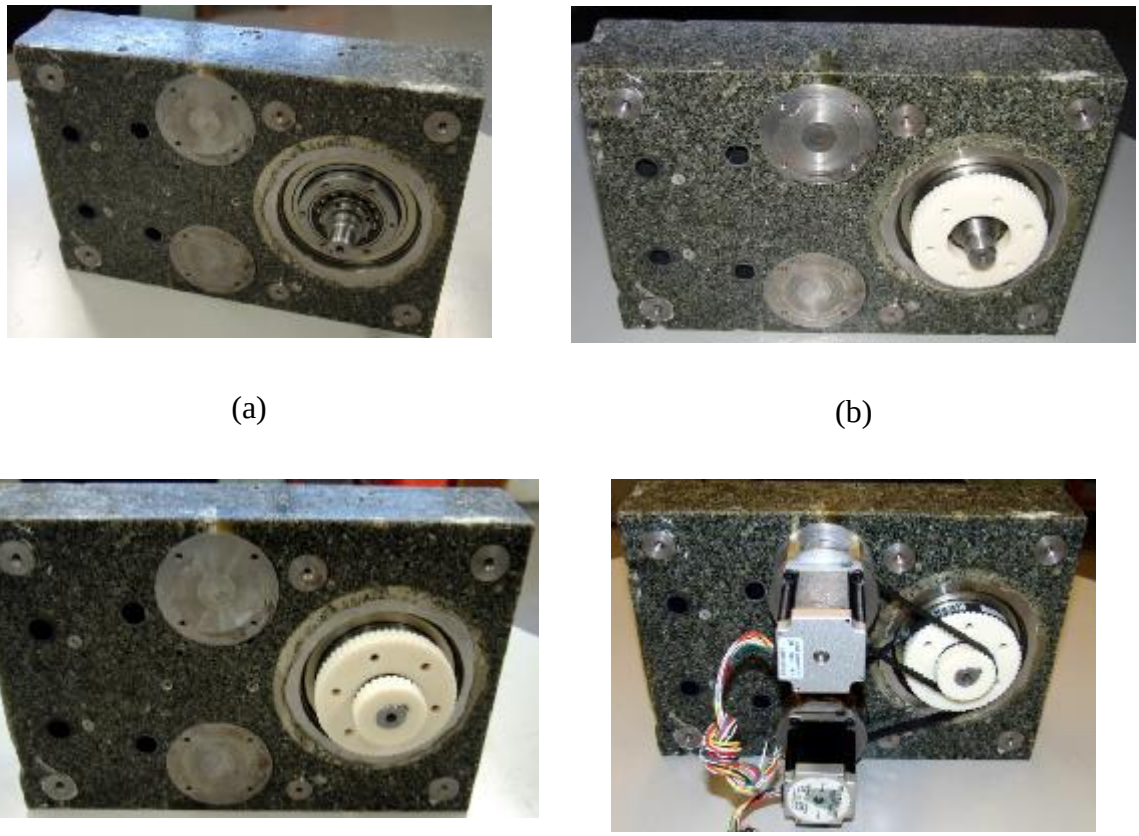
Para a montagem dos mancais de rolamento no eixo externo e na mesa foi realizado o resfriamento dos rolamentos no refrigerador, o aquecimento do inserto do conjunto de arraste com soprador de ar quente e a aplicação de força através da prensa uniaxial hidráulica. A montagem com o labirinto externo é mostrada na Figura 51 (a). A Figura 51 (b) mostra o conjunto de arraste montado formado pelos eixos interno e externo e a mesa.



(a) (b)

Figura 51 – Montagem de componentes, em (a) rolamentos e labirinto externo na mesa e em (b) conjunto de arraste.

A sequência de etapas para a montagem dos motores de passo e da transmissão por polias e correias é mostrada na Figura 52. Em (a) é mostrada a vista posterior da mesa com os eixos interno e externo fixados. Em (b) é mostrada a fixação por atrito através de seis parafusos da polia ao eixo externo. Em (b) é mostrada a fixação por chaveta da polia ao eixo interno. Em (d) é mostrada a montagem completa dos motores de passo e correias para a transmissão do movimento.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 52 – Etapas na montagem dos motores e transmissão de movimento, em (a) vista posterior da mesa com conjunto de arraste, em (b) fixação de polia ao eixo externo, em (c) fixação de polia ao eixo interno e em (d) montagem das correias e motores de passo.

Para a montagem da estrutura foram utilizados quatro pedaços de metalon de seção quadrada de 1” de lado soldados nas duas extremidades a cilindros com furos roscados para fixação com parafusos aos insertos na parte inferior da mesa e aos apoios da máquina. Posteriormente foi fixada a coluna da máquina ao inserto na parte superior da mesa através de quatro parafusos. A Figura 53 mostra em (a) a montagem da estrutura e em (b) a montagem da coluna.

(a) (b)

Figura 53 - Montagem da máquina, em (a) montagem da estrutura metálica e em (b) montagem da coluna.

Após a fixação da coluna foi montado o cabeçote de retificadora com rebolo com alma de alumínio e pista abrasiva flexível. Foi adicionado um protetor de rebolo que passou pelo processo de torneamento. Para a movimentação do rebolo foi utilizado um motor DC com acoplamento direto, conforme mostrado pela Figura 54.

Figura 54 – Montagem da máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes.

A máquina de usinagem de esferas cerâmicas apresentou montagem otimizada devido à utilização da mesa em granito sintético, pois a fabricação com os insertos metálicos facilita a montagem dos componentes e define as distâncias relativas.

4.3. Fabricação e montagem do molde

A fabricação do molde para a prensagem isostática das esferas foi iniciada com a fabricação dos moldes utilizados para a conformação das peças elastoméricas, fabricadas em silicone. Uma esfera de rolamento de diâmetro 35 mm foi utilizada para transmitir o formato esférico e o acabamento superficial para a matriz elastomérica e para a tampa. As peças rígidas foram prototipadas em ABS e são mostradas na Figura 55 juntamente com a esfera de rolamento.

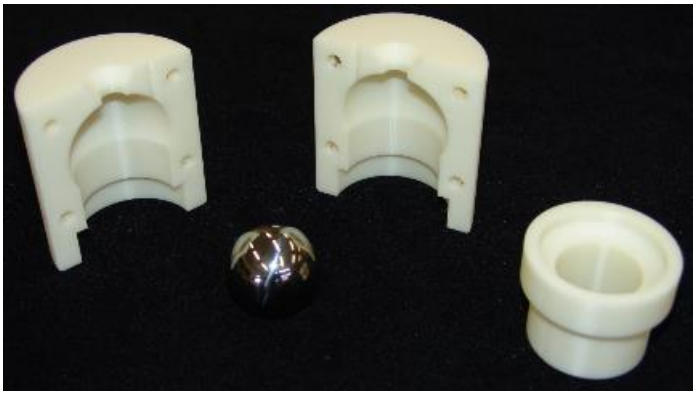


Figura 55 – Peças prototipadas utilizadas para a fabricação dos moldes utilizados na conformação das partes elastoméricas e esfera de rolamento.

A matriz elastomérica foi fabricada em silicone a partir de um molde formado com uma esfera de rolamento de diâmetro 35 mm, corpo bipartido prototipado em ABS e base torneada. A Figura 56 mostra o molde e as etapas de fabricação da matriz elastomérica.

(a) (b) (c)

Figura 56 – Fabricação da matriz elastomérica, em (a) molde aberto, em (b) injeção de silicone e em (c) molde aberto com o silicone curado.

Conforme mostrado pela Figura 56 (a) o molde para a conformação da matriz elastomérica foi montado com a colocação da esfera de rolamento sobre a base e o fechamento do corpo bipartido com parafusos. Em (b) é mostrado a injeção de silicone pelo furo superior através de uma seringa. O molde foi deixado em repouso por 12 h e o corpo bipartido foi então aberto, conforme mostrado em (c).

Para a fabricação da tampa elastomérica foi utilizada a peça prototipada em ABS encaixada sobre a esfera de rolamento, que foi fixada a uma placa de vidro com massa adesiva, conforme mostrado pela Figura 57.

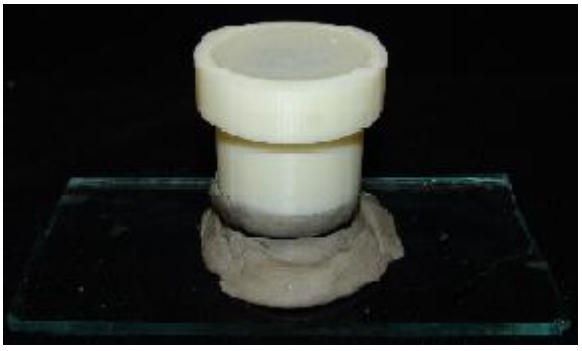


Figura 57 – Fabricação da tampa elastomérica.

O corpo rígido do molde para a prensagem das esferas foi protipado em ABS e, dessa maneira, teve sua manufatura facilitada, pois essa peça apresenta diversos furos para a passagem do fluido pressurizado para a compressão da matriz elastomérica, é mostrada na Figura 58.

(a) (b)

Figura 58 – Molde para prensagem isostática das esferas, em (a) peças constituintes do molde e em (b) molde montado.

A Figura 58 (a) mostra as três peças que formam o molde para a prensagem isostática das esferas: o corpo rígido, a matriz elastomérica e a tampa elastomérica. Em (b) é mostrado o molde montado.

4.4. Validação

Para a validação da máquina foram realizados dois ensaios de usinagem. Esfera de Zircônia 3Y de diâmetro final de 22 mm foi idealizada, o material escolhido para a fabricação das esferas foi a zircônia tetragonal parcialmente estabilizada com 3 mol% de ítria (Y2O3) TZ-3Y-E (Tosoh). O material foi escolhido devido às suas características superficiais de acabamento da zircônia (brilho e reflexo de luz), sua relativa alta tenacidade à fratura e uso em implantes de quadril. O pó para prensagem foi obtido em um moinho de jarros com a introdução de 30 vol% de pó de zircônia, 67,5 vol% de álcool isopropílico, 2vol% de PVB e 0,5 % da massa de ZrO2 de PABA (ácido 4-aminobenzóico). A aglomeração ocorreu por evaporação do álcool com pistola de ar quente à ~80ºC e granulação entre malhas 80 – 170 Mesh. O molde foi preenchido com o pó e a prensagem isostática *wet bag* foi realizada a 200 MPa por 1 minuto.

(a) (b)

Figura 59 – Prensagem isostática da esfera, em (a) extração do molde e em (b) extração da esfera.

A Figura 59 mostra a prensagem isostática *wet bag* da esfera, em (a) a extração do molde do vaso de pressão do tipo *clover leaf* e em (b) a extração da esfera do molde.

O processo de prensagem isostática conformou o pó em um pré-formato para a esfera, porém com uma marca em desnível decorrente da tampa do molde. O processo de usinagem deve ser capaz de remover a marca do processo e melhorar a esfericidade e acabamento superficial da peça prensada.

4.4.1. Usinagem

Para a usinagem das esferas foi montada a estação de trabalho mostrada na Figura 60.

Figura 60 – Estação de trabalho para a usinagem de esferas cerâmicas.

A Figura 60 mostra a estação de trabalho utilizada para a usinagem das esferas cerâmicas: o motor DC responsável pelo acionamento do rebolo de corte é alimentado pela fonte da extremidade esquerda, os dois motores de passo responsáveis pelo acionamento dos

rebolos de arraste são controlados pelo driver CNC e alimentados pela fonte central. Driver CNC foi controlado pelo software Turbo CNC.

Para a medição das rotações dos discos de arraste foi utilizado um tacômetro, dispositivo que mede a velocidade angular de peças girantes, fornecendo uma saída proporcional a velocidade angular. O princípio de funcionamento é que cada marca percebida pelo sensor é contabilizada por um contador eletrônico de pulso, e através da contagem do número de pulsos por unidade de tempo, a velocidade média do sistema é calculada.

Para esse trabalho foi necessário determinar a rotação dos rebolos de arraste, o interno e o externo. Para tanto, foi utilizado o tacômetro Minipa modelo MDT-2238A.

Para a medição da rotação dos discos de arraste, as superfícies metálicas, portanto reflexivas, foram cobertas com papel preto e a fita reflexiva foi colada sobre o papel, procedimento que consta no manual de instruções. A Figura 61 mostra a preparação dos discos e o procedimento de medição.

(a) (b)

Figura 61 - Medição de rotação dos discos de arraste, em (a) preparação dos discos e em (b) medição do disco interno com sistema em repouso.

Para a usinagem das esferas foi projetada uma gaiola separadora para evitar o contato entre as esferas durante a usinagem e também para evitar que o rebolo de corte arrastasse as esferas pelo canal em “V”. A gaiola separadora é mostrada na Figura 62.

Figura 62 – Gaiola separadora das esferas.

A gaiola separadora de esferas foi prototipada em ABS, o diâmetro do espaço para as esferas foi projetado para que a esfera gire em torno do seu centro de massa, com a diminuição da folga a translação da esfera dentro do espaço é minimizada.

As pistas dos rebolos de arraste foram recobertas com uma camada de EVA para a promoção do aumento do coeficiente de atrito entre as esferas e as pistas de arraste, diminuindo a ocorrência de deslizamento entre os mesmos.

O processo de usinagem das esferas foi divido em duas etapas: primeiramente foi realizada uma usinagem de desbaste com o rebolo de corte com alma de alumínio, uma camada de EVA de 5 mm e uma lixa para a remoção da marca de prensagem. Após essa etapa foi realizada a usinagem com o rebolo de corte com alma de alumínio, espuma de poliuretano e partículas de carbeto de silício com dimensões entre 125 e 150 μm, para a melhora do acabamento superficial da esfera. Em todas as situações o rebolo de corte foi acionado com rotação de 2500 rpm e sentido de giro concordante com o rebolo de arraste externo.

Os ensaios de usinagem foram realizados de duas maneiras distintas:

- **Aplicação de entradas degrau simples**

Na usinagem realizada com a aplicação de entradas degrau simples aos motores acionadores dos rebolos de arraste, a gaiola separadora das esferas foi utilizada fixa ao disco externo. Dessa forma a velocidade angular do centro de massa da esfera pode ser escrita como mostra a Equação 44:

$$\dot{\gamma} = \omega_B \tag{44}$$

Dessa forma as Equações 23 e 29 podem ser simplificadas nas Equações 45 e 46:

$$\begin{cases} \omega_B.R_B - \omega_B.R_A = \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta + \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta & (45) \\ \omega_C.R_C - \omega_B.R_A = \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta - \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta & (46) \end{cases}$$

Resolvendo as Equações 45 e 46 para θ e $\dot{\phi}$:

$$\theta = \text{arctg}\left[\frac{\omega_B.R_B + \omega_C.R_C - 2.\omega_B.R_A}{(\omega_B.R_B - \omega_C.R_C).tg\alpha}\right] \tag{47}$$

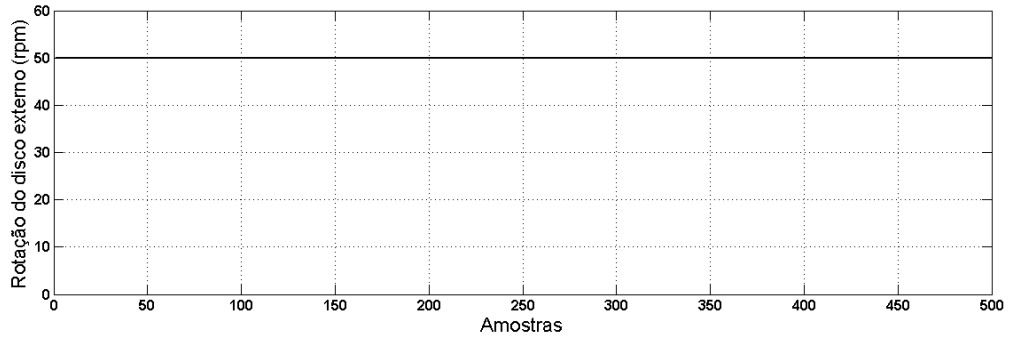
$$\dot{\phi} = \frac{\omega_B.R_B + \omega_C.R_C - 2.\omega_B.R_A}{2.\mathrm{r}_e.\mathrm{sen}\,\alpha.sen\theta} \tag{48}$$

Os valores para as entradas são mostrados na Tabela 8:

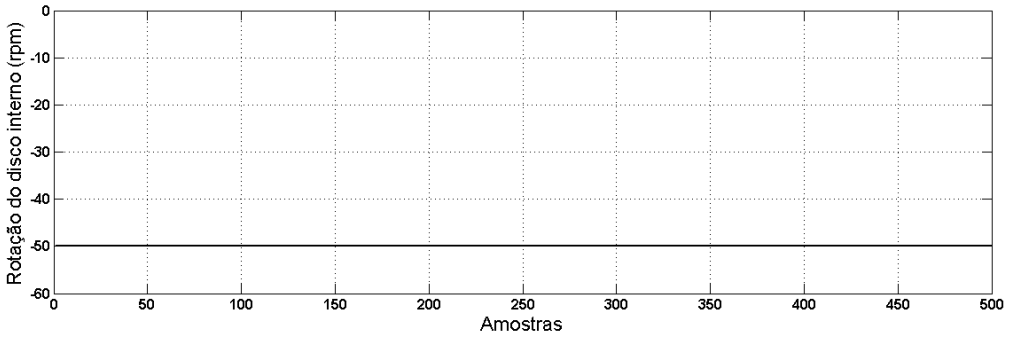
Tabela 8 – Grandezas utilizadas para a determinação dos parâmetros cinemáticos do movimento da esfera.

Grandezas	Valores
R_A (mm)	52,5
R_B (mm)	63,11
R_C (mm)	41,89
α (°)	45
ω_B (rpm)	50
ω_C (rpm)	-50

As Equações 47 e 48 foram escritas no Matlab Simulink, o diagrama de blocos produzido se encontra no Apêndice B. Os dados de entrada foram inseridos para a realização da simulação, as respostas de θ e $\dot{\phi}$ foram obtidas para um tempo de ciclo de 50 s, com uma taxa de amostragem de 10 amostras por segundo. Os gráficos das entradas são mostradas na Figura 63:



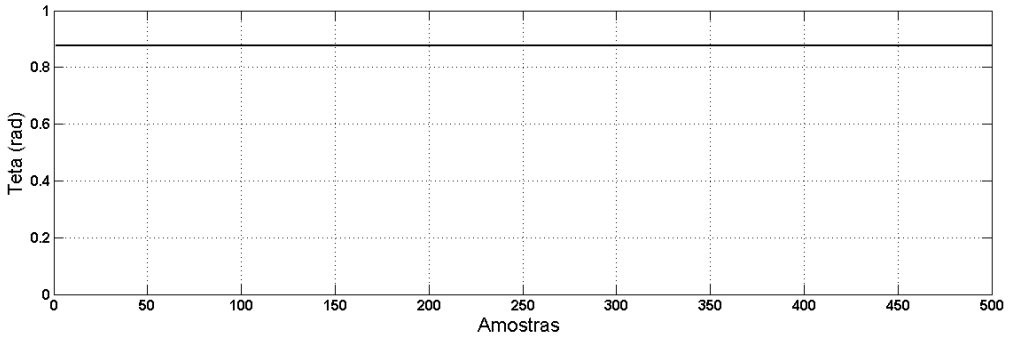
(a)



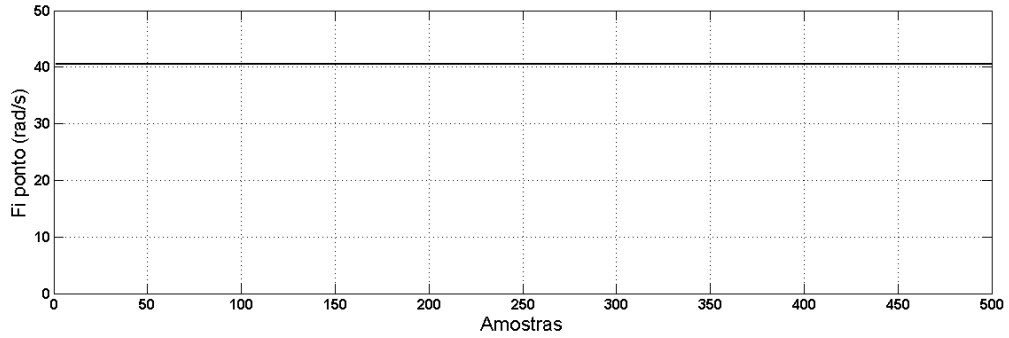
(b)

Figura 63 – Rotações aplicadas aos motores acionadores dos rebolos de arraste, em (a) disco externo e em (b) disco interno.

Os gráficos das saídas são mostrados na Figura 64.



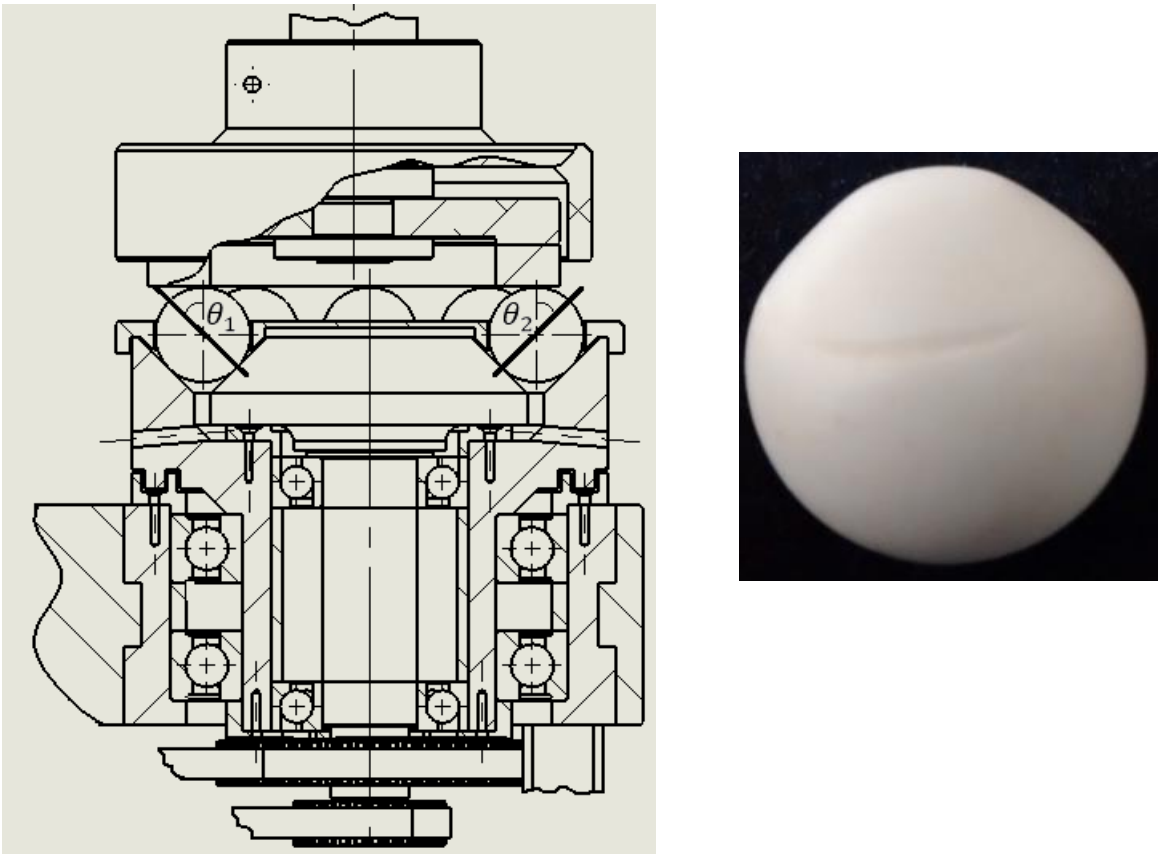
(a)



(b)

Figura 64 – Parâmetros da cinemática da esfera, em (a) ângulo de giro e em (b) velocidade angular em relação ao eixo instantâneo.

Os gráficos mostrados pela Figura 64 mostram que as respostas são do tipo degrau, quando obtidas pela aplicação de entradas degrau. O erro de circularidade da esfera aumentou com a usinagem e um lóbulo foi formado. Esse fato se deveu às entradas degrau aplicadas aos motores. Conforme mostrado pela Equação 6 valores constantes nas rotações dos discos de arraste determinam ângulos de giro constantes para as esferas. Assim apenas uma região é usinada, o que resulta na formação do lóbulo. A Figura 65 mostra os ângulos de giro para duas esferas opostas e uma esfera usinada através da aplicação das entradas degrau.



(a) (b)

Figura 65 – Ângulos de giro para as esferas, em (a) ângulos de giros iguais e em (b) esfera produzida com lóbulo devido ao ângulo de giro constante.

Conforme mostrado pela Figura 65 (a), quando os ângulos θ_1 e θ_2 foram mantidos iguais durante todo o ciclo de usinagem, apenas uma região da esfera foi usinada e um lóbulo foi formado, a esfera adquiriu uma região com formato cônico, conforme mostrado pela Figura 65 (b).

- **Aplicação de entrada degrau simples e entrada degrau composta**

Na usinagem realizada com a aplicação de entradas degrau simples e degrau composta aos motores acionadores dos discos de arraste, a gaiola separadora das esferas foi utilizada fixa à mesa de granito sintético. Dessa forma a velocidade de rotação do centro de massa da esfera pode ser escrita como mostra a Equação 49:

$$\dot{\gamma} = 0 \tag{49}$$

Dessa forma as Equações 23 e 29 podem ser simplificadas nas Equações 50 e 51:

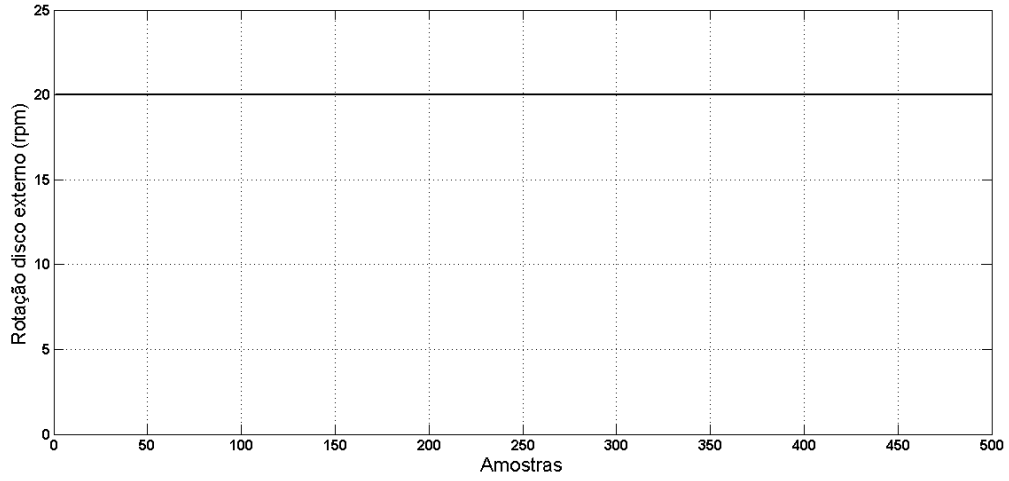
$$\begin{cases} \omega_B.R_B = \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta + \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta & (50) \\ \omega_C.R_C = \dot{\phi}.r_e.sen\alpha.sen\theta - \dot{\phi}.r_e.\cos\alpha.\cos\theta & (51) \end{cases}$$

Resolvendo as Equações 50 e 51 para θ e $\dot{\phi}$:

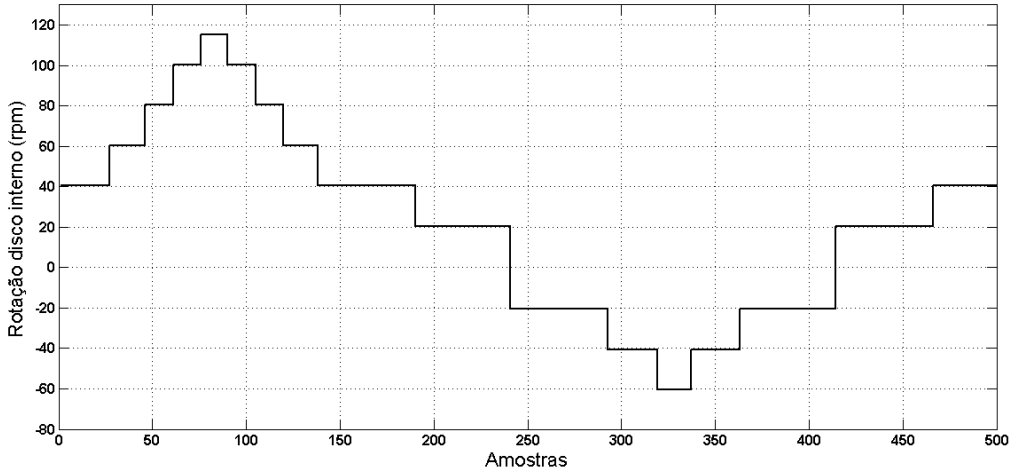
$$\theta = \text{arctg}\left[\frac{\omega_B.R_B + \omega_C.R_C}{(\omega_B.R_B - \omega_C.R_C).tg\alpha}\right] \quad (52)$$

$$\dot{\phi} = \frac{\omega_B.R_B + \omega_C.R_C}{2.\text{r}_e.\text{sen}\,\alpha.sen\theta} \quad (53)$$

As Equações 52 e 53 foram escritas no Matlab Simulink, os dados de entrada foram inseridos para a realização da simulação, as respostas de θ e $\dot{\phi}$ foram obtidas para um tempo de ciclo de 50 s, com uma taxa de amostragem de 10 amostras por segundo. Os gráficos das entradas são mostrados na Figura 66:



(a)

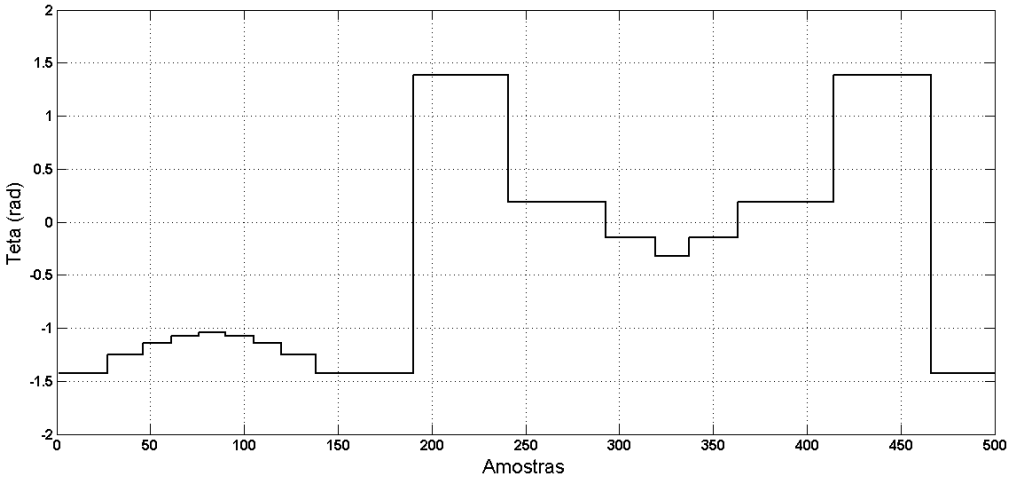


(b)

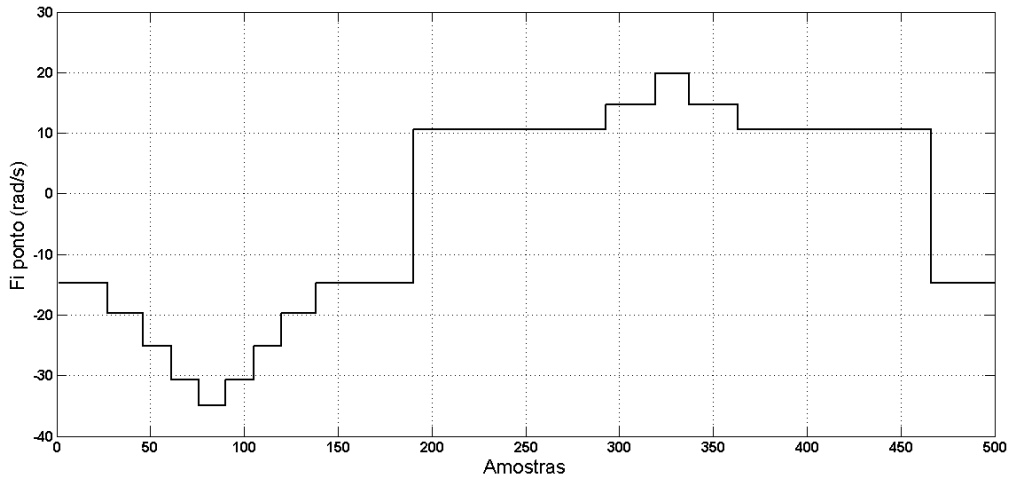
Figura 66 - Rotações aplicadas aos motores acionadores dos rebolos de arraste, em (a) disco externo e em (b) disco interno.

A Figura 66 mostra em (a) o perfil de movimento aplicado ao disco de arraste externo, uma entrada degrau de 20 rpm e em (b) o perfil de movimento aplicado ao disco de arraste interno, um perfil do tipo degrau composto com tendência a formação de um perfil triangular, com rotação máxima de 115 rpm e rotação mínima de -60 rpm.

Os gráficos das saídas são mostrados na Figura 67:



(a)



(b)

Figura 67 - Parâmetros da cinemática da esfera, em (a) ângulo de giro e em (b) velocidade angular em relação ao eixo instantâneo.

A Figura 67 (a) mostra que o ângulo de giro apresentou variação de intensidade, devido a variação da velocidade de rotação do disco de arraste interno. Conforme a entrada aplicada, a variação ocorreu na forma de patamares seguindo uma tendência a uma forma triangular. Conforme observado na Figura 67 (b) o mesmo ocorreu com a velocidade de rotação da esfera, que apresentou variação em degraus compostos com tendência a forma triangular.

Conforme o previsto, devido a variação do ângulo de giro, a usinagem da esfera foi eficiente em retirar material de uma superfície maior que a alcançada com a aplicação das

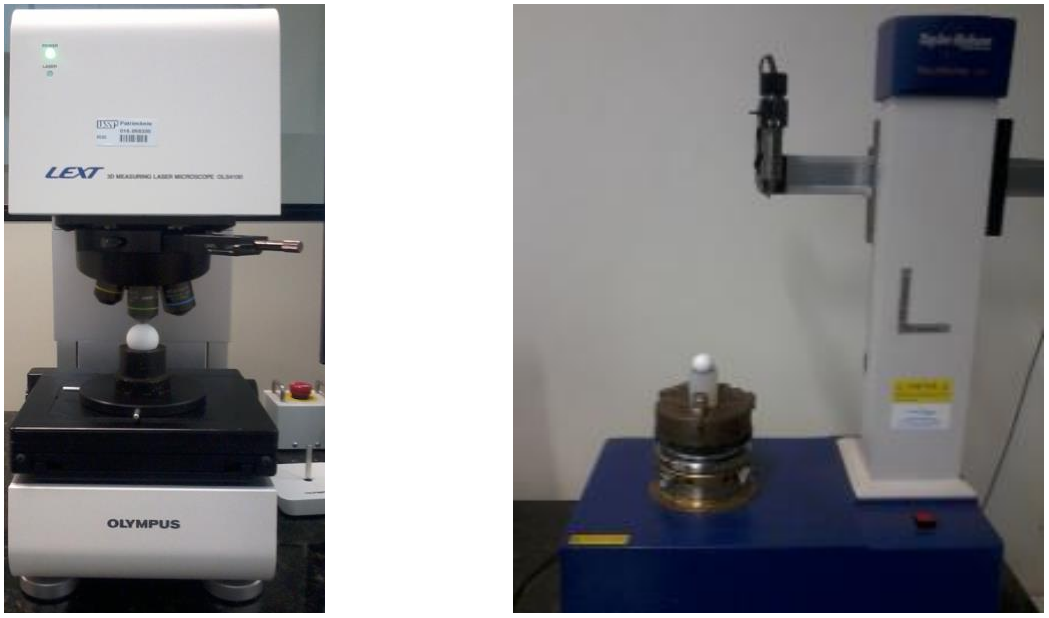
entradas degrau simples, a marca em desnível proveniente do processo de prensagem isostática foi removida com sucesso.

O tempo total usinagem foi de 9 horas, sendo 7 horas a duração da usinagem de desabaste e 2 horas a duração da usinagem de acabamento.

4.4.2. Caracterização metrológica

Para a caracterização metrológica das esferas, foi medido o parâmetro Ra de acabamento superficial, a circularidade e a esfericidade das esferas em cada etapa do processo, desde a prensagem, passando pelas duas etapas de usinagem, até a sinterização.

O parâmetro de rugosidade Ra foi medido com o microscópio Olympus modelo OLS 4100, no Núcleo de Manufatura Avançada da EESC. O erro de circularidade da esfera foi medido no Talyrond 131. O erro de esfericidade foi medido em uma máquina de medir por coordenadas no NepAS, na EESC. A Figura 68 mostra as medições da esfera:



(a) (b)

Figura 68 – Caracterização metrológica, em (a) acabamento superficial e em (b) circularidade.

Foi também utilizado o perfilômetro ótico WEEKO modelo 1001 NT, do Laboratório de Ultra Precisão da EESC para levantamento da topografia da esfera, as imagens foram geradas para a esfera na etapa da prensagem e na etapa da usinagem em desbaste.

- **Esfera prensada**

A Figura 69 mostra a imagem obtida da esfera prensada no perfilômetro ótico WEEKO:

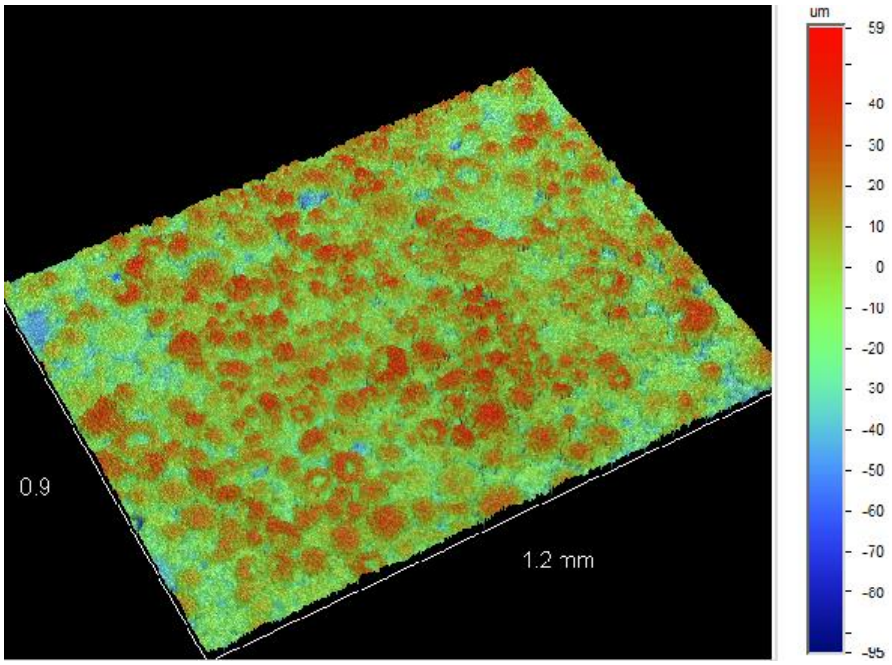
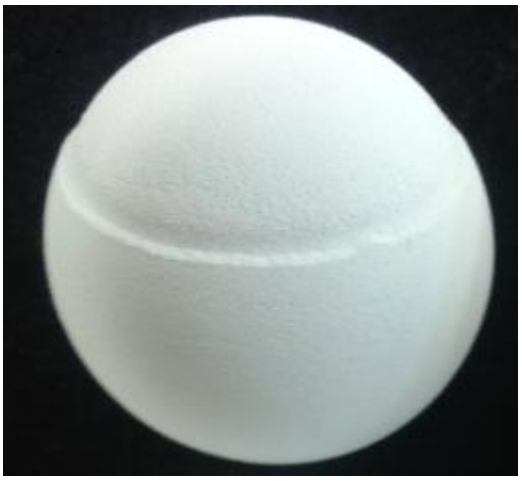


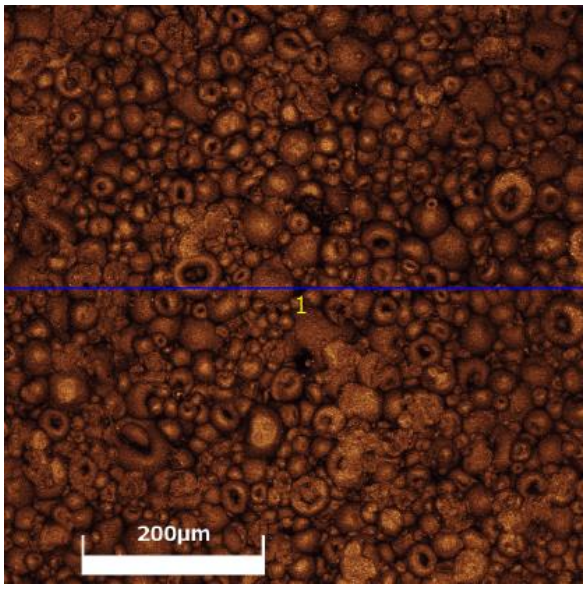
Figura 69 – Imagem da topografia da esfera prensada.

A imagem da Figura 69 mostra um trecho da superfície da esfera de 1,2 mm x 0,9 mm, a superfície da esfera prensada é bastante irregular, com muitos grânulos sobressalentes (pontos mais elevados em vermelho).

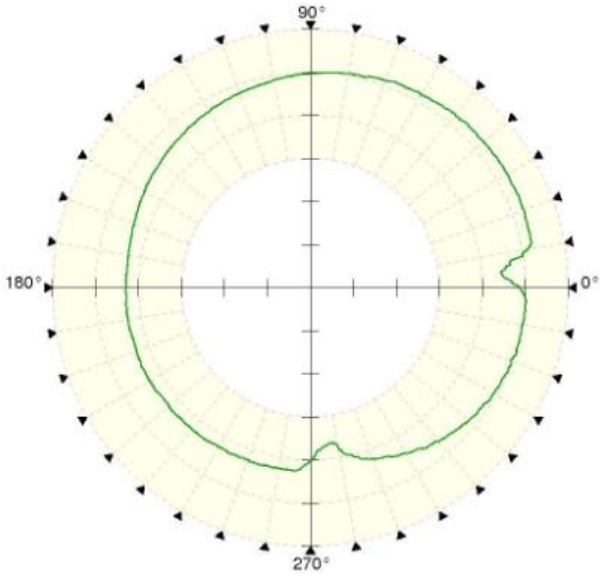
A Figura 70 mostra em (a) a esfera prensada, em (b) um trecho da superfície da esfera ampliado ao microscópio Olympus, em (c) um perfil de circularidade obtido no Talyrond e em (d) o perfil do segmento (1) mostrado em (b).



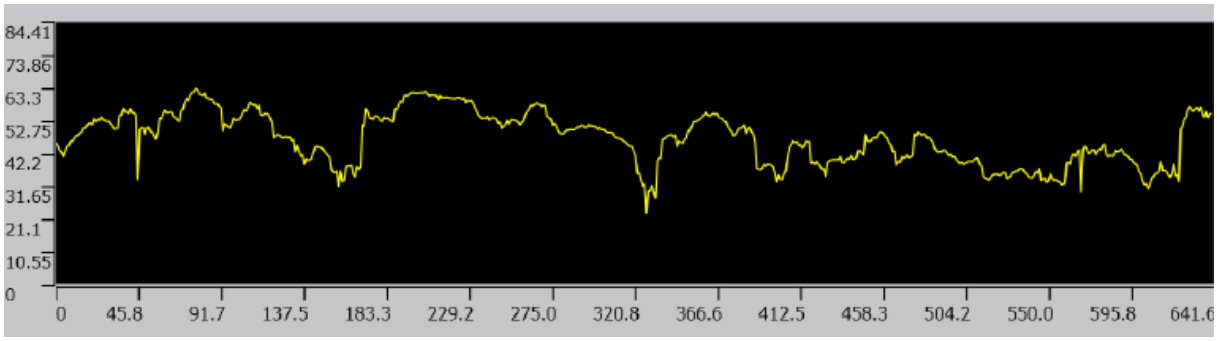
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 70 – Esfera prensada, em (a) foto, em (b) superfície ao microscópio laser, em (c) medida de circularidade e em (d) perfil de medição de rugosidade.

A Figura 70 (a) mostra a esfera cerâmica formada após o processo da prensagem isostática com a marca em desnível deixada pelo processo. Em (b) é possível observar os

grânulos na superfície da esfera. Em (c) o perfil de circularidade mostra o desnível existente na esfera e em (d) o perfil linear mostra as irregularidades de formato arredondado provenientes dos grânulos que formam a esfera.

A Tabela 9 mostra os valores medidos do parâmetro Ra para a esfera prensada:

Tabela 9 – Valores medidos do parâmetro Ra para a esfera prensada.

Medida	Parâmetro Ra (μm)
1	5,311
2	6,355
3	7,768
4	6,371
5	7,664
Média	6,694

A Tabela 10 mostra os valores do erro de circularidade para a esfera prensada:

Tabela 10 – Valores medidos de erro de circularidade para a esfera prensada.

Medida	Erro de circularidade (μm)
1	134,05
2	184,33
3	555,81
4	841,13
5	464,07

Os valores da Tabela 9 mostram que o valor médio do parâmetro Ra para a esfera prensada é de 6, 694 μm, e os valores da Tabela 10 mostram um erro máximo de circularidade de 841,13 μm, erro elevado devido ao desnível proveniente da etapa da prensagem.

O valor do erro de esfericidade medido foi de 228 μm.

- **Esfera usinada em desbaste**

Após o processo de usinagem em desbaste foi obtida uma imagem da superfície da esfera no perfilômetro ótico WEEKO, mostrada pela Figura 71:

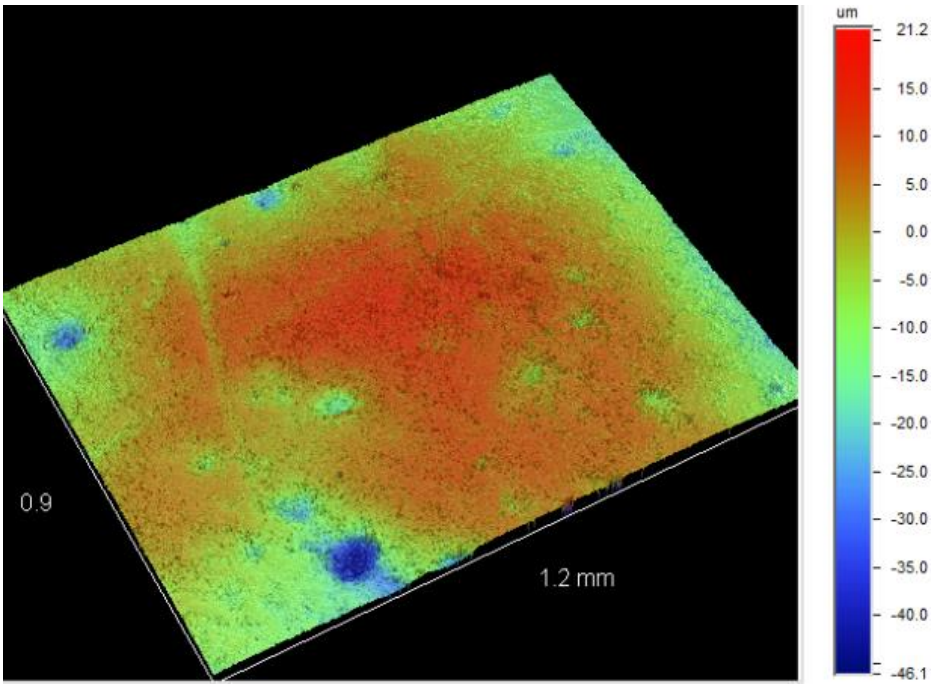
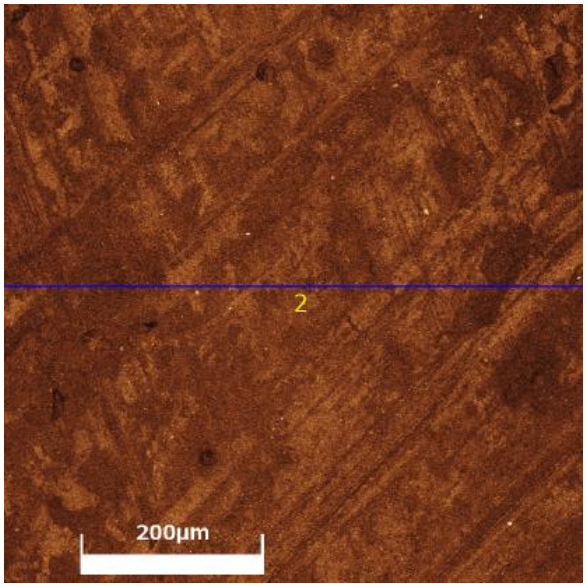


Figura 71 - Imagem da topografia da esfera usinada em desbaste.

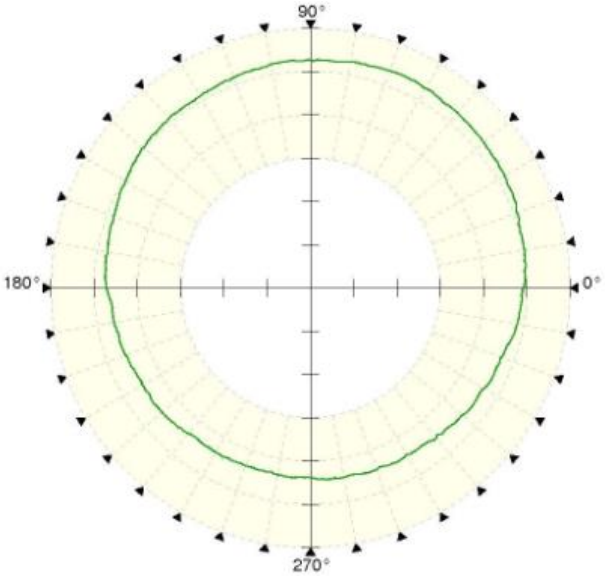
A imagem da Figura 71 mostra a superfície da esfera usinada bem mais homogênea que a superfície da esfera prensada. É possível observar um risco proveniente da usinagem e locais de maior profundidade aproximadamente circulares, o que indica a ocorrência de usinagem intergranular, com o destacamento de grãos inteiros.

A Figura 72 mostra em (a) a esfera usinada em desbaste, em (b) um trecho da superfície da esfera ampliado ao microscópio Olympus, em (c) um perfil de circularidade obtido no Talyrond e em (d) o perfil do segmento (2) mostrado em (b).

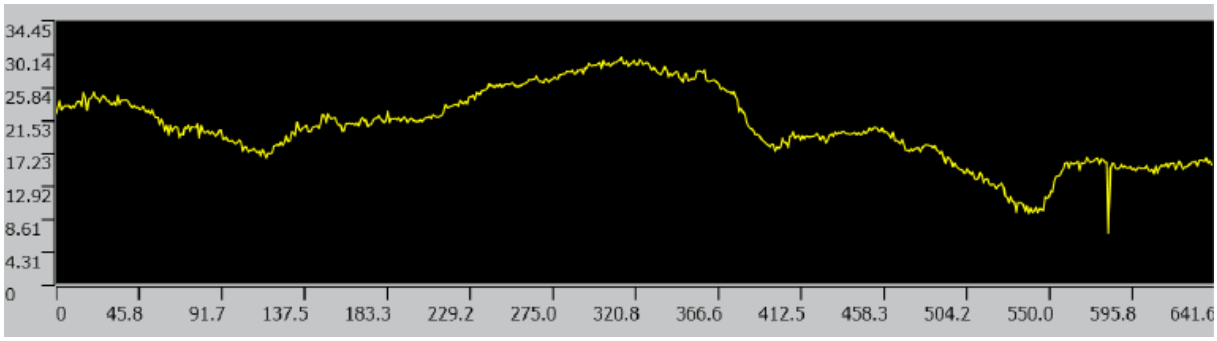
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 72 – Esfera usinada em desbaste, em (a) foto, em (b) superfície ao microscópio laser, em (c) medida de circularidade e em (d) perfil de medição de rugosidade.

A Figura 72 (a) mostra a esfera cerâmica após o processo da usinagem em desbaste, percebe-se que a marca em desnível deixada pelo processo da prensagem isostática foi totalmente removida. Em (b) é possível observar a superfície da esfera com a presença de vários riscos de usinagem. Em (c) o perfil de circularidade mostra a ausência do desnível e em (d) a análise do perfil linear mostra que o padrão arredondado proveniente dos grânulos foi substituído por um padrão com menor valor de rugosidade.

A Tabela 11 mostra os valores medidos do parâmetro Ra para a esfera usinada em desbaste:

Tabela 11 – Valores medidos do parâmetro Ra para a esfera usinada em desbaste.

Medida	Parâmetro Ra (μm)
1	2,357
2	1,827
3	1,131
4	1,100
5	1,648
Média	1,613

A Tabela 12 mostra os valores do erro de circularidade para a esfera usinada em desbaste:

Tabela 12 – Valores medidos de erro de circularidade para a esfera usinada em desbaste.

Medida	Erro de circularidade (μm)
1	62,55
2	95,32
3	142,99
4	103,12
5	103,93

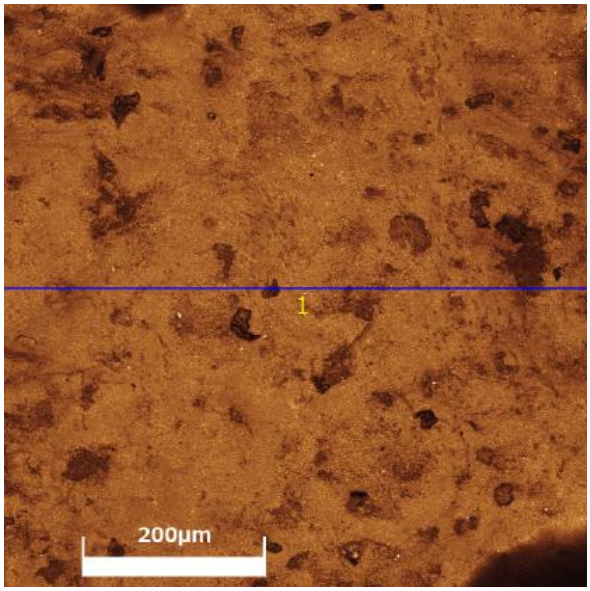
Os valores da Tabela 11 mostram que o valor médio do parâmetro Ra para a esfera usinada em desbaste é de 1,613 μm, e os valores da Tabela 12 mostram um erro máximo de circularidade de 142,99 μm.

O valor do erro de esfericidade medido foi de 174 μm.

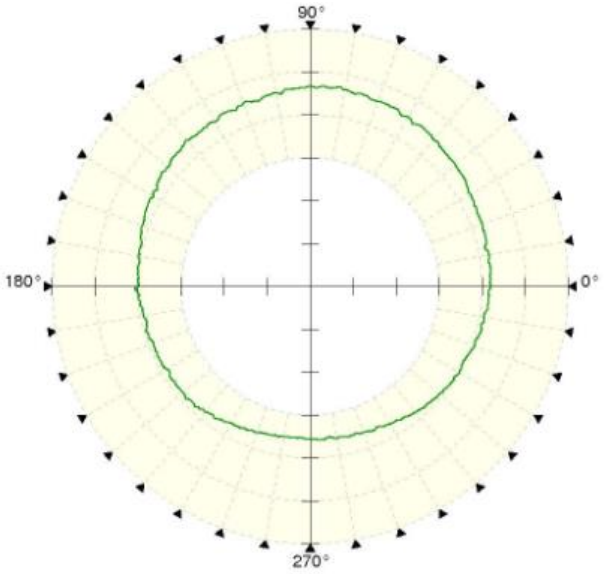
- **Esfera usinada em acabamento**

A Figura 73 mostra em (a) a esfera usinada em acabamento, em (b) um trecho da superfície da esfera ampliado ao microscópio Olympus, em (c) um perfil de circularidade obtido no Talyrond e em (d) o perfil do segmento (1) mostrado em (b).

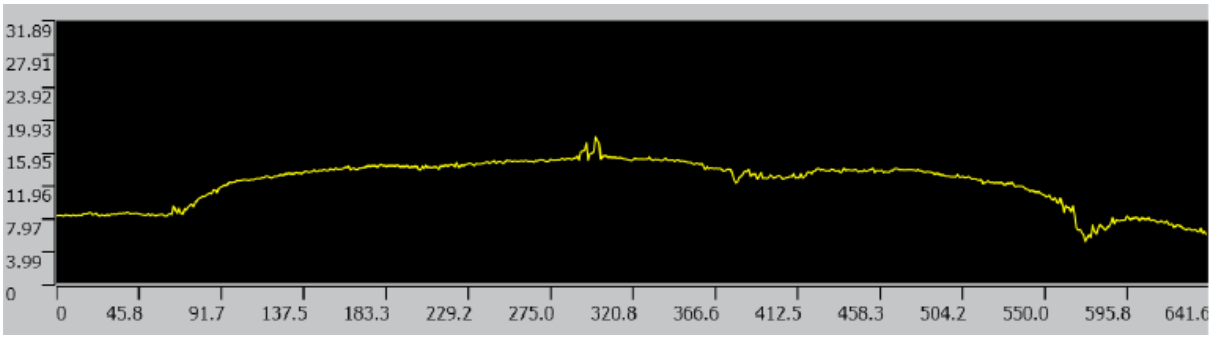
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 73 – Esfera usinada em acabamento, em (a) foto, em (b) superfície ao microscópio laser, em (c) medida de circularidade e em (d) perfil de medição de rugosidade.

A Figura 73 mostra (a) mostra a esfera cerâmica após o processo da usinagem em acabamento, percebe-se que a superfície da esfera está mais brilhante. Em (b) é possível

observar que os riscos de usinagem foram removidos da superfície da esfera. Em (c) é mostrado o perfil de circularidade e em (d) a análise do perfil linear mostra uma menor variação da topografia da superfície esférica.

A Tabela 13 mostra os valores medidos do parâmetro Ra para a esfera usinada em acabamento:

Tabela 13 – Valores medidos do parâmetro Ra para a esfera usinada em acabamento.

Medida	Parâmetro Ra (μm)
1	1,386
2	1,066
3	0,722
4	1,039
5	1,144
Média	1,071

A Tabela 14 mostra os valores do erro de circularidade para a esfera usinada em acabamento:

Tabela 14 – Valores medidos de erro de circularidade para a esfera usinada em acabamento.

Medida	Erro de circularidade (μm)
1	32,85
2	66,41
3	78,99
4	90,34
5	66,18

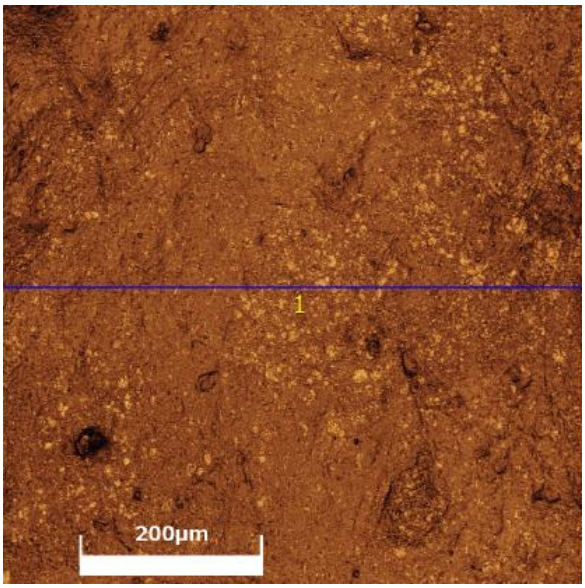
Os valores da Tabela 13 mostram que o valor médio do parâmetro Ra para a esfera usinada em acabamento é de 1,071 μm, e os valores da Tabela 14 mostram um erro máximo de circularidade de 90,34 μm.

O valor do erro de esfericidade medido foi de 78 μm.

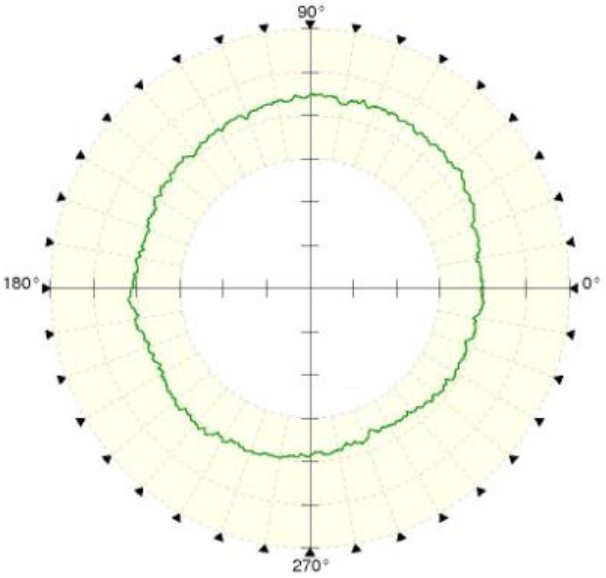
- **Esfera sinterizada**

A Figura 74 mostra em (a) a esfera sinterizada, em (b) um trecho da superfície da esfera ampliado ao microscópio Olympus, em (c) um perfil de circularidade obtido no Talyrond e em (d) o perfil do segmento (1) mostrado em (b).

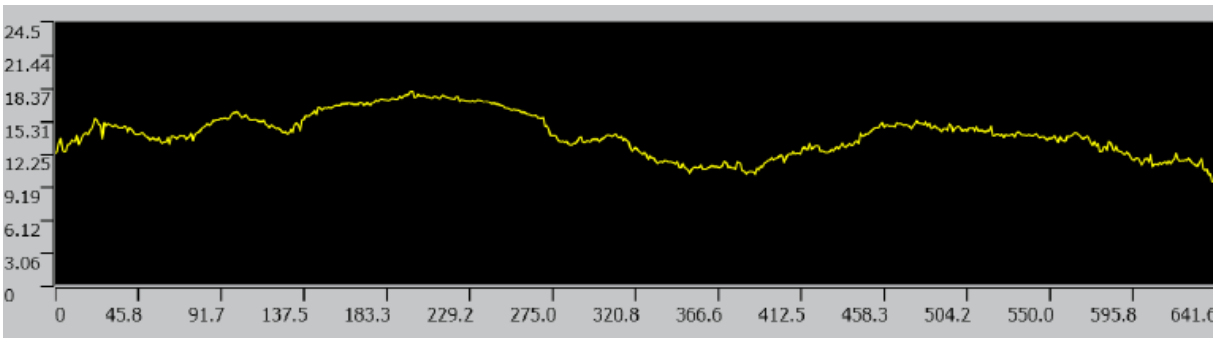
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 74 – Esfera sinterizada, em (a) foto, em (b) superfície ao microscópio ao laser, em (c) medida de circularidade e em (d) perfil de medição de rugosidade.

A Tabela 15 mostra os valores medidos do parâmetro Ra para a esfera sinterizada:

Tabela 15 – Valores medidos do parâmetro Ra para a esfera sinterizada.

Medida	Parâmetro Ra (μm)
1	1,366
2	0,947
3	1,544
4	1,410
5	1,144
Média	1,282

A Tabela 16 mostra os valores do erro de circularidade para a esfera sinterizada:

Tabela 16 – Valores medidos de erro de circularidade para a esfera sinterizada.

Medida	Erro de circularidade (μm)
1	35,30
2	74,63
3	49,73
4	78,34
5	49,42

Os valores da Tabela 15 mostram que o valor médio do parâmetro Ra para a esfera sinterizada é de 1,282 μm, e os valores da Tabela 16 mostram um erro máximo de circularidade de 78,34 μm.

O valor do erro de esfericidade medido foi de 67 μm.

A Figura 75 resume as informações obtidas do parâmetro de acabamento superficial Ra e de esfericidade num gráfico que mostra a evolução do processo:

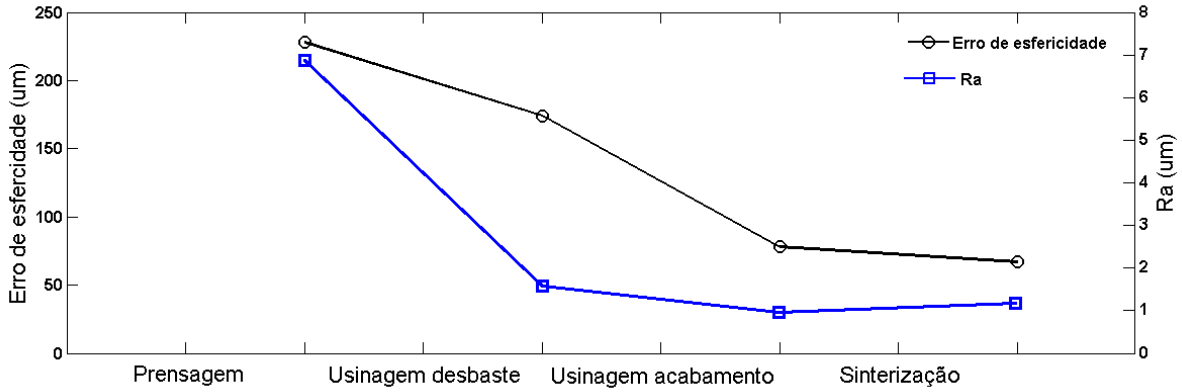


Figura 75 – Evolução dos parâmetros Ra de acabamento superficial e esfericidade durante o processo de fabricação da esfera cerâmica.

O gráfico da Figura 75 mostra a variação do parâmetro de acabamento superficial Ra e do erro de esfericidade no decorrer do processo de fabricação da esfera cerâmica. O gráfico mostra uma queda nos parâmetros desde a esfera prensada até a esfera usinada em acabamento, a partir da sinterização o parâmetro Ra de acabamento superficial tem uma elevação decorrente das distorções provocadas pelo processo.

Observa-se que o parâmetro Ra na etapa de usinagem de acabamento caiu a 16% do valor do parâmetro Ra da esfera prensada, e o erro de esfericidade na etapa de usinagem de acabamento caiu a 35% do valor do erro de esfericidade da esfera prensada.

5. CONCLUSÕES

A máquina de usinagem de esferas cerâmicas verdes foi projetada e um protótipo foi construído. O projeto da máquina foi desenvolvido com o auxílio de ferramentas da metodologia de projeto mecânico, o conceito definido foi o que utiliza rebolos de arraste formadores do canal em "V" independentes e excêntricos ao rebolo de corte. Os componentes utilizados para a realização da função global da máquina foram determinados com o auxílio do método da combinação de variantes.

A estrutura da máquina definida foi uma mesa de granito sintético sobre uma estrutura de metal soldado. O granito sintético é utilizado para maior amortecimento de vibrações e fabricação otimizada. Motores de passo foram determinados para o acionamento dos rebolos de arraste e motor DC para o acionamento do rebolo de corte, com transmissão por polias e correia e por acoplamento, respectivamente.

O molde para a mesa de granito sintético foi construído em madeira, os insertos metálicos foram fabricados e a mesa foi fabricada. A estrutura de metal foi construída de forma simplificada. O conjunto de arraste foi montado e depois alojado na mesa, assim como o conjunto de usinagem. Os conjuntos de arraste e usinagem foram montados com excentricidade de 5 mm. O rebolo de desbaste foi fabricado em alma de alumínio, camada de EVA e pista abrasiva em lixa e o rebolo de acabamento utilizado foi fabricado com alma de alumínio e pista abrasiva flexível formada por espuma de poliuretano com partículas abrasivas de carbeto de silício.

Para a validação da máquina foi projetado o molde para a prensagem isostática de esferas cerâmicas. O molde foi fabricado através da moldagem de silicone para a matriz e tampa elastomérica e a camisa rígida foi prototipada em ABS. Esferas de zircônia de diâmetro de 30 mm foram prensadas isostaticamente a 210 MPa por um minuto.

A estação de trabalho utilizada para o teste de validação foi montada com driver CNC para controle dos motores de passo responsáveis pelo acionamento dos rebolos de arraste. O software CNC aplicou entradas degrau para os motores, no primeiro ensaio entradas degrau simples foram utilizadas e no segundo ensaio uma entrada degrau composta foi utilizada.

A máquina foi validada e foram realizadas otimizações no projeto e programação dos giros dos rebolos de arraste e foram obtidas esferas com expressivos ganhos quanto à tolerância de forma e acabamento em relação à esfera prensada, o que valida o projeto desenvolvido.

O trabalho realizado atingiu o objetivo de projeto e fabricação de uma míni máquina para a usinagem de esferas cerâmicas verdes, contribuindo para melhor entendimento do processo da fabricação de esferas cerâmicas, a partir dos ensaios realizados no protótipo.

5.1. Trabalhos futuros.

- Aplicação de diferentes entradas aos motores, como a rampa, trapezoidal e harmônica.

- Medição dos coeficientes de atrito entre a esfera e as pistas dos rebolos de arraste e de corte para simulação dos efeitos de diferentes entradas e diferentes rotações no movimento resultante da esfera.

- Estudo da variação da magnitude da rotação do rebolo de corte no acabamento superficial e na circularidade das esferas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROSIO, L.; CAROTENUTO, G.; MARLETTA, G.; NICOLAIS, L.; SCANDURRA, A. Wear effects in retrieved acetabular UHMW-PE cups. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 7, p. 723–729, 1996.

ASHBY, M.F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Editora Elsevier, 2012, 311 p.

BUKVIC, G.; SANCHEZ, L. E. DE A. **Usinagem a verde voltada à melhoria da distorção e acabamento superficial de cerâmicas sinterizadas**IV Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. **Anais**...2010

DONACHIE, M. **Biomedical alloys**. Adv Materials Processes. 1998.7:63-5.

FISHER, J.; GALVIN, A.; TIPPER, J.; STEWART, T; STONE, M.; INGHAN, E. Comparison of the Functional Biological Activity and Osteolytic Potential of Ceramic on Ceramic and Cross Linked Polyethylene Bearings in the Hip. **Bioceramics and Alternative Bearings in Joint Arthroplasty**, p. 21–24, 2005.

FORTULAN, C. A.; PEDROSO, M. P. G.; PENAZZI, L. A.; PURQUERIO, B M. Prensa isostática de vasos gêmeos : projeto. **Cerâmica**, v. 60, p. 199–204, 2014.

FORTULAN, CA; PURQUERIO, BM. Desenvolvimento e desempenho de uma prensa isostática "*wet bag"*, **41º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, Anais, v.2 p.785-788, São Paulo, 1997.

GONÇALVES JÚNIOR, M.; FOSCHINI, C. R. Estudo dos parâmetros de processos de usinagem a verde de materiais cerâmicos **VII Seminário da Pós-graduação em Engenharia Mecânica.** Anais...2013

HARKESS, J. W.; CROCKARELL, J. R. **Arthroplasty of the hip**. In: Canale ST, Beaty JH, editors. Campbell's operative orthopaedics. 11th ed. Philadelphia: Mosby Elsevier, 2008. p. 312-481.

HARKESS, J. W.; DANIELS, A. U. **Introdução e visão geral**. In: Canale ST, Ed. Cirurgia ortopédica de Campbell. 10a. ed. São Paulo: Manole; 2006. p.223-42.

KANG, J.; HADFIELD, M. A novel eccentric lapping machine for finishing advanced ceramic balls. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 215, n. 6, p. 781–795, 1 jan. 2001.

KUROBE, T.; KAKUTA, H.; ONODA, M. Spin Angle Control Lapping of Balls (1st Report). **Journal of the Japan Society for Precision Engineering**, v. 62, n. 12, p. 1773–1777, 1996.

LEE, R.-T.; HWANG, Y.-C.; CHIOU, Y.-C. Lapping of ultra-precision ball surfaces. Part I. Concentric V-groove lapping system. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 10, p. 1146–1156, ago. 2006a.

LEE, R.-T.; HWANG, Y.-C.; CHIOU, Y.-C. Lapping of ultra-precision ball surfaces. Part II. Eccentric V-groove lapping system. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 10, p. 1157–1169, ago. 2006b.

MA, W. C. **High Efficiency Ultra-precision Grinding of Ceramic Balls Contents**. [s.l.] Saga, 2013.

MAIER, H. R.; MICHAELI, N. Green Machining of Alumina. **Key Engineering Materials**, v. 132-136, p. 436–439, 1997.

MARINESCU, I. D. (Ed.). **Handbook of advanced ceramic machining**. Boca Raton: CRC Press, 2006. 384 p.

MURPHY, S. B.; ECKER, T. M.; TANNAST, M. Two- to 9-year clinical results of alumina ceramic-on-ceramic THA. **Clinical orthopaedics and related research**, v. 453, n. 453, p. 97–102, dez. 2006.

PAHL, G. BEITZ, W. FELDHUSEN J.; GROTE K-H. **Projeto na Engenharia**, Editora Edgard Blucher (Tradução da 6ª. Edição alemã). (2005) 412p.

RAMOS, D. T. L.; PALLONE, E. M. J. A.; PURQUERIO, B. M.; FORTULAN, C.. A. Projeto de um banco de ensaio de desgaste do tipo " pin-on-disc ." **Cerâmica**, v. 60, p. 443–448, 2014.

REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. Second Edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA, 1995, 658 p

RICHERSON, D.W. **Modern ceramic engineering**, Properties, processing and use in design**.** Taylor e Francis Group, Boca Raton, USA, 2006, 707 p.

SANTOS, Ilmar Ferreira. **Dinâmica de sistemas mecânicos**: Modelagem, simulação, visualização, verificação. 1 ed. São Paulo: MAKRON Books, 2001. 272 p.

SCHELLER, W. L. Conventional Machining of Green Aluminum/Aluminum Nitride Ceramics. **Ohio Journal of Science**, v. 1994, n. 5, p. 151–154, 1994.

SCHWARTSMANN, C. R.; BOSCHIN, L. C.; GONÇALVES, R Z; YÉPES, A K.; SPINELLI, L. F. Novas superfícies em artroplastia total do quadril. **Revista Brasileira de Ortopedia**, v. 47, n. 2, p. 154–159, 2012.

SOUZA, M. M. **Estudo da forma e da rugosidade em próteses ortopédicas de quadril.** 2011. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

STRAKNA, T. J; JAHANMIR, S.; ALLOR, R. L.; KUMAR K. V. 1996, "Influence of grinding direction on fracture strength of silicon nitride", **J. Eng. Mater.Tech**., Vol. 118, pp. 335- 342.

UMEHARA, N. et al. A new apparatus for finishing large size/large batch silicon nitride (Si3N4) balls for hybrid bearing applications by magnetic float polishing (MFP).

International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 46, n. 2, p. 151–169, fev. 2006.

VOSS, Wilfried. **A comprehensible guide to servo motor sizing**. Greenfield: Copperhill Technologies Corporation, 2007. 158 p.

WANG, L.; SNIDLE, R. W.; GU, L. Rolling contact silicon nitride bearing technology : a review of recent research. v. 246, p. 159–173, 2000.

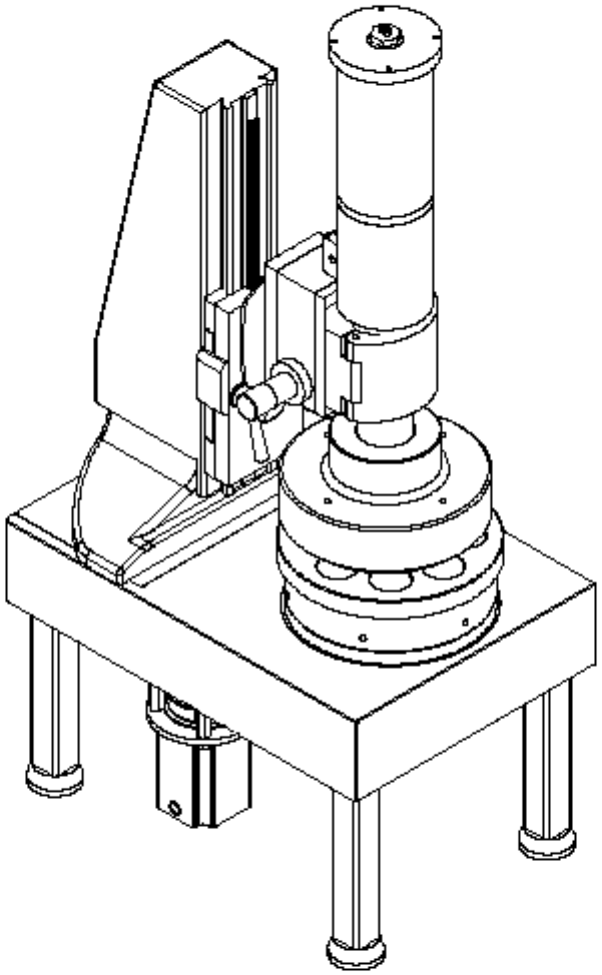
WREGE, P. A. S. M**etodologia para a obtenção de esferas de cerâmica para próteses de quadril.** 2000. 186 f. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

WREGE, PAULO ALBERTO; PURQUERIO, B. D. M. Desenvolvimento e Fabricação de implante total de quadril em cerâmica e polímero. Congresso brasileiro de engenharia de fabricação. **Anais**...Curitiba: 2001

YUAN, J.; YAO, W.; DENG, Q.; LV, B.. Research on V-Groove Angle of Rotated Dual-Plates Lapping Machine. **Applied Mechanics and Materials**, v. 37-38, p. 1125-1129, 2010. Disponível em: <www.scientific.net/AMM.37-38.1125>. Acesso em: 30 dez. 2014.

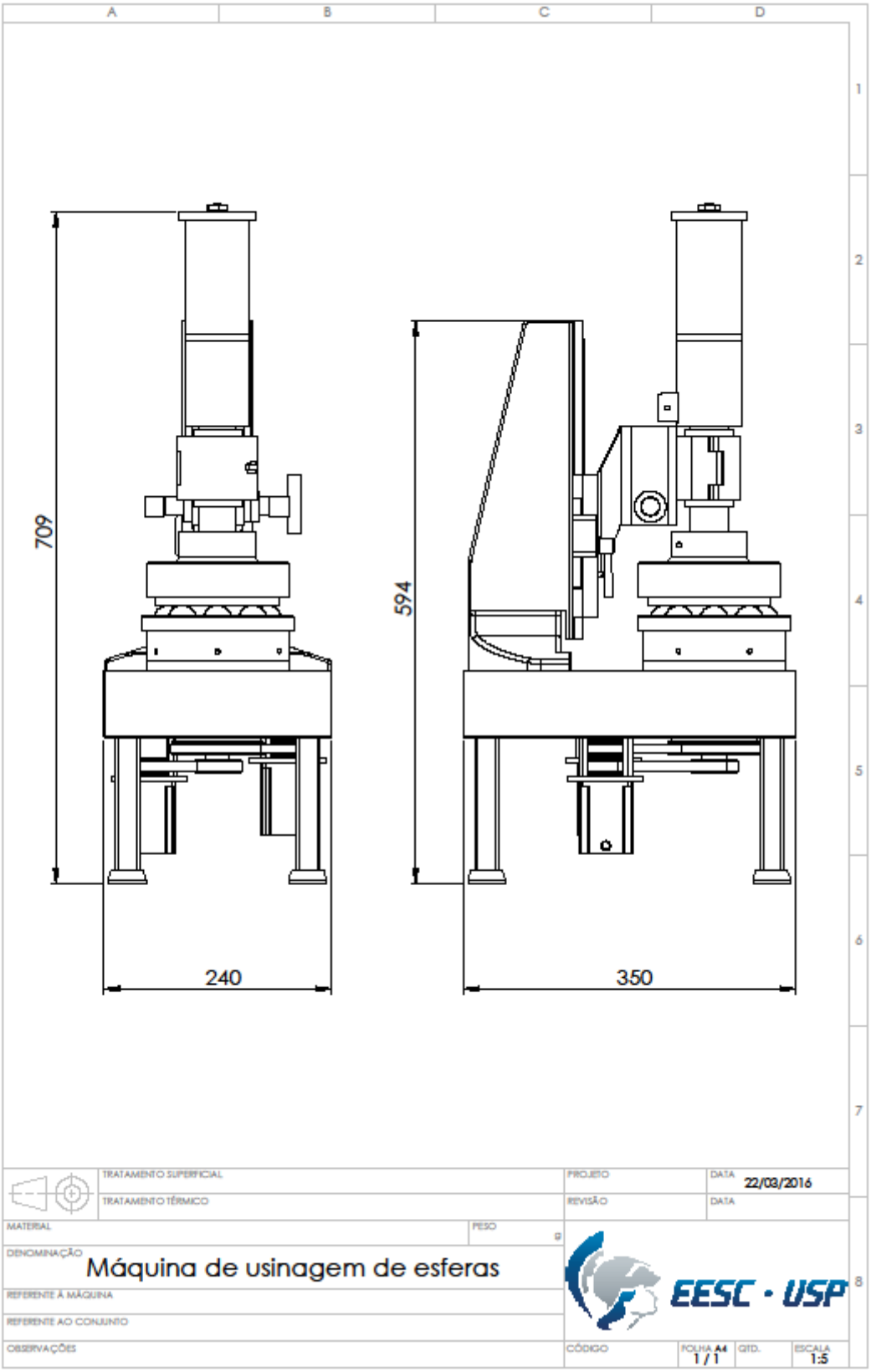
ZHANG, W. X. et al. Shaping of Green Ceramic Balls and Precision Lapping of Ceramic Balls for Ceramic Ball Bearings. **Key Engineering Materials**, v. 259-260, p. 471–475, 2004.

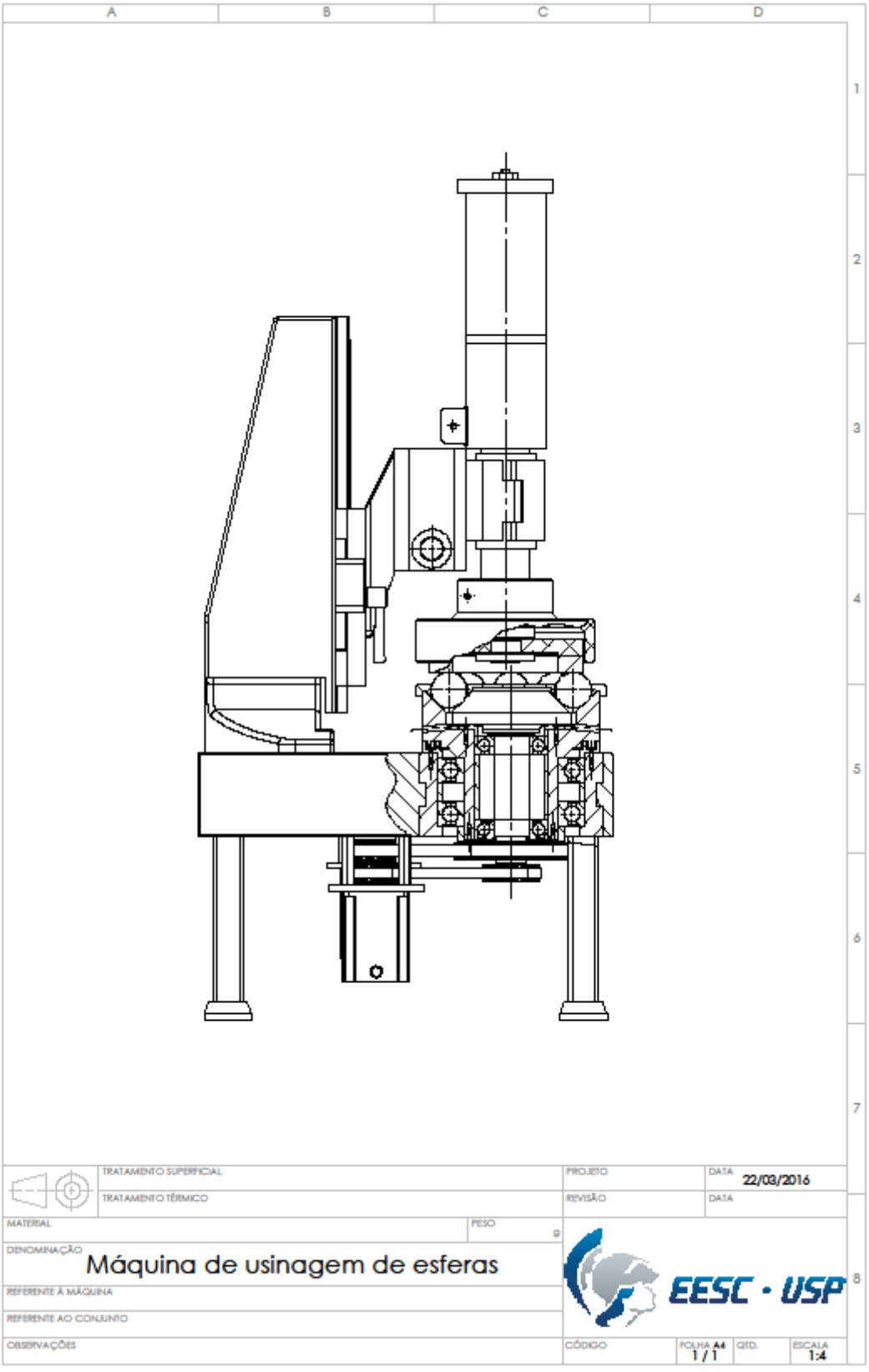
APÊNDICE A. Desenhos



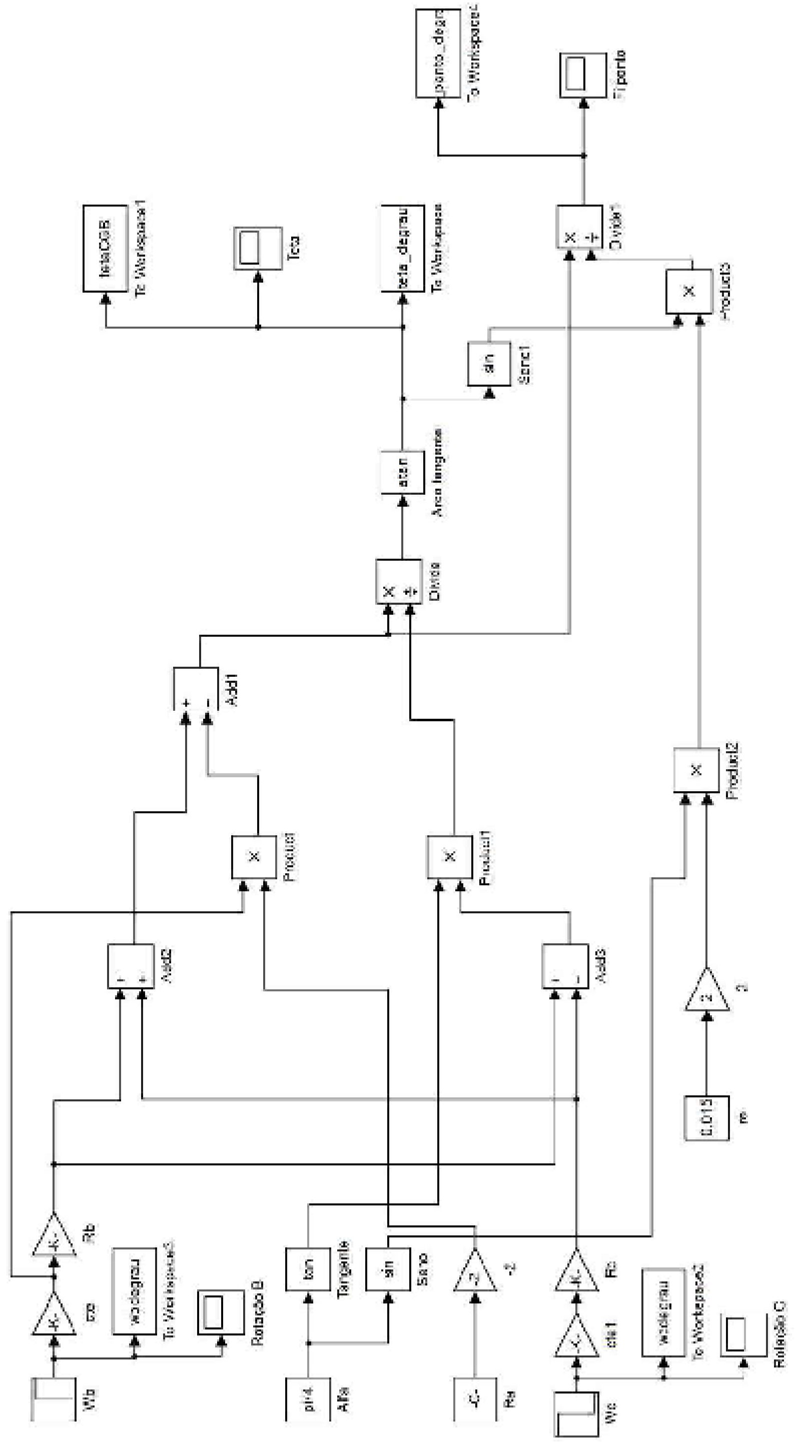
TRATAMENTO SUPERFICIAL		PROJETO	DATA 22/03/2016
TRATAMENTO TÉRMICO		REVISÃO	DATA
MATERIAL	PESO g		
DENOMINAÇÃO	Máquina de usinagem de esferas		
REFERENTE À MÁQUINA			
REFERENTE AO CONJUNTO			
OBSERVAÇÕES		CÓDIGO	FOLHA A4 1 / 1 · QTD. · ESCALA 1:4

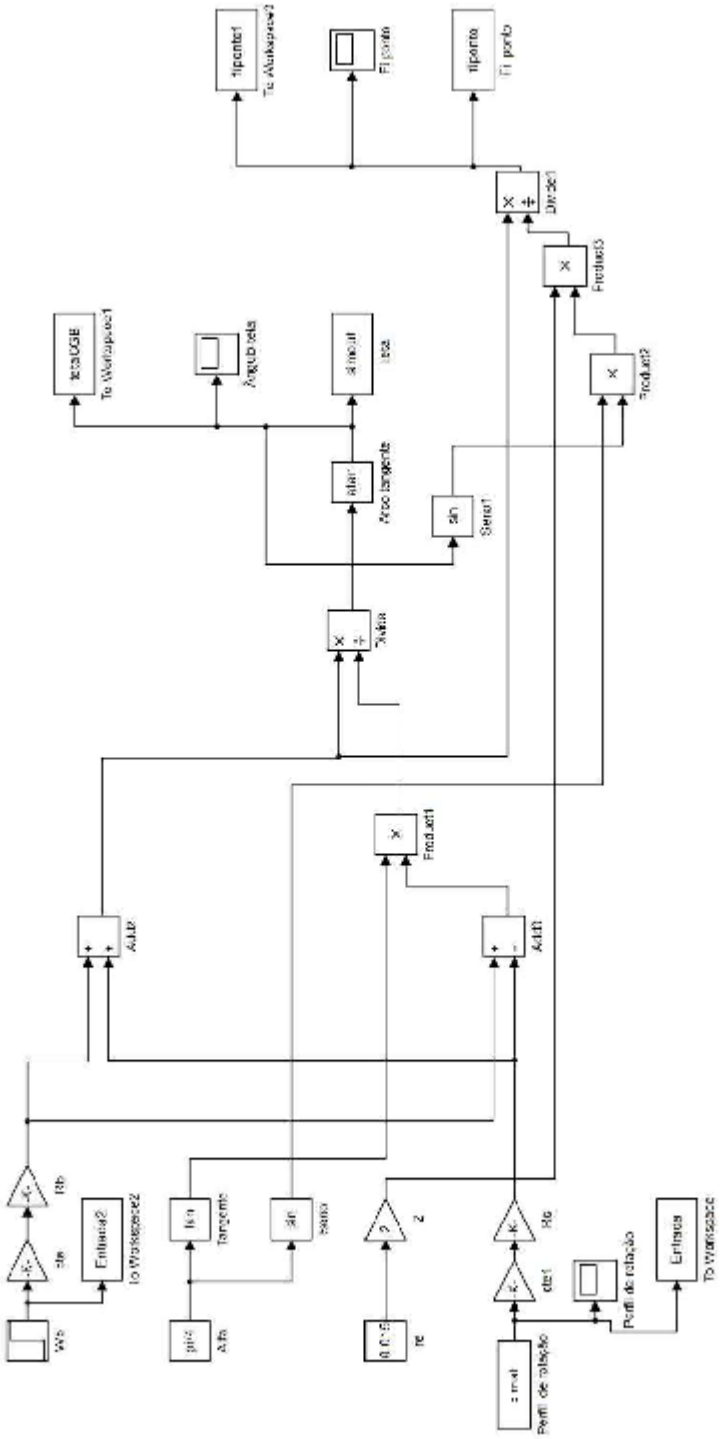
EESC · USP


A
B
C
D
1
2
3
4
5
6
7
8
709
594
240
350
TRATAMENTO SUPERFICIAL
TRATAMENTO TÉRMICO
PROJETO
DATA
22/03/2016
REVISÃO
DATA
MATERIAL
PESO
DENOMINAÇÃO
Máquina de usinagem de esferas
REFERENTE À MÁQUINA
REFERENTE AO CONJUNTO
OBSERVAÇÕES
CÓDIGO
FOLHA A4
1 / 1
QTD.
ESCALA
1:5
EESC · USP


A
B
C
D
1
2
3
4
5
6
7
8
TRATAMENTO SUPERFICIAL
TRATAMENTO TÉRMICO
PROJETO
DATA
22/03/2016
REVISÃO
DATA
MATERIAL
PESO
g
DENOMINAÇÃO
Máquina de usinagem de esferas
REFERENTE À MÁQUINA
REFERENTE AO CONJUNTO
OBSERVAÇÕES
CÓDIGO
FOLHA A4
1 / 1
QTD.
ESCALA
1:4
EESC · USP

APÊNDICE B. Diagramas de blocos


tetaOGB
To Workspace1
Teta
teta_degrau
To Workspace
ponto_degrau
To Workspace4
Tiponto
Divide1
Product3
sin
Seno1
atan
Arco tangente
Divide
Add1
Product
Product1
Product2
Add2
Add3
2
0.015
m
-K-
Rb
cte2
Rc
cte1
Wb
wbdegrau
To Workspace3
Rotação B
pi/4
Alfa
tan
Tangente
sin
Seno
-2
-C-
Ra
Wc
wcdegrau
To Workspace2
Rotação C


tipontot1
To Workspace2
Ti ponto
tiponto
Ti ponto
Divide1
Product3
Product2
anguloGE
To Workspace1
Angulo teta
simout
teta
Atan
Arco tangente
sin
Seno1
Soma
Add2
Add1
Product1
Ib
-K-
-1/n
Entrada2
To Workspace2
Ib/n
Tangente
sin
Seno
2
Ig
-K-
dte1
Perfil de rotação
Entrada
To Workspace
Wb
Ab
Perfil de rotação