

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MICRO LAPIDADORA**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Vivian de Souza Vidal, nºUSP 6484961

Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau

São Paulo

2014

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MICRO LAPIDADORA**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Vivian de Souza Vidal, nºUSP 6484961

Orientador: Rodrigo Lima Stoeterau

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

São Paulo

2014

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Vidal, Vivian de Souza**

**Desenvolvimento de uma micro-lapidadora / V.S. Vidal. --  
São Paulo, 2014.  
37 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Usinagem 2.Fabricação 3.Lapidação I.Universidade de São  
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecâ-  
nica II.t.**

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema .....	1
1.2	Relevância .....	2
1.3	Objetivos .....	2
1.4	Metodologia .....	3
1.5	Estrutura do trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	Processo de Lapidação .....	4
2.2	Fundamentos da Lapidação .....	6
2.2.1	Lapidação Plana .....	8
2.2.2	Lapidação Plana com Dois Discos .....	9
2.2.3	Outros Métodos de Lapidação .....	10
2.3	Composição de Ferramentas e Materiais Operacionais ....	12
2.4	Acessórios .....	14
2.5	Parâmetros .....	15
2.6	Lapidadoras .....	17
2.7	Projeto Informacional .....	17
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
3.1	Micro lapidadora .....	19
3.2	Fixação de Peças Complexas .....	21
3.3	Acionadores .....	25
3.3.1	Motores Assíncronos .....	25
3.3.2	Servomotores de Corrente Contínua – CC .....	26
3.3.3	Servomotores de Corrente Alternada – CA .....	26

3.3.4	Motores de Passo .....	26
3.4	Controlador de Velocidade .....	27
3.5	Mancais .....	27
3.6	Sistema de Injeção de Mistura de Lapidação .....	28
3.7	Anel Externo .....	30
3.8	Disco de Lapidação .....	30
3.9	Base .....	30
3.10	Carregador .....	30
3.11	Montagem da Máquina .....	31
4	RESULTADOS .....	34
5	ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES .....	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Inserto de ferramenta de usinagem	2
Figura 2.1 – Evolução na precisão da usinagem no século XX	4
Figura 2.2 – Possíveis tipos de remoção de material durante a lapidação	5
Figura 2.3 – Movimento e efeito dos grãos de lapidação	6
Figura 2.4 – Superfície lapidada	7
Figura 2.5 – Técnicas de lapidação	8
Figura 2.6 – Rota de peças em lapidação com dois discos	9
Figura 2.7 – Configuração das peças e do carregador em lapidação cilíndrica	10
Figura 2.8 – Lapidação cilíndrica externa periférica	11
Figura 2.9 – Lapidação de perfil	11
Figura 2.10 – Lapidação ultrassônica	12
Figura 2.11 – Parâmetros influentes na lapidação	15
Figura 2.12 – Influência da pressão e da duração da lapidação na remoção de material	16
Figura 2.13 – Exemplo de Lapidadora	17
Figura 3.1 – Esboço da micro lapidadora	20
Figura 3.2 – Esquema na micro lapidadora	21
Figura 3.3 – Esboço da primeira opção de fixação	22
Figura 3.4 – Esboço da segunda opção de fixação	22
Figura 3.5 – Esboço da terceira opção de fixação	23
Figura 3.6 – Desenho 3D do braço articulado	24
Figura 3.7 – Desenho 3D do braço articulado mostrando os graus de liberdade	25
Figura 3.8 – Desenho 3D do mancal Aerostático	28
Figura 3.9 – Esquema do sistema de injeção de mistura de lapidação	29
Figura 3.10 – Válvula com mangueira e cano prolongador	29
Figura 3.11 – Desenho 3D parcial da micro lapidadora	31
Figura 3.12 – Desenho 3D parcial da micro lapidadora com a peça auxiliar do carregador indicada.	32
Figura 3.13 – Desenho 3D mostrando a parte de baixo da micro lapidadora sem o motor.	33
Figura 4.1 – Desenho 3D da micro lapidadora completa.	34

Figura 4.2 – Válvula com mangueira e cano prolongador. 35

Figura 4.3 – Desenho 3D da micro lapidadora explodida. 35

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Combinações favoráveis de pó de lapidação e material da peça de trabalho	14
Tabela 3.1 – Comparação de acionadores rotativos	26
Tabela 3.2 – Comparação de mancais	27

## **1 INTRODUÇÃO**

Neste trabalho a proposta é o projeto, desenvolvimento e construção do protótipo de uma micro lapidadora controlada.

O processo de lapidação é um processo de usinagem com ferramenta de geometria não definida. A retirada de material se dá pela ação de grãos abrasivos em suspensão em um fluido atuando na interface da superfície a ser usinada.

Uma lapidadora é a máquina capaz de fazer com que a mistura de grãos abrasivos e fluido de lapidação cumpram seu papel de retirada de material.

### **1.1 Formulação do Problema**

O intuito de ter uma máquina como esta é o de suprir a necessidade de lapidação de componentes de tamanho reduzido e frágeis.

Lapidadoras em geral não são capazes de usinar peças de geometria complexas. A máquina a ser desenvolvida neste trabalho será capaz de lapidar superfícies planas de peças complexas. Tendo como exemplo incertos de ferramenta de usinagem e outras peças de dimensões reduzidas, principalmente peças que possuam uma geometria, que proporcione baixa estabilidade para se manter na posição desejada durante o processo.

A face a ser usinada durante o processo de lapidação deve ser grande o suficiente para que a peça se mantenha apoiada sobre esta face durante todo o processo.

Faces laterais de insertos de ferramentas de usinagem geralmente possuem geometria que as impossibilita de passarem pelo processo de lapidação. A figura 1.1 mostra um inserto que ilustra o problema. A não ser que ele seja fixado por meio de algum instrumento especial, as faces laterais não podem ser usinadas em uma lapidadora convencional.



Figura 1.1 – Inserto de ferramenta de usinagem ([http://www.kyocera-componentes.com.br/ceratip\\_ca55\\_px.html](http://www.kyocera-componentes.com.br/ceratip_ca55_px.html))

## 1.2 Relevância

Uma máquina como a sugerida neste projeto é capaz de gerar superfícies planas de alta qualidade em peças de geometria complexa. Uma aplicação desta possibilidade é a preparação de ferramentas de usinagem especiais.

Outra aplicação possível para uma micro lapidadora, é como uma máquina ferramenta capaz de efetuar fatiamento para construção de modelos 3D de estrutura de materiais, pois quanto menor puder ser a retirada de material para escaneamento da camada seguinte, mais precisa será a elaboração do modelo.

Uma micro-lapidadora pode também ser utilizada para efetuar ensaios de desgaste abrasivo em situações controladas. Sendo que o próprio processo de lapidação é um caso de desgaste envolvendo 3 corpos onde o desgaste da peça é desejado e controlado através da velocidade de rotação do disco e da força aplicada sobre a peça.

## 1.3 Objetivos

Neste trabalho a proposta é o desenvolvimento do projeto, e a construção do protótipo de uma micro lapidadora para lapidação de insertos de usinagem.

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Efetuar um estudo sobre o processo de lapidação.
- Efetuar um estudo sobre lapidadoras.
- Desenvolver uma máquina utilizando um software CAD.

- Construir um protótipo para testes e análise.

#### **1.4 Metodologia**

A abordagem metodológica do sistema será voltada em primeiro lugar para o estudo teórico do funcionamento e projeto de uma micro lapidadora e o próprio processo de lapidação em si, levando-se em consideração inclusive o fato de ser necessário a redução de causas de vibração que possam afetar a máquina, internas e externas. Para máquinas muito precisas, vibrações que em outras máquinas seria aceitável, se tornam demasiadas podendo provocar diversos defeitos na peça final.

Em seguida o desenvolvimento da máquina como um produto é efetuado.

Após o projeto da máquina, a próxima etapa será a construção do protótipo, sendo que a abordagem será mais experimental. Nesta etapa principalmente, os processos devem ser cuidadosos e precisos, para que problemas construtivos não influenciem no funcionamento do protótipo.

A etapa seguinte é composta por ensaios do protótipo, que possam atestar sua eficácia.

#### **1.5 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos. O capítulo 1 trata da apresentação geral do que é o trabalho e da metodologia a ser empregada nele. Neste capítulo são tratadas algumas das possíveis aplicações de uma micro lapidadora e qual será o processo de seu desenvolvimento. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica do processo de lapidação, de lapidadoras e do processo de desenvolvimento de um produto. O capítulo 3 mostra todos os processos e materiais que foram utilizados para o desenvolvimento da máquina. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos. O capítulo 5 apresenta as análises e conclusões sobre os resultados obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como mostra a figura 2.1 retirada de Tanigushi, 1994; Ikawa, 1991 apud Stoeterau, 2004 a lapidadora de precisão é totalmente capaz de produzir peças com precisão elevada.

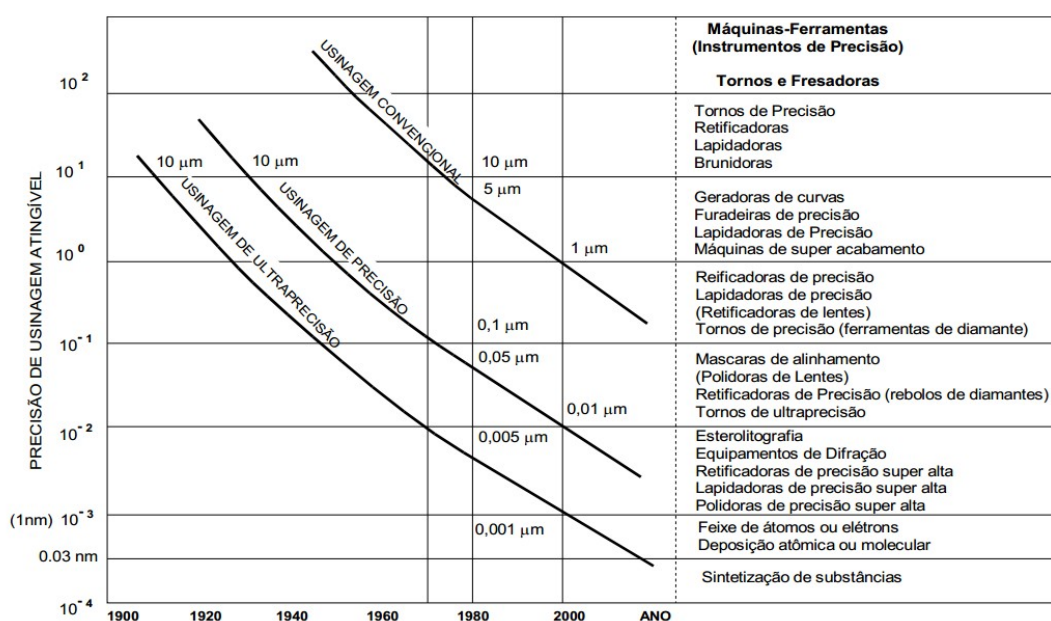


Figura 2.1 – Evolução na precisão da usinagem no século XX

### 2.1 Processo de Lapidção

O processo de lapidação é principalmente um processo de usinagem dependente de espaço com ferramenta de geometria não definida. É definido como um processo de formação de cavaco com grãos soltos em um fluido ou pasta.

Superfícies lapidadas apresentam marcas de usinagem sem direção definida e uma aparência reluzente.

As superfícies a serem lapidadas são geralmente planas, se a peça tiver uma forma diferente, modificações no método devem ser aplicadas, geralmente com ferramentas auxiliares.

Considerando-se a baixa taxa de remoção de material e os custos do processo, em diversas situações a lapidação não é um processo economicamente aplicável, porém a lapidação plana cilíndrica tem se mostrado competitiva em comparação com outros processos de usinagem de precisão. Frequentemente é a única opção para atingir a qualidade de acabamento necessária.

Tanto materiais dúcteis quanto materiais frágeis podem ser lapidados, até mesmo o diamante pode passar pelo processo de lapidação.

Elementos de geometria complexa podem ser preenchidos com outro material que possa ser facilmente removido posteriormente, para que o método de lapidação possa ser aplicado mais facilmente.

Com a lapidação muitas peças podem ser usinadas sem a necessidade de serem fixadas. O tempo de troca de peça pode ser muito curto, componentes de menos de 0,1mm de espessura podem ser usinados. É possível atingir baixos níveis de aquecimento durante o processo, reduzindo possíveis distorções.

Altíssima qualidade de superfície e rugosidade podem ser atingidas. Lapidação raramente provoca distorções por tensão. Com a lapidação é possível inclusive usinar várias peças de uma vez.

Durante o processo de lapidação o material pode ser removido de duas possíveis formas, uma é a formação de cavaco e a outra é a formação de micro trincas, como visto na figura 2.2.

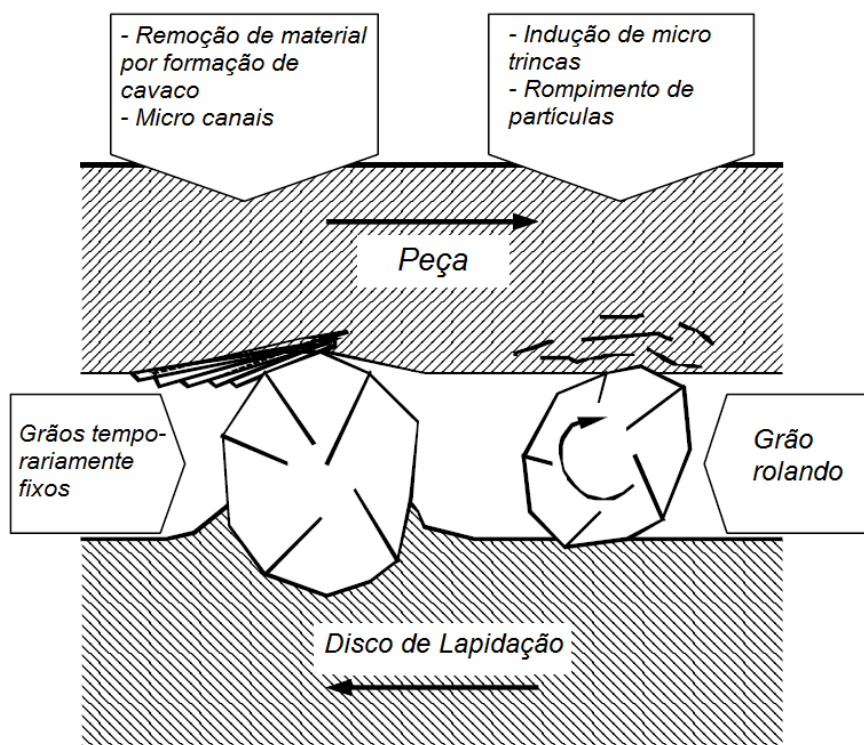


Figura 2.2 – Possíveis tipos de remoção de material durante a lapidação (Klocke 2009)

## 2.2 Fundamentos da Lapidação

Na lapidação a superfície de trabalho é esfregada contra a superfície da peça a ser trabalhada. O corte é efetuado pela inserção de um fluido de lapidação no espaço entre o disco de lapidação e a peça de trabalho. No processo, grãos soltos são adicionados continuamente ou intermitentemente. A figura 2.3 mostra o processo de corte da lapidação.

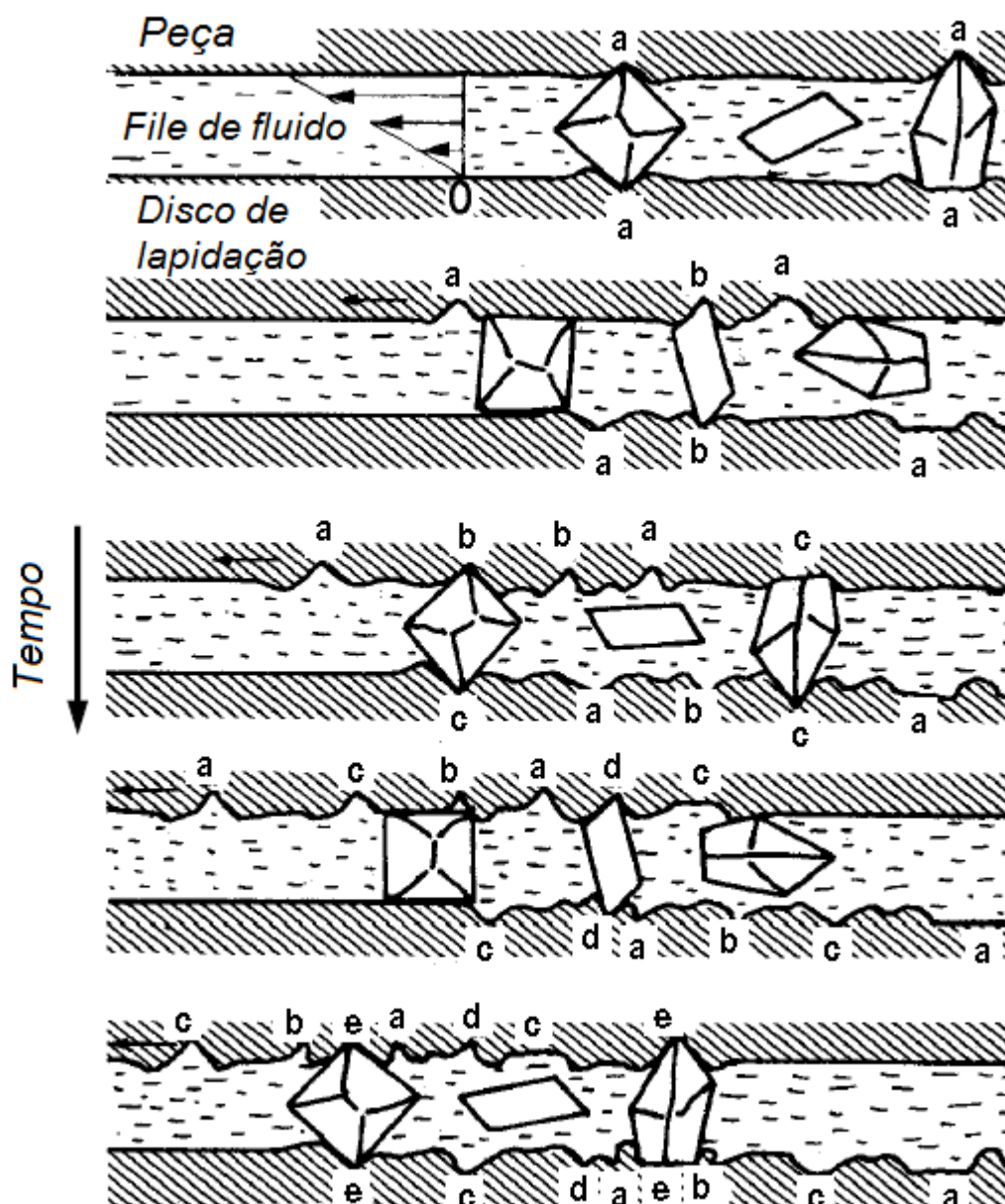


Figura 2.3 – Movimento e efeito dos grãos de lapidação (Klocke 2009)

A remoção de material ocorre como resultado do efeito de rolamento do grão na zona de contato entre a peça de trabalho e o disco de lapidação ou de grãos

temporariamente fixados na superfície do disco. As arestas dos grãos de lapidação se inserem no material da peça de trabalho. A profundidade de inserção depende do material e da pressão da superfície, normalmente entre 5% e 10% do diâmetro médio do grão.

Através do vórtice criado no filme de fluido, os grãos se acertam com o movimento. Suas arestas que estão se movendo em rotas cicloidais, se encravam na superfície.

Através de repetidas penetrações dos grãos na superfície da peça de trabalho, materiais dúcteis são moldados até a fadiga e então sucessivamente removidos. No caso de materiais duros e frágeis são induzidas micro trincas na superfície da peça e a interconexão delas levam a uma quebra e retirada de partículas.

A superfície adquire sua aparência através da sobreposição de micro crateras causadas pelos grãos. As ranhuras sugestivas de remoção de material causadas por processos de corte não são visivelmente reconhecíveis, como mostra a figura 2.4. Ocorre também um endurecimento da superfície da peça de trabalho.

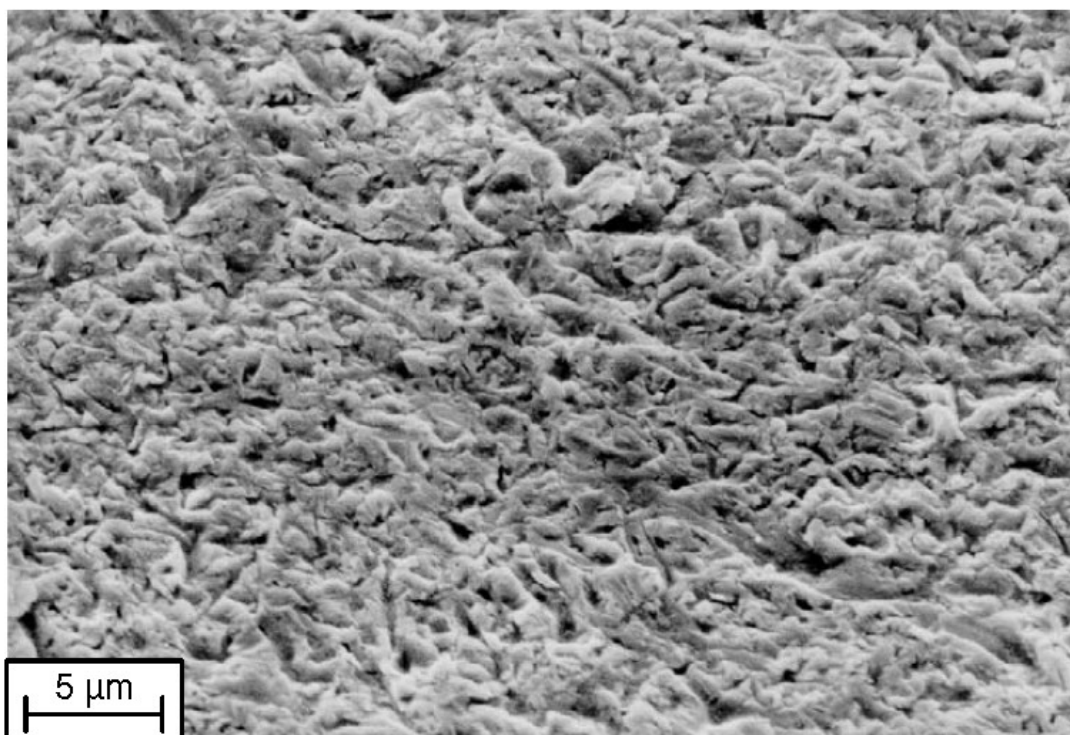


Figura 2.4 – Superfície lapidada (Klocke 2009)

É possível subdividir os métodos de lapidação de acordo com a superfície ativa da ferramenta de lapidação. O termo lapidação periférica se aplica quando o eixo da

ferramenta e a superfície da peça de trabalho são paralelos e a lapidação lateral se aplica quando o eixo da ferramenta é perpendicular à superfície da peça de trabalho. A figura 2.5 mostra alguns exemplos de diferentes métodos de lapidação.

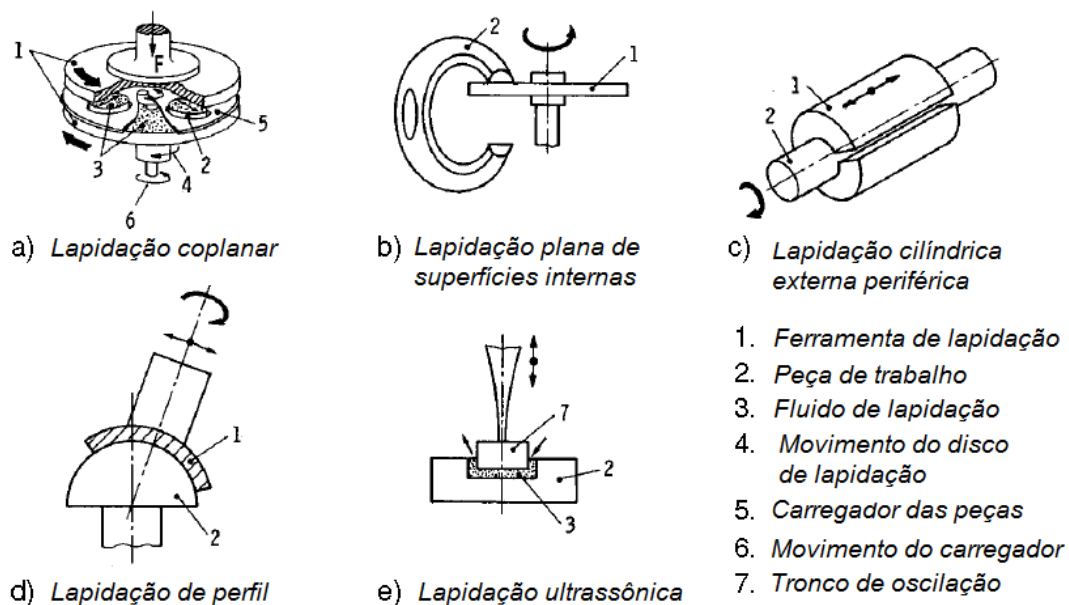


Figura 2.5 – Técnicas de lapidação (Klocke 2009)

### 2.2.1 Lapidação Plana

A lapidação plana é usada para criar superfícies com alta qualidade. São distintas duas variações do método. no primeiro caso, as peças são movidas livremente sobre o disco de lapidação, no segundo caso as peças são presas em carregadores com rota restrita para prevenir danos.

As peças de trabalho são normalmente colocadas em anéis em um disco de lapidação (também chamado de placa de lapidação ou disco de corte). A precisão de forma da peça de trabalho é atingível na lapidação dependendo principalmente da planicidade do disco de lapidação. Os grãos de lapidação são encontrados em um fluido carregador entre o disco e a peça, esta mistura de fluidos e grãos é a mistura de lapidação. A peça de trabalho recebe a pressão de corte necessária através de seu próprio peso ou através da soma deste peso com carregamentos adicionais fornecidos por discos de carga ou cilindros de pressão.

### 2.2.2 Lapidação Plana com Dois Discos

Diferente da lapidação com um disco, a lapidação com dois discos utiliza duas superfícies planas opostas na peça ao mesmo tempo. Neste método as peças são inseridas em carregadores dentados, estes são encaixados em pinos ou engrenagens que os movem em torno de dois eixos, seus próprios e o eixo central. As peças descrevem uma órbita espicicloidal ou hipocicloidal entre os discos de lapidação, como mostra a figura 2.6.

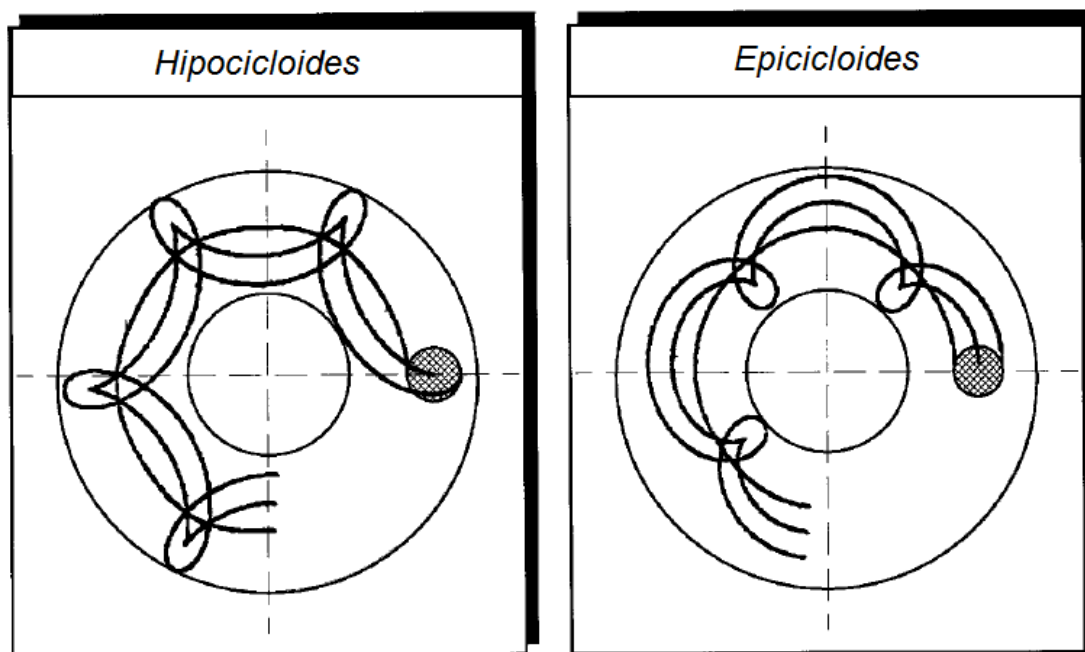


Figura 2.6 – Rota de peças em lapidação com dois discos (Klocke 2009)

A mistura de lapidação é adicionada através do disco superior.

Outra vantagem do sistema de dois discos é o controle dimensional através de um leitor digital central ou externo, o que ajuda a atingir uma precisão dimensional de  $2\mu\text{m}$ .

Um tipo particular de aplicação do princípio dos dois discos é a lapidação periférica cilíndrica. Neste método, as peças são seguras radialmente em um grande carregador, cujo eixo de rotação é levemente deslocado do eixo do disco de lapidação, como mostra a figura 2.7. Este método remove material graças a esta posição deslocada. Precisão de até  $0,2\mu\text{m}$  de circularidade e linearidade pode ser atingida e a taxa de remoção é de 10 a  $20\mu\text{m}$  em 10 minutos.

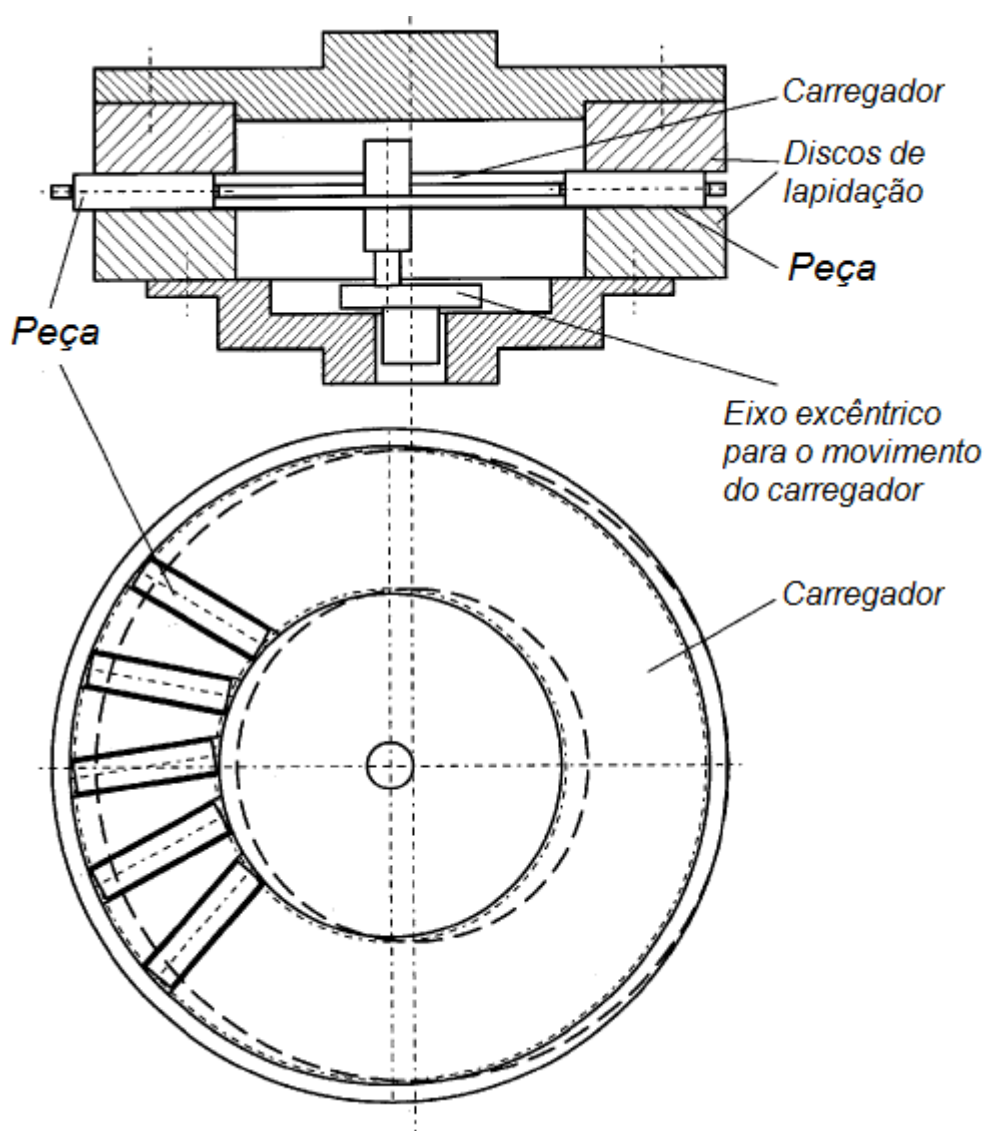


Figura 2.7 – Configuração das peças e do carregador em lapidação cilíndrica (Klocke 2009)

### 2.2.3 Outros Métodos de Lapidação

O princípio da lapidação periférica cilíndrica externa é ilustrado na figura 2.8. Um corte na ferramenta possibilita o alargamento e o estreitamento desta ferramenta em forma tubular. Isto possibilita o ajuste da pressão de trabalho pretendida e das dimensões desejadas. Com a intenção de melhorar a forma em termos de cilindricidade e circularidade, um movimento rotacional e um axial são sobrepostos como no processo correspondente de brunimento.

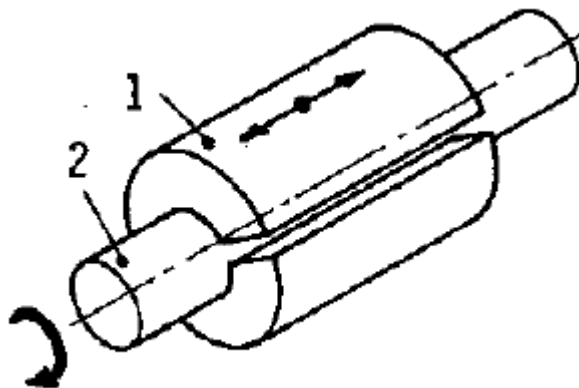


Figura 2.8 – Lapidação cilíndrica externa periférica (Klocke 2009)

A peça de trabalho e a ferramenta de lapidação devem ter o mesmo comprimento. A mistura de lapidação é introduzida na superfície de contato esporadicamente. Peças em forma de disco são lapidadas juntas em feixes para passar por este processo.

Ferramentas de lapidação com forma apropriada tornam possível a lapidação de cilindros internos e furos. Estas ferramentas podem ser alargadas, sendo assim adaptáveis para mudanças de diâmetro.

Lapidação de superfícies esféricas é possível através de ferramenta apropriada. A ferramenta a ser utilizada tem a forma do negativo correspondente à peça a ser produzida, como mostra a figura 2.9. A forma desejada é atingida sob constantes mudanças de direção do movimento da ferramenta. A meta do corte é alcançar altíssima precisão nas dimensões finais, que é possível pelos movimentos oscilantes da ferramenta.

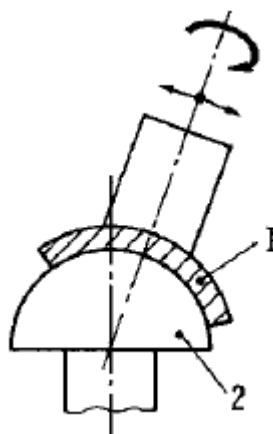


Figura 2.9 – Lapidação de perfil (Klocke 2009)

A lapidação ultrassônica ocorre com o corte causado pela aplicação de impulsos ultrassônicos na mistura de lapidação sobre a peça de trabalho, sendo que estes impulsos são aplicados por uma ferramenta que possui a forma a ser usinada na peça, como mostra a figura 2.10.

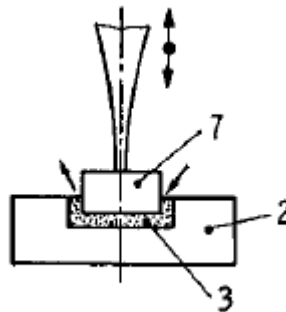


Figura 2.10 – Lapidação ultrassônica (Klocke 2009)

### 2.3 Composição de Ferramentas e Materiais Operacionais

As propriedades do disco de lapidação são determinadas por fatores geométricos e pelo material da peça de trabalho. Quando a peça possui uma superfície grande, canais no disco de lapidação são necessários para garantir uma distribuição constante de grãos de lapidação por todo o disco.

Os materiais comumente utilizados como grãos abrasivos na lapidação são carboneto de silício (SiC), óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), carboneto de boro ( $B_4C$ ) e cada vez mais o diamante.

O disco de lapidação produz um movimento rotativo que move a mistura de lapidação, as peças de trabalho e os anéis. A velocidade de rotação precisa ser controlada para que forças centrífugas indesejadas sejam evitadas. Os discos de lapidação são geralmente feitos de ferro fundido especial ou ligas de aço endurecido.

Para o disco de lapidação, três faixas de dureza são distintas: macio ( $< 140HB$ ), médio (140 a 220 HB) e duro ( $> 220HB$ ). Uma baixa dureza do disco favorece o encravamento de grãos na superfície do mesmo, o que leva a formação de cavacos na peça de trabalho. discos mais duros tendem a fazer os grãos rolarem no espaço entre ele e a peça. A dureza do disco também influencia no seu próprio desgaste e na taxa de remoção de material. Em geral, discos mais duros levam a um menor desgaste e a uma maior taxa de remoção, porém os anéis tem um menor efeito corretivo.

Para refrigerar o disco de lapidação pode ser necessária a utilização de um sistema com fluido refrigerante passando por baixo da superfície. No caso de lapidação com grande retirada de material, a refrigeração é indispensável, pois de outra forma a temperatura pode chegar a subir 50°C após muito tempo de trabalho. Isto acarretaria em um aquecimento indesejável da peça, mudanças na viscosidade do fluido de lapidação ou até evaporação do mesmo. O aquecimento também pode prejudicar a obtenção de peças com alta precisão geométrica.

A viscosidade do fluido de lapidação é muito importante, um fluido com alta capacidade de carga e alta viscosidade pode fazer com que o filme de lapidação tenha uma espessura maior que o tamanho do grão, diminuindo muito a eficiência quanto a retirada de material, logo, grãos muito pequenos devem ser acompanhados de fluido pouco viscoso. Concentração excessiva de grãos pode reduzir também a efetividade de corte.

Tipicamente os valores para concentração de grãos no fluido em lapidação grosseira são de 80 a 100g de pó de lapidação para 1l de fluido e para lapidação de ultra precisão são de 65 a 80g de pó por 1l de fluido quando for baseado em óleo, quando for baseado em água, a concentração aumenta de três a quatro vezes.

As características determinantes para a qualidade do pó de lapidação são: uma distribuição homogênea do tamanho dos grãos, a dureza e o tipo e qualidade das arestas de corte. Os grãos tem normalmente tamanhos de 5 a 40 $\mu$ m, sendo a maioria entre 12 e 18 $\mu$ m. As variações de tamanho em uma classe de grãos não pode passar de 20%.

O tipo de pó de lapidação é determinado, entre outras coisas, de acordo com o material da peça de trabalho. Algumas combinações úteis estão na tabela 2.1

Tabela 2.1 – Combinações favoráveis de pó de lapidação e material da peça de trabalho (Klocke 2009)

Pó de Lapidação	Área de aplicação
Oxido de alumínio	Aços macios, metais leves e não ferrosos, carbono, materiais semicondutores
Carbonato de silício	Aços temperados e revenidos, ligas de aço, ferro fundido cinzento, vidro, porcelana
Carbonato de boro	Carbonatos, cerâmicas
Diamante	Materiais duros

## 2.4 Acessórios

Acessórios usados na lapidação são os anéis, os carregadores para a peça de trabalho, equipamentos para reduzir ou aumentar o peso da peça de trabalho e equipamentos para injetar a mistura de lapidação.

Os anéis se localizam sobre o disco de corte, são suportados por braços guias laterais com roletes e recebem movimento rotativo através de atrito quando a mesa gira.

As funções dos anéis são: receber as peças, ajustar a geometria do disco de lapidação durante o processo de corte, auxiliar na distribuição da mistura de lapidação, auxiliar no direcionamento da remoção de cavacos, direcionar movimento adicional a peça de trabalho e remover calor.

Peças com angulação podem necessitar de braços de apoio ou outro tipo de ferramenta de fixação.

Para reduzir o tempo de corte e tornar a lapidação mais economicamente viável, muitas vezes, peso adicional se faz necessário. Peso este, adicionado por dispositivos pneumáticos ou por outro corpo sobre as peças exercendo seu peso, porém esta pressão não pode ser excessiva para não danificar a peça.

Componentes para armazenar a mistura de lapidação e injetá-la quando necessário são também importantes. Quanto à reutilização da mistura, ela é possível parcialmente, apesar de os grãos estarem muito danificados após a usinagem para serem reutilizados, o fluido carregador muitas vezes pode ser reutilizado.

## 2.5 Parâmetros

As principais condições de lapidação estão mostradas na figura 2.11.

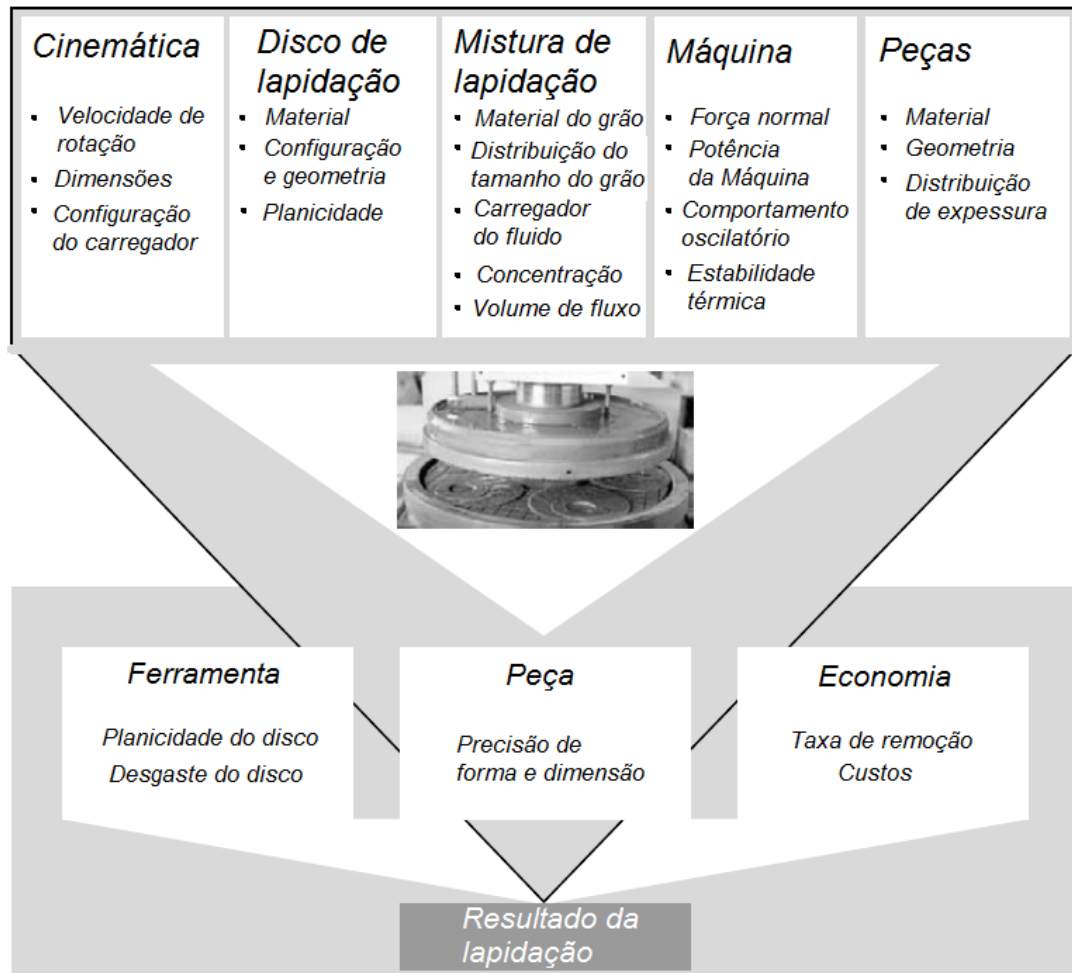


Figura 2.11 – Parâmetros influentes na lapidação (Klocke 2009)

A cinemática parcialmente determina o formato do disco e o material do mesmo. Ela também determina como a mistura de lapidação irá se comportar e também está interligada com a geometria da peça.

A velocidade e a pressão de lapidação são os principais fatores para calibrar a taxa de remoção de material. O diâmetro do grão também influencia muito nisso.

Pode-se reparar pela figura 2.12 que o material removido aumenta com o tempo de usinagem até uma carga de 16N/cm<sup>2</sup>, para cargas maiores esta quantidade de material removido começa a diminuir, isto pode ser explicado pela quebra de grãos no

começo da operação. Com isso podemos assumir que esta operação possui uma carga ótima.

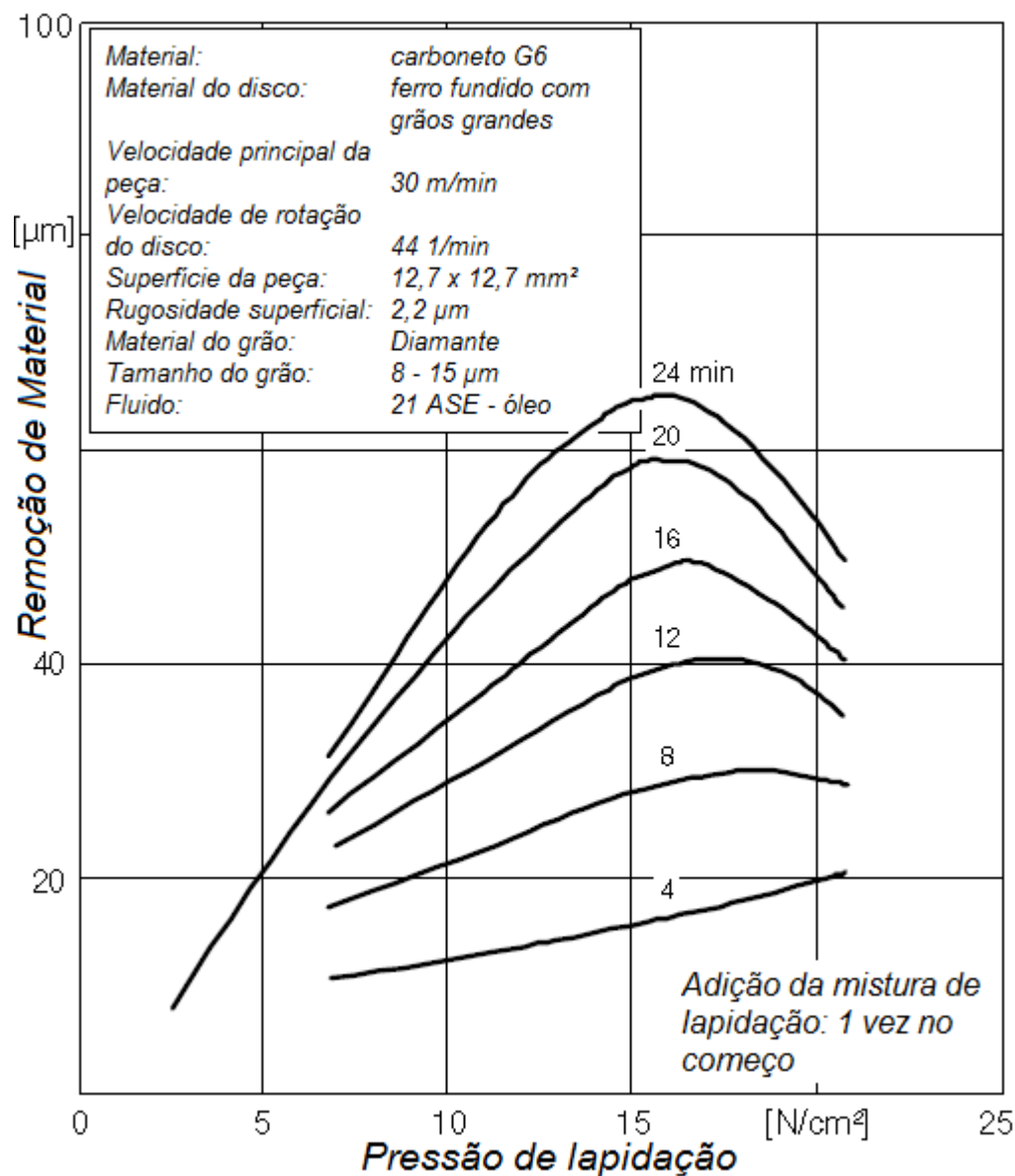


Figura 2.12 – Influência da pressão e da duração da lapidação na remoção de material (Klocke 2009)

A estabilidade do sistema de lapidação também tem grande influência sobre a qualidade do resultado final. Para alta qualidade, baixíssima vibração é requerida, externa e interna.

## 2.6 Lapidadoras

Lapidadoras são máquinas que possam efetuar os processos descritos acima, sendo que um exemplo de uma lapidadora plana pode ser vista na figura 2.13.



Figura 2.13 – Exemplo de Lapidadora (<http://jvrmaquinas.com.br/Produtos.aspx?id=7274>)

## 2.7 Projeto Informacional

Como visto em Stoeterau, 2004, o projeto informacional informacional realizado durante o início do desenvolvimento de uma máquina ferramenta consiste em levantar as características que a máquina deve possuir.

É necessário saber o tipo de peça que a máquina deve produzir, quais as tolerâncias para o resultado final, com quais materiais a máquina irá trabalhar, o tamanho do lote a ser produzido, qual deve ser o preço da máquina e qual deve ser seu peso e tamanho.

Os instrumentos de medida da máquina devem ser de 10 a 100 vezes mais precisos que as dimensões da peça a ser fabricada. Outras perguntas relativas a fabricação a serem respondidas são com relação a resistência e rigidez que a máquina deve possuir sem que isso afete sua capacidade de produzir peças com precisão e

acabamento superficial desejado, quais os atuadores necessários e como controlá-los são outras informações a serem definidas.

É necessário definir os materiais que melhor se enquadram na fabricação da máquina, levando em consideração suas características, a definição dos sensores da máquina devem ser precisos o suficiente para garantir a precisão solicitada pelo cliente externo, porém o custo dos sensores chega a ser um limitante para que não inviabilize a máquina.

A preocupação com a segurança do operador é outra coisa que deve guiar a definição de características que a máquina deve possuir, deve-se definir a forma de fabricação da máquina, sendo esta a forma mais econômica possível sem afetar na qualidade, tendo inclusive a qualidade como uma preocupação, um controle de qualidade deve ser orquestrado para que as peças da máquina sejam produzidas de acordo com o esperado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Micro lapidadora

A máquina a ser projetada neste trabalho é uma micro lapidadora, que tem como requisitos:

- Ser de fácil utilização (possuir poucos botões);
- Possuir peças baratas de prateleira ou fáceis de fabricar;
- A máquina deve ser ergonômica;
- A máquina deve ser precisa (planeza de 1  $\mu\text{m}$ );
- Gerar baixas rugosidades ( $R_a/S_a$  0,1  $\mu\text{m}$ );
- Ser pequena (máx. 450x450x450 mm);
- Leve (máx. 25 kg);
- Confiável (1 falha/160 horas de operação);
- Baixo custo (máx. R\$ 1.500,00);
- Bonita;
- Silenciosa (máx. 50 dB).

Um esboço inicial da máquina é mostrado na figura 3.1. Neste esboço é possível visualizar a ideia de fixação para peças complexas e o sistema de aplicação da mistura de lapidação ou pasta, assim como os componentes internos da máquina.

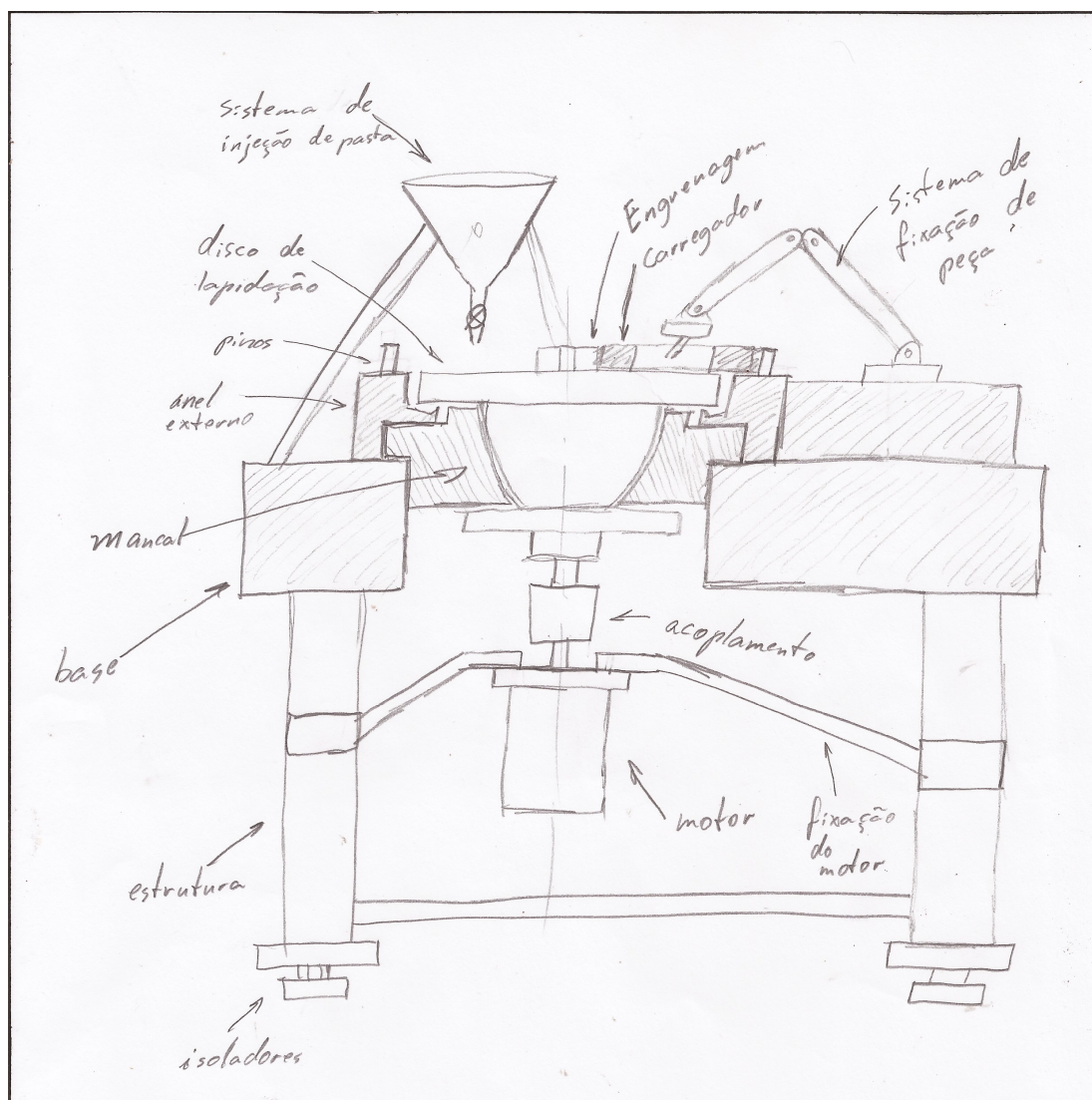


Figura 3.1 – Esboço da micro lapidadora

Um esquema mostrando os componentes da máquina e suas interações pode ser visto na figura 3.2. As partes da máquina devem ser peças de prateleira ou facilmente fabricáveis.

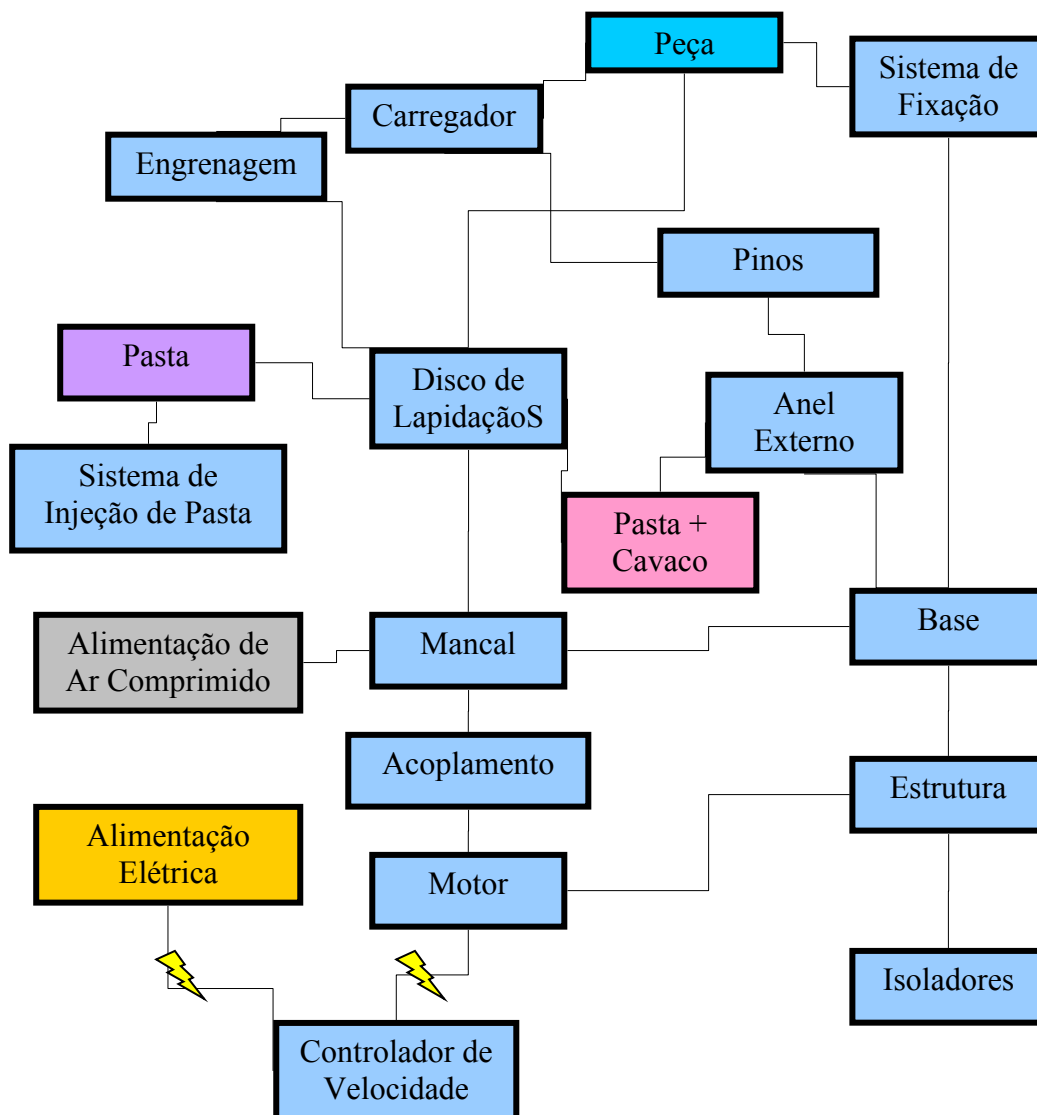


Figura 3.2 – Esquema na micro lapidadora

### 3.2 Fixação de Peças Complexas

Algumas das peças a serem usinadas na micro lapidadora a ser projetada possuem uma geometria que impossibilita que as mesmas passem pelo processo sem uma forma de fixação, pois possuem um lado muito estreito a ser usinado e um ângulo que dificulta esta fixação. Três formas de fixação estão sendo consideradas até o momento.

A primeira forma de fixação seria um conjunto de peças que montado fixa a peça no ângulo desejado, como mostra a figura 3.3. Esta opção possui uma boa estabilidade, porém cada angulação exige um conjunto de peças, não sendo flexível.

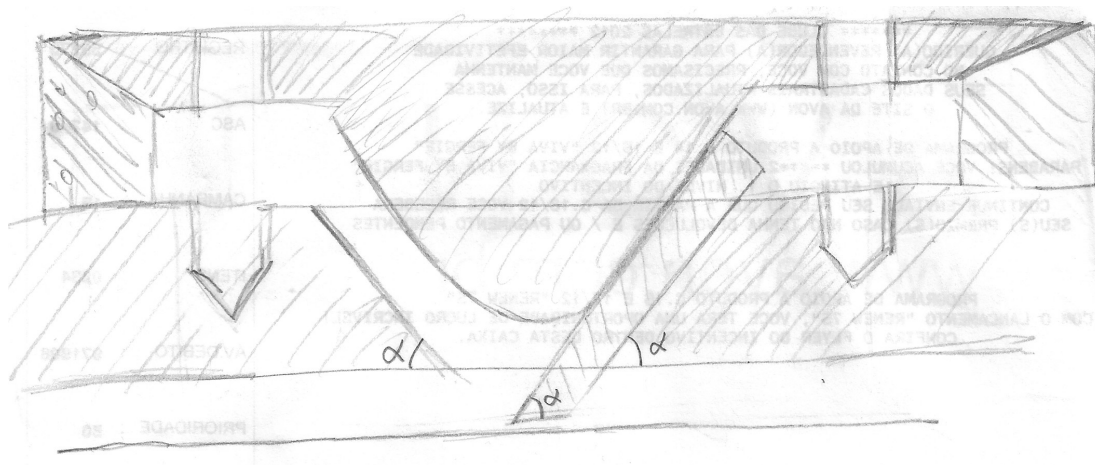


Figura 3.3 – Esboço da primeira opção de fixação

A segunda opção consiste de hastes com ajuste flexível para fixação de peças com ângulo, como visto na figura 3.4, esta opção não se resume a um ângulo pré-definido, mas é mais instável a vibrações.

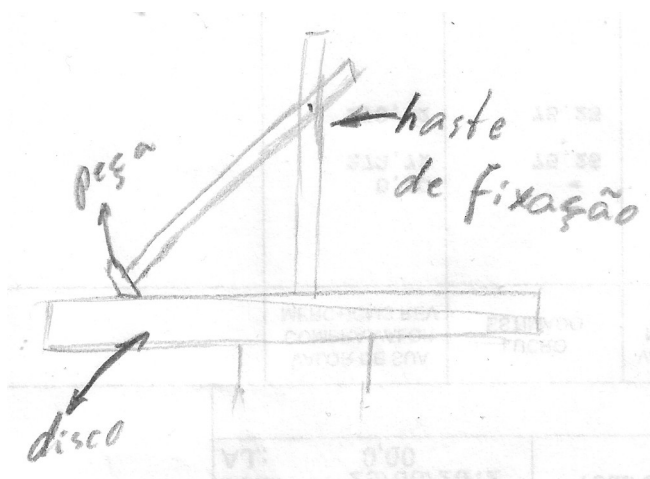


Figura 3.4 – Esboço da segunda opção de fixação

A terceira opção consiste de fixar a peça em um material que possa ser facilmente retirado posteriormente, como mostra a figura 3.5. Em um molde preferencialmente cilíndrico a peça deve ser posicionada de forma que a face a ser usinada apareça em uma das bases do cilindro e o resto do molde deve ser preenchido com um material que possa passar pelo processo de lapidação e ser retirado depois sem danificar a

peça. Este processo é estável, porém a preparação da peça para a usinagem é demorada.

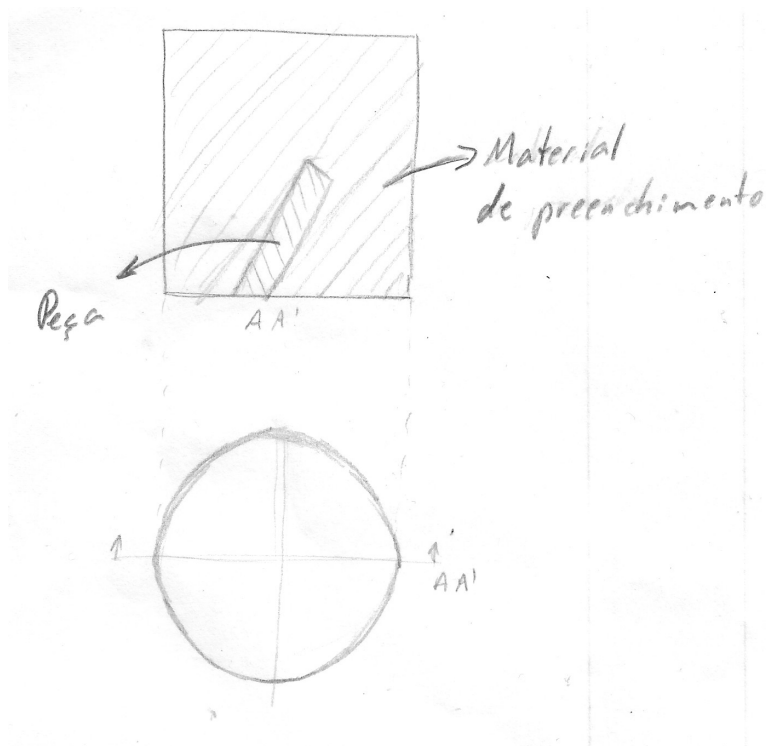


Figura 3.5 – Esboço da terceira opção de fixação

A primeira opção de fixação possui pouca flexibilidade de formatos de peças e exige uma configuração diferente para cada peça. A terceira opção exige um tempo muito longo de preparação para a fixação e para mudar o lado da peça a ser usinado, logo estas opções são menos desejáveis que a segunda, sendo que esta é a mais flexível e exige um tempo mais curto de troca de peça.

O desenho 3D do braço articulado responsável pela fixação de peças que possuam um ângulo está exposto na figura 3.6.

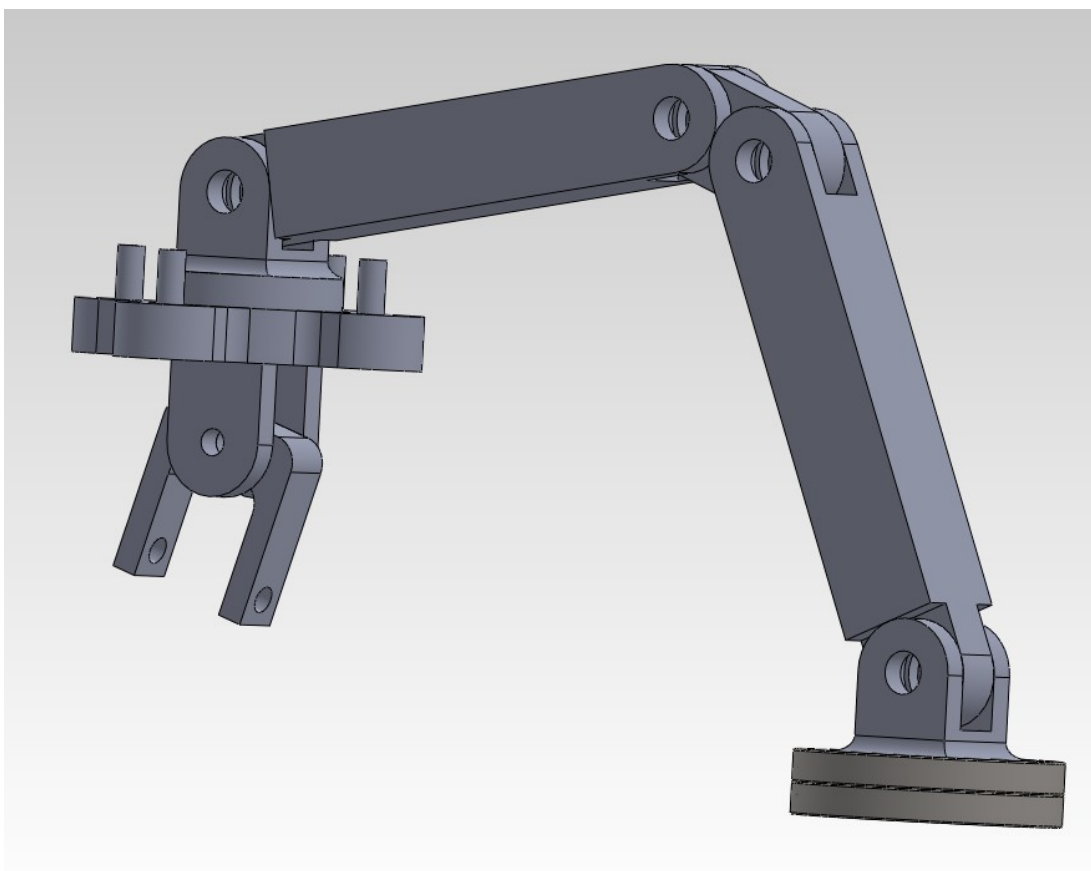


Figura 3.6 – Desenho 3D do braço articulado

O movimento do braço não será controlado diretamente, os graus de liberdade do mesmo irão permitir que a ponta, onde a peça estará presa, se mova guiada pelo carregador cujo movimento estará coordenado com o movimento do disco. A base do braço estará presa na mesa, porém com possibilidade de giro. no desenho existem quatro pinos onde pesos poderão ser alocados para aumentar a carga. Os graus de liberdade do braço estão expostos na figura 3.7.

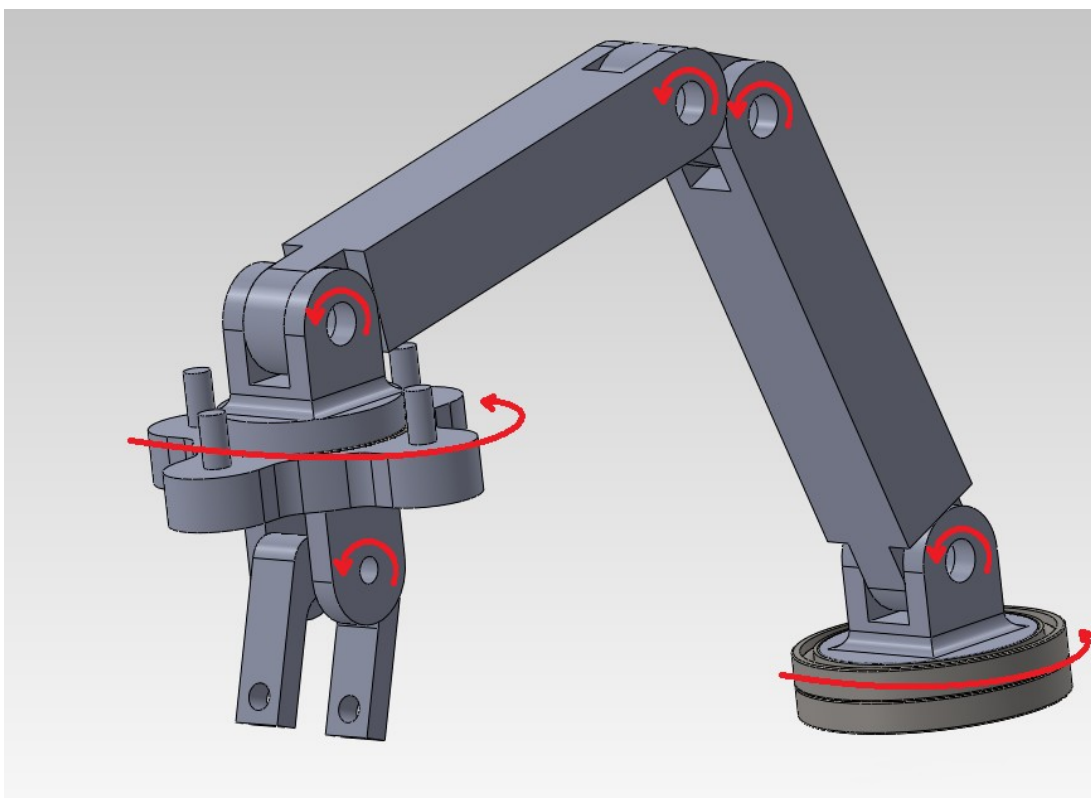


Figura 3.7 – Desenho 3D do braço articulado mostrando os graus de liberdade

### 3.3 Acionadores

As opções de acionadores consideradas para a lapidadora são todas de acionadores rotativos, considerando-se que o movimento exigido no processo de lapidação é rotativo.

Durante a seleção do acionador seria melhor uma opção que não exigisse a presença de redutores mecânicos, pois esta caixa de engrenagens é um gerador de vibrações e calor indesejados.

#### 3.3.1 Motores Assíncronos

Este tipo de motor não permite um controle muito apurado, logo só deve ser utilizado em casos onde este controle não é necessário. Para o controle de velocidades deste tipo de motor pode ser utilizado um variador de frequência, dispensando a utilização de uma caixa de redução. (Stoeterau, 2004)

### 3.3.2 Servomotores de Corrente Contínua – CC

Estes são motores de alto desempenho, que favorecem alta precisão e rapidez em paradas e partidas. O torque deste motor pode ser controlado pela corrente de armadura ou corrente de campo e a velocidade pode ser controlada pela tensão, descartando também a utilização de redutores. (Stoeterau, 2004)

### 3.3.3 Servomotores de Corrente Alternada – CA

São motores de indução reversível, podendo ser síncronos ou assíncronos. (Stoeterau, 2004) Estes motores apresentam uma precisão menor que os de corrente contínua. (Stephan)

### 3.3.4 Motores de Passo

Motores de passo convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos discretos, que seriam os passos. Os motores de passo são classificados de acordo com suas formas construtivas, podendo ser com relutância variável, com ímã permanente ou híbridos.

A tabela 3.1 mostra a comparação de alguns acionadores rotativos de acordo com seu funcionamento, facilitando assim uma tomada de decisão da melhor opção para o projeto.

Tabela 3.1 – Comparação de acionadores rotativos (Stoeterau 2004)

	Servomotores de Corrente Contínua CC		Servomotores de Corrente Alternada CA		Motores de Passo		
	Comutação Mecânica	Comutação Eletrônica	Assíncronos	Síncronos	Relutância Variável	Ímã Permanente	Híbridos
Controle	5	5	1	3	5	5	5
Manutenção	5	5	0	0	5	5	5
Custo	5	5	5	3	5	5	3
Dinâmica	4	4	4	4	4	4	4
Torque	4	5	4	4	3	3	4
Cursos	5	5	5	5	5	5	5
Precisão de giro	5	5	2	2	3	3	5

**Legenda:** 5 – excelente, 4 – bom, 3 – moderado, 2 – regular, 1 – ruim e 0 – não aplicável.

A micro lapidadora deste projeto terá um controle de velocidades simples e manual, já que a lapidação não exige mudanças de velocidade durante o processo, outra coisa

a se levar em consideração é que deve ser um projeto de baixo custo, logo o motor mais barato tem preferência. Por estes motivos o motor a ser escolhido deve ser o servo motor de corrente contínua, por sua facilidade de controle e seu custo que é considerado excelente.

### 3.4 Controlador de Velocidade

O controle de velocidade do motor não necessita ser muito complexo, pois o processo não requer mudanças de velocidade, logo não é necessário um controle que utilize programas em computador, podendo ser um controle manual, sendo que um controle de tensão é muito utilizado e é de fácil aplicação e utilização.

### 3.5 Mancais

Os possíveis mancais a serem considerados para o movimento do disco são mancais de rolamento, hidrodinâmicos, hidrostáticos, aerostáticos e magnéticos. A tabela 3.2 compara estes tipos de mancais.

Tabela 3.2 – Comparação de mancais (Stoeterau 2004)

	<b>Mancais de rolamento</b>	<b>Hidrodinâmicos</b>	<b>Hidrostáticos</b>	<b>Aerostáticos</b>	<b>Magnéticos</b>
<b>Velocidade</b>	X X X	X X X	X X X	X X X X	X X X X
<b>Durabilidade</b>	X X X	X X X	X X X X	X X X X	X X X X
<b>Precisão de Giro</b>	X X X	X X X	X X X X	X X X X	X X X X
<b>Amortecimento</b>	X	X X X	X X X	X X	X X X
<b>Rigidez</b>	X X X	X X X	X X X X	X X	X X X
<b>Vida do Lubrificante</b>	X	X X X	X X X X	X	----
<b>Atrito</b>	XX	X X X X	X X X X	X	X
<b>Preço</b>	X	X X X	X X X	X X	X X X X

**Legenda:** XXXX – muito elevado XXX – elevado XX – médio X – baixo ---- – não aplicável.

Dos mancais mostrados na tabela, o mancal aerostático é o que apresenta características mais próximas do desejado. Com relação ao preço, os outros mancais são mais caros com exceção do mancal de rolamento porém este tem um atrito maior

e um amortecimento menor. O mancal magnético tem características excelentes porém é muito caro. Sendo assim o mancal escolhido é o aerostático.

O mancal aerostático a ser utilizado neste projeto é de autoria do meu orientador, o professor Rodrigo Lima Stoeterau. O desenho 3D do mancal é mostrado na figura 3.8. O mancal será construído em alumínio, com exceção do estator que será de bronze.

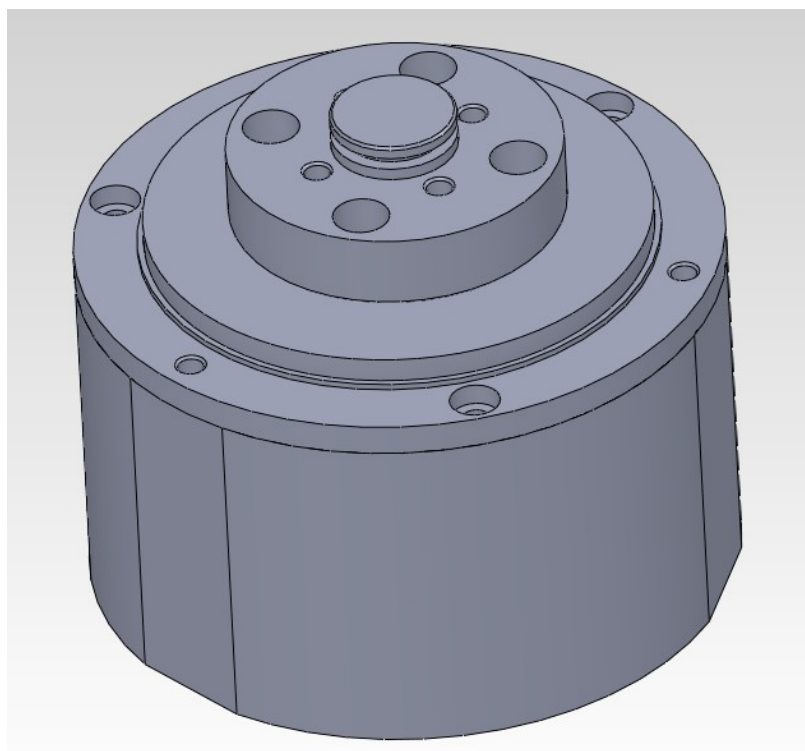


Figura 3.8 – Desenho 3D do mancal Aerostático

### **3.6 Sistema de Injeção de Mistura de Lapidação**

O sistema de injeção da mistura de lapidação será por gravidade. Consistindo de uma espécie de funil preso sobre a área do disco de lapidação com uma válvula de controle de fluxo na ponta como mostra o esquema da figura 3.9.

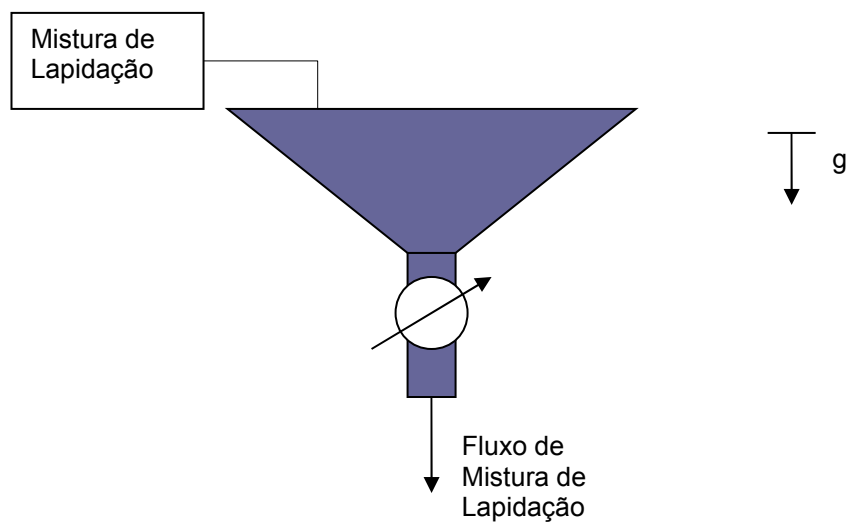


Figura 3.9 – Esquema do sistema de injeção de mistura de lapidação

A válvula a ser utilizada será uma válvula utilizada para controlar o fluxo de água em um sistema de refrigeração de uma máquina de cortar piso manual, mostrada na figura 3.10.



Figura 3.10 – Válvula com mangueira e cano prolongador

Utilizando parte da mangueira deste sistema e uma parte do cano ou o cano inteiro, podemos alocar o reservatório de mistura de lapidação ao lado da máquina e não diretamente em cima. Deste modo a fixação será facilitada e mais segura, assim como controlar a abertura e fechamento da válvula não envolverá colocar a mão sobre a máquina em funcionamento. O reservatório ainda estará localizado em uma posição mais elevada com relação a máquina para garantir a ação da gravidade sobre o fluido.

### **3.7 Anel Externo**

O anel externo possui um canal para recolher a pasta de lapidação depois que ela sair do processo, e neste canal tem um pequeno orifício para a retirada da pasta. Pinos são acoplados nos furos na face superior do anel, com a finalidade de engrenar no carregador, que será movido pelos pinos do disco de lapidação. Será construído em aço ABNT 1020.

### **3.8 Disco de Lapidação**

O disco de lapidação possui 140mm de diâmetro e possui furos para pinos simples e furos passantes para pinos com rosca que tem a função de fixar o disco de lapidação ao mancal. O disco de lapidação é movido pelo motor por intermédio de um acoplamento com uma parte do mancal e move o carregador. Será construído em aço ABNT 1020.

### **3.9 Base**

Na base são fixados o mecanismo de fixação e o anel externo. A base em si está fixada na estrutura da lapidadora. Será construído em aço ABNT 1020.

### **3.10 Carregador**

O carregador tem a função de mover a peça ou mover o braço de fixação com a utilização de um acoplamento auxiliar. O carregador é movido através de seu engrenamento com os pinos do disco de lapidação e do anel externo, movimento este composto de duas rotações, uma em torno do eixo do disco e outra em torno de seu próprio eixo. O carregador e o acoplamento serão construídos em alumínio.

### 3.11 Montagem da Máquina

A figura 3.11 mostra a parte superior da micro lapidadora sem o sistema de injeção de pasta de lapidação. As principais partes da máquina estão indicadas na figura. Na conexão do braço fixador com a base é utilizado o mancal de rolamento 6805 ZZ VV DD. No braço fixador são usados quatro micro rolamentos 688 A e mais um rolamento 6805 ZZ VV DD, todos retirados do manual de rolamentos da NSK. A ponta do braço fixador foi modificada para ser acoplada à peça auxiliar do carregador.

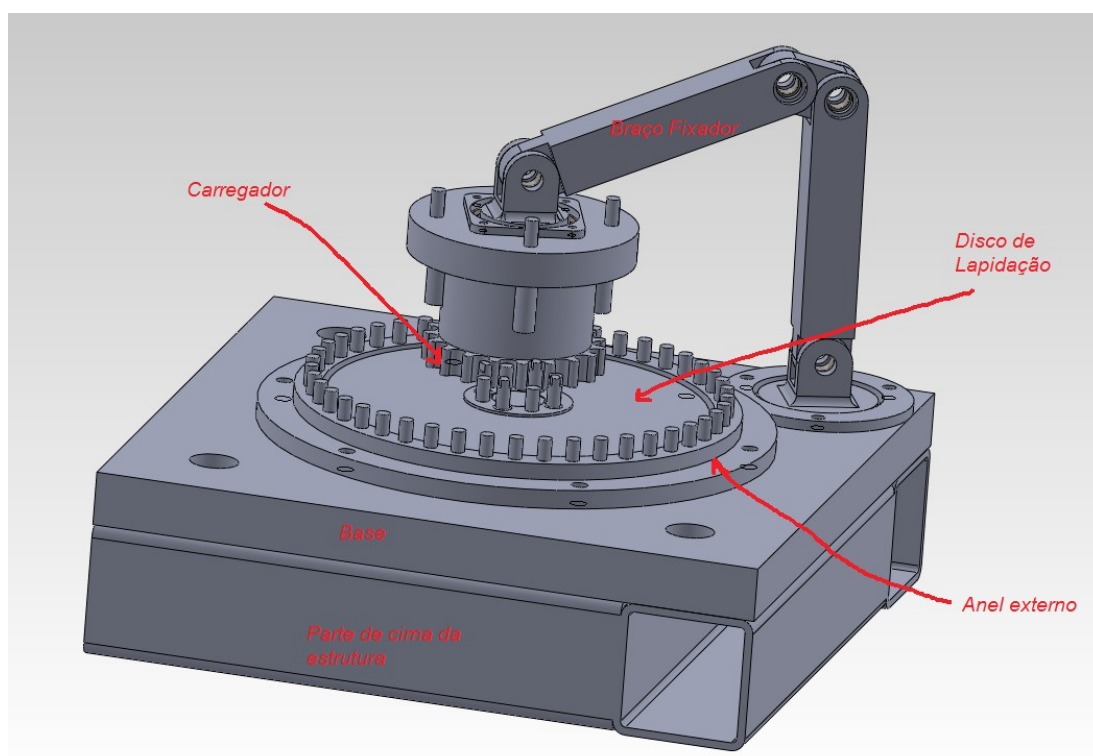


Figura 3.11 – Desenho 3D parcial da micro lapidadora

A figura 3.12 mostra a peça auxiliar que faz o acoplamento da ponta do braço fixador com o carregador permitindo assim que o primeiro seja controlado. Esta peça garante que o ângulo da face da peça a ser usinada, que foi definido na fixação, se mantenha durante o processo de lapidação. Isso se dá através do encaixe dos pinos da ponta do

braço de fixação com a peça auxiliar do carregador. Este encaixe deixa a ponta do braço, onde está afixada a peça de trabalho, livre para descer durante a usinagem garantindo o paralelismo da face horizontal da ponta do braço com a face do disco de lapidação.

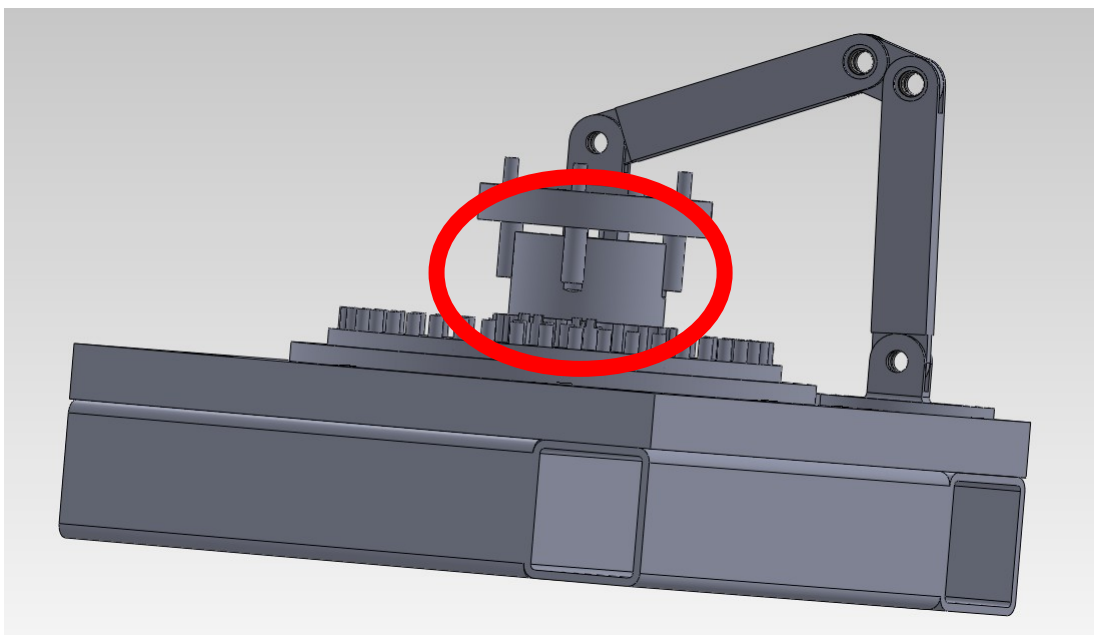


Figura 3.12 – Desenho 3D parcial da micro lapidadora com a peça auxiliar do carregador indicada.

Na figura 3.13 é possível visualizar a placa de suporte do mancal aerostático logo abaixo da estrutura, o suporte do motor, as pernas da máquina e os pés com regulação de altura e amortecimento.

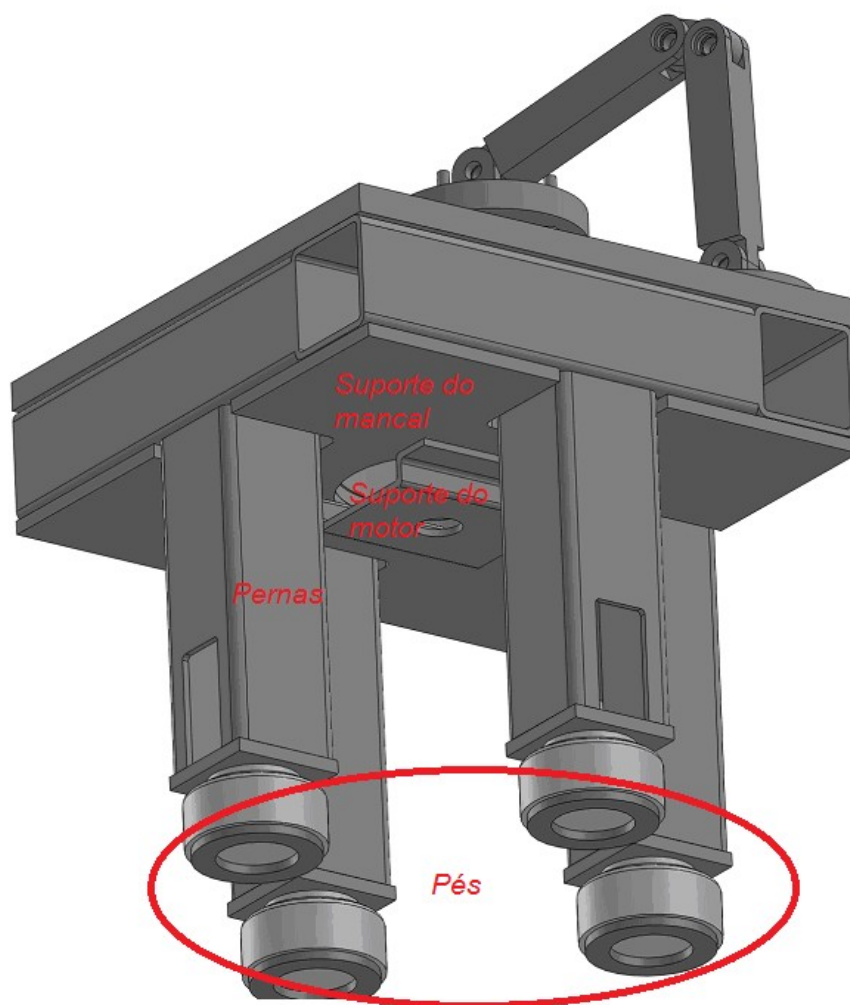


Figura 3.13 – Desenho 3D mostrando a parte de baixo da micro lapidadora sem o motor.

As demais peças serão construídas em aço ABNT 1020 e a estrutura e suas pernas serão construídas a partir de perfis de aço 50x50x4mm. O motor a ser utilizado será um motor CC.

#### 4 RESULTADOS

Como resultado deste trabalho temos o projeto da micro lapidadora como mostrado na figura 4.1. O braço mostrado na figura tem como finalidade manter peças com ângulo na posição desejada, porém quando o braço não for necessário o carregador e a peça auxiliar podem ser utilizadas sem ele. Para aumentar a carga sobre a peça de trabalho, quando necessário, pesos podem ser posicionados nos pinos presentes na ponta do braço de fixação. O carregador se move em torno do eixo do disco e do próprio eixo devido aos seus acoplamentos, movendo assim o braço e a peça com ele.

A velocidade do disco de lapidação terá controle manual através do controle da alimentação do motor, a velocidade deve se manter em torno de  $50 \text{ min}^{-1}$  de acordo com os dados observados no capítulo 2. Os pés possuem regulagem de altura para viabilizar o nivelamento da máquina. Os pés possuem também amortecimento para minimizar vibrações. O acréscimo de mistura de lapidação na máquina será através de um sistema externo com válvula de regulagem de fluxo, onde o fluxo de fluido se dá pela ação da gravidade. A válvula a ser utilizada está apresentada no capítulo anterior e na figura 4.2.

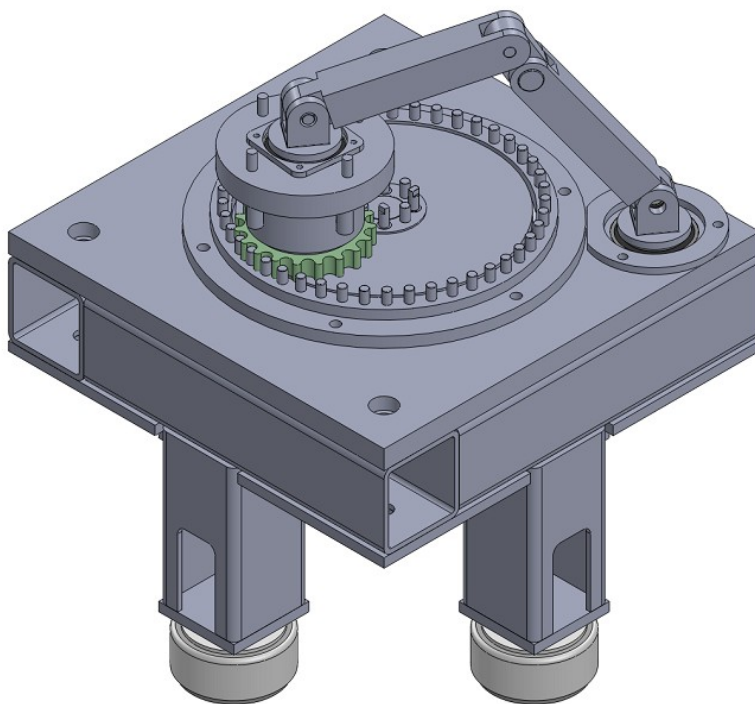


Figura 4.1 – Desenho 3D da micro lapidadora completa.



Figura 4.2 – Válvula com mangueira e cano prolongador.

As peças da máquina podem ser vistas na vista explodida apresentada na figura 4.3.

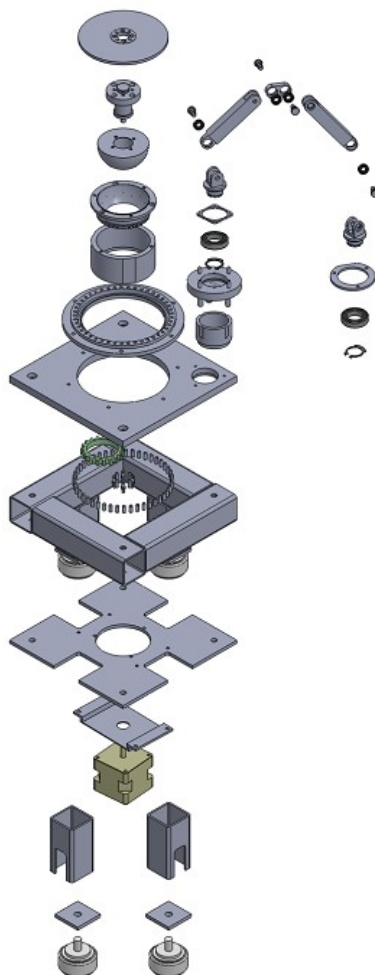


Figura 4.3 – Desenho 3D da micro lapidadora explodida.

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

O projeto da micro lapidadora está completo, porém não foi possível construir o protótipo para testes. A máquina a ser construída possui potencial para produzir bons resultados e as peças são de prateleira ou são fabricadas a partir de materiais comuns com custo não muito elevado, com exceção do mancal aerostático.

Com o auxílio do braço projetado neste trabalho, será possível lapidar peças pequenas de até aproximadamente 40mm de diâmetro, mesmo que estas peças não possuam estabilidade para se manter na posição adequada para a lapidação. Peças estas que podem ter faces a ser lapidadas de pequena dimensão com relação ao resto da peça e/ou que possuam face a ser lapidada inclinada de uma forma que não permita que ela se mantenha apoiada sobre a mesma durante o processo de lapidação.

A capacidade de as superfícies e faces dos insertos na posição correta durante o processo de lapidação pode ser atingida.

A máquina é de fácil utilização, a máquina é pequena, sendo suas dimensões de aproximadamente 250x250x400 mm.

Não existem lapidadoras de porte tão reduzido no mercado, principalmente levando-se em consideração o fato de que ela pode efetuar a lapidação de faces de peças de geometria instável, como já descrito.

Alguns mecanismos da máquina estão expostos, fazendo com que ela não seja muito segura.

Sugestões de melhorias:

- A máquina necessita de estudo mais aprofundado para garantir a proteção do usuário.
- De modo experimental as condições ótimas de funcionamento da máquina com relação a carga e a rotação precisam ser definidas.
- O sistema de aplicação de abrasivo deve ser reprojetoado para melhorar sua eficiência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Klocke, F., 2009, “Manufacturing Processes 2 Grinding, Honing, Lapping”, ISBN 978-3-540-92258-2, pp. 338 – 369

Stephan, R. M., “Guia de Aplicação de Servoacionamentos”, Weg.

Stoeterau, R. L., 2004, “Introdução ao Projeto de Máquinas Ferramenta Modernas”

<http://jvrmaquinas.com.br/Produtos.aspx?id=7274>, 11/13

[http://www.kyocera-componentes.com.br/ceratip\\_ca55\\_px.html](http://www.kyocera-componentes.com.br/ceratip_ca55_px.html), 06/2014