

**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 Bergantin

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
F _{at}	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
V _c	Volume de desgaste da camada revestida
V _s	Volume de desgaste do substrato
μ	coeficiente de atrito

SUMÁRIO

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

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 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 μm , 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 extendida 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 aparelhos experimentais com disco e outras configurações. Mas há uma grande vantagem da utilização do aparelho 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 Vc e Vs podem ser calculados a partir do diâmetro a e b gerados pelo desgaste (fig. 1b).

5. ALTERNATIVAS DE PROJETO

Existem hoje várias configurações de aparelhos 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.

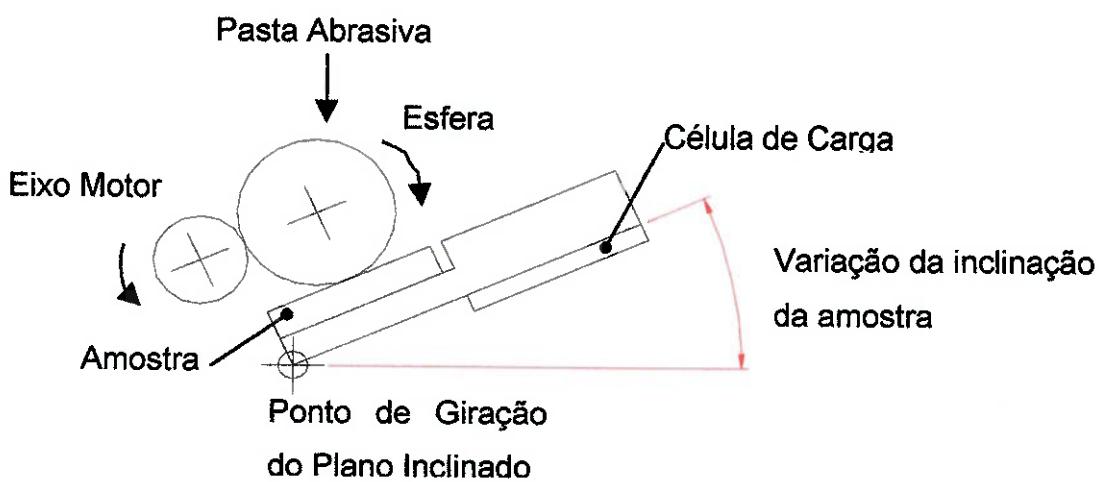


Figura 2: Configuração de “esfera móvel”.

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.

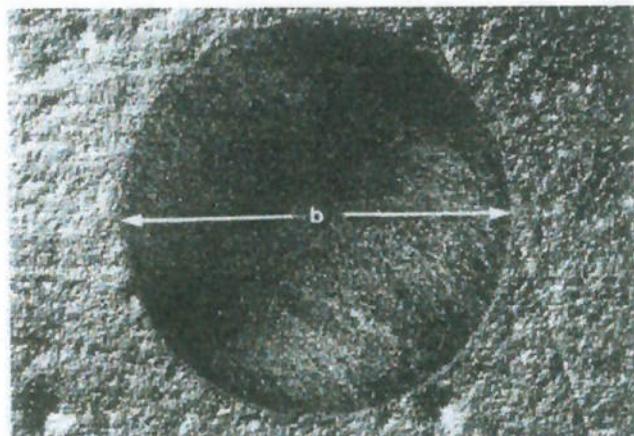


Figura 1a: Material homogêneo. Medida b é referente ao diâmetro da cratera formada.

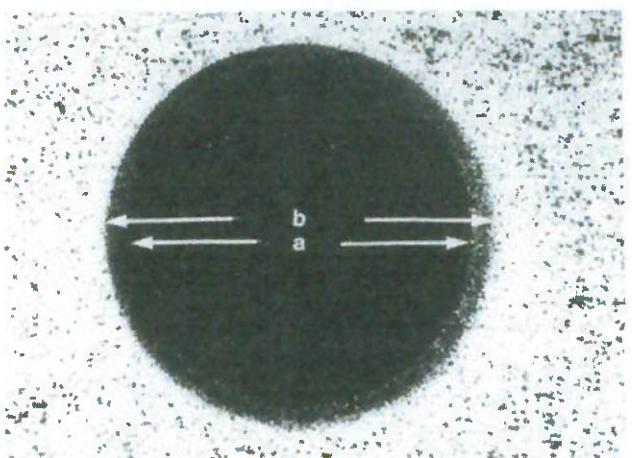


Figura 1b: Material revestido. Medida b é referente ao diâmetro da cratera do revestimento e a da cratera do substrato.

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).

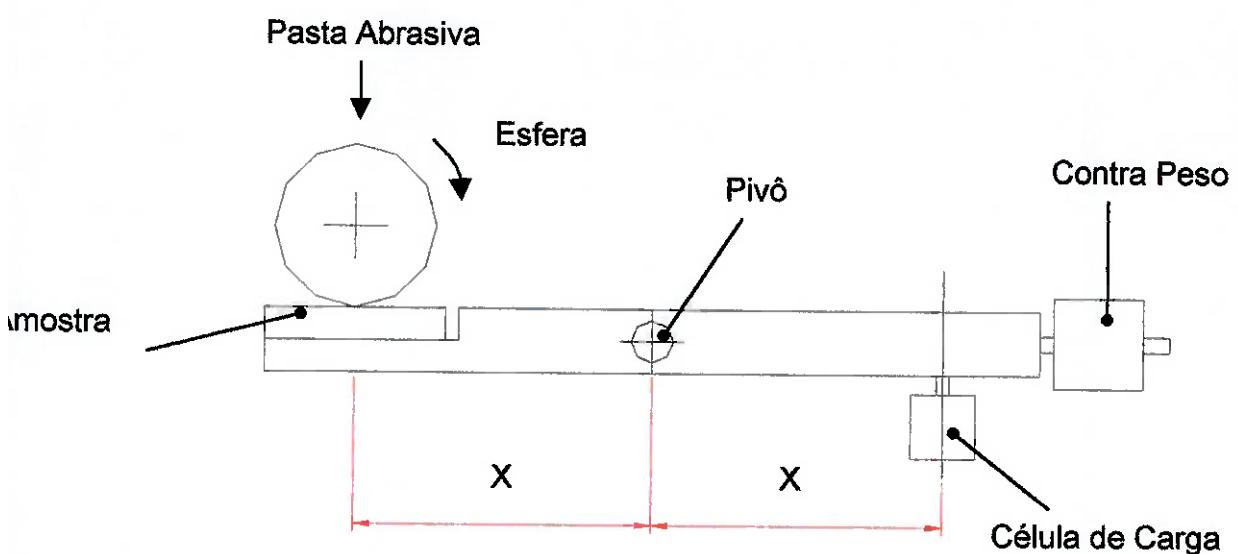


Figura 3: Configuração 1 de "esfera fixa".

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.

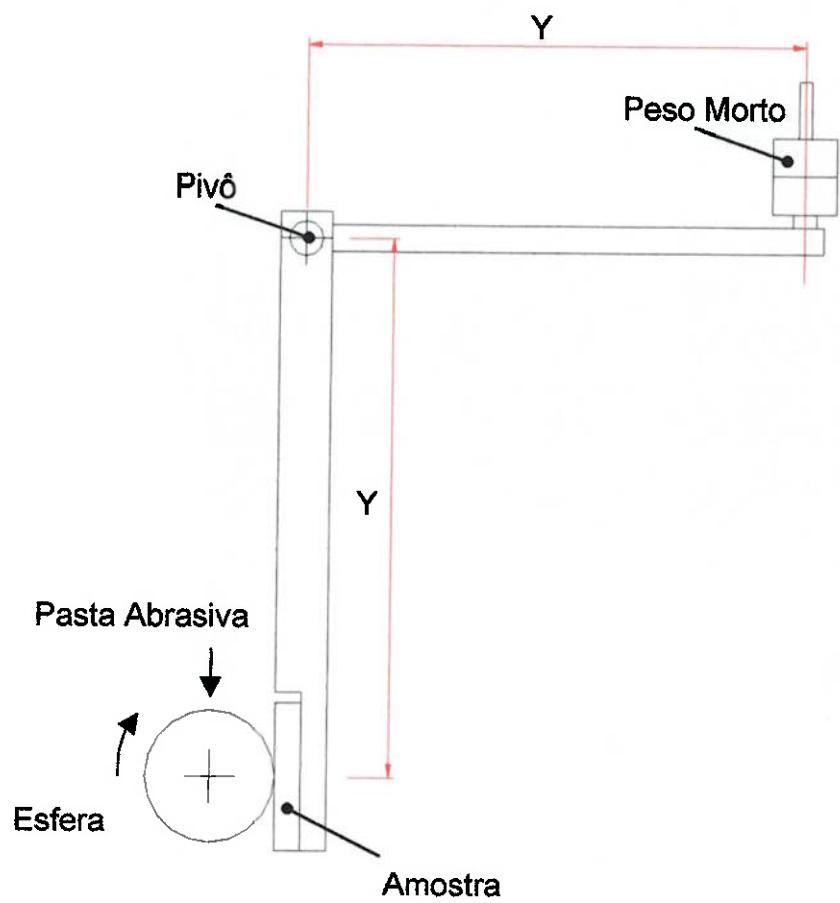


Figura 4: Configuração 2 de "esfera fixa".

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.

Analizando 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.

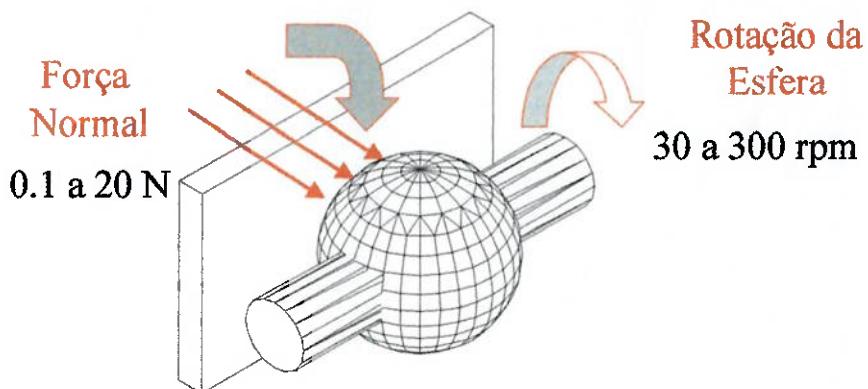
Força normal de projeto = 20 N.

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

Diâmetro da esfera de ensaio = 25 mm.

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

Aplicação de Abrasivo



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.

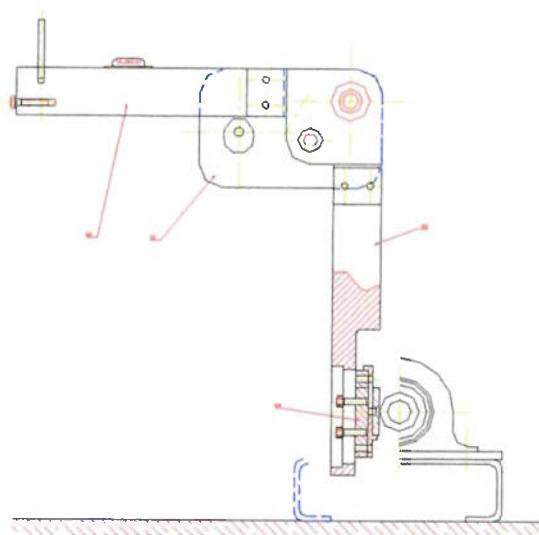


Figura 5: Configuração do projeto inicialmente proposto.

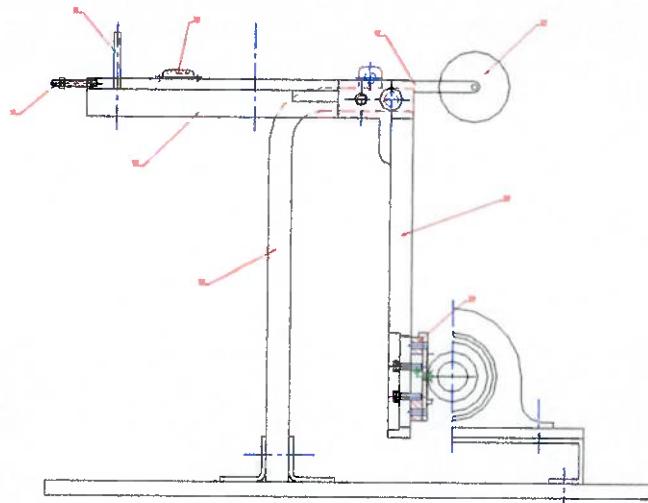


Figura 6: Configuração do projeto otimizado.

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:

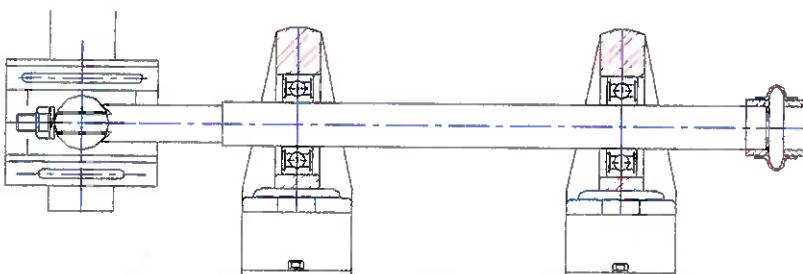


Figura 7: Configuração 1 de montagem de esfera.

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.

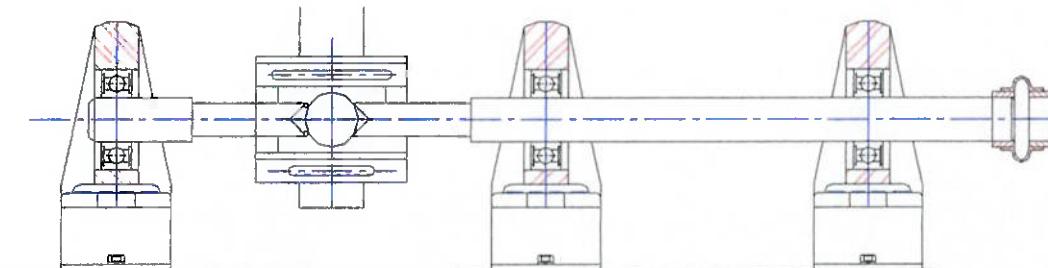
Modo 2:

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

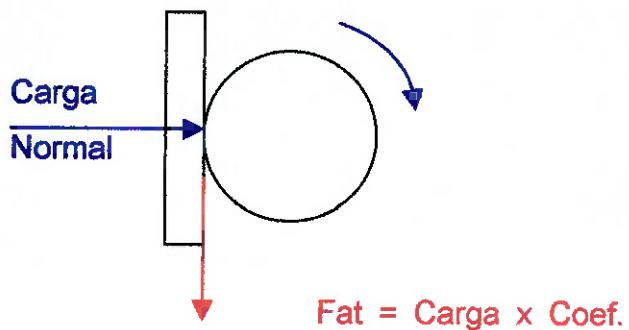


Figura 9: Esquema das forças atuando sobre a esfera.

Carga Normal Máxima: 20 N

Rotação de projeto: 30 a 300 rpm

Força de atrito:

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

$$F_{at} = 20 \text{ N} \times 1 = 20 \text{ N}$$

Torque:

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

Potência do motor:

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

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 ³)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm ⁴)	y.V (mm ⁴)	z.V (mm ⁴)
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/m³
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

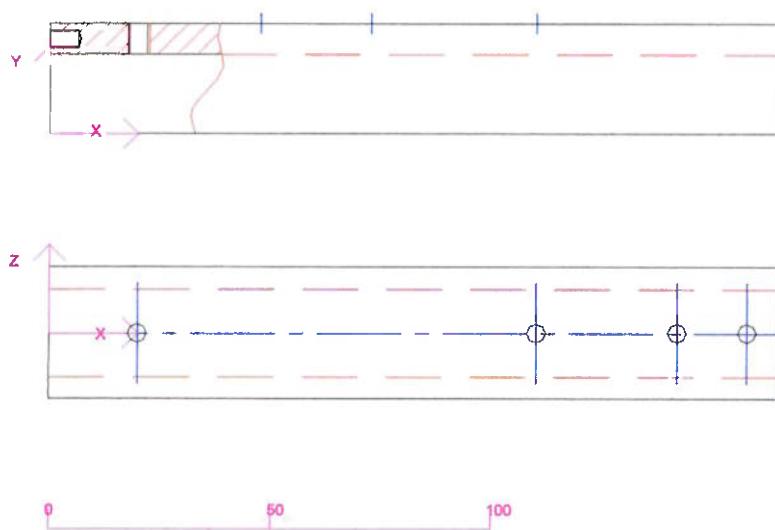


Figura 10: Croqui peça 02.

Cálculo do baricentro da peça 03:

Peça 03

Componente	Volume (mm ³)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm ⁴)	y.V (mm ⁴)	z.V (mm ⁴)
Retangulo 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/m³
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

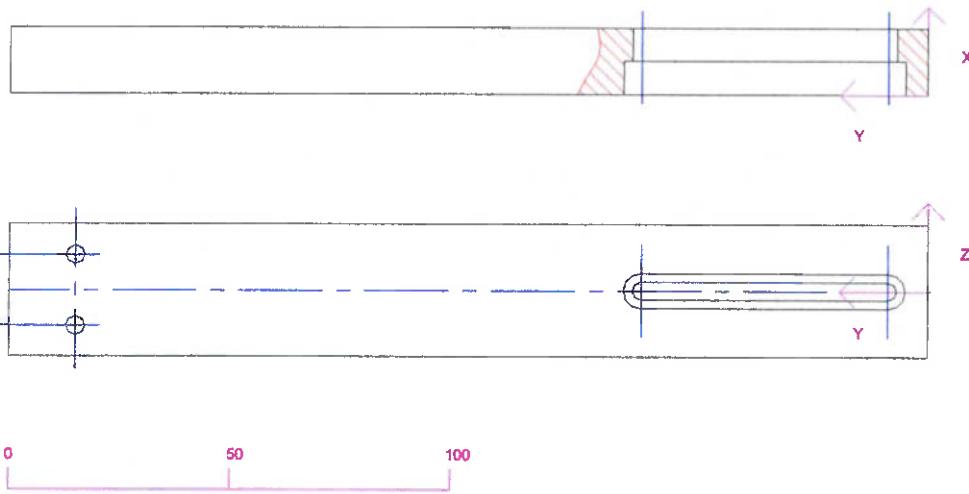


Figura 11: Croqui peça 03.

Cálculo do baricentro da peça 04:

Peça 04

Componente	Volume (mm ³)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm ⁴)	y.V (mm ⁴)	z.V (mm ⁴)
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/m³
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

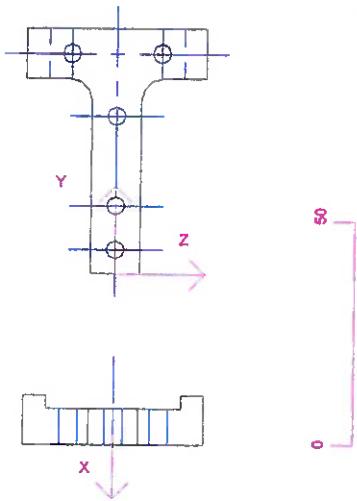


Figura 12: Croqui peça 04.

Cálculo do baricentro da peça 05:

Peça 05

Componente	Volume (mm ³)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm ⁴)	y.V (mm ⁴)	z.V (mm ⁴)
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/m³

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

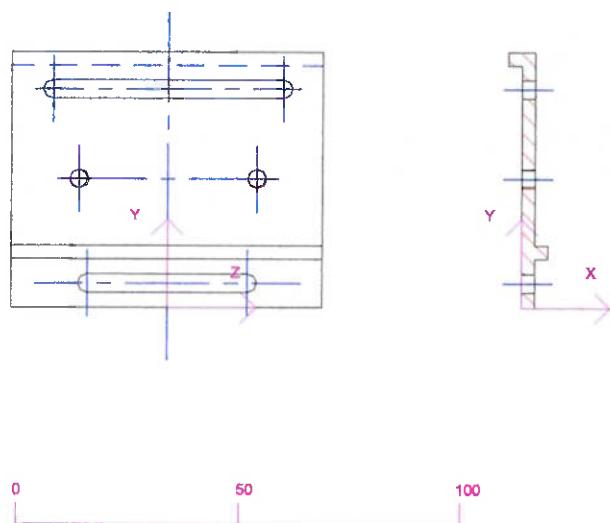


Figura 13: Croqui peça 05.

Cálculo do baricentro da peça 06:

Peça 06

Componente	Volume (mm ³)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm ⁴)	y.V (mm ⁴)	z.V (mm ⁴)
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/m³
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

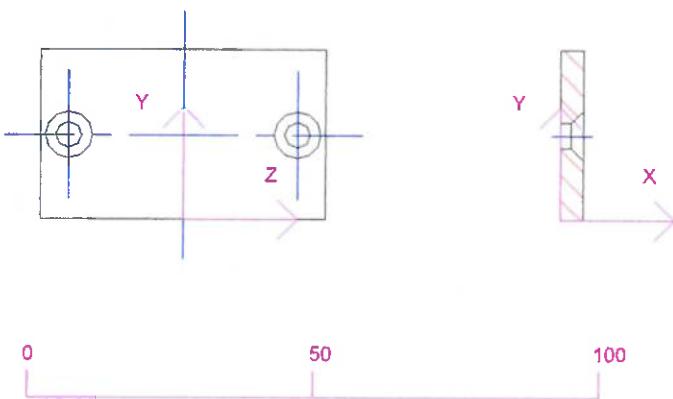


Figura 14: Croqui peça 06.

Cálculo do baricentro da peça 07:

Peça 07

Componente	Volume (mm ³)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm ⁴)	y.V (mm ⁴)	z.V (mm ⁴)
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/m³

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

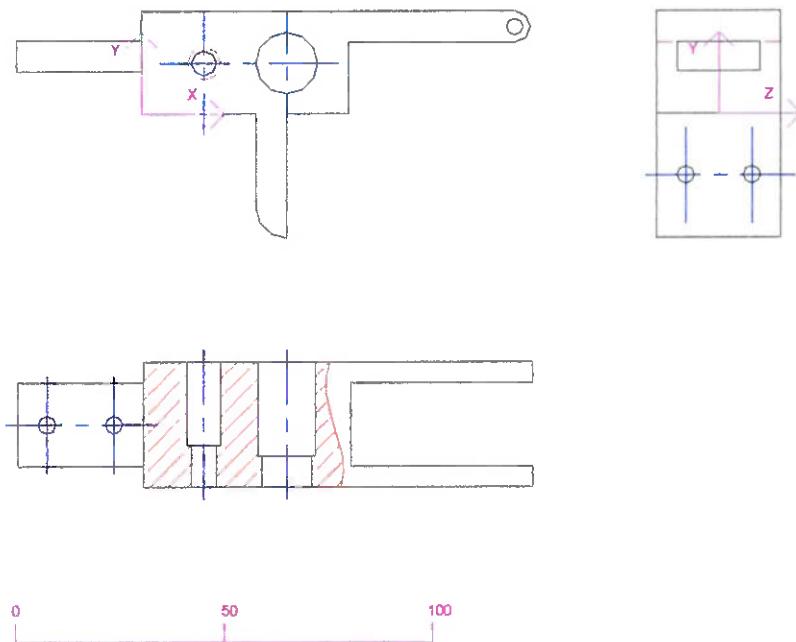


Figura 15: Croqui peça 07.

Cálculo do baricentro da peça 10:

Peça 10

Componente	Volume (mm³)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x.V (mm⁴)	y.V (mm⁴)	z.V (mm⁴)
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/m³
 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/m³), então:

Diâmetro do contra peso: 46,53

Calculando o baricentro do conjunto, sem a massa de balanceamento, obtém-se então o seguinte resultado: $X = - 22,68$ mm e $Y = - 69,10$ 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 : 55,00mm, temos:

- Massa do contra-peso = 265 gramas e posição em $Y = 167,58$ 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 kg/m³

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:

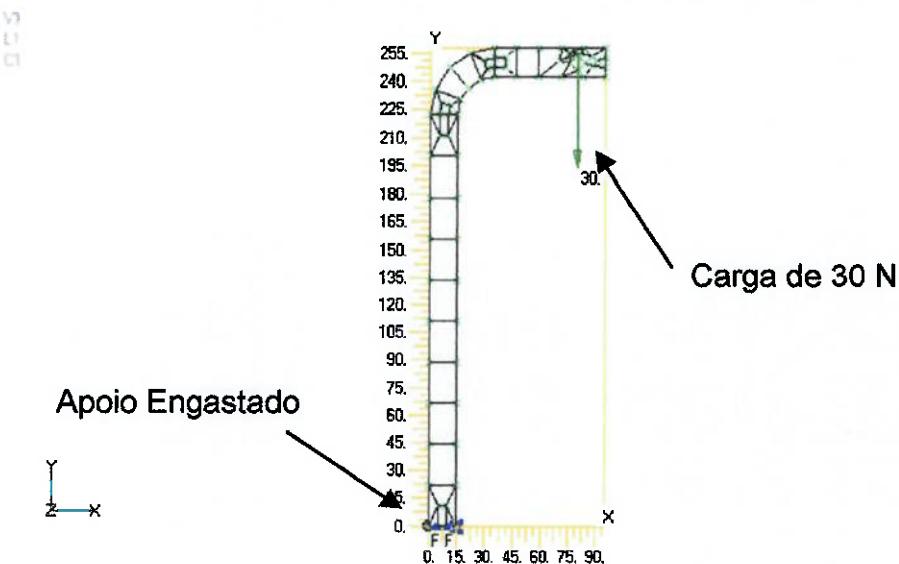


Figura 16: Modelo da viga construído no software Nastran.

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.

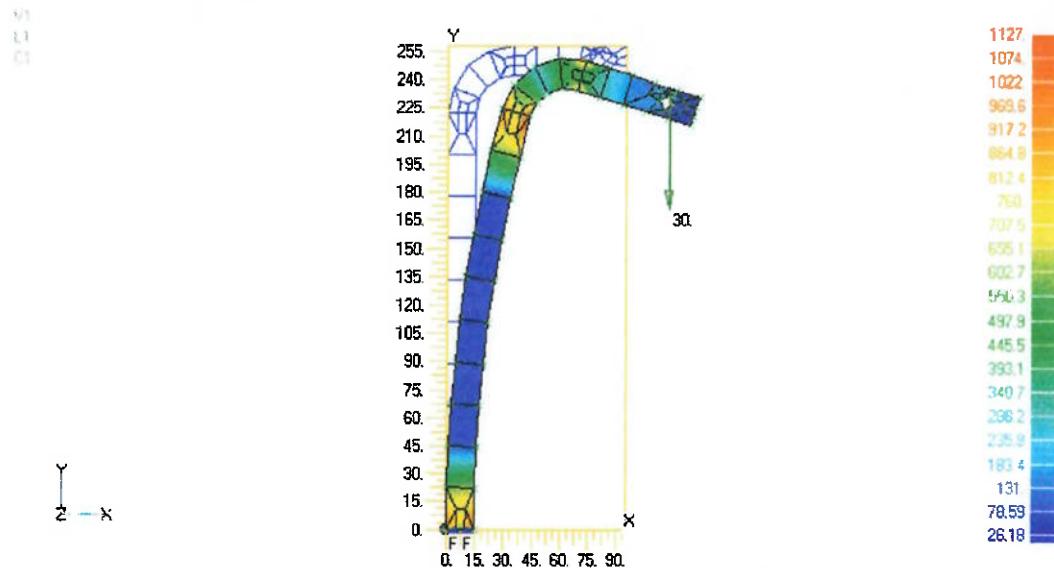


Figura 17: Representação da viga deformada. Escala de deformação 10:1.

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.

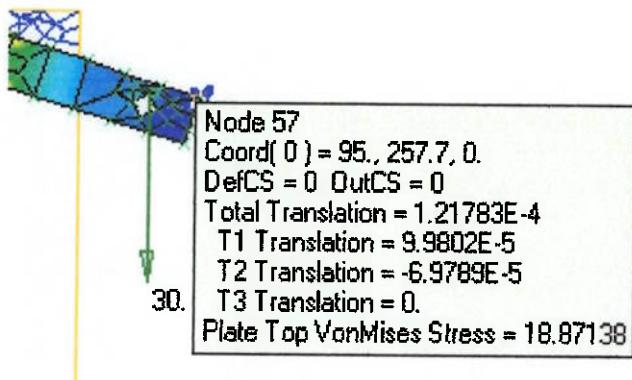


Figura 18: Máxima deformação da viga.

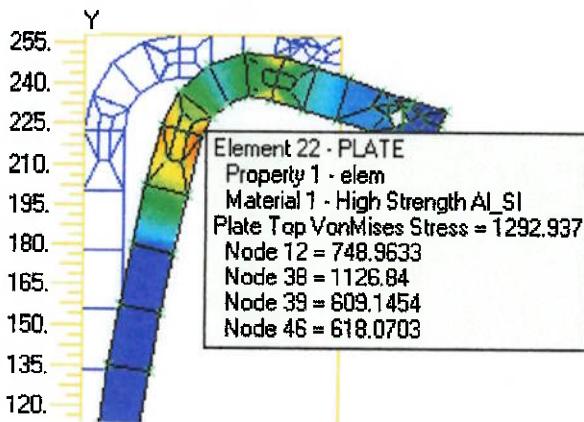


Figura 19: Máxima tensão na viga, segundo critério de Von Misses.

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	Qty	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 reprojetando 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

- 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

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.** 5^{ed}. São Paulo: Makron, 1994.

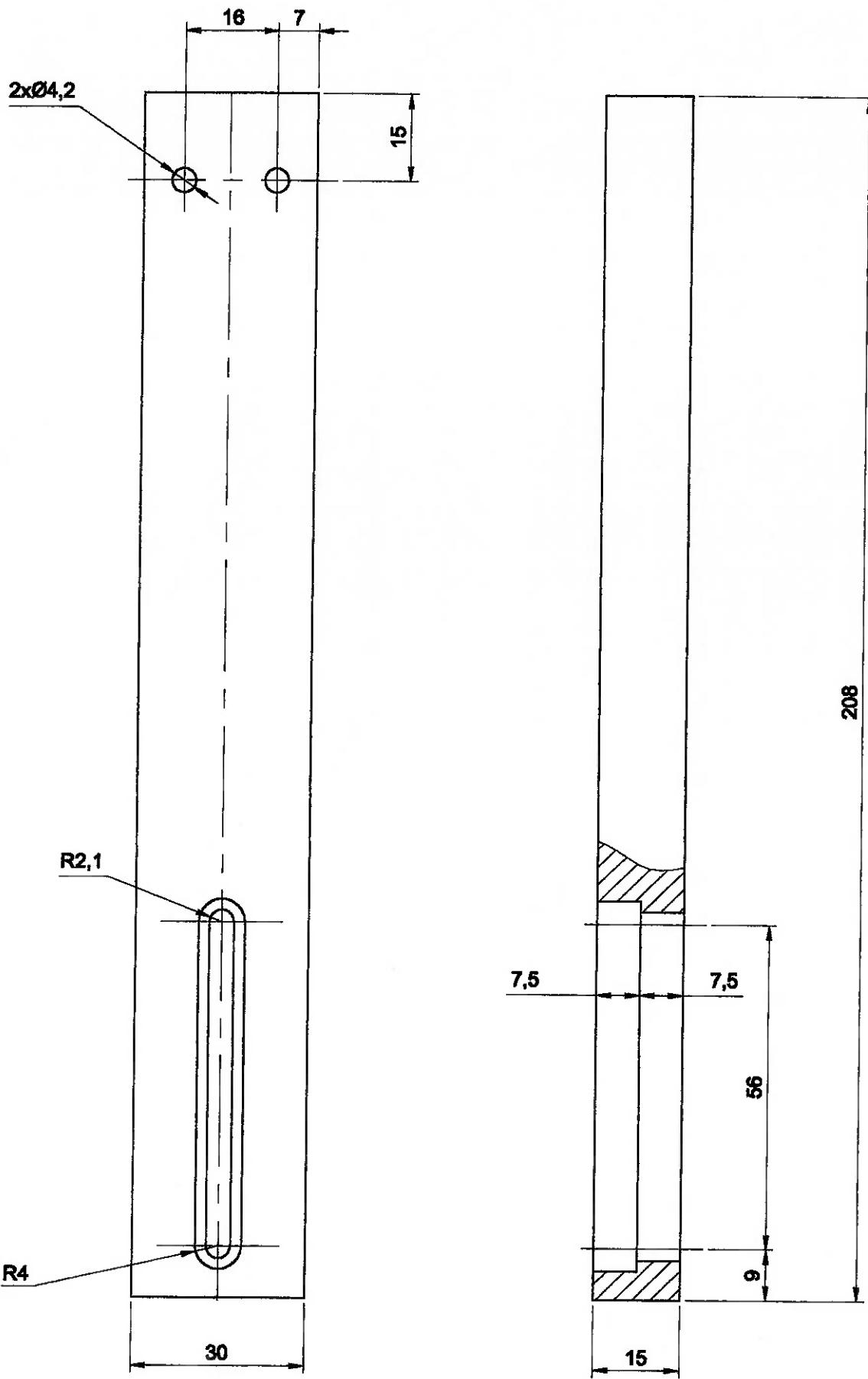
P.BEER, Ferdinand; JOHNSTON JR, E.Russell . **Resistência dos Materiais.** 2^{ed}. São Paulo: Makron, 1989.

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

13. ANEXOS

Anexo A: Desenho de Conjunto

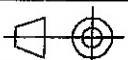
Anexo B: Desenhos de Construção



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

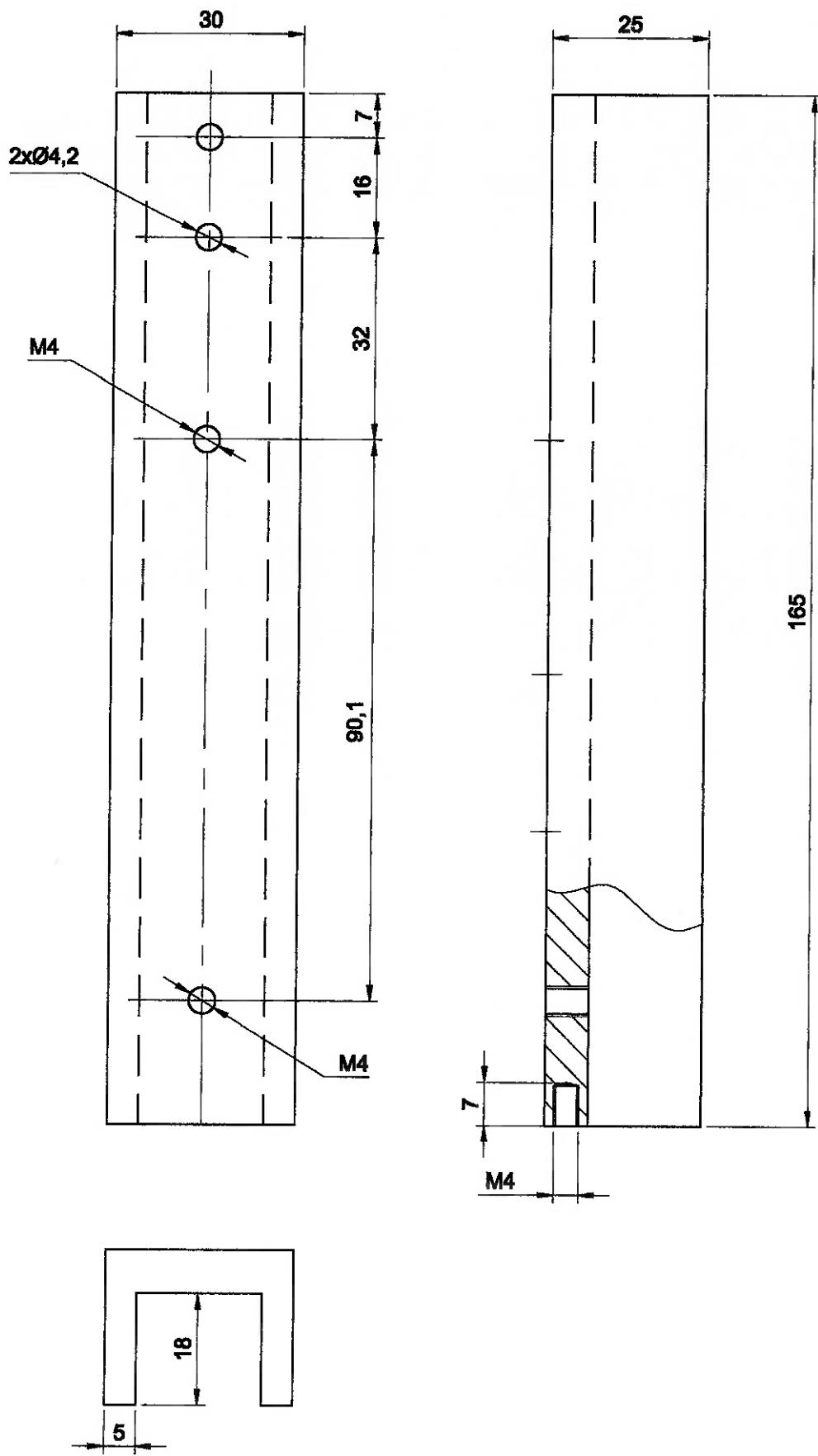


DESENHO: HASTE VERTICAL

DATA: 09/09/2002

PEÇA N°. 02

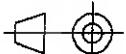
ALUMÍNIO



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

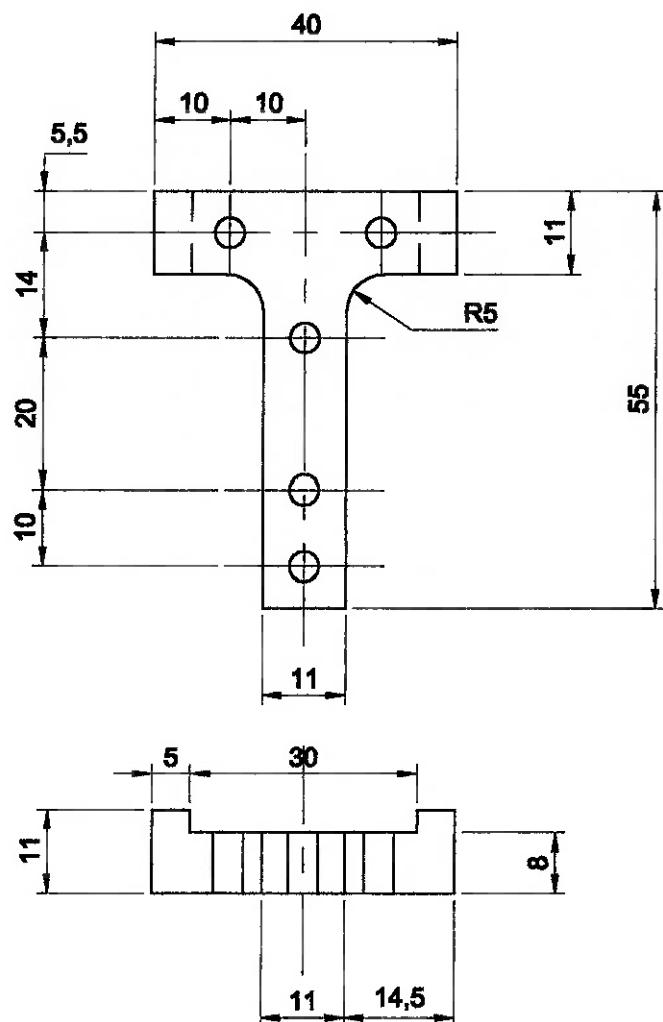


DESENHO: HASTE HORIZONTAL

DATA: 23/06/2002

PEÇA N°. 03

ALUMÍNIO

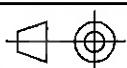


OBSERVAÇÃO:
FUROS: 5X M4

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

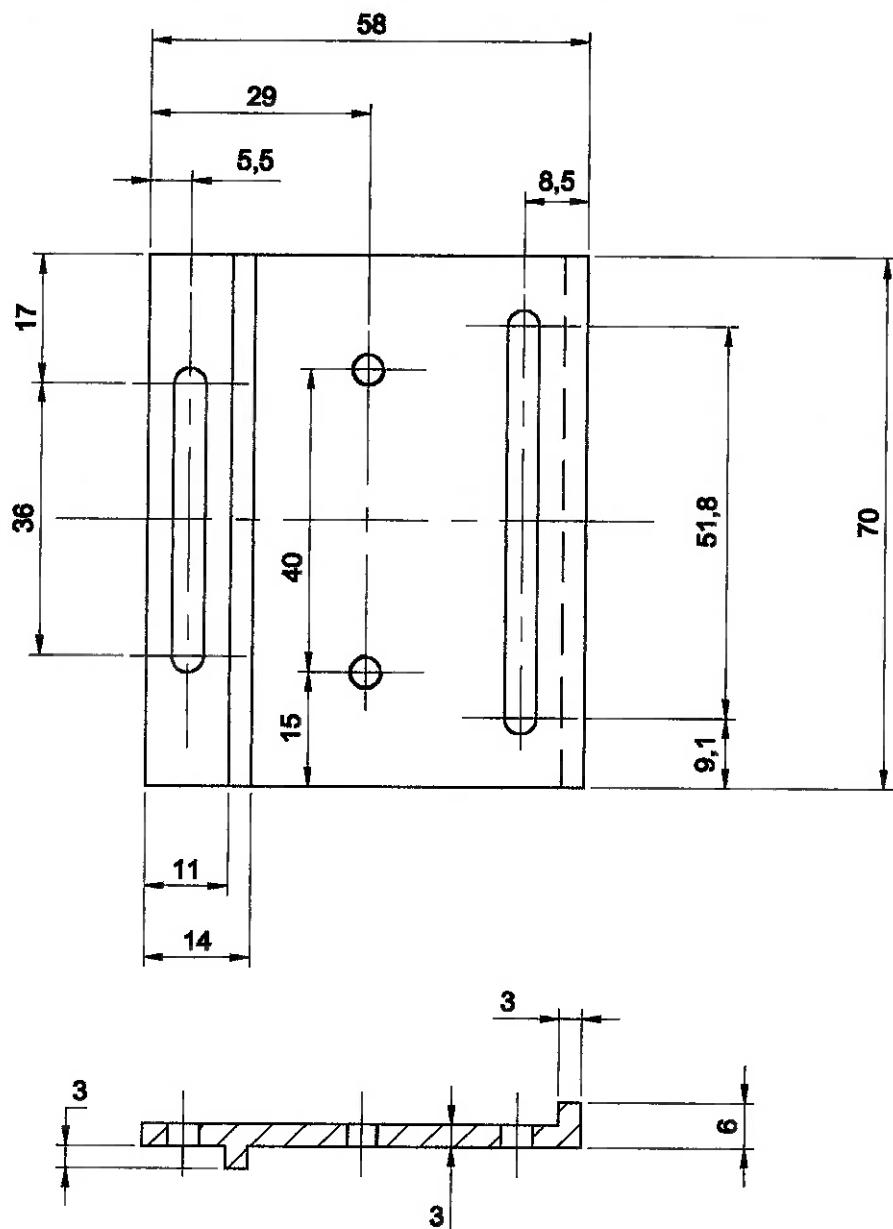


DESENHO: GUIA DO PORTA AMOSTRA

DATA: 23/06/2002

PEÇA N°. 04

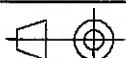
MAT. ALUMÍNIO



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

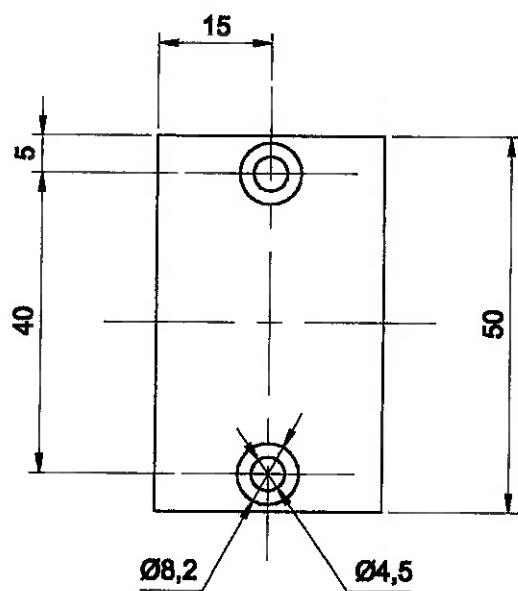
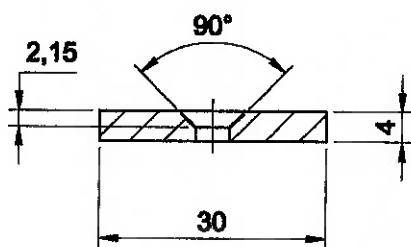


DESENHO: PORTA AMOSTRA

DATA: 23/06/2002

PEÇA N°. 05

MAT. ALUMÍNIO

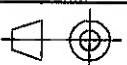


ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

DATA: 23/06/2002

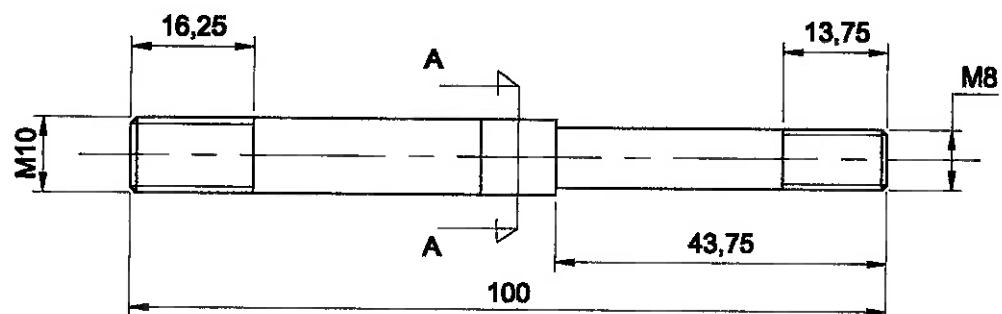
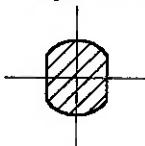


DESENHO: AMOSTRA

PEÇA N°. 06

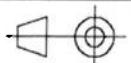
MAT. AÇO 1020

Seção A-A



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1



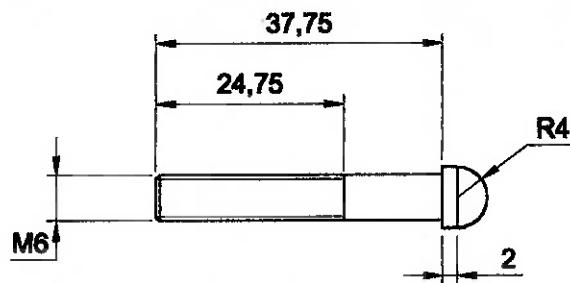
DESENHO: PINO DE CONEXÃO

DATA: 23/06/2002

PEÇA N°. 09

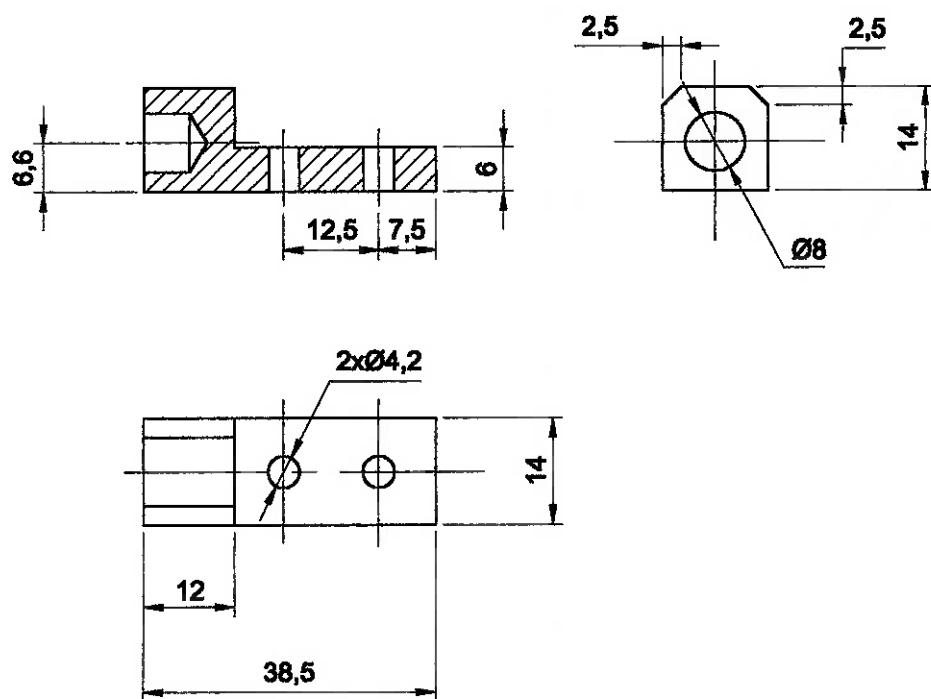
DES.N°. 01

PINO MÓVEL



PEÇA N°. 10

PINO TRAVA

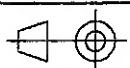


PEÇA N°. 11

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

ESCALA 1:1

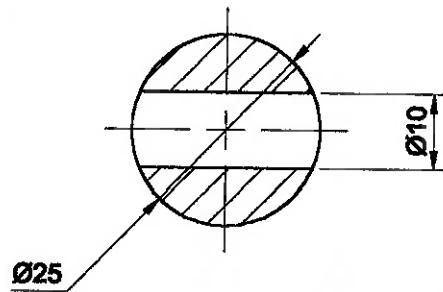


DESENHO: SIST. DE TRAVAMENTO HASTE

DATA: 23/06/2002

DES.N°. 01

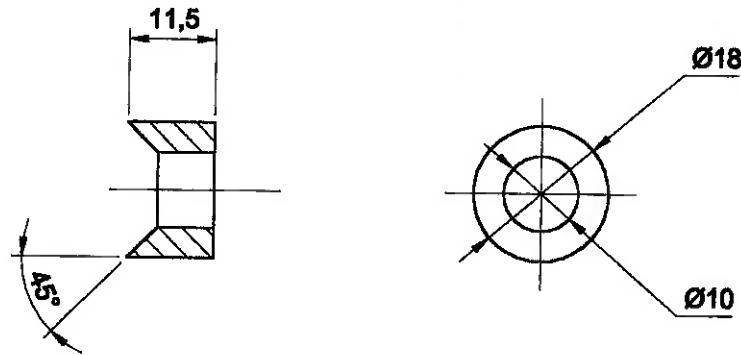
ESFERA DE ENSAIO



MATERIAL: AÇO AISI 52100
(AÇO P/ ROLAMENTO)

PEÇA N°. 14

BUCHA CENTRALIZADORA



MATERIAL: AÇO 1020

PEÇA N°. 24

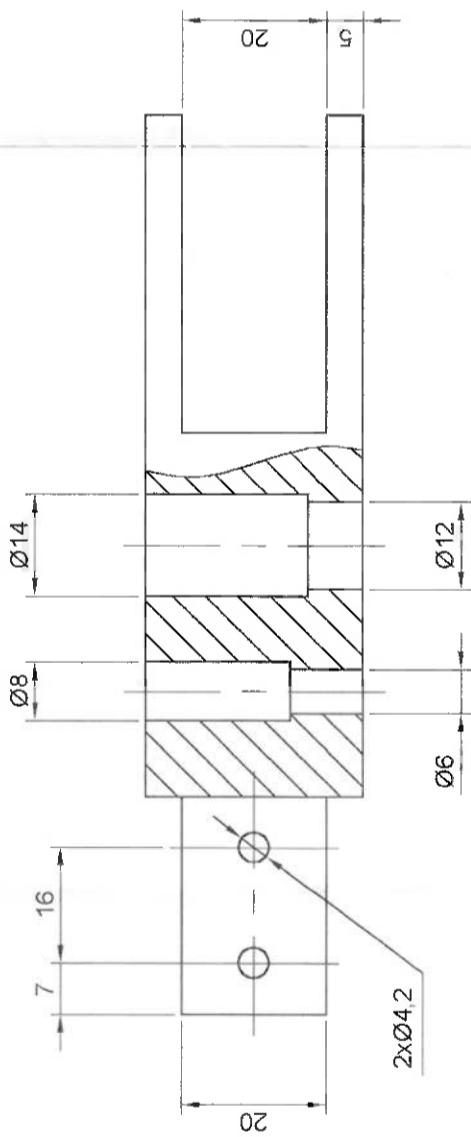
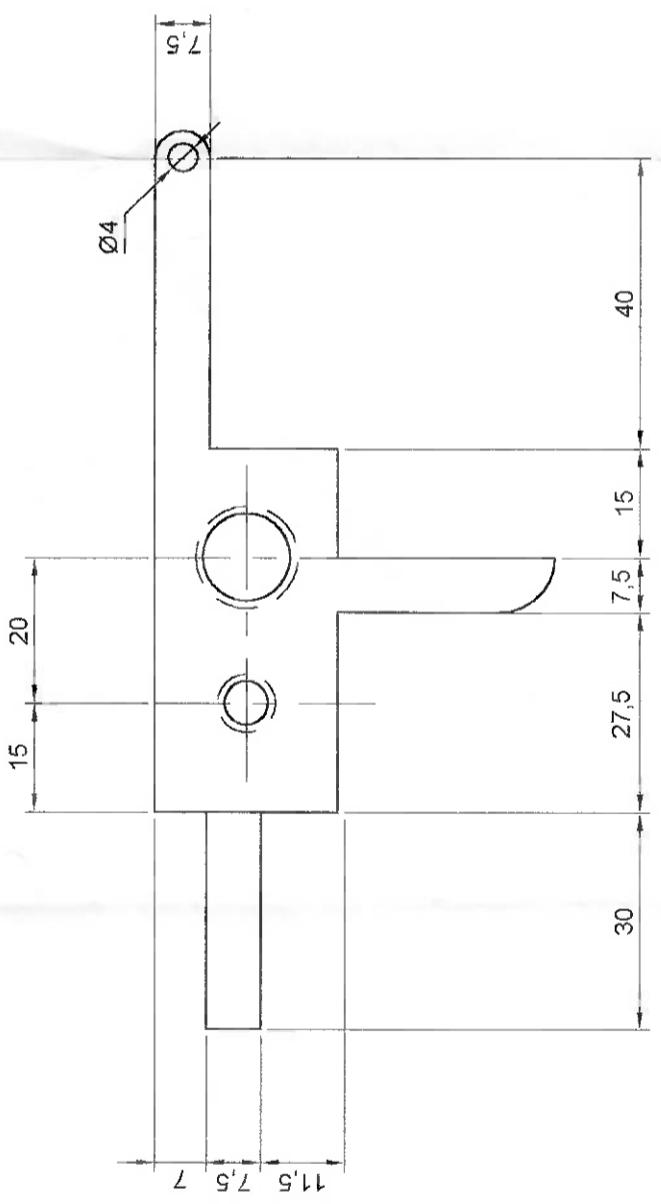
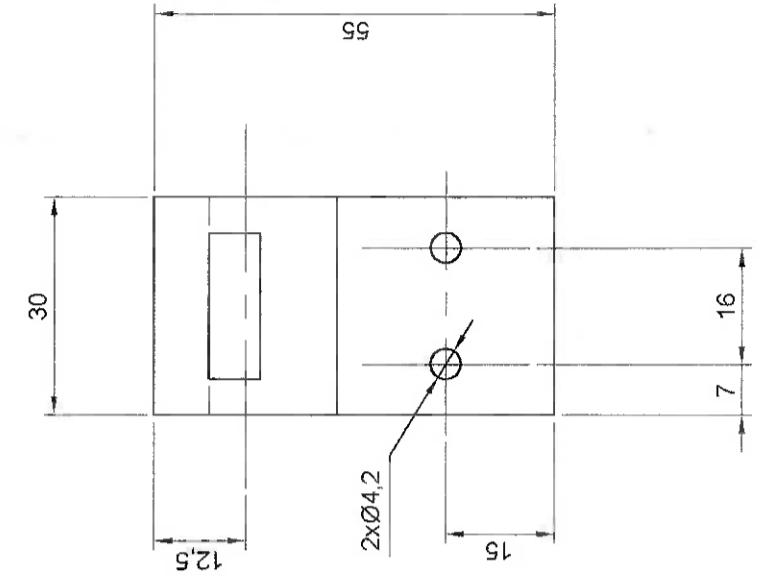
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO

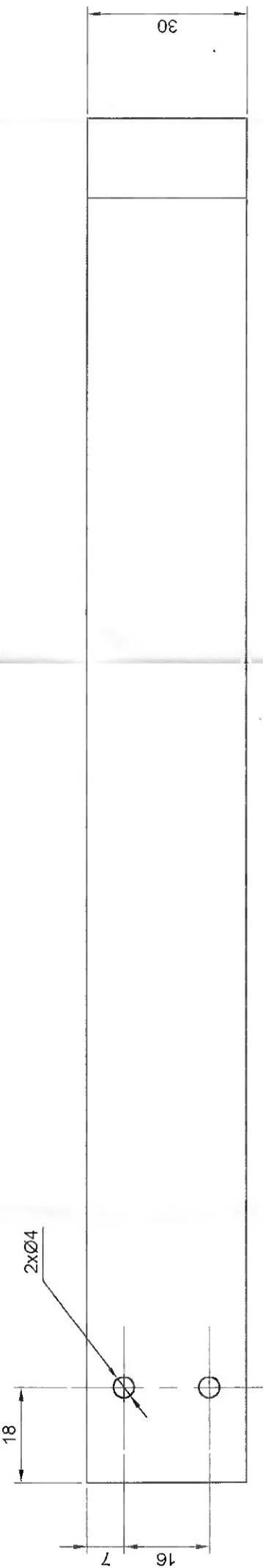
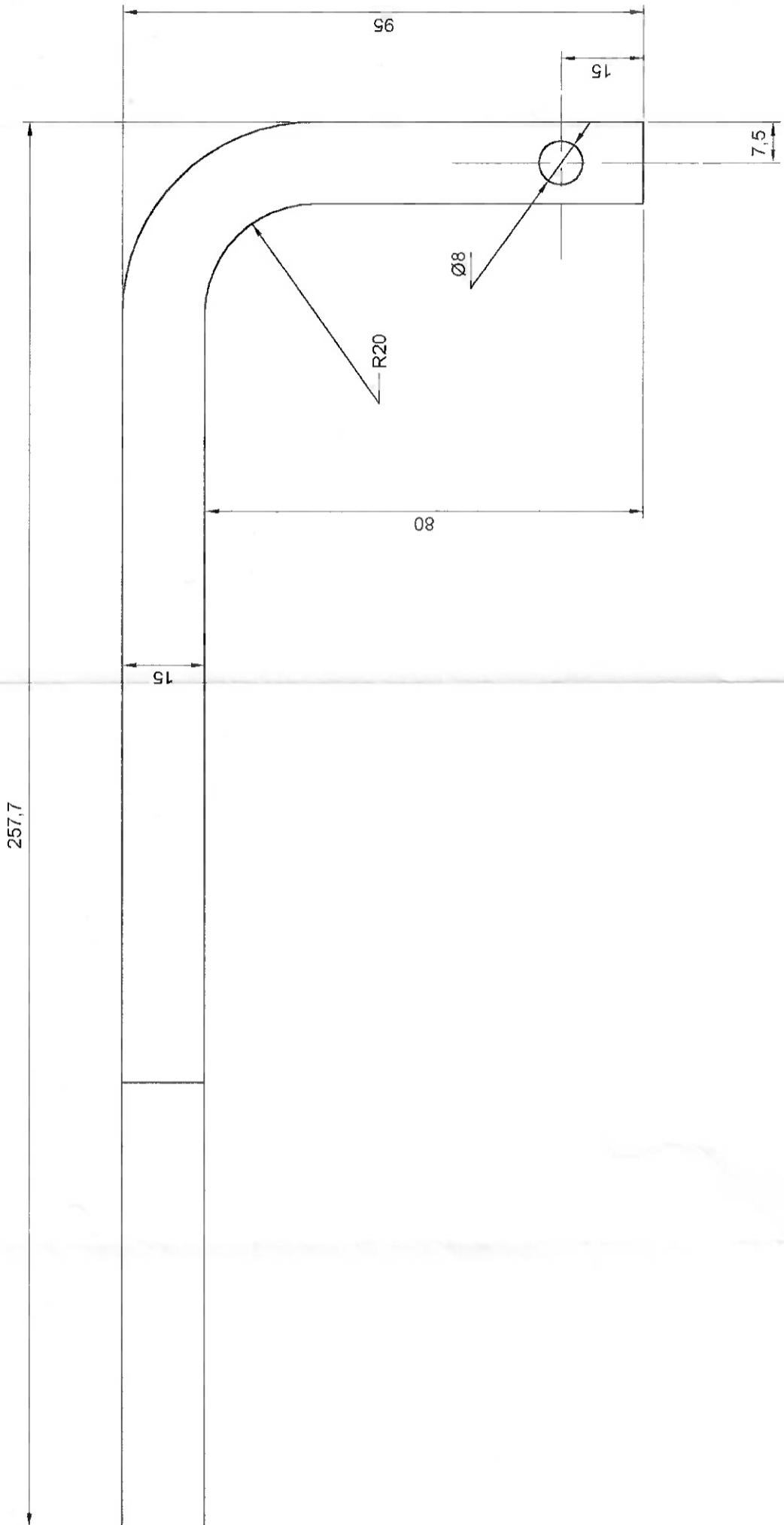


DESENHO: ESFERA DE ENSAIO E
BUCHA CENTRALIZADORA

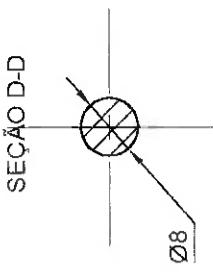
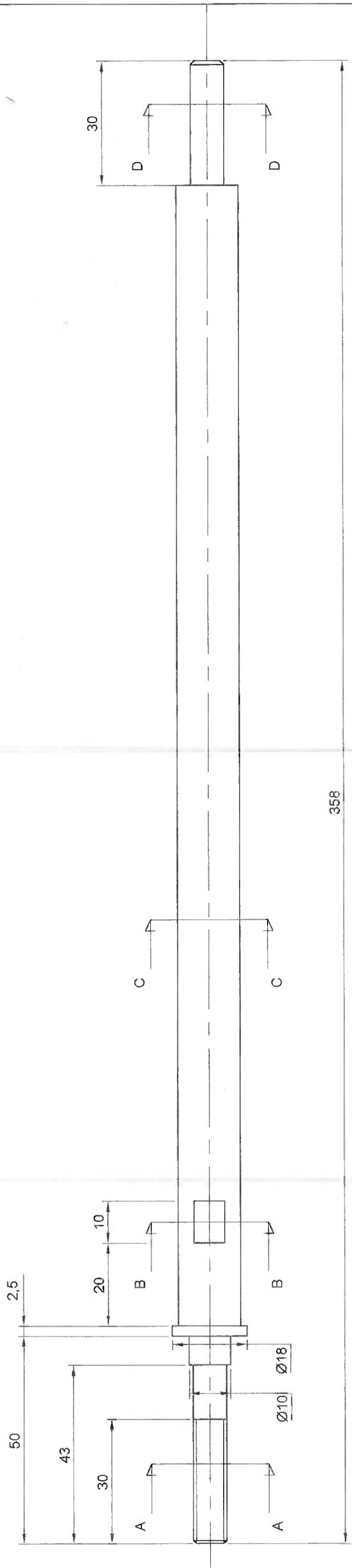
DATA: 30/09/2002



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

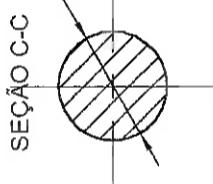


ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
PROJETO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	
ESCALA 1:1	DATA: 05/10/2002
	PEÇA N° 13
DESENHO: CONEXÃO COLUNA	MAT. ALUMÍNIO

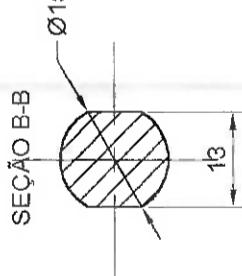


SECÃO D-D

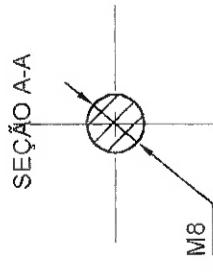
08



SEÇÃO C-C



SEÇÃO B-B



SEÇÃO A-A

TOLERÂNCIAS DO EXO

Dimensional: Classe h8

Circularidade: IT3 - IT4

Cilindrícidado: 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	DESENHO: EIXO
DATA: 01/11/2002	
PEÇA N°. 07	
MAT. AÇO 1020	