

Ian Faccio
Marcelo Koji Kawabata

MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE

90 (nove)
Ministro
Fazenda

Trabalho de graduação
apresentado á Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para conclusão do
curso de Engenharia Mecânica

Área: Projeto e Fabricação

Orientadores:

Prof. Dr. Amilton Sinatora
Prof. Dr. Deniol Tanaka

OK RZ

São Paulo –1998

Agradecimentos

Ao orientador Prof. Dr. Amilton Sinatra e Prof. Dr. Deniol K. Tanaka pelo apoio e incentivo durante todo o projeto.

Ao Prof. Dr. Telésforo Medeiros e Marcia Marie Maru pelo auxílio e orientação neste trabalho.

Aos colegas de turma Marcelo Luís Roma e Varidots D.T. MeKss pelo apoio logístico.

A todos aqueles que direta ou indiretamente, colaboraram para a realização desse trabalho.

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto e fabricação de uma máquina para ensaios de desgaste em materiais imersos em meio polimérico, especificamente para materiais utilizados em componentes de injetoras de polímeros, como os furos.

Os ensaios padronizados por norma não levam em conta o meio polimérico, mesmo assim decidiu-se adotar algumas características dimensionais normalizadas.

O dimensionamento dos principais componentes da máquina foram feitos na forma literal em função das características do material utilizado no ensaio, a partir disso é possível projetar o conjunto de componentes que minimiza os custos de fabricação dependendo dos materiais ensaiados.

O trabalho está dividido em três partes o Estudo de Viabilidade, o Projeto Básico e o Projeto Executivo.

ÍNDICE

Parte 1 - ESTUDO DE VIABILIDADE	6
1.1 Estabelecimento da Necessidade	6
1.2 - Formulação do Projeto	8
1.2.1 - Métodos de Ensaios	8
1.2.2 - Teoria do Desgaste	8
1.2.3 - Variáveis a Serem Consideradas	8
1.2.4 - Desgaste na injeção	9
1.2.5 - Especificações Técnicas	10
1.3 - Síntese de Soluções	12
1.3.1 - Esquemas Construtivos	14
1.4 - Exequibilidade Física	16
1.5 - Valor Econômico e Viabilidade Financeira	17
1.6 - Conclusão do Estudo de Viabilidade	17
Parte 2 - PROJETO BÁSICO	18
2.1 - A escolha da melhor solução	18
2.2 - Detalhamento do projeto	18
2.2.1 - Determinação da força de contato	19
2.2.3 - Projeto do eixo do corpo-de-prova	20
2.2.4 - Projeto da estrutura do garfo	21
2.2.5 - Seleção do rolamento do corpo-de-prova	22
2.2.6 - Seleção do motor	23
2.2.7 - Projeto do eixo de saída	23
2.2.7 - Seleção do acoplamento	24
2.2.8 - Seleção de escovas	24
2.2.9 - Corpo-de-provas e contracorpo	25
2.2.10 - Especificação do Isolamento	26
2.3 - Análise de sensibilidade	26

2.4 - Análise de compatibilidade	26
2.5 - Análise de estabilidade	27
2.6 - Otimização Formal	29
Parte 3 - Projeto Executivo	30
3.1 - Modelo Funcional	30
3.2 - Conclusões	32
Referências Bibliográficas	33
Apêndice	34

Parte 1 - ESTUDO DE VIABILIDADE

1.1 Estabelecimento da Necessidade

O desenvolvimento das ligas fundidas para ferramentas de transformação mecânica ocorreu contemporaneamente ao desenvolvimento do metal duro. Com o passar do tempo, as ferramentas de metal duro passaram a ser mais utilizadas do que as de ligas fundidas, principalmente em usinagem, devido ao baixo custo e facilidade de fabricação.

Entretanto, com a utilização de novas técnicas de fundição de precisão, e novas tecnologia, como a de prototipagem rápida, ferramentas de ligas fundidas podem se tornar viáveis em diversas aplicações de construção mecânica, como por exemplo o fuso de máquinas injetoras de plástico.

Assim, para se estudar o comportamento de tais materiais sob as condições a que são submetidos, necessita-se de máquinas para simular tais condições. Seguindo tal necessidade, o objetivo é projetar e construir uma máquina para ensaio de desgaste de materiais utilizados na fabricação dos componentes das injetoras que entram em contato com o material polimérico, fornecendo como resultado a taxa de desgaste para os diferentes esforços e meios abrasivos submetidos na operação.

Deste modo além de se criarem meios para se determinarem com maior precisão as características das novas ligas fundidas que virão a ser desenvolvidas, pode-se também determinar taxas de desgaste para diferentes materiais utilizados na fabricação do fuso, que podem ajudar no dimensionamento, da determinação da vida útil e de outros parâmetros.

Com maiores dados acerca dos materiais utilizados na fabricação destas peças, o tempo gasto na manutenção das injetoras seria reduzido, devido a melhor adequação das peças aos materiais injetados e condições de operação. Além disso tais informações possibilitariam maior eficiência em manutenções preventivas.

Como a utilização de polímeros na indústria em geral é sempre crescente, esta máquina teria bastante aplicação também em análises de segurança de elementos de máquinas, comparações com materiais de peças similares, além de contribuir para o desenvolvimento de novos materiais.

Também, ao se difundir as informações obtidas a partir desta máquina, novas normas e parâmetros seriam estabelecidos e conduzir-se-iam melhores condições comerciais.

Portanto, existe a necessidade de tal máquina. Ela deverá ser construída inicialmente como protótipo e após testes preliminares será modificada para melhor atender as exigências. Ao final da construção será utilizada para pesquisas e estudos no Departamento de Engenharia Mecânica em conjunto ao Instituto de Pesquisa Tecnológicas.

1.2 - Formulação do Projeto

No início foram discutidos diversos modelos de desgaste possíveis, bem como os ensaios plausíveis para simulá-los. Em seguida, foi feita pesquisa sobre a literatura dos assuntos em questão. Combinando as técnicas e os conceitos relevantes, determinaram-se as variáveis a serem consideradas e por fim, estipulou-se as especificações técnicas mínimas para o desenvolvimento do projeto.

1.2.1 - Métodos de Ensaios

Os ensaios de desgaste são utilizados para analisar os mecanismos presentes durante o fenômeno de desgaste, para simular aplicações práticas e fornecer dados úteis para projetos, como coeficiente de atrito e taxa de desgaste ⁽²⁾. Neste estudo interessa obter dados sobre desgaste em meio abrasivo; ou seja; o fenômeno ocorrerá em meio polimérico com partículas abrasivas contidas nele.

As dimensões dos corpo-de-provas variam de milímetros a dezenas de milímetros para pinos, e os são normalmente da ordem de dezenas de milímetros de diâmetro. As cargas variam desde frações de Newtons até kiloNewtons. E as velocidades de ensaio são aproximadamente podem variar entre milímetros ou até metros por segundo.

1.2.2 - Teoria do Desgaste

Define-se desgaste como um fenômeno superficial que consiste na deterioração mecânica gradual das superfícies em contato (com aplicação de carga normal e apresentando movimento relativo entre si), mediante o arrancamento de partículas, ocorrendo, portanto, perda de massa das partes envolvidas ⁽⁵⁾.

O contato entre duas superfícies ocorre onde as asperezas se tocam, ou seja, a área de contato é igual à soma das áreas de contato das asperezas individuais. Esta área é proporcional à carga normal, e nos metais, adota-se que a deformação das

asperezas é plástica. O movimento relativo contínuo proporciona uma formação e destruição contínua dos contatos das asperezas individuais. Portanto, o desgaste por deslizamento é associado ao destaque de fragmentos de material das asperezas ⁽²⁾.

O desgaste apresentado pelo fuso da rosca injetora, em meio polimérico, não é do tipo deslizante apenas, pois o material polimérico utilizado na injeção, apresenta partículas abrasivas em sua composição. O desgaste do fuso tem um componente de abrasão.

1.2.3 - Variáveis a Serem Consideradas

As variáveis que afetam o desgaste e que devem ser controladas no ensaio, compreendem a velocidade, a carga aplicada, a velocidade de deslizamento, a pressão de contato, ao tempo de ensaio, a temperatura e umidade, à composição atmosférica , à dureza, às rugosidades superficiais ao módulo de Young e disposição do material desgastado ⁽²⁾.

O desgaste depende da pressão de contato entre as superfícies. Ela depende da relação entre a área de contato e a força normal, pois quanto maior a força de contato maior é a deformação na interface e consequentemente maior a área de contato, alterando a pressão entre as superfícies.

As condições do desgaste por deslizamento dependem também da velocidade de deslizamento e duração do ensaio. A velocidade de deslizamento afeta a taxa de dissipação de energia de atrito, e consequentemente a temperatura na região de contato. Entretanto, especificando-se velocidades baixas, em regime permanente, a taxa será constante. Nesse caso, o tempo de ensaio é importante, embora não tenha nenhuma relação de dependência direta. Isto é não se pode afirmar que um ensaio produzirá os mesmos resultados de outro com a metade do tempo de duração e o dobro da velocidade de deslizamento. Pois podem ocorrer transições abruptas no mecanismo de desgaste e na taxa quando a velocidade é alterada.

A influência da temperatura é importante , pois altera as propriedades mecânicas dos materiais afetados, bem como a viscosidade do meio envolvente, no caso material polimérico a alta temperatura.

É muito importante a influência da composição atmosférica porque componentes reativos como o vapor d'água e oxigênio influenciam no mecanismo de desgaste. Os "debris" do material desgastado também devem ser levados em consideração, pois diferentes resultados são alcançados dependendo da disposição desse material, que pode cair na área de contato ou não, e pode ficar retido no contracorpo.

1.2.4 - Desgaste na injeção

Atualmente a injeção do material polimérico é feita através de um fuso, mostrado na figura xxxx. A matéria prima granulada ou em pó é colocada na câmara de injeção, e é comprimida pela movimentação do fuso. Gradualmente, o material polimérico é fundido e homogeneizado, estando o meio sob pressão. Após a completa homogeneização, observa-se um movimento relativo entre o fuso e o material polimérico fundido.

O desgaste no fuso impossibilita a movimentação do material polimérico para frente, pois permite a movimentação do material no sentido inverso a orientação do fuso. Isso caracteriza a necessidade de recuperação do fuso.

Desse modo, a máquina a ser construída pretende simular essa situação para de desgaste para obter parâmetros confiáveis no projeto da produção e manutenção desses fusos.

1.2.5 - Especificações Técnicas

Antes se iniciar o estudo de soluções é necessário que o problema de engenharia do projeto esteja totalmente identificado e formulado. Por isso foi feito um levantamento dos principais requisitos necessários à máquina em estudo.

1.2.5.1 - Requisitos Funcionais

- **Desempenho:** Assegurar o desgaste contínuo entre três corpos (corpo de prova, contracorpo e polímero derretido), de modo representativo da situação real de injeção. A máquina deverá ainda permitir variações em alguns dos parâmetros de ensaio, tais como força aplicada e tempo de ensaio.
- **Conforto:** Simplicidade no método de troca de corpos de prova, na mudança dos parâmetros de ensaio (força, velocidade, tempo) e facilidade para limpeza e manutenção.
- **Segurança:** Instalação de proteções no equipamento contra possíveis acidentes de operação tais como: isolamento térmico no recipiente de contenção do polímero, proteção das partes móveis e sinalizações preventivas.

1.2.5.2 - Requisitos Operacionais

- **Reprodutibilidade:** A máquina deverá fornecer as condições necessárias para reproduzir o mesmo ensaio com medidas aceitáveis de dispersão de parâmetros.
- **Confiabilidade:** Os ensaios a serem efetuados devem garantir que o modelo estipulado está sendo ensaiado, tendo em vista que todas as condições requeridas para tal ensaio estão presentes. Os dados fornecidos a partir destes ensaios devem ter uma utilidade que permita comparações e conclusões posteriores.
- **Durabilidade:** A vida útil dos componentes principais deve ser superior a 5 anos em regime de trabalho constante. A durabilidade dos componentes não poderá ser menor que o tempo de ensaio, e preferencialmente, bem acima deste.

1.2.5.3 - Requisitos Construtivos

- **Dimensões:** A máquina deverá ser a menor possível, contanto que isso não sacrifique nenhuma de suas características.

- Isolamento: Durante o ensaio, o equipamento deve minimizar as influências prejudiciais ao sistema, tais como vibrações e atmosferas nocivas.
- Massa: O equipamento completo não deverá ultrapassar 500kg de massa.

1.3 - Síntese de Soluções

A partir da formulação das especificações, será necessário conceber, inventar e sintetizar soluções concretas dos sistemas que serão o produto final do projeto. Nesta etapa os elementos que compõem as soluções serão caracterizados apenas pelas suas funções, ficando para as fases seguintes a sua definição completa.

Através de reuniões semanais com os orientadores, as soluções foram obtidas. Primeiramente são apresentadas as entradas e saídas desejadas para o projeto e depois as alternativas sintetizadas para as principais partes ou componentes da máquina.

Tabela 1 - Tabela com entradas/saídas para a formulação de idéia

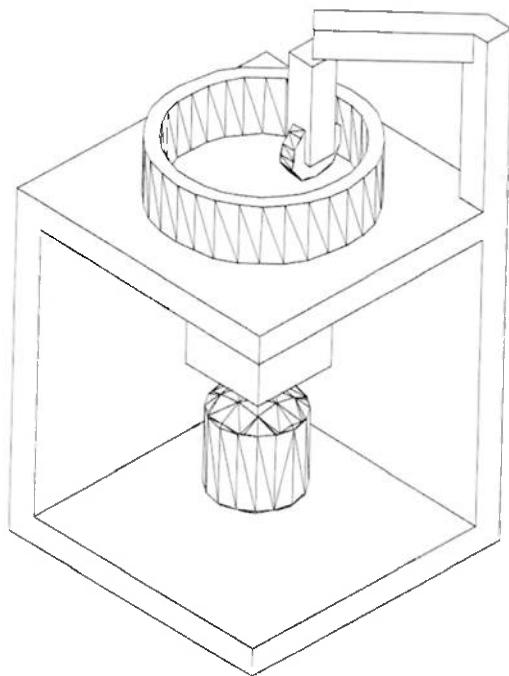
	ENTRADAS	SAÍDAS
DESEJÁVEIS	<ul style="list-style-type: none"> • Material abrasivo entre o corpo-de-prova e o contracorpo; • Controle sobre a fluidez do polímero; • Parâmetros em geral (cargas, velocidades) aplicados dentro do estipulado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliar material ensaiado; • Avaliar abrasividade do polímero; • Obter influência dos parâmetros de ensaio.
INDESEJÁVEIS	<ul style="list-style-type: none"> • Ocorrência de desgaste adesivo e por deslizamento; • Polímero parcialmente derretido, ou sem as características iniciais devido a instabilidade (derretido por muito tempo); • Parâmetros fora do estipulado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resultados fornecidos pelo ensaio não coerentes; • A máquina permanece íntegra; • Possível ruído.

Tabela 2 - Tabela de Idéias

Função	A	B	C
Aquecimento	Resistências elétricas	Indução eletromagnética	Maçarico
Movimento do corpo-de-provas	Corpo de prova e contracorpo móveis	Corpo de prova fixo e contracorpo móvel	Corpo de prova móvel e contracorpo fixo
Acionamento do sistema	Motor elétrico com acoplamento por eixo	Motor elétrico com acoplamento por polias	Motor elétrico com acoplamento por engrenagens
Método de ensaio	Pino contra plano	Disco contra plano	Disco contra disco
Fixação do corpo-de-prova e do contracorpo	Parafuso e porca	Encaixe	Magnética
Aplicação da carga normal	Massa	Mola	Pistão

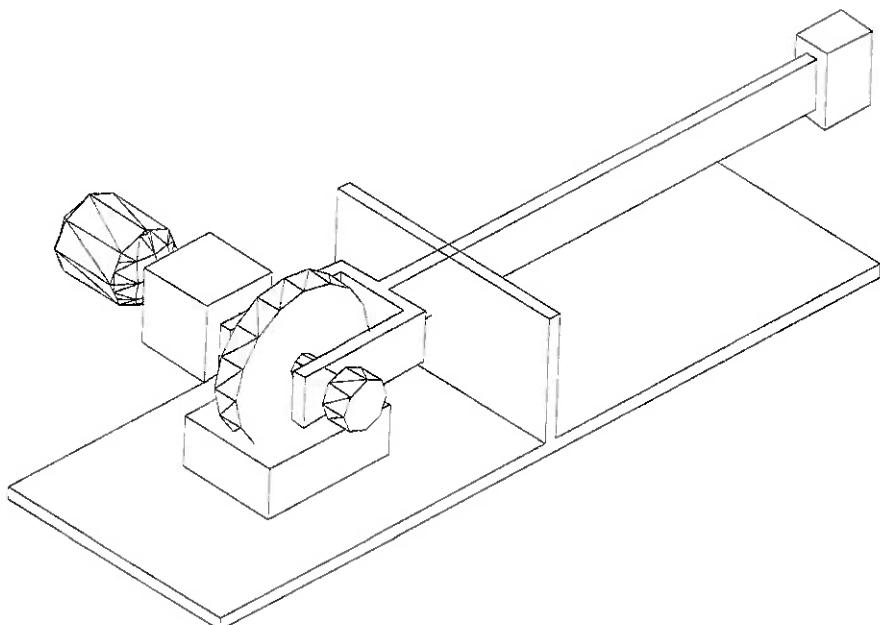
1.3.1 - Esquemas Construtivos

a) Máquina “Tabor”;



Esta concepção é denominada “Tabor” por se assemelhar a uma máquina deste fabricante, utilizada para medição de desgaste abrasivo. Trata-se de um recipiente de formato cilíndrico, contendo o polímero fundido, com um contracorpo em forma de um rolo disposto em contato com o fundo do recipiente. Ao girar o recipiente, o contracorpo é colocado de tal maneira que o arraste proporciona tanto a rotação do contracorpo em seu próprio eixo, bem como um atrito entre três corpos: o fundo do recipiente (corpo de prova), o rolo (contracorpo) e o polímero fundido.

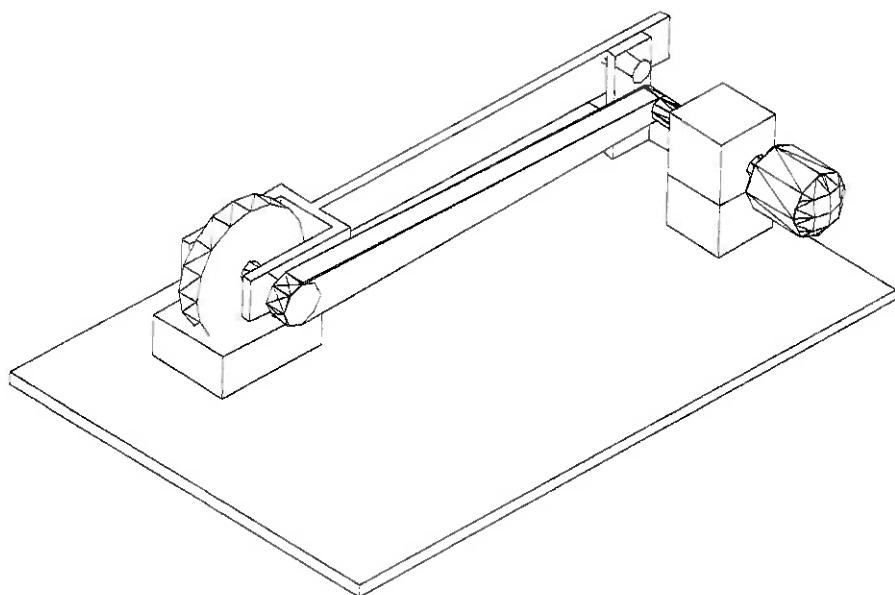
b) Máquina de braço móvel;



A máquina acima funciona segundo um motor acoplado diretamente ao contracorpo, utilizando-se um braço com contrapeso para balanceamento e aplicação das cargas. O polímero fundido encontra-se em um recipiente aquecido e somente o contracorpo se movimenta.

É uma máquina bastante simples, e ainda interessante quando observado que através do desbalanceamento se aplica a carga desejada sobre o sistema.

c) Máquina de braço com polias.



A máquina no caso é semelhante à anterior, com a mudança de se utilizar polias para o acionamento do contracorpo ao invés de diretamente do conjunto motor-redutor. Ambas as versões são simples de fabricação e atendem os requisitos principais de ensaio.

1.4 - Exeqüibilidade Física

De acordo com as soluções apresentadas, todos os sistemas construtivos são exeqüíveis. Toda a estrutura da máquina pode ser obtida através de fundição. Peças pequenas e de maior grau de acabamento poder ser usinadas (eixos, assentos de

mancais, furos para fixação) ou retificadas (contatos para desgaste, flanges, ajustes precisos).

Equipamentos normalizados ou comercialmente abundantes, tais como parafusos, motores elétricos, redutores, rolamentos, variadores de freqüência, podem ser encontrados no mercado.

Tratamentos superficiais para os materiais utilizados, por exemplo têmpera ou nitretação, podem ser aplicados conforme a necessidade e a disponibilidade do processo.

1.5 - Valor Econômico e Viabilidade Financeira

Conforme demonstrado no estabelecimento da necessidade, e considerando que todas as soluções são exeqüíveis, a máquina a ser construída tem valor econômico.

Contando com subsídios de empresas e a facilidade de obtenção de componentes de segunda mão, a execução deste projeto é totalmente viável. Além disso, pode-se utilizar alguns componentes ou máquinas dispostas para reaproveitamento no laboratório, baixando assim o custo total.

1.6 - Conclusão do Estudo de Viabilidade

Ao final deste estudo de viabilidade, encontraram-se três soluções viáveis para o projeto. Resta determinar o encaminhamento ideal a ser adotado, escolhendo-se a alternativa que melhor se adequar as especificações do projeto.

Parte 2 - PROJETO BÁSICO

A etapa básica preliminar visa estabelecer a concepção global do projeto que servirá de base à fase executiva. A metodologia adotada foi retirada da apostila da disciplina PMC 475 – Metodologia do Projeto.

2.1 - A escolha da melhor solução

Entre as soluções resultantes do Estudo de Viabilidade, foi escolhida a melhor solução. Os critérios de seleção receberam pesos, de acordo com o grau de importância na máquina. A pontuação está na tabela a seguir.

Tabela 3 – Matriz de decisão

Característica	Peso	Esquema A	Esquema B	Esquema C
Desempenho	10	8/80	6/60	4/40
Conforto	7	5/35	7/49	6/42
Segurança	10	6/60	5/50	4/40
Confiabilidade	9	8/72	7/63	6/36
Durabilidade	8	7/56	6/48	5/40
Massa	4	5/20	8/32	7/28
Dimensões	6	6/36	8/48	8/48
Isolamento	5	9/54	7/35	6/30
Custo	8	5/40	8/64	7/56
Total		503	449	362

2.2 - Detalhamento do projeto

A partir do projeto executivo escolhido, os componentes serão dimensionados ou especificados. O dimensionamento dos componentes foi feito de forma genérica, isto é, através de fórmulas literais. Assim de acordo com os materiais ensaiados, pode-se construir uma máquina mais compatível com sua utilização. Essas fórmulas encontram-se em uma planilha de cálculo em Excel no apêndice. Desse modo as

principais dimensões da máquina são facilmente obtidos para qualquer tipo de material ensaiado.

2.2.1 - Determinação da força de contato

A determinação da força de contato entre dois ou mais corpos é o primeiro passo para o dimensionamento da máquina, pois essa força rege todo o comportamento do desgaste, e portanto os principais parâmetros construtivos.

Foi feito um estudo para delimitar a faixa de máxima força de ensaio para os possíveis materiais do experimento. Com isso pretende-se minimizar o massa do cabeçote, diminuindo também a força mínima de ensaio.

O modelo adotado para representar a força de contato durante o ensaio foi o de cilindro contra cilindro ⁽²⁾.

O fator Δ relaciona geometria e propriedades elásticas do corpo-de-provas e do contracorpo. O índice 1 refere-se ao corpo-de-provas e o 2 ao contracorpo.

$$\Delta = \frac{1}{(1/2.R_1) + (1/2.R_2)} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)$$

A variável b relaciona Δ com a carga aplicada.

$$b = \sqrt{2.q.\Delta / \pi}$$

A tensão máxima de cisalhamento é dada pela seguinte fórmula.

$$\tau_{MAX} = 0,3.b / \Delta$$

O índice 1 refere-se aos dados do corpo-de-prova, e o 2 do contracorpo, sendo:

q : carga distribuída sobre o corpo-de-prova (N/m)

R : raios do cilindros no modelo (m)

μ : coeficiente de Poisson

E : módulo de Young (Pa)

τ_{MAX} : tensão máxima de cisalhamento do corpo-de-prova (Pa)

Como $R_2 = \infty$ (plano) e isolando a carga distribuída, as relações resultam:

$$q = \frac{\pi \cdot (\tau_{MAX})^2}{0,18} \left[\frac{1}{(1/2.R_1)} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \right]$$

Ou utilizando Δ , temos:

$$q = \frac{\pi \cdot (\tau_{MAX})^2 \Delta}{0,18}$$

Uma vez que a força aplicada no corpo-de-prova é a carga distribuída vezes a largura do corpo-de-prova (h), a relação final fica:

$$F = q \cdot h$$

2.2.3 - Projeto do eixo do corpo-de-prova

Sobre o eixo do corpo-de-prova, este estará sujeito a força de contato propriamente dita e as reações dos mancais ⁽⁷⁾ (vide desenho do garfo no apêndice).

$$d_{EIXO} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot F \cdot \ell_{EIXO}}{4 \cdot \pi \cdot \tau_{ADM}}}$$

Sendo:

d_{EIXO} : diâmetro do eixo do corpo-de-prova (m)

F : força de contato (N)

ℓ_{EIXO} : comprimento do eixo (m)

τ_{ADM} : tensão admissível de cisalhamento do eixo (Pa)

2.2.4 - Projeto da estrutura do garfo

Foi adotada uma secção quadrada e cheia, as fórmulas são simples. Mas poderia ser utilizada uma secção vazada para reduzir a massa, nesse caso as fórmulas utilizadas seriam as seguintes.

O momento de inércia da barra (vazada) é dado por:

$$J = \frac{b \cdot h^3 - b_i \cdot h_i^3}{12}$$

Sendo:

b: largura da barra (m)

h: altura da barra (m)

b_i: largura do espaço interno da barra (m)

h_i: altura do espaço interno da barra (m)

Utilizando uma barra de espessura constante (e):

$$\begin{aligned} b_i &= b - 2e \\ h_i &= h - 2e \end{aligned}$$

O momento de inércia particular fica:

$$J = \frac{b \cdot h^3 - (b - 2e) \cdot (h - 2e)^3}{12}$$

Cálculo de solicitação por flambagem ⁽⁷⁾:

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{S_K^2 \cdot C}$$

Sendo:

F_K: força máxima para que não ocorra flambagem (N)

E: módulo de Elasticidade do material do garfo (Pa)

J: momento de inércia da seção vazada (m^4)

S_k : comprimento equivalente de flambagem (m)

C: coeficiente de segurança

Cálculo da secção crítica por cisalhamento ⁽⁷⁾:

$$\sigma_{MAX} = 6 \left[\frac{F \cdot \ell}{b \cdot h^3 - (b - 2e) \cdot (h - 2e)^3} \right]$$

2.2.5 - Seleção do rolamento do corpo-de-prova

Uma vez que esta máquina deve realizar ensaios a baixas rotações, o problema de vida útil de mancais, bem como desgaste por fadiga podem ser desconsiderados.

Devido ao ambiente poluído, adotam-se rolamentos com blindagem dupla. Pela carga aplicada, simplicidade e preço, recomenda-se a utilização de rolamentos simples de uma carreira de esfera.

Para se selecionar tal rolamento, a partir de catálogo de fabricante⁽⁶⁾, acompanha-se o seguinte procedimento:

1. Escolhe-se um rolamento que suporte a carga radial de metade da força de contato ($F/2$) estática e dinamicamente;
2. Além disto, verifica-se o diâmetro interno do rolamento, que deverá ser ajustado ao diâmetro do eixo calculado (d_{EIXO});
3. Por fim, verifica-se o diâmetro externo do rolamento, que deve ser compatível com as dimensões do garfo.

Poderia ser adotado um rolamento autocompensador para facilitar a montagem, mas a rigidez seria prejudicada, o contato paralelo entre o corpo-de-prova e o contracorpo ficaria mais duvidoso e os custos seriam maiores.

2.2.6 - Seleção do motor

O motor utilizado nesta aplicação, deve, a princípio, aplicar ao recipiente contendo polímero, o mesmo torque e a mesma rotação aplicados nas condições reais de injeção na rosca injetora.

Entretanto, conforme o interesse de estudo, ou de modelagem do sistema, pode-se optar por um conjunto motor-redutor que aplique estas condições desejadas (rotação e torque maiores ou menores), ainda que diferentes do equipamento real.

Para o caso sugere-se um motor⁽¹⁾ de 0,55 kW com 1,1 rpm, com carga máxima de 51 kN. Isso é razoável, uma vez que as forças de atrito não ultrapassariam 10kN para o modelo adotado.

Em se desejando outros parâmetros de ensaio, pode-se escolher outro motor.

2.2.7 - Projeto do eixo de saída

O eixo⁽⁷⁾ de saída deve ser dimensionado pelo torque máximo que o motor possa aplicar, para não romper-se em casos de travamento, ou sobrecarga do motor.

Seguindo o mesmo critério do eixo do corpo-de-prova:

$$d_{EIXO} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot N_{MOTOR} \cdot \omega}{\pi \cdot \tau_{ADM}}}$$

Sendo:

d_{EIXO} : diâmetro do eixo de saída (m)

N_{MOTOR} : potência do motor selecionado (N)

ω : rotação máxima do motor (1/s)

τ_{ADM} : tensão admissível de cisalhamento do eixo (Pa)

2.2.7 - Seleção do acoplamento

O acoplamento deve, antes de tudo, deve minimizar as vibrações do motor no recipiente, para que estas tenham menor interferência no resultado do ensaio, e também permita que o motor não sofra sobrecargas no caso de algum travamento ocorrido por fatores não esperados durante o ensaio.

Sugere-se a utilização de um acoplamento flangeado (vide desenho de conjunto no apêndice), pois absorve energia decorrentes das vibrações, choques, permite pequenos desvios de alinhamento e resiste ao escorregamento nas condições do problema estudado.

2.2.8 - Seleção de escovas

O calor necessário para que o polímero atinja a temperatura de ensaio (polímero fundido como na máquina injetora) é dado por ⁽⁹⁾:

$$q_{\text{FUSÃO}} = m.c.\Delta\theta$$

Sendo:

$q_{\text{FUSÃO}}$: calor necessário para fundir o polímero (J)

m : massa de polímero (kg)

c : coeficiente de transferência de calor (J/kg.K)

$\Delta\theta$: variação de temperatura $\theta_{\text{FUSÃO}} - \theta_{\text{AMBIENTE}}$ (K)

Uma vez que o polímero atingiu a temperatura de ensaio, o calor necessário para manter este estado é estimado pela perda através da convecção ⁽⁹⁾ à temperatura ambiente:

$$q_{\text{PERDA}} = h.A.\Delta\theta$$

Sendo:

q_{PERDA} : calor necessário para manter o polímero fundido (W)

h: coeficiente de convecção (W/m².K)

A: área de troca de calor do recipiente (m²)

A temperatura na cuba será regulada através de um termostato. A potência fornecida pelas resistências deve ser suficiente para manter o polímero aquecido em torno de 200°C até quando as resistências estiverem desativadas e forem ligados quando chegarem à temperatura limite.

O tempo necessário para aquecer a cuba quando o termostato ativa as resistências pode ser estimado pelo método da Capacitância Global ⁽⁹⁾ na condução em regime transiente. Deve-se adotar um coeficiente de segurança devido as perdas por convecção nesse período e ao fato de que os aquecimento encontra-se apenas na parte inferior da cuba.

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \exp \left[- \left(\frac{h \cdot A_s}{\rho \cdot V} \right) t \right]$$

Sendo:

T: temperatura a ser atingida pelo polímero (K);

T_i: temperatura inicial do polímero (K);

A_s: área superficial do polímero na cuba (m²);

ρ: densidade do polímero (Kg/m³);

V: volume do polímero contido na cuba (m³);

c: calor específico do polímero (J/Kg.K);

t: tempo necessário para que o polímero atinja a temperatura T (s).

2.2.9 – Corpo-de-provas e contracorpo

Pretende-se estudar materiais os mais diversos possíveis, e principalmente materiais novos ou que possuem poucos dados técnicos para projeto como o aço AISI H12 forjado, temperado e revenido; aço P20 forjado, temperado e revenido; aço

1045 forjado e recoberto por aspersão térmica e a liga Fe-Cr-C eutética fundida, temperada e revenida.

O material do contracorpo deve ser de extrema dureza, para que não seja danificado antes do corpo-de-provas. O ideal seria que o contracorpo não se desgastasse, assim não teria nenhuma influência sobre os resultados. Então deve-se escolher um material com dureza muito maior que o material dos corpo-de-provas.

2.2.10 - Especificação do Isolamento

A câmara de polímero deve ser isolada termicamente para que não aqueça outras partes da máquina, para segurança do ensaio e para o auxílio na manutenção da temperatura do polímero. Para isso é necessário a colocação de um isolante em torno da cuba, como o Amianto ou o Celeron, que são normalmente utilizados nessa situação.

2.3 - Análise de sensibilidade

Determinado o modelo que melhor representa a máquina, foi descrito um conjunto de características intrínsecas, que através de equações, relacionam os parâmetros de entrada, saída e determinam as dimensões da máquina. Nessa análise pretende-se determinar o grau com que o funcionamento da máquina é afetado com variações dos parâmetros de entrada. De acordo com os estudos feitos na formulação das equações durante o projeto, conclui-se que o principal parâmetro da máquina é a carga aplicada no corpo-de-prova e a velocidade, suas variações afetam consideravelmente todos os demais parâmetros do equipamento de forma significativa.

2.4 - Análise de compatibilidade

A máquina em projeto possui três partes principais, o conjunto de acionamento, o conjunto de aquecimento e o conjunto de aplicação da carga no corpo-de-provas.

Para que haja um funcionamento harmônico é necessário que a iteração desses conjuntos seja compatível, em vista disso foram feitas as seguintes considerações.

A aplicação da carga no corpo-de-provas e consequentemente na cuba ocasiona o aparecimento de uma reação indesejável em sua estrutura, um momento na base que é ligada ao eixo de saída do redutor. Isso ocasionaria uma ligeira inclinação da cuba e um desalinhamento entre o contato do corpo-de-prova e o contracorpo. Esse problema é resolvido com a introdução de um apoio através de um rolamento posicionado logo abaixo da linha de aplicação da carga.

Além disso, para garantir o alinhamento vertical na aplicação da carga foi projetado um apoio com um parafuso regulador de posição para reparar eventuais desvios no alinhamento e proporcionar perpendicularidade entre a linha de aplicação da carga e a superfície do contracorpo.

O conjunto de aquecimento deve atuar apenas no polímero contido na cuba, todos os demais componentes têm que ser isolados termicamente para não comprometer seu funcionamento. Para isso, foi colocado um isolante abaixo da cuba entre ela e o eixo de acionamento para não danificar as partes da máquina localizadas logo abaixo da cuba, e os rolamentos do eixo do corpo-de-prova foram isolados para não ser prejudicados. Esse isolamento garante maior tempo de vida para seus componentes e é um importante fator de segurança para seus operadores, além de dar maior confiabilidade nos resultados devido a menor alteração nas propriedades físicas dos materiais.

2.5 - Análise de estabilidade

O funcionamento da máquina será sempre afetado pelas alterações das suas variáveis de entrada e pelas condições do meio ambiente, o sistema deverá responder adequadamente a essa variações accidentais, de modo a voltar ao seu equilíbrio original.

Desse modo a estabilidade do sistema será melhor analisado como protótipo da máquina construído, com ele será possível estabelecer limites aceitáveis para essas

perturbações, através de estudos estatísticos e utilizando o bom senso na estimativa dos riscos envolvidos.

Dentro desse contexto, mesmo sem o protótipo em mãos, certas observações já podem ser estipuladas. A carga de ensaio não deverá ultrapassar 10 Kg, visto que deverá ser mantido um filme de polímero entre as duas superfícies de desgaste para simular as condições previstas.

Outro parâmetro importante é a temperatura do polímero durante o ensaio, ela deve ficar em torno de 200°C, para proporcionar viscosidade adequada, ou seja, variando o mínimo, e de modo a não desestabilizar o polímero com temperaturas muito elevadas. Neste ponto é importante ressaltar o papel dos termopares, eles servem para manter a temperatura de ensaio variando entre uma pequena faixa de temperaturas, para garantir a viscosidade constante.

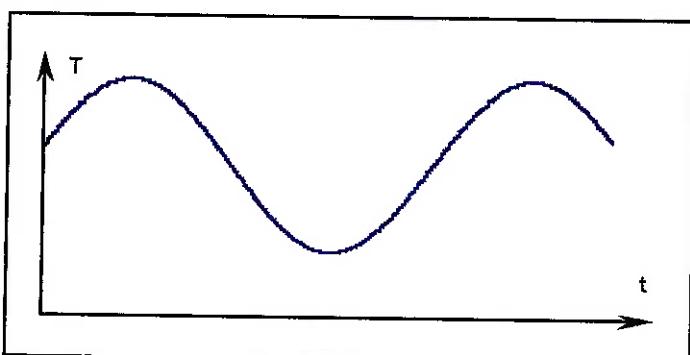


Gráfico. Variação da temperatura durante o ensaio.

Na parte estrutural da máquina, o braço que suporta o sistema de aplicação de carga foi dimensionado de forma a ter massa reduzida e alta rigidez, para evitar deflexões indesejáveis.

Os problemas de vibração podem ser minimizados com a utilização de coxins na base do sistema de acionamento, entretanto o uso do acoplamento elástico impede que grande parcela das vibrações originadas pelo motor se propague para o restante da máquina. Além disso podem ser utilizados materiais especiais entre as junções de determinados componentes que absorvem eventuais vibrações, para melhorar as condições de ensaio.

2.6 - Otimização Formal

O dimensionamento do equipamento foi feito de forma a alcançar o projeto ótimo em função da gama de materiais a serem ensaiados. Os principais componentes foram projetados de forma literal, selecionado o material a ser ensaiado suas dimensões são automaticamente calculadas através de uma planilha em Excel, que encontra-se no final deste trabalho.

A otimização formal foi realizada com valores iniciais baseados no conhecimento dos membros do Laboratório de Fenômenos de Superfície da Universidade de São Paulo, e de acordo com a experiência e conveniência utilizadas nas reuniões semanais com os orientadores.

Parte 3 - Projeto Executivo

A partir do dimensionamento e especificações dos componentes e conjuntos definidos no projeto básico, foram feitos estudos para verificar a compatibilidade entre as diversas partes da máquina e feito isso, o desenho de conjunto foi elaborado, juntamente com os desenhos de fabricação que se encontram anexos no final desse trabalho.

3.1 - Modelo Funcional

Inicialmente a máquina seria construída em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, mas devido à escassez de recursos financeiros a máquina está sendo construída utilizando partes de uma outra máquina, fato esse que originou outros interesses para o equipamento.

Mesmo assim, o orçamento inicial foi incluído neste trabalho. O motor e redutor tiveram seus preços avaliados em lojas de equipamentos usados. Alguns instrumentos de medição como o variador de frequência não foram incluídos, podendo serem incrementados posteriormente. A avaliação dos preços segue a lista de peças do desenho de conjunto.

Dessa forma o presente trabalho fica disponível para futuras utilizações e retomada dos estudos aqui efetuados.

Tabela 4 : lista de peças e preços da máquina projetada.

Número	Denominação	Quant.	Material/Norma	Preço R\$
1	Mesa/suporte	1	Conj. Soldado	60
2	Motor/redutor	1	Vide relatório	200
3	Acoplamento	1	Vide relatório	50
4	Mancal	1	ABNT 1045	20
5	Escovas	4	Vide relatório	20
6	Recipiente	1	ABNT1045	150
7	Torre	1	ABNT1045	50
8	Eixo	1	ABNT1045	20
9	Suporte	1	ABNT1045	50
10	Braço	1	Alumínio	60
11	Célula de carga	1	Vide relatório	75
12	Parafuso de ajuste	1	M5x50 DIN912	1
13	Encosto	1	Metal duro	15
14	Guia linear	1	Vide relatório	100
15	Cabeçote	1	Conj. Soldado	120
16	Rolamento	2	Vide relatório	50
17	Anel de encosto	1	ABNT 1020	10
18	Eixo	1	ABNT 1045	20
19	Corpo-de-prova	1	Vide relatório	15
20	Bucha	1	Celeron	30
21	Bucha	1	Celeron	30
22	Porca	1	Vide relatório	5
23	Rolamento	1	Vide relatório	25
24	Suporte do rolamento	1	Conj. Soldado	40
25	Termostato	1		30
26	Conta-giros	1		30
27	Parafuso sextavado	12	M12x20ABNT1045	6
28	Parafuso c. cilíndrica	20	M5x20 DIN 912	10
29	Tampa	1	ABNT 1045	20
Total				1312

3.2 - Conclusões

Durante o projeto surgiram diversas dúvidas com relação a integração das partes da máquina para garantir um funcionamento razoavelmente harmonioso. O sistema de aquecimento foi bastante discutido e pesquisado nas reuniões com os orientadores. A aplicação da carga na linha perpendicular ao eixo do corpo-de-prova foi solucionado com um cabeçote de forma especial e uma guia linear.

A metodologia do projeto utilizada foi facilmente aplicada devido às experiências em disciplinas anteriores.

A elaboração dessa máquina foi um grande desafio, visto que foi necessário utilizar conceitos de matérias que foram aprendidas de forma separada durante o curso.

Portanto, esse trabalho contribuiu para consolidar nossos conhecimentos, devido a utilização de diversos assuntos em um único problema. E permitiu vivenciar de forma mais prática e intensa um projeto de engenharia.

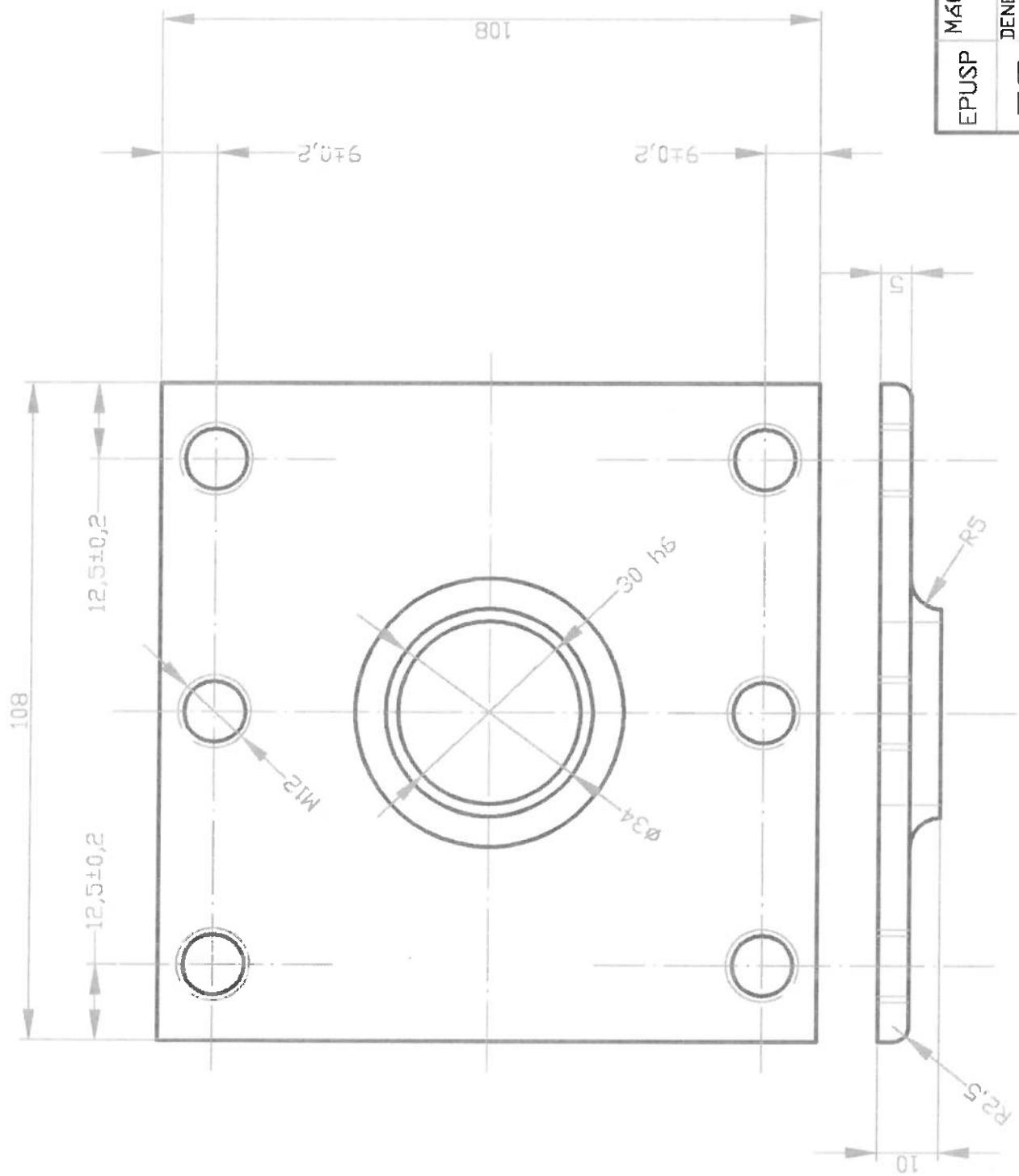
Referências Bibliográficas

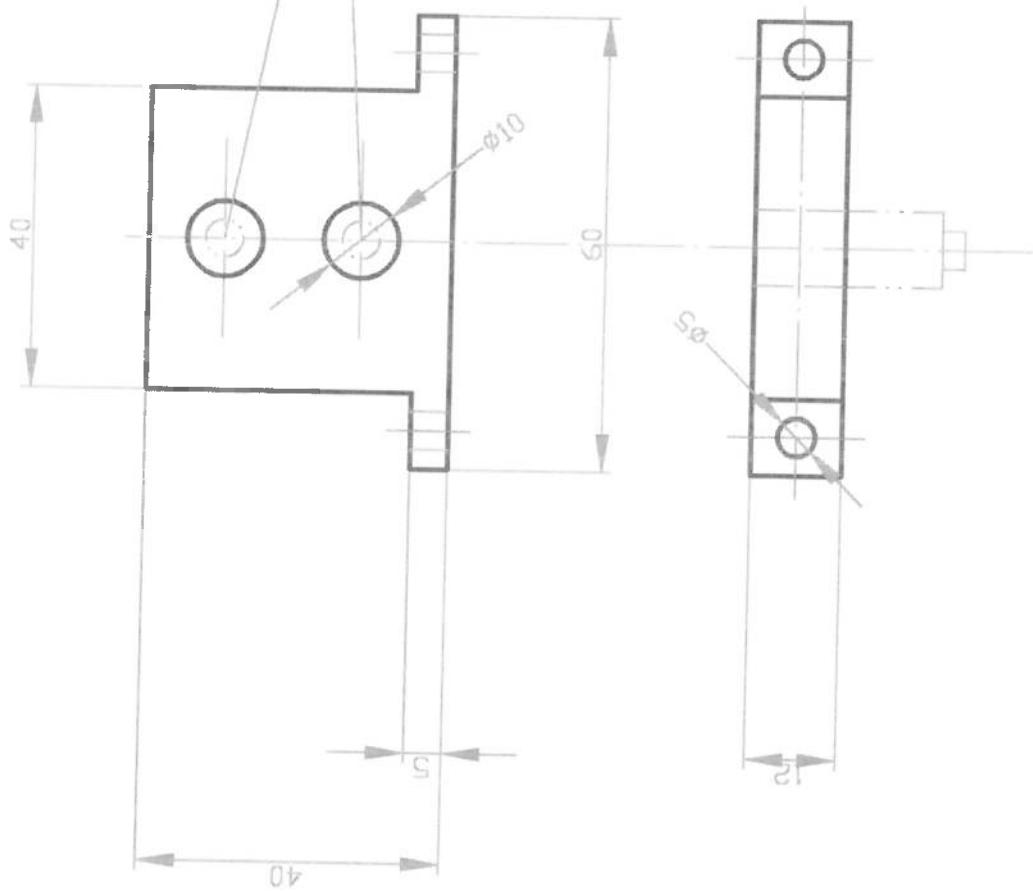
- (1) SEW - Catálogo de Moto Redutores SEW edição 09/91, SEW do Brasil
- (2) Huchings, I. M. [1992]. Tribology; Friction and Wear of Engineering. Department of Materials Science and metallurgy University of Cambridge.
- (3) Omar, M. de Madureira [1989]. Apostila de PMC-475. Metodologia de projeto.
- (4) Chiaverini, Vicente [1986]. Tecnologia mecânica. Vol 1, McGraw-hill.
- (5) Marshek, Juvinal [1991]. Fundamentals of Machine Component Design. John Wiley & Sons. Second edition.
- (6) SKF [1989] – Catálogo Geral 400 PB.
- (7) Zampese, Boris [1986]. Dimensionamento. Grêmio Politécnico, EPUSP.
- (8) Menning, G. [1991]. Tribological Aspects of Developing Wear Tests For Plastic Processing. Wear Materials, ASME, Germany.
- (9) Incropera, Frank P. [1992]. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. LCT. Terceira edição.
- (10) Maru, M. M. e Bianco, L. F. [1995]. Trabalho de Graduação, Máquina para Ensaio de Desgaste de Materiais para injetoras de plástico.

Apêndice

Planilha de cálculo dos principais parâmetros da máquina.

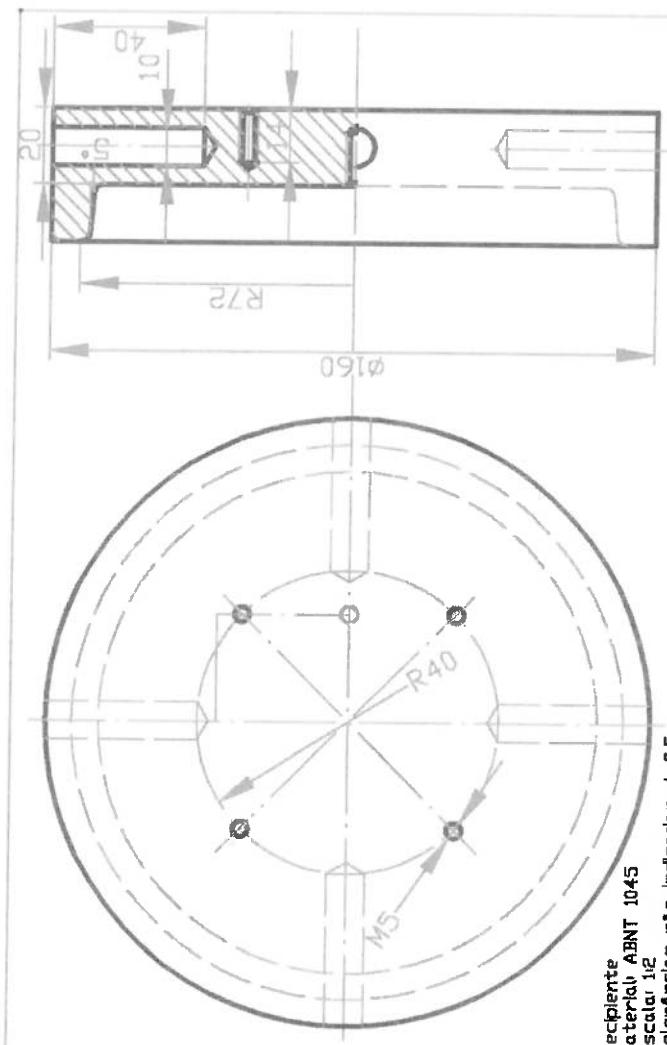
Variáveis/materiais	Aço AISI H12
Coeficiente de Poisson 1	0,30
Coeficiente de Poisson 2	0,30
Coeficiente de elasticidade 1	2,E+11
Coeficiente de elasticidade 2	2,E+11
Raio R1	0,05
Raio R2	Infinito
Largura do corpo de prova (mm)	10,00
Delta (vide item 2.2.1)	1,67E-15
Máxima tensão normal (MPa)	1.006
Máxima tensão cisalhamento (Mpa)	290
Tensões/materiais	Aço AISI H12
Carga distribuída KN/m	1.290,55
Força aplicada ao corpo de prova (KN)	12,90
Eixo do corpo de prova	Aço AISI H12
Tensão admissível do material do eixo (MPa)	210
Comprimento L do eixo (mm)	65,00
Diâmetro d mínimo do eixo (mm)	34,39
Garfo do corpo de prova	Aço AISI H12
Tensão admissível do material do garfo (MPa)	210
Largura b da barra (mm)	32,0
Altura mínima do garfo (mm)	27,3
Deformação do corpo de prova	Aço AISI H12
Tensão na superfície de contato (MPa)	580
Deformação do corpo de prova (mm)	0,14
Calor para aquecer o polímero	Aço AISI H12
Massa de polímero (Kg)	0,20
Coeficiente de transferência de calor (J/Kg.K)	1,80
Temperatura de fusão (K)	474
Temperatura ambiente (K)	300
Área de troca de calor do recipiente (m^2)	0,10
Coeficiente de convecção (W/m^2.K)	8,0
Calor de fusão (J)	62,6
Calor para manter polímero aquecido (W)	363,2



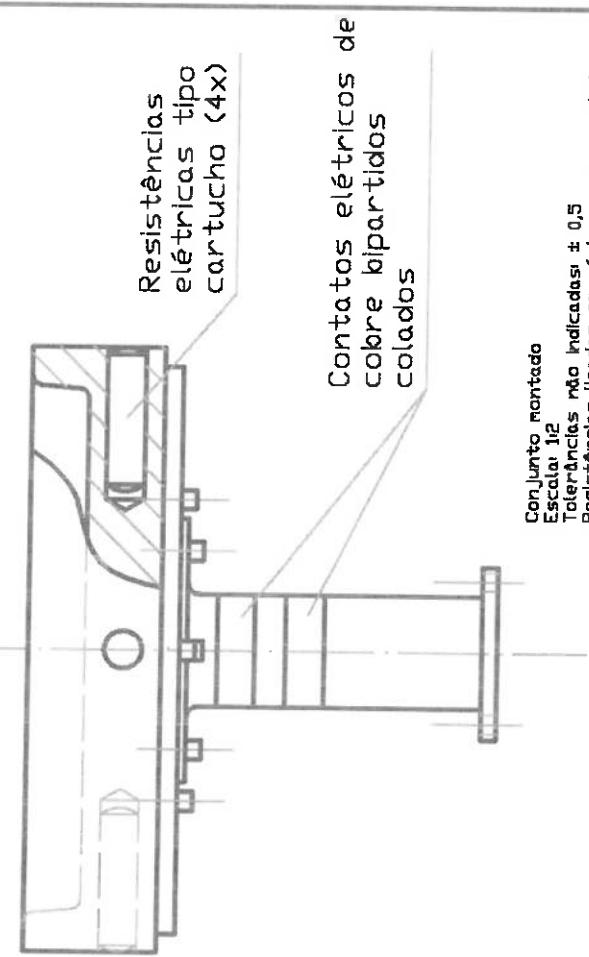


Material ABNT 1045
Escala 1:1
Tolerâncias não indicadas ± 0,5

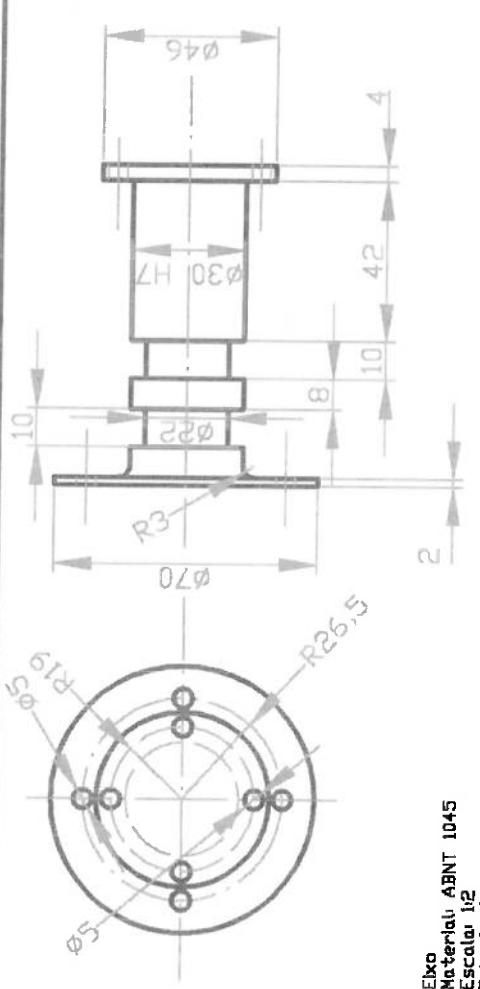
EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA 21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO ESCOVAS	Folha F2



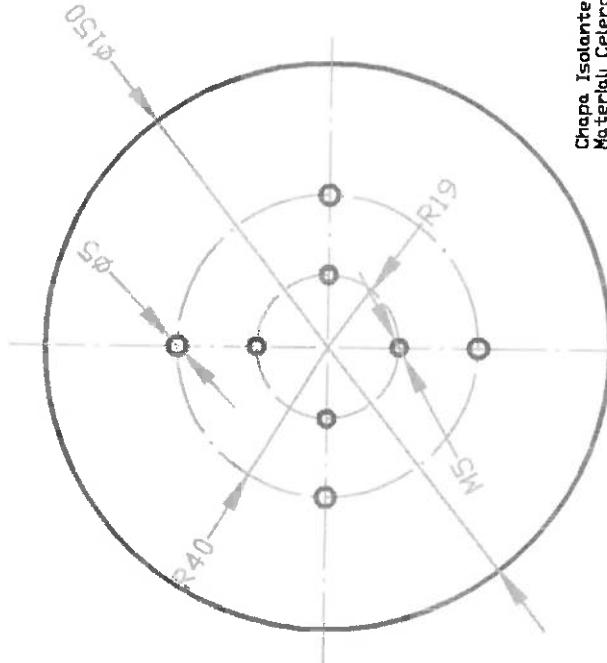
Recipiente
Material ABNT 1045
Escala 1:2
Tolerâncias não indicadas $\pm 0,5$



Conjunto montado
Escala 1:2
Tolerâncias não indicadas $\pm 0,5$
Resistências ligadas em série com os contatos



Elxo
Material ABNT 1045
Escala 1:2
Tolerâncias não indicadas $\pm 0,5$

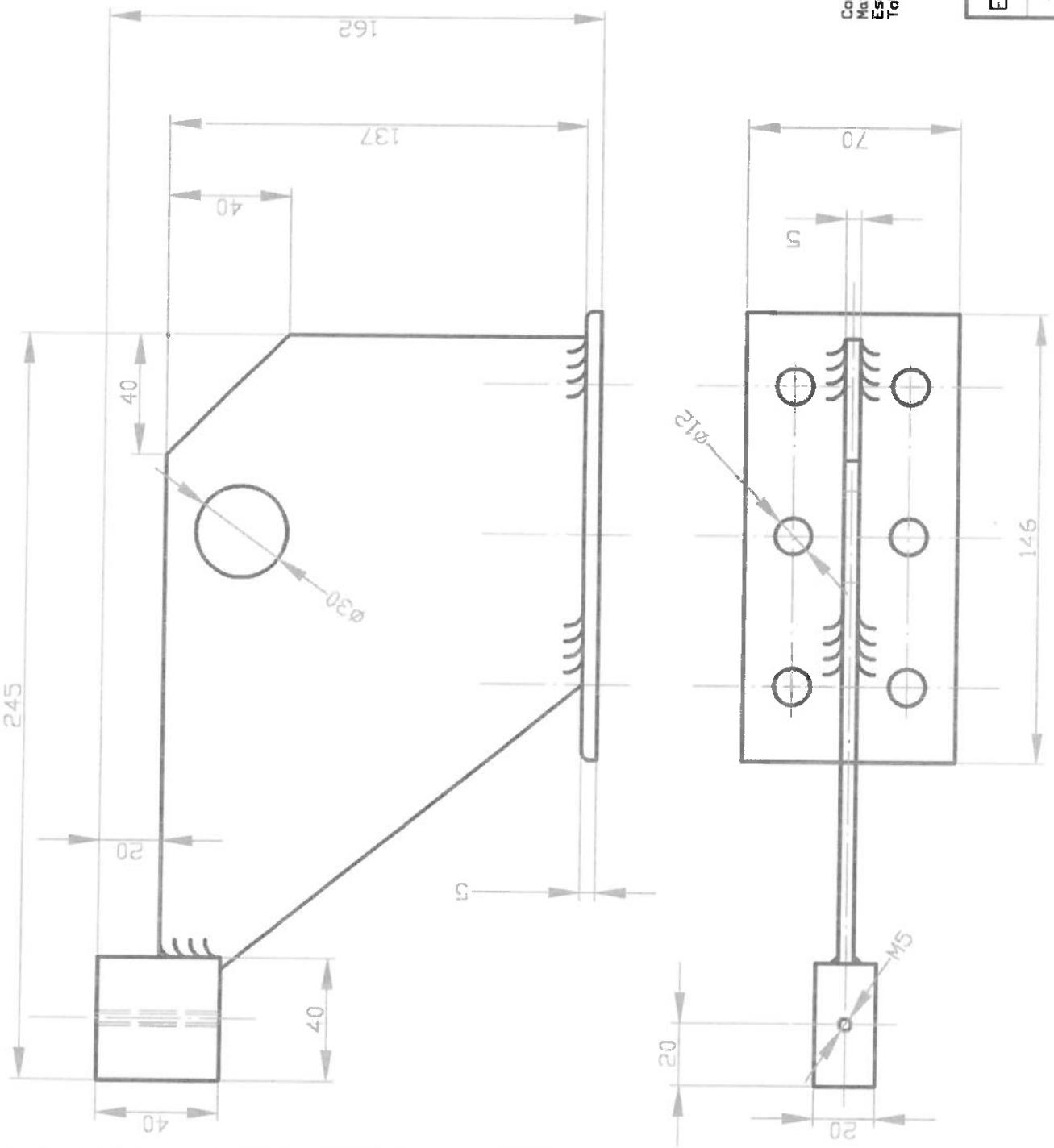


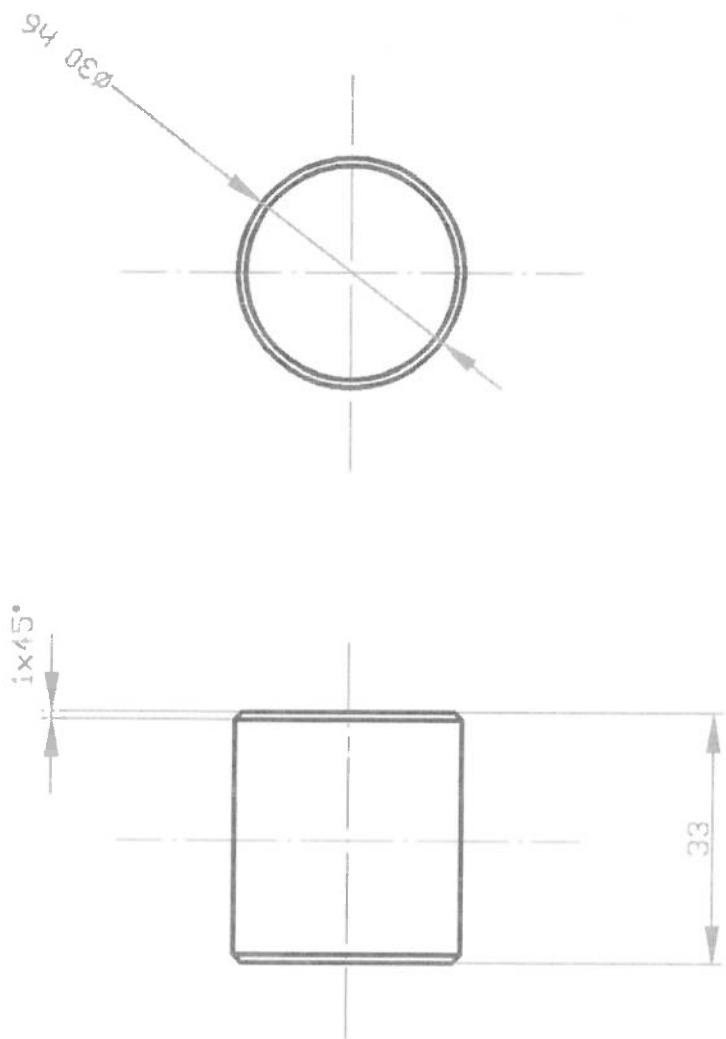
Chapa Isolante
Material Celcon esp.5mm
Escala 1:2
Tolerâncias não indicadas $\pm 0,5$

EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA 21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO RECIPIENTE	Folha F3

EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA 21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO TORRE	
		Folha F4

Conjunto soldado normalizado
Material: ABNT 1045
Escala 1:2
Tolerâncias não indicadas: $\pm 0,5$



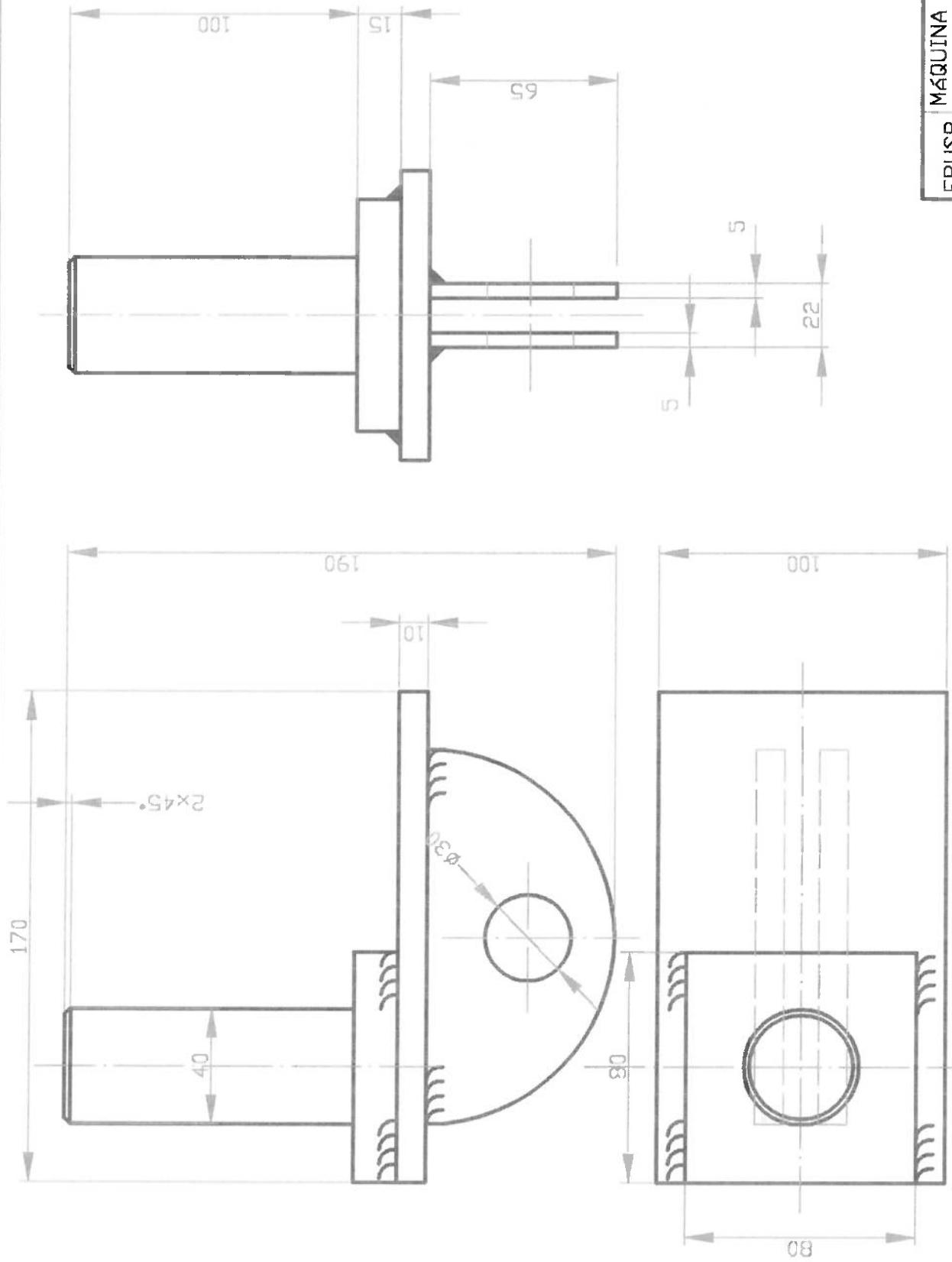


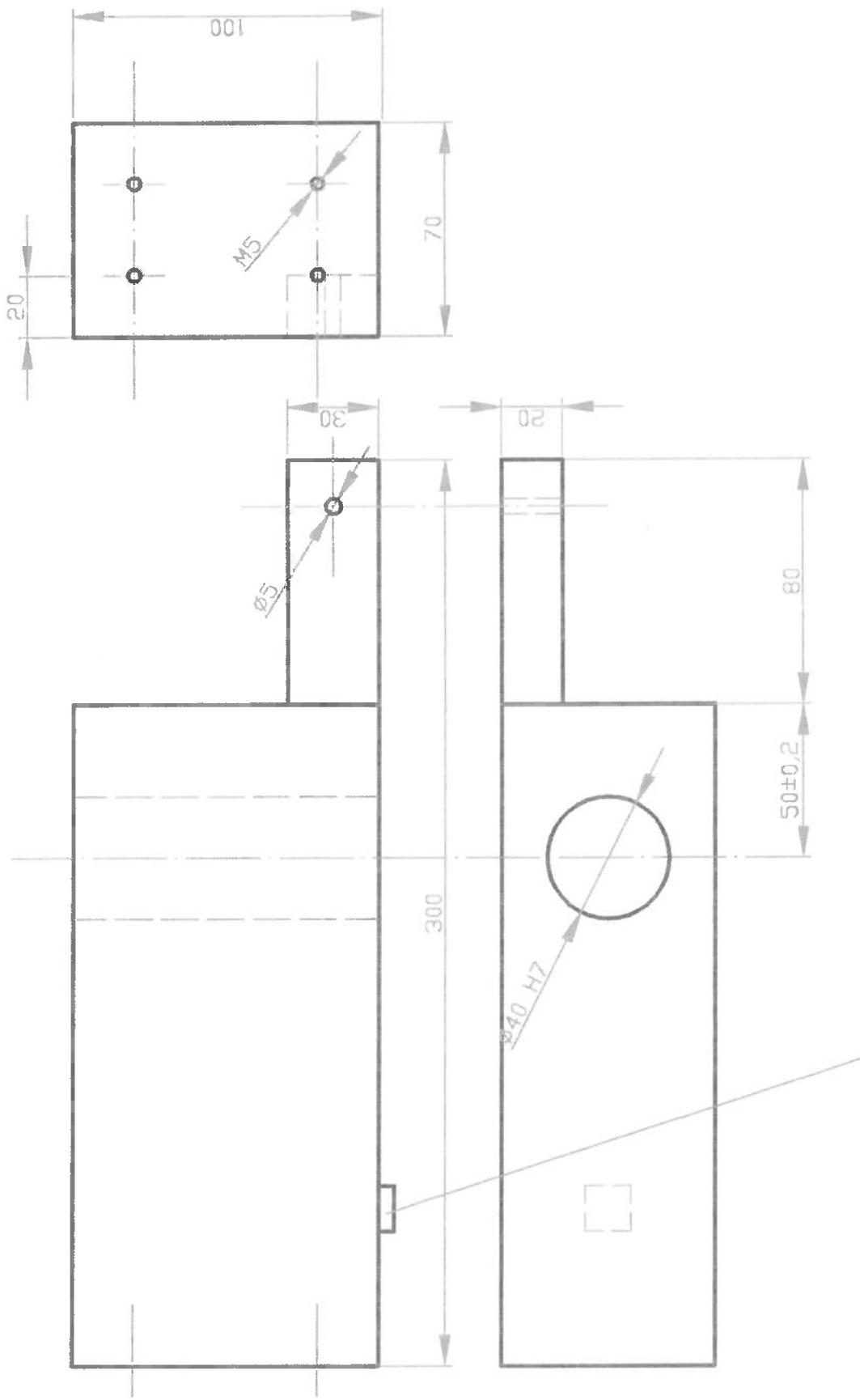
EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA 21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO EIXO	Fatiga

Material: ABNT 1045
Escala: 1:1
Tolerâncias não indicadas: $\pm 0,5$

EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DATA DESGASTE	21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO	Fatiga
	SUPORTE	F6

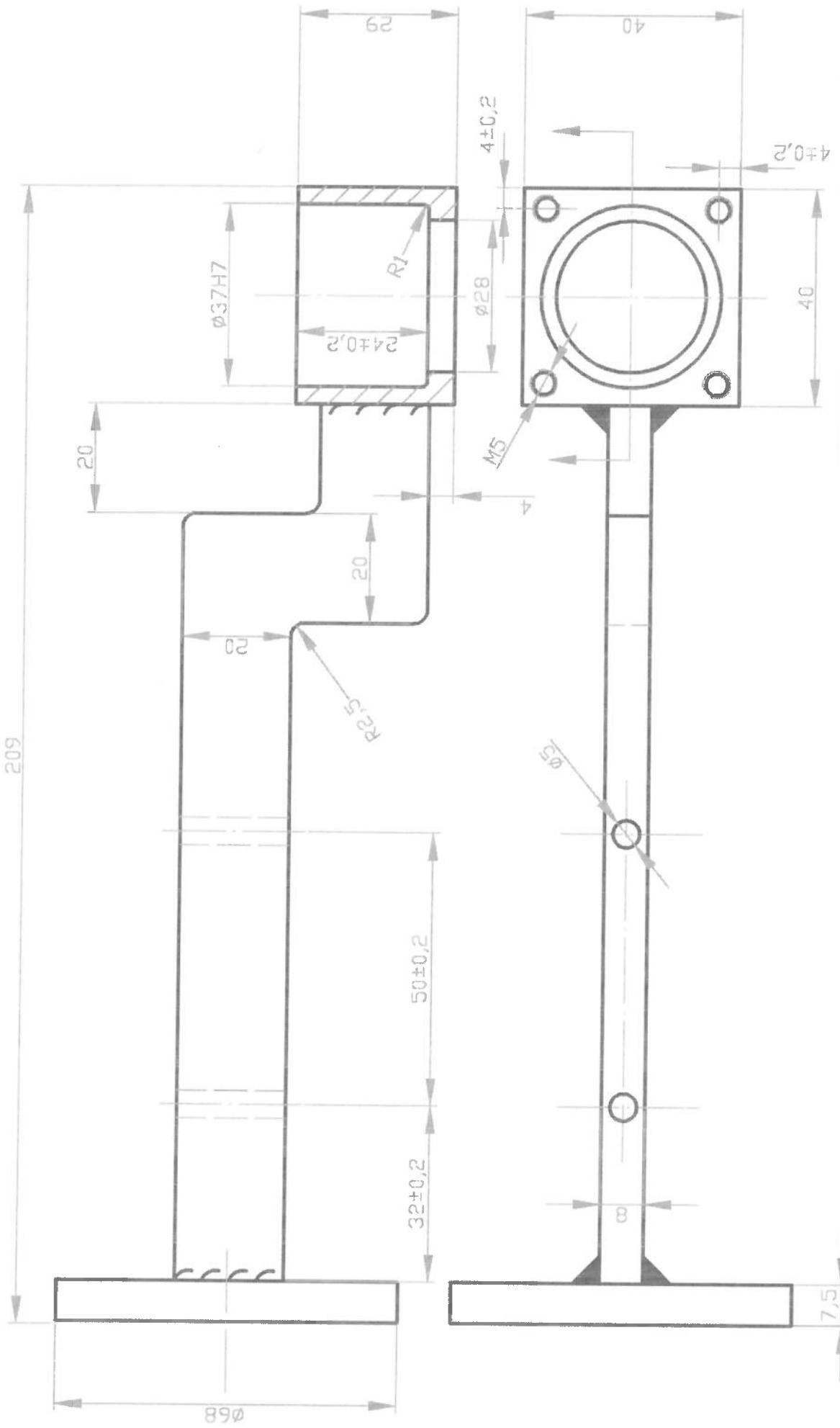
Conjunto soldado normalizado
Material ABNT 1045
Escala 1:2
Tolerâncias não indicadas: $\pm 0,5$





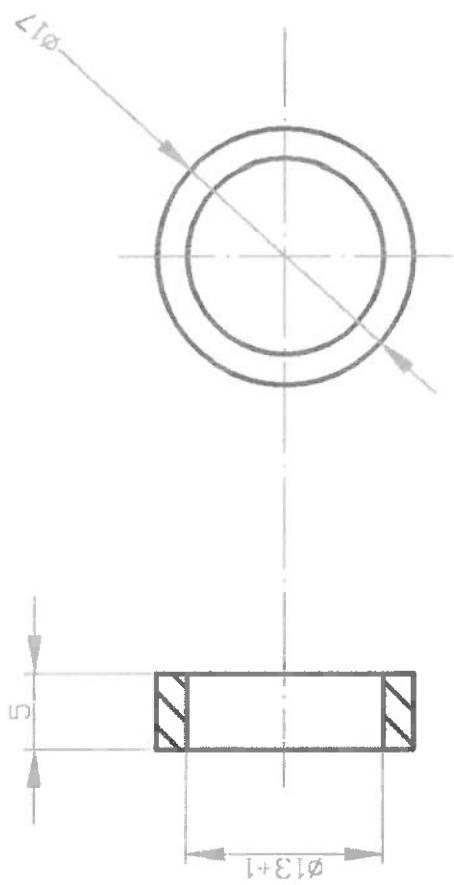
Material: Alumínio
 Escala: 1:2
 Tolerâncias não indicadas: $\pm 0,5$

EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA	21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO	Folha	F7



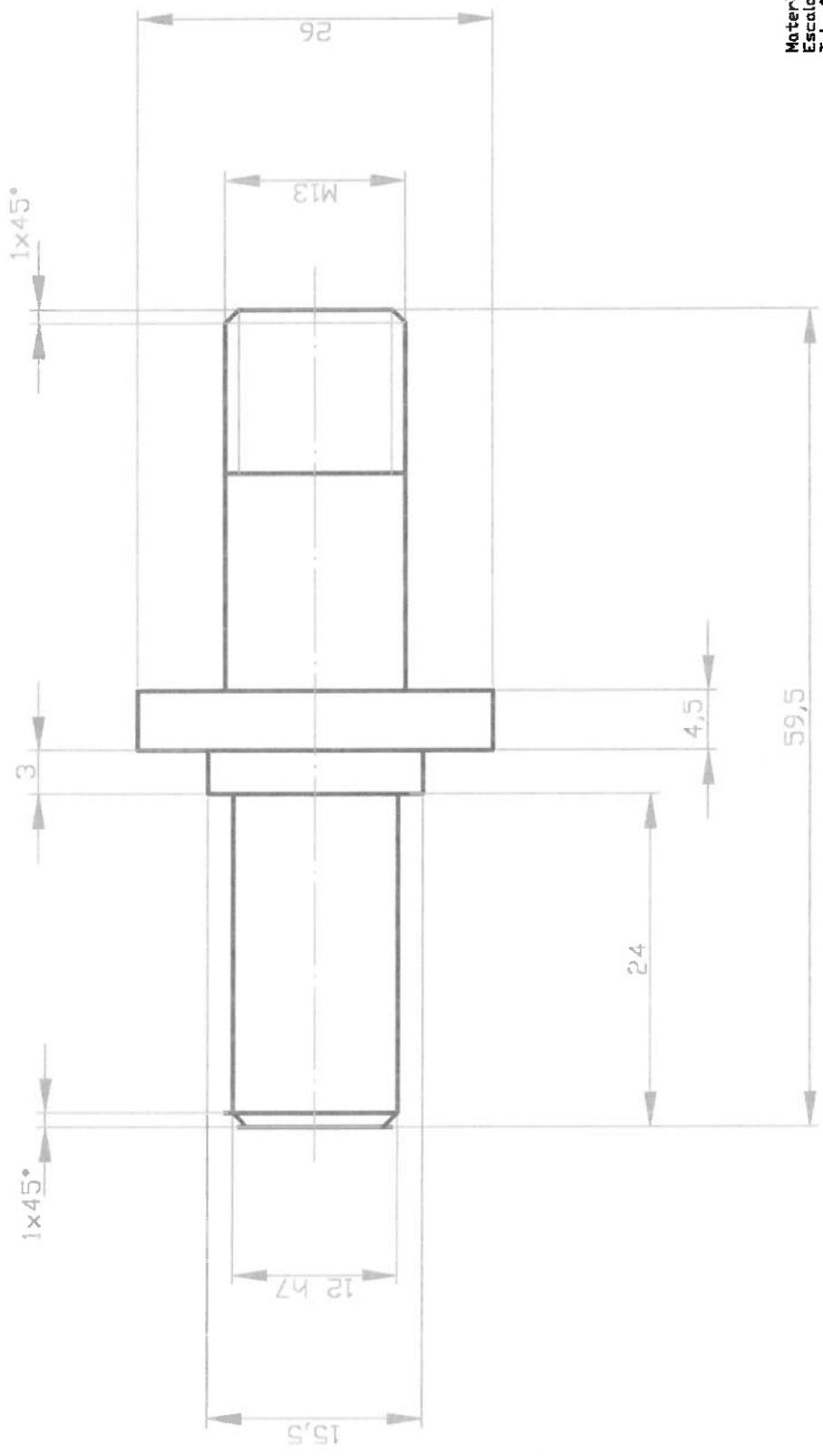
EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA
		21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO	Folha
	CABECOTE	F8

Conjunto soldado normalizado
Material ABNT 1045
Escala 1:1
Tolerâncias não indicadas ± 0,5



Material: ABNT 1020
Escala: 2:1
Tolerâncias não indicadas: $\pm 0,5$

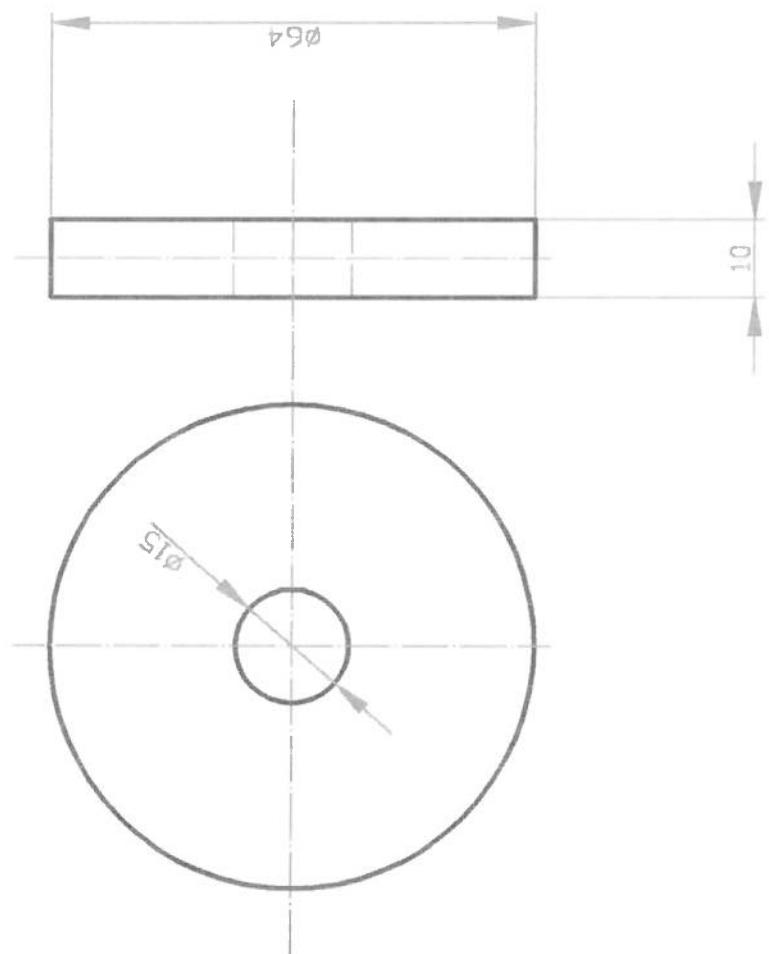
EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA 21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO ANEL DE ENCONTRO	Fat.º F9

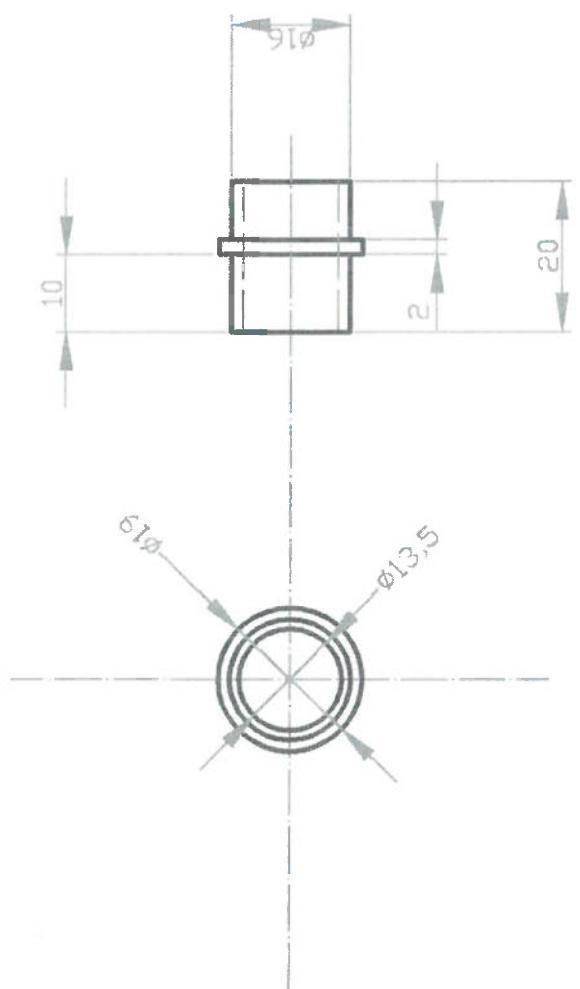


EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DATA DESGASSE	21/12/98	Falha	F10
	DENOMINAÇÃO	EIXO		

EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA 21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO CORPO-DE-PROVA	Faixa F11

Material: vide relatório
 Escala: 1:1
 Tolerâncias não indicadas: $\pm 0,5$

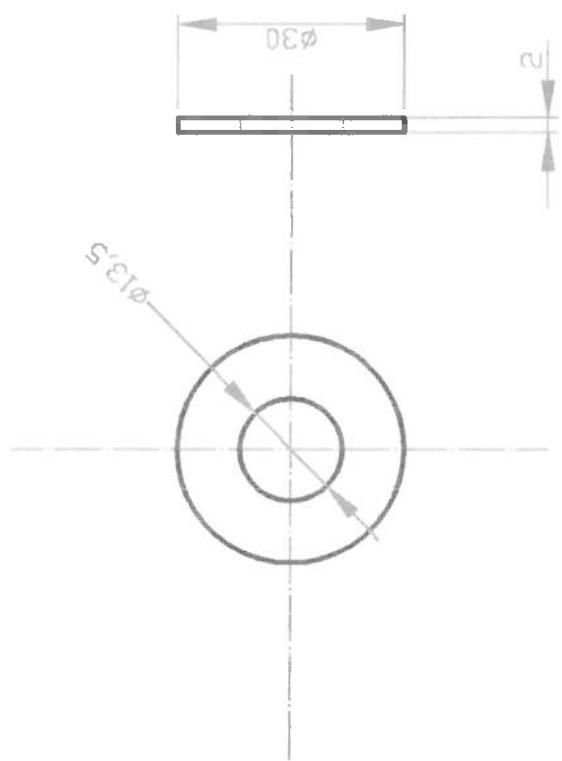




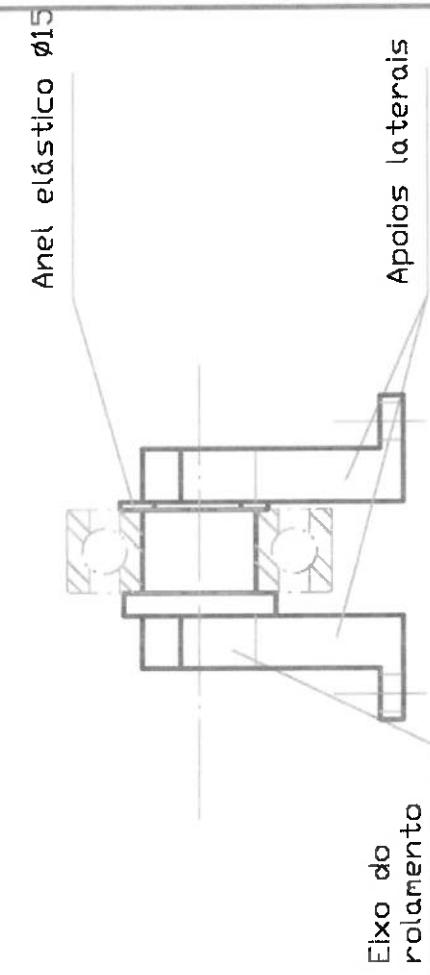
EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DATA	21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO	Folha
	BUCHA	F12

Material: celeron
Escala: 1:1
Tolerâncias não indicadas $\pm 0,5$

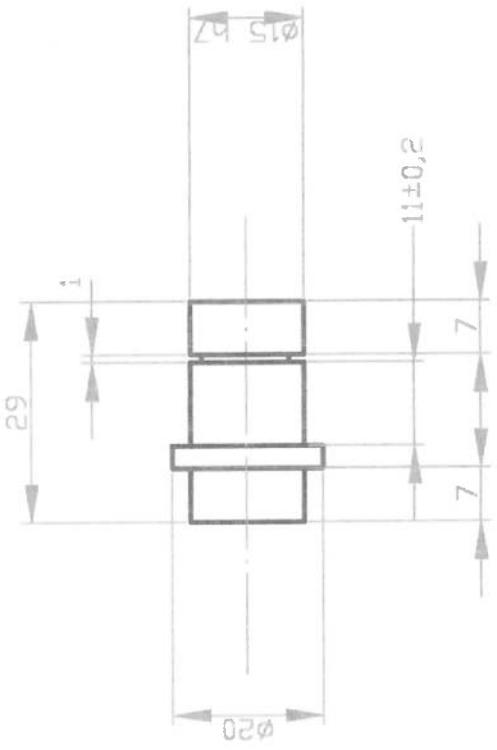
EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA 21/12/98
TF	DENOMINAÇÃO BUCHA	Folha F13



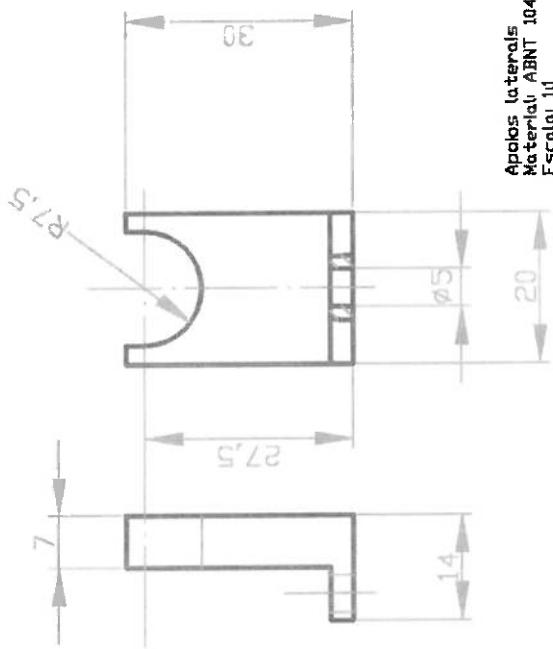
Material: celeron
Escala: 1:1
Tolerâncias não indicadas ± 0,5



Eixo do
rolamento
Montado
Material: ABNT 1045
Escala: 1:1
Tolerâncias não indicadas: $\pm 0,5$



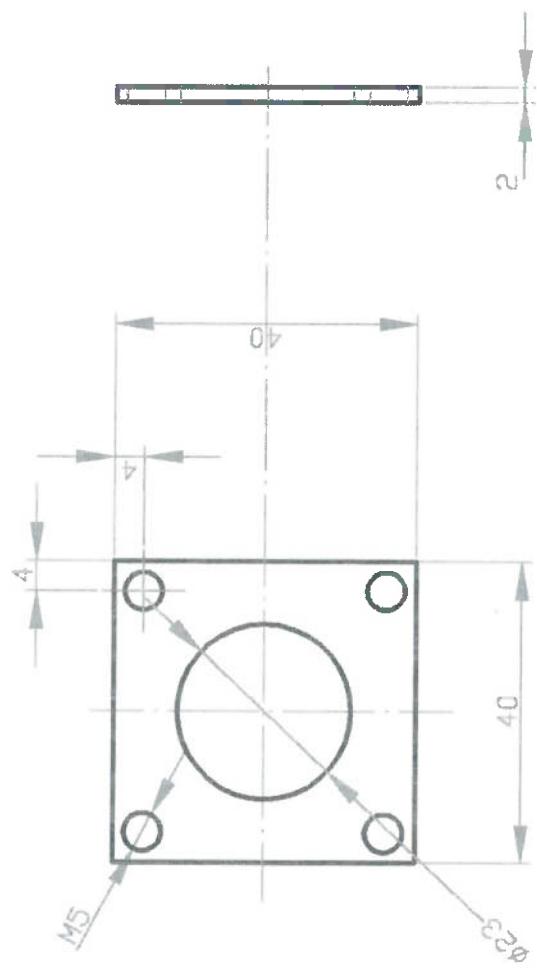
Eixo do rolamento
Material: ABNT 1045
Escala: 1:1
Tolerâncias não indicadas: $\pm 0,5$



Apósos laterais
Material: ABNT 1045
Escala: 1:1
Tolerâncias não indicadas: $\pm 0,5$

EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA 21/12/98
T	DENOMINAÇÃO SUPORTE DO ROLAMENTO	Folha F14

EPUSP	MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE	DATA 21/12/98
TF	DENO ^{MINAÇÃO} TAMPA	Folha F15



Material: ABNT 1045
Escala 1:1
Tolerâncias não indicadas $\pm 0,5$

