

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO**

Renato Bergantin

Orientadores: Roberto Martins de Souza  
Deniol Katsuki Tanaka

**SÃO PAULO**  
**2002**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO**

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

Renato Bergantín

Orientadores: Roberto Martins de Souza  
Deniol Katsuki Tanaka

**SÃO PAULO**

**2002**

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer, em primeiro lugar, à minha mãe Maria Izy e ao meu pai Celso, que desde o início da minha vida me incentivaram aos estudos. Também quero agradecer aos meus irmãos Patrícia e Rogério que sempre me acompanharam nesta minha batalha.

Aos professores Roberto Martins de Souza e Deniol Katsuki Tanaka que me orientaram na conclusão deste trabalho, e que também são responsáveis pela minha formação acadêmica, onde tenho a honra de ter sido aluno, companheiro de trabalho e amigo.

Ao professor Linilson R. Padovese, às doutorandas Marcia Marie Maru e Maria Cristina Moré Farias, aos quais tive o prazer de ter trabalhado junto e que me auxiliaram no meu trabalho de iniciação científica.

Agradeço muito a todos os meus amigos de faculdade, que ajudaram a transformar estes anos de Escola Politécnica em anos muito prazerosos e inesquecíveis.

A todos meus professores que tem participação importante na minha formação profissional e como pessoa.

## **RESUMO**

A “máquina de ensaio por desgaste por micro-abrasão” tem como função simular desgaste por micro-abrasão utilizando uma esfera rotativa em contato com uma amostra plana, em presença de pequenas partículas abrasivas. O mecanismo de desgaste predominante neste tipo de teste depende fortemente da natureza do movimento das partículas na zona de contato, envolvendo o tipo de abrasivo, material da esfera e da amostra.

Este trabalho consiste no projeto de uma máquina por micro-abrasão na configuração “esfera-fixa”, onde são apresentados desenho de conjunto, desenhos de construção da máquina, estudos de configuração, análise e dimensionamento de elementos de máquinas e estudo de materiais. Também são analisados aspectos construtivos da máquina, através de levantamento de custos.

Segue como proposta a implementação deste trabalho, pois é um material de auxílio importante para o desenvolvimento tecnológico de nosso país.

**Palavras-chave:** Desgastes dos materiais, Abrasão, Projeto Mecânico.

## **LISTA DE FIGURAS**

- Figura 1a: Material homogêneo.
- Figura 1b: Material revestido.
- Figura 2: Configuração de “esfera móvel”.
- Figura 3: Configuração 1 de “esfera fixa”.
- Figura 4: Configuração 2 de “esfera fixa”.
- Figura 5: Configuração do projeto inicialmente proposto.
- Figura 6: Configuração do projeto otimizado.
- Figura 7: Configuração 1 de montagem de esfera.
- Figura 8: Configuração 2 da fixação da esfera.
- Figura 9: Esquema das forças atuando sobre a esfera.
- Figura 10: Croqui peça 02.
- Figura 11: Croqui peça 03.
- Figura 12: Croqui peça 04.
- Figura 13: Croqui peça 05.
- Figura 14: Croqui peça 06.
- Figura 15: Croqui peça 07.
- Figura 16: Modelo da viga construído no software Nastran.
- Figura 17: Representação da viga deformada. Escala de deformação 10:1.
- Figura 18: Máxima deformação da viga.
- Figura 19: Máxima tensão na viga, segundo critério de Von Misses.

## **LISTA DE SIGLAS**

ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Diâmetro externo da cratera de desgaste
EP-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Fat	Força de atrito
h	Profundidade de penetração
k	Coeficiente de desgaste
N	Força normal
P	Potência
R	Raio da esfera
S	Distância total de deslizamento da esfera sobre a amostra
T	Torque
V	Volume de desgaste
Vc	Volume de desgaste da camada revestida
Vs	Volume de desgaste do substrato
$\mu$	coeficiente de atrito

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE SIGLAS .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>1. HISTÓRICO. ....</b>	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
<b>3. DESCRIÇÃO DO ENSAIO .....</b>	<b>11</b>
<b>4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>12</b>
<b>5. ALTERNATIVAS DE PROJETO .....</b>	<b>14</b>
<b>6. ESCOLHA DA MELHOR ALTERNATIVA .....</b>	<b>17</b>
<b>7. DADOS DE PROJETO .....</b>	<b>19</b>
<b>8. ADEQUAÇÃO DO PROJETO .....</b>	<b>20</b>
<b>9. DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO.....</b>	<b>24</b>
<b>DIMENSIONAMENTO DO MOTOR.....</b>	<b>24</b>
<b>CÁLCULO DO BARICENTRO E BALANCEAMENTO ESTÁTICO DO BRAÇO .....</b>	<b>26</b>
<b>ANÁLISE DA VIGA DE SUSTENTAÇÃO DO BRAÇO.....</b>	<b>34</b>
<b>10. CUSTOS.....</b>	<b>37</b>
<b>11. CONCLUSÃO.....</b>	<b>38</b>
<b>12. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>40</b>
<b>13. ANEXOS .....</b>	<b>41</b>

## INTRODUÇÃO

Na engenharia, o estudo de eventos que ocorrem na superfície do material é identificado hoje como um dos pontos mais importantes para o aperfeiçoamento e avanço da tecnologia de manufatura. Testes são necessários para avaliar a performance do material e principalmente o comportamento de sua superfície. Tem-se assim uma base para um estudo avançado no assunto e consequente desenvolvimento tecnológico, sendo este um dos princípios da EP-USP.

Um campo ainda pouco explorado é o estudo de desgaste de materiais onde há pouca perda de massa e pouca deformação plástica. A máquina de ensaio de desgaste por micro-abrasão foi recentemente desenvolvida para a medição deste tipo de desgaste em superfícies. Este trabalho vem propor a construção de uma máquina de ensaio de desgaste por micro-abrasão com o intuito de proporcionar à EP-USP estudos nesta área de pesquisa e desenvolvimento.



## 1. HISTÓRICO.

Um dos primeiros testes de desgaste abrasivo foi documentado por Mikhail Lomonosov (1952), membro da Academia de Moscou, entre os anos de 1745 e 1765. O teste consistia em um rebolo de pedra de 46 cm de diâmetro contra uma amostra fixada num braço de madeira. Aplicava-se a carga por um sistema de peso morto. Este teste foi utilizado para testar abrasão em metais, minerais e vidros. Este tipo de teste foi refinado por Brinell (1921) o qual substituiu o rebolo por um disco metálico de 100 mm de diâmetro e implementou partículas de quartzo entre as amostras. A próxima modificação significativa foi implementada por Haworth (1949), onde foi identificada uma série de vantagens em se reduzir as forças sobre as amostras. Haworth (1949) identificou estas vantagens ao realizar o primeiro teste de abrasão em borracha.

E foi neste ano que está relatado o primeiro teste por micro-abrasão, realizado por Grodzinski (1956). Neste ensaio foi utilizado um aparato que consistia em um disco metálico cônico de uma polegada de diâmetro. Foi utilizado partículas abrasivas de diamante de até 2  $\mu\text{m}$ , carga normal de 20 a 500 gramas-força, e velocidade de rotação acima de 20000 rpm. Foi medido então o desgaste por um método de interferometria. Este teste foi usado por Grodzinski (1949), Stern (1949) e Wilks (1952) para investigar resistência ao desgaste de superfícies de diamantes. Estes autores apontaram que os ensaios permitiram a examinação de desgaste em pequenos volumes e em superfícies duras. Os problemas apontados referiam-se a excentricidade do disco.

Happ (1956) e Shockley (1956) usaram este mesmo princípio, com rotação controlada, para gerar crateras na amostra e controlar a profundidade da camada revestida de silício ("silicon"). Esta técnica foi refinada por McDonald (1962) e Goetzberger (1962), onde foi controlada a espessura do revestimento por medições ópticas das marcas de desgaste.

Um contorno esférico foi primeiramente utilizado por Thompson, Hintermann e Chollet (1979). Eles utilizaram uma esfera revestida com uma pasta de diamante padronizada. Nestes ensaios, foi observada uma superfície com geometria esférica.

O aparato com uma esfera rotativa é hoje comercialmente desenvolvida e utilizada para determinação de espessura de revestimentos. Há um procedimento normalizado da ASTM que é utilizado para fazer esta medição (procedimento número E1182-87).

Kassman (1991) fez um desenvolvimento significativo no ensaio de desgaste de camadas finas. Foi utilizado um "dimple grinder" com um disco cilíndrico "crowned". Este autor elaborou um modelo combinando o comportamento de desgaste de uma fina camada de revestimento e seu substrato usando uma forma estendida da equação de desgaste de Archard. Isto possibilitou medir-se coeficientes de desgaste do revestimento e seu substrato de forma independente.

Nothnagel (1993) aplicou os mesmos princípios básicos em desgaste por deslizamento com uma esfera rotativa, mas sem considerar a combinação substrato e revestimento. Rutherford (1996) e Hutchings (1996) fizeram uma extensão do trabalho de Kassman (1991) ao reformularem a equação estendida de Archard, onde pode-se calcular coeficientes de desgaste de modo independente do revestimento e substrato em um mesmo ensaio. Estas análises foram posteriormente estendidas em estudos de superfícies com revestimentos e materiais em geral.

Pode-se encontrar hoje aparatos experimentais com disco e outras configurações. Mas há uma grande vantagem da utilização do aparato com esfera devido a diminuição de problemas de desalinhamento e desbalanceamento, fortemente ligado a grande precisão de fabricação destas esferas.

## **2. OBJETIVOS**

Este trabalho consiste no projeto básico e construção de uma máquina de ensaio de desgaste por micro-abrasão.

A máquina terá como função determinar o coeficiente de desgaste em materiais revestidos e monolíticos ("bulk") por desgaste abrasivo, na configuração esfera sobre o plano. Pode também ser utilizada para a determinação de espessura de camadas revestidas.

## **3. DESCRIÇÃO DO ENSAIO**

A rotação de uma esfera contra uma superfície revestida plana em presença de uma pasta abrasiva resulta na produção de uma depressão circular. Eventualmente o revestimento é totalmente desgastado e forma-se então uma cratera na superfície da amostra. A medição do diâmetro externo e interno desta depressão no substrato é de fácil execução, sendo um método barato e preciso na determinação da espessura da camada do revestimento. Esta é uma técnica de medição já bastante difundida. Para utilizar esta configuração na determinação do coeficiente de desgaste é necessário a medição precisa da velocidade de rotação da esfera, carga aplicada e número de rotações completadas (para determinar a distância percorrida). Deste modo, pode-se determinar a taxa de desgaste do material e do revestimento envolvidos.

Para materiais homogêneos, pode-se seguir um modelo simples de desgaste, equivalente à equação de Archard para desgaste por deslizamento. Esta equação é dada por:

$$SN = \frac{V}{k} = \frac{1}{k} \left( \frac{\pi \cdot b^4}{64 \cdot R} \right) \quad \text{para } b \ll R \quad (1)$$

Onde S é a distância total de deslizamento da esfera sobre a amostra, N é a força normal, V é o volume de desgaste, k é o coeficiente de desgaste, R é o raio da esfera, e b é o diâmetro externo da cratera de desgaste, como ilustrado na figura 1a.

Reordenando a equação (1), temos que o volume de desgaste, calculado a partir de b, é dado por:

$$V = \left( \frac{\pi \cdot b^4}{64 \cdot R} \right) \quad \text{para } b \ll R \quad (1a)$$

A profundidade de penetração é dada pela seguinte equação:

$$h = \frac{b^2}{8 \cdot R} \quad (2)$$

A equação 1 pode ser estendida em um modelo combinando desgaste do substrato e do revestimento, como mostrado na equação (3).

$$SN = \left( \frac{V_c}{k_c} + \frac{V_s}{k_s} \right) \quad (3)$$

onde c refere-se a camada revestida e s ao substrato. O volume V<sub>c</sub> e V<sub>s</sub> podem ser calculados a partir do diâmetro a e b gerados pelo desgaste (fig. 1b).

## 5. ALTERNATIVAS DE PROJETO

Existem hoje várias configurações de aparatos experimentais de micro-abrasão com esfera, as quais podem ser divididas em duas categorias:

- Máquinas de “esfera livre”: a esfera é acionada por atrito através de um eixo motor. Nesta configuração, a carga aplicada é essencialmente devido ao peso da esfera;
- Máquinas de “esfera fixa”: a esfera é devidamente fixa e dirigida, por exemplo através de sua fixação entre eixos coaxiais, e a amostra é pressionada contra a esfera por uma carga controlada através de um mecanismo.

A seguir serão apresentadas três propostas de construção da máquina de ensaio, sendo uma configuração de “esfera livre” e duas de “esfera fixa”.

A primeira proposta segue a configuração de “esfera livre”. A fig.2 mostra um esquema deste aparato. Nesta configuração, propõe-se utilizar um sistema de plano inclinado para fixação da amostra, onde é fixado uma célula de carga para monitoramento da força normal aplicada. A esfera segue livre e é acionada por um eixo motor, através de contato. A carga aplicada é obtida através do próprio peso da esfera, através do ajuste de inclinação do plano inclinado.

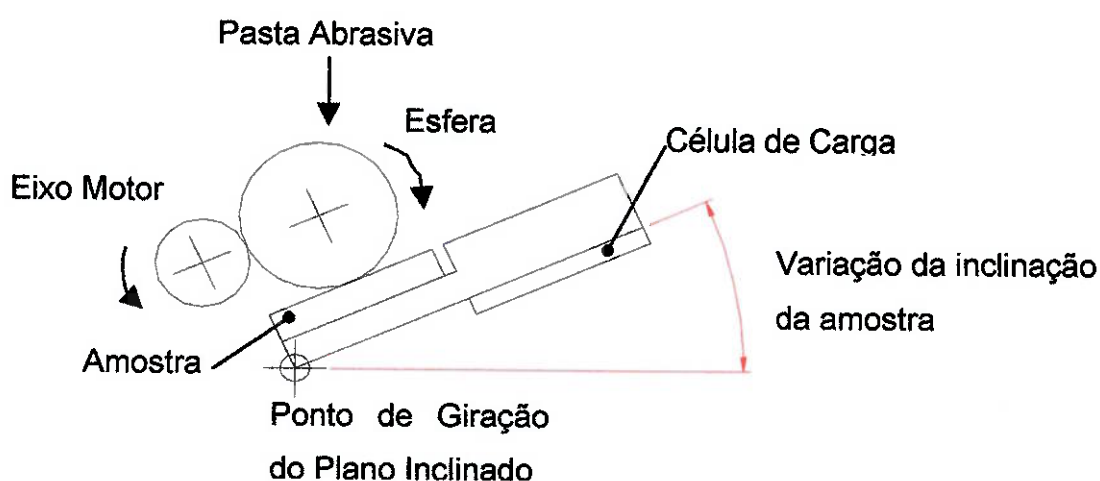


Figura 2: Configuração de “esfera móvel”.

#### 4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A rotação de uma esfera contra uma amostra em presença de partículas abrasivas gera desgaste com geometria esférica no material. As figuras 1a e 1b mostram a superfície microscópica deste tipo de desgaste em amostra sem revestimento e revestida, respectivamente.

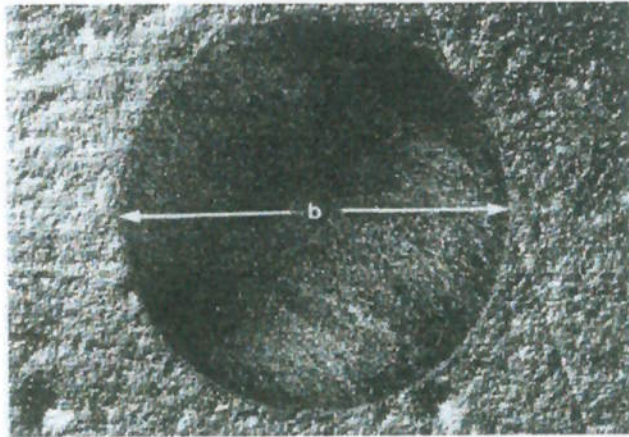


Figura 1a: Material homogêneo. Medida b é referente ao diâmetro da cratera formada.

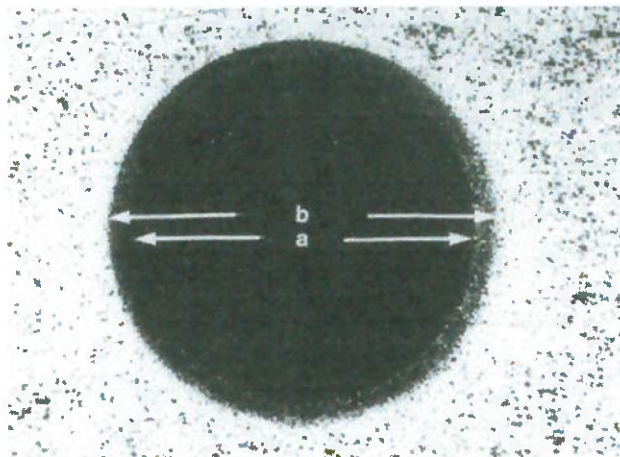


Figura 1b: Material revestido. Medida b é referente ao diâmetro da cratera do revestimento e a da cratera do substrato.

As propostas a seguir seguem a configuração da "esfera fixa". A fig.3 mostra a primeira configuração. A esfera é fixa num eixo motor. A amostra é montada horizontalmente, abaixo da esfera, através de um braço pivotado pressionando a esfera através de um sistema de balanço por peso morto. A profundidade de desgaste pode ser medida diretamente e em tempo real pelo deslocamento do braço durante o ensaio. Para se calcular o volume de desgaste final, pode-se utilizar a eq.(1a).

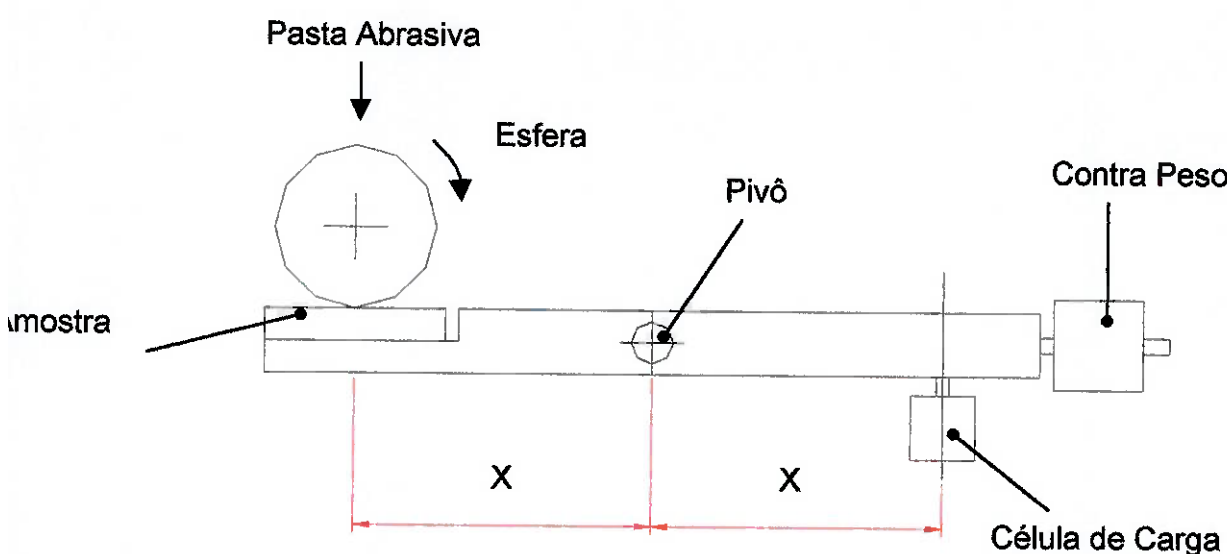


Figura 3: Configuração 1 de "esfera fixa".

A fig.4 mostra uma outra proposta. Fixa-se novamente a esfera num eixo motor, mas nesta configuração monta-se a amostra na posição vertical, e a carga é então aplicada através de um braço pivotado em "L". Deste modo o controle da carga é feito através de pesos mortos. Nesta configuração, pode-se calcular o volume de desgaste pela medição da cratera de desgaste, dado pela eq.(1a).

A alimentação de pasta abrasiva nas três alternativas é feita sobre a esfera através de um sistema de bombeamento.

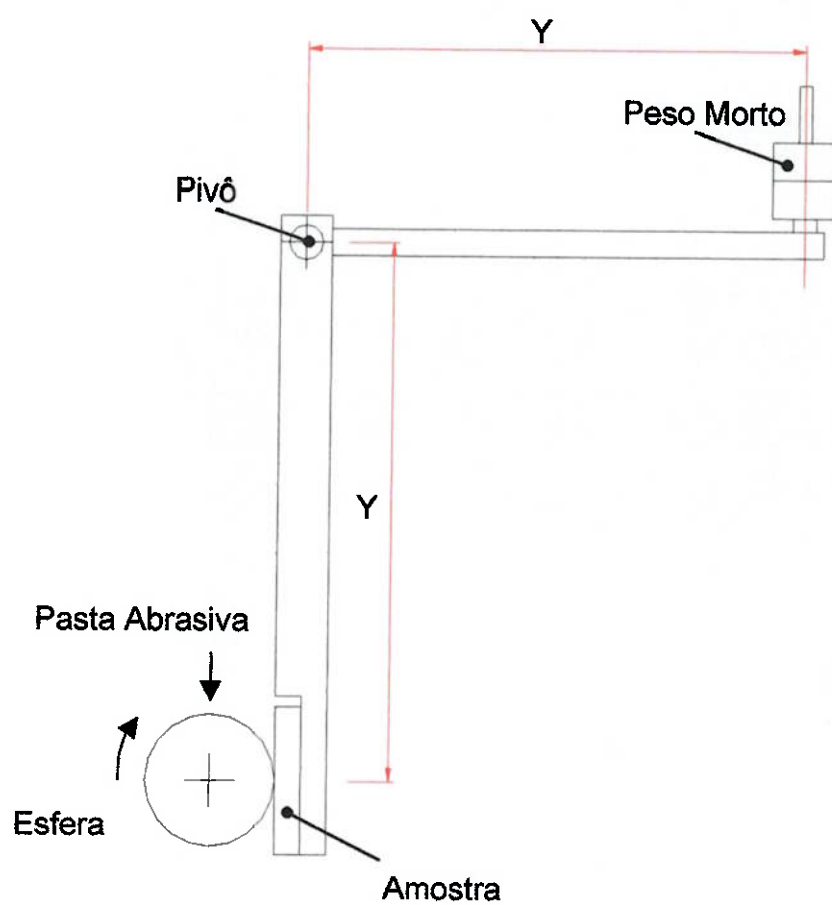


Figura 4: Configuração 2 de "esfera fixa".



## 6. ESCOLHA DA MELHOR ALTERNATIVA

Através do estudo bibliográfico e análise das configurações apresentadas pelas máquinas de ensaio por micro-abrasão, pode-se observar os seguintes pontos.

O projeto de “esfera fixa” oferece as seguintes vantagens sobre o projeto de “esfera livre”:

1. A carga normal aplicada pode ser definida de forma precisa sem a interação do tamanho e material da esfera, como também da inclinação do plano inclinado.
2. Pode-se utilizar várias cargas normais de modo preciso e repetitivo, sem precisar fazer muitos ajustes no ensaio.
3. A velocidade de rotação da esfera e o número de ciclos podem ser medidos precisamente, ao contrário da configuração de “esfera livre”, onde pode haver escorregamento da esfera sobre a amostra.
4. Mesmas condições de ensaios são mais fáceis de se reproduzir.

Estas observações mostram que a configuração de “esfera fixa” torna-se mais vantajosa tanto em relação a praticidade na preparação do ensaio, quanto na confiabilidade e reprodução de resultados obtidos.

As configurações 1 e 2 de “esfera fixa” são bastante similares, podendo ser observados os seguintes pontos:

A configuração 1 apresenta:

- Dispositivo mecânico simples, com peças de fácil execução;
- Fácil instrumentação da máquina para medição da taxa de desgaste e carga normal aplicada;
- Amostra fixa na posição horizontal, podendo apresentar problema na deposição da pasta abrasiva e eventual acúmulo de material.
- Carga normal controlada por célula de carga, mas pode ser de difícil ajuste, já que possui o princípio de equilíbrio de forças em uma alavanca (variação da distância de posicionamento de uma massa fixa).

A configuração 2 apresenta:

- Ajuste da carga normal mais prático, sendo equivalente ao peso morto posicionado na máquina;
- Amostra fixa na vertical, tendo maior facilidade de fuga da pasta abrasiva, mas também menor capacidade de mante-la no sistema de desgaste.

Analisando as propostas levantadas acima, foi tomada a decisão de projeto da máquina conforme configuração 2 de esfera "fixa". Esta decisão foi feita levando-se em conta dos pontos discutidos acima e por opção do modo construtivo desta máquina.

## 7. DADOS DE PROJETO

A seguir são indicados alguns valores utilizados para o projeto da máquina:

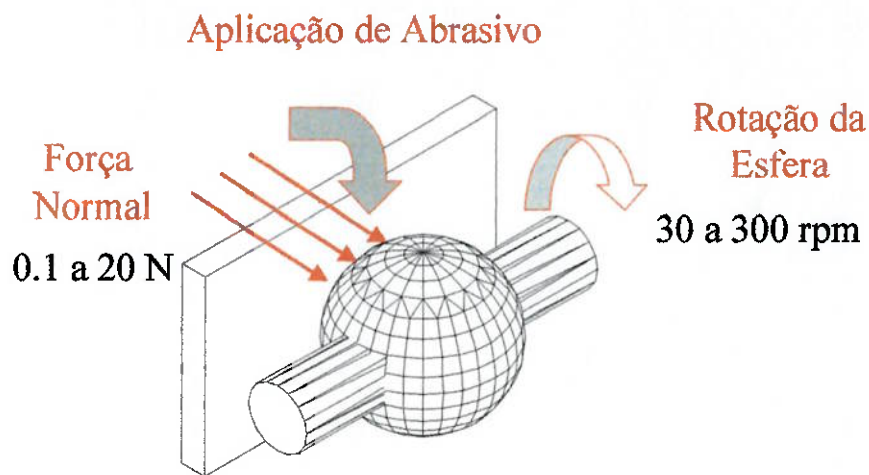
Força normal máxima aplicada sobre a esfera = 20 N.

Força normal de projeto = 20 N.

Coeficiente de atrito de projeto  $\mu = 1$ .

Diâmetro da esfera de ensaio = 25 mm.

Rotação mínima e máxima de ensaio = 30rpm a 300rpm.



Estes valores foram especificados conforme dados observados na revisão bibliográfica, buscando a construção de uma máquina compatível com máquinas usuais no mundo e em pesquisas que vem sendo desenvolvidas atualmente. Dados de força normal de projeto e coeficiente de atrito foram especificados levando-se em conta a segurança no dimensionamento da máquina e motor, pois sabe-se que um coeficiente de atrito unitário é obtido em casos críticos de atrito, e dificilmente será reproduzido em um ensaio deste tipo.

## 8. ADEQUAÇÃO DO PROJETO

Foram realizadas algumas modificações no projeto inicialmente apresentado. Estas modificações estão relacionadas com otimização de materiais e projeto, além da apresentação de opções construtivas da máquina. Seguem a seguir algumas destas modificações.

### *Mudança de material*

O material selecionado inicialmente para a construção do braço era o material aço inoxidável, em sua maioria. Após discussão com os orientadores, foi decidido utilizar o material alumínio 7075 T6, que apresenta propriedades mecânicas para construção de estruturas com a vantagem de ter densidade bem menor que materiais como o aço. Com isto, obteve-se uma redução de peso significativa no projeto, incluindo a massa do contra-peso.

### *Otimização de projeto*

De modo a deixar a estrutura da máquina otimizada, foi re-projetado o braço, reduzindo algumas dimensões de peças. Também foi feito o balanceamento do sistema, com a inserção de um contra-peso.

É apresentada abaixo uma comparação de configurações.

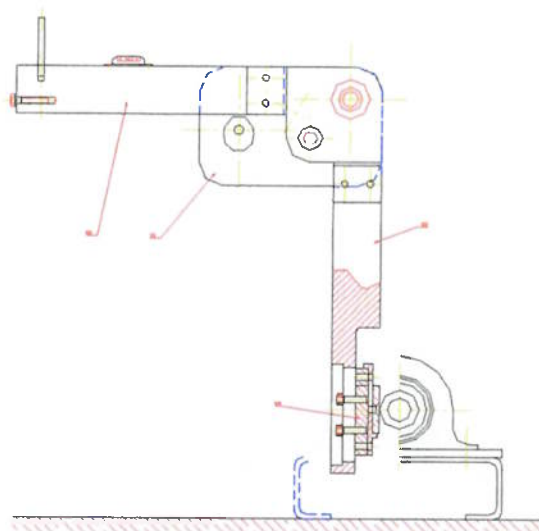


Figura 5: Configuração do projeto inicialmente proposto.

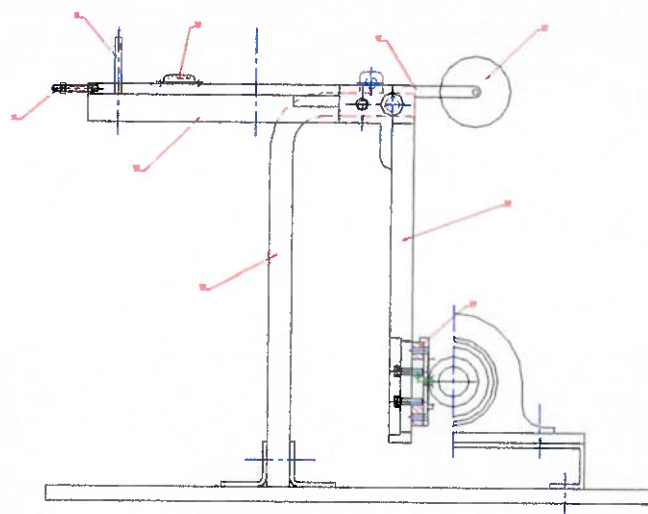


Figura 6: Configuração do projeto otimizado.

Pode-se claramente perceber que o projeto atual possui o contra-peso e uma configuração mais otimizada, deixando a máquina mais leve do que a anterior.

#### *Opções de construção da máquina*

Além das modificações citadas acima, foi feita uma análise de montagem da esfera no eixo motor da máquina. A seguir serão apresentados os modos construtivos propostos.

#### Modo 1:

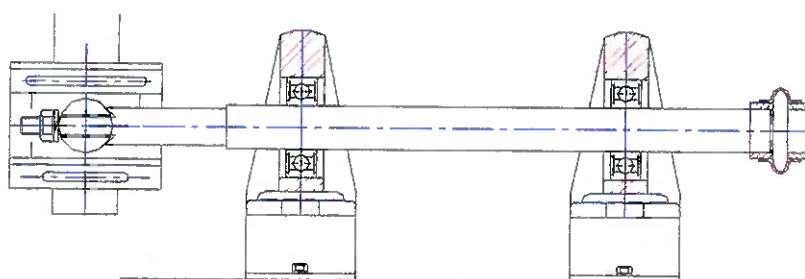


Figura 7: Configuração 1 de montagem de esfera.

Esta configuração exige que a esfera seja furada e fixada no eixo através de uma porca de aperto. Também pode-se observar o eixo montado sobre dois mancais de rolamento.

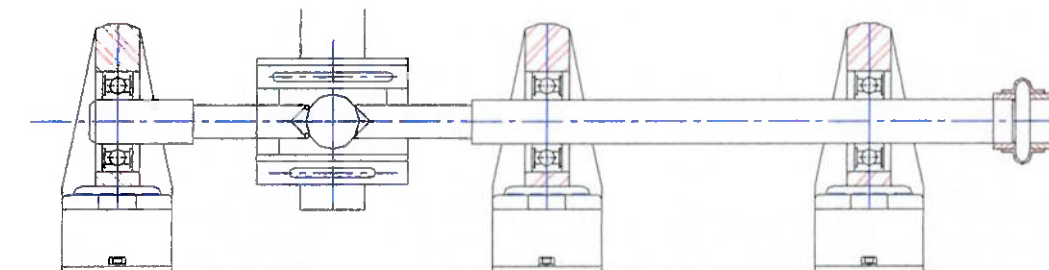
**Modo 2:**

Figura 8: Configuração 2 da fixação da esfera.

Este segundo modo construtivo exige pelo menos mais um mancal de rolamento na construção da máquina. Deste modo, a fixação da esfera se dá pela pressão da esfera entre o eixo-motor e o eixo de apoio, que possui um o-ring na ponta para aumento de atrito entre a esfera e o eixo. A vantagem desta configuração se encontra na não necessidade de se furar a esfera, mas apresenta a desvantagem de precisar de mais um mancal.

Em vista destas informações, optou-se pelo modo 1 de fixação da esfera.

## 9. DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO

Os anexos A e B deste trabalho apresentam o desenho de conjunto e os desenhos de construção, respectivamente. A seguir serão apresentados o dimensionamento e seleção de elementos de máquina necessários para construção do projeto proposto.

### *Dimensionamento do motor*

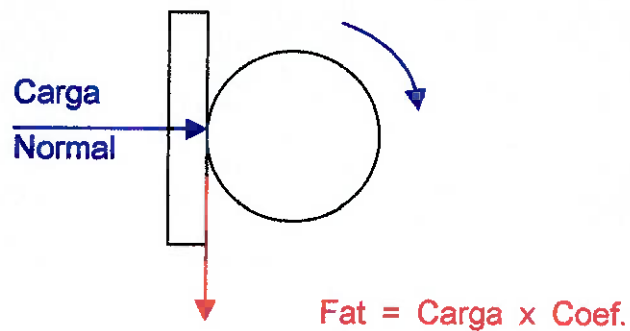


Figura 9: Esquema das forças atuando sobre a esfera.

Carga Normal Máxima: 20 N

Rotação de projeto: 30 a 300 rpm

*Força de atrito:*

$Fat = N \times \mu$ , considerando-se que há escorregamento no contato e um coeficiente de atrito máximo igual a 1, temos:

$$Fat = 20 \text{ N} \times 1 = 20 \text{ N}$$

*Torque:*

$$T = Fat \times \text{raio} = 20 \text{ N} \times 12,7 \text{ mm} = 250 \text{ N.mm} = 0,250 \text{ N.m}$$

*Potência do motor:*

$$P = T \times \omega = 0,250 N.m \cdot 300 rpm \cdot \frac{2\pi}{60} = 7,85 \text{ Watts}$$

*Seleção do motor:*

Através do catálogo eletrônico da empresa RS do Brasil, foi feita a escolha do motor de passo de 24 Watts com redutor 12.25:1. Deste modo, tem-se um motor com velocidade controlada variando de 28 a 278 rpm e torque de 5 N.m. A potência do motor especificada está acima da necessária (7,85 Watts) devido à dificuldade em se encontrar este tipo de motor no mercado. Além do mais, há a necessidade de seleção de um controlador compatível com o motor acima citado para termos a possibilidade de controle e operação adequados do motor.



### **Cálculo do baricentro e balanceamento estático do braço**

É necessário calcular o baricentro do braço para o projeto do contra-peso, de modo que o braço de aplicação de carga esteja balanceado estaticamente. Segue abaixo o cálculo de cada componente do braço e a seleção do contra-peso.

Cálculo do baricentro da peça 02:

Peça 02

Componente	Volume (mm <sup>3</sup> )	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm <sup>4</sup> )	y.V (mm <sup>4</sup> )	z.V (mm <sup>4</sup> )
Retângulo 1	94050,00	7,50	104,50	0,00	705375,00	9828225,00	0,00
Rasgo 1	-1867,90	11,25	38,00	0,00	-21013,88	-70980,20	0,00
Rasgo 2	-3737,00	3,75	38,00	0,00	-14013,75	-142006,00	0,00
Furos	-415,63	7,50	194,00	0,00	-3117,23	-80632,22	0,00
Total	88029,47	30,00	374,50	0,00	667230,15	9534606,58	0,00

Baricentro:	Local	Global*
X	7,58	7,58
Y	108,31	-112,19
Z	0,00	0,00

Material: Alumínio

Densidade: 2700 kg/m<sup>3</sup>

Massa: 0,24 kg

\* Medidas referentes ao baricentro de cada componente são em relação ao centro do pino articulado.

\*\* Volume positivo refere-se à adição de massa e volume negativo à remoção de massa

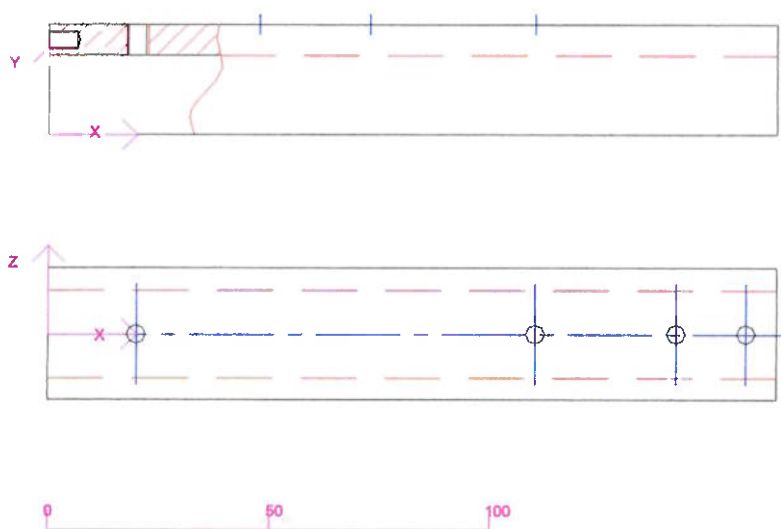


Figura 10: Croqui peça 02.

## Cálculo do baricentro da peça 03:

Peça 03

Componente	Volume (mm <sup>3</sup> )	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm <sup>4</sup> )	y.V (mm <sup>4</sup> )	z.V (mm <sup>4</sup> )
Retângulo 1	123750,00	82,50	12,50	0,00	10209375,00	1546875,00	0,00
Rasgo 1	-59400,00	82,50	9,00	0,00	-4900500,00	-534600,00	0,00
Total	64350,00	165,00	21,50	0,00	5308875,00	1012275,00	0,00

Baricentro:	Local	Global*
X	82,50	-97,50
Y	15,73	3,23
Z	0,00	0,00

Material: Alumínio

Densidade: 2700 kg/m<sup>3</sup>

Massa: 0,17 kg

\* Medidas referentes ao baricentro de cada componente são em relação ao centro do pino articulado.

\*\* Volume positivo refere-se à adição de massa e volume negativo à remoção de massa

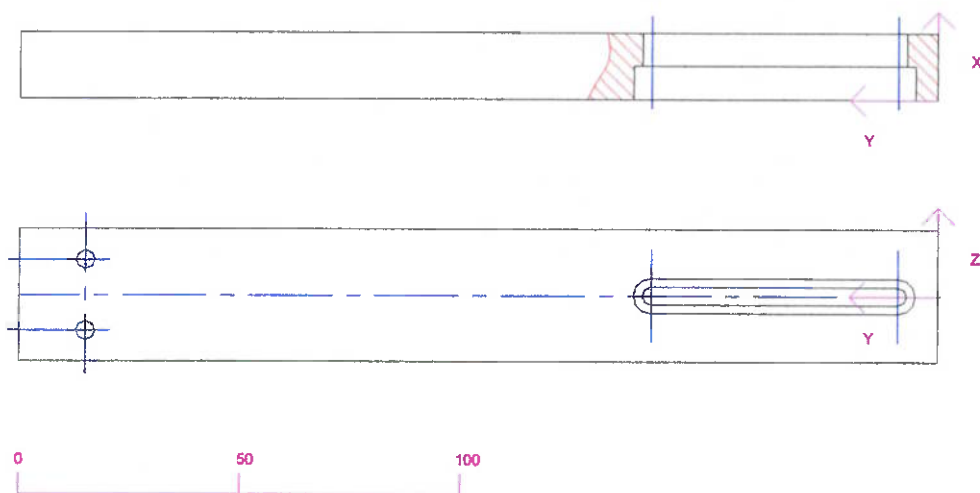


Figura 11: Croqui peça 03.

## Cálculo do baricentro da peça 04:

Peça 04

Componente	Volume (mm <sup>3</sup> )	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm <sup>4</sup> )	y.V (mm <sup>4</sup> )	z.V (mm <sup>4</sup> )
Retângulo 1	3520,00	4,00	49,50	0,00	14080,00	174240,00	0,00
Retângulo 2	3872,00	4,00	22,00	0,00	15488,00	85184,00	0,00
Total	7392,00	8,00	71,50	0,00	29568,00	259424,00	0,00

Baricentro:	Local	Global*
X	4,00	19,00
Y	35,10	-169,90
Z	0,00	0,00

Material: Alumínio

Densidade: 2700 kg/m<sup>3</sup>

Massa: 0,02 kg

\* Medidas referentes ao baricentro de cada componente são em relação ao centro do pino articulado.

\*\* Volume positivo refere-se à adição de massa e volume negativo à remoção de massa

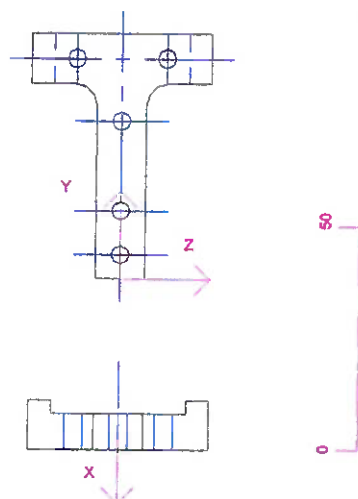


Figura 12: Croqui peça 04.

## Cálculo do baricentro da peça 05:

Peça 05

Componente	Volume (mm <sup>3</sup> )	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm <sup>4</sup> )	y.V (mm <sup>4</sup> )	z.V (mm <sup>4</sup> )
Retângulo 1	12180,00	1,50	29,00	0,00	18270,00	353220,00	0,00
Retângulo 2	630,00	4,50	1,50	0,00	2835,00	945,00	0,00
Retângulo 3	630,00	-1,50	45,50	0,00	-945,00	28665,00	0,00
Rasgo 1	-621,60	1,50	8,50	0,00	-932,40	-5283,60	0,00
Rasgo 2	-432,00	1,50	52,50	0,00	-648,00	-22680,00	0,00
Total	12386,40	7,50	137,00	0,00	18579,60	354866,40	0,00

Baricentro:	Local	Global*
X	1,50	24,50
Y	28,65	-180,35
Z	0,00	0,00

Material: Alumínio

Densidade: 2700 kg/m<sup>3</sup>

Massa: 0,03 kg

\* Medidas referentes ao baricentro de cada componente são em relação ao centro do pino articulado.

\*\* Volume positivo refere-se à adição de massa e volume negativo à remoção de massa

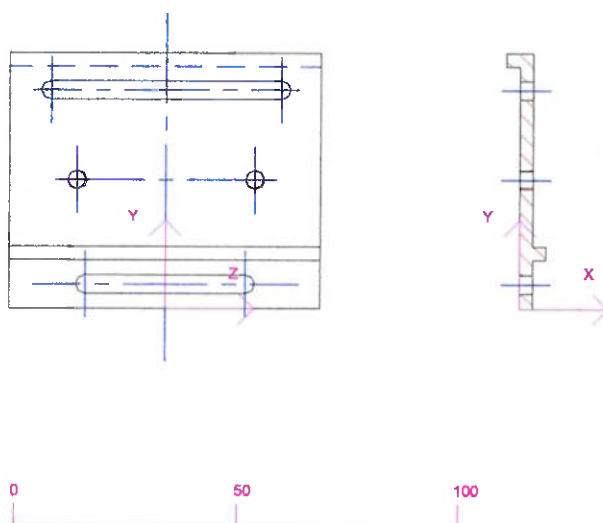


Figura 13: Croqui peça 05.

## Cálculo do baricentro da peça 06:

Peça 06

Componente	Volume (mm <sup>3</sup> )	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm <sup>4</sup> )	y.V (mm <sup>4</sup> )	z.V (mm <sup>4</sup> )
Retângulo 1	6000,00	2,00	15,00	0,00	12000,00	90000,00	0,00
Total	6000,00	2,00	15,00	0,00	12000,00	90000,00	0,00

Baricentro:	Local	Global*
X	2,00	28,00
Y	15,00	-180,00
Z	0,00	0,00

Material: Aço

Densidade: 7800 kg/m<sup>3</sup>

Massa: 0,05 kg

\* Medidas referentes ao baricentro de cada componente são em relação ao centro do pino articulado.

\*\* Volume positivo refere-se à adição de massa e volume negativo à remoção de massa

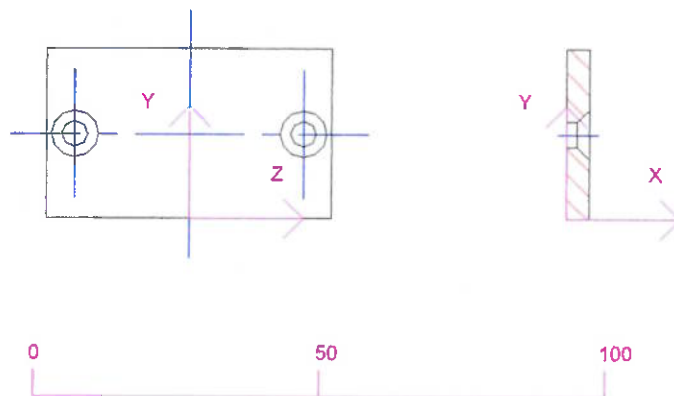


Figura 14: Croqui peça 06.

## Cálculo do baricentro da peça 07:

Peça 07

Componente	Volume (mm <sup>3</sup> )	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm <sup>4</sup> )	y.V (mm <sup>4</sup> )	z.V (mm <sup>4</sup> )
Retângulo 1	37500,00	25,00	12,50	0,00	937500,00	468750,00	0,00
Retângulo 2	4500,00	-15,00	14,25	0,00	-67500,00	64125,00	0,00
Retângulo 3	6750,00	31,25	-15,00	0,00	210937,50	-101250,00	0,00
Furo 1	-1507,00	15,00	12,50	0,00	-22605,00	-18837,50	0,00
Furo 2	-4616,00	35,00	12,50	0,00	-161560,00	-57700,00	0,00
Total	42627,00	91,25	36,75	0,00	896772,50	355087,50	0,00

Baricentro:	Local	Global*
X	21,04	-13,96
Y	8,33	-4,17
Z	0,00	0,00

Material: Alumínio

Densidade: 2700 kg/ms

Massa: 0,12 kg

\* Medidas referentes ao baricentro de cada componente são em relação ao centro do pino articulado.

\*\* Volume positivo refere-se à adição de massa e volume negativo à remoção de massa

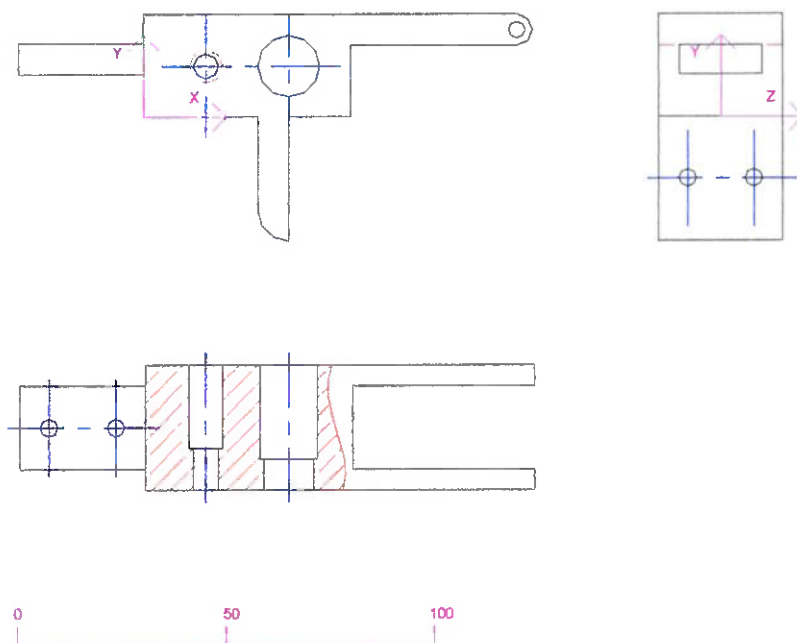


Figura 15: Croqui peça 07.

## Cálculo do baricentro da peça 10:

Peça 10

Componente	Volume (mm <sup>3</sup> )	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm <sup>4</sup> )	y.V (mm <sup>4</sup> )	z.V (mm <sup>4</sup> )
Cilindro 1	1682,84375	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Porca 1	314,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Esfera 1	89,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	2086,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Baricentro:

X	0,00	-20,00
Y	0,00	0,00
Z	0,00	0,00

Material: Aço

Densidade: 7800 kg/ms

Massa: 0,02 kg

\* Medidas referentes ao baricentro de cada componente são em relação ao centro do pino articulado.

\*\* Volume positivo refere-se à adição de massa e volume negativo à remoção de massa

## Cálculo do baricentro do braço sem contra-peso

Peça	Massa	Xg	Xg*M	Yg	Yg*M
2	0,238	7,58	1,80	-112,19	-26,70
3	0,174	-97,50	-16,97	3,23	0,56
4	0,020	19,00	0,38	-169,90	-3,40
5	0,033	24,50	0,81	-180,35	-5,95
6	0,047	28,00	1,32	-180,00	-8,46
7	0,115	-13,96	-1,61	-4,17	-0,48
10	0,016	-20,00	-0,32	0,00	0,00
Total	0,643		-14,58		-44,43

Baricentro Conjunto

X -22,68

Y -69,10

Balanceamento

X = 55,00

M = 0,265

Y = 167,58

Sendo material do contra-peso de aço (densidade de 7800 kg/m<sup>3</sup>), então:

Diâmetro do contra peso: 46,53

Calculando o baricentro do conjunto, sem a massa de balanceamento, obtém-se então o seguinte resultado:  $X = - 22,68 \text{ mm}$  e  $Y = - 69,10 \text{ mm}$ , em relação ao centro de pivotagem do braço. Deslocando o baricentro do conjunto para o centro do pino pivô com a adição de um contra-peso, e selecionando sua posição de centro de massa em  $X: 55,00\text{mm}$ , temos:

- Massa do contra-peso = 265 gramas e posição em  $Y = 167,58 \text{ mm}$  e sendo a espessura desta peça de 20 mm, tem-se que o diâmetro do contra peso será de 46,53 mm.



### ***Análise da Viga de Sustentação do Braço***

Será apresentada a seguir uma análise da viga de sustentação do braço. Esta análise visa verificar os deslocamentos principais da viga e analisar se estes deslocamentos são significativos a ponto de influenciar no ensaio de desgaste.

Para esta análise foram utilizados os seguintes dados:

#### ***Material***

Alumínio Estrutural

Módulo de Elasticidade  $E = 7,10 \cdot 10^4$  MPa

Módulo de Elasticidade Transversal  $G = 2,69 \cdot 10^4$  MPa

Coeficiente de Poisson = 0,33

Densidade =  $2768,4 \text{ kg/m}^3$

#### ***Elemento***

Superfície plana de espessura de 30mm.

#### ***Força***

Força de 30 N referente ao peso do braço (6,25 N), ao contra-peso (2,65 N) e peso morto máximo (20 N), totalizando uma carga de 28,9N (aproximadamente 30N).

#### ***Resultados***

Os resultados obtidos na análise estrutural feita através do software Nastran estão apresentados a seguir.

Modelo:

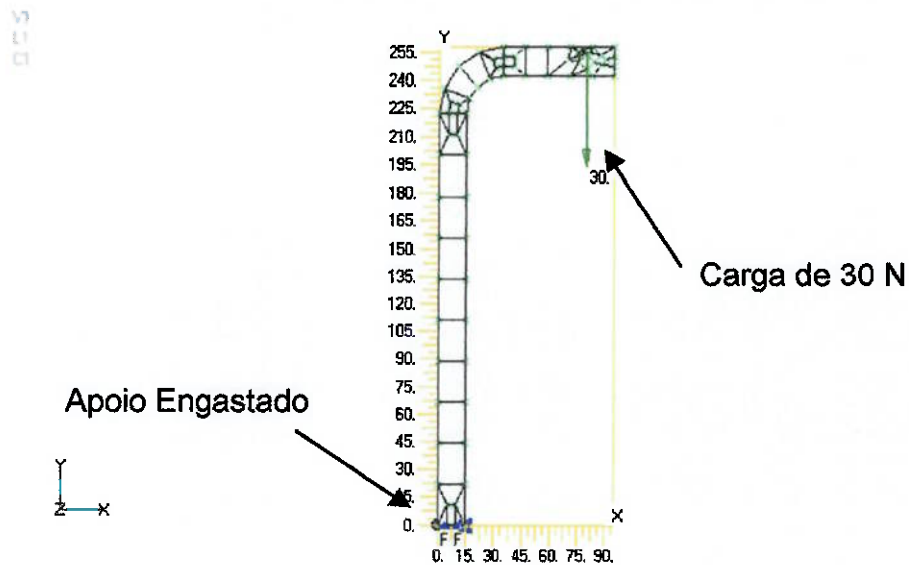


Figura 16: Modelo da viga construído no software Nastran.

Deformação:

Abaixo é apresentado o gráfico da viga deformada com a representação da deformação equivalente e as componentes de tensões de Von Misses. A escala de cores indica as tensões de Von Misses equivalentes.

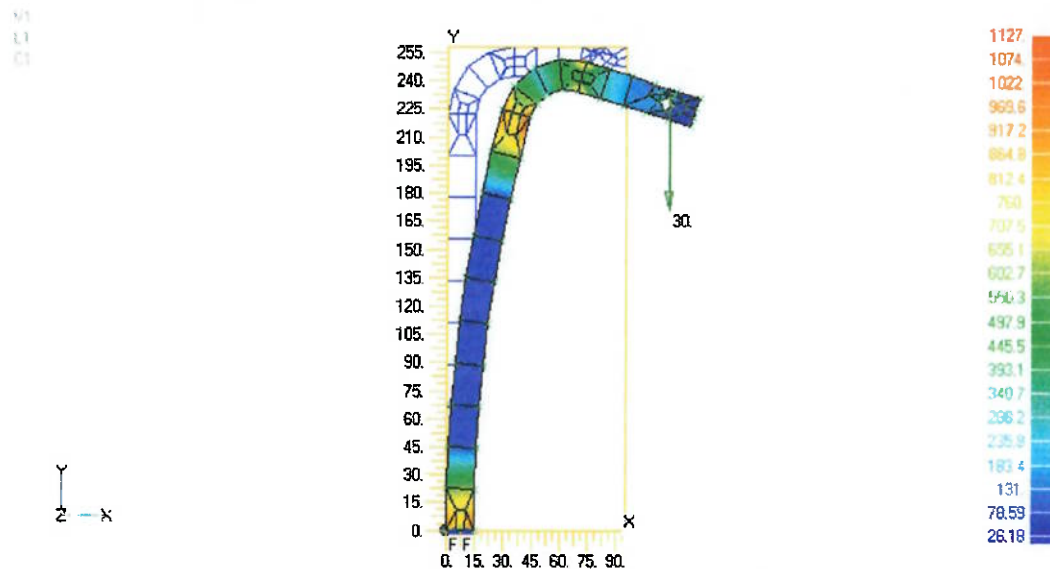


Figura 17: Representação da viga deformada. Escala de deformação 10:1.

O deslocamento máximo ocorreu no nó 57 (fig.14) e a tensão máxima ocorreu no elemento 22 (fig.15), sendo:

Máximo deslocamento de 0,122mm.

Tensão máxima de 1,29 kPa.

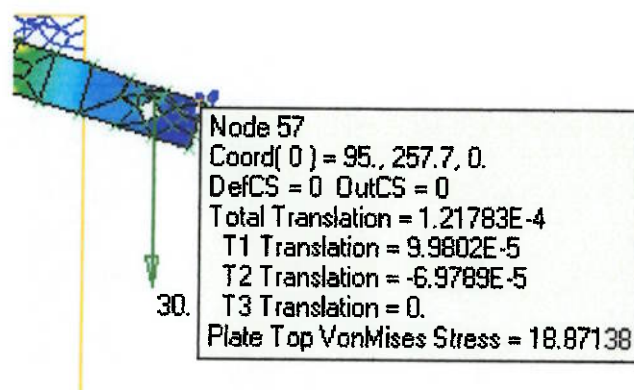


Figura 18: Máxima deformação da viga.

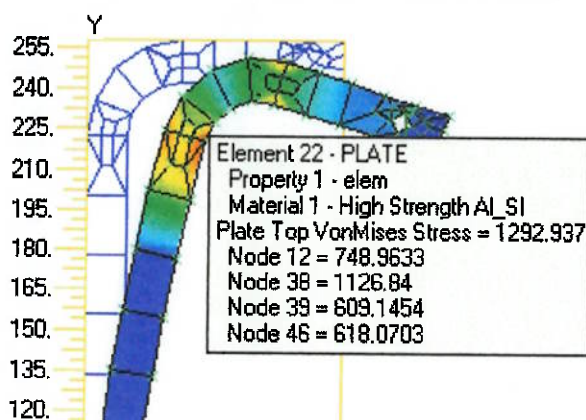


Figura 19: Máxima tensão na viga, segundo critério de Von Misses.

### Análise:

Com uma deformação equivalente máxima de 0,122mm, podemos ver que esta deformação não é significativa e que não será perceptível na máquina. Outro ponto a ser verificado é o de máxima tensão. Sabendo que o material utilizado possui uma tensão de escoamento de 505 MPa, a tensão de Von Misses máxima de 1,29 KPa não afetará o projeto da viga.

## 10. CUSTOS

Foi realizado um levantamento de custos de materiais a serem utilizados na construção da máquina. Estes dados são apresentados na tabela abaixo.

No.	Denominação	Material	Qtd	Custo unit	Custo Total
1	Base	Alumínio	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00
2	Haste Vertical	Alumínio 7075 T6	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
3	Haste Horizontal	Alumínio 7075 T6	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
4	Guia Porta Amostra	Alumínio 7075 T6	1	R\$ 8,00	R\$ 8,00
5	Porta Amostra	Alumínio 7075 T6	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
6	Amostra	Aço	3	R\$ 6,00	R\$ 18,00
7	Conector-Haste	Alumínio 7075 T6	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
8	Rolamento de Agulhas	SKF HK1015	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
9	Pino Conector	Aço 1020	1	R\$ 3,00	R\$ 3,00
10	Pino Trava	Aço 1020	1	R\$ 3,00	R\$ 3,00
11	Peça Trava	Aço 1020	1	R\$ 2,00	R\$ 2,00
12	Conexão Eixo-Motor	Borracha - Padr.	1	R\$ 15,00	R\$ 15,00
13	Coluna	Alumínio 7075 T6	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
14	Esfera Padrão 25mm	Aço	6	R\$ 5,00	R\$ 30,00
15	Eixo	Aço 1045	1	R\$ 20,00	R\$ 20,00
16	Fixação da Caixa de Rolamento	Aço 1020	2	R\$ 10,00	R\$ 20,00
17	Unidade de Rolamentos	NSK UCP202	2	R\$ 57,50	R\$ 115,00
18	Pino M4x30mm	Aço 1020	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00
19	Pino d4x38 mm	Aço 1020	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00
20	Nível de Bolha	Plástico	1	R\$ 20,00	R\$ 20,00
21	Contra-Peso	Aço 1020	1	R\$ 7,00	R\$ 7,00
22	Motor de Passo 25 Watts		1	R\$ 2.454,44	R\$ 2.454,44
23	Controlador		1	R\$ 777,91	R\$ 777,91
24	Bucha Centralizadora	Aço 1020	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
	Total				R\$ 3.672,35

## 11. CONCLUSÃO

Podemos ver pela revisão bibliográfica a importância da pesquisa e o avanço tecnológico que ela nos trás. O desenvolvimento da máquina que é apresentada neste trabalho surgiu de uma máquina simples, fabricada de madeira e pedra. Após estudos e com o desenvolvimento começaram a surgir ensaios que utilizavam pequenas cargas e partículas abrasivas da ordem de micrômetros para a medição de desgaste em diamantes. Hoje em dia a máquina de ensaio de desgaste por micro-abrasão é utilizada principalmente para se medir desgaste em materiais revestidos, bastante utilizados em revestimentos de ferramentas e representam novamente o avanço da tecnologia.

A proposta deste trabalho foi a de desenvolver o projeto da máquina. O projeto foi realizado em uma primeira etapa, sendo desenvolvido estudos dos modos construtivos da máquina, aplicação acadêmica e o projeto em si. Foi feito a seguir uma revisão do projeto, onde foi feito a otimização da máquina, modificando materiais e reprojetoando componentes e balanceamento estático do sistema de aplicação de carga.

Finalizado a etapa do projeto, então iniciou-se um estudo para a construção da máquina. Nesta etapa, pode-se então aprender que a engenharia não é constituída apenas de aspectos técnicos. Foi necessário utilizar conhecimentos adquiridos em aulas, expostos implicitamente. Conhecimentos estes mais próximos da engenharia atual, como utilização de recursos disponíveis, contato com fornecedores e adequação do projeto com o que se pode encontrar no mercado. Uma série de dificuldades foram observadas neste aspecto, como localização de fornecedores de materiais e equipamentos, levantamento de custos, que as vezes não era esperado.

Concluindo este trabalho, observamos a importância da implementação deste projeto, considerando-o como um material de auxílio ao desenvolvimento tecnológico de nosso país.

**CONTATOS TÉCNICOS**

Distribuidor SKF: Marajó Rolamentos Com. e Imp. Ltda.

- Rua Antonio Ayrosa, 126 Fone: (11) 2625-0455

- email: [marajo@marajorolamentos.com.br](mailto:marajo@marajorolamentos.com.br)

- Contato: Eng. Lima

Alcoa .

Fone: 4463-8010 (suporte técnico)      3741-1583 (compras)

Contato: Adalmir

Red Metal – Fornecedor de Materiais – Alumínio Estrutural

Fone: 6099-0300

Contato: Avelino

RS do Brasil – Fornecedor de Motores

Av. Brig. Faria Lima, 2413 16º andar

email: [vendas@rsdobrasil.com.br](mailto:vendas@rsdobrasil.com.br)

Suporte técnico: 3044-9098

SAC: 3031-4491

## 12. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RUTHERFORD, K.L.; HUTCHINGS, I.M. **Theory and application of a micro-scale abrasive wear test.** J. Test. Eval., JTEVA v.25, n.2, p.250-260, 1997.

TREZONA, R.I.; HUTCHINGS, I.M. **Three-body abrasive wear testing of soft materials.** Elsevier, Wear, p. 209 – 221, 1999.

TREZONA, R.I.; ALLSOPP, D.N.; HUTCHINGS, I.M. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test.** Elsevier, Wear, 205 - 214, 1999.

HIGGNS, R.A. **Propriedades e estruturas dos materiais em engenharia.** São Paulo: Difel, 1982.

E.BOYER, Howard; L.GALL, Timothy **Metals Handbook: Alloy and temper designation systems for aluminum** American Society for Metals, 1985

P.BEER, Ferdinand; JOHNSTON JR, E.Russell . **Mecânica vetorial para engenheiros.** 5ªed. São Paulo: Makron, 1994.

P.BEER, Ferdinand; JOHNSTON JR, E.Russell . **Resistência dos Materiais.** 2ªed. São Paulo: Makron, 1989.

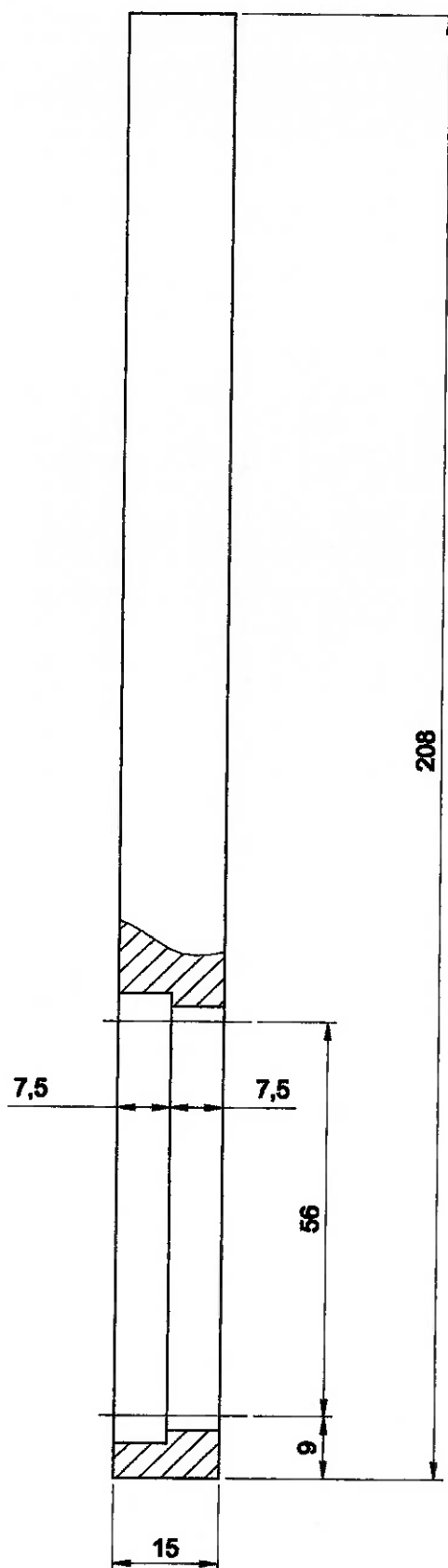
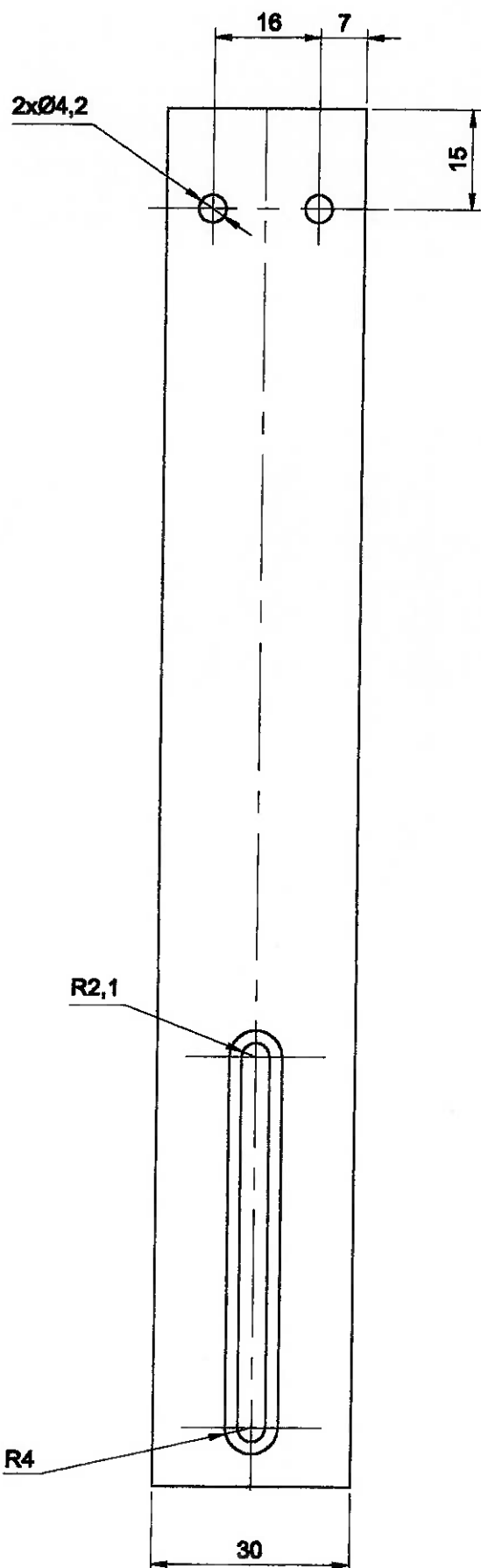
MANFÉ, Giovanni; POZZA, Rino; SCARATO, Giovanni **Desenho Técnico Mecânico** vol.2, 3. Hemus.

## **13. ANEXOS**



## **Anexo A: Desenho de Conjunto**

## **Anexo B: Desenhos de Construção**



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

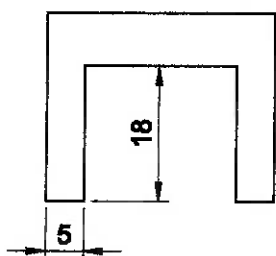
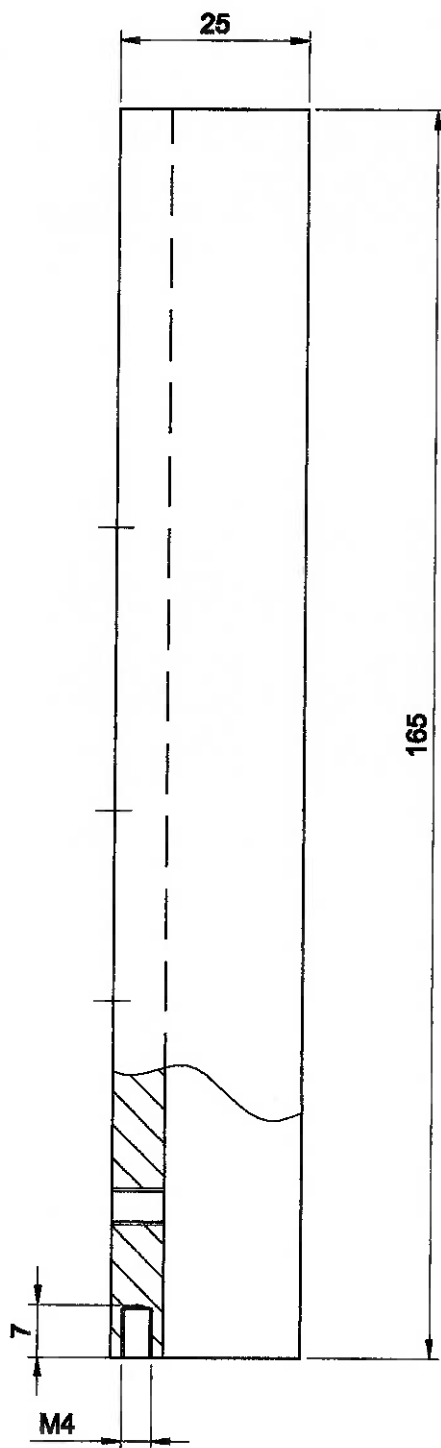
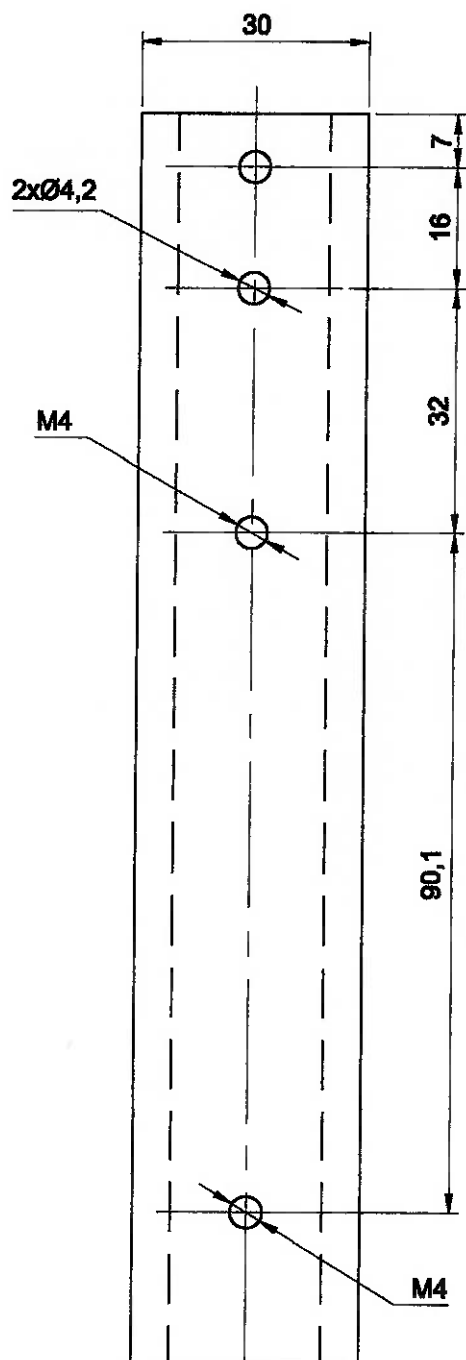
ESCALA 1:1

DESENHO: HASTE VERTICAL

DATA: 09/09/2002

PEÇA N°. 02

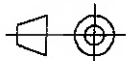
ALUMÍNIO



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

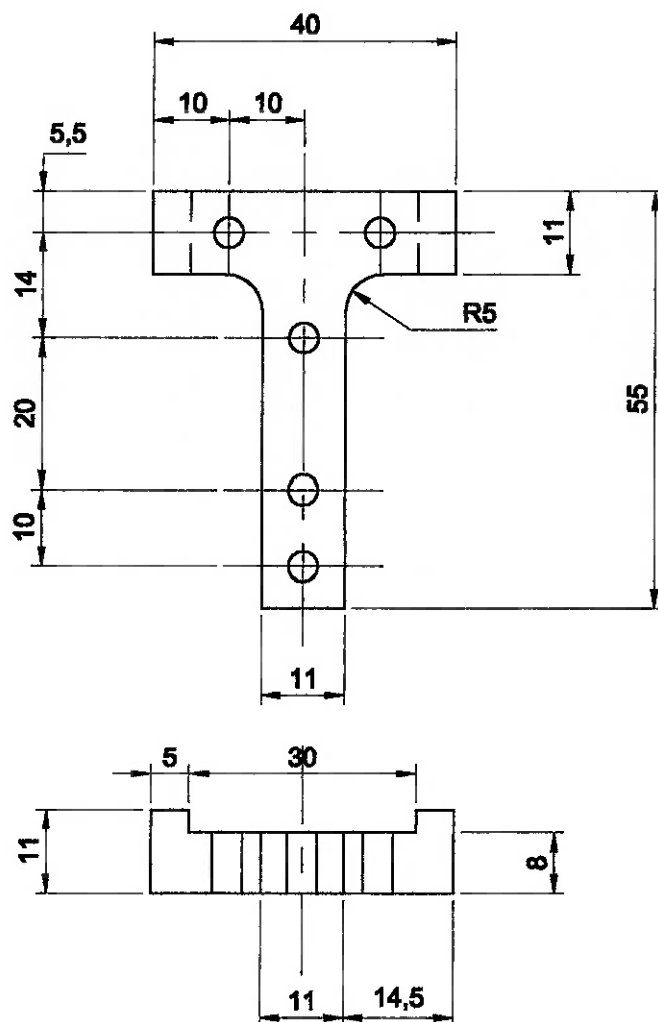


DESENHO: HASTE HORIZONTAL

DATA: 23/06/2002

PEÇA N°. 03

ALUMÍNIO



**OBSERVAÇÃO:**  
FUROS: 5X M4

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

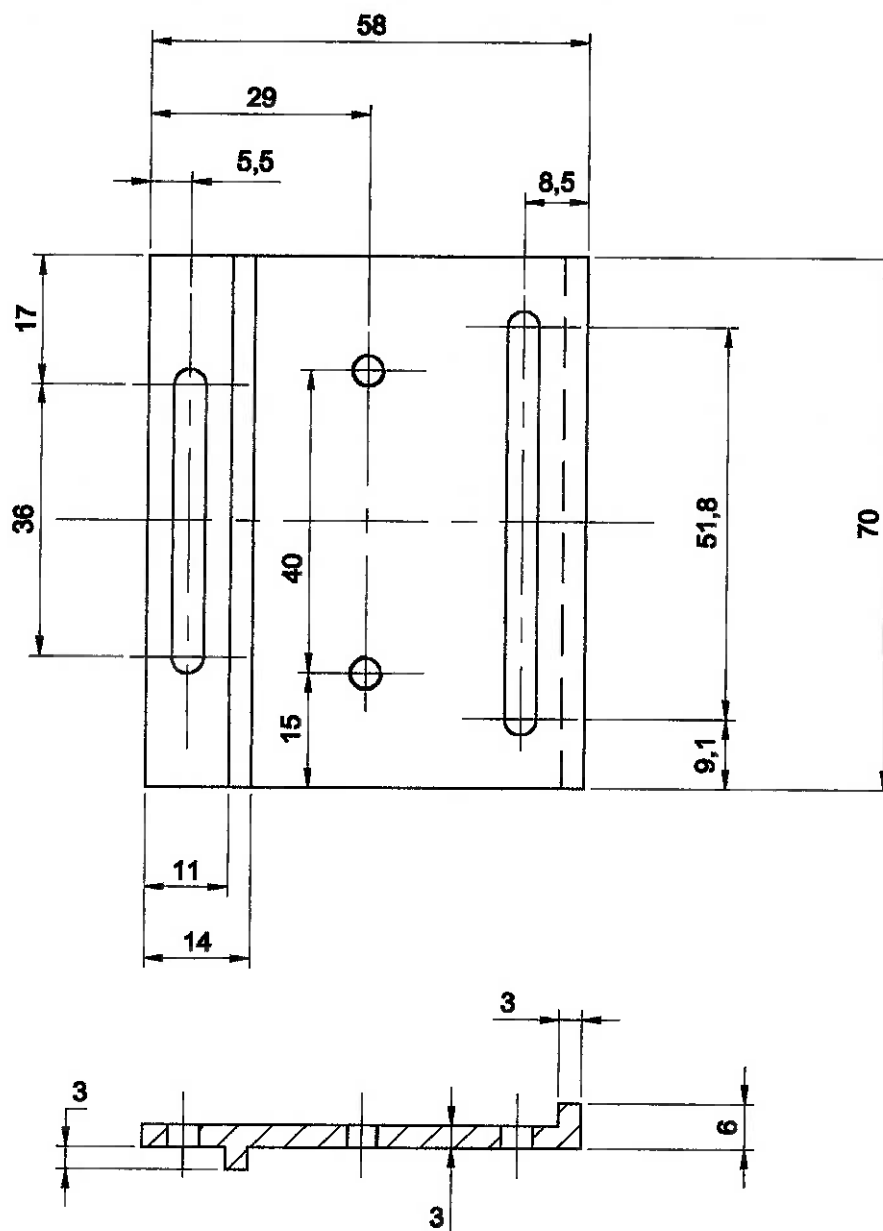
ESCALA 1:1

**DESENHO: GUIA DO PORTA AMOSTRA**

DATA: 23/06/2002

PEÇA N°. 04

MAT. ALUMÍNIO



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

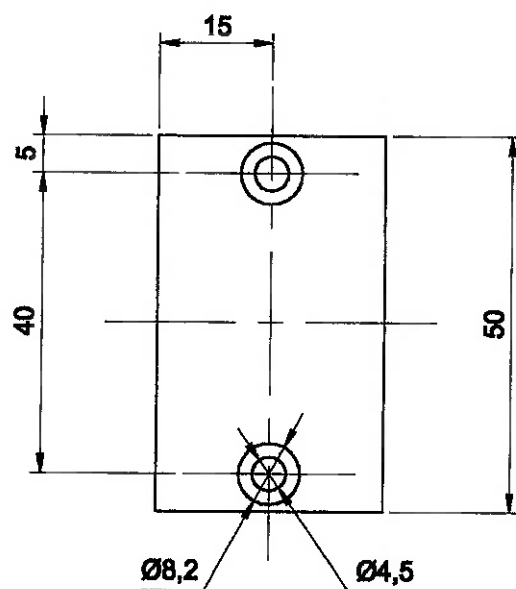
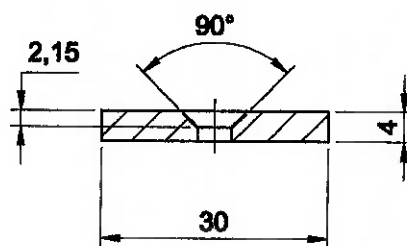
ESCALA 1:1

DESENHO: PORTA AMOSTRA

DATA: 23/08/2002

PEÇA N°. 05

MAT. ALUMÍNIO



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

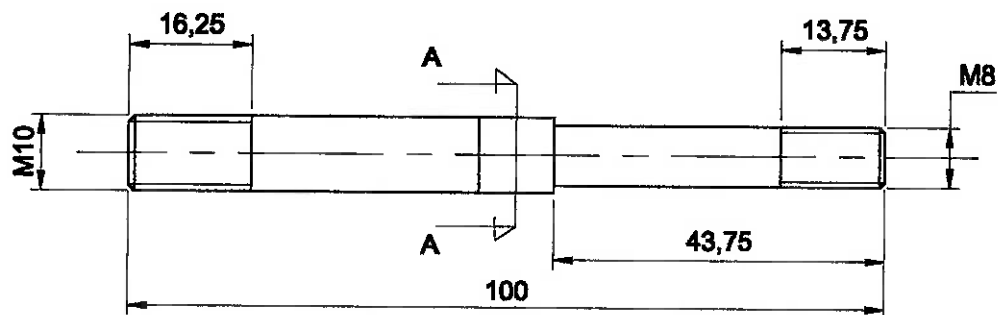
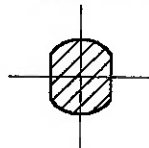
DESENHO: AMOSTRA

DATA: 23/06/2002

PEÇA N°. 06

MAT. AÇO 1020

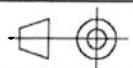
Seção A-A



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1



DESENHO: PINO DE CONEXÃO

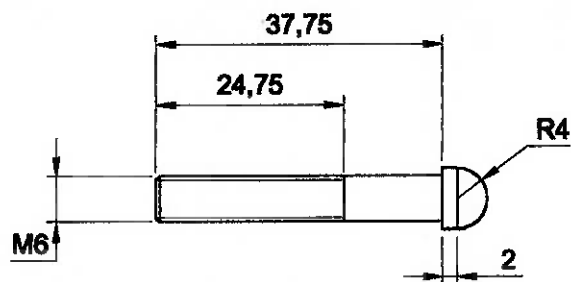
DATA: 23/06/2002

PEÇA N°. 09

DES.N°. 01

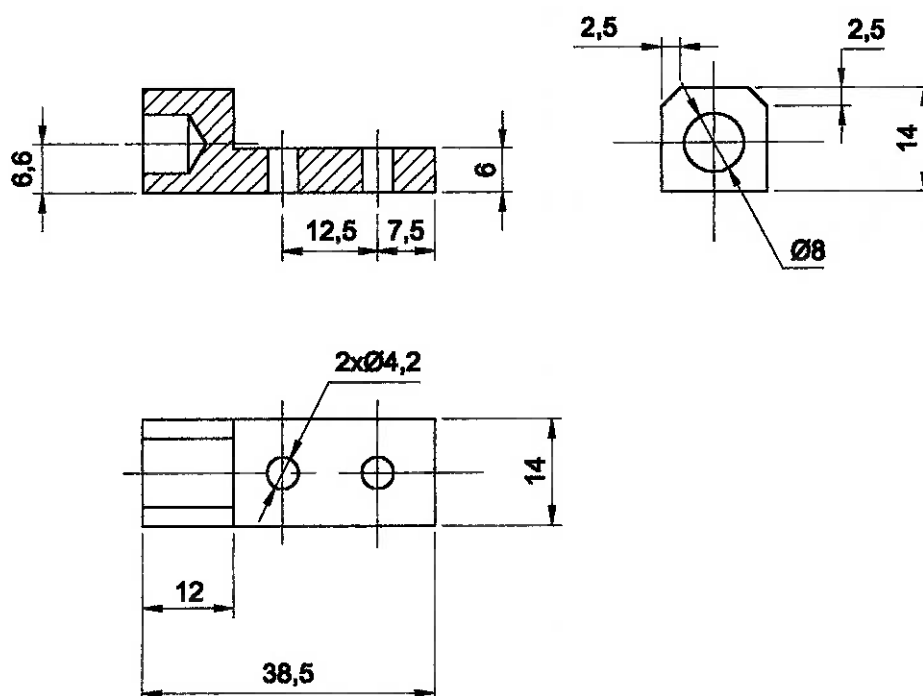


## PINO MÓVEL



PEÇA N°. 10

## PINO TRAVA



PEÇA N°. 11

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

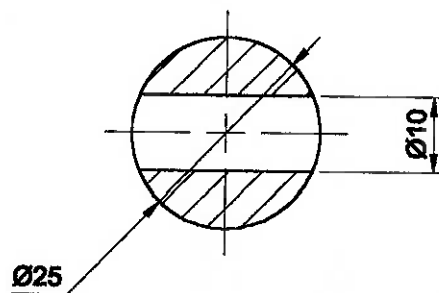
ESCALA 1:1

DESENHO: SIST. DE TRAVAMENTO HASTE

DATA: 23/08/2002

DES.N°. 01

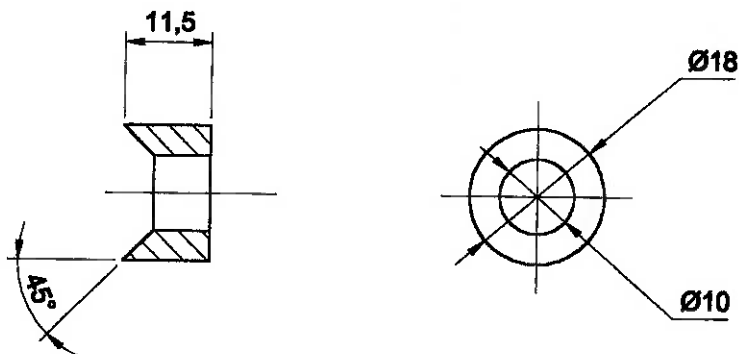
## ESFERA DE ENSAIO



MATERIAL: AÇO AISI 52100  
(AÇO P/ ROLAMENTO)

PEÇA N°. 14

## BUCHA CENTRALIZADORA



MATERIAL: AÇO 1020

PEÇA N°. 24

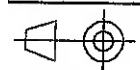
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

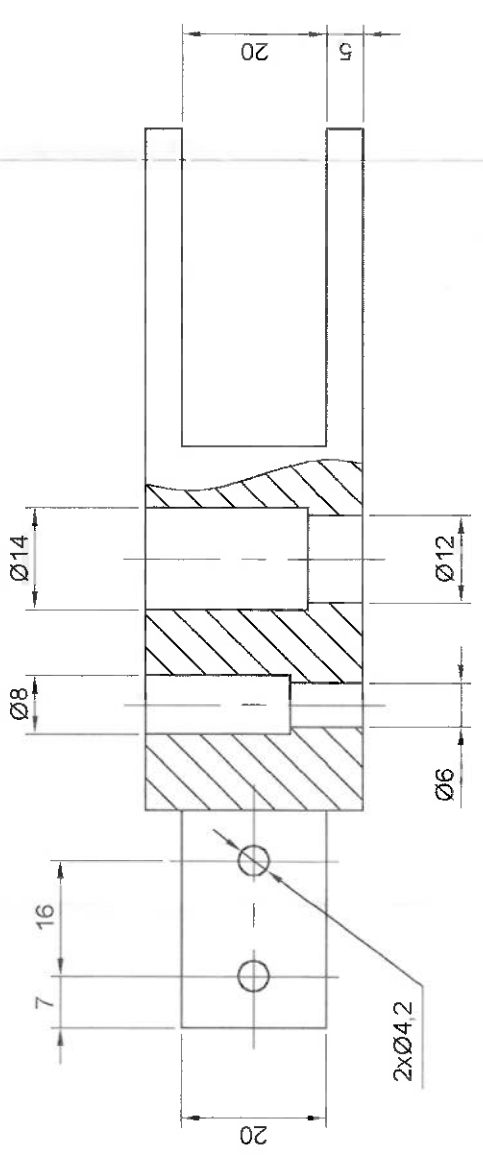
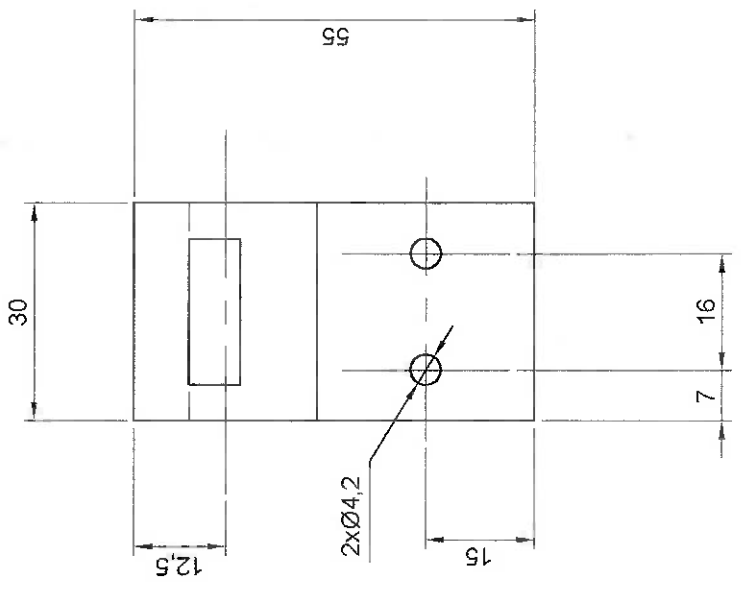
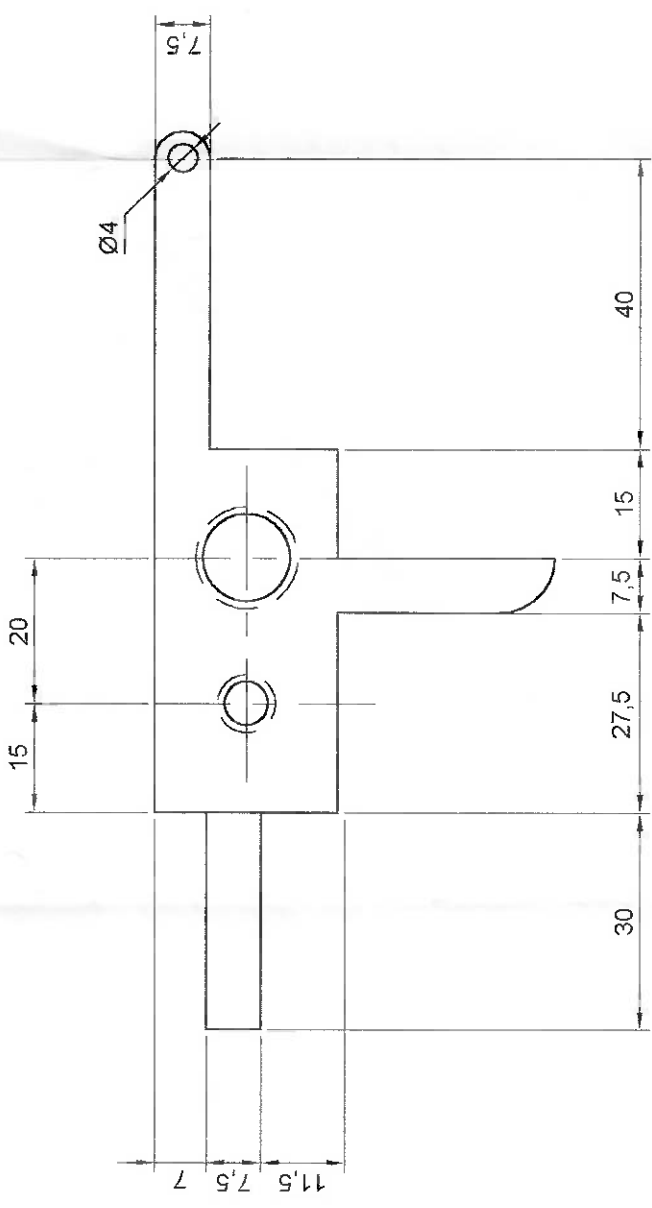
PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

DESENHO: ESFERA DE ENSAIO E  
BUCHA CENTRALIZADORA

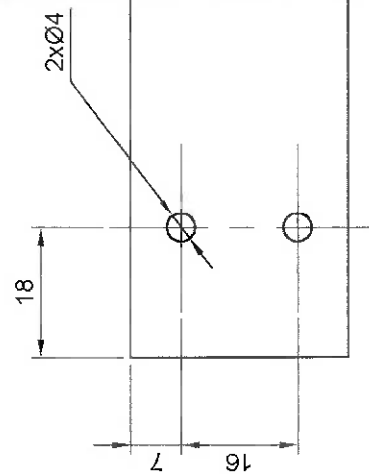
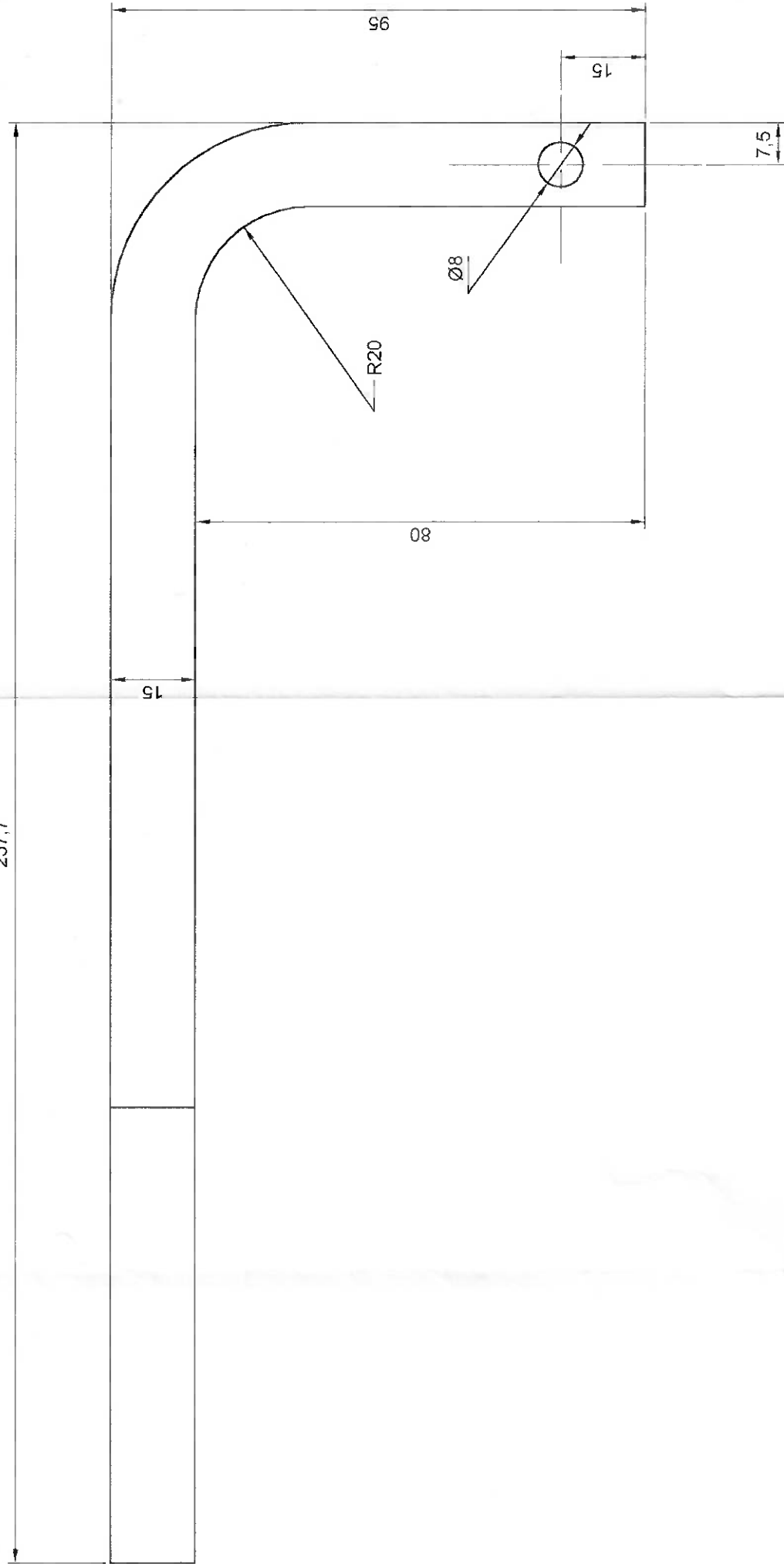
DATA: 30/09/2002





ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	
ESCALA 1:1	DESENHO: CONEXÃO HASTES - CORPO
	DATA: 23/06/2002
	PEÇA N°. 07
	MAT. ALUMÍNIO

257,7



30

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

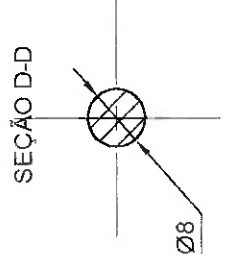
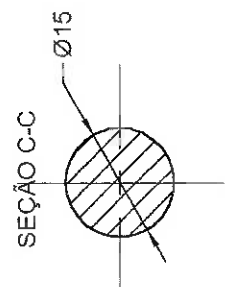
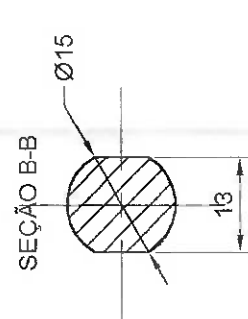
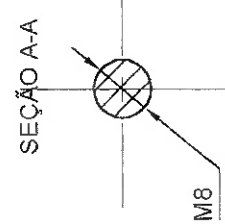
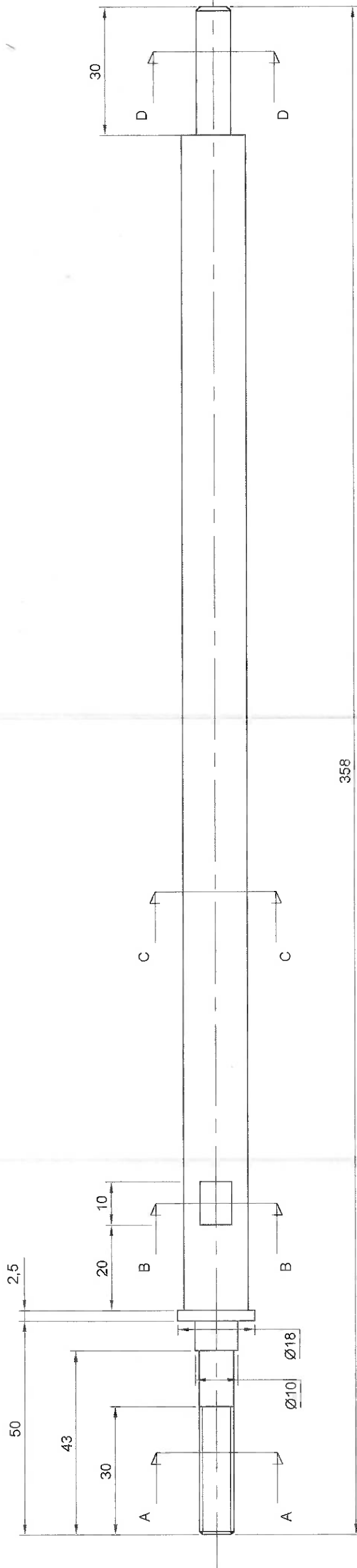


DATA: 05/10/2002

PEÇA N°. 13

MAT. ALUMÍNIO

DESENHO: CONEXÃO COLUNA



TOLERÂNCIAS DO EIXO:  
Dimensional: Classe h8  
Circularidade: IT3 - IT4  
Cilindricidade: IT3 - IT4  
Rugosidade Superficial: 3,2 S  
Obs: Tolerâncias indicadas conforme catálogo NSK.

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	
ESCALA 1:1	DATA: 01/11/2002
	PEÇA N°. 07
DESENHO: EIXO	
MAT. AÇO 1020	