

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA – DEPARTAMENTO DA MECÂNICA

**MÁQUINA DE TESTE DE FADIGA**

Ivan Akira Akai Miyashiro

Relatório Final de PMC581 - Projeto Mecânico  
2 apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo, referente ao  
Trabalho de Formatura.

10,0  
(DEZ)  
g...  
11/DEZ/02

São Paulo  
2002

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA – DEPARTAMENTO DA MECÂNICA

## **MÁQUINA DE TESTE DE FADIGA**

Ivan Akira Akai Miyashiro

Relatório Final de PMC581 - Projeto Mecânico  
2 apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo, referente ao  
Trabalho de Formatura.

Coordenador: Prof. Eng. Edson Gomes

Orientador: Prof. Eng. Gilberto F. M. Souza

São Paulo  
2002

Aos meus pais e irmã que estiveram sempre presentes me incentivando em todos estes anos de estudo. Expresso minha eterna gratidão e dívida.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu amigo e orientador Prof. Gilberto Francisco Martha de Souza pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

A todos amigos e colegas, em especial aos amigos Adonis, Mauro, Nicolau, Rodrigo Fujimoto e Rui, que direta ou indiretamente colaboraram para o bom desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

p.

<b>RESUMO</b>	
<b>SUMMARY/ABSTRACT</b>	
<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Objetivos</b> .....	<b>2</b>
<b>3 Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>3</b>
<b>3.1 Normas</b> .....	<b>3</b>
3.1.1 <i>Objetivos</i> .....	3
3.1.2 <i>Corpo de prova</i> .....	3
<b>3.2 Tipos de máquinas</b> .....	<b>5</b>
3.2.1 <i>Máquinas de teste de flexões rotativas</i> .....	6
3.2.2 <i>Máquinas de flexão repetitivas</i> .....	7
3.2.3 <i>Máquina de carregamento Axial</i> .....	9
3.2.4 <i>Máquina de torção</i> .....	12
3.2.5 <i>Máquinas de carregamento combinado (multiaxial)</i> .....	13
<b>3.3 Apresentação de resultados</b> .....	<b>13</b>
3.3.1 <i>Apresentação de Dados</i> .....	13
3.3.2 <i>Apresentação Gráfica</i> .....	14
3.3.2.1 <i>Diagrama S-N</i> .....	14
3.3.2.2 <i>Diagrama constante de vida</i> .....	15
<b>4 Seleção do tipo da fadiga</b> .....	<b>17</b>
<b>4.1 Aspectos relevantes para a seleção</b> .....	<b>17</b>
4.1.1 <i>Interesse do aluno (fator X5)</i> .....	17
4.1.2 <i>Facilidade de construção (fator X3)</i> .....	17
4.1.3 <i>Estudo histórico (fator X2)</i> .....	17
<b>4.2 Matriz de Decisão</b> .....	<b>18</b>
<b>5 Seleção do tipo de máquina</b> .....	<b>19</b>
<b>5.1 Tipo de acionamento</b> .....	<b>19</b>
<b>5.2 Tipo de mecanismo de barras</b> .....	<b>21</b>
<b>5.3 Tipo de carga</b> .....	<b>22</b>
<b>5.4 Fixação do corpo de prova</b> .....	<b>23</b>
<b>5.5 Tipo de falha</b> .....	<b>26</b>
<b>6 Máquina escolhida</b> .....	<b>28</b>
<b>7 Dimensionamento</b> .....	<b>29</b>
<b>7.1 Corpo de Prova</b> .....	<b>29</b>
<b>7.2 Luva</b> .....	<b>31</b>
<b>7.3 Eixo Corpo de prova/ Disco de Inércia</b> .....	<b>31</b>
<b>7.4 Rolamento dos mancais</b> .....	<b>32</b>

<b>7.5 Mancal.....</b>	<b>33</b>
<b>7.6 Base.....</b>	<b>34</b>
<b>7.7 Cubo/ Flange do Disco de Inércia .....</b>	<b>34</b>
<b>7.8 Discos de Inércia .....</b>	<b>35</b>
<b>7.9 Sistema de 4 barras.....</b>	<b>36</b>
<b>7.10 Motor.....</b>	<b>38</b>
<b>7.11 Disco-motor.....</b>	<b>39</b>
<b>7.12 Barra1 .....</b>	<b>39</b>
<b>7.13 Barra2 .....</b>	<b>43</b>
<b>7.14 Rolamento-articulação1 .....</b>	<b>44</b>
<b>7.15 Rolamento-articulação2 .....</b>	<b>45</b>
<b>7.16 Estrutura.....</b>	<b>47</b>
<b>8 Workmodel 2D® .....</b>	<b>48</b>
<b>8.1 Modelo .....</b>	<b>48</b>
<b>8.2 Dados de entrada.....</b>	<b>49</b>
<b>8.3 Saídas .....</b>	<b>50</b>
<b>8.4 Tratamento de dados.....</b>	<b>51</b>
<b>8.5 Simulação.....</b>	<b>53</b>
<b>9 Lista de peças.....</b>	<b>55</b>
<b>10 Estimativa de Custo .....</b>	<b>57</b>
<b>10.1 Motor.....</b>	<b>57</b>
<b>10.2 Acionamento .....</b>	<b>57</b>
<b>10.3 Peças que devem ser fabricadas .....</b>	<b>57</b>
<b>10.4 Peças prontas .....</b>	<b>58</b>
<b>10.5 Custo total.....</b>	<b>59</b>
<b>11 Discussão .....</b>	<b>60</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>61</b>
<b>Anexos – Desenhos .....</b>	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Raio de curvatura tangencial entre a secção de teste e extremos.....	4
Figura 3.2: Raio de curvatura contínuo.....	4
Figura 3.3: Raio de curvatura tangencial entre a secção de teste e extremos.....	5
Figura 3.4: Raio de curvatura contínuo.....	5
Figura 3.5: exemplo de testes de flexão rotativa.....	6
Figura 3.6: exemplo de máquinas mecânicas de teste de flexão repetitiva.....	7
Figura 3.7: Exemplo de máquina magnéticas de teste de flexão repetitiva.....	8
Figura 3.8: exemplo de máquina pneumática de teste de flexão repetitiva.....	9
Figura 3.9: Exemplos de máquinas hidráulicas de teste de flexão repetitiva.....	10
Figura 3.10: Exemplos de máquinas mecânica e magnética de teste axial.....	11
Figura 3.11: Exemplo de máquina de teste de torção.....	12
Figura 3.12: Exemplo de máquina de teste multiaxial.....	13
Figura 3.13: Diagrama S-N.....	14
Figura 3.14: Diagrama S-N com as curvas de probabilidade.....	15
Figura 3.15: Diagrama Constante de vida (tensão mínima X tensão máxima).....	16
Figura 3.16: Diagrama Constante de vida (tensão média X amplitude de tensão).....	16
Figura 5.1: Opção pneumática e hidráulica.....	20
Figura 5.2: Opção magnética.....	21
Figura 5.3: Mecanismos de acionamento de 3 e 4 barras.....	22
Figura 5.4: Tipos de carga para o sistema.....	23
Figura 5.5: Fixação por superfície cônica.....	24
Figura 5.6: Fixação por luva.....	25
Figura 5.7: Fixação por parafuso ou pino.....	25
Figura 5.8: Fixação por secção geométrica da extremidade.....	26
Figura 6.1: Esquema da máquina selecionada.....	28
Figura 7.1: Esquema de dimensões de 4 Barras.....	37
Figura 7.2: Torque no motor.....	38

Figura 7.3:	Projeção para a Barra1 .....	40
Figura 7.4:	Esforços na Barra1 .....	40
Figura 7.5:	Esforço Axial na Barra1 .....	41
Figura 7.6:	Esquema da Barra1 .....	41
Figura 7.7:	Esforço fletor na Barra2.....	43
Figura 7.8:	Esforços na articulação 1.....	44
Figura 7.9:	Esforços na Articulação2 .....	46
Figura 7.10:	Perfil das barras da estrutura.....	47
Figura 8.1:	Modelo do Workmodel.....	48
Figura 8.2:	Apresentação de saídas do Workmodel® .....	51
Figura 8.3:	Abrindo os dados do Workmodel.....	52
Figura 8.4:	Apresentação dos dados no Excel.....	52
Figura 8.5:	Estudo da Influência da discretização nos resultados ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1:	Matriz de Decisão do tipo de fadiga .....	18
Tabela 7.1:	Corpo de Prova .....	30
Tabela 7.2:	Dimensões do Corpo de Prova .....	30
Tabela 7.3:	Dados para cálculo de chaveta .....	31
Tabela 7.4:	Comprimento mínimo de chaveta.....	32
Tabela 7.5:	Esmagamento pela chaveta.....	32
Tabela 7.6:	Disco de Inércia.....	36
Tabela 7.7:	Rotação do Motor x Torque no Corpo de Prova.....	37
Tabela 8.1:	Massa e inércia dos Discos de Inércia .....	49
Tabela 8.2:	Massa e inércia das Barras.....	49
Tabela 8.3:	Massa e inércia das outras peças.....	49
Tabela 9.1:	Lista de Peças.....	55
Tabela 10.1:	Custo de peças fabricadas.....	58
Tabela 10.2:	Estimativa de Custo .....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

$T$  – Torque

$r$  – Raio

$J$  – Momento polar

$d_{\text{teste}}$  – Diâmetro da secção de teste

$\tau_{\text{máx}}$  – Tensão de cisalhamento máxima

$F_{\text{atrito}}$  – Força de atrito

$r_{\text{extremidade}}$  – Raio da extremidade de fixação do corpo de prova

$L_{\text{chaveta}}$  – Comprimento da chaveta

$h_{\text{chaveta}}$  – Altura da chaveta

$w_{\text{chaveta}}$  – Largura da chaveta

$S_Y$  – Tensão de escoamento

$e$  – Espessura

$I_x$  – Momento de Inércia

$\alpha$  – Aceleração angular

$N$  – Número de parafusos

$FS$  – Fator de segurança

$A$  – Área

$M$  – Massa

$\theta_1$  – Ângulo entre a Barra1 e o eixo vertical

$\theta_2$  – Ângulo entre a Barra2 e o eixo horizontal

$E$  – Módulo de elasticidade

$\sigma$  – Tensão

$y$  – Deslocamento perpendicular a Barra2

**B** – largura de barra

$\rho$  – Densidade

## RESUMO

MIYASHIRO, I. A. A. **Maquina de Teste de Fadiga**. 2002. 62 p. Relatório Final de PMC581 - Projeto Mecânico 2 – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Este Trabalho visa o desenvolvimento de um projeto de uma máquina de teste de fadiga, para isto foram estudados os tipos de fadiga e de máquinas existentes. Com estes estudos selecionou-se a fadiga torcional para a qual posteriormente desenvolveram-se alternativas de maquinas. Depois de determinado o tipo de máquina, procedeu-se o dimensionamento dos componentes. Este projeto usou o programa Workmodel 2D para simular e encontrar os dados necessários para o projeto.

## SUMMARY/ABSTRACT

MIYASHIRO, I. A. A. **Fatigue Test Machine**. 2002. 62 p. Relatório Final de PMC581 - Projeto Mecânico 2 – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

This Project wants to develop a design of fatigue test machine, in order to do this it was studied types of fatigue and existing machines. With these studies, torcional fatigue was selected, after that a brainstorm was done to find alternatives to the machine. After the machine type determination, components dimension were done. This project have used Workmodel 2D software to simulate and find necessary data to the project.

## **1 Introdução**

A fadiga é um fenômeno que deve ser bem estudado, pois na maioria das falhas causadas por ela acontecem sob carregamentos abaixo dos máximos admissíveis aos materiais obtidos em ensaios de tração em testes quase estáticos. A fadiga é um mecanismo de falha por esforços repetitivos. Estes esforços tanto podem ser de oscilações de temperatura, como choques ou carregamentos alternados. Estes esforços geram pontos de concentração de tensão, micro fissuras, que podem acarretar numa quebra ou falha da peça submetida a estes carregamentos.

## **2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo principal, o projeto de uma máquina de fadiga. No qual fazem parte do projeto a seleção do tipo de fadiga a ser analisada, o projeto e o dimensionamento da máquina. Para tanto serão necessárias pesquisas bibliográficas para buscar uma normalização do ensaio, tipo de fadiga, concepções de máquinas já existentes, e material para o projeto da concepção desenvolvida.

### **3 Revisão Bibliográfica**

#### **3.1 Normas**

##### *3.1.1 Objetivos*

Visa padronizar ensaios e resultados para que possam ser estudados e comparados em qualquer tipo de ensaio, executados em diversas instituições de pesquisa ou prestadora de serviços.

##### *3.1.2 Corpo de prova*

Nas normas para corpo de prova, onde destaca-se a emitida pela American Society for testing and Materials – ASTM – como a E466, mostra tipos de corpo de provas existentes, suas dimensões, seleção e procedimento de usinagem, preparação, armazenagem e inspeção.

O tipo de corpo de prova depende do tipo de ensaio, tipo de máquina, sua capacidade e a maneira que o material está disponível. No entanto o desenho do corpo de prova deve seguir um certo critério.

Segundo a norma E 466 [1]a, a seleção do desenho do corpo de prova deve ser tal que a máxima tensão nunca ocorra acima de 25% da capacidade da máquina e o mínimo nunca ocorra abaixo de 2,5% da capacidade.

A dimensão deve ser escolhida de tal forma que a frequência natural do corpo de prova seja de no mínimo duas vezes a frequência cíclica que a máquina pode aplicar.

Eles podem ser de secção circular ou retangular.

Para a secção circular, o diâmetro da secção de teste deve medir entre 5,08 mm (0,200 polegadas) e 25.4 mm (1,00 polegada). O diâmetro da parte de fixação deve medir no mínimo 1,5 vezes o

diâmetro de teste, porem para a maioria dos materiais é aconselhado pelo menos 4 vezes maior. O raio de arredondamento deve ser no mínimo 8 vezes maior que o de teste, para minimizar o fator de concentração de tensão ( $K_t$ ).

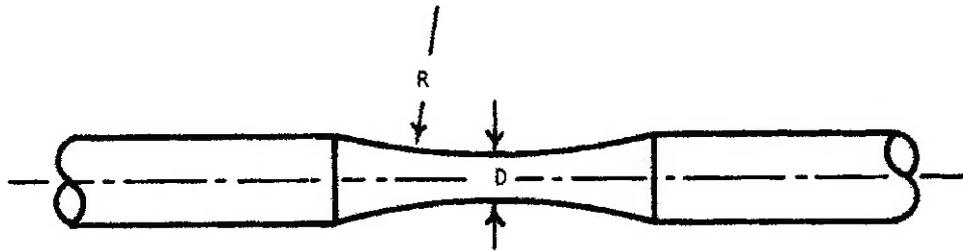


Figura 3.1: Raio de curvatura tangencial entre a secção de teste e extremos.

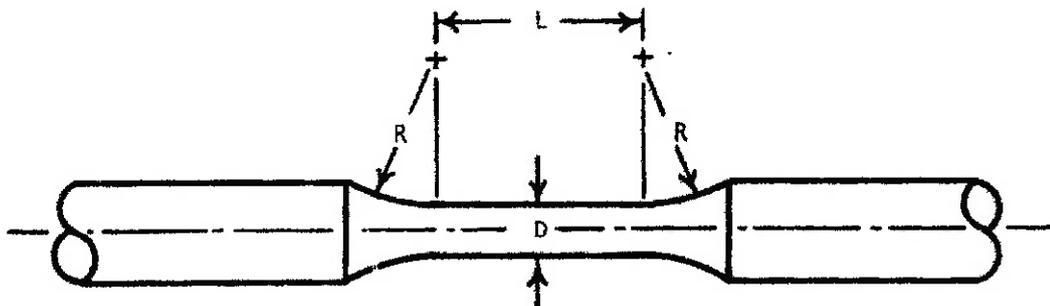


Figura 3.2: Raio de curvatura contínuo.

Para a secção retangular, a razão entre a largura e a espessura deve ser entre 2 a 6 vezes e a área da secção reduzida deve ter entre  $19,4 \text{ mm}^2$  ( $0,030 \text{ in}^2$ ) e  $645 \text{ mm}^2$  ( $1,00 \text{ in}^2$ ). O comprimento da secção de teste deve ser maior que 3 vezes a largura da secção de teste. ( em caso de compressão, deve ser menor que 4 vezes).

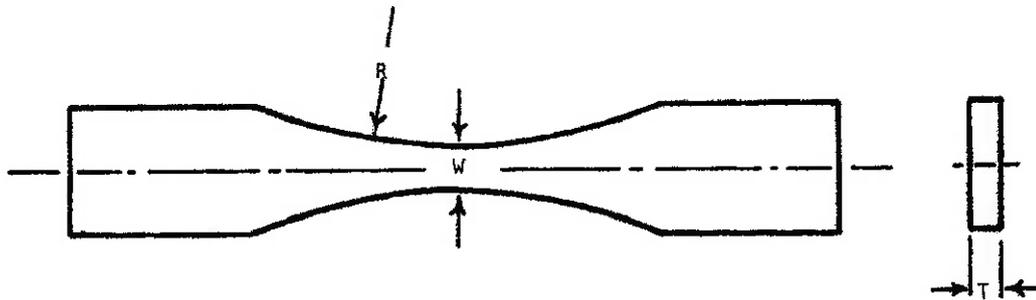


Figura 3.3: Raio de curvatura tangencial entre a seção de teste e extremos.

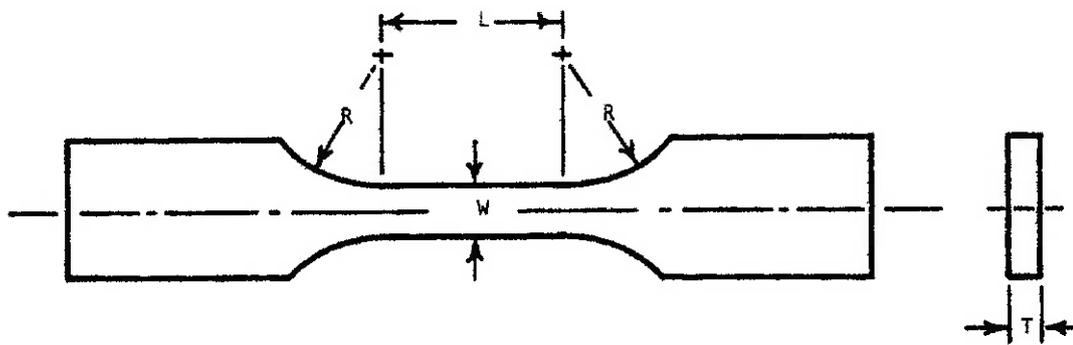


Figura 3.4: Raio de curvatura contínuo

Para corpos de prova com entalhe, não há restrições de geometria de entalhe. Porém devem ser consistentes com o programa de teste aplicado, e também devem ser reportados, a geometria do entalhe, a concentração de tensão associada  $K_t$  e o método e características de sua determinação.

### 3.2 Tipos de máquinas

Segundo o Manual on Fatigue Testing [2], as máquinas de teste de fadiga podem ser classificadas quanto:

- 1) Tipo de carregamento: solicitação ou deformação constante;
- 2) Tipo de solicitação: flexão, torção, tração, etc.;
- 3) Características de acionamento da máquina: mecânico, hidráulico, magnético, etc.;
- 4) Características de operação: ressonante ou não-ressonante.

### 3.2.1 Máquinas de teste de flexões rotativas

A principal característica é de que todas são mecânicas e não ressonantes e toda a superfície da secção crítica do corpo de prova está sujeito as tensões máximas. De acordo com o *Manual on Fatigue Testing* [2], o tipo mais usados possuem 4 pontos de carregamento como o da figura 5a.

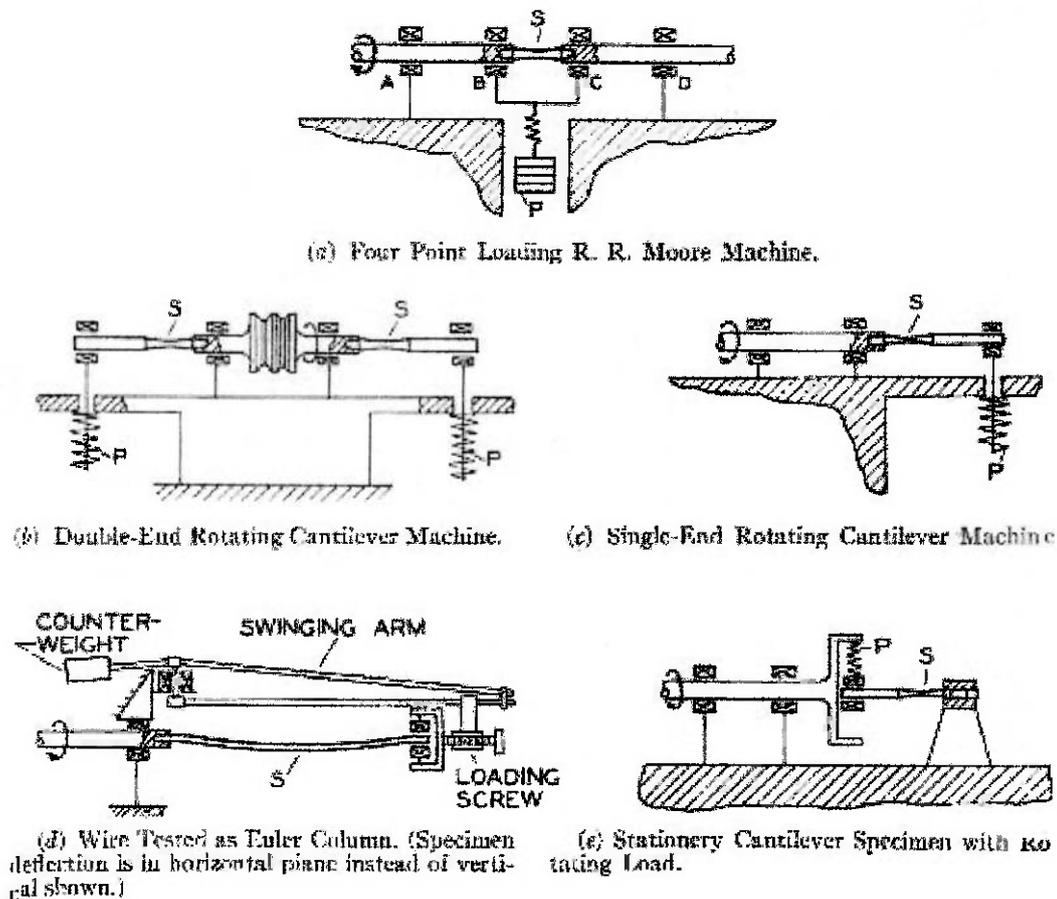


Figura 3.5: exemplo de testes de flexão rotativa

A máquina mostrada pela Figura 3.5 a) de Moore adup *Manual of Fatigue Testing* é a mais utilizada, as distâncias  $AB = CD$  para garantir um carregamento uniforme. Comercialmente esta máquina pode ser encontrada na capacidade de até 10.000 lbin@3600rpm. A mola serve para reduzir qualquer tenção da inércia do peso, resultado por vibrações indesejadas do corpo de prova.

As Figuras 3.5 b) e c) mostram as máquinas feitas por Wöhler adup Manual of Fatigue Testing, estas foram muito utilizadas em sua época, pois eram baratas e permitiam testes de corpos de secções grandes. A figura 5d mostra uma modificação da máquina mostrada na figura 5c, fazendo com que ela ensaia-se arames.

A máquina da Figura 3.5e) foi descrita por Gough e Moore adup Manual of Fatigue Testing, nesta máquina, uma extremidade do corpo de prova fica rigidamente fixa a um suporte e a outra corre dentro de um mancal que gira em torno dele, recendo a carga em baixo ciclo por uma mola que gira junto com o mancal.

### 3.2.2 Máquinas de flexão repetitivas

Os modelos mecânicos geralmente usam sistemas de eixos excêntricos ajustáveis para gerar os movimentos repetitivos, como pode ser visto a seguir:

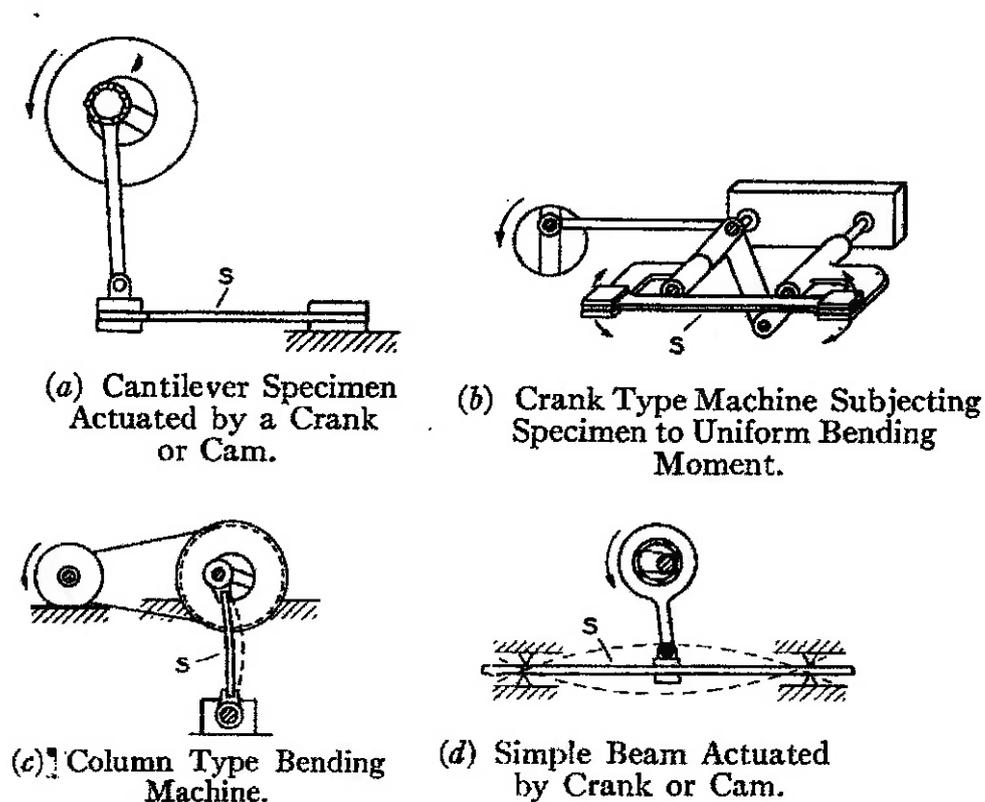


Figura 3.6: exemplo de máquinas mecânicas de teste de flexão repetitiva

As figuras 3.6 a) e d) são muito similares, porem em a o esforço é aplicado em um extremo do corpo de prova enquanto no outro a excitação é aplicada no centro. Na figura 6c a excentricidade é aplicada diretamente no corpo de prova e na figura 6b a excitação do excêntrico é aplicada a um sistema de barras.

Os modelos magnéticos utilizam corrente alternada para gerar campos magnéticos alternados nas bobinas aplicando os carregamentos. Para este sistema pode-se observar pela figura 3.7b) que se desejar um carregamento alternado contínuo, é necessário um sistema de controle.

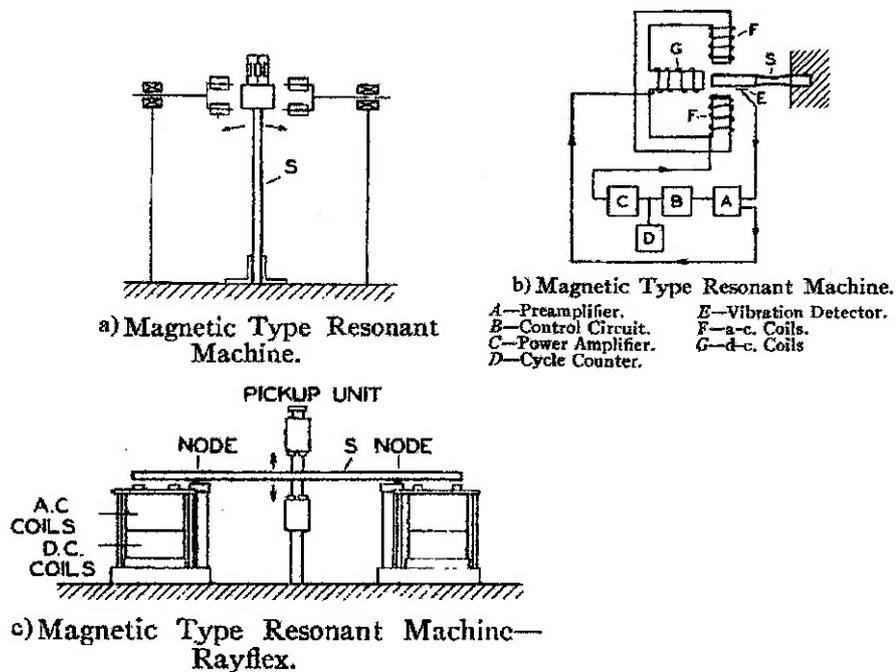


Figura 3.7: Exemplo de máquina magnéticas de teste de flexão repetitiva.

O modelo pneumático utiliza o fluxo de ar, direcionados a uma extremidade do corpo de prova, para gerar um esforço e provocar a deformação. Este sistema é controlado por válvulas para que se possa aplicar o carregamento de forma alternada.

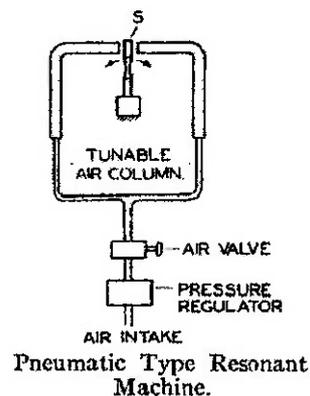


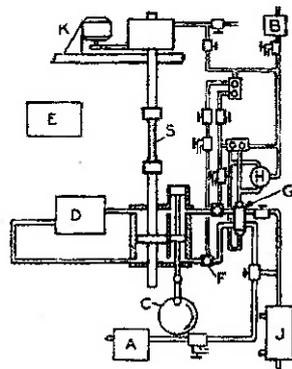
Figura 3.8: exemplo de máquina pneumática de teste de flexão repetitiva.

### 3.2.3 Máquina de carregamento Axial

A fadiga por tração e compressão, ocorre com tensões altas, necessitando assim sistemas de porte maior para gerar um carregamento axial adequado para o teste. Por este motivo a maioria dos tipos são hidráulicos, porém também são encontrados modelos mecânicos e magnéticos.

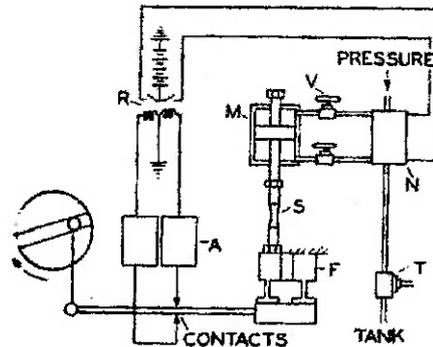
#### Modelos hidráulicos

A figura 3.9 a) mostra a máquina de Krouse adup Manual of Fatigue Testing, onde a excitação excêntrica é aplicada a uma barra que acoplada a um sistema de pratos flexíveis (F), aplica uma força de razão 10 para 1, e o carregamento máximo constante é mantido por um sistema hidráulico ligado em série com o corpo de prova e sua capacidade vai de 5000 a 100000 com 1500rpm para o tamanho menor e 500 rpm para o maior.



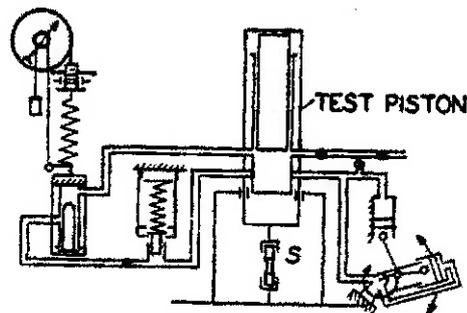
(b) Krouse-Purdue Direct Stress Machine.

A—Fifty five-G.P.M. Pump.  
 B—Five G.P.M. Pump.  
 C—High Speed Drive and Amplitude Control.  
 D—Pressure Control.  
 E—Electronic Unit.  
 F—Selector Valves.  
 G—Four-Way Valve.  
 H—Pilot.  
 J—Oil Cooler.  
 K—Hydraulic Nut.

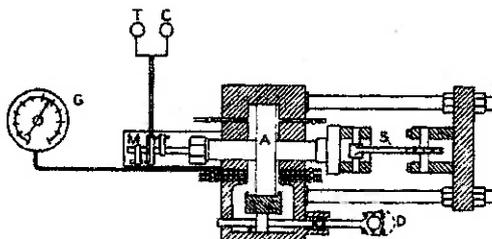


(a) Crank and Lever Operated Machine—Krouse.

A—Amplifiers.  
 V—Flow Control Valves.  
 F—Flexure Plates.  
 T—Low Pressure Throttle.  
 M—Hydraulic Load Maintainer.  
 R—Relays.



(c) Amsler Pulsator.



d) G.M.R. Pulsator.

A—Loading Piston.  
 B—Actuating Piston.  
 M—Micrometer Contactors.  
 D—Crankshaft.  
 T and C—Neon Lamps Indicating Tension and Compression.  
 G—Oil Pressure Gage.

Figura 3.9: Exemplos de máquinas hidráulicas de teste de flexão repetitiva

O modelo b) de Krouse-Purdue adup Manual of Fatigue Testing, utiliza um pistão para aplicar a força que é controlada por uma válvula acionada por um sistema de barras e um excêntrico. O desenho 3.9c) é

de Amsler *adup Manual of Fatigue Testing*. Este modelo é um projeto sem válvulas e uma bomba diferencial de pistões em forma de V, pode a partir do ângulo dos cilindros da bomba, controlar o volume resultante do conjunto e este volume corresponde a uma determinada carga aplicada pelo pistão principal ao corpo de prova.

O modelo de G.M.R. *adup Manual of Fatigue Testing*, mostrado na figura 3.9d), possui dois cilindro pequenos acionados por um eixo-biela ajustável, dessa maneira, o óleo bombeado por estes cilindros, acionam o pistão principal que esta ligado ao corpo de prova.

### Modelo mecânico e magnético

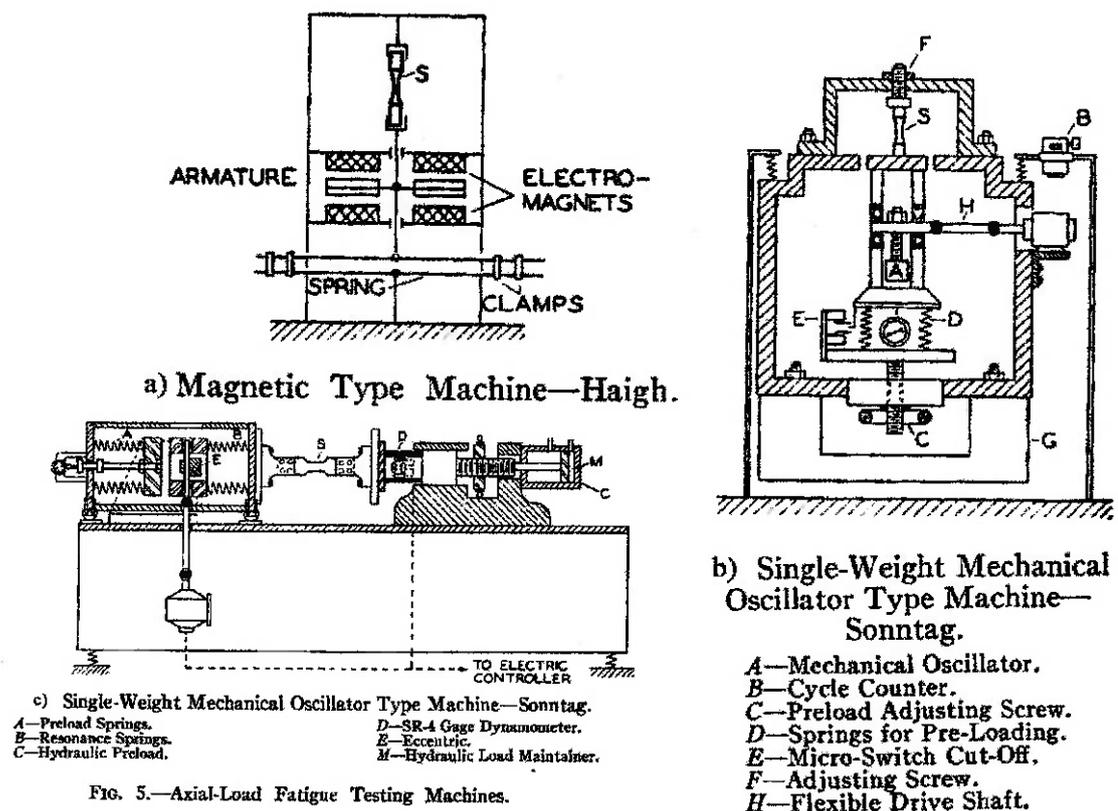


Figura 3.10: Exemplos de máquinas mecânica e magnética de teste axial.

### 3.2.4 Máquina de torção

De uma forma geral, utilizam uma roda de inércia, para aplicar a carga e usa excentricidade para a periodicidade do carregamento. O modelo de Mc Adam adup Manual of Fatigue Testing, (figure11a) usa em uma extremidade um sistema de barras para o acionamento, e na outra extremidade utiliza um peso morto, uma roda de inércia para a aplicação da carga. Enquanto a segunda figura utiliza Uma barra elástica para aplicar a força, e é acionada diretamente por barras e camo. O modelo da figura 3.11c) possui o corpo de prova em série com um disco de inércia funcionando como uma armadura em campo magnético onde corrente alternada gera os impulsos.

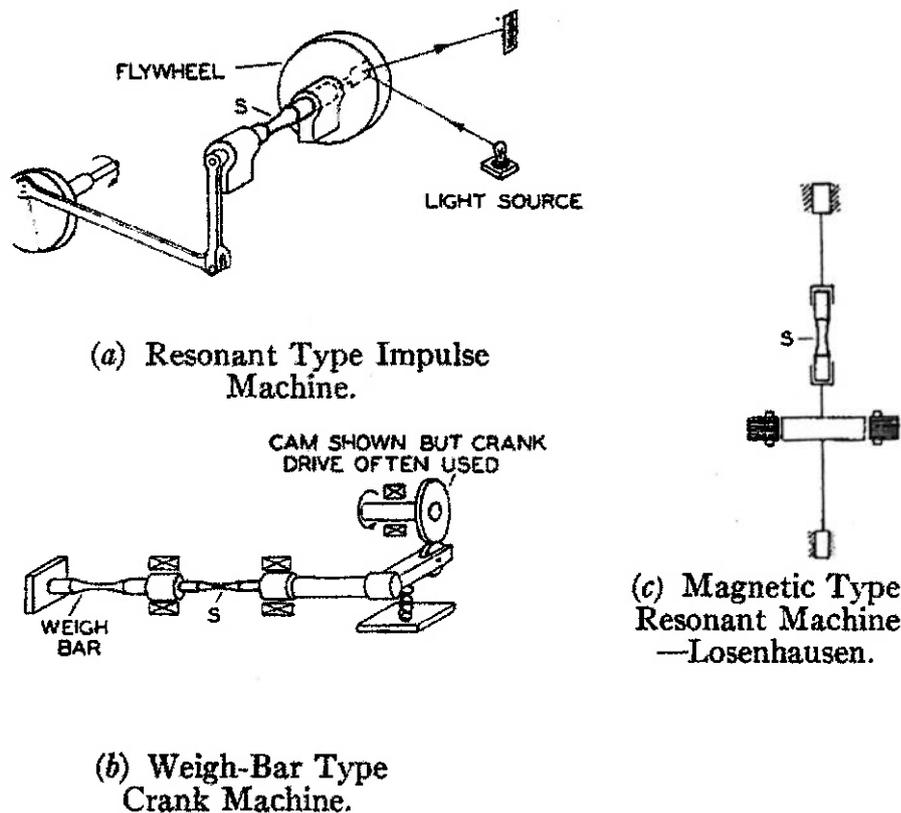
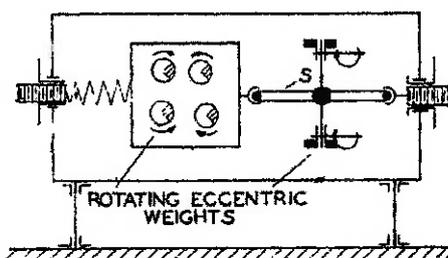


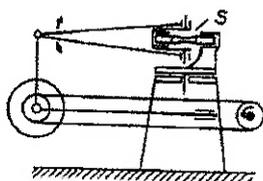
Figura 3.11: Exemplo de máquina de teste de torção

### 3.2.5 Máquinas de carregamento combinado (multiaxial)

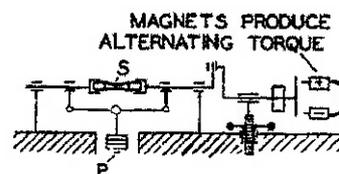
Estes tipos de máquina se tornam mais complexas que os de teste individuais, pois necessitam melhores sistemas para aplicação e medição dos esforços.



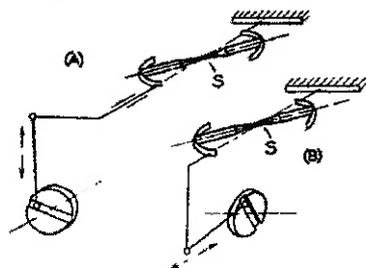
(a) Mechanical-Oscillator Type Machine for Applying Alternating Torsion and Pulsating Axial Loading—Schenck.



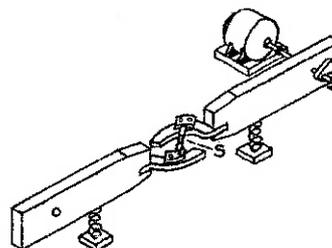
(c) Combined Repeated-Bending and Reversed-Torsion Stress Machine—Gough and Pollard.



(b) Combined Rotating-Bending and Reversed-Torsion Stress Machine.



(d) Attachments to Conventional (A) Repeated-Bending and (B) Reversed-Torsion Machines to Obtain Combined Bending and Torsion Stress.



(e) Mechanical Oscillator Type of Combined Repeated-Bending and Reversed-Torsion Stress Machine.

*D*—Dynamometer consisting of torsion bar and disk gages *G*.  
*M*—Mass.  
*E*—Mechanical oscillator.

Figura 3.12: Exemplo de máquina de teste multiaxial

## 3.3 Apresentação de resultados

### 3.3.1 Apresentação de Dados

Aconselha-se tabular os resultados, identificando corpo de prova, seqüência de teste, tensões dinâmicas (duas das: máximas, mínima, média, amplitude ou faixa, e taxa), vida de fadiga ou ciclos



Apesar da curva S-N ser apresentada como uma única curva, ela representa muito mais, ela representa uma família de curvas de probabilidade de ocorrer a falha, isto se deve ao fato da curva ser feita a partir de dados estatísticos, apresentando uma distribuição de ocorrências para cada carga testada. A representação destas curvas pode ser vistas no exemplo da figura abaixo.

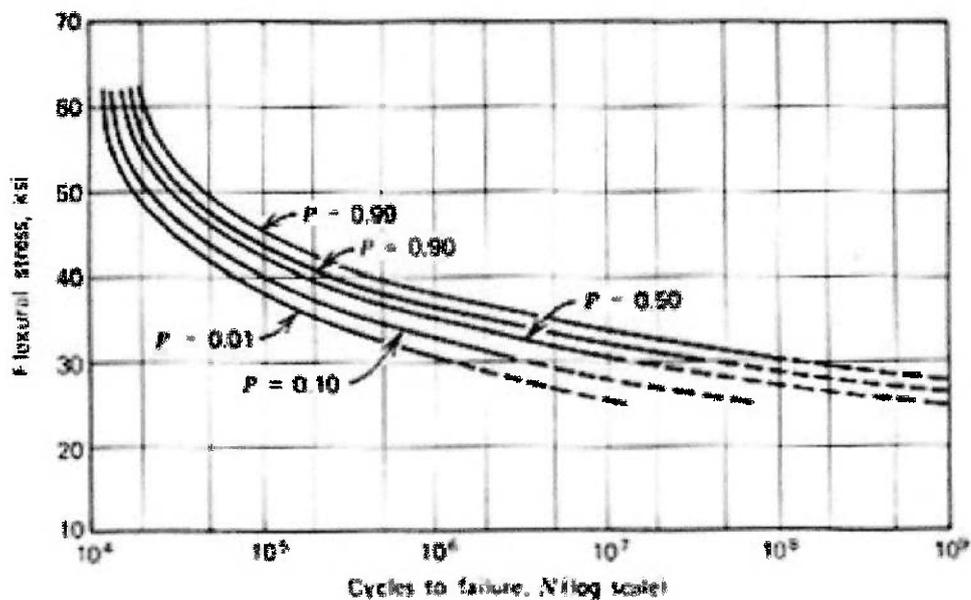


Figura 3.14: Diagrama S-N com as curvas de probabilidade

### 3.3.2.2 Diagrama constante de vida

Para alguns casos, também é aplicável a apresentação de gráficos de constante de vida, que relaciona amplitude de tensão e tensões mínimas e máximas.

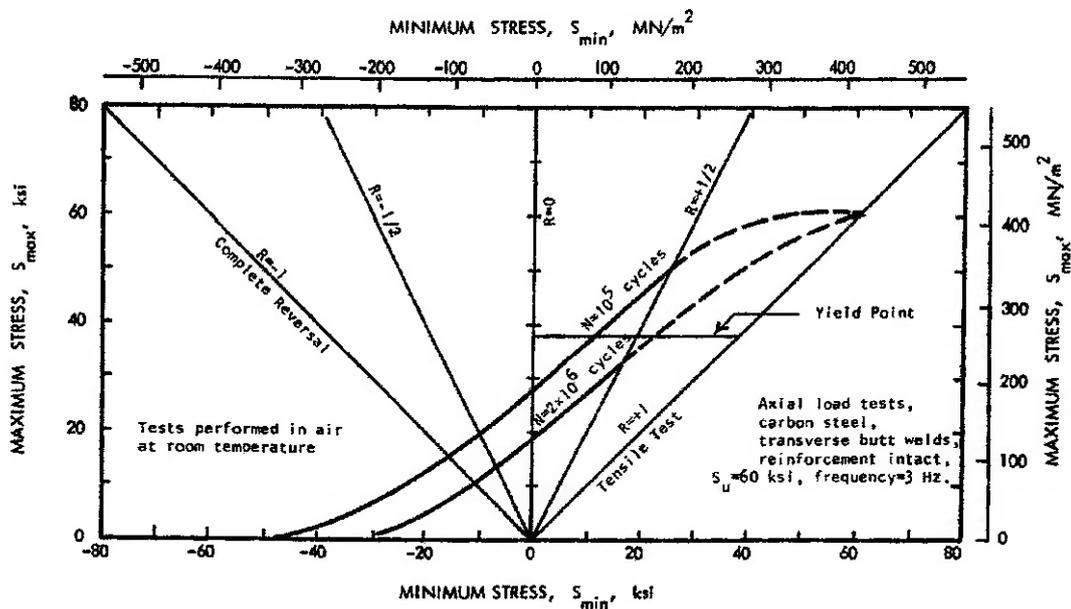


Figura 3.15: Diagrama Constante de vida (tensão mínima X tensão máxima)

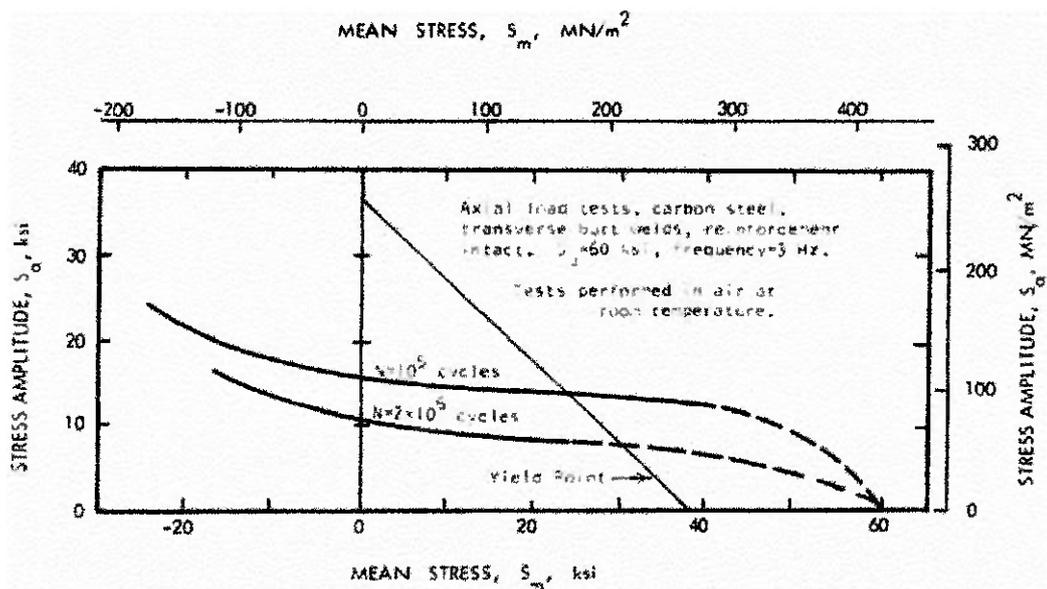


Figura 3.16: Diagrama Constante de vida (tensão média X amplitude de tensão)

Quando o Diagrama de Constante de vida é apresentado, é necessária a apresentação do Diagrama S-N de onde foi construído.

## **4 Seleção do tipo da fadiga**

Nesta parte do trabalho será selecionado o tipo de fadiga para qual haverá um projeto de uma máquina de ensaio. Esta seleção será feita pela análise de diversos aspectos que serão julgados importantes pelo aluno. Onde será utilizada uma matriz de decisão. Nesta matriz, haverá uma ponderação das notas dadas a cada conceito e esta ponderação será de 1 a 5. O conceito, da mesma maneira que a ponderação será de 1 a 5. Onde a melhor escolha será aquela que obtiver o melhor total de conceitos.

### **4.1 Aspectos relevantes para a seleção**

#### **4.1.1 Interesse do aluno (fator X5)**

Este aspecto indica o grau de interesse do aluno de desenvolver um trabalho em um determinado tipo de fadiga. Quanto maior o conceito, maior é o interesse despertado pelo aluno em desenvolver o tema.

#### **4.1.2 Facilidade de construção (fator X3)**

A facilidade de construção procura apontar de uma maneira genérica qual tipo de ensaio de fadiga é mais fácil de ser implementado. Neste aspecto, quanto maior o conceito, mais simples é a maneira de se implementar o ensaio.

#### **4.1.3 Estudo histórico (fator X2)**

O aspecto de estudo histórico indica o quanto o tipo de ensaio já foi estudado anteriormente. Onde o conceito será dado de maneira que o menos estudado receberá o maior conceito.

## 4.2 Matriz de Decisão

Tabela 4.1: Matriz de Decisão do tipo de fadiga

Aspecto	Peso	Axial	Flexão rotativa	Flexão repetitiva	Torção	Multiaxial
Interesse do Aluno	5	1	3	1	5	5
Facilidade de Construção	3	2	4	5	3	1
Estudo Histórico	2	1	2	1	3	5
<b>TOTAL</b>		13	31	22	40	38

Para o item interesse do Aluno, os conceitos dados aos aspectos, refletem o fato de que o aluno está estagiando em uma empresa onde trabalha principalmente com acoplamentos, nos quais as principais grandezas inerentes a seleção são o torque e o momento fletor. O torque diretamente ligado a finalidade do acoplamento que é transmitir potência de um eixo para o outro por torque e rotação e o momento fletor que pode ser causado por desalinhamentos dos eixos acoplados, gerando esforços nos mancais.

No item Facilidade de Construção, procura-se analisar os tipos de máquinas existentes para cada tipo de ensaio e determinar quais são as mais simples. A busca de um modelo simplificado se deve ao fato de procurar-se fazer um projeto de uma máquina de ensaio de fadiga de maneira que possa ser usado didaticamente, porém buscando resultados de maneira normalizada.

O estudo histórico mostra de uma maneira simplificada, o quanto estes tipos de ensaio já foram desenvolvidos e estudados. Para tanto se procurou dar um maior conceito para aquele menos estudado. E conforme foi descoberto os itens mais estudados são os ensaios de tração e flexão, enquanto o menos estudado é a multiaxial.

## **5 Seleção do tipo de máquina**

Após a determinação de que se pretende ensaiar a fadiga a torção, inicia-se a fase de geração de alternativas onde o aluno gerará diversas idéias para o tipo de máquina, tipo de acionamento, tipo de dispositivos de fixação da amostra e outros sistemas.

A partir das alternativas geradas, será feita a escolha da alternativa que melhor desempenhar o sistema estudado.

A seguir serão apresentados os sistemas principais para o projeto de uma máquina de ensaio de fadiga.

### **5.1 Tipo de acionamento**

Os acionamentos podem ser:

- Hidráulicos;
- Magnéticos;
- Mecânicos;
- Pneumáticos.

As opções pneumáticas e hidráulicas são complexas, pois necessitam de diversos outros sistemas como reservatórios ou tanques, bombas, compressores, tubulações, válvulas, preocupação com os sistemas de vedação, maior dificuldade de controlar os esforços, necessitando de uma maneira geral de um conjunto grande com diversos itens. Abaixo esta um esquema de uma máquina de ensaio de fadiga axial hidráulica, porém ela serve de exemplo para visualizar a complexidade do projeto de um sistema hidráulico ou pneumático, que é muito semelhante.

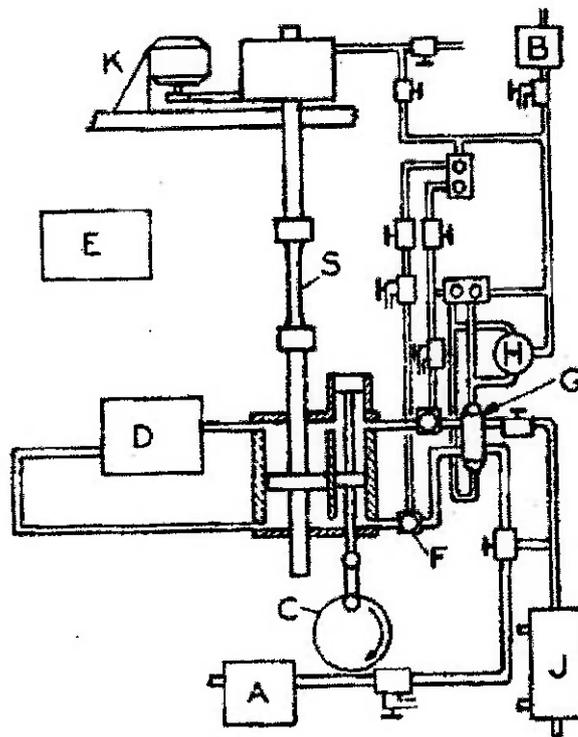


Figura 5.1: Opção pneumática e hidráulica

Os magnéticos, também necessitam de diversos outros sistemas eletrônicos para que se possa controlar a aplicação de cargas alternadas. Abaixo está um exemplo de um sistema magnético de uma máquina de teste de fadiga de flexão repetitiva, no qual pode ser observada a necessidade de um sistema de controle para que se possa ser aplicada uma carga alternada corretamente.



fixa ao motor ou um camo faz (Figura 19: a)). Enquanto o mecanismo de 4 barras (Figura 19: b)) é o tradicional com uma manivela e uma biela, que estão representados na figura como barras.

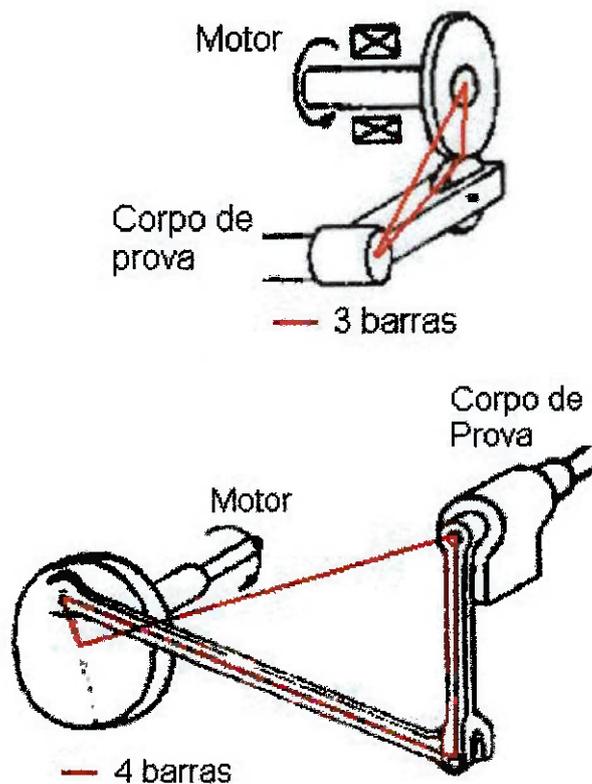


Figura 5.3: Mecanismos de acionamento de 3 e 4 barras

A escolha será a de 4 barras, pois se procura evitar atrito entre partes móveis e esta opção possibilita a utilização de mancais de rolamento em todas as articulações. Na figura acima, O sistema esta representado por barras, no entanto no projeto pode ser utilizados discos, está definição só poderá ser conseguida na segunda parte do projeto quando houver o dimensionamento.

### 5.3 Tipo de carga

A carga pode ser gerada pela inércia de um disco de inércia ou uma barra elástica que possui uma de suas extremidade fixa.

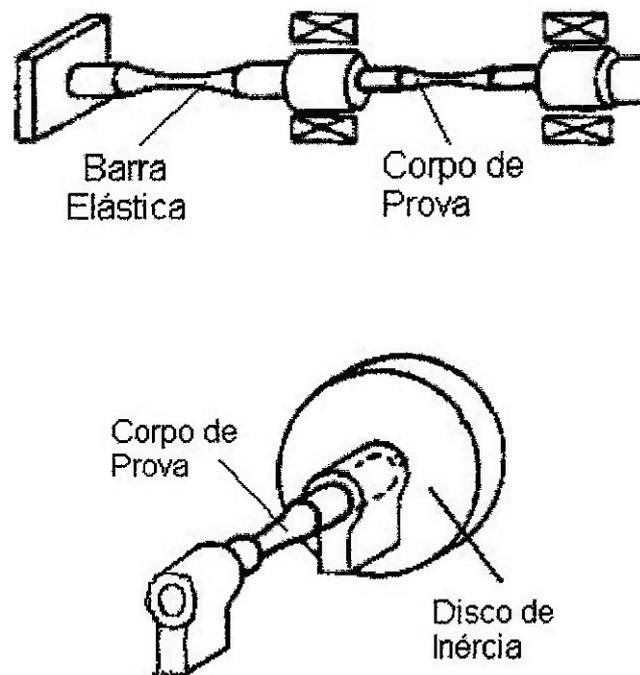


Figura 5.4: Tipos de carga para o sistema

A barra elástica utiliza sua rigidez  $K$  para acumular a energia do movimento, refletida na aplicação de torque no corpo de prova. Enquanto no sistema de disco o torque surge na aceleração e desaceleração angulares do disco.

A opção de disco é a mais indicada, pois permite uma fácil variação do esforço, necessitando somente trocar o disco, que é uma peça simples.

#### **5.4 Fixação do corpo de prova**

A fixação do corpo de prova pode ser feita de diversas maneiras, como:

- Superfície cônica da extremidade do corpo de prova ou de uma bucha;
- Luvas que prendem o corpo por compressão;
- Parafuso ou pino;
- Seção geométrica da extremidade.

As superfícies cônicas utilizam como meio de fixação o atrito de superfícies que é conseguidos com esforço normal a superfície que é mais facilmente conseguido com um pequeno esforço axial, isto se deve a geometria que faz com que uma pequena força radial gere uma resultante normal a superfície muito maior, conseqüentemente o atrito.

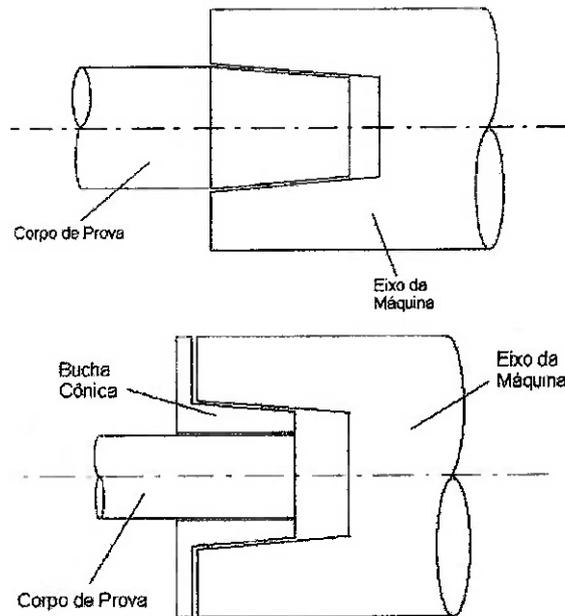


Figura 5.5: Fixação por superfície cônica

A fixação por luva é um tipo de fixação por atrito de superfícies, conseguido com a compressão da superfície interna de um tubo sobre o elemento, necessitando uma força maior que no caso das superfícies cônicas.

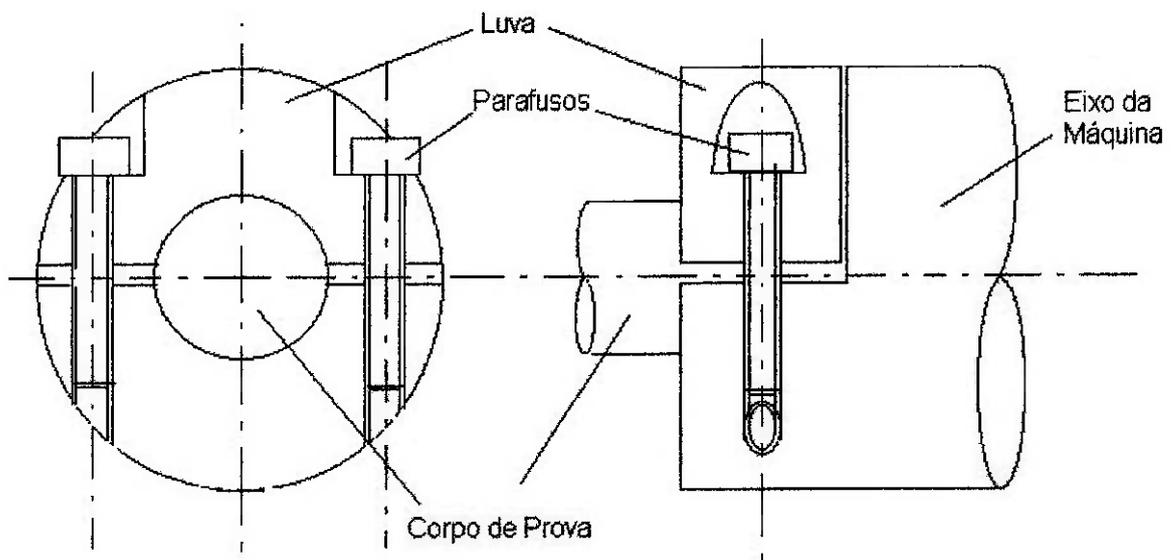


Figura 5.6: Fixação por luva

O tipo de fixação por parafuso ou pino é simplesmente o corpo de prova parafusado ao eixo ou com um pino. Este tipo de sistema gera pontos de concentração de tensão no corpo de prova na região do furo.

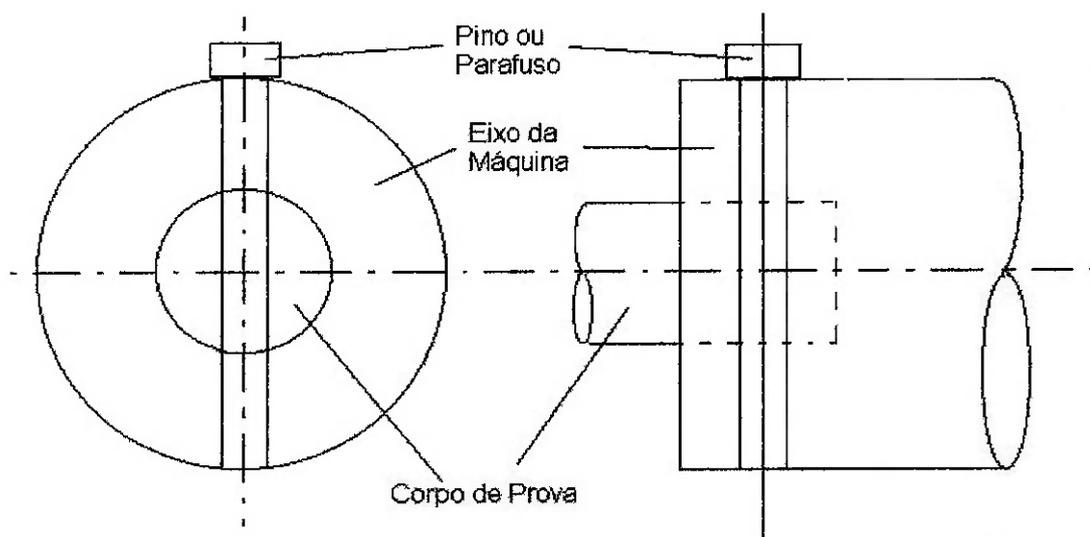


Figura 5.7: Fixação por parafuso ou pino

As secções geométricas proporcionam encaixes que possibilita a transmissão de força, porem, como o corpo de prova é de secção

circular, este sistema, assim como o sistema de parafusos gera regiões de concentração.

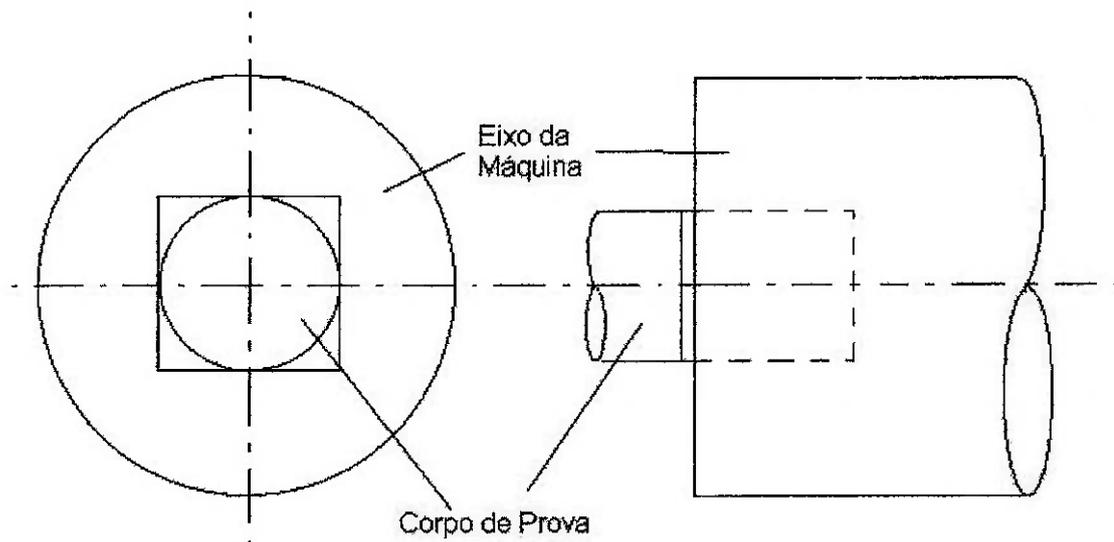


Figura 5.8: Fixação por secção geométrica da extremidade

Dentre todas estas opções, as mais prováveis são de luva ou de conicidade, pois não geram regiões de concentração de tensão no corpo de prova,

### **5.5 Tipo de falha**

Para se efetuar ensaios de fadiga, antes de começar a coletar dados deve-se haver uma definição do tipo de falha que será analisada. Dentre os principais tipos de falha temos:

- Deformação da superfície do corpo de prova;
- Início de alongação do corpo de prova;
- Início de fratura do corpo de prova;
- Rompimento do corpo de prova.

A falha por deformação de superfície acontece quando houver o primeiro sinal de deformação da superfície, onde haverá aumento de rugosidade, aparecimento de superfícies com forma de grãos. O início de alongação, mostra o início de deformação plástica que se apresenta como um alongamento acima de uma alongação máxima especificada.

O início de fratura é o ponto que se começa a ser observado alguma trinca, ou seja, o início da propagação da trinca. A falha por rompimento é determinada quando a propagação da trinca chega a seu ponto máximo, ocasionando o rompimento total do corpo de prova em duas partes.

Como já apresentado como o projeto visa uma máquina didática, o tipo de falha a ser escolhido é o por rompimento do corpo de prova, pois sua determinação pode ser conseguida facilmente, basta observar quando o corpo de prova divide-se em dois por completo.

## 6 Máquina escolhida

Da seleção do tipo de ensaio, dos tipos dos sistemas da máquina e o tipo de falha, pode-se apresentar as características gerais como sendo:

Máquina de ensaio de fadiga a torção:

- Tipo: mecânica;
- Esforços alternados – Acionamento por barras;
- Carga aplicada por um disco de inércia;
- Fixação do corpo de prova por superfície cônica ou luva;
- Falha por rompimento completo do corpo de prova;

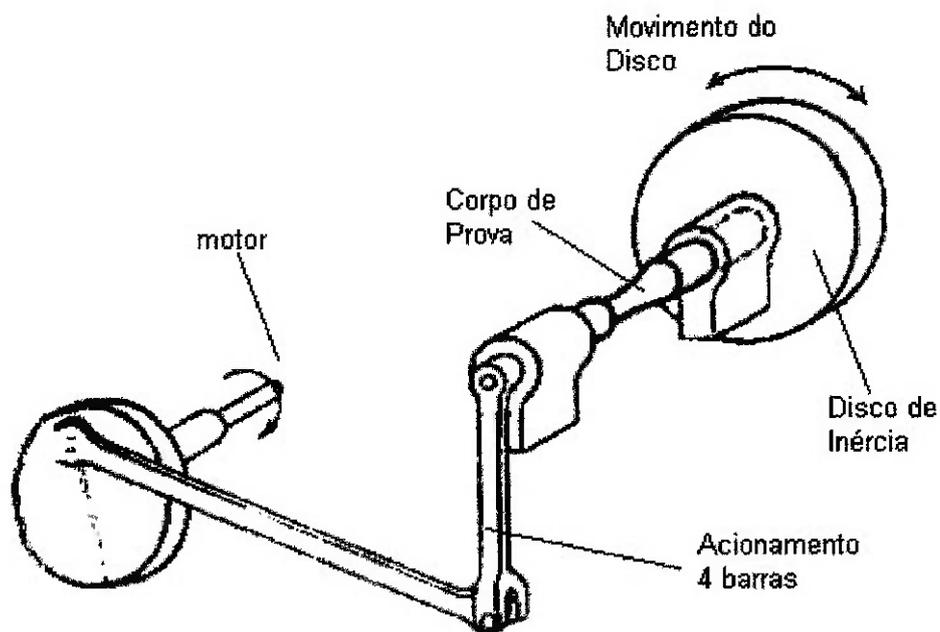


Figura 6.1: Esquema da máquina selecionada

## 7 Dimensionamento

### 7.1 Corpo de Prova

Para o dimensionamento do corpo de prova estudou-se a relação entre o torque, a tensão de escoamento ( $S_y$ ) e o diâmetro da secção de teste para diversos materiais.

Segundo Norton, A tensão máxima de uma secção circular acontece na extremidade, na periferia da secção, ou seja,  $r$  da secção, e é dado pela formula:

Rearranjando esta formula, temos que o torque pode ser encontrado por:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{T * r}{J} \quad (7.1)$$

Rearranjando esta formula, temos que o torque pode ser encontrado por:

$$T = \frac{\tau_{m\acute{a}x} * J}{r} \quad (7.2)$$

Onde  $J$ , momento polar, pode ser calculado por:

$$J = \frac{\pi * d_{teste}^4}{32} \quad (7.3)$$

Substituindo o momento polar da equação 2, temos:

$$T = \frac{\tau_{m\acute{a}x} * \pi * d_{teste}^3}{16} \quad (7.4)$$

Considerando cargas fletoras e de compressão no corpo de prova temos:

$$\tau_{m\acute{a}x} = S_y \quad (7.5)$$

Dessa forma obtemos a relação para o corpo de prova:

$$T = \frac{S_Y * \pi * d_{teste}^3}{16} \quad (7.6)$$

Pode-se assim tabelar (Tabela 7.1) esta relação para diversos diâmetros de teste e diferentes materiais.

Tabela 7.1: Corpo de Prova

Material	Tensão de escoamento	Diâmetro (m)			
	Sy (Mpa)	0.019	0.0127	0.010	0.008
1020	294.8	400	119	58	30
1040	353.4	480	142	69	36
4340	472.3	641	190	93	47
inox 304	241.3	328	97	47	24
Ti-35 <sup>a</sup>	172.0	233	69	34	17
T1-13 V-11 Cr-3 Al Alloy	896.0	1,216	360	176	90
Cast Iron classe 20	152.0	206	61	30	15

Observando os dados tabelados, determinou-se que o diâmetro de 12,7 mm (1/2 polegadas) seria o maior diâmetro de teste e que se pode ainda trabalhar com os diâmetros de 8 mm (mínimo) e 10 mm.

Dessa forma obedeceu-se as relações:

$$\text{Diâmetro de base: } D_{base} \geq 4 * d_{teste} \quad (7.7)$$

$$\text{Raio de concordância: } R \geq 8 * d_{teste} \quad (7.8)$$

$$\text{Comprimento da teste: } L_{teste} \geq 10 * d_{teste} \quad (7.9)$$

Estabeleceu-se que o diâmetro de base fosse igual, para facilitar o projeto do sistema de fixação do corpo de prova (ver desenho 01200 - Corpo de Prova), dessa forma obteve-se as seguintes dimensões para os corpos de prova possíveis:

Tabela 7.2: Dimensões do Corpo de Prova

Dia (mm)	R1 (mm)	Ltotal (mm)	Lteste (mm)
8	64	265.5	80
10	80	295.8	100
12.7	101.6	335.5	127

Dimensões conseguidas através de desenhos feitos no programa AUTOCAD®.

## 7.2 Luva

O sistema de fixação escolhido é o de luva, onde o corpo de prova será fixado por uma chaveta que deve ter um ajuste justo no corpo de prova e na luva, ele será encaixado e pressionado pela luva, que é de duas peças. O lado do eixo, esta luva é simplesmente fixada por uma chaveta e um parafuso de fixação (set screw), para que os rasgos de chaveta de ambas extremidades do corpo de prova fiquem do mesmo lado, a luva de uma extremidade deve ser o oposto da outra extremidade (ver desenho 01100, 01110, 01120).

## 7.3 Eixo Corpo de prova/ Disco de Inércia

Este mesmo eixo será utilizado para a união do corpo de prova e a Barra2. As dimensões para o Corpo de prova/ Disco de Inércia (ver desenho 00900 - Corpo de prova/ Disco de Inércia) foram determinadas a partir do diâmetro da base de fixação do corpo de prova, com o intuito de facilitar o projeto, e posteriormente será feita uma verificação do dimensionamento do eixo.

Dimensionamento da chaveta:

$$\text{Compressão: } T = \frac{S_Y * L_{chaveta,comp} * h_{chaveta} * d_{eixo}}{2} \quad (7.10)$$

$$\text{Cisalhamento: } T = \frac{0,58 * S_Y * L_{chaveta,cisa} * w_{chaveta} * d_{eixo}}{2} \quad (7.11)$$

Tabela 7.3: Dados para cálculo de chaveta

Local	Diâmetro	Largura	Altura	material (Sy)
	mm	mm	Mm	Mpa
Disco/Inercia	40	12	8	2.94E+08
Corpo de prova	50.8	16	10	2.94E+08

Tabela 7.4: Comprimento mínimo de chaveta

Local	Torque	$L_{chaveta,comp}$	$L_{chaveta,cisa.}$	$L_{mínimo}$
	Nm	mm	mm	mm
Disco/Inercia	80	1.95	1.70	1.95
Corpo de prova	80	1.15	1.07	1.15

Será utilizado chavetas de comprimento de 20mm.

Analisando o esmagamento do corpo de prova e da luva na região da chaveta temos:

Tabela 7.5: Esmagamento pela chaveta

	Torque	Comp	altura	Tensão
	Nm	mm	mm	Mpa
Esmagamento	80	20	4	1.97E+07

Que mostra que a tensão de esmagamento é muito pequena visto os possíveis materiais que possam ser testados.

#### 7.4 Rolamento dos mancais

Seguindo o mesmo princípio do dimensionamento dos eixos, escolheu-se um rolamento a partir do desenho dos eixos (Eixo Corpo de prova/ Disco de Inércia e Eixo Corpo de Prova/ 4 Barras).

Encontrando assim o rolamento:

Modelo: 7009<sup>a</sup> DB

Arranjo tipo: O

Diâmetro do eixo: 45mm

Diâmetro externo: 75mm

Largura: 32mm (16mm cada)

Cr: 37.500N

Cor: 37.500N

Rotação máxima: 7500rpm (graxa)

Demais dimensionais podem ser encontrados no Catálogo NSK ROLAMENTOS seção B 54 e B 55.

Após a determinação das cargas envolvidas, será feita a verificação da adequação do rolamento ao projeto. Porém para uma verificação inicial, para o mancal que fica do lado dos discos de Inércia, tem-se os seguintes dados:

Carga Radial = 150N cálculo aproximado.

Rotação máxima de 900rpm (na realidade, 900 ciclos de operação por minuto);

Vida Nominal L de no mínimo 108 rev.

Para  $L \geq 108$  rev. Tem-se  $f_h \geq 4,65$  e para 900 rpm tem-se  $f_n = 0,333$  (ver secções C24 e C25 do Catálogo NSK ROLAMENTOS);

$P = F_r = 150N$

$$f_h = f_n * \frac{C_r}{P} \Rightarrow C_r = f_h * \frac{P}{f_n} \quad (7.12)$$

$$C_r \geq 4,65 * \frac{150}{0,333} = 2.095N \quad (7.13)$$

O rolamento escolhido 7009A DB, atende perfeitamente esta verificação e por sua capacidade de carga  $C_r$  de 37.500N, ele forneceria um  $f_h$  de 83, que representa um L maior que 1011 rev.

### **7.5 Mancal**

O projeto do mancal (ver desenho 01000 - Mancal) levou em consideração a necessidade de se garantir um bom alinhamento, para tanto este projeto considerou que se faria a usinagem do furo para rolamentos e do rasgo da chaveta-guia com os dois mancais ao mesmo tempo.

Os rolamentos serão ficados no mancal por anéis elásticos.

O alinhamento de montagem dar-se-á por meio dos rasgos da chaveta-guia que serão os mesmos para ambos os mancais.

O mancal que estará ligado ao sistema de acionamento (4 barras) será fixo a Base (A Base será apresentada a seguir). Enquanto o mancal que carregará o disco de inércia terá a liberdade de

transladar longitudinalmente sobre a Base, guiada pelas chavetas-guias.

Para o dimensionamento da distância entre o centro do furo dos rolamentos no mancal e a Base, observou-se a compatibilidade física do Disco de Inércia de maior diâmetro.

### **7.6 Base**

A Base (ver desenho 01400 - Base) leva em consideração os rasgos das chavetas-guias dos mancais assim como os rasgos e furos para os parafusos que fixam os mancais.

### **7.7 Cubo/ Flange do Disco de Inércia**

Esta peça (ver desenho 00600 - Cubo/ Flange do Disco de Inércia) serve como base para a fixação dos discos de Inércia ao eixo. A fixação ao Eixo Corpo de prova/ Disco de Inércia é feita por uma chaveta e um parafuso de fixação em cima da chaveta e afixação do disco é feita por 4 parafusos distanciados a 90°.

Como este sistema de flange e Disco de Inércia trabalha em um sistema alternado de direção, a verificação dos parafusos será feita apenas por cisalhamento puro, pois há uma dificuldade maior de garantir a fixação do disco e da flange pelo atrito entre superfícies.

Considerações:

- O torque máximo a ser aplicado ocorre com o disco maior;
- Desprezando a influência da força de atrito entre superfícies para o efeito de fixação;
- Desprezando a força axial nos parafusos;
- Distribuição por igual das cargas em todos os parafusos.

Dessa maneira temos:

Torque aplicado:

$$T = Ix_{\text{disco}10} * \alpha_{\text{máximo}} \quad (7.14)$$

Força aplicada em cada parafuso:

$$F = \frac{T}{N_{n.\text{parafusos}} * r} \quad (7.15)$$

Admitindo-se um fator de segurança de 2 para garantir as aproximações envolvidas nas considerações:

$$F_{\text{corrigido}} = FS * F \quad (7.16)$$

Para uma secção circular carregada com cisalhamento puro tem-se para o ponto de maior carregamento a tensão de cisalhamento de:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{4}{3} * \frac{F}{A} \quad (7.17)$$

Onde a área A é dada por:

$$A = \pi \frac{d_{\text{base}}^2}{4} \quad (7.18)$$

onde  $d_{\text{base}}$  é o diâmetro da base do parafuso.

Dessa maneira temos uma tensão de cisalhamento máxima de aproximadamente 4MPa, mostrando que os parafusos agüentarão mesmo que eles trabalhem em cisalhamento puro.

### **7.8 Discos de Inércia**

Os discos de Inércia (ver desenho 00700 - Discos de Inércia) são anéis com o diâmetro interno e espessuras iguais, podendo assim variar somente o diâmetro externo. Dessa forma variando o diâmetro externo, conseguimos os seguintes discos bases:

Tabela 7.6: Disco de Inércia

Disco	densidade	Comp.	Diâ. Ext.	Diâ. Int.	Massa	Ix
	kg/m <sup>3</sup>	mm	mm	Mm	Kg	kgm <sup>2</sup>
1 (Menor)	7700	10	110	70	0.435	3.9E-04
2	7700	10	120	70	0.575	6.8E-04
3	7700	10	130	70	0.726	1.1E-03
4	7700	10	140	70	0.889	1.6E-03
5	7700	10	150	70	1.064	2.3E-03
6	7700	10	160	70	1.252	3.2E-03
7	7700	10	170	70	1.451	4.4E-03
8	7700	10	180	70	1.663	5.7E-03
9	7700	10	190	70	1.887	7.4E-03
10 (Maior)	7700	10	200	70	2.123	9.3E-03

Onde a massa foi obtida através da relação:

$$M = \frac{\rho * \pi * (d_{\text{externo}}^2 - d_{\text{interno}}^2) * e}{4} \quad (7.19)$$

E o Momento de Inércia:

$$I_x = \frac{M * (d_{\text{externo}}^2 - d_{\text{interno}}^2)}{8} \quad (7.20)$$

### 7.9 Sistema de 4 barras

Determinou-se que o ângulo de abertura da barra alavanca (Barra2) do sistema de 4 barras teria um curso de aproximadamente de 60o e de comprimento de 150mm, nos dando uma relação geométrica de que o raio da circunferência gerada pela manivela (Disco motor) de 75mm. Estas medidas são aproximadas e neste trabalho, não está sendo feito um estudo de otimização deste sistema. A comprimento da Barra1 foi determinado de maneira que suporte fisicamente as dimensões dos outros componentes, como a altura do motor.

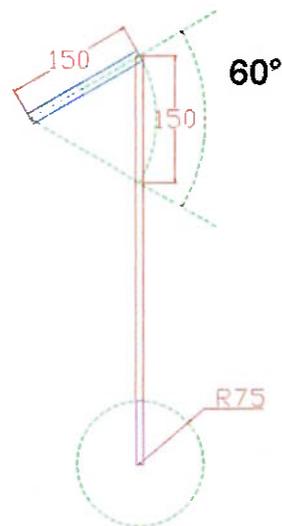


Figura 7.1: Esquema de dimensões de 4 Barras

Criou-se assim um modelo para que se pudesse utilizar o programa WORKMODEL 2D para se calcular as reações nos mancais, bem como torques e acelerações dos pontos de interesse.

Analizando a aceleração máxima e o torque aplicado no corpo de prova, utilizando-se o disco maior, obteve-se com o auxílio do programa os seguintes dados, para algumas rotações de motor pré-determinadas:

Tabela 7.7: Rotação do Motor x Torque no Corpo de Prova

Motor		Corpo de prova	
N	W	$\alpha$	Torque
Rpm	$^{\circ}/s$	$^{\circ}/s^2$	Nm
300	1800	4,04E+04	9,84
500	3000	1,12E+05	27,27
700	4200	2,19E+05	53,33
900	5400	3,64E+05	88,54
1800	10800	1,44E+06	350,66

Podendo assim, observar que para obter um intervalo de torques possíveis de serem aplicados ao corpo de prova, pode-se além de variar os discos de inércia, pode-se variar a rotação do motor.

Para o dimensionamento inicial do equipamento, se está considerando um torque aplicado ao corpo de prova de no máximo 80Nm, tem-se então a rotação máxima de 900 rpm.

### 7.10 Motor

Como visto no item anterior, o a rotação de 900rpm leva a um motor de 8 polos.

Do Wormodel2D, pode-se retirar o torque no eixo do motor necessário para que se consiga o funcionamento de todo o sistema:

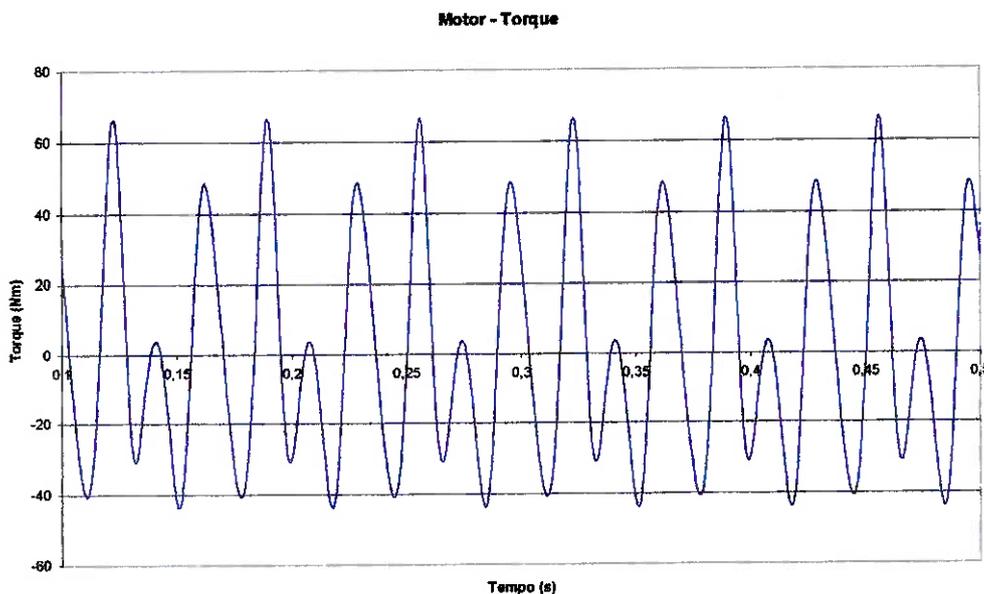


Figura 7.2: Torque no motor

Como somente em um pequeno intervalo de tempo o torque atinge cerca de 65Nm, é razoável considerar para efeito de cálculo, um torque de 50Nm, pois mais de 90% do período de um ciclo ocorre a baixo deste ponto. Desta maneira, sabendo-se a rotação e o torque pode-se chegar a uma potência de 6,4CV. Segundo as normas, o motor deve trabalhar entre 2,5% e 25% de sua capacidade, faz-se assim necessário a utilização de um fator de serviço 4 determinando um motor de 25CV.

Dessa maneira selecionou-se o motor:

Marca: Eberle  
Potência: 25CV  
Número de pólos: 8  
Carcaça: 200L  
Tensão: 220/380V

### **7.11 Disco-motor**

Esta peça (desenho 00800) por ser uma peça de grandes dimensões, robusta não houve um dimensionamento e suas dimensões foram determinadas somente visando a compatibilidade física entre as outras peças com a qual se relaciona.

### **7.12 Barra1**

Esta barra (desenho 00400) foi verificada sua resistência a flambagem. Para tanto foi considerado o esforço axial máximo de cada ciclo, este esforço foi conseguido com a ajuda do Workmodel 2D, do qual se retirou os esforços no sentido do eixo x e em y, a partir destas projeções, determinou-se a projeção do esforço no sentido axial da Barra1.

A projeção dos esforços no sentido axial da Barra1 é dada por:

$$F_{axial} = F_x \cdot \text{sen}(\theta_1) - F_y \cdot \text{cos}(\theta_1) \quad (7.21)$$

Onde  $\theta_1$  é o ângulo formado entre o eixo y e o eixo longitudinal da Barra1

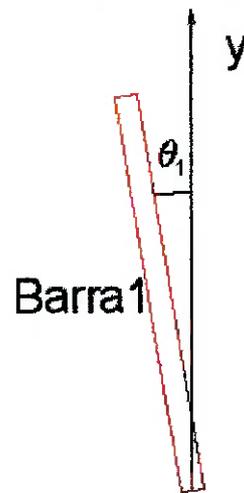


Figura 7.3: Projeção para a Barra1

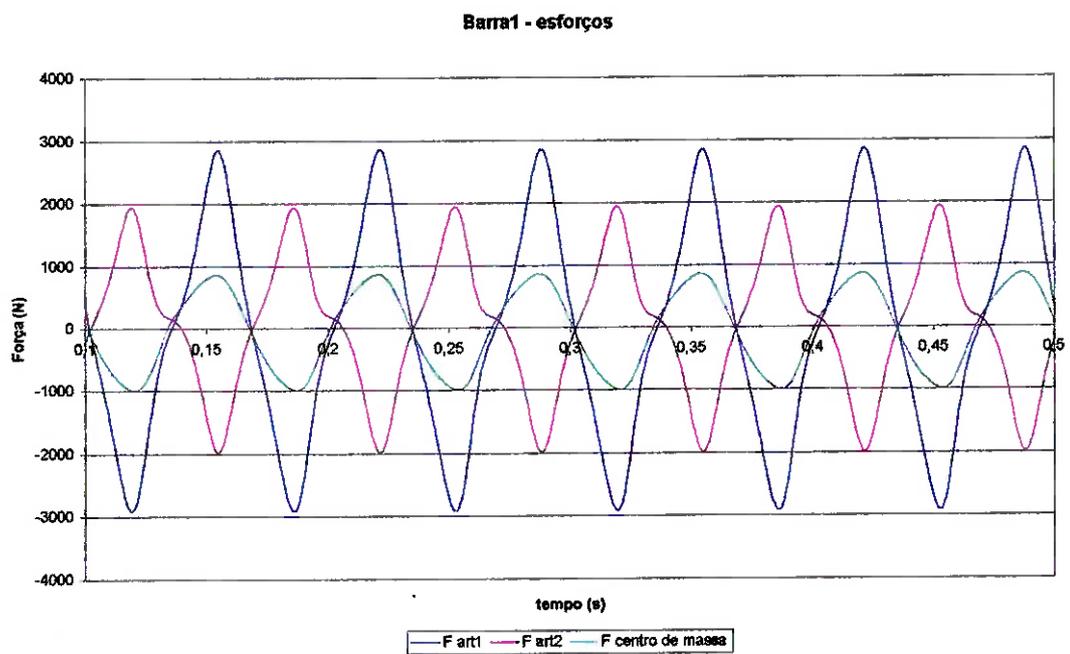


Figura 7.4: Esforços na Barra1

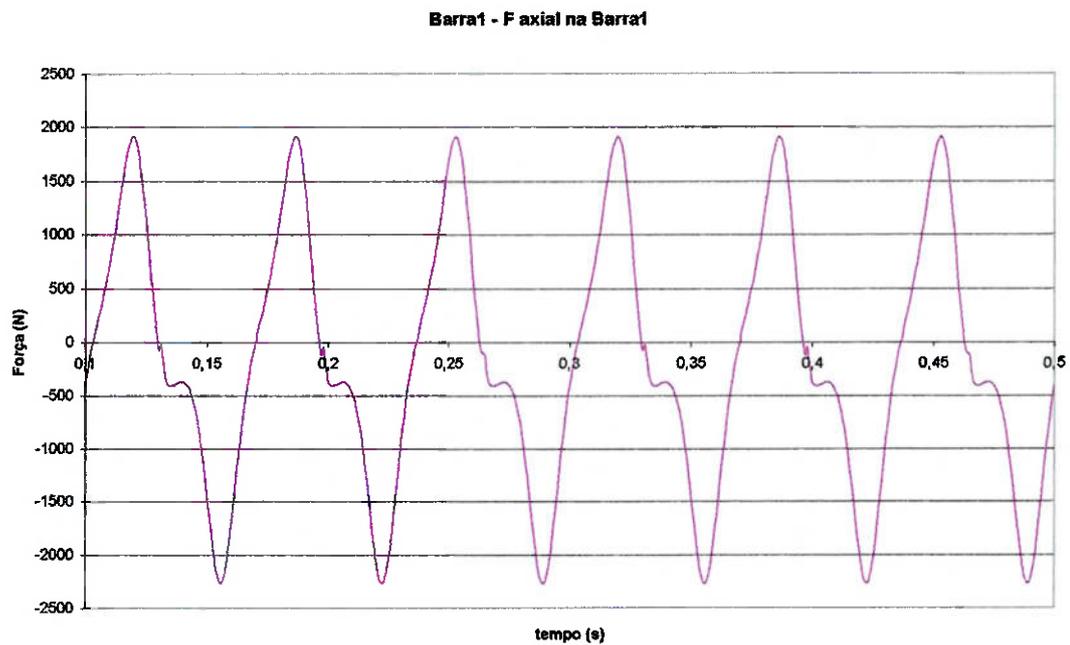


Figura 7.5: Esforço Axial na Barra1

Dessa forma tem-se que a força axial de compressão máxima não ultrapassa 2500N.

Temos que a barra1 é basicamente uma barra de seção retangular como mostra a figura abaixo

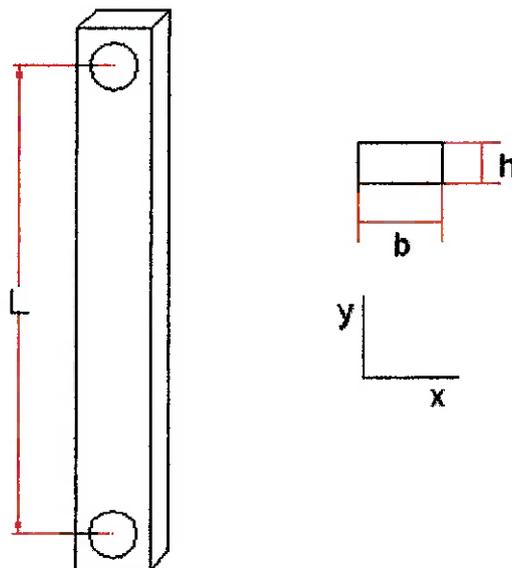


Figura 7.6: Esquema da Barra1

As coordenadas referem-se a secção. Verificando a barra quanto a flambagem, pelas relações:

$$P_{critico} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{eq}^2} \quad (7.22)$$

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{3} \quad (7.23)$$

$$I_y = \frac{b^3 \cdot h}{3} \quad (7.24)$$

Dados:

$$L = 0,406 \text{ m}$$

$$E = 206,8 \text{ MPa}$$

$$b = 0,04 \text{ m}$$

$$h = 0,01 \text{ m}$$

Verificando a flambagem em relação ao eixo y da secção temos:

$$L_{eq} = L = 0,406 \text{ m (bi-articulado)}$$

$$P_{critico, y} = 2.642 \text{ kN}$$

Verificando a flambagem em relação ao eixo x da secção temos:

$$L_{eq} = L/2 = 0,203 \text{ m (bi-engastado)}$$

$$P_{critico, y,1} = 660 \text{ kN}$$

Ou no pior caso:

$$L_{eq} = L = 0,406 \text{ m (bi-articulado)}$$

$$P_{critico, y,2} = 165 \text{ kN}$$

Como a tensão máxima não ultrapassa 2500N, verifica-se que a barra1 não flambará.

Nas extremidades, para a alocação dos rolamentos será necessária a solda de discos, para que se possam efetuar as usinagens dos furos para os rolamentos que serão fixados axialmente por anéis elásticos.

### 7.13 Barra2

Como os esforços da articulação 2 na Barra 2 (desenho 00500) são principalmente perpendiculares, verificou-se a tensão máxima de flexão e a flexa máxima.

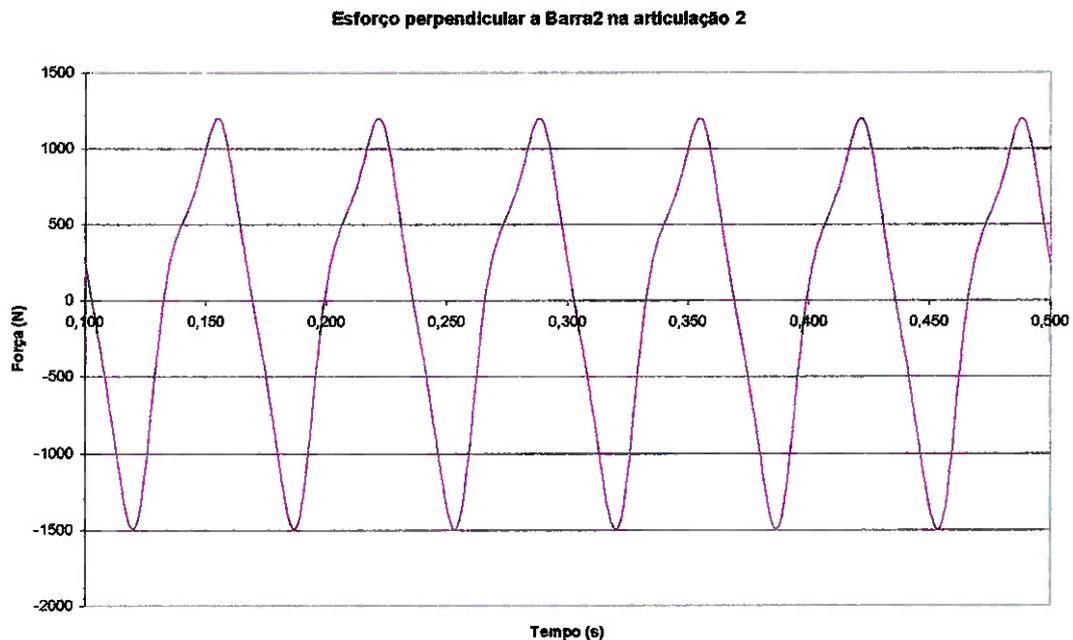


Figura 7.7: Esforço fletor na Barra2

Pelo gráfico, retirou-se a tensão máxima de 1500N, que pelas fórmulas para cálculo de tensão máxima numa secção de uma barra e a flexa máxima para este tipo de esforço:

$$\sigma_{máximo} = \frac{P_{máximo} \cdot l \cdot h}{2 \cdot I} \quad (7.25)$$

$$y_{máximo} = -\frac{P_{máximo} \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (7.26)$$

A Barra2 é feita de aço SAE1020, com valores tabelados de:

$$E = 206,8 \text{ GPa}$$

$$\sigma_{escoamento} = 295 \text{ MPa}$$

Com dimensões de 190mm de comprimento (150mm entre articulações), 40mm de largura e 10mm de espessura.

Com estes dados, verifica-se os valores aproximados para a barra de:

$$\sigma_{\text{máximo}} = 84,4 \text{ MPa}$$

$$y_{\text{máximo}} = 0,154 \text{ mm}$$

Que podem ser analisados como deformação desprezível e um trabalho com fator de segurança de aproximadamente 3,5. Ou seja, a barra não falará.

### 7.14 Rolamento-articulação1

A articulação 1 consiste em um conjunto de um pino (desenho 00200) e um rolamento que articula o Disco-motor com a Barra1. Todas as fixações axiais são feitas por anéis elásticos.

Segundo os dados do Workmodel2D:

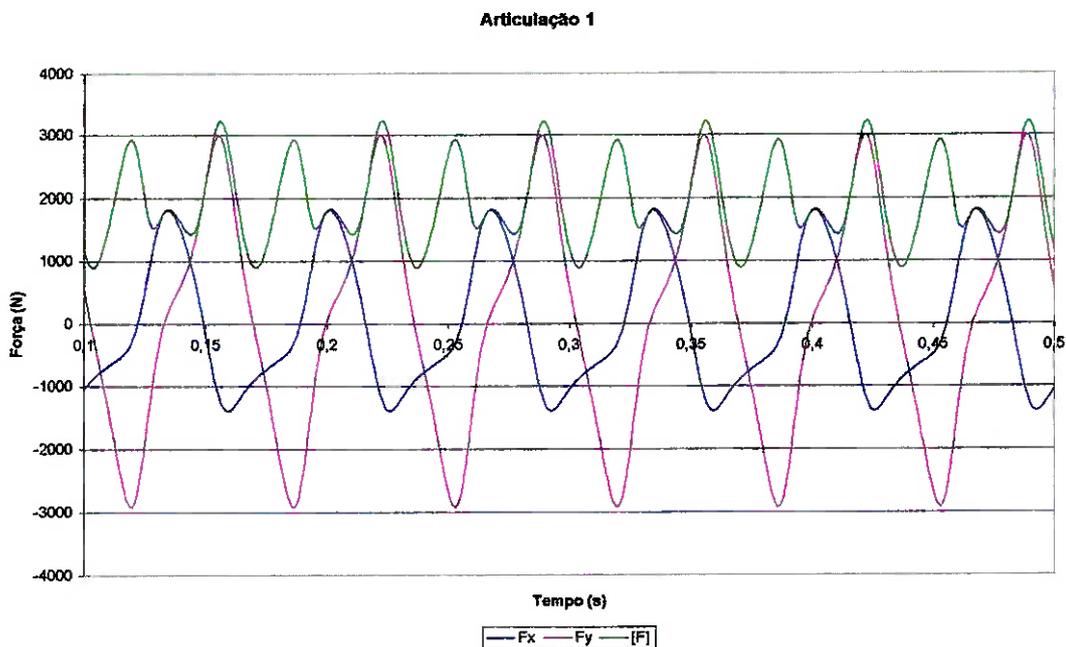


Figura 7.8: Esforços na articulação 1

Verifica-se que o esforço máximo não passará de 3500N, dessa maneira, dimensionou-se a articulação, o rolamento usado.

Este dimensionamento, baseia-se que o rolamento deva ter uma vida de no mínimo de  $10^8$  ciclos, que nos dá aproximadamente mais de 100 ensaios.

Do catálogo da NSK, obtemos:

$C/P = 4,65$  para uma vida de  $10^8$  ciclos;

Pode-se assim obter uma carga dinâmica do rolamento de:

$C = 16275N$

Selecionando do catalogo NSK de rolamentos radiais de uma carreira de esferas:

Rolamento modelo: 6305

Com as seguintes dimensões principais:

deixo = 25mm;

Dexterno = 62mm;

B = 17mm.

### **7.15 Rolamento-articulação2**

Da mesma forma que para o rolamento da articulação 1, a articulação 2 é um conjunto de um pino (desenho 00300) e um rolamento, fixados axialmente com a Barra1 e a Barra2 por anéis elásticos.

Similarmente tem-se os seguintes dados obtidos através do Workmodel2D:

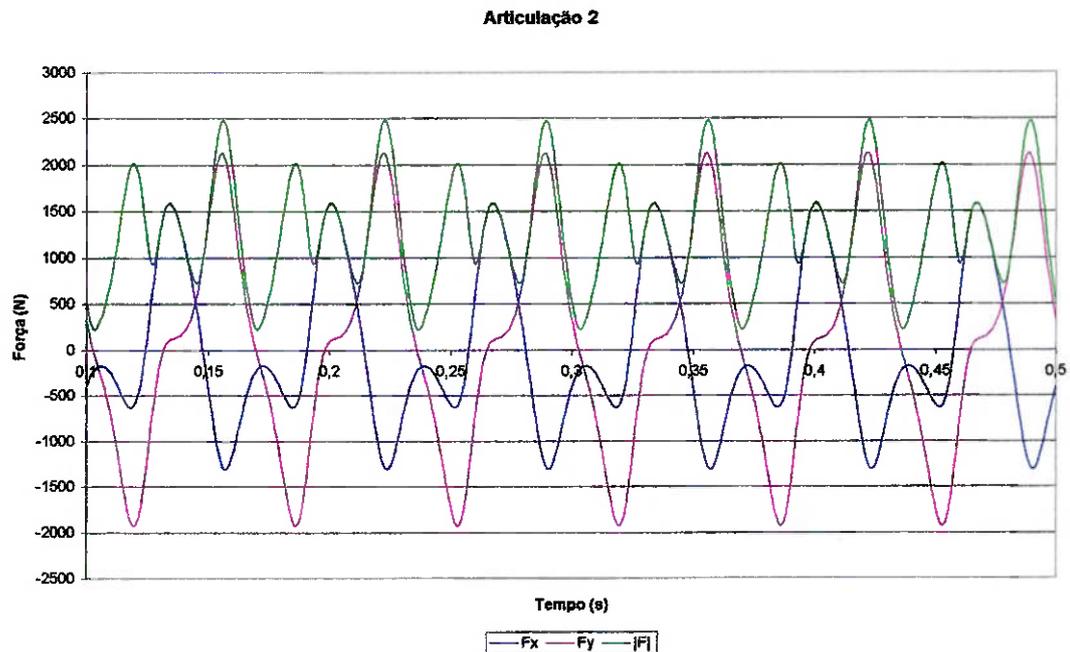


Figura 7.9: Esforços na Articulação2

Este gráfico mostra que os esforços na articulação 2 não ultrapassam 2500N, como neste rolamento, não se movimentam mais que 60 graus, pode-se dimensioná-lo como estático.

Desta forma segundo o catálogo da NSK página o fator de serviço a ser usado deve ser de 1,5. Calculando a carga estática equivalente:

$$C_o = 3750N$$

Porém, analisando a vida de um rolamento com a carga estática calculada, tem-se uma vida muito inferior a de  $10^8$  ciclos, por este motivo, escolheu-se o rolamento 6204. pois este rolamento fornece uma relação C/P de 5,12, que equivale a  $1,33 \times 10^8$  ciclos.

Rolamento selecionado: 6204

Com as seguintes dimensões principais:

deixo = 20mm;

Dexterno = 47mm;

B = 14mm.

### 7.16 Estrutura

A estrutura (desenho 01300), para suportar todo este equipamento, pode ser feito com base em vigas L de 76x76x12,7mm soldadas.

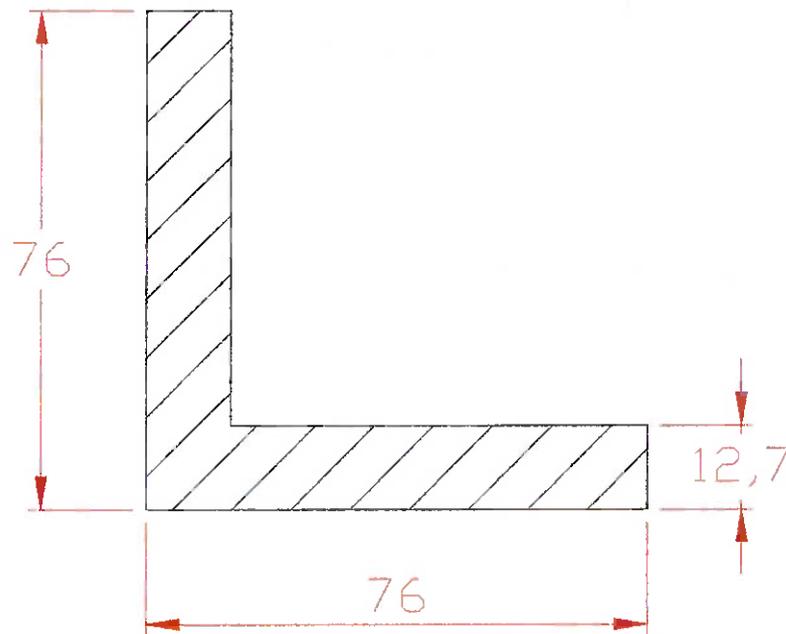


Figura 7.10: Perfil das barras da estrutura

## 8 Workmodel 2D®

### 8.1 Modelo

Neste trabalho criou-se o seguinte modelo:

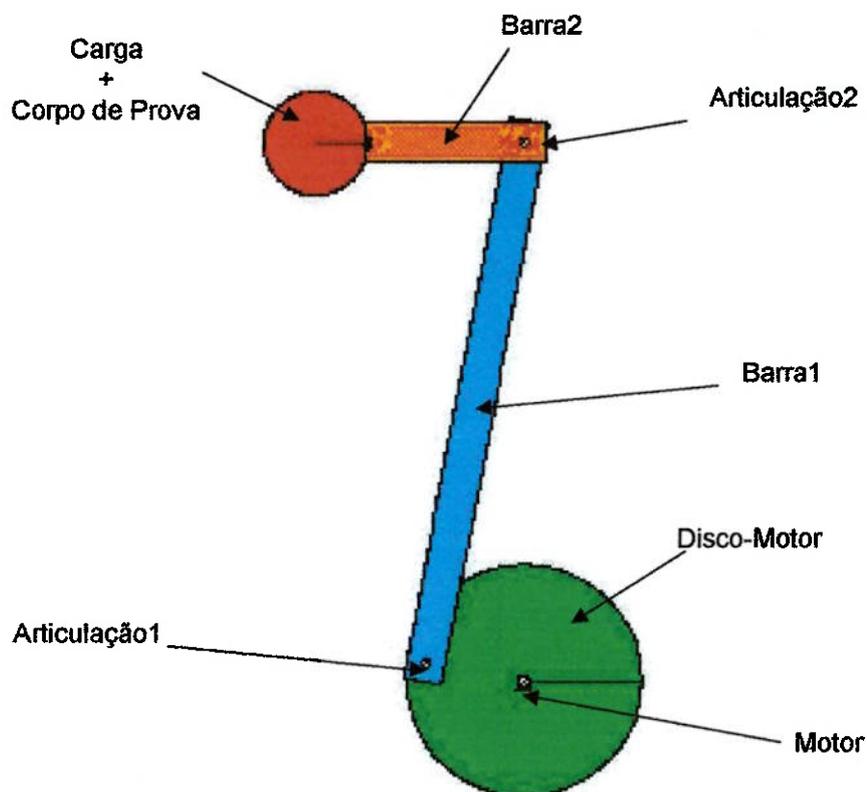


Figura 8.1: Modelo do Workmodel

O programa WORKMODEL 2D® é um simulador de mecanismos no plano. Nele pode-se simular modelos de mecanismos, podendo assim visualizar trajetórias e posições. Nele há a possibilidade de inserir algumas propriedades de materiais, como massa, inércia e carga. Pode-se também incluir na simulação a influência de ambiente

como campos elétricos e gravidade. E dessa maneira pode-se obter através do programa esforços nas articulações, bem como forças do centro de massa de cada peça, acelerações, velocidades, posições, torque e outras grandezas.

## 8.2 Dados de entrada

Este modelo foi simulado utilizando massas e inércias aproximadas que foram calculadas a partir de dimensões estimadas.

Tabela 8.1: Massa e inércia dos Discos de Inércia

Disco	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$E_{\text{espessura}}$ mm	$\phi_{\text{ext}}$ mm	$\phi_{\text{int}}$ mm	Massa Kg	$I_x$ kgm <sup>2</sup>
Disco 1-menor	7700	10	110	70	0,435	3,9E-04
Disco 2	7700	10	120	70	0,575	6,8E-04
Disco 3	7700	10	130	70	0,726	1,1E-03
Disco 4	7700	10	140	70	0,889	1,6E-03
Disco 5	7700	10	150	70	1,064	2,3E-03
Disco 6	7700	10	160	70	1,252	3,2E-03
Disco 7	7700	10	170	70	1,451	4,4E-03
Disco 8	7700	10	180	70	1,663	5,7E-03
Disco 9	7700	10	190	70	1,887	7,4E-03
Disco 10-maior	7700	10	200	70	2,123	9,3E-03

Tabela 8.2: Massa e inércia das Barras

	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	L mm	B mm	$E_{\text{espessura}}$ mm	Massa kg	$I_x$ kgm <sup>2</sup>
Barras	7.700	446	40	10	1,37	2,75E-01
Barra1	7.700	190	40	10	0,59	2,21E-02

Tabela 8.3: Massa e inércia das outras peças

Peça	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$E_{\text{espessura}}$ mm	$\phi_{\text{ext}}$ mm	$\phi_{\text{int}}$ mm	Massa kg	$I_x$ kgm <sup>2</sup>
Eixo / 4 Barras	7700	130	54	0	2,293	8,4E-04
Eixo / Disco de Inercia	7700	130	54	0	2,293	8,4E-04
Base do corpo de prova	7700	50	50,8	0	0,780	2,5E-04
Secção de teste	7700	120	12,7	0	0,117	2,4E-06
Luva	7700	70	100	50,8	3,141	2,9E-03
Cubo-disco	7700	30	70	40	0,599	2,5E-04
Cubo/base-disco	7700	10	110	70	0,435	3,9E-04
Disco-motor	7700	10	190	42	2,076	8,9E-03

Além da propriedade das peças, na simulação foi ativada a influência do efeito da gravidade.

### **8.3 Saídas**

No programa, as saídas aparecem na tela na forma de janelas, para o modelo, pediu-se a leitura dos seguintes dados:

Carga / Corpo de prova:

- Posição, velocidade e aceleração angulares;
- Torque;
- Reações na articulação

Barra2:

- Forças do centro de massa;

Articulação2:

- Reações;

Barra1:

- Forças do centro de massa;
- Posição, velocidade e aceleração angulares;

Articulação1:

- Reações;

Disco-Motor:

- Posição, velocidade e aceleração angulares;
- Torque;

Motor:

- Reações.

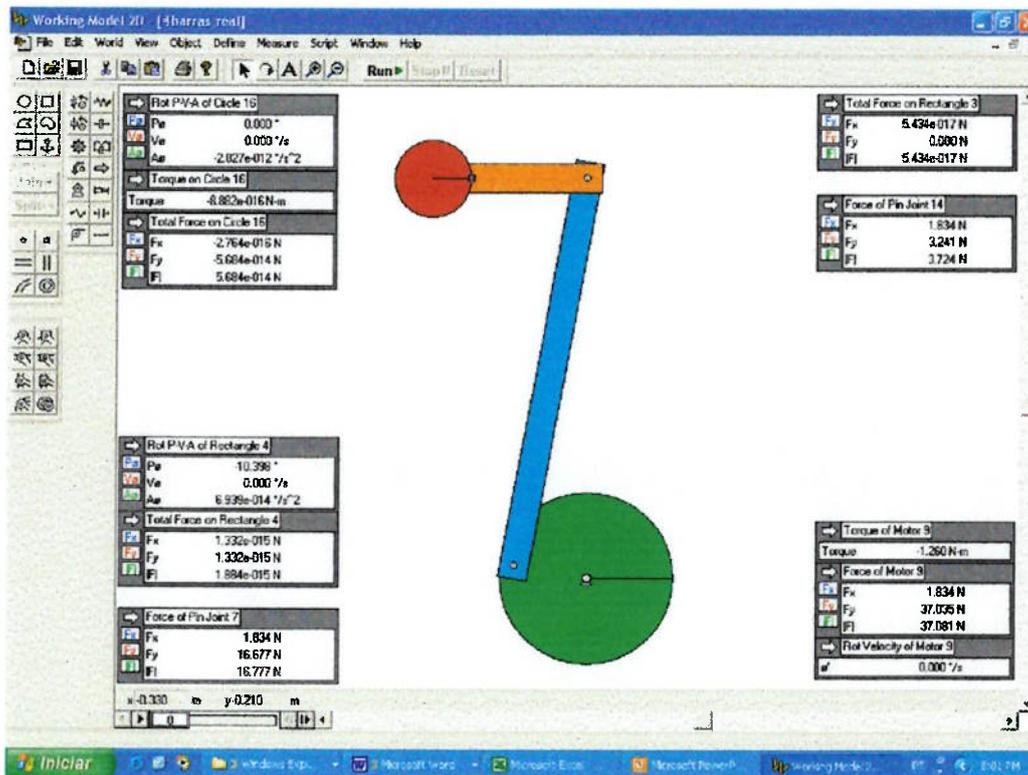


Figura 8.2: Apresentação de saídas do Workmodel®

#### 8.4 Tratamento de dados

Os dados que são visualizados no programa, podem ser exportados para serem tratados em outros programas. Para exportar os dados, basta ir em “*Export...*” no menu “*File*”, selecionar o o intervalo de tempo equivalente (“*Frame*”), colocar o nome do arquivo e salvar com extensão “.*dta*”.

Este arquivo pode ser aberto em diversos programas como Microsoft Excel® e Matlab®. Neste trabalho optou-se pela utilização do programa Excel. Ao abrir os dados, haverá diversas configurações que podem ser determinadas, neste caso, deve-se colocar como separador de decimal o ponto (.) e o separador de milhar deve ser selecionado o item em branco.

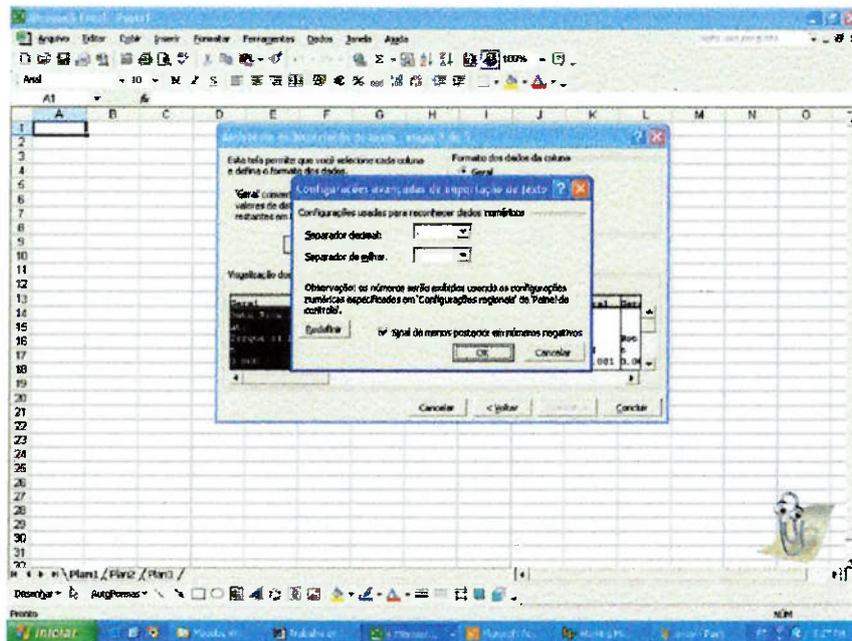


Figura 8.3: Abrindo os dados do Workmodel

Os dados são apresentados na forma de tabela em colunas, com o título de cada leitura acima da coluna de índice de tempo (t). A coluna de índices de tempo se repete para cada conjunto de leituras.

	A	B	C	D	E	F
1	Data From 4barras-real					
2	at:					
3	Torque of Motor 9		Force of Motor 9			
4	t	Torque	t	Fx	Fy	F
5	0	-1,26	0	1,834	37,035	37,081
6	0,001	-25,175	0,001	1818,283	186,983	1827,872
7	0,002	-19,512	0,002	1804,878	282,177	1826,802
8	0,003	-13,289	0,003	1765,337	367,192	1803,121
9	0,004	-7,325	0,004	1703,463	447,036	1761,143
10	0,005	-2,28	0,005	1622,802	526,037	1705,931
11	0,006	1,365	0,006	1526,434	607,889	1643,024
12	0,007	3,301	0,007	1416,852	695,762	1578,466

Figura 8.4: Apresentação dos dados no Excel

A partir destes dados, pode-se fazer gráficos e cálculos para a obtenção dos dados necessários para o dimensionamento das peças.

### 8.5 Simulação

Para o estudo do corpo de prova, utilizou-se como entrada na parte que representa a carga e o corpo de prova somente as massas e inércias do disco maior (10), o cubo-disco, uma luva, um eixo e uma base de corpo de prova. Dessa forma o torque calculado pelo programa refere-se ao que a secção de teste será submetida. Os teste foram feitos, alterando-se a rotação do motor, como mostro a tabela 7.7 do capítulo 7.9 – Sistema de 4 barras.

A simulação do conjunto todo aplicou-se todos dados de entrada apresentados na sessão 2 deste capítulo.

A primeira tentativa para a análise das saídas não foi satisfatória. Após diversas discussões, percebeu-se que a aproximação para a construção de gráficos no Excel era de ponto a ponto e por isso foi feito um estudo alterando a discretização que era de 40 pontos por segundo.

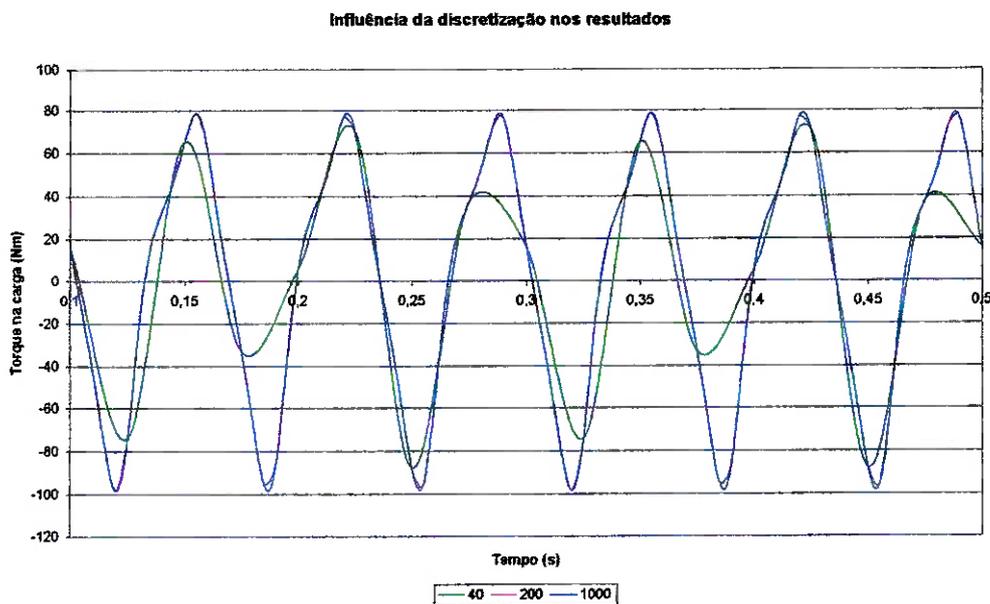


Figura 8.5: Estudo da Influência da discretização nos resultados

Com este estudo percebeu-se que a discretização é importante para o tratamento de dados pelo Excel. O resultado que não

comportava uniformemente, com uma frequência de 40 pontos por segundo, com 200 ou 1000 pontos por segundo já se mostra uniformes.

Para a simulação final, utilizou-se a frequência de 1000 pontos por segundo, pois mesmo tendo seus resultados muito próximos ao de de 200 pontos, o tempo computacional não é muito afetado, no computador utilizado (processador de 1,67GHz, memória de 256Mb DDR).

## 9 Lista de peças

Na lista de peças abaixo, as peças que deverão ser fabricadas, estão com a indicação do desenho ao lado.

Tabela 9.1: Lista de Peças

Item	Q	Descrição	Desenho
1	1	Motor de 25CV 4 polos - carcaça 200L	
2	1	Corpo de prova	01200
3	1	Disco-motor	00800
4	1	Eixo-articulação1	00200
5	1	Barra1	00400
6	1	Eixo-articulação2	00300
7	1	Barra2	00500
8	1	Rolamento 6305	
9	1	Rolamento 6204	
10	2	Rolamento 7009A DB	
11	2	Mancais	01000
12	1	Luva – Disco	01110
13	1	Luva – Barra2	01100
14	2	Luva – Capa	01120
15	1	Cubo-disco	00600
16	10	Discos de Inércia	00700
17	2	Eixo	00900
18	1	Estrutura	01300
19	1	Base	01400
20	2	Anéis de retenção de furo de 75mm	
21	2	Anéis de retenção de eixo de 25mm	
22	2	Anéis de retenção de eixo de 20mm	
23	2	Anéis de retenção de furo de 47mm	
24	2	Anéis de retenção de furo de 62mm	
25	2	Chaveta 12x8x20mm	
26	2	Chaveta 10x10x200mm	
27	2	Chaveta 10x10x45mm	
28	4	Chaveta 16x10x20mm	
29	2	M8x16 sem cabeça com hexagonal imbutido	
30	1	M10x20 sem cabeça com hexagonal imbutido	
31	2	M6x16 sem cabeça com hexagonal imbutido	
32	4	M6x25 cabeça hexagonal	
33	4	M10x70 cabeça hexagonal	
34	6	M10x45 cabeça hexagonal	

35	4	M18x75 cabeça hexagonal	
36	4	M8x42 cabeça cilíndrica com hexagonal imbutido	
37	10	Porca hexagonal M10	
38	4	Porca hexagonal M18	
39	4	Arruelas elásticas para furo de 6mm	
40	10	Arruelas elásticas para furo de 10mm	
41	4	Arruelas elásticas para furo de 18mm	
42	4	Arruelas de furo de 6mm	
43	20	Arruelas de furo de 10mm	
44	8	Arruelas de furo de 18mm	
45	4	Tirante a olho	

## **10 Estimativa de Custo**

Por ser uma estimativa de custo, as peças listadas no capítulo anterior, estão subdivididas em subgrupos.

- Motor
- Acionamento
- Peças que devem ser fabricadas
- Peças prontas

### **10.1 Motor**

O motor Eberle selecionado no item 7.10 tem um custo de aproximado de R\$ 3.000,00.

### **10.2 Acionamento**

O custo para o sistema de acionamento com Soft Starter e os cabos e bornes necessários é de R\$ 1.800,00. Caso se opte por um acionamento controlado por um Inversor de frequência, o custo de um inversor para este motor é de R\$ 11.500,00.

### **10.3 Peças que devem ser fabricadas**

O custo das peças fabricadas envolve material e mão-de-obra. O material, foi considerado com dimensões em bruto, ou seja com dimensões de tarugos e barras encontradas no mercado e espessuras e comprimentos adequados para a usinagem das peças. Como o custo das barras e tarugos é baseada no peso, aplicou-se uma média de R\$ 2,50 / kg de aço.

O custo da mão-de-obra, foi estimada mediante a consulta de técnicos da oficina do departamento da mecânica, que indicaram os tempos estimados para a fabricação de cada peça, que envolvem principalmente os processos de torneamento, fresamento, soldagem e montagem. O custo-hora foi levantado consultando algumas empresas de usinagem e se aplicou o valor médio de R\$ 30,00 / hora na estimativa de custo.

Tabela 10.1: Custo de peças fabricadas

Peça	Massa	tempo	Custo (R\$)		
	kg	h	Material	Mão-de-obra	Total
Disco-motor	12,7	15	31,75	450,00	481,75
Eixo-articulação1	0,3	6	0,75	180,00	180,75
Barra1	17,8	20	44,50	600,00	644,50
Eixo-articulação2	0,2	6	0,50	180,00	180,50
Barra2	3,2	25	8,00	750,00	758,00
Mancais	27,8	20	69,50	600,00	669,50
Luva – Disco	5,1	12	12,75	360,00	372,75
Luva - Barra2	5,1	12	12,75	360,00	372,75
Cubo-disco	5,0	12	12,50	360,00	372,50
Discos de Inércia	37,4	40	93,50	1.200,00	1.293,50
Estrutura	60,0	10	150,00	300,00	450,00
Base	57,4	8	143,50	240,00	383,50
				<b>TOTAL</b>	<b>6.160,00</b>

#### 10.4 Peças prontas

Para as peças prontas que incluem parafusos, porcas, arruelas, anéis elásticos, olhais e rolamentos, estima-se um custo de R\$ 600,00 para os rolamento e mais R\$ 300,00 para os demais itens.

### **10.5 Custo total**

Reunindo todos itens acima descritos, chega-se a uma estimativa de custo de:

Tabela 10.2: Estimativa de Custo

Motor	R\$ 3.000,00
Acionamento	R\$ 1.800,00
Peças Fabricadas	R\$ 6.160,00
Peças Prontas	R\$ 900,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 11.860,00</b>

Esta estimativa considera um acionamento simples (soft starter) e sem controle de rotação e sem controle de rotação, porém se for utilizado um inversor de frequência este custo pode aumentar cerca de R\$ 10.000,00.

## 11 Discussão

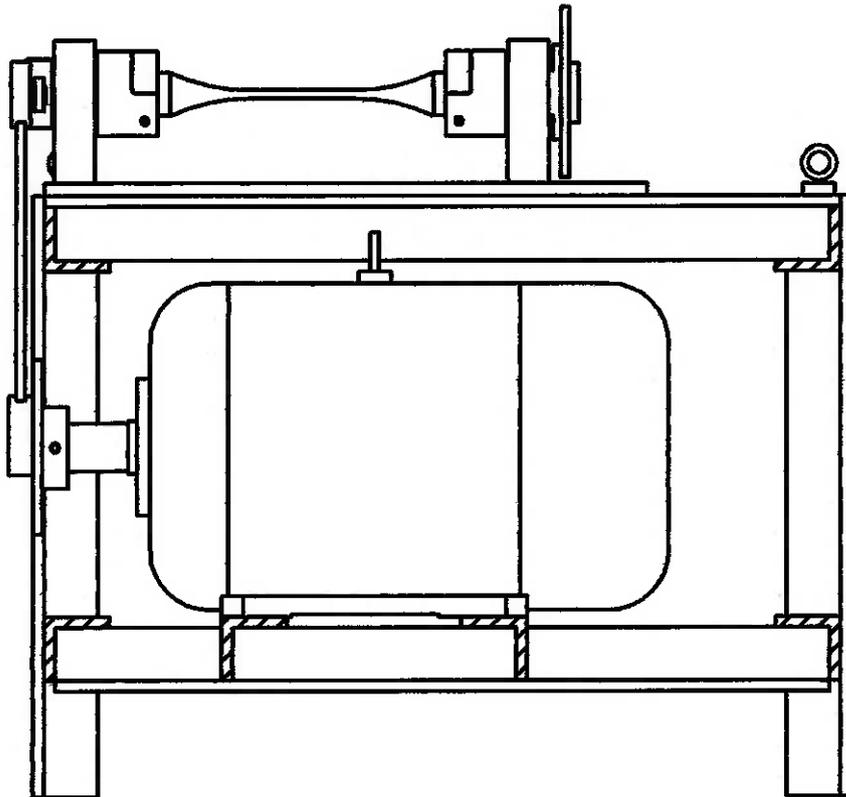
Este trabalho conseguiu desenvolver a idéia de projetar uma máquina de ensaio de fadiga, passando por etapas que englobaram desde o estudo de bibliografia já existente, a seleção do tipo de fadiga, seleção do tipo de máquina e seus componentes até o seu dimensionamento.

No final deste trabalho, pode-se chegar a um projeto completo de uma máquina de ensaio, porém, este projeto, não levou em consideração a otimização de cada parte. Por isso, para um futuro estudo e aprimoramento da máquina, vê-se possibilidades de estudos mais aprofundados nos sistemas dinâmicos como o sistema de 4 barras, quanto suas dimensões, deformações, e resposta em frequência. Assim como o comportamento do corpo de prova quanto a influência de sua elasticidade na dinâmica do sistema, com conseqüente esforços reais. Outros estudos que também podem ser feitos é quanto ao processo de fabricação dos corpos de prova, estudo mais aprofundado da análise probabilística para o tratamento de dados e a utilização de um inversor de frequência para um maior controle e aumento da gama de possibilidades de teste. Bem como desenvolvimento de um sistema de proteção, segurança para o manuseio do equipamento.

## Bibliografia

- [1] *Annual Book of ASTM Standards – Volume 03.01 – 1991 – Referências:*
- a) E 466: Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials
  - b) E 606: Standard Recommended Practice for Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing
  - c) E 739: Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data
  - d) E 1049: Standard practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis
  - e) E 1150: Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue
- [2] *Comittee E-9 on Fatigue – Manual on Fatigue Testing – ASTM – Publicação número 91, Philadelphia – Estados Unidos, 1949.*
- [3] OSGOOD, C. C. – *Fatigue Design* – Editora Wiley-Interscience – Nova Iorque – Estados Unidos, 1970.
- [4] KUSSMAUL, K. F.; MCDIARMID D. L.; SOCIE D. F. – *Fatigue Under Biaxial and Multiaxial Loading* – 1a. Edição – Editora Page Bros of Norwich – Grã Bretanha, 1991.
- [5] WEIBULL, W. – *Fatigue Testing and Analysis of Results* – Editora Pergamon Press – Nova Iorque, Estados Unidos, 1961.
- [6] MANFÉ, P. S. – *Desenho Técnico Mecânico – Volume 1 e 2* – Hemus-Livraria Editora Ltda.
- [7] NORTON, R. L. – *Design of Machinery* – Editora McGraw-Hill – Singapura, 1999.
- [8] NORTON, R. L. – *Machine Design* – Segunda edição – Editora Prentice-Hall – Estados Unidos, 2000.
- [9] BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. Jr. – *Resistência dos Materiais* – Terceira Edição – Editora Makron Books – São Paulo, 1995.
- [10] *NSK ROLAMENTOS – Catálogo, 1998*
- [11] *Motores Elétricos Trifásicos para uso Industrial* – Catálogo Eberle, 2001.

**ANEXOS - DESENHOS**



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc		Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00100	Date 26/11/02	Scale 1:4
Trabalho de Formatura			Conjunto - Lateral		
			00100	Edition 1	Sheet 1/1

A

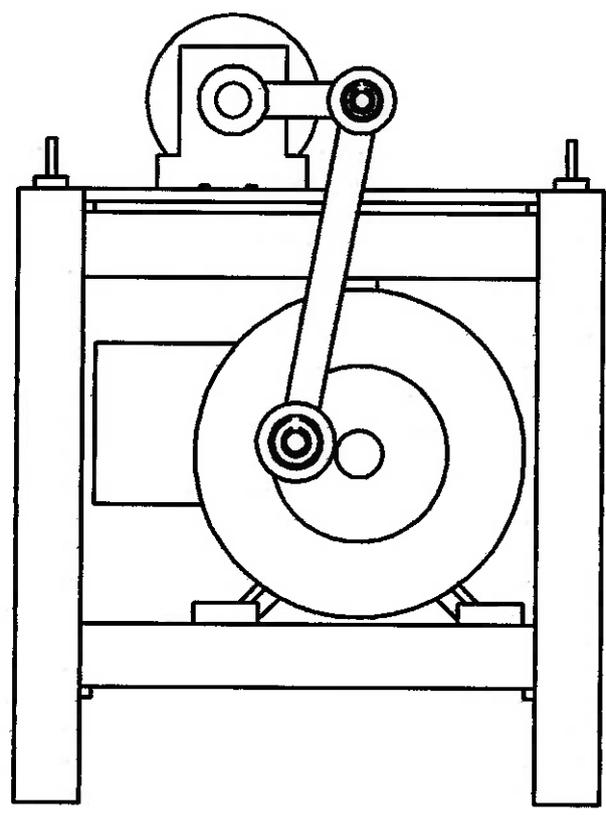
B

C

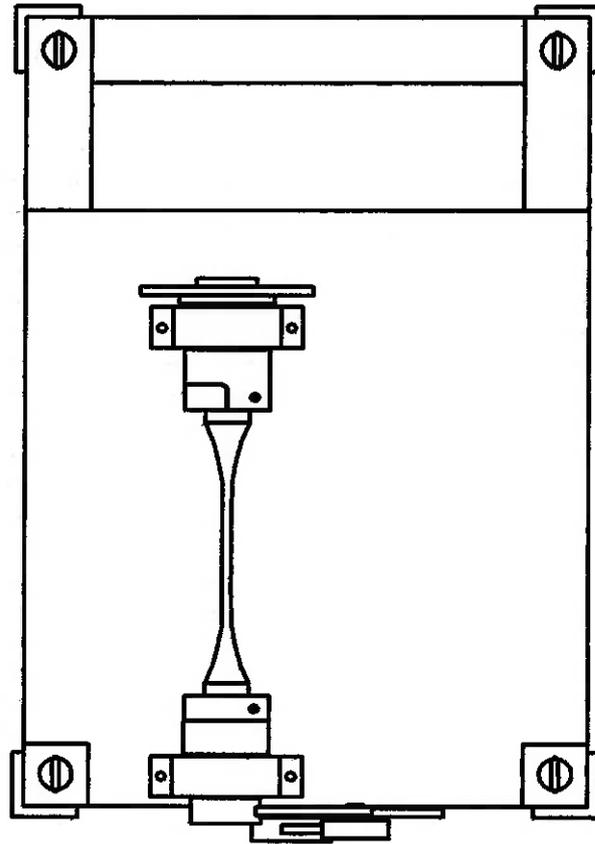
D

E

F

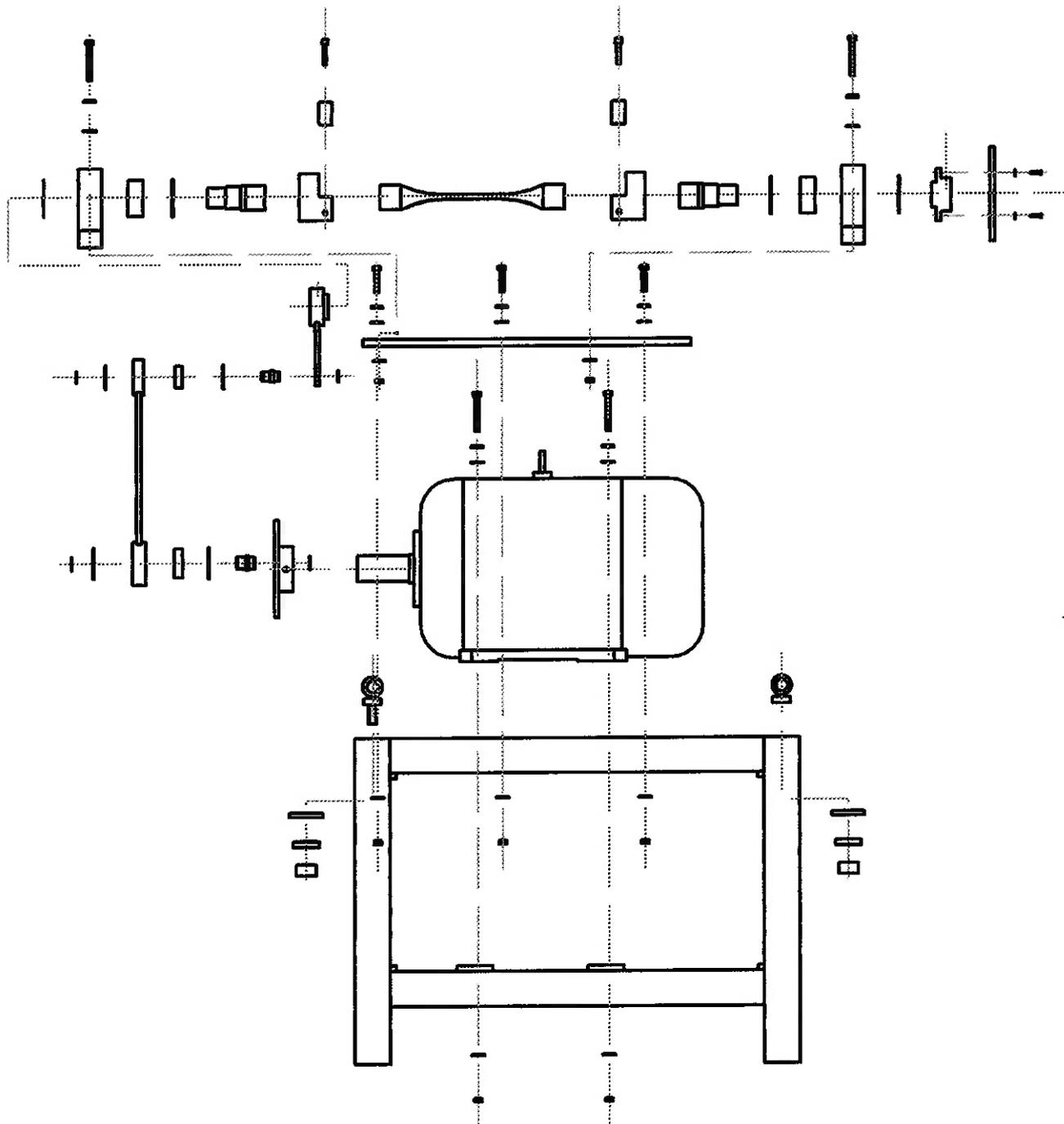


Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc		Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00110	Date 26/11/02	Scale 1:4
Trabalho de Formatura		Conjunto - Frente			
		00110	Edition 1	Sheet 1/1	

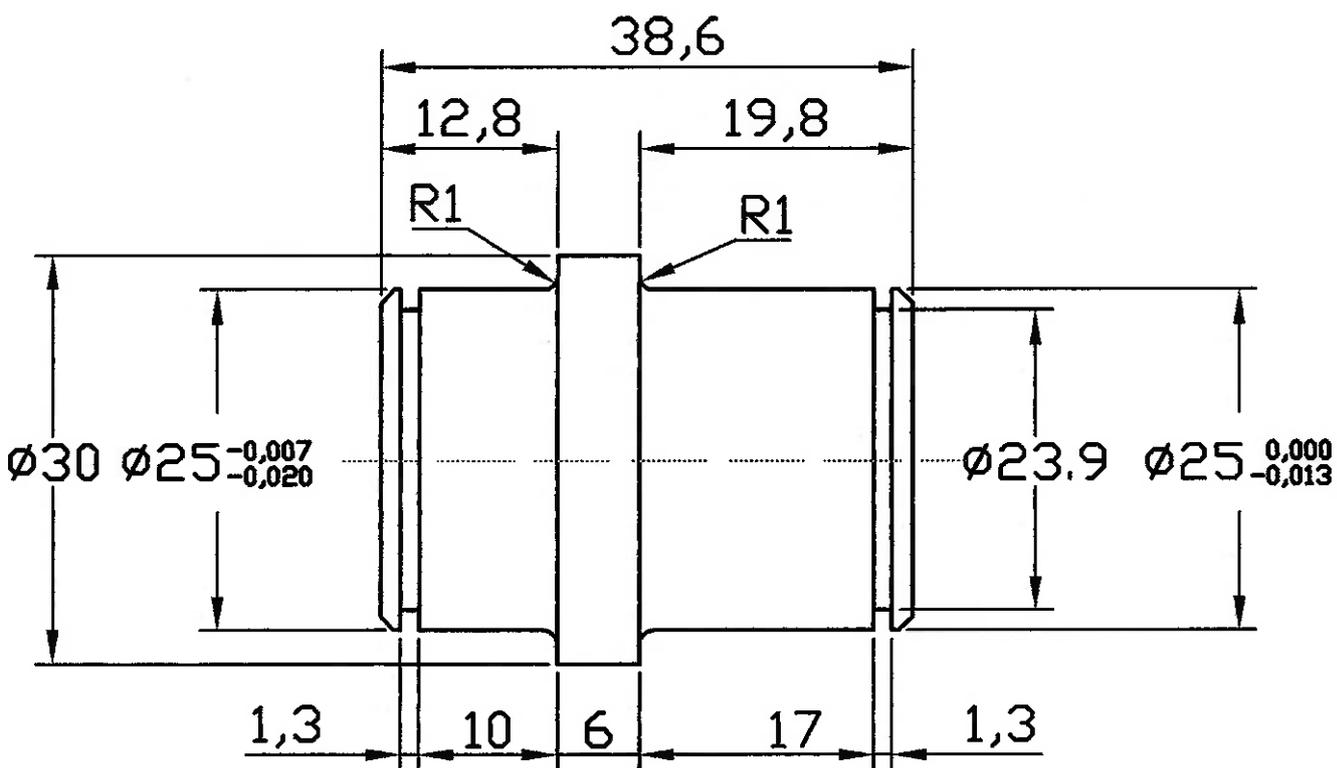


A  
B  
C  
D  
E  
F

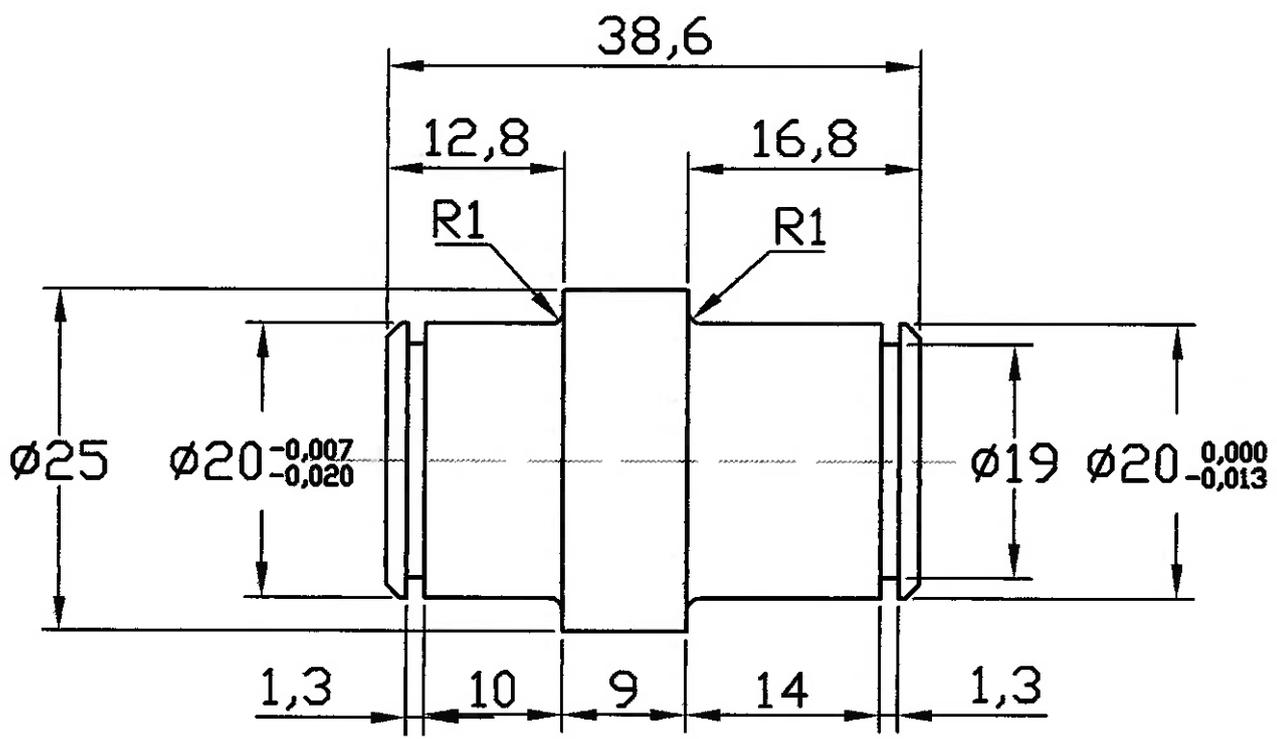
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00120	Date 26/11/02	Scale 1:4	
Trabalho de Formatura			Conjunto - Superior			
			00120	Edition 1	Sheet 1/1	



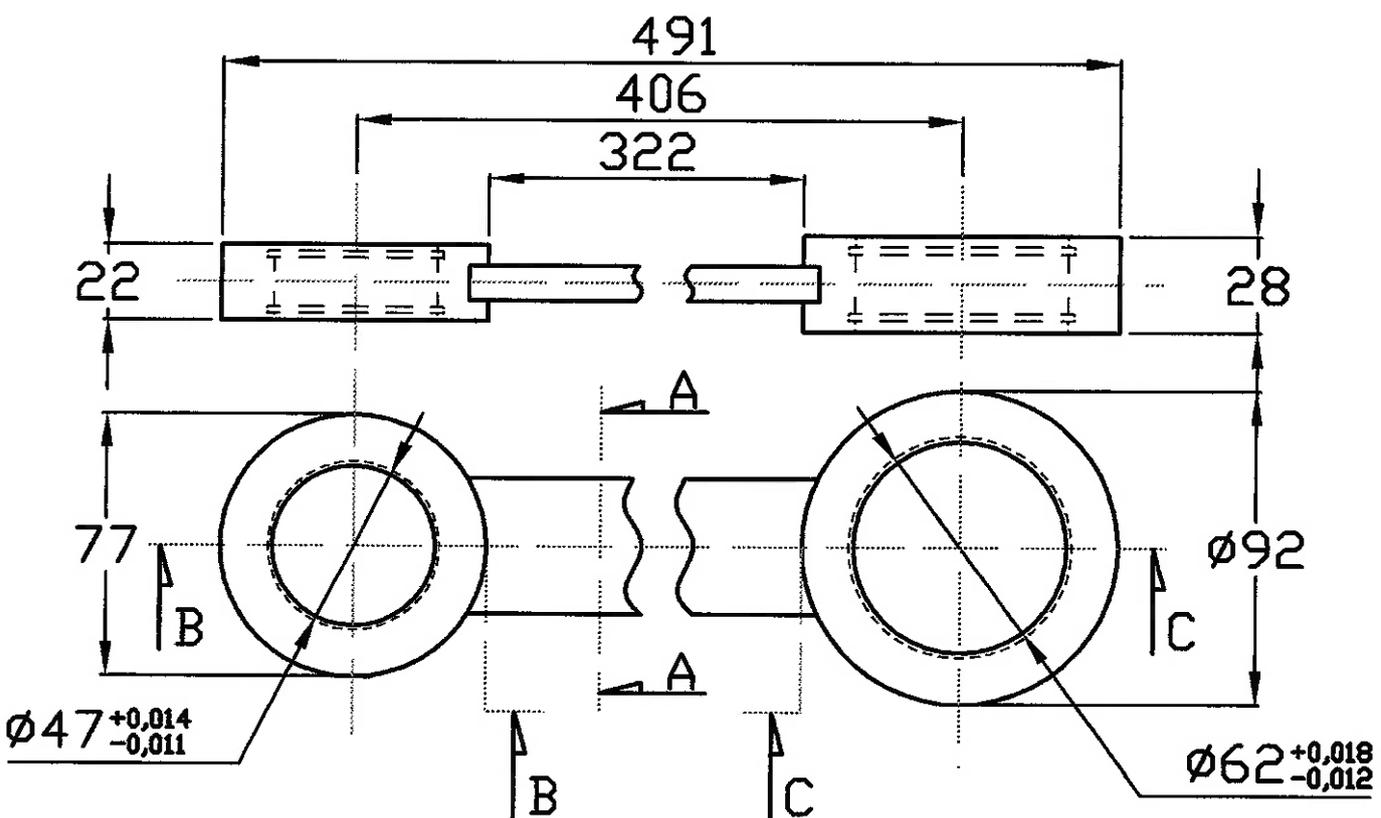
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc		Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00130	Date 26/11/02	Scale 1:4
Trabalho de Formatura			Conjunto - Explodido		
			00130	Edition 1	Sheet 1/1



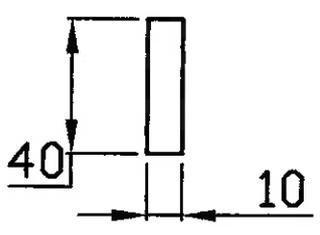
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc		Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00200	Date 26/11/02	Scale 4:1
Trabalho de Formatura		Articulação1			
		00200	Edition 1	Sheet 1/1	



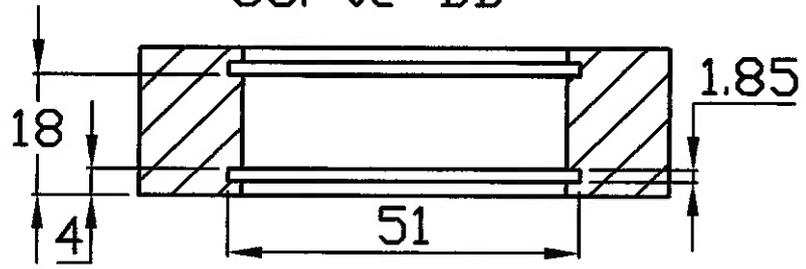
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00300	Date 26/11/02	Scale 4:1	
Trabalho de Formatura			Articulação2			
			00300	Edition 1	Sheet 1/1	



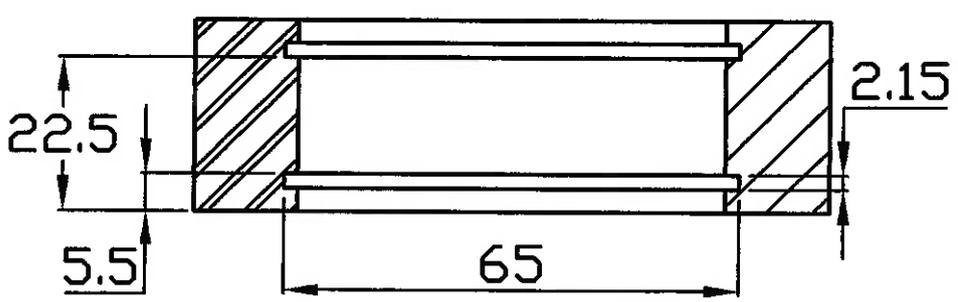
Corte AA



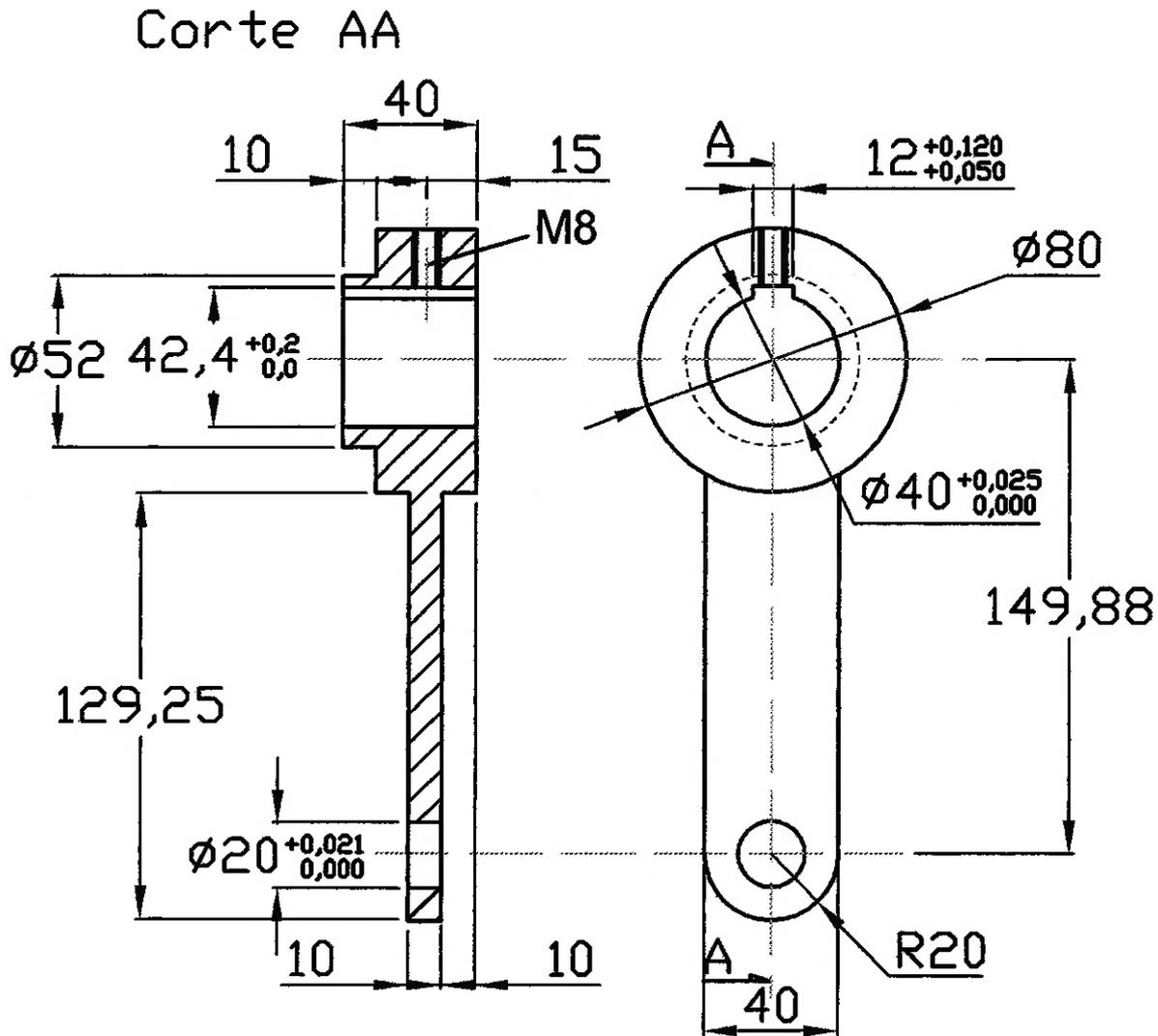
Corte BB



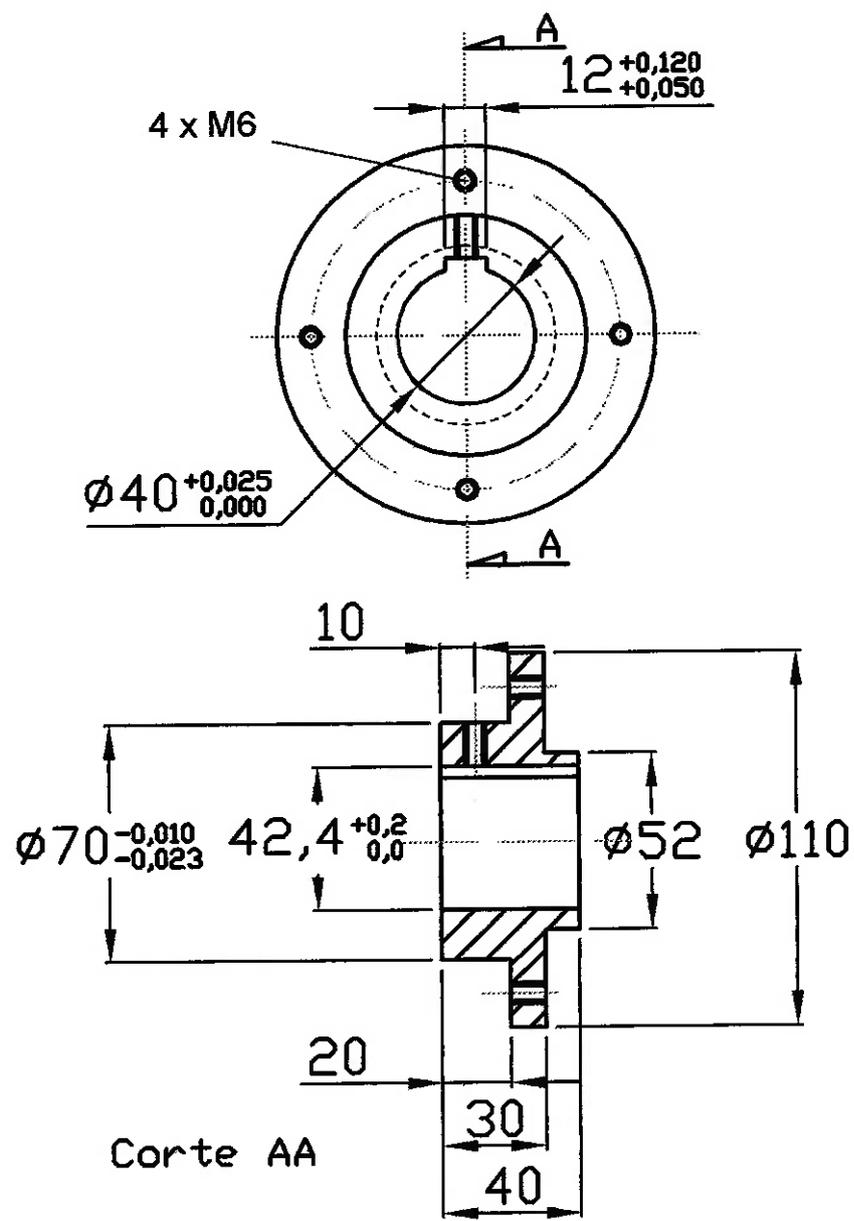
Corte CC



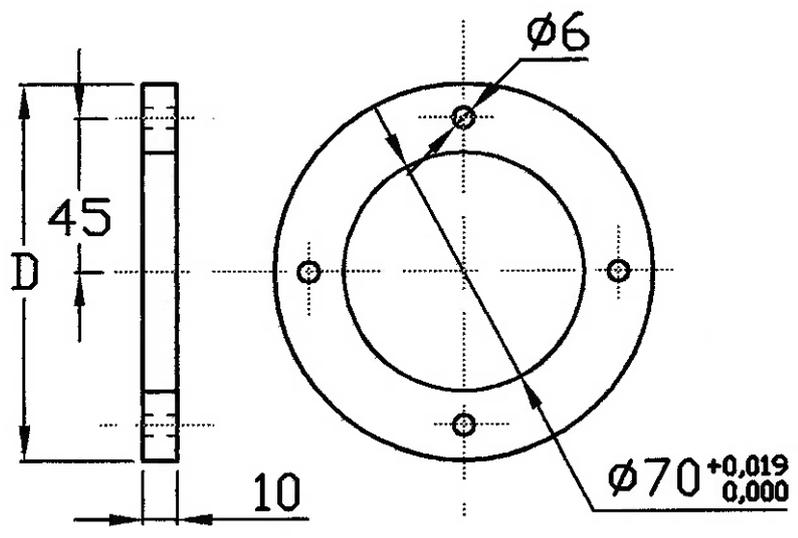
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc		Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00400	Date 26/11/02	Scale 1:1
Trabalho de Formatura			Barra1		
			00400	Edition 1	Sheet 1/1



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference		
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00500	Date 26/11/02	Scale 1:1
Trabalho de Formatura		Barra2			
		00500	Edition 1	Sheet 1/1	



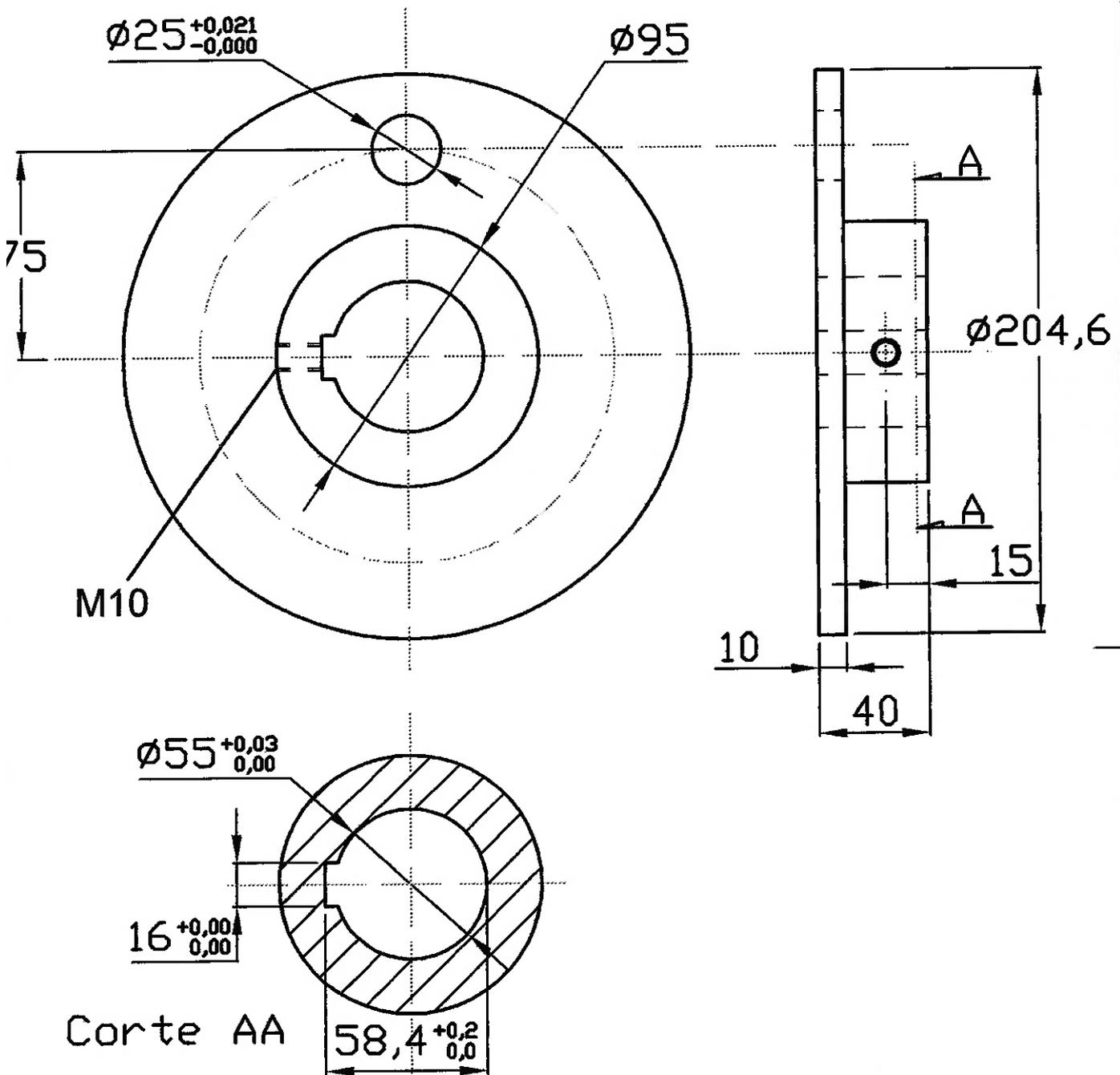
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00600	Date 26/11/02	Scale 1:1	F
Trabalho de Formatura			Cubo-Disco			
			00600	Edition 1	Sheet 1/1	



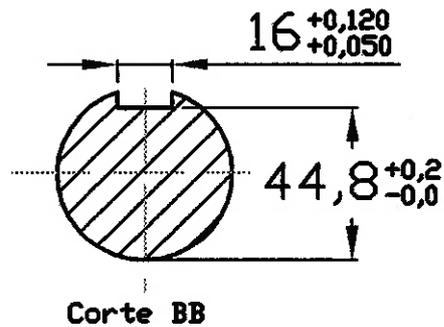
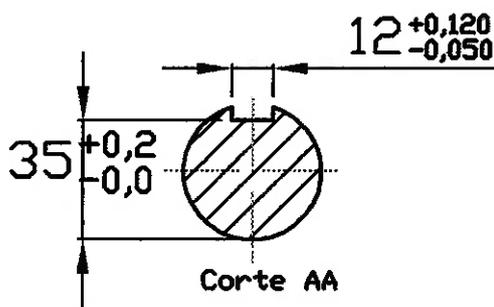
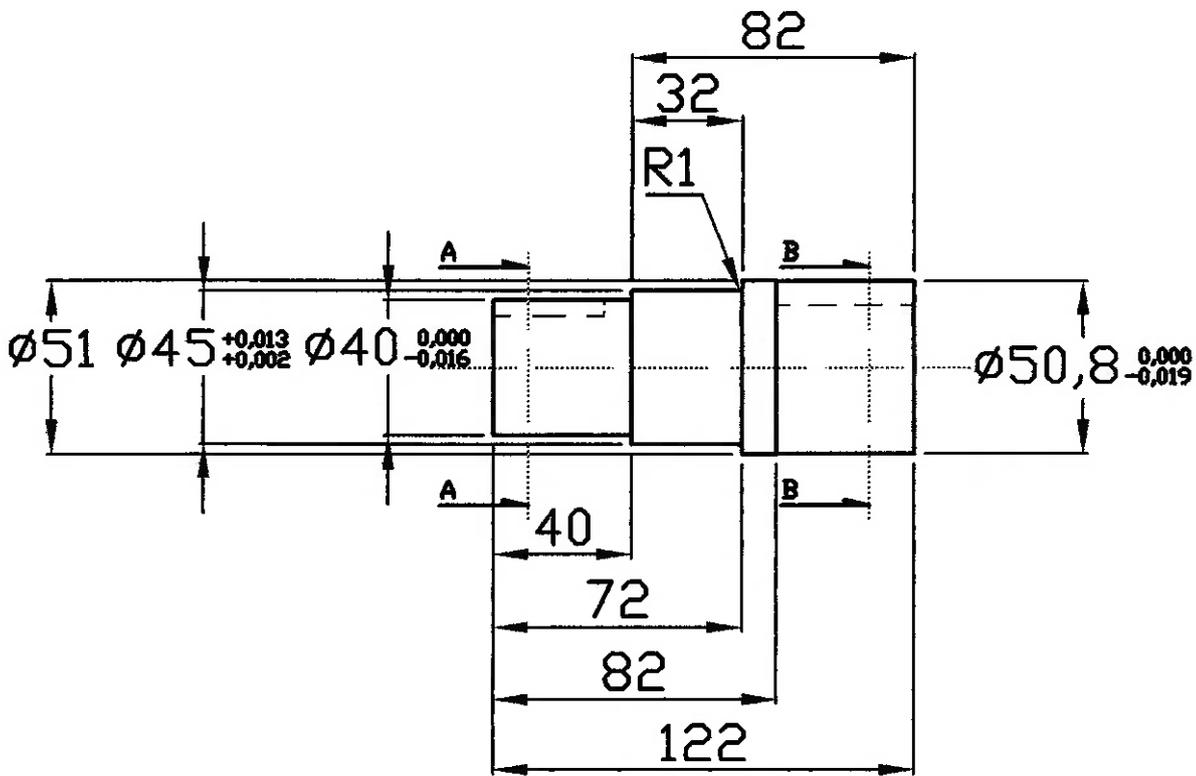
Disco	D	Disco	D
1	110	6	160
2	120	7	170
3	130	8	180
4	140	9	190
5	150	10	200

Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00700	Date 26/11/02	Scale 1:1	
Trabalho de Formatura			Discos de Inércia			
			00700	Edition 1	Sheet 1/1	

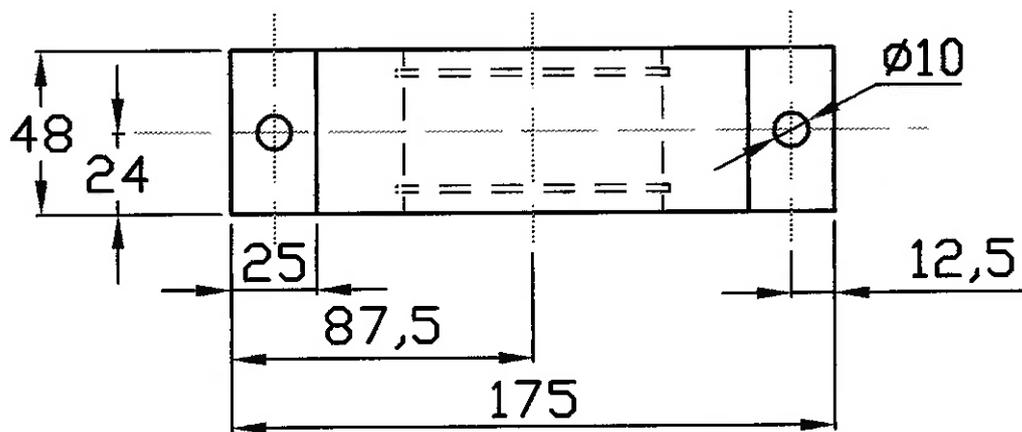
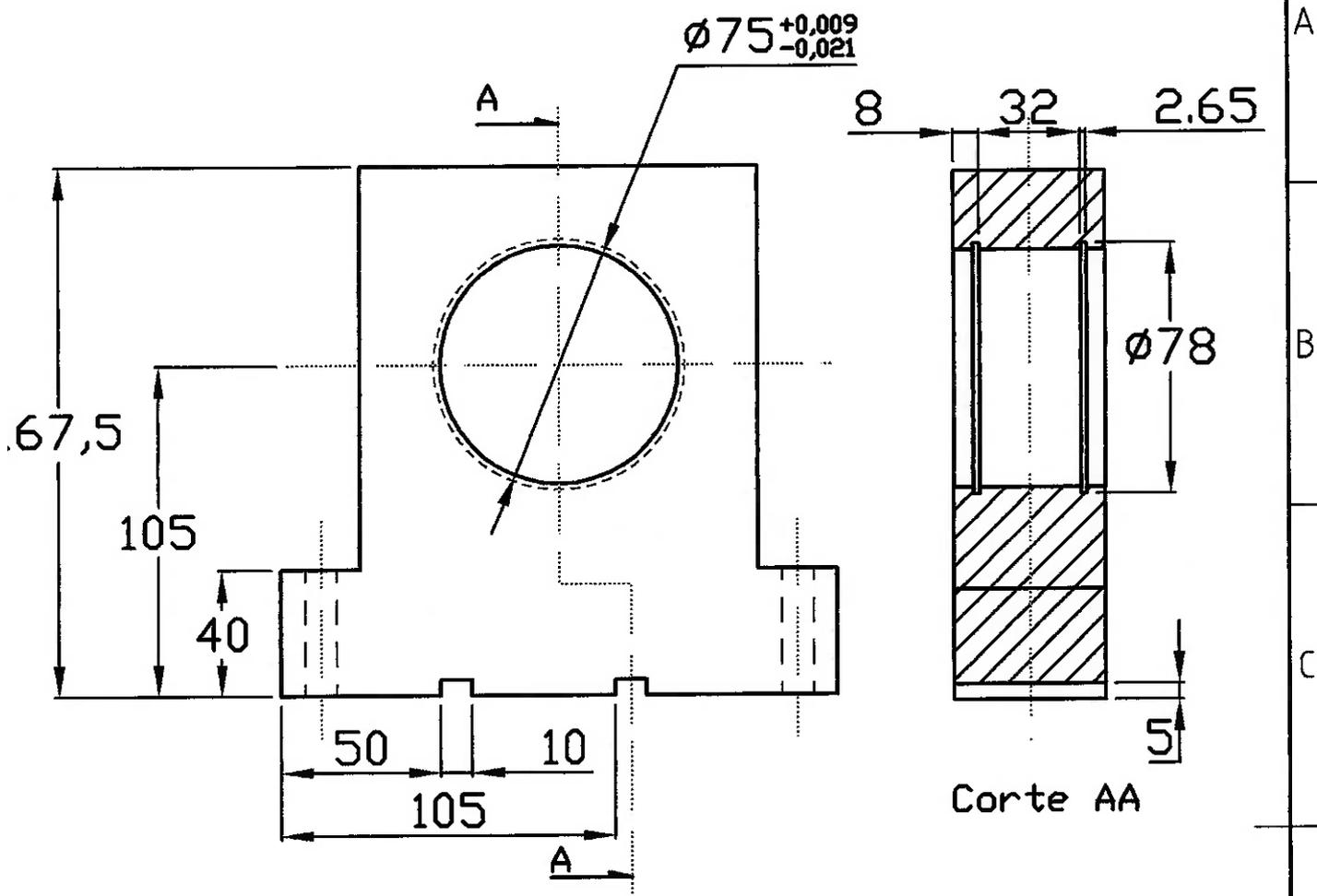
A  
B  
C  
D  
E  
F



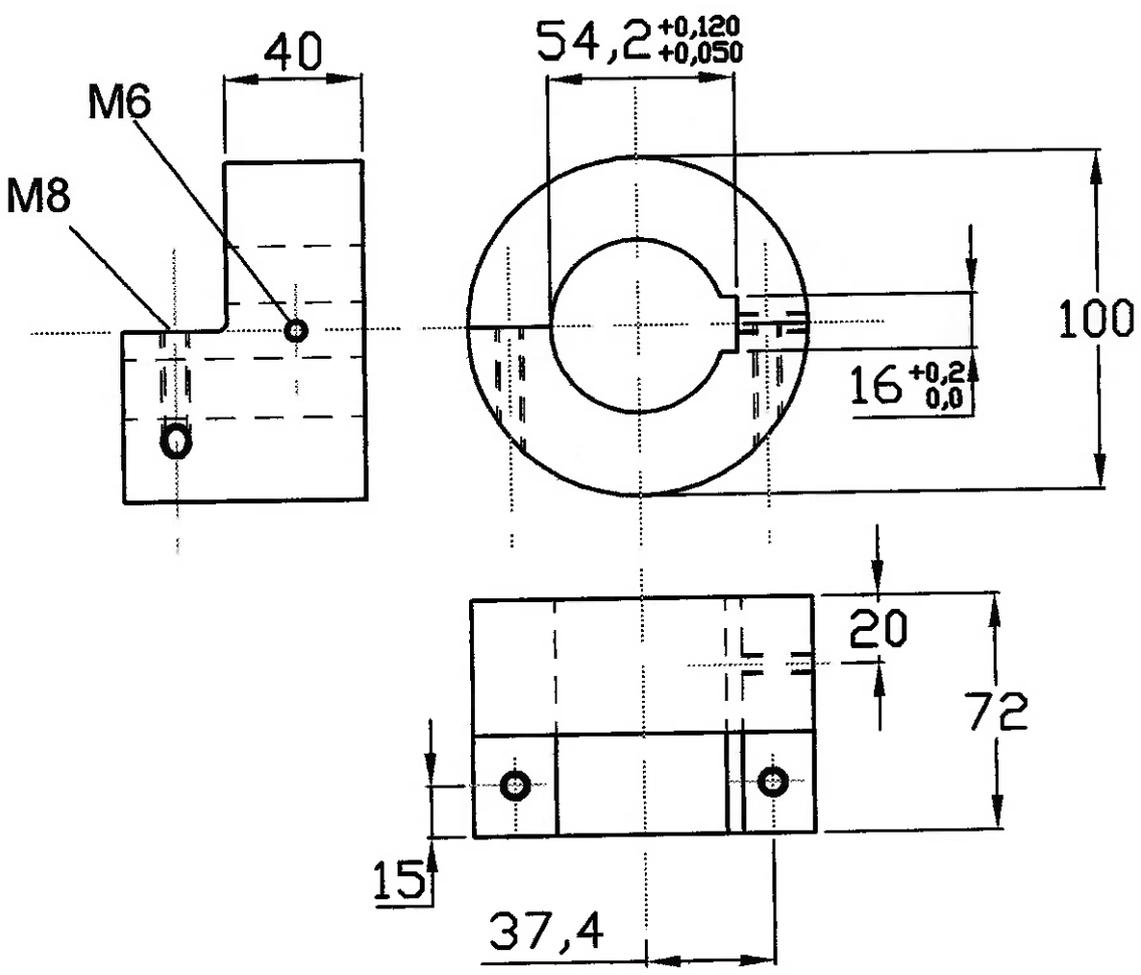
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00800	Date 26/11/02	Scale 1:1	
Trabalho de Formatura			Disco - Motor			
			00800	Edition 1	Sheet 1/1	



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD00900	Date 26/11/02	Scale 1:1	
Trabalho de Formatura			Eixo			
			00900	Edition 1	Sheet 1/1	

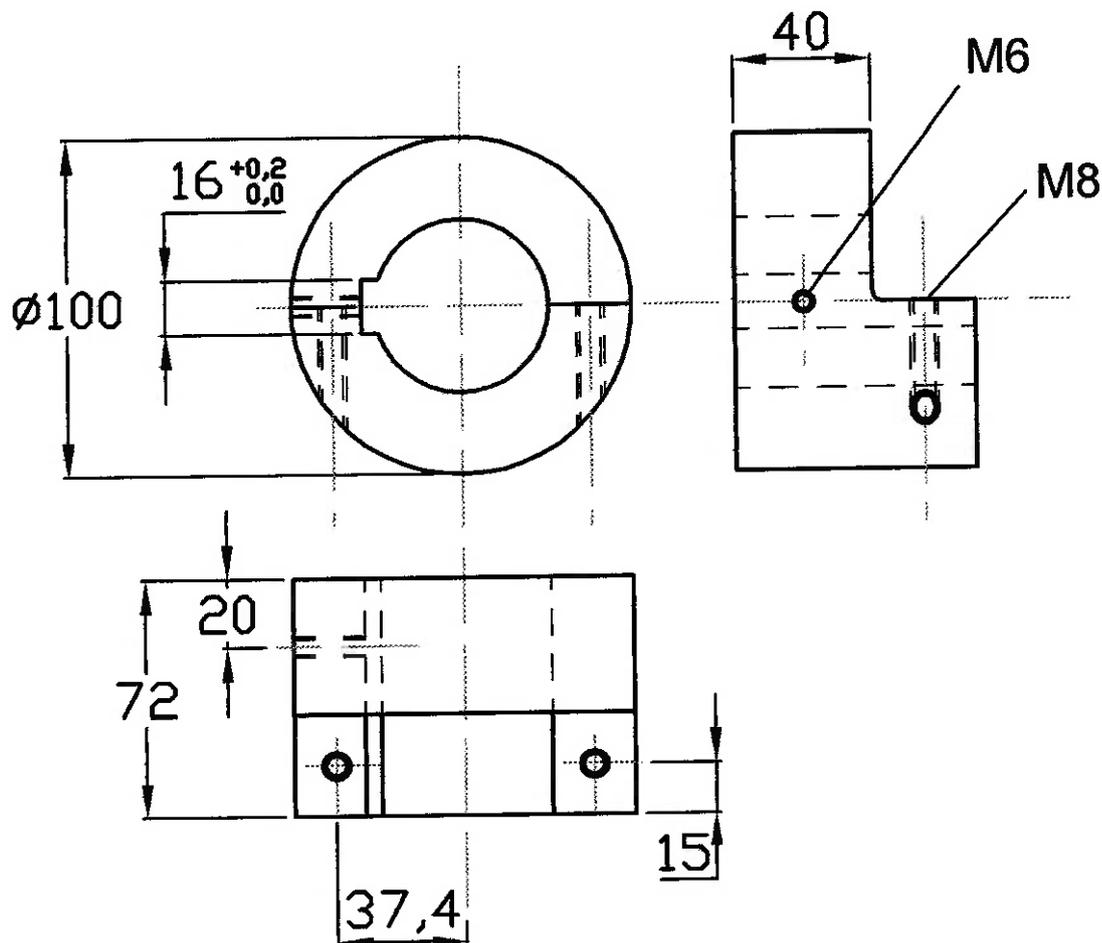


Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD01000	Date 26/11/02	Scale 1:1	
Trabalho de Formatura			Mancal			
			01000	Edition 1	Sheet 1/1	

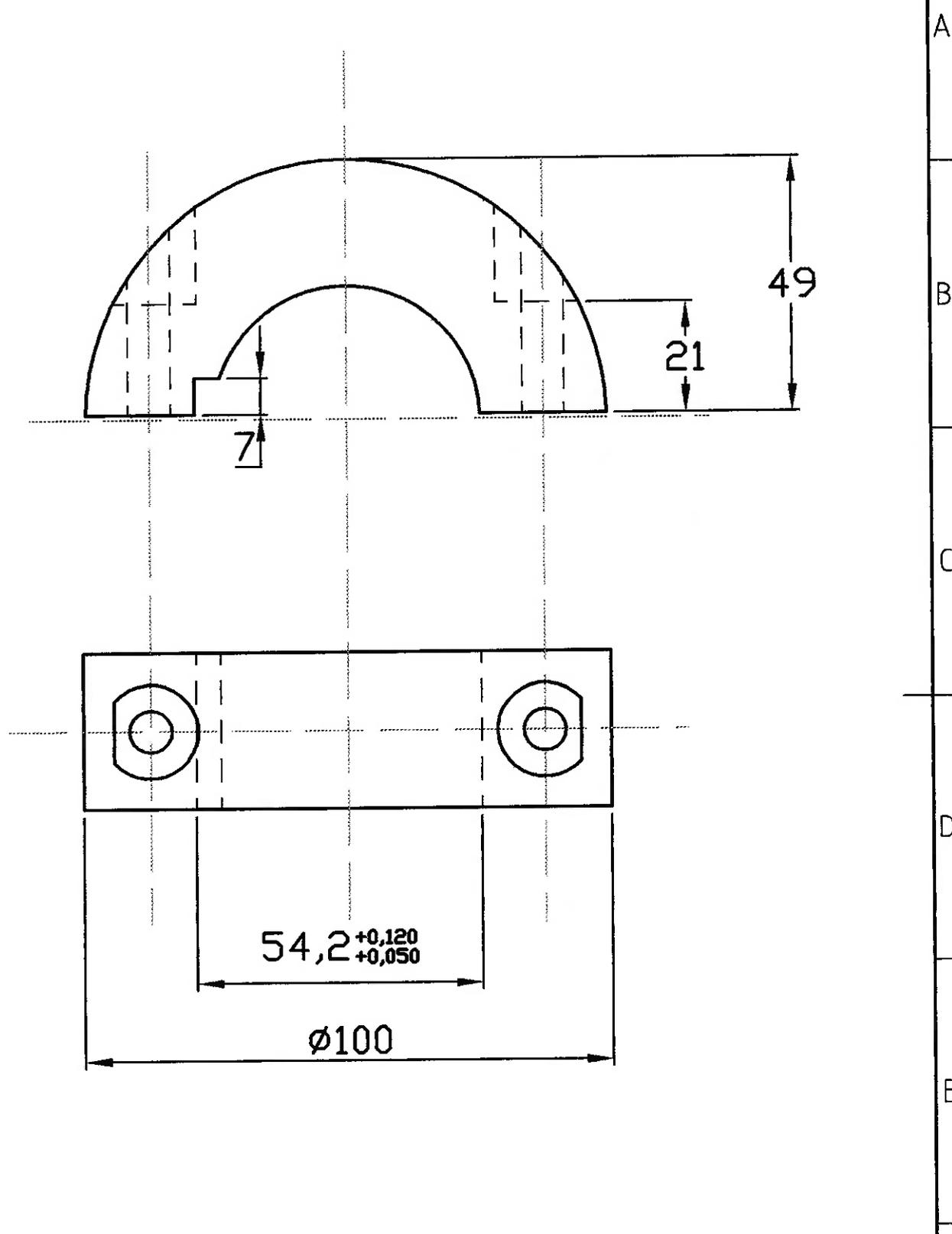


Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD01100	Date 26/11/02	Scale 1:1	
Trabalho de Formatura			Luva - Barra2			
			01100	Edition 1	Sheet 1/1	

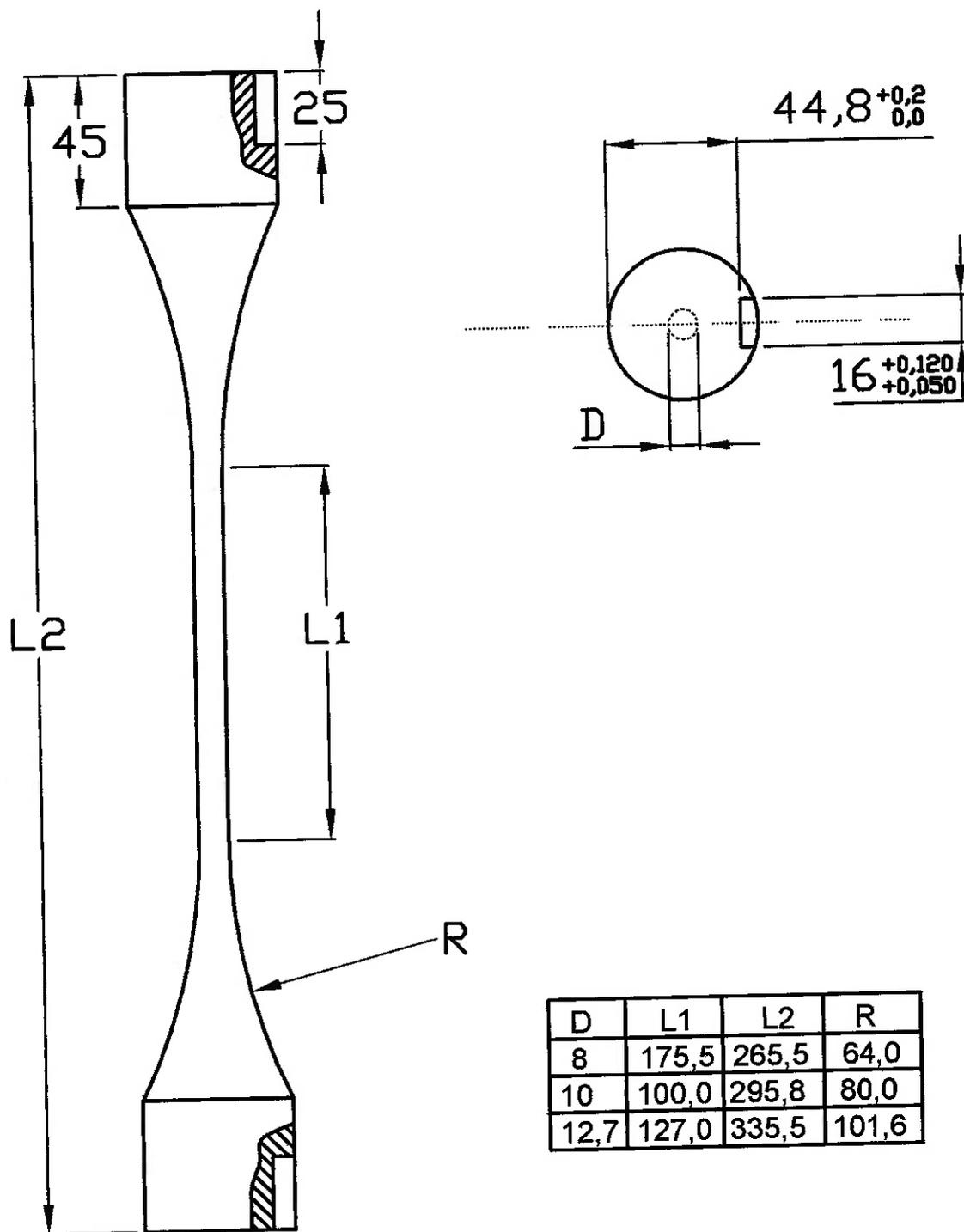
A  
B  
C  
D  
E  
F



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD01110	Date 26/11/02	Scale 1:1	
Trabalho de Formatura			Luva - Disco			
			01110	Edition 1	Sheet 1/1	



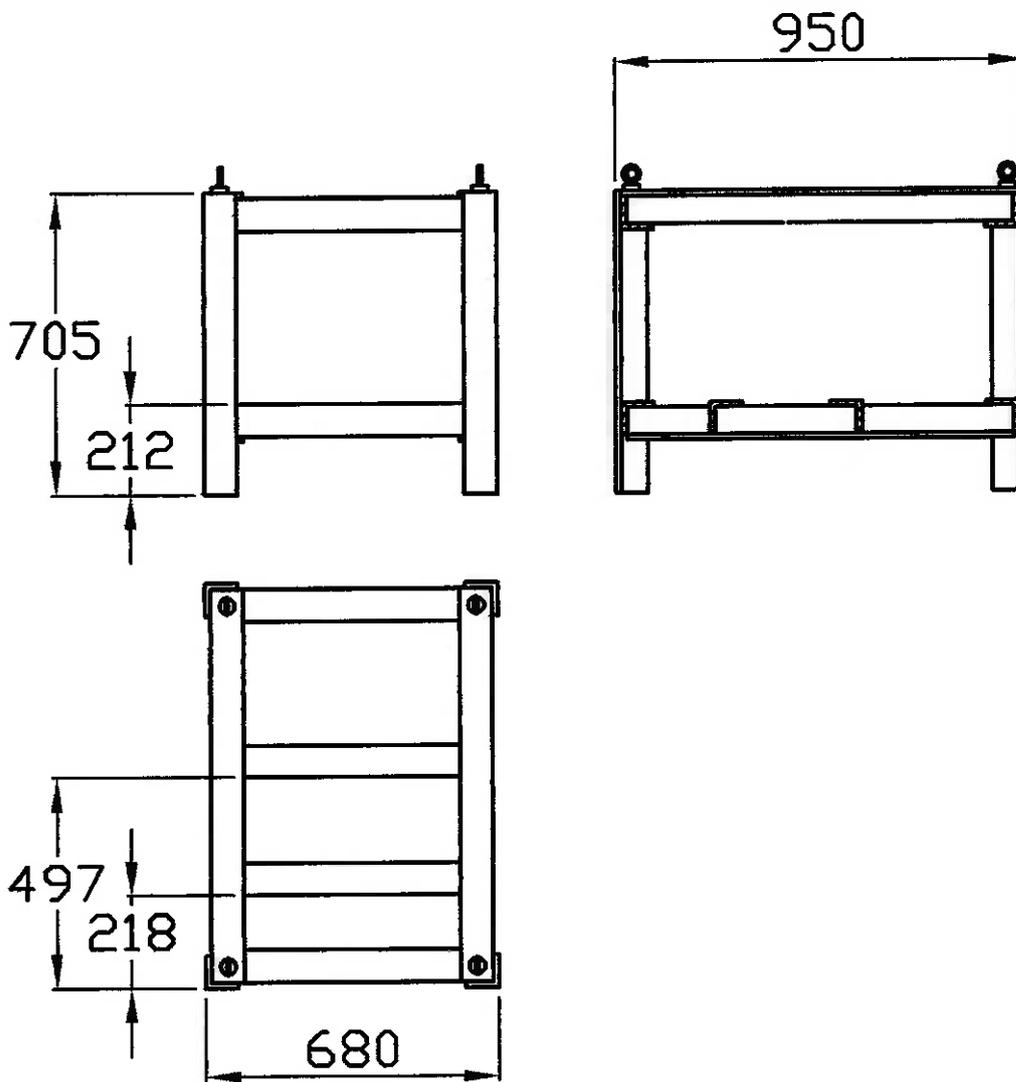
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD01120	Date 26/11/02	Scale 2:1	
Trabalho de Formatura			Luva - Capa			
			01120	Edition 1	Sheet 1/1	



D	L1	L2	R
8	175,5	265,5	64,0
10	100,0	295,8	80,0
12,7	127,0	335,5	101,6

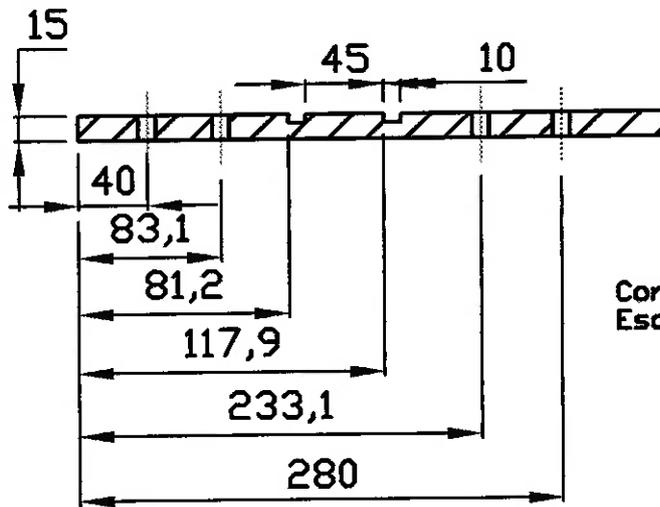
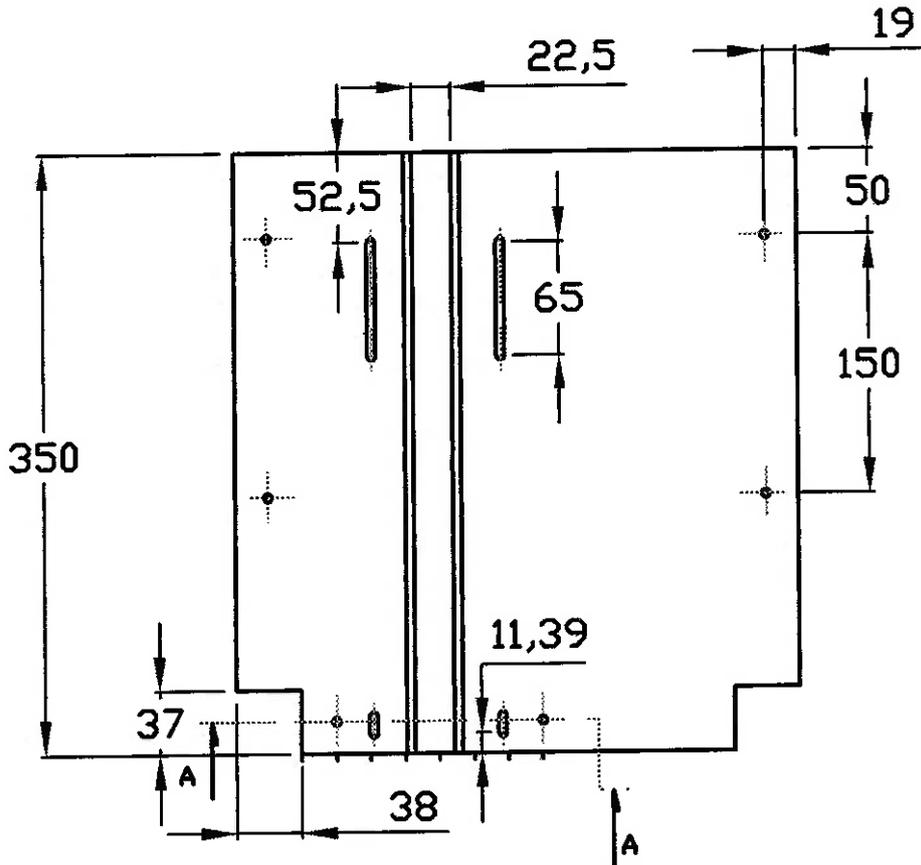
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD01200	Date 26/11/02	Scale 1:1	
Trabalho de Formatura			Corpo de Prova			
			01200	Edition 1	Sheet 1/1	

A  
B  
C  
D  
E  
F



A  
B  
C  
D  
E  
F

Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan		Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD01300	Date 26/11/02	Scale 1:8
Trabalho de Formatura			Estrutura			
			01300	Edition 1	Sheet 1/1	



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc			Article No./Reference	
Designed by Ivan	Checked by Ivan	Approved by - date Ivan - 26/11/02	File name TFD01400	Date 26/11/02	Scale 1:4	
Trabalho de Formatura			Base			
			01400	Edition 1	Sheet 1/1	

A

B

C

D

E

F