



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA PARA**  
**ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO**

**MATHEUS DA SILVA LAGES**

**Belo Horizonte, 04 de agosto de 2017**

Matheus da Silva Lages

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA PARA  
ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. PhD. Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017

L174d

Lages, Matheus da Silva.

Desenvolvimento de uma máquina para ensaio de fadiga por flexão [manuscrito] / Matheus da Silva Lages. – 2017.  
127 f., enc.: il.

Orientador: Alexandre Mendes Abrão.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 97-127.

Bibliografia: f. 92-96.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Máquinas de ensaio de fadiga - Teses. 3. Fadiga - Teses. 4. Máquinas - Projetos - Teses. 5. Flexão (Engenharia civil) - Teses. I. Abrão, Alexandre Mendes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: +55 31 3409.5145

E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**"DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA PARA ENSAIO DE  
FADIGA POR FLEXÃO"**

**MATHEUS DA SILVA LAGES**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Processos de Fabricação**".

Dissertação aprovada no dia 04 de agosto de 2017.

Por:



**Prof. Alexandre Mendes Abrão**  
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG



**Prof. Juan Carlos Horta Gutiérrez**  
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG



**Prof. Giovane Azevedo**  
Colégio Técnico/UFMG

## AGRADECIMENTOS

Nada seria possível se não fosse por **Ele**, então meu primeiro agradecimento é por **Deus** ter me dado oportunidade, sabedoria e por ter colocado pessoas especiais pelo meu caminho, facilitando esta caminhada. Este trabalho não seria possível sem que pessoas especiais me apoiassem, então não poderia deixar de agradecer:

A meus pais, **Gildenir Silvestre Lages** e **Maria Eunice da Silva Lages**, que sempre lutaram e deram o melhor de si para que eu conseguisse seguir meu caminho decentemente. Agradeço pelos conselhos, apoio e por sempre acreditarem em meus objetivos, sonhos e na minha capacidade. Obrigado por tudo que fizeram e ainda fazem por mim.

À minha namorada, **Karine Matoso Miranda**, que sempre se fez presente ao meu lado, sendo participativa no desenvolvimento deste trabalho me dando conselhos, sendo amiga, companheira, paciente e me alegrando. Você foi fundamental para a conclusão deste trabalho, me dando forças nos momentos mais críticos e em todo momento acreditando que eu conseguiria ir até o fim. Obrigado por sempre me inspirar a querer ser mais e melhor do que sou hoje.

Ao professor **Alexandre Mendes Abrão** que, mesmo sem me conhecer aceitou o desafio de ser meu orientador e me conduziu à elaboração deste trabalho. Obrigado pela dedicação, paciência e amizade. Sua competência e orientação foram de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores **Gabriel de Oliveira Ribeiro**, **Francisco Carlos Rodrigues** e **Ana Maria Gontijo Figueiredo**, Departamento de Engenharia de Estruturas, da UFMG, por disponibilizarem a máquina de ensaio de fadiga existente no Laboratório de Estruturas da UFMG para avaliação e incentivo ao desenvolvimento da uma nova máquina de fadiga em questão.

Às pessoas que participaram diretamente ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho, em especial ao **Anderson Júnior dos Santos**, ao **Caio Ladeia Costa Alves** e ao **Listz Simões de Araújo**, que foram fundamentais na fabricação e montagem da máquina, no modelamento e no desenvolvimento da parte eletrônica da mesma, respectivamente. Obrigado pelo comprometimento, disponibilidade e amizade. Sem a ajuda de vocês esse trabalho seria mais complicado e o resultado alcançado não seria o mesmo.

Aos professores do programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFMG e aos alunos de mestrado e doutorado que frequentam o Laboratório de Usinagem e Automação, especialmente ao professor **Marcelo Araújo Câmara**, que me ajudaram no trabalho com seus ensinamentos e orientações. Todos foram referência e contribuíram de alguma maneira, por isso meus agradecimentos.

Meus sinceros agradecimentos.

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE GRÁFICOS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo .....	3
1.2 Estrutura do trabalho .....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Materiais .....	4
2.1.1 Propriedades mecânicas dos materiais .....	5
2.1.2 Imperfeições e defeitos estruturais .....	18
2.2 Fadiga .....	21
2.2.1 Processo de fratura por fadiga .....	28
2.2.2 Fadiga de alto e baixo ciclo .....	32
2.2.3 Ensaio de fadiga .....	36
2.2.3.1 Ensaio de fadiga por flexão alternada.....	36
2.2.3.2 Ensaio de fadiga por flexão rotativa .....	37
2.2.3.3 Outros tipos de ensaios de fadiga .....	39
2.3 Fatores que influenciam na vida em fadiga dos materiais.....	39
2.3.1 Influência da microestrutura.....	40
2.3.2 Influência dos processos de fabricação .....	41
2.3.3 Influência do ambiente .....	42
2.3.4 Influência da carga aplicada .....	43
2.3.5 Influência do acabamento e geometria do material .....	44
2.3.6 Influência de uniões.....	44
2.4 Metodologia de projeto.....	45
2.4.1 Planejamento do processo .....	46
2.4.1.1 Seleção de materiais para projetos mecânicos.....	48
2.4.1.2 Recursos e ferramentas para elaboração de projetos .....	49

2.4.1.3 Informações complementares sobre projetos .....	50
3 DESENVOLVIMENTO.....	52
3.1 Princípios básicos .....	53
3.2 Subconjuntos da máquina.....	55
3.2.1 Subconjunto estrutural.....	55
3.2.2 Subconjunto dinâmico .....	59
3.2.2.1 Motor e inversor de frequência.....	60
3.2.2.2 Redução .....	62
3.2.2.3 Conjunto biela-base móvel .....	63
3.2.2.4 Outros elementos dinâmicos.....	68
3.2.3 Controle da máquina de fadiga e coleta de dados .....	70
3.2.4 Realização dos ensaios de fadiga.....	74
3.3 Dimensionamento da máquina de fadiga .....	75
3.4 Materiais .....	76
3.5 Fabricação e montagem mecânica.....	77
3.5 Limitações mecânicas.....	79
4 TESTES DE VALIDAÇÃO.....	82
5 CONCLUSÃO.....	88
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
ABSTRACT .....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	92



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Tipos de defeitos pontuais	19
FIGURA 2.2	Modelo de iniciação de trinca de fadiga	27
FIGURA 2.3	Processo de fadiga: inicialização e propagação de trincas	29
FIGURA 2.4	Marcas de praia e de estria resultantes da fratura por fadiga	31
FIGURA 2.5	Estrias de fadiga em liga de alumínio 2014-T6 visto em MEV	32
FIGURA 2.6	Representação do teste de fadiga por flexão alternada e algumas características	37
FIGURA 2.7	Representação do teste de fadiga por flexão rotativa	38
FIGURA 2.8	As fases do projeto com as devidas iterações	47
FIGURA 2.9	Relação entre projeto, materiais e processo de fabricação	49
FIGURA 3.1	Representação básica da máquina para ensaio de fadiga por flexão	53
FIGURA 3.2	Máquina para ensaio de fadiga por flexão existente DEES da EE - UFMG	54
FIGURA 3.3	Representação da estrutura da máquina de fadiga e suas dimensões externas	55
FIGURA 3.4	Representação da parte superior da estrutura da máquina de ensaio de fadiga por flexão	56
FIGURA 3.5	Representação das paredes e parte inferior da máquina	57
FIGURA 3.6	Representação dos acessórios utilizados para fixação da parte dinâmica	58

FIGURA 3.7	Subconjunto dinâmico com as peças estruturais de fixação e os sensores responsáveis pelo controle do ensaio	60
FIGURA 3.8	Motor trifásico utilizado na máquina para ensaio de fadiga	61
FIGURA 3.9	Inversor de frequência utilizado na máquina para ensaio de fadiga	61
FIGURA 3.10	Polias utilizadas para a redução	63
FIGURA 3.11	Representação do mecanismo para transformar o movimento circular em movimento vertical da máquina para ensaio de fadiga	63
FIGURA 3.12	Variação da amplitude da flecha.	65
FIGURA 3.13	Representação (fora de escala) do volante com rasgo (esquerda) e do pino adaptado (direita) para possibilitar a variação da amplitude da flecha	66
FIGURA 3.14	Mecanismo responsável por transmitir a flecha para o corpo de prova	67
FIGURA 3.15	Neutralização de desalinhamentos entre árvores por meio de acoplamento elástico	68
FIGURA 3.16	Representação dos mancais e buchas fabricados	69
FIGURA 3.17	Esquema dos dispositivos eletrônicos utilizados na máquina de fadiga	70
FIGURA 3.18	Mecanismo para contagem de ciclos	71
FIGURA 3.19	Sensor fim de curso	72
FIGURA 3.20	<i>Display</i> LCD pronto para receber o número de ciclos desejados na operação	73
FIGURA 3.21	Cartão de memória micro SD incluso no circuito eletrônico da máquina de fadiga	73

FIGURA 3.22	Metodologia para realização e obtenção de dados dos ensaios de fadiga	75
FIGURA 3.23	Modelamento completo da máquina em dois ângulos diferente	76
FIGURA 3.24	Bucha de bronze prensada no interior do mancal	79
FIGURA 4.1	Máquina para ensaio de fadiga por flexão	82
FIGURA 4.2	Corpo de prova para a validação da máquina	83
FIGURA 4.3	Medição de rugosidade de um dos corpos de prova e apalpador em destaque	84
FIGURA 4.4	Exemplo de perfil de rugosidade de um corpo de prova	85
FIGURA 4.5	Imagem antes da inicialização do ensaio de validação da máquina de fadiga com destaque para a fixação do corpo de prova	86
FIGURA 4.6	Imagem após o ensaio de validação da máquina de fadiga	86

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1	Diferença no comportamento da deformação elástica e plástica dos metais	7
GRÁFICO 2.2	Módulo de elasticidade através da tensão <i>versus</i> deformação	8
GRÁFICO 2.3	Representação do diagrama tensão-deformação convencional para um aço	10
GRÁFICO 2.4	Determinação do limite convencional de escoamento de 0,2% para o ferro fundido cinzento	11
GRÁFICO 2.5	Diferença de comportamento entre os materiais frágeis e dúcteis	13
GRÁFICO 2.6	Gráfico típico de ruptura por fluência para o material ASTM E 139	17
GRÁFICO 2.7	Representação do módulo de resiliência (área hachurada) através do gráfico $\sigma \times \epsilon$	18
GRÁFICO 2.8	Cargas alternadas com amplitude de oscilação ao nível médio da tensão nula	22
GRÁFICO 2.9	Outros dois modos de solicitações mecânicas	23
GRÁFICO 2.10	Ciclo de tensão com diferentes valores de tensões médias ( $S_m$ ) e de razão ( $R$ )	24
GRÁFICO 2.11	Representação de uma curva S-N típica	25
GRÁFICO 2.12	Exemplos de curvas S-N para alguns materiais	26
GRÁFICO 2.13	Resultado do ensaio de fadiga de uma espécie sem entalhe de aço baixa liga (SAE 4130)	33
GRÁFICO 2.14	Laços de histerese associados à cargas cíclicas que produzem danos de fadiga de baixo ciclo	34

GRÁFICO 2.15	Fenômeno transiente antes da estabilidade do ciclo de histerese	35
GRÁFICO 2.16	Efeito da tensão média na vida em fadiga	40
GRÁFICO 2.17	O efeito da corrosão na vida de fadiga de um liga de Al (7075-T6)	43
GRÁFICO 4.1	Tensão <i>versus</i> número de ciclos realizados	87

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Propriedades de alguns materiais	12
TABELA 2.2	Dados de dureza Brinell de alguns materiais	14
TABELA 2.3	Dados de dureza Rockwell de alguns polímeros	15
TABELA 2.4	Valores dos coeficientes $a$ e $b$ para estimar o limite de resistência à tração para aços	15
TABELA 2.5	Classificação de alguns ensaios dos materiais	21
TABELA 2.6	Efeito do tamanho do corpo de prova no limite de resistência à fadiga	44
TABELA 2.7	Comparação de algumas propriedades de diferentes classes de materiais	49
TABELA 3.1	Metodologia de projeto para a máquina de fadiga	52
TABELA 3.2	Dados técnicos do motor utilizado na máquina	60
TABELA 3.3	Estimativa de custos da máquina	81
TABELA 4.1	Rugosidade média dos corpos de prova	85
TABELA 4.2	Dados dos ensaios de fadiga para validação da máquina	87

## RESUMO

O conhecimento a respeito das propriedades dos materiais é de grande importância para aplicações de engenharia. Propriedades químicas, físicas e mecânicas de um material diferenciam-se de outros e graças a essas diferenças pode-se desfrutar de toda tecnologia e conforto atual. O estudo dessas propriedades é necessário para o desenvolvimento de novos equipamentos ou produtos e uma importante propriedade é a resistência à fadiga dos materiais utilizada para a fabricação de componentes que serão submetidos a cargas cíclicas porque a falha por fadiga pode acontecer inesperadamente. O objetivo deste trabalho é projetar e construir uma máquina para ensaio de fadiga por flexão para ser utilizada no estudo do comportamento de materiais metálicos que apresentam geometria plana, comum em diversas operações de usinagem, possibilitando o estudo da resistência à fadiga variando parâmetros de fresamento, por exemplo. O projeto da máquina foi dividido em dois grandes grupos denominados estrutural e dinâmico, formados por peças e acessórios com o objetivo de, juntos, realizar os ensaios de fadiga. Como o ensaio de fadiga por flexão permite uma variação nas dimensões dos corpos de prova, a máquina foi construída para possibilitar ensaios de corpos de prova com diferentes tamanhos e formas. Aços ABNT 1020 e 1045 foram predominantes na construção da máquina, entretanto, materiais polímeros foram ocasionalmente utilizados em locais específicos. Um circuito eletrônico consistindo basicamente de um microcontrolador *Arduino*, um *encoder*, um fotodetector e um sensor de interrupção foi desenvolvido e construído para a contagem do número de ciclos e interrupção do teste imediatamente após a fratura do corpo de prova. Ensaios de validação da máquina foram realizados utilizando oito corpos de prova de aço ABNT 1020 e indicaram que a máquina apresenta desempenho satisfatório, pois a mesma realizou e registrou adequadamente os testes, possibilitando a obtenção de dados confiáveis para elaborar a curva de Wöhler.

**Palavras-chave:** *Ensaio de fadiga por flexão; fadiga; projeto de máquina; curva de Wöhler.*

# 1 INTRODUÇÃO

Os diferentes produtos encontrados no cotidiano são constituídos de diversos tipos de materiais, tais como objetos de madeira, plástico, aço, vidro, entre outros. A diversidade dos materiais permitiu o avanço e modernização da humanidade até os dias atuais. O desenvolvimento tecnológico é movido pela necessidade humana e está diretamente associado à utilização adequada dos materiais, o que só pode ser feito por meio do conhecimento de cada tipo de material, suas propriedades e particularidades, portanto, conhecer bem as características dos diferentes materiais é de extrema importância.

O desenvolvimento tecnológico deve acontecer com responsabilidade, atendendo às necessidades da sociedade e minimizando os possíveis impactos ambientais. Os principais responsáveis pelo desenvolvimento de novas tecnologias e pelas soluções de diferentes problemas são os cientistas e os engenheiros. Inevitavelmente, estes trabalham direta ou indiretamente com a seleção de materiais a fim de utilizar os mais adequados a uma determinada função.

Existem três grupos principais de materiais, os quais são classificados como: metais, polímeros e cerâmicos e são diferenciados pela sua composição atômica e química (CALLISTER, 2008). Cada grupo possui diversos compostos com propriedades mecânicas individuais, o que leva um material a ser aplicável em uma situação ou não. O estudo de cada material torna-se necessário para a sua correta utilização.

Entre as diversas propriedades dos materiais, destaca-se a resistência à fadiga. A maioria das máquinas e equipamentos está sujeita a esforços cíclicos e dependendo da ocasião esses esforços repetitivos podem provocar a falha do material o que, eventualmente, pode resultar em uma catástrofe. Essa falha é ocasionada pela fadiga dos materiais e a maioria das falhas mecânicas (50 a 90 %) ocorre por esse fenômeno, sendo que acontecem majoritariamente de forma repentina (ROSA, 2002).

Exemplos históricos não faltam para confirmar que falhas por fadiga podem resultar em catástrofes. Na década de 1960 um avião da empresa Comet de origem inglesa



acidentou-se devido ao desgaste na fuselagem que trincou a ponta de uma das janelas, criando concentradores de tensão e levando 520 pessoas a óbito. Segundo as investigações, um reparo no avião foi mal feito e a inspeção falhou ao não detectar a fadiga do metal (ABRAHÃO et al., 2008).

Em 1994, na sétima volta do Grande Prêmio de San Marino, na Itália, o piloto brasileiro Ayrton Senna perdeu o controle de seu carro Williams passando direto por uma curva batendo contra o muro de retenção a 216 km/h, o que levou o piloto a óbito. O relatório de 70 páginas do comitê de investigação concluiu que a coluna da direção do carro fraturou por fadiga. Anteriormente, os mecânicos resolveram cortar a barra de direção do carro e soldaram uma bucha a fim de aumentar o comprimento deste componente, pois Senna havia dito durante várias corridas que o volante estava muito distante do seu corpo. A fratura por fadiga ocorreu exatamente na solda realizada (TAKASHI, 2014).

Em 2013, a montadora japonesa Toyota anunciou um *recall* em 242.000 veículos híbridos *Toyota Prius* e *Lexus HS 250h* em todo o mundo. O motivo foi que os carros eram equipados com acumulador de pressão de freio que pode desenvolver trinca por fadiga devido à vibração (TAKASHI, 2014).

A melhor maneira de prevenir uma falha por fadiga é conhecendo as propriedades dos materiais por meio de ensaios que forneçam resultados necessários para prever a vida em fadiga do material quando cargas alternadas são aplicadas.

As máquinas para a realização de ensaios de fadiga devem ser construídas de acordo com o ensaio desejado. A construção da máquina demanda tempo para seu projeto, fabricação, montagem e validação, além de custos em todas as fases. Entretanto, uma vez construída, a máquina é útil para diversas pesquisas, incluindo desenvolvimento de novos produtos e aperfeiçoamento dos já existentes.

A máquina de fadiga por flexão permite o estudo da resistência à fadiga em peças mecânicas que possuem formato plano, portanto, através desse tipo de ensaio é possível o estudo da fadiga em materiais levando em consideração a variação dos parâmetros de usinagem de alguns processos de fabricação que utilizam peças com esse tipo de geometria, como por exemplo, o processo de fresamento.

## **1.1 Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma máquina para ensaio de fadiga por flexão. Mais especificamente, o trabalho consiste no projeto, fabricação, montagem e validação da máquina. A máquina segue o modelo de uma máquina para ensaio de fadiga já existente na Universidade Federal de Minas Gerais, com devidas melhorias propostas. Após montagem e validação, a máquina ficará disponibilizada no Laboratório de Usinagem e Automação da Universidade Federal de Minas Gerais para servir de auxílio a pesquisas que relacionem a influência do processo de usinagem e dos parâmetros de corte ao desempenho do componente usinado sob fadiga.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

O trabalho foi dividido em seções introdutórias e objetivas para facilitar o entendimento do processo da fabricação da máquina de fadiga. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica com temas importantes para o completo entendimento do assunto, como as propriedades mecânicas dos materiais, com ênfase na fadiga, e o desenvolvimento de projetos de engenharia.

O terceiro capítulo faz uma apresentação detalhada das peças, acessórios e conjuntos necessários para o funcionamento da máquina. Também é descrito o modo de aquisição das peças, fabricação e montagem da máquina.

O quarto capítulo apresenta a metodologia e os resultados para validação da máquina. As conclusões do projeto e fabricação da máquina são apresentadas no quinto capítulo e o sexto capítulo é destinado às sugestões para possíveis melhorias na máquina.

Nos anexos são apresentados o código utilizado para possibilitar a coleta de dados dos ensaios (Anexo A), o dimensionamento do eixo responsável por transmitir força e movimento aos testes (Anexo B), a metodologia de cálculo da tensão aplicada aos corpos de prova ensaiados (Anexo C) e o detalhamento bidimensional da máquina (Anexos D1 ao D22).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão tratados tópicos relevantes para o desenvolvimento da máquina para ensaio de fadiga por flexão. Inicialmente é apresentado um estudo das características dos materiais metálicos dando ênfase no fenômeno da fratura por fadiga, que abrange suas características, particularidades e a realização de ensaios para avaliar as propriedades de fadiga. O capítulo é finalizado com uma explanação sobre como são desenvolvidos os projetos de engenharia.

### 2.1 Materiais

Existem basicamente três grandes grupos de materiais no estado sólido: metais, cerâmicas e polímeros. A classificação em cada grupo de materiais está ligada às diferenças na composição química e à estrutura atômica (CALLISTER, 2008).

Os materiais metálicos são compostos por, no mínimo, um elemento metálico com outro elemento também metálico ou não metálico. Seus átomos são arranjados de maneira ordenada, são relativamente densos, geralmente rígidos e dúcteis (resistem a grandes deformações sem que ocorra fratura). Os metais são bons condutores elétricos e de calor e não são transparentes à luz visível (CALLISTER, 2008).

As cerâmicas são formadas pela combinação entre elementos metálicos e não metálicos, sendo mais rígidas e resistentes que os compostos metálicos, entretanto, são muito duras e frágeis (sofrem pouca ou nenhuma deformação antes da fratura) em comparação aos metais. Esses materiais são bons isolantes elétricos e térmicos, sendo muito resistente às altas temperaturas e ambientes severos de trabalho. Outras propriedades das cerâmicas são que elas podem ser transparentes, opacas ou translúcidas à luz visível (CALLISTER, 2008).

Os polímeros são formados por elementos não metálicos e possuem como características estruturas moleculares muito grandes. Quando comparados aos metais e às cerâmicas, os polímeros possuem baixa densidade, além de não serem tão rígidos

nem resistentes. Outras características dos polímeros são: baixa ductilidade, inércia química e elevada deformação sob moderadas temperaturas (CALLISTER, 2008).

A combinação de dois ou mais diferentes tipos de materiais recebe a denominação de compósito. Os compósitos permitem que um material atinja certas características que não seriam possíveis utilizando um material isolado, assim, é possível combinar as melhores características de cada material criando outro material para a aplicação desejada (CALLISTER, 2008).

### 2.1.1 Propriedades mecânicas dos materiais

Apesar da evolução dos materiais cerâmicos, polímeros e compósitos, os materiais metálicos apresentam características mais interessantes e aplicáveis aos projetos de engenharia. Isto se deve ao fato dos materiais metálicos responderem de forma aceitável aos esforços aos quais são submetidos quando em serviço. Desta maneira, é sempre desejável o estudo constante e aprofundado desse tipo de material. Segundo Askeland et al. (2008), a resposta positiva ou não de um material quando solicitado a esforços é reflexo das propriedades mecânicas do material e as principais propriedades mecânicas são: resistência mecânica, rigidez, ductilidade, dureza, tenacidade, resiliência, fluência e fadiga.

A resistência mecânica de um material refere-se a sua capacidade de resistir a solicitações mecânicas sem se romper (AMARAL, 2002). A carga mecânica que age na unidade de área sobre a qual a carga é aplicada é conhecida como tensão, deste modo, a tensão é comumente expressa em  $\text{N/mm}^2$  (newton por milímetro quadrado) ou Pa (pascal), (ASKELAND et al., 2008). Garcia (2000) descreve: “tensões representam a resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo”. A deformação pode ser definida como a alteração na geometria do material sujeito à tensão, não possuindo dimensão. A tensão e a deformação estão relacionadas diretamente como uma relação de causa e efeito (ASKELAND et al., 2008).

As tensões são originadas por solicitações mecânicas que podem ser de tração, flexão, compressão e/ou cisalhamento, podendo existir tensões originadas de combinações

dessas solicitações. As tensões de tração (ou compressão) e de cisalhamento são representadas pelo símbolo  $\sigma$  e  $\tau$ , respectivamente (ASKELAND et al., 2008).

Para se calcular a tensão é necessário conhecer a força (F) aplicada no material e a área da seção inicial ( $A_0$ ) do corpo onde a carga é diretamente aplicada, EQ (2.1). A tensão é inversamente proporcional à área do material, entretanto, na maioria dos ensaios mecânicos esta área varia durante o teste, dificultando a medição da tensão. Para contornar este problema, utiliza-se a tensão nominal (ou tensão de engenharia) que considera a área da seção inicial do material onde a força é aplicada (GARCIA et al., 2000).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

A força aplicada reduz a área de seção do material e, com isso, a tensão tem seu valor alterado constantemente caso a força aplicada não sofra alteração. Essa tensão é denominada tensão verdadeira e leva em consideração a alteração da área em cada instante de aplicação da força. Como a tensão de engenharia não leva em consideração a variação na área de seção do material, a tensão verdadeira tende a ser mais próxima ao valor da tensão de engenharia para pequenas alterações na seção transversal (ASHBY et al., 2012).

As deformações dos materiais podem ocorrer de maneira reversível ou irreversível, sendo a primeira possibilidade definida como deformação elástica e a segunda como deformação plástica (GRA 2.1). A deformação elástica é aquela que ocorre quando o material é submetido a uma carga e, quando esta é retirada, o material volta a sua forma inicial, não resultando em uma alteração geométrica. A deformação plástica é aquela em que, mesmo eliminando-se a carga, o material não volta à sua forma original. Esses dois tipos de deformação variam de um material para outro e dependem diretamente da estrutura cristalina do material. As deformações originadas por esforços de tração ou compressão são designados pelo símbolo  $\epsilon$  e as originadas por esforços de cisalhamento são designadas por  $\gamma$ , de maneira análoga às solicitações de tensões (ASKELAND et al., 2008).

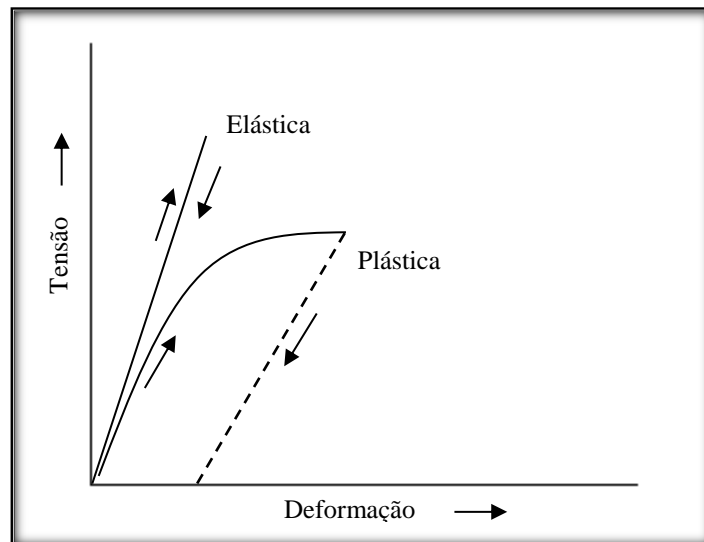


GRÁFICO 2.1 - Diferença no comportamento da deformação elástica e plástica dos metais

FONTE - Adaptado de ASKELAND et al., 2008

O cálculo da deformação é simples e leva em consideração o comprimento do material antes da aplicação da carga ( $l_0$ ) e o comprimento no instante que antecede a fratura ( $l_i$ ) ou o comprimento do material após aplicação da carga mesmo sem que ocorra fratura, EQ (2.2), (ASHBY et al., 2012).

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

A EQUAÇÃO (2.2) é conhecida como deformação de engenharia. De forma semelhante ao processo que ocorre com a tensão de engenharia, a deformação de engenharia não leva em consideração a variação na área ou volume do material. A deformação verdadeira leva em consideração essa alteração, sendo necessária sua análise em intervalos pequenos detectando cada variação (ASHBY et al., 2012).

A deformação elástica é proporcional à tensão aplicada, sendo multiplicada por uma constante de proporcionalidade, EQ (2.3). Esta relação é conhecida como lei de Hooke e a constante de proporcionalidade ( $E$ ) é conhecida como módulo de elasticidade ou módulo de Young, sendo expressa em GPa.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.3)$$

Como a deformação elástica é proporcional à tensão aplicada, o gráfico  $\sigma$  versus  $\epsilon$  resulta em uma reta onde é possível calcular o módulo de elasticidade (E), que corresponde à inclinação da curva (GRA 2.2). A inclinação da curva e, conseqüentemente, o módulo de elasticidade estão relacionados às energias de ligação atômicas do material, de modo que quanto maior o modo de elasticidade (inclinação acentuada da curva no gráfico), maior a força necessária para separar os átomos, o que torna mais difícil a deformação elástica do material. Caso contrário, quanto menor a inclinação da curva, maior a facilidade de deformar elasticamente aquele material (ASKELAND et al., 2008).

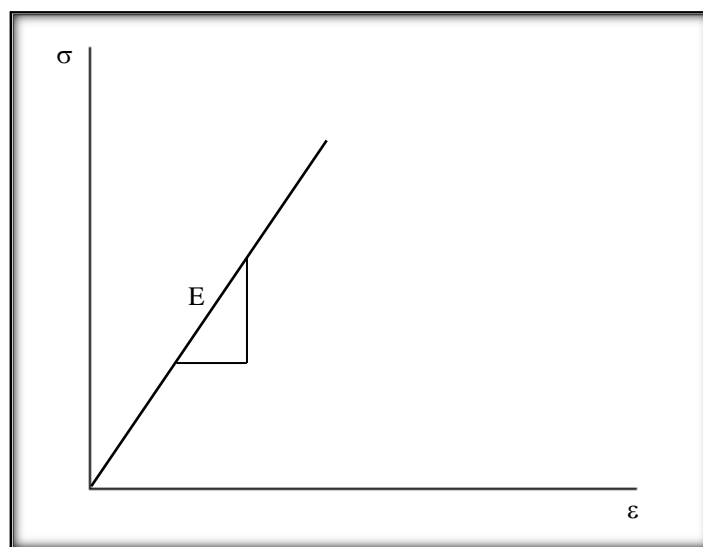


GRÁFICO 2.2 - Módulo de elasticidade através da tensão versus deformação

FONTE - Adaptado de ASKELAND et al., 2008

O módulo de elasticidade (E) indica a rigidez de um material. Amaral (2002, p.10) define rigidez como “a capacidade de um corpo, como parte de uma estrutura, de resistir a deformações, isto é, de resistir à tensões deformando-se pouco”. Deste modo, a rigidez é definida como a medida de resistência de um material à deformação de modo que quanto mais alto for o módulo de elasticidade do material, mais rígido ele será, o que significa que sofrerá menos alterações dimensionais quando uma tensão for aplicada quando comparado a um material que apresenta baixo módulo de elasticidade. A rigidez de um componente é função tanto do módulo de elasticidade quanto da geometria do componente e geralmente é maior para materiais cerâmicos, intermediário para metais e ligas metálicas e menores para os polímeros (ASKELAND et al., 2008).

O módulo de elasticidade também leva em consideração as deformações longitudinais que o material sofre, entretanto, uma vez submetido à tensões, um material deforma simultaneamente tanto longitudinalmente quanto transversalmente. A deformação transversal é proporcional a longitudinal e a relação entre essas deformações é conhecida como coeficiente de Poisson ( $\mu$ ), EQ. (2.4) (ASKELAND et al., 2008).

$$\mu = \frac{-\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (2.4)$$

De maneira análoga às deformações elásticas provocadas por tensões de tração, as tensões de cisalhamento ( $\tau$ ) também provocam deformações elásticas ( $\gamma$ ) com uma constante proporcionalidade, que neste caso é conhecida como módulo de cisalhamento ( $G$ ) que, como o módulo de elasticidade, também é expresso em GPa, EQ (2.5) (ASKELAND et al., 2008).

$$\tau = G \times \gamma \quad (2.5)$$

Diferentemente da deformação elástica, a deformação plástica é caracterizada por modificar a geometria do material mesmo quando a tensão é retirada. A deformação plástica é provocada pela quebra de ligações com os átomos vizinhos originais e a formação de novas ligações com novos átomos vizinhos, uma vez que a tensão aplicada provoca uma grande movimentação nos átomos ou moléculas dos materiais (CALLISTER, 2008).

Todos os materiais sujeitos a esforços mecânicos deformam-se elasticamente e, dependendo da intensidade da carga, podem sofrer deformação plástica. Para saber quando um material passa da deformação elástica para a plástica e, conseqüentemente, descobrir até que ponto um material suporta esforços sem que ocorra uma deformação permanente, engenheiros e pesquisadores utilizam o gráfico tensão *versus* deformação (GRA 2.3). Este gráfico é individual para cada material e expressa o valor de deformação para certa carga (tensão) aplicada. Por meio do gráfico é possível verificar o comportamento plástico e elástico dos materiais (ASKELAND et al., 2008).



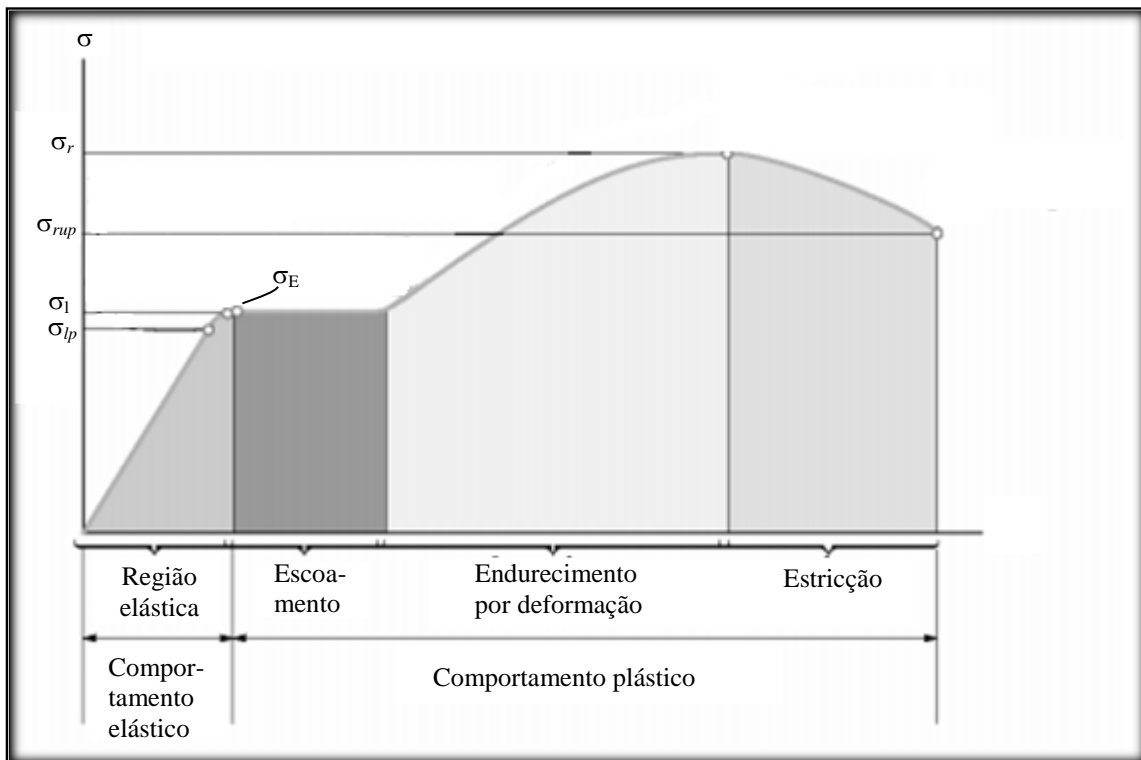


GRÁFICO 2.3 - Representação do diagrama tensão-deformação convencional para um aço

FONTE - Adaptado de HIBBELER, 2010

Hibbeler (2010) define os seguintes parâmetros identificados no gráfico:

- Tensão limite de proporcionalidade ( $\sigma_{lp}$ ): valor limite para tensão cuja deformação do material é proporcional à tensão aplicada. Como citado anteriormente, esta relação de proporcionalidade é conhecida como a Lei de Hooke.
- Tensão limite de escoamento ( $\sigma_E$ ): ponto a partir do qual o material passa a sofrer deformação plástica, perdendo suas propriedades elásticas. O limite de escoamento e o limite de proporcionalidade são bastante próximos na maioria dos materiais, sendo difícil a determinação dos valores com exatidão. Desta maneira, existe um limite convencional de escoamento que é bastante utilizado na engenharia. O valor limite convencional de escoamento é geralmente 0,002 (ou 0,2 %) e é utilizada uma reta paralela à parte linear da curva tensão-deformação (GRA 2.4). O valor de tensão desta curva é conhecido como limite convencional de escoamento (ASKELAND et al., 2008).

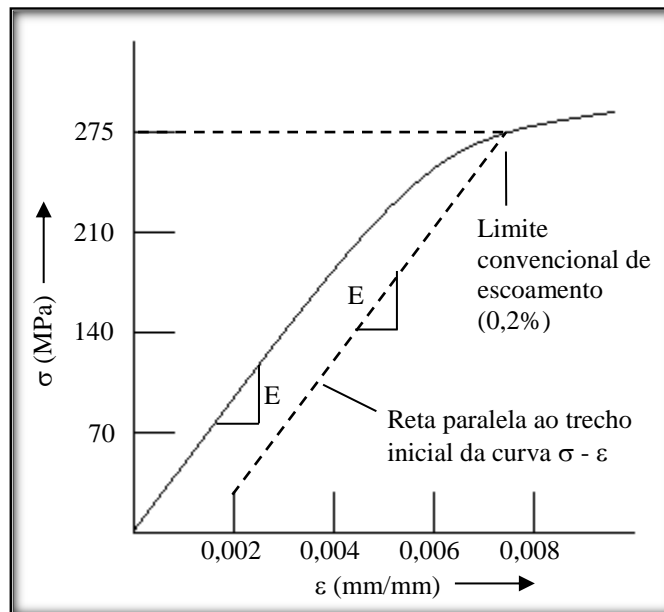


GRÁFICO 2.4 - Determinação do limite convencional de escoamento de 0,2% para o ferro fundido cinzento

FONTE - Adaptado de ASKELAND et al., 2008

- Tensão limite de resistência ( $\sigma_r$ ): corresponde à maior tensão que um material pode suportar.
- Limite de elasticidade ( $\sigma_l$ ): limite máximo de tensão que o material pode suportar sendo capaz de retornar ao seu formato original caso a tensão for removida. Após esse limite, aumentando-se ainda mais o valor de tensão o material começa de se deformar plasticamente.
- Limite de proporcionalidade ( $\sigma_{lp}$ ): determina a tensão máxima que o material pode sofrer de modo que sua deformação ocorra de maneira proporcional.
- Tensão de ruptura ( $\sigma_{rup}$ ): tensão registrada no momento instantâneo da ruptura do material.

Durante a aplicação da tensão, o material passa por diferentes comportamentos mecânicos que são separados por regiões. A região elástica é limitada pela tensão limite de proporcionalidade. O escoamento é delimitado pela região onde um pequeno aumento na tensão acima da tensão limite de proporcionalidade resultará em uma deformação irreversível do material. A região de endurecimento por deformação é

observada quando o escoamento já estiver finalizado e o material estiver sujeito a uma carga adicional. Assim, o corpo irá deformar-se plasticamente cada vez mais à medida que mais carga é aplicada, até o limite de resistência do material. Atingindo o limite de resistência, o material passa para a fase de estrição finalizando com a sua ruptura.

A TAB (2.1) apresenta algumas das propriedades citadas anteriormente para alguns materiais metálicos e polímeros. Nota-se que as ligas à base de ferro e cobre apresentam maior módulo de elasticidade que o alumínio e os polímeros, resistindo melhor a deformações quando são submetidos a tensões. O limite de resistência dos metais também são superiores aos dos outros materiais, o que os torna atrativos para aplicações mecânicas por suportarem maiores cargas.

TABELA 2.1  
Propriedades de alguns materiais

<b>Material</b>	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\sigma_E</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_r</math> (MPa)</b>
Aço 1040	$200 \times 10^3$	600	750
Aço ferramenta L2	-	1380	1550
Liga de ferro (410)	$200 \times 10^3$	700	800
Liga de cobre	$110 \times 10^3$	320	652
Alumínio 3003-H14	$70 \times 10^3$	145	150
Polietileno (alta densidade)	830	-	28
Polietileno (baixa densidade)	170	-	14
Policarbonato	2400	-	62
ABS	2100	-	28 - 48

FONTE - Adaptado de SHACKELFORD, 2000

A ductilidade é uma propriedade mecânica que relaciona a medida do grau de deformação plástica que o material suporta até a fratura (CALLISTER, 2008). Para se verificar a ductilidade de um material, este deve ser submetido ao ensaio de tração e a ductilidade é estimada verificando a distância entre as marcas de referência impostas ao material antes e após o ensaio. A ductilidade de um material deve ser considerada em aplicações onde seja necessário suportar esforços mecânicos (ASKELAND et al., 2008).

O alongamento percentual descreve quantitativamente a ductilidade, levando em consideração a deformação plástica do material antes da falha, não incluindo o retorno do material referente à parte relativa à deformação elástica (CALLISTER, 2008). O alongamento percentual leva em consideração as marcas de referência antes ( $l_0$ ) e no instante anterior à fratura do material ( $l_f$ ), (ASKELAND et al., 2008). Além de ser uma

medida quantitativa da ductilidade, o alongamento tem grande importância em engenharia por indicar a qualidade do material metálico, pois uma variação interna do material como presença de porosidades e inclusões ou outro tipo de danificação diminui o alongamento percentual a um nível inferior ao normal.

Outra forma de medição da ductilidade é através da porcentagem de redução de área (EQ 2.6). Esta grandeza é medida após ensaios de tração levando em consideração os diâmetros antes do ensaio e após a ruptura (SMITH, 1998).

$$\text{Redução de área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% \quad (2.6)$$

Os materiais que suportam grandes deformações antes da sua ruptura são denominados materiais dúcteis, enquanto os materiais que apresentam pouco ou nenhum escoamento antes da falha são conhecidos como materiais frágeis. Os materiais frágeis, como por exemplo as cerâmicas, quando submetidos a cargas externas apresentam pouca ou nenhuma deformação antes de sua ruptura, ou seja, rompem-se praticamente sem passar pela fase elástica. Por outro lado, os materiais dúcteis, como os aços ao carbono e ligas de alumínio, sofrem grande deformação, às vezes sem atingir a ruptura (CALLISTER, 2008). O GRA (2.5) representa a diferença do comportamento entre os materiais frágeis e dúcteis com base nas curvas originadas de gráficos tensão *versus* deformação.

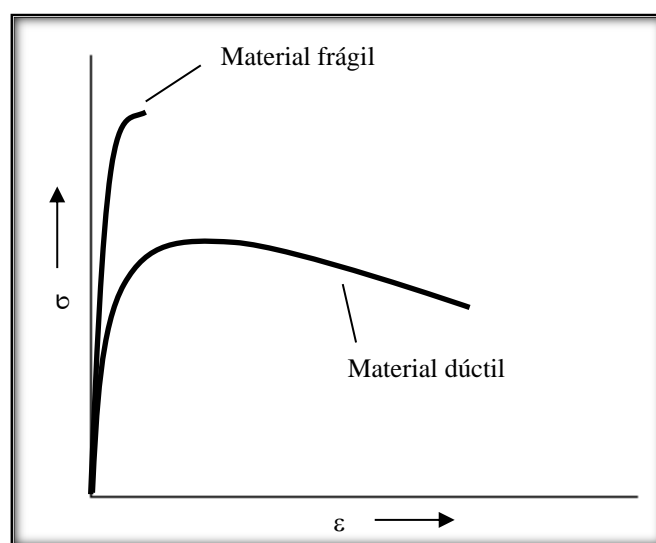


GRÁFICO 2.5 - Diferença de comportamento entre os materiais frágeis e dúcteis

FONTE - Adaptado de CALLISTER, 2008

A dureza é uma propriedade mecânica que mede a resistência de um material à deformação permanente (deformação plástica). A medição da dureza de um material metálico é realizada utilizando um indentador que é forçado contra a superfície do material, penetrando e deixando marcas da penetração. O indentador deve ser constituído de material mais duro que a superfície do material a ser analisado, sendo fabricado geralmente em aço temperado, carboneto de tungstênio ou diamante com geometrias apresentando comumente o formato de esfera, pirâmide ou cone (SMITH, 1998).

Existem diferentes tipos de ensaios de dureza, como o ensaio Brinell, ensaio Vickers e o ensaio Rockwell, que se diferenciam de acordo com a geometria do indentador. A TAB (2.2) e TAB (2.3) apresentam valores de dureza de algumas ligas em escala Brinell e alguns polímeros em escala Rockwell, respectivamente. A aplicação da carga nos ensaios ocorre de maneira lenta e a penetração na superfície do material se dá perpendicularmente. Cada ensaio possui uma fórmula específica que é utilizada para calcular a dureza do material. Após a penetração, calcula-se a dureza do material de acordo com a área impressa pelo indentador na superfície analisada, devendo este valor ser incluído na fórmula com as demais variáveis necessárias, dependendo do tipo de ensaio utilizado (SHACKELFORD, 2000). Observa-se na TAB (2.2) e TAB (2.3) que os materiais metálicos geralmente possuem dureza elevada comparada aos outros materiais (exceto os cerâmicos).

TABELA 2.2

Dados de dureza Brinell de alguns materiais

<b>Material</b>	<b>Dureza Brinell</b>
Aço 1040	235
Liga de ferro (410)	250
Liga de cobre	165
Alumínio 3003-H14	40
Liga de níquel	110 - 150
Zinco AC41A	91

FONTE - Adaptado de SHACKELFORD, 2000

TABELA 2.3

Dados de dureza Rockwell de alguns polímeros

<b>Material</b>	<b>Dureza Rockwell (escala R)</b>
Polietileno (alta densidade)	40
Polietileno (baixa densidade)	10
Polycarbonato	118
ABS	95

FONTE - Adaptado de SHACKELFORD, 2000

A dureza de um material metálico é maior quanto maior for a sua capacidade de suportar uma carga sem alteração na sua geometria (ou seja, sem ocorrer deformação plástica), estabelecendo então uma relação empírica entre a dureza e a resistência mecânica de um material, EQ (2.7), (SMITH, 1998). Pela EQ 2.7 é possível estimar o limite de resistência à tração a partir da dureza Vickers e de constantes  $a$  e  $b$  que é um valor tabelado e depende do material. Pavlina et al. (2008), apresenta em seu estudo sobre valores típicos de  $a$  e  $b$  para aços com diferentes microestruturas, incluindo ferrita, perlita, martensita, bainita e estruturas com múltiplas fases (TAB 2.4) comprovando a relação entre tensão de ruptura com a dureza do material.

$$\sigma_r = a + (b \times Hv) \quad (2.7)$$

TABELA 2.4

Valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  para estimar o limite de resistência à tração para aços

<b>Microestrutura</b>	<b><math>a</math></b>	<b><math>b</math></b>
Martensita	- 273,6	4,279
Não martensita	2,5	3,339
Fases complexas	54,0	2,969

FONTE - Adaptado de PAVLINA et al., 2008

A dureza é uma importante propriedade mecânica a ser analisada na seleção de materiais para utilização específica. Por exemplo, em trabalho de moagem ou trituração, deve-se garantir que o material responsável pelo trabalho seja de dureza maior que o material a ser moído ou triturado. Geralmente, materiais poliméricos são macios, metais e ligas apresentam dureza intermediária e os cerâmicos são materiais considerados de alta dureza (ASKELAND et al., 2008).

A tenacidade é a capacidade do material de resistir a um impacto qualquer e é calculada por meio de testes específicos utilizando um pêndulo. O pêndulo utilizado no teste de

impacto deve ser pesado e partir de uma altura inicial conhecida. Ao ser liberado, o pêndulo golpeia e fratura o corpo de prova do material atingindo uma altura final. Sabendo as alturas inicial e final, é possível calcular a diferença de energia potencial que representa a energia absorvida durante o golpe. Essa energia indica a energia necessária para fraturar o corpo de prova do material em um impacto (ASKELAND et al., 2008).

Outra característica importante da tenacidade dos materiais está relacionada à capacidade de resistir à propagação de trincas quando estas já estão presentes nos materiais. Além do teste de impacto, é possível estimar a energia necessária para fraturar um material calculando a área sob a curva tensão-deformação. Esta energia também é conhecida como energia de fratura de um material (ASKELAND et al., 2008).

Fluência pode ser definida como uma deformação permanente que ocorre num material sob tensão geralmente constante (ou quase constante), em função do tempo, que pode ser muito longo. A fluência ocorre devido à presença de falhas internas presente na estrutura cristalina dos metais através do escoamento lento do material e é dependente de altas temperaturas (ASKELAND et al., 2008).

Faturas por fluências podem acontecer, por exemplo, nos rotores de turbinas em motores a jato e geradores de vapor, pois esses componentes estão sujeitos a temperaturas elevadas e tensões mecânicas constantemente. A fluência é um fenômeno geralmente indesejável que limita a vida útil de uma peça e, apesar de ser observada em todos os tipos de materiais, a fluência em metais é crítica apenas para temperaturas superiores a aproximadamente 40 % de sua temperatura de fusão (CALLISTER, 2008).

Como os materiais metálicos são frequentemente utilizados em projetos mecânicos, estes devem ser selecionados levando em consideração seu ponto de fusão para situações onde existe risco de fluência, como em casos em que o material ficará exposto a temperaturas acima de 426 °C (temperaturas abaixo deste valor não são críticas para a fluência nos metais), (BUDINSKI et al., 2010). Os valores de fluência de um material são fornecidos em unidades de percentagem de tensão sobre um dado período de tempo. O GRA 2.6 apresenta duas curvas típicas de fluência e percebe-se que o aumento de

temperatura reduz a tensão necessária para a fratura ocasionada pelo fenômeno em questão (BUDINSKI et al., 2010).

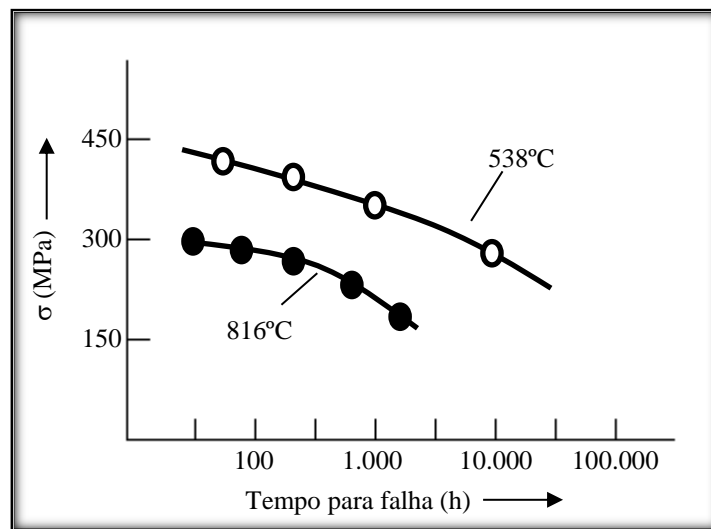


GRÁFICO 2.6 - Gráfico típico de ruptura por fluência para o material ASTM E 139  
 FONTE - Adaptado de BUDINSKI et al., 2010

A resiliência pode ser definida como a capacidade de um material absorver energia quando este é submetido a deformações elásticas (Garcia et al., 2000), sendo determinada pelo módulo de resiliência ( $U_r$ ). Callister (2008) define o módulo de resiliência como: “a energia de deformação por unidade de volume necessária para submeter um material à tensão, desde um estado com ausência de carga até o ponto de escoamento”.

O módulo de resiliência também é extraído do gráfico que relaciona tensão e deformação do material, sendo correspondente à área sob a curva tensão *versus* deformação calculada até o escoamento (GRA 2.7).



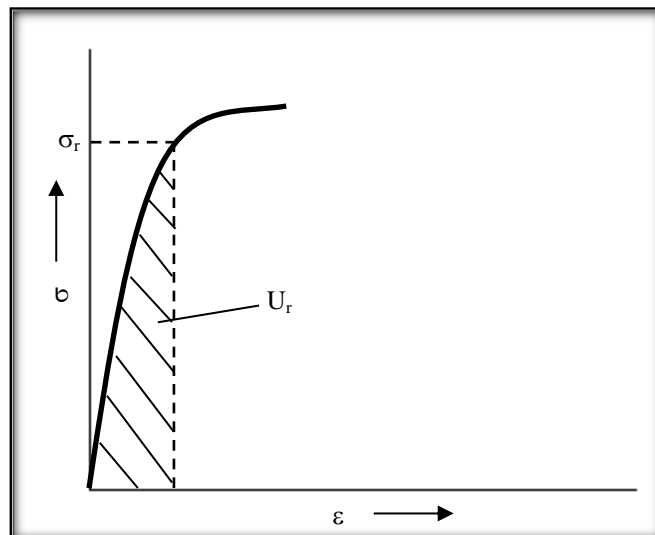


GRÁFICO 2.7 - Representação do módulo de resiliência (área hachurada) através do gráfico  $\sigma \times \epsilon$

FONTE - Adaptado de CALLISTER, 2008

### 2.1.2 Imperfeições e defeitos estruturais

As imperfeições e defeitos presentes na estrutura dos arranjos atômicos e iônicos dos materiais possuem forte influência sobre as propriedades mecânicas. A presença de imperfeições na estrutura do material pode ser útil em alguns casos, mas também pode ser um problema em outros casos. Os três tipos básicos de imperfeições atômicas e iônicas encontradas nos materiais são: defeitos pontuais, discordâncias e defeitos superficiais (ASKELAND et al., 2008).

Os defeitos pontuais podem ser caracterizados por discontinuidades localizadas nos arranjos atômicos e iônicos (ASKELAND et al., 2008). Essas discontinuidades podem ser criadas pelo próprio movimento de átomos e íons durante o processamento do material através da introdução de impurezas ou dopagem. Os defeitos pontuais diferem dos defeitos de discordância e superficiais por envolverem normalmente um ou um par de átomos ou íons, entretanto, esses defeitos afetam uma região que envolve vários átomos ou íons (ASKELAND et al., 2008). Os defeitos pontuais podem acontecer de seis maneiras distintas que dependem da razão da causa da discontinuidade atômica ou iônica, como apresentado na FIG 2.1: lacuna, átomo intersticial, átomo substitucional grande ou pequeno, defeito de Frenkel e defeito de Schottky.

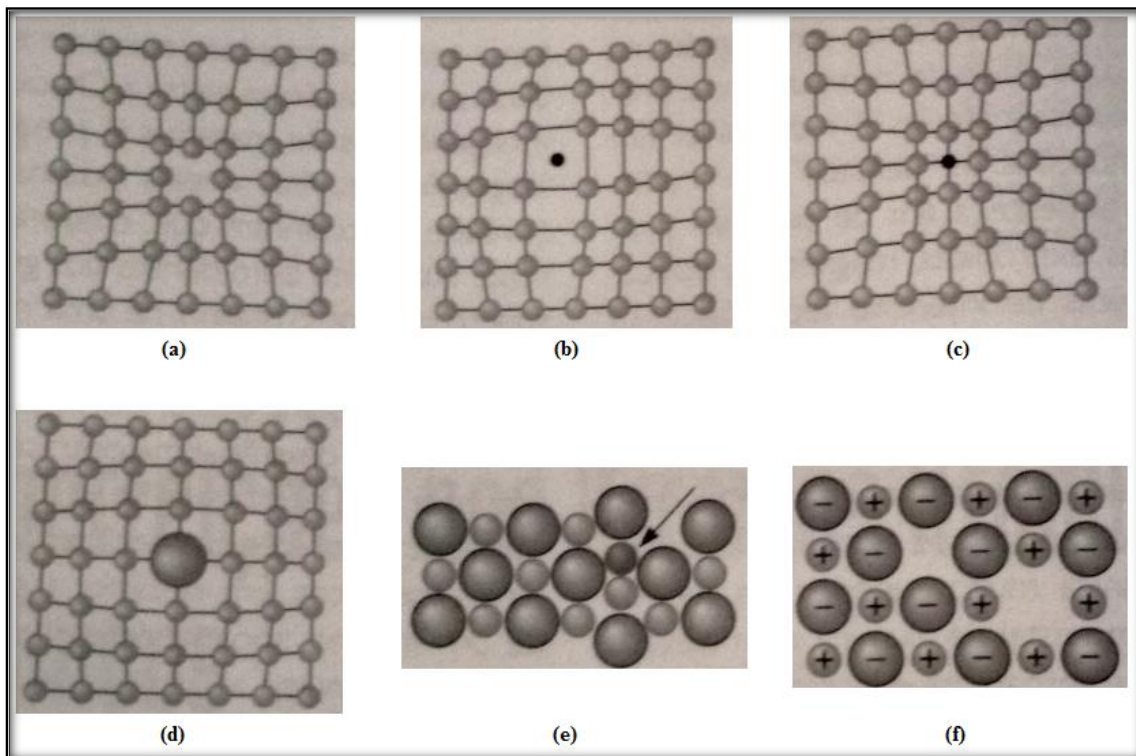


FIGURA 2.1: Separação dos tipos de defeitos pontuais: (a) lacuna, (b) átomo intersticial, (c) átomo substitucional pequeno, (d) átomo substitucional grande, (e) defeito de Frenkel, (f) defeito de Schottky

FONTE - ASKELAND et al., 2008

Imperfeições denominadas discordâncias são imperfeições lineares em cristais. As discordâncias nem sempre são indesejadas, pois as presenças dessas imperfeições aumentam a resistência mecânica dos materiais metálicos. Esses defeitos podem se mover, resultando numa deformação permanente nos materiais, processo denominado deslizamento. O deslizamento só é possível de acontecer quando uma tensão mínima (tensão de Peirls-Naborro) necessária para mover a discordância de um local de equilíbrio para outro é atingida (ASKELAND et al., 2008).

O movimento de discordâncias está ligado diretamente à resistência mecânica por ser, entre outros mecanismos, responsável pelas deformações plásticas em metais e ligas metálicas, que são definidas como deformações irreversíveis (ASKELAND et al., 2008). Deste modo, o processo de deslizamento possui influência direta sobre propriedades das peças e componentes, ajudando a compreender o comportamento mecânico dos metais.

As discordâncias podem ser utilizadas para controlar a dureza, a ductilidade, propriedades ópticas e propriedades elétricas dos materiais. Apesar de ser mais comuns em metais e ligas metálicas, o deslizamento também pode ocorrer em materiais poliméricos e cerâmicos, entretanto, outros fatores desses materiais são mais representativos quanto às propriedades dos mesmos. Os materiais amorfos (sem estrutura cristalina definida) não possuem discordâncias por não possuírem um arranjo periódico (ASKELAND et al., 2008).

O terceiro tipo básico de imperfeições está relacionado aos contornos de grãos ou planos cristalinos. Os defeitos superficiais são resultados de diferenças nas orientações cristalográficas de cada região com a mesma estrutura cristalina. O grão pode ser considerado como uma parte do material que apresenta arranjos atômicos praticamente idênticos. O que difere a região de um grão para outro é a diferença na orientação da estrutura cristalina de cada grão adjacente, sendo que a separação de grãos é conhecida como contorno de grão (ASKELAND et al., 2008). As discordâncias explicadas anteriormente movem-se no interior dos grãos, de modo que o contorno dos grãos torna-se uma barreira para o movimento, o que eleva a resistência do material metálico. Deste modo, o tamanho dos grãos possui relação direta com a tensão mínima necessária para causar deformação permanente no material (ASKELAND et al., 2014).

A relação entre o limite de escoamento e o tamanho do grão em um material metálico é expressa pela equação de Hall-Peach (EQ 2.8) e leva em consideração o limite de escoamento ( $\sigma_E$ ), o diâmetro médio dos grãos ( $d$ ) e duas constantes do material ( $\sigma_0$  e  $K$ ), (ASKELAND et al., 2014).

$$\sigma_E = \sigma_0 + K(d)^{-1/2} \quad (2.8)$$

Os defeitos superficiais também podem se manifestar nas superfícies externas dos materiais. As superfícies externas apresentam planos cristalográficos que são interrompidos abruptamente, de modo que cada átomo da superfície deixa de ter o número de coordenação característico do interior do material. Esse fato, ligado a possibilidade da superfície apresentar rugosidade e entalhes, torna a superfície muito mais reativa quimicamente quando comparado ao seu interior. Essas características podem ser úteis ou não, dependendo da aplicação (ASKELAND et al., 2008).

## 2.2 Fadiga

Os projetos de engenharia exigem um vasto conhecimento em relação às propriedades e comportamento dos materiais disponíveis. As propriedades dos materiais são avaliadas por meio de ensaios mecânicos (já citados para algumas propriedades) que na sua maioria já se encontram normatizados. A finalidade dos ensaios mecânicos está na obtenção de informações do material sob determinadas condições, auxiliando na seleção do material ideal para certa aplicação (GARCIA et al., 2000).

Segundo Garcia et al. (2000), os ensaios mecânicos podem ser classificados em dois grupos relacionados às características dos ensaios:

- Quanto à integridade da peça: o ensaio pode ser destrutivo (resulta no rompimento e posterior inutilização parcial ou total da peça) ou não destrutivo (não resulta no comprometimento da integridade da peça ensaiada).
- Quanto à velocidade de aplicação da carga: durante o ensaio a carga pode ser aplicada lentamente de maneira a induzir sucessões de estados de equilíbrio durante o teste (carga estática), rapidamente ou ciclicamente (carga dinâmica), ou ainda de modo constante durante um logo período de tempo (carga constante). A TAB 2.5 apresenta alguns ensaios de materiais separados por sua classificação.

TABELA 2.5

Classificação de alguns ensaios dos materiais

<b>Classificação</b>	<b>Tipo</b>	<b>Ensaio</b>
Integridade geométrica	Destrutivo	Tração, dureza, fadiga, torção, fluência, flexão, tenacidade à fratura
	Não destrutivo	Raios X, ultrassom, partículas magnéticas, líquidos penetrantes
Velocidade de aplicação da carga	Estático	Tração, compressão, flexão, dureza e torção
	Dinâmico	Fadiga e impacto
	Constante	Fluência

FONTE - Adaptado de GARCIA et al., 2000

A fadiga é uma propriedade mecânica que pode ser definida como um processo de danos localizados em peças e componentes sujeitos a esforços cíclicos (LEE et al., 2005). As falhas por fadiga ocorrem em componentes estruturais e dinâmicos que estão

sujeitos a esforços cíclicos cujos valores são inferiores ao limite de escoamento do material e são responsáveis por grande percentagem de falhas em, por exemplo, bielas e virabrequins de motores (HIBBELER, 2010). Assim, o mecanismo de fadiga deve ser tratado como um processo de acúmulo de danos no material causado pela repetição de cargas (LEE et al., 2005).

As forças cíclicas (ou tensões cíclicas) responsáveis pela fadiga nos materiais são caracterizadas por apresentar variações de intensidade e oscilarem em função do tempo. Essas tensões podem ser de tração, compressão, flexão (dobramento) ou de torção. As cargas oscilantes responsáveis pela fadiga podem se apresentar de três maneiras diferentes. O GRA 2.8 apresenta uma maneira no qual a amplitude de oscilação é simétrica ao nível médio de tensão que é zero, de modo que as tensões máximas de tração e compressão possuem igual magnitude (CALLISTER, 2008).

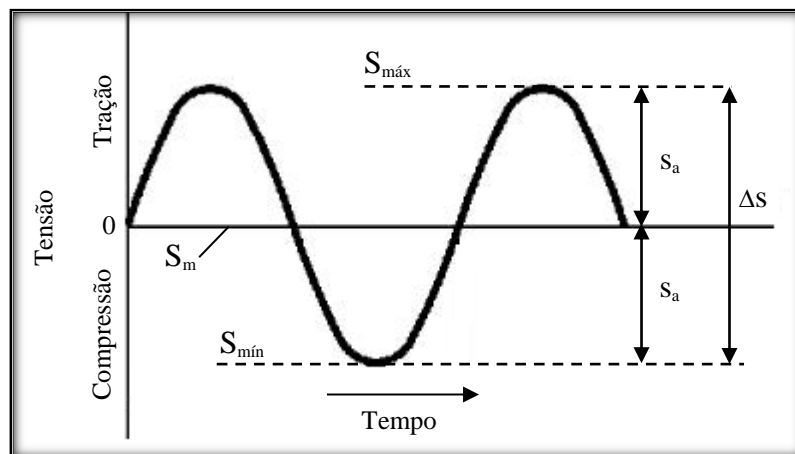


GRÁFICO 2.8 - Cargas alternadas com amplitude de oscilação ao nível médio da tensão nula

FONTE - Adaptado de CALLISTER, 2008

No GRA 2.8 são apresentadas alguns parâmetros de fadiga. Os valores de  $S_{máx}$  e  $S_{mín}$  correspondem, respectivamente, aos níveis máximo e mínimo da tensão ao qual o material está submetido, de modo que a direção do carregamento é invertida quando esses níveis são atingidos.  $S_m$  corresponde à carga média que o material está submetido e no caso do GRA 2.8 seu valor é zero. O valor de  $S_a$  corresponde à carga máxima e mínima em relação a  $S_m$ , que pode ser coincidente ou não com os valores de  $S_{máx}$  e  $S_{mín}$ , dependendo do tipo de aplicação de carga oscilante ao qual o material está submetido (SCHIJVE, 2009).

Os outros dois modos de aplicação das cargas oscilantes possuem relações não simétricas (GRA 2.9). A carga aplicada pode apresentar valores máximos e mínimos assimétricos em relação à origem, GRA 2.9 (A). Desta maneira, as forças de tração e compressão não possuem a mesma magnitude. O último modo de aplicação de carga possível trata-se da variação da carga aleatoriamente em amplitude e em frequência, GRA 2.9 (B), variando também o tipo de sollicitação mais influente no material em cada período.

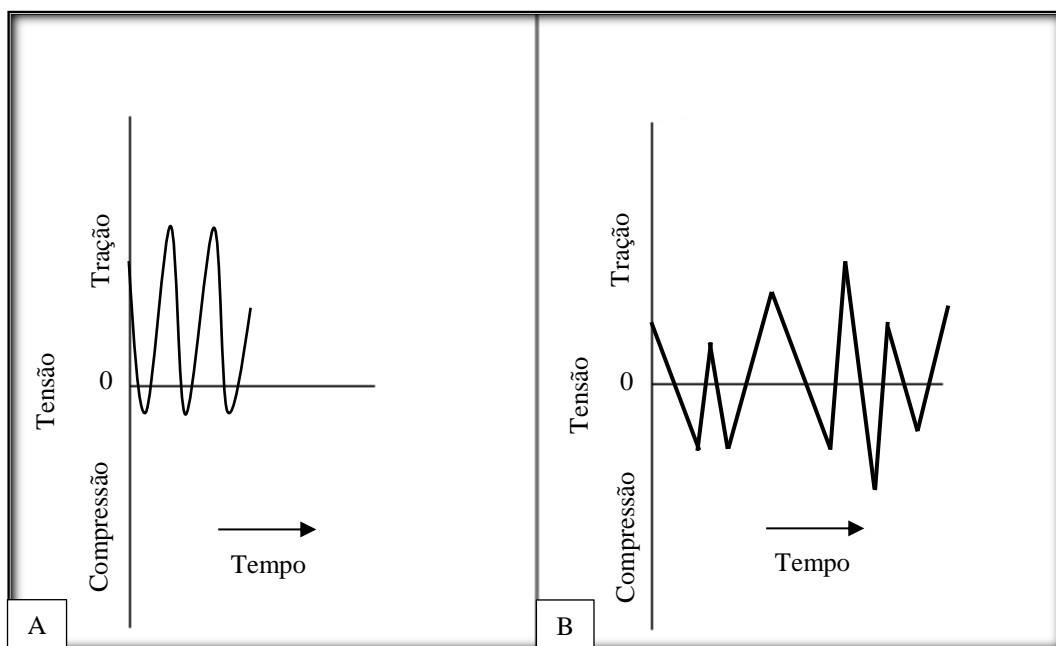


GRÁFICO 2.9 - Outros dois modos de sollicitações mecânicas: (A) Cargas de tração e compressão com diferentes magnitudes; (B) Ciclo de tensões aleatórias com amplitude e frequência variáveis

FONTE - Adaptado de CALLISTER, 2008

A sollicitação de tensões aleatórias com amplitude e frequência variáveis apresentada no GRA 2.9 (B) pode ser aplicável no trem de pouso de aviões, por exemplo. O trem de pouso é utilizado nas operações de aterrissagem e decolagem de aviões de modo que, a cada operação de decolagem ou aterrissagem, esse componente está submetido a esforços de fadiga onde a intensidade e a frequência de aplicação das tensões variam a cada operação.

A razão entre os níveis mínimo e máximo de tensão (representado por  $R$ ) é um parâmetro utilizado para representar as tensões médias em um componente (EQ 2.9). O

GRA 2.10 apresenta os ciclos de tensões com frequência regular, mas com diferentes valores para a razão  $R$  possíveis de serem encontrados em componentes submetidos à fadiga.

$$R = \frac{S_{mín}}{S_{máx}} \quad (2.9)$$

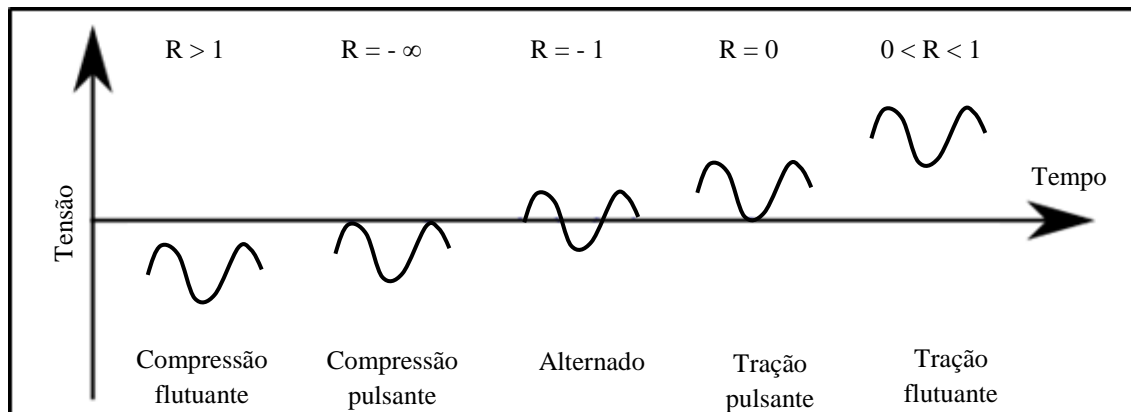


GRÁFICO 2.10 - Ciclo de tensão com diferentes valores de tensões médias ( $S_m$ ) e de razão ( $R$ )

FONTE - TAKAHASHI, 2014

Quando  $R = -1$ , esforços de tração e compressão no corpo de prova possuem valores equivalentes e a tensão média é zero. Para a razão de tensões com valores iguais a zero ou inferiores a 1, tensões de tração são predominantes, caso contrário, tensões de compressão serão predominantes (BRANDÃO, 2013).

A avaliação da resistência à fadiga de um material pode ser realizada por intermédio do estudo de gráficos de tensão ( $\sigma$  ou  $S$ ) em função do número de ciclos ( $N$ ) necessários para fraturar o material. O ciclo de tensões necessário para romper o material é conhecido como o ciclo de fadiga e geralmente é apresentado em escala logarítmica.

No estudo de fadiga dos materiais, sabe-se que para cada tensão aplicada, um número específico de ciclos de tensões é necessário para levar o material à fratura (vida em fadiga). A realização de diversos ensaios utilizando o mesmo material sob diferentes tensões e, conseqüentemente, diferentes números de ciclos até a fratura, resulta em um gráfico de vida em fadiga que apresenta uma curva S-N (GRA 2.11), denominada curva de Wöhler (LEE et al., 2005). A curva S-N permite realizar uma previsão do número de

ciclos de vida de um material baseado nos esforços mecânicos aos quais ele está submetido.

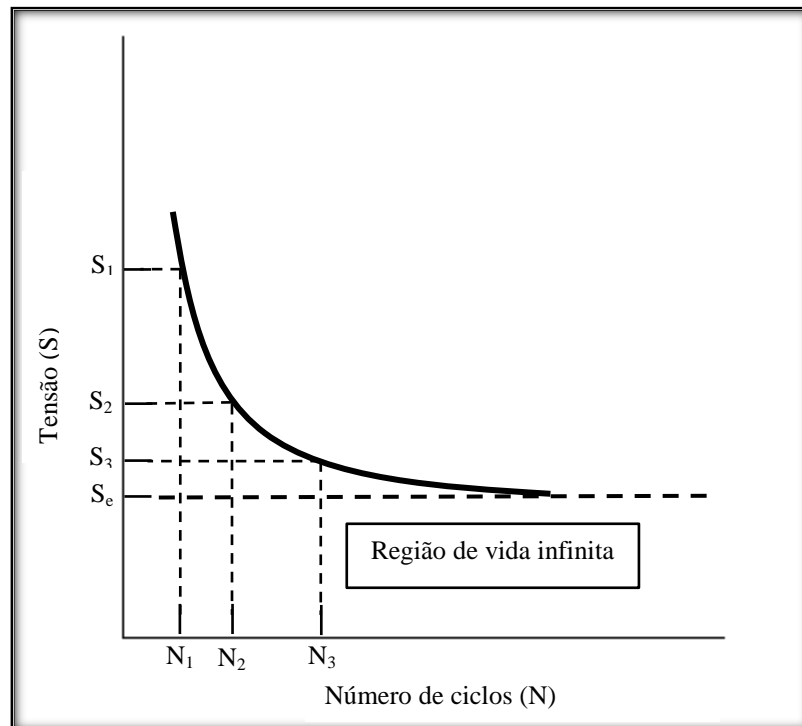


GRÁFICO 2.11 - Representação de uma curva S-N típica

FONTE - Adaptado de CALLISTER, 2008

Quanto maior for a tensão aplicada, menor o número de ciclos necessários para levar o material à fratura por fadiga. O número de ciclos sob o qual o material irá falhar é especificado como resistência à fadiga e varia de um material para outro (CALLISTER, 2008). Percebe-se no GRA 2.11 que, a partir de certo valor de tensão, a curva S-N estabiliza-se horizontalmente. A tensão sob qual a curva torna-se uma linha horizontal é denominada limite de fadiga ( $S_e$ ), abaixo da qual não ocorrerá falha (denominada região de vida infinita de fadiga), (SANTOS, 2002). Essa tensão limite de fadiga é observada para aços, porém esta característica não é observada em materiais não ferrosos como o alumínio, de forma que para esses materiais a tensão sempre decrescente com o aumento do número de ciclos (BRANDÃO, 2013).

A curva S-N é específica para cada material, podendo existir variações da curva para o mesmo material por diversos fatores que serão discutidos posteriormente. O valor do limite de fadiga ( $S_e$ ) também é influenciado por diversos fatores, entretanto, para os



aços o limite de fadiga corresponde à aproximadamente 50 % da tensão limite de resistência e para ligas não ferrosas, 35 % (SOUZA, 1982). O GRA 2.12 apresenta alguns exemplos práticos de algumas curvas S-N. Observa-se que os aços ligados e tratados possuem alta resistência à fadiga quando comparado a liga de Al - Cu ou ferro fundido cinzento.

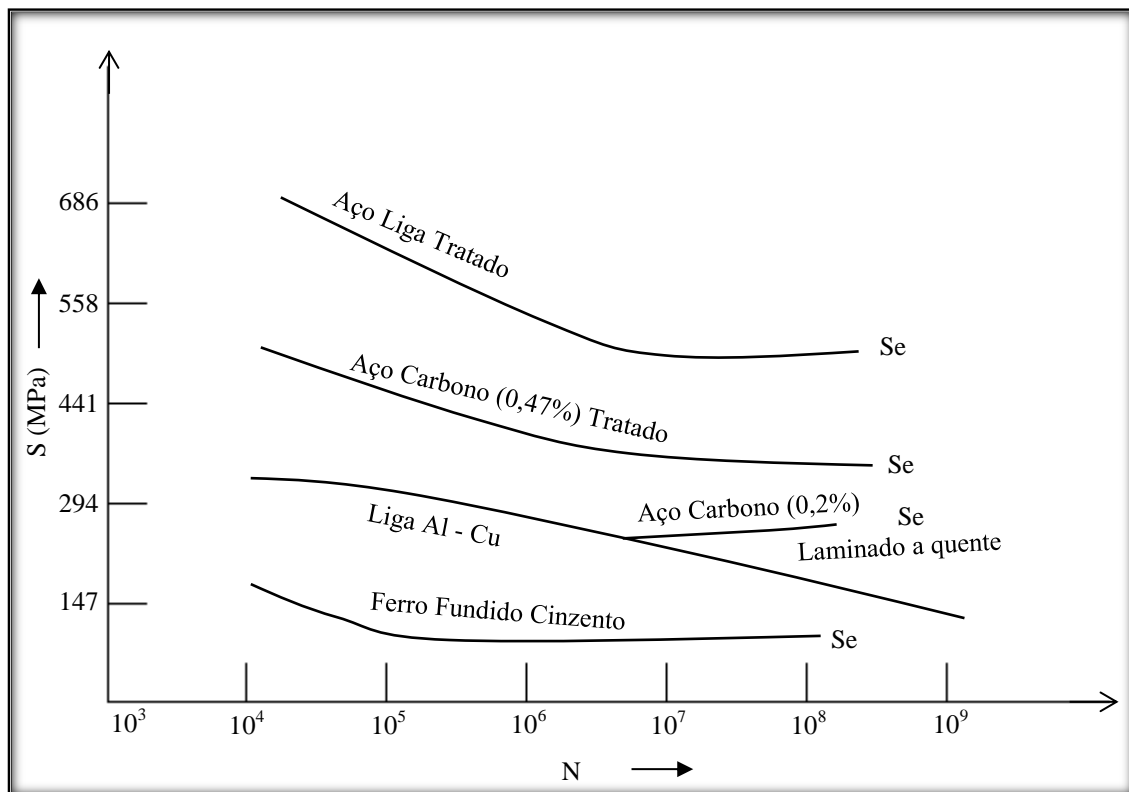


GRÁFICO 2.12 - Exemplos de curvas S-N para alguns materiais

FONTE - SOUZA, 1982 apud ASM, 1948 e 1961

Fadiga, como citado anteriormente, é uma forma de ruptura que ocorre em materiais sujeitos a forças aplicadas de maneira cíclica. Essas cargas não são suficientes para romper o material instantaneamente (tensões inferiores à tensão de ruptura), entretanto, elas provocam dano devido à repetição da carga, o que pode causar falha ou rompimento do material. Considerando o diagrama tensão *versus* deformação, pode-se prever a carga máxima que um material suporta antes de falhar, entretanto, os materiais podem estar sujeito a cargas inferiores ao valor máximo suportado e mesmo assim ocorrer o rompimento por fadiga, por isso, é necessário conhecer bem as propriedades de fadiga do material para que providências possam ser tomadas antes da falha vir a acontecer.

A fadiga é um processo que geralmente ocorre devido à defeitos internos ou de superfície causados por concentração de tensão e consiste na formação de um fluxo cisalhante (trinca) que se propaga ao longo dos planos de deslizamento do material. A trinca por fadiga tende a se propagar transversalmente à tensão aplicada (FIG 2.2), (SCHIJVE, 2009).

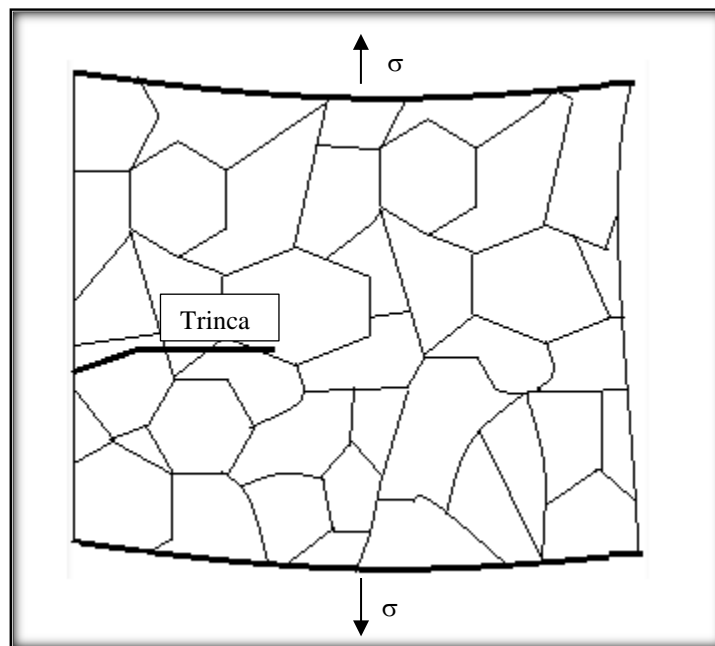


FIGURA 2.2 - Modelo de iniciação de trinca de fadiga

FONTE - Adaptado de SCHIJVE, 2009

Para entender os mecanismos que levam algum objeto a sofrer fratura por fadiga, é importante estar atento às várias condições específicas que podem influenciar o mecanismo, desde o início da trinca até seu rompimento. Entre essas influências, pode-se citar a qualidade superficial do objeto, processo de fabricação, tensões residuais e influências ambientais (SCHIJVE, 2009).

Schijve (2009) relata que a vida em fadiga é o período em que se origina a trinca até sua propagação. O primeiro período é o de inicialização da trinca, caracterizado pela inclusão de algumas microtrincas invisíveis a olho nu. No segundo período, as trincas se propagam até ocorrer a fratura. Essa separação em dois períodos de vida em fadiga é explicada pelo fato de que várias condições específicas citadas anteriormente podem ter grande influência na inicialização da trinca, mas pouca ou nenhuma influência sobre a propagação da trinca. O contrário também pode acontecer, isto é, alguma condição

oferecer grande influência no segundo período e quase nenhuma no primeiro. Como um exemplo prático, ambientes corrosivos podem influenciar tanto na inicialização da trinca (primeiro período) quanto na propagação (segundo período), mas esta influência ocorre de maneiras diferentes para os dois períodos (SCHIJVE, 2009).

Fine et al. (1996) divide a fratura por fadiga em cinco etapas que ocorrem de maneira semelhante ao citado por Schijve, entretanto com maior nível de detalhes: deformação plástica cíclica antes do aparecimento da primeira trinca de fadiga, aparecimento de uma ou mais microtrincas, propagação ou união de microtrincas para formar novas microtrincas, propagação de uma ou mais trincas (escala macroscópica) e ruptura final.

### 2.2.1 Processo de fratura por fadiga

O processo de fadiga ocorre com o acúmulo de danos em regiões localizadas devido às cargas cíclicas. O processo consiste na formação e propagação das trincas até o rompimento do material (LEE et al., 2005). A formação de uma trinca ocorre em escala microscópica e esta se propaga pelo material à medida que a carga cíclica é mantida até tal ponto que a seção do material não suporta mais a carga e o material sofre ruptura. Desta maneira, a fratura por fadiga pode ser distinguida em três fases: nucleação, propagação e ruptura (LEE et al., 2005). Essas três fases estão de acordo com os dois períodos da vida de fadiga citados anteriormente, onde a nucleação seria um dos eventos dentro do primeiro período, enquanto a propagação e a fratura estariam dentro do segundo período (ELLYIN, 1997).

A aplicação de cargas cíclicas em materiais cria uma região com alta concentração de tensões e esta região sofrerá deformações plásticas localizadas que ocorrem por meio da movimentação de discordâncias (SCHIJVE, 2009). A deformação provoca danos permanentes ao material e seu acúmulo favorece o aparecimento de trincas. A exposição contínua do material às cargas cíclicas aumenta o acúmulo de danos presente no material, conseqüentemente o comprimento da trinca torna-se cada vez maior até ocasionar na ruptura do material (LEE et al., 2005).

O carregamento cíclico que resulta no fenômeno da fadiga nos materiais provoca deformações plásticas em um pequeno número de grãos do material, ocorrendo

preferencialmente nos grãos presentes na superfície por terem menor restrição ao deslizamento. Grãos na superfície do material são circundados por outros grãos apenas para os lados e para a região voltada para o interior do material. Como consequência, a deformação plástica nesses grãos é menos limitada do que se fosse comparada a um grão no interior do material (que está envolvido em todos os seus lados por outros grãos). Isso também explica o fato que a deformação plástica na região da superfície pode ocorrer a um nível de tensão mais baixo que a tensão de escoamento do material, já que o grão não possui limitação para deformar-se (SCHIJVE, 2009).

A inicialização da trinca de fadiga acontece geralmente na superfície dos materiais, com dimensão de ordem de micrometros, e é causada pelos movimentos irreversíveis de deslizamentos entre os planos cristalográficos no interior dos materiais, quando estes são submetidos à cargas cíclicas (ELLYIN, 1997). O movimento de discordâncias provoca a formação de bandas de deslizamento e estas causam intrusões (reentrâncias) e extrusões (saliências) na superfície do material (MANESCHY et al., 2014). Além da superfície, as trincas podem iniciar em locais que apresentem pontos de concentração de tensão, como furos, riscos, rasgos e descontinuidades (CALLISTER, 2008). A FIG 2.3 mostra a nucleação da trinca de fadiga iniciada em um local de alta concentração de tensão e a sua propagação (LEE et al., 2005).

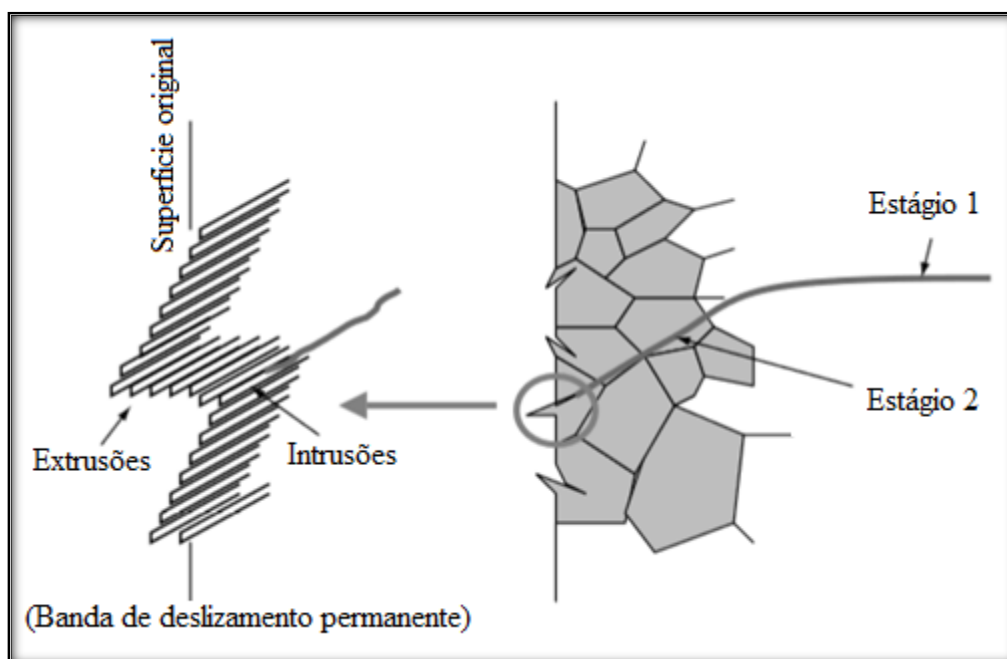


FIGURA 2.3 - Processo de fadiga: inicialização e propagação de trincas

FONTE - Adaptado de LEE et al., 2005

As cargas cíclicas originam descontinuidades microscópicas que concentram tensões na superfície do material. Estas descontinuidades tem formato de pequenas fendas superficiais e saliências irregulares são as intrusões e extrusões citadas que formam pontos de concentração de tensão, levando à formação de microtrincas (ROSA, 2002). As microtrincas propagam-se paralelamente aos planos atômicos do deslizamento e esta propagação pode ser dividida nos dois estágios (LEE et al., 2005). O primeiro estágio representa a propagação inicial da trinca através de um comprimento finito (na ordem de alguns grãos) e ocorre no plano de tensão de cisalhamento máximo. O tamanho da trinca no primeiro estágio é compatível à microestrutura do material, deste modo, a trinca é afetada pelas características internas do material, como deslizamentos, tamanho e orientação dos grãos e presença de tensões residuais internas. Segundo Ellyin (1997), o comprimento do primeiro estágio depende das características estruturais da superfície do material e da amplitude da carga aplicada, e geralmente é da ordem de três ou quatro vezes o tamanho de grão do material. O segundo estágio refere-se ao maior comprimento de propagação da trinca e é controlado pelas tensões aplicadas (ROSA, 2002). No segundo estágio, a propagação da trinca é menos afetada pelas propriedades microestruturais do material do que o primeiro estágio, uma vez que, no segundo estágio, a trinca possui comprimento muito maior que a microestrutura do material (LEE et al., 2005).

O estágio 1 (FIG 2.3) também é caracterizado pela orientação de propagação da trinca, que ocorre a aproximadamente  $45^\circ$  em relação à direção de aplicação da força. A continuidade da aplicação do ciclo de tensão propicia o crescimento das trincas ao longo das bandas de deslizamento até que uma trinca dominante surja entre as pequenas trincas, mudando a direção da trinca para uma orientação perpendicular ao eixo de aplicação da carga, que é representado como o estágio 2 da FIG 2.3 (ELLYIN, 1997).

A maior parte da vida em fadiga de um material é consumida pela propagação e crescimentos das trincas (CALLISTER, 2008). Materiais que inicialmente não possuem concentradores de tensão utilizam mais de 70% da sua vida de fadiga na nucleação e estágio 1 da trinca, enquanto o restante da vida em fadiga depende da propagação no estágio 2 (ROSA, 2002). Não é possível definir exatamente o período de transição da fase de nucleação para a propagação da trinca.

A trinca se propaga pelos planos cristalográficos até encontrar contornos de grão e a partir daí sua propagação se dá na direção perpendicular ao eixo de tensão, etapa caracterizada por dois tipos de marcas conhecidas como praia e estrias (FIG 2.4), que são características da superfície de fratura por fadiga (HERTZBERG, 1937). As marcas de praia possuem dimensões macroscópicas e as estrias apresentam dimensões microscópicas (CALLISTER, 2008). A extremidade da trinca em propagação gera muita concentração de tensões de tração, o que possibilita uma deformação plástica à frente da trinca até a ruptura do material (ROSA, 2002). A posição da ponta da trinca é a responsável por dar as características superficiais da fratura por fadiga, como citado anteriormente.

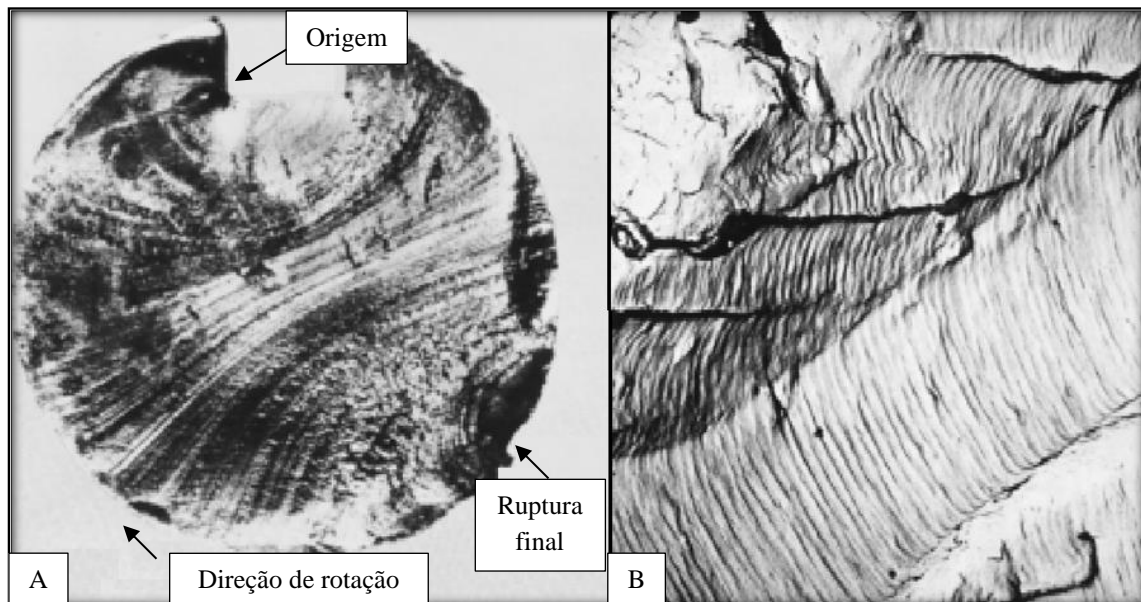


FIGURA 2.4 - Marcas de praia e de estria resultantes da fratura por fadiga: (A) marcas de praia de um eixo rotativo de aço que sofreu falha por fadiga; (B) fractografia eletrônica por transmissão mostrando marcas de estrias de fadiga no alumínio

FONTE - Adaptado de HERTZBERG, 1937 e CALLISTER, 2008

A última etapa dos mecanismos físicos que leva à fratura por fadiga acontece após a propagação e crescimento da trinca. Após um comprimento específico da trinca, o material não suporta a propagação e o resultado é uma fratura que ocorre de modo instantâneo. No local onde ocorrer a fratura não aparecerão marcas de praia e/ou estrias, podendo levar a uma falsa avaliação do motivo da fratura (CALLISTER, 2008).

A FIG 2.5 apresenta o início e fim da propagação de trincas em uma liga de alumínio. Percebem-se na figura as estrias de fadiga originadas pelas trincas.

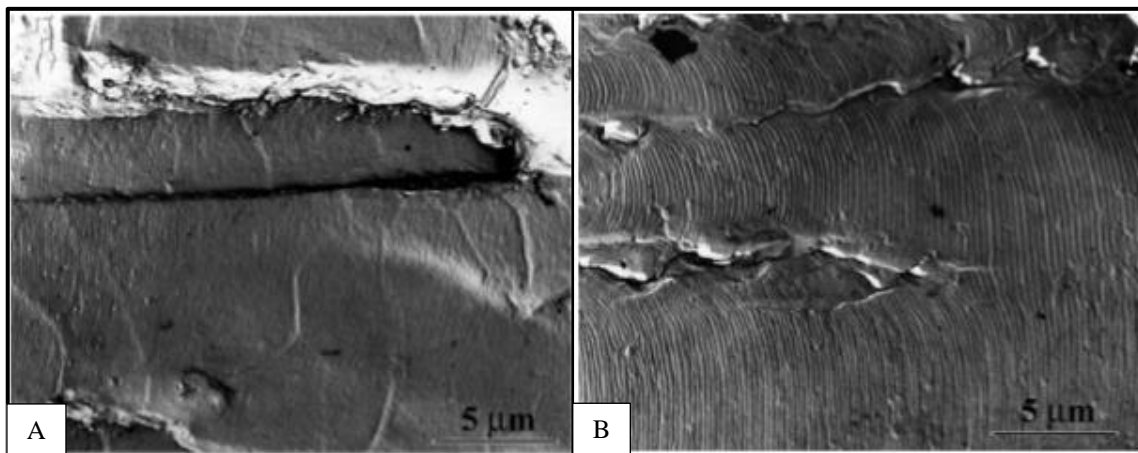


FIGURA 2.5 - Estrias de fadiga em liga de alumínio 2014-T6 visualizado em MEV

FONTE - MEYERS & CHAWLA, 2009 apud TAKAHASHI, 2014

### 2.2.2 Fadiga de alto e baixo ciclo

O processo de fadiga nos materiais pode ocorrer por meio de dois regimes denominadas alto ciclo e baixo ciclo de fadiga (GRA 2.13), onde cada falha resultante é provavelmente produzida por mecanismos físicos diferentes. Baixo ciclo de fadiga está associado a altas cargas e baixo número de ciclos até a falha, resultando consequentemente em uma curta vida do corpo de prova. Alto ciclo de fadiga está associado a cargas reduzidas e elevado número de ciclos até ocorrer a falha, resultando em uma vida em fadiga mais longa (COLLINS, 1993).

Em alguns casos práticos, o baixo ciclo de fadiga tem seu número de ciclos até a fratura delimitado. No caso de foguetes aeroespaciais, a quantidade de ciclos até a fratura varia da ordem de 10 a 100 ciclos. Para usinas nucleares ou térmicas, indústrias químicas e acessórios domésticos (como dobradiças de portas) o número de ciclos fica na ordem de  $10^2$  à  $10^3$ . Para motores de avião ou de carro, o número de ciclos fica entre  $10^3$  e  $10^4$  ciclos até a fratura. Geralmente, considera-se alto ciclo de fadiga quando o número de ciclos até a fratura for superior a  $10^5$  e baixo ciclo quando o número de ciclos for inferior a  $10^4$ , valores intermediários dependem da situação analisada (LEMAITRE et al., 2010).

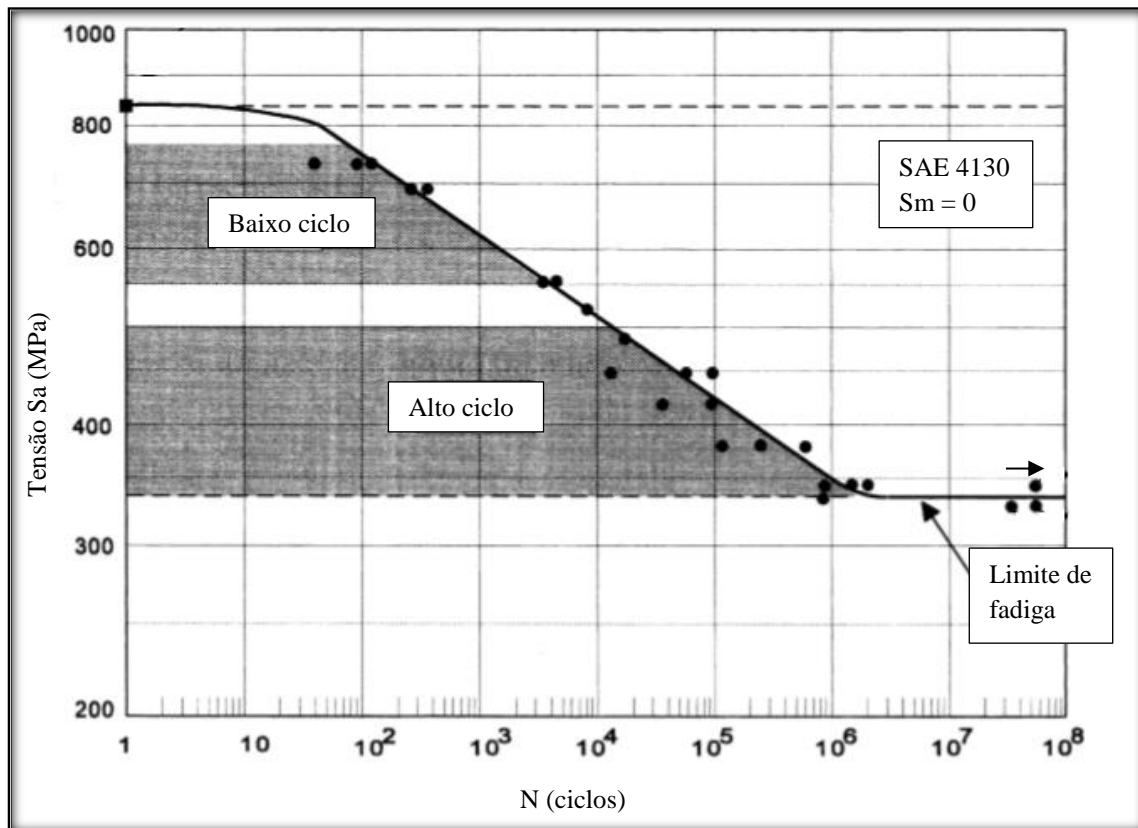


GRÁFICO 2.13 - Resultado do ensaio de fadiga de uma espécie sem entalhe de aço baixa liga (SAE 4130)

FONTE - Adaptado de GROVER, 1951 apud SCHIJVE, 2009

Porém, alto e baixo ciclo de fadiga de um material não está limitado apenas ao número de ciclos específicos até ocorrer a falha do material, sendo mais relevante diferenciar os dois processos através da deformação que cada uma proporciona em cada ciclo. Baixo ciclo de fadiga está associado a deformações plásticas macroscópicas em cada ciclo, enquanto o processo de alto ciclo de fadiga está mais relacionado com a deformação elástica do material (SCHIJVE, 2009). Além disso, o processo de fratura dos materiais submetidos a alto ou baixo ciclo de fadiga é diferente. Materiais submetidos a baixo ciclo de fadiga possuem um alto nível de tensão (da ordem do limite de escoamento) e a falha ocorre sem o crescimento das trincas, sendo muito difícil apresentar períodos de propagação (SCHIJVE, 2009).

No caso de fadiga de baixo ciclo, uma melhor análise é realizada levando em consideração a deformação constante do material (e não tensão constante) por representar uma situação mais próxima do real (MITCHELL, 1996). O comportamento



gráfico da tensão-deformação com amplitudes cíclicas é caracterizado por laços de histerese mostrado no GRA 2.14 (COLLINS, 1993).

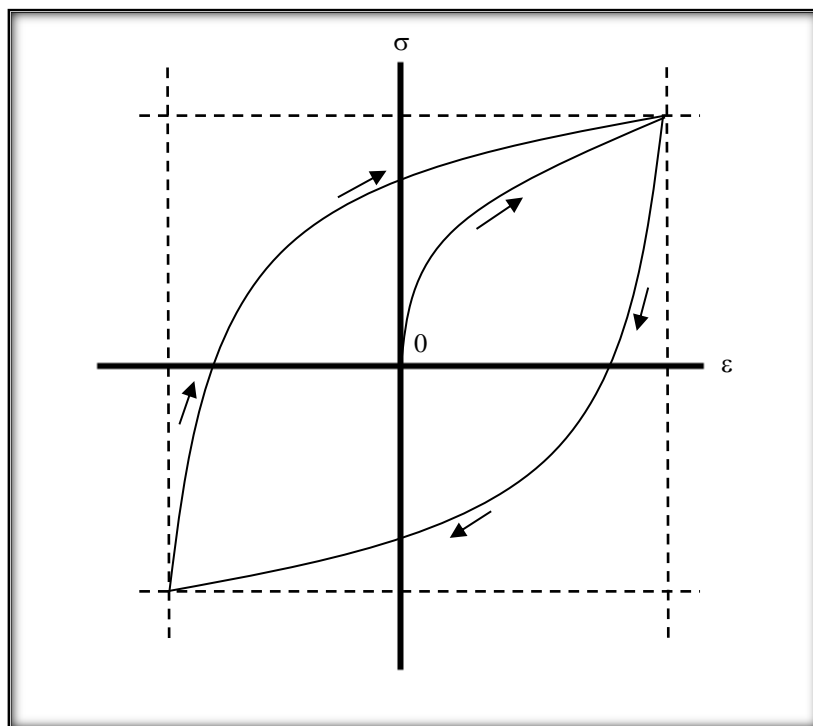


GRÁFICO 2.14 - Laços de histerese associados à cargas cíclicas que produzem danos de fadiga de baixo ciclo

FONTE - Adaptado de COLLINS, 1993

O ciclo de histerese não é imediatamente estável, podendo ocorrer dois tipos de fenômenos denominados amolecimento ou endurecimento (GRA 2.15). Por esse motivo, os ensaios de baixo ciclo devem possuir amplitudes de tensões variáveis para representar uma situação real de solicitação de carga no corpo de prova ensaiado.

No GRA 2.15, a variação da deformação é controlada e não sofre alteração com o tempo da solicitação da carga. O endurecimento cíclico ocorre quando é necessário aumentar a tensão com o tempo para manter constante a deformação, GRA 15 (A), enquanto que no amolecimento cíclico a amplitude tensão deve ser reduzida para que o ciclo de deformação seja mantido, GRA 15 (B). Normalmente, tanto o endurecimento quanto o amolecimento estabilizam após um certo número de ciclos que usualmente é baixo em relação à vida em fadiga do material.

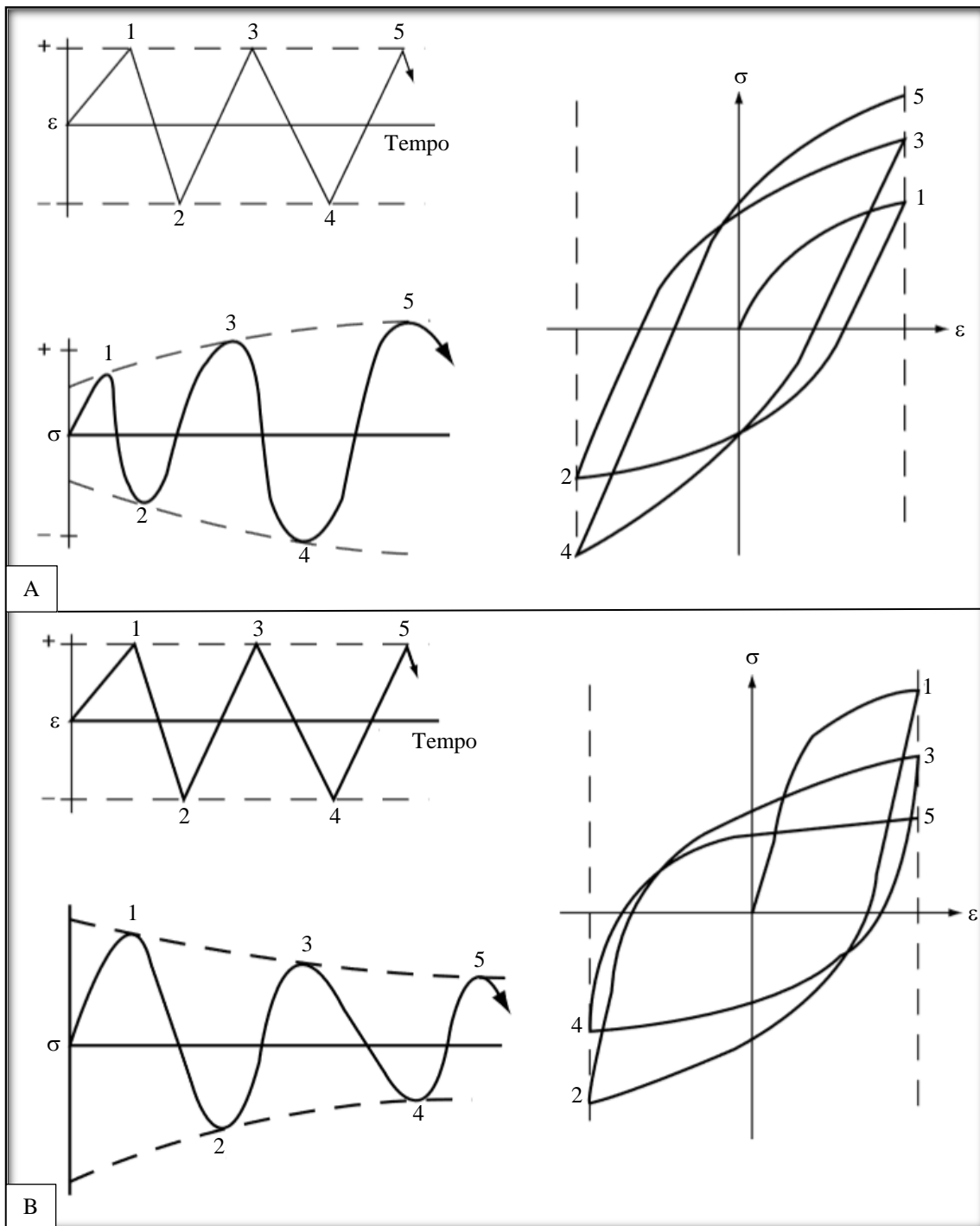


GRÁFICO 2.15 - Fenômeno transiente antes da estabilidade do ciclo de histerese: (A) endurecimento cíclico; (B) amolecimento cíclico

FONTE - Adaptado de MITCHELL, 1996

A vida em fadiga dos materiais pode ser prevista em função da amplitude de deformação ( $\Delta\epsilon_p/2$ ) pela (EQ 2.10) apresentada por Coffin e Manson em 1955, (MITCHELL, 1996):

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \quad (2.10)$$

A equação leva em consideração as seguintes propriedades do material: módulo de Young  $E$ , o coeficiente  $\sigma'_f$  e expoente  $b$  referente à deformação elástica, coeficiente  $\varepsilon'_f$  e expoente  $c$  referente à deformação plástica.

### 2.2.3 Ensaio de fadiga

As curvas S-N são obtidas por meio de ensaios geralmente realizados em laboratório. Diferentes tipos de cargas, amostras, ambientes e equipamentos são utilizados nos testes (SCHIJVE, 2009). Os ensaios de fadiga são definidos pela aplicação de uma carga cíclica em um corpo de prova até o rompimento deste. Os ensaios de fadiga podem ser agrupados em quatro tipos básicos que dependem da aplicação da carga e do processo do ensaio: flexão alternada, flexão rotativa, tração-compressão e torção (MILELLA, 2013).

#### 2.2.3.1 Ensaio de fadiga por flexão alternada

O ensaio de fadiga por flexão alternada é caracterizada pela aplicação de uma força em uma das extremidades do corpo de prova que realiza movimentos alternativos, enquanto a outra extremidade permanece fixa (FIG 2.6). Neste tipo de ensaio, o corpo de prova possui superfície geralmente plana ou trapezoidal. A utilização de superfícies cônicas garante que o estado de tensões seja constante independentemente da distância da aplicação da força (MILELLA, 2013).

O ensaio por flexão alternada pode acontecer com a tensão média com o valor nulo ou diferente de zero através da variação da posição do excêntrico ou da altura da extremidade fixa do corpo de prova. Diferentes espessuras e tamanhos de corpos de prova podem ser utilizados, entretanto, quanto maior a espessura do corpo de prova para um mesmo comprimento, maior a força que a máquina aplicará na extremidade móvel para manter um mesmo estado de tensão (MILELLA, 2013).

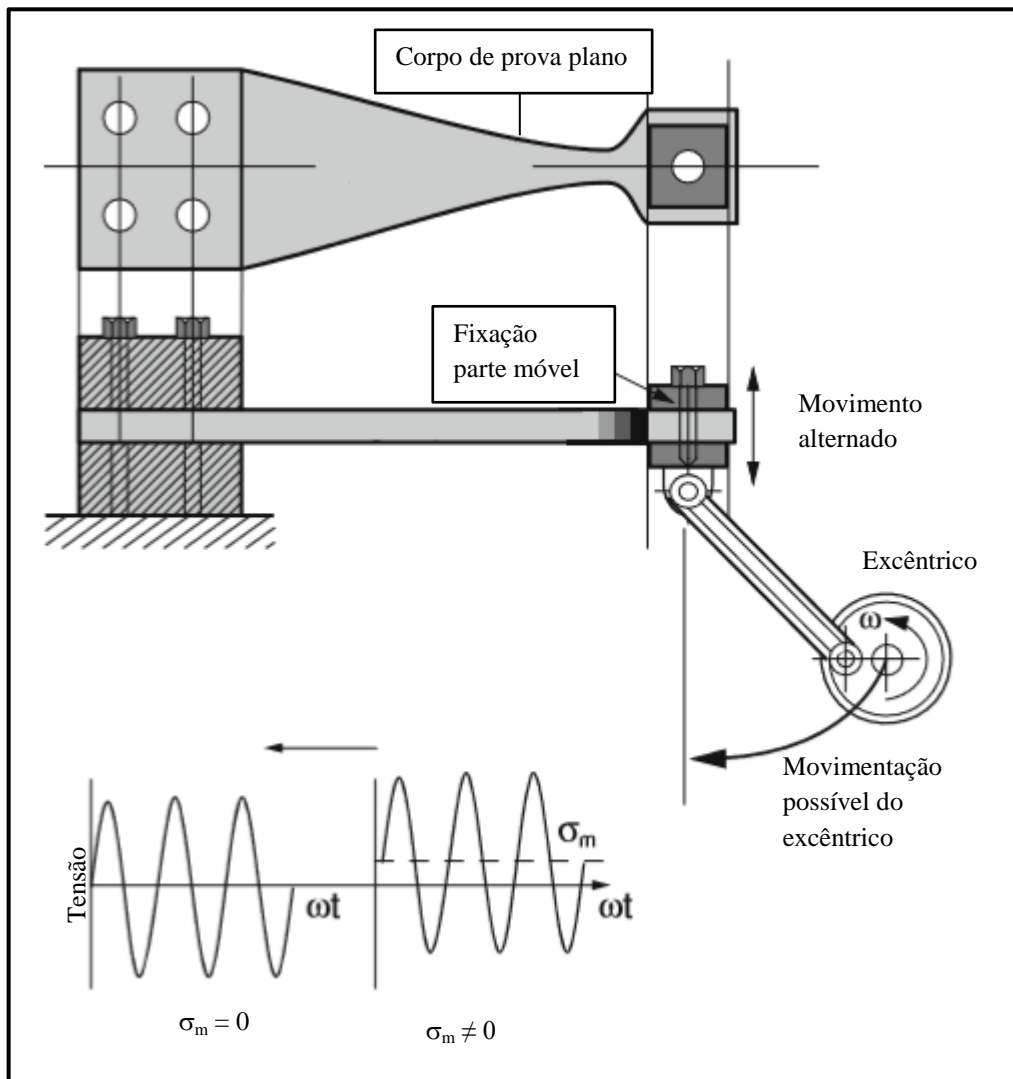


FIGURA 2.6 - Representação do teste de fadiga por flexão alternada e algumas características

FONTE - Adaptado de MILELLA, 2013

### 2.2.3.2 Ensaio de fadiga por flexão rotativa

O ensaio de fadiga por flexão rotativa é o mais utilizado pela indústria (GARCIA et al., 2000). O corpo de prova possui formato circular com variações de diâmetro ao longo do seu comprimento e é rotacionado enquanto sofre carregamento simétrico em suas extremidades (FIG 2.7). A carga aplicada resulta em tensões de tração ou compressão em qualquer ponto da seção A do corpo de prova. No movimento de rotação em torno do eixo axial do corpo de prova, cada meia revolução faz com que as tensões originalmente na parte abaixo da linha neutra do corpo de prova sejam revertidas de tração para compressão e quando a revolução é completada, as tensões novamente se

invertem de compressão para tração. Deste modo, a cada giro (ou revolução), o corpo de prova está submetido a tensões oscilantes de tração e compressão (MILELLA, 2013).

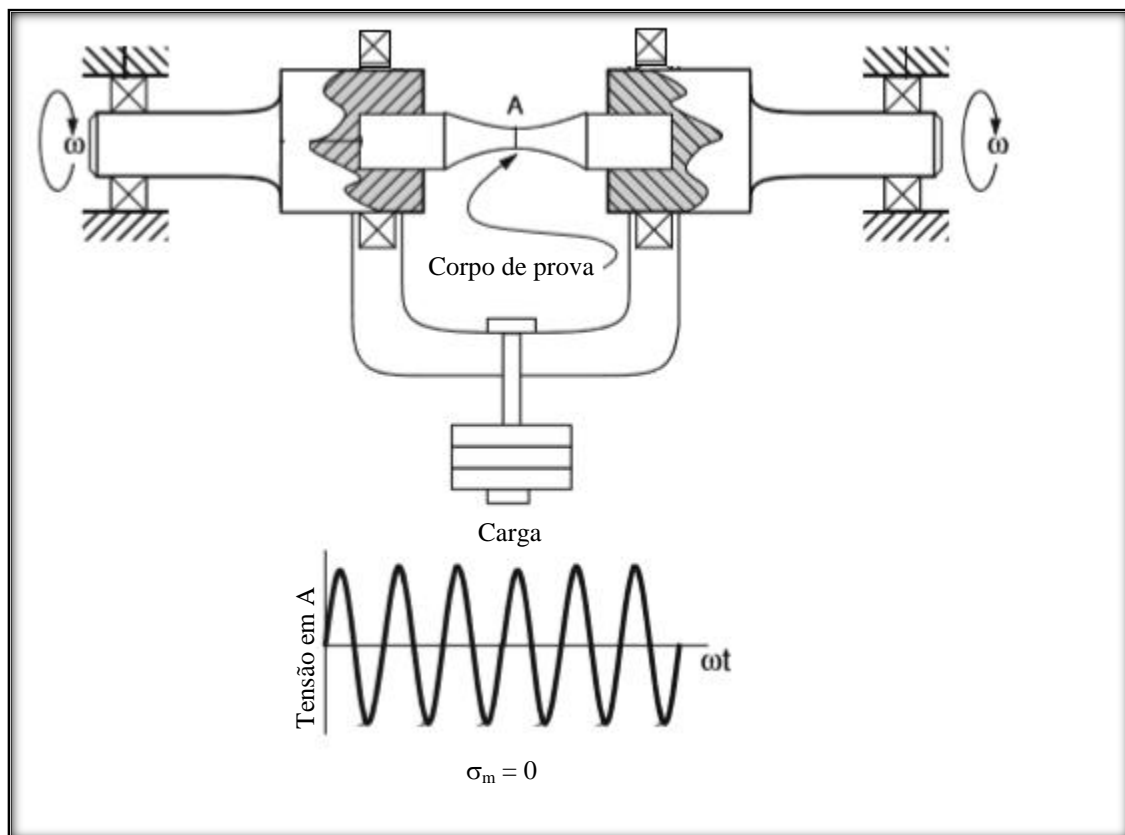


FIGURA 2.7 - Representação do teste de fadiga por flexão rotativa

FONTE - Adaptado de MILELLA, 2013

O corpo de prova possui uma redução de área da seção em sua região central, a qual é necessária para concentrar as tensões nessa região evitando que a falha ocorra em uma região não esperada. Esse tipo de ensaio utilizando a máquina da FIG 2.7 permite apenas aplicação de tensões simétricas, não sendo recomendado para tensões médias diferentes de zero (MILELLA, 2013).

Máquinas que realizam ensaios de fadiga por flexão rotativa geralmente são compostas por um motor responsável pelo giro do eixo, um sensor contador de giros, um dispositivo ou mecanismo para aplicação de carga e acessórios mecânicos para viabilizar a execução dos ensaios, como suportes, pinças e rolamentos (MARQUES et al., 2011).

### 2.2.3.3 Outros tipos de ensaios de fadiga

Como citado por Millela (2013), outros tipos de ensaios de fadiga também são utilizados. O ensaio de fadiga por tração-compressão é realizado através da aplicação de tensões axiais alternadas ou flutuantes de tração e/ou compressão em um corpo de prova de formato cilíndrico. Os corpos de prova para esse tipo de ensaio são fixados em suas duas extremidades e submetidos a ciclos alternados de tensões até a sua ruptura. Esse tipo de ensaio geralmente é realizado em máquinas de ensaio universal que realizam outros tipos de testes mecânicos como teste de tração, compressão, cisalhamento, entre outros (MARQUES et al., 2011).

A máquina de ensaio universal também é utilizada para a realização do ensaio de fadiga por torção, podendo realizar ensaios com tensões combinadas de tração-compressão e torção. Nos ensaios de fadiga por torção, um corpo de prova cilíndrico é submetido a cargas de torção até a ruptura do material.

## 2.3 Fatores que influenciam na vida em fadiga dos materiais

Os primeiros estudos sobre fadiga não levavam em consideração detalhes internos como a formação e propagação das trincas e a existência de imperfeições nos materiais, mas apenas os termos medidos quantitativamente, como a tensão aplicada e a número de ciclos de vida de cada material através da curva S-N (GDOUTOS, 1948).

Ignorar o processo e mecanismo de fratura por fadiga e suas influências pode levar à realização de ensaios e obtenção de dados incorretos, pois muitos fatores afetam a vida dos materiais, desde a geometria e estrutura até ao modo de aplicação da carga (GDOUTOS, 1948).

A tensão média (representada pela razão R) influencia de modo positivo ou negativo a vida em fadiga (GRA 2.16). Tensão média positiva reduz a resistência à fadiga dos materiais, pois atuam abrindo trincas presentes no componente mecânico, enquanto que tensão média negativa aumenta a resistência à fadiga, pois tendem a fechar as trincas (SOUZA, 2011).

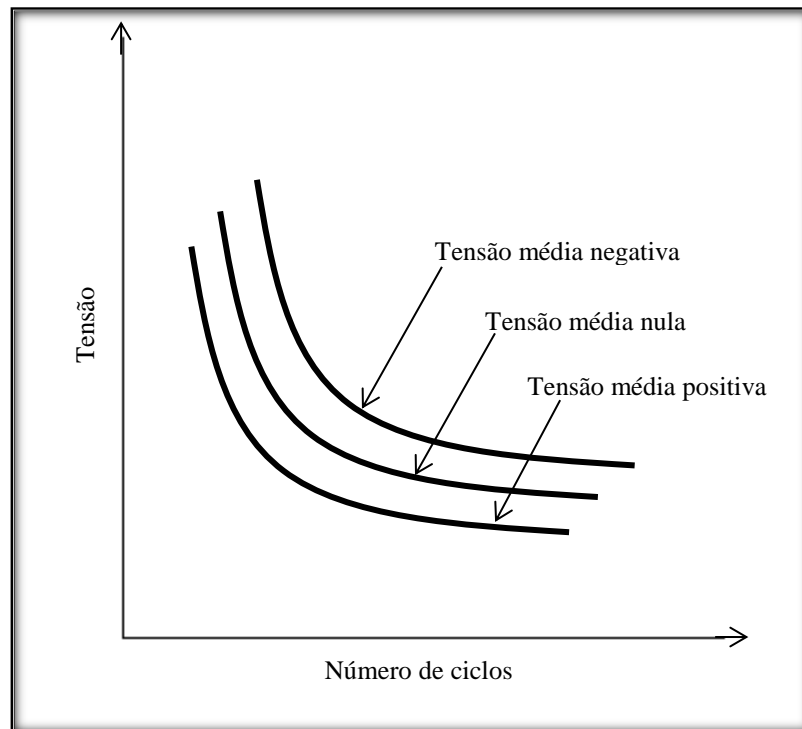


GRÁFICO 2.16 - Efeito da tensão média na vida em fadiga

FONTE - Adaptado de SOUZA, 2011

A vida em fadiga é afetada de diversas formas, dependendo da microestrutura do material, dos processos de fabricação, do tipo e intensidade de carga aplicada, das condições ambientais e da geometria do material (ELLYIN, 1997). A dificuldade encontrada no estudo dos fatores que afetam na vida em fadiga está na relação que um aspecto possui com outro, o que impede que cada fator seja quantificado individualmente. Os principais fatores que afetam a vida de fadiga dos materiais são apresentados a seguir.

### 2.3.1 Influência da microestrutura

Um dos principais fatores que influenciam a vida em fadiga é a microestrutura do material. O tamanho médio dos grãos, sua estrutura e falhas internas afetam diretamente a vida em fadiga dos materiais. A temperatura ambiente, materiais que possuem tamanho médio de grãos maiores possuem vida em fadiga mais curta em relação aos que possuem tamanho médio de grãos menores, entretanto, em alguns metais, essa relação é invertida quando a temperatura é elevada (ELLYIN, 1997). A microestrutura do material influencia diretamente a vida em fadiga porque a deformação por fadiga ocorre

através de deformações plásticas no interior do material. Na fadiga, as forças cíclicas aceleram essa deformação através do movimento de discordâncias entre os grãos e o modo e a facilidade do movimento são afetados pelo tamanho dos grãos, impurezas e precipitados que podem estar presentes entre as estruturas (ELLYIN, 1997).

A indução de tensões residuais de tração pelas deformações plásticas e processos de fabricação diminui a vida de fadiga do material e, deste modo, interfere no ciclo de vida em fadiga do material. É importante levar em consideração a deformação plástica até a montagem das peças, pois a pressão de aperto pode levar à deformação plástica do material, introduzindo uma tensão residual localizada (SCHIJVE, 2009).

### 2.3.2 Influência dos processos de fabricação

Os processos de fabricação também afetam a vida em fadiga devido à alteração na orientação dos grãos dos materiais, produção de defeitos internos entre as cavidades dos grãos e indução de formação de tensões residuais. A orientação dos grãos aumenta a vida em fadiga, ao passo que quando grãos encontram-se posicionados aleatoriamente a vida em fadiga diminui (ELLYIN, 1997). Os defeitos internos que podem estar presentes nos materiais dependendo do processo de fabricação e atuam como concentradores de tensão, tornando-se locais propícios para a nucleação da trinca de fadiga. A rugosidade presente nos elementos mecânicos é influenciada pelo processo de fabricação aos quais estes foram submetidos e o aumento da rugosidade diminui a vida em fadiga de um elemento comparado com um similar com rugosidade menor (ELLYIN, 1997).

Os processos de tratamentos térmicos e superficiais provocam alterações nas tensões residuais dos materiais. Nas superfícies dos materiais, as tensões residuais de compressão aumentam a vida em fadiga dos materiais, enquanto as tensões de tração diminuem (SCHIJVE, 2009). Os tratamentos térmicos tendem a reduzir as tensões residuais dos materiais que já passaram por algum processo de fabricação e, além disso, o tratamento térmico pode causar a descarbonização do material (materiais metálicos), reduzindo sua tenacidade e favorecendo a formação de microtrincas (ELLYIN, 1997). A cementação e nitretação, ao contrário da descarbonização, aumentam a resistência do



material e produzem tensões residuais de compressão na superfície do material, elevando sua resistência à fadiga (SANTOS, 2008).

Processos mecânicos também podem produzir tensões residuais de compressão na superfície dos materiais, como a laminação a frio e o jateamento por granalha, que também endurecem a superfície do material e elevam sua vida em fadiga (SANTOS, 2008).

### 2.3.3 Influência do ambiente

Materiais submetidos à corrosão têm sua vida em fadiga reduzida (ELLYIN, 1997). A corrosão é o processo que causa degradação do material por reação química ou eletroquímica com o meio ambiente (MANESCHY et al., 2014). Esse processo resulta em concentradores de tensões que facilitam a inicialização da trinca e o efeito é aumentado em materiais sujeitos a esforços repetitivos (ciclos de fadiga), uma vez que o ciclo de força atua quebrando a camada superficial oxidada e expondo o interior do material ao processo de corrosão. Uma vez iniciada a trinca, o aumento da corrosão no material facilita sua propagação (ELLYIN, 1997).

Em geral, a corrosão diminui a vida em fadiga por favorecer a inicialização da trinca e a propagação através da combinação da própria carga de fadiga com a facilitação da corrosão no interior do material. O GRA 2.17 apresenta uma comparação da vida em fadiga de uma liga de alumínio com uma camada de 0,33 mm de corrosão e outra sem corrosão, onde fica evidenciado que o material com corrosão apresenta vida em fadiga muito inferior ao material sem corrosão (SCHIJVE, 2009).

O aumento da temperatura ao qual o material está sujeito também reduz a resistência à fadiga do material, pois geralmente facilita a propagação das trincas (ELLYIN, 1997).

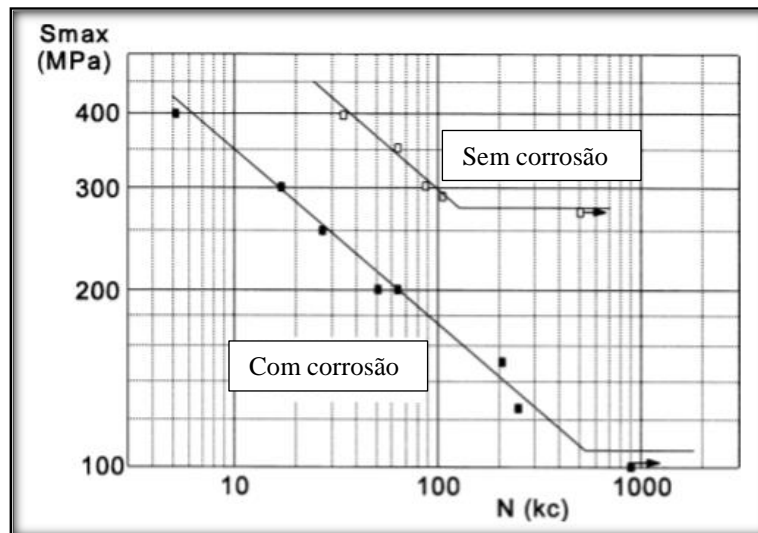


GRÁFICO 2.17 - O efeito da corrosão na vida de fadiga de um liga de Al (7075-T6)

FONTE - Adaptado de SCHEERDER, 1992 apud SCHIJVE, 2009

#### 2.3.4 Influência da carga aplicada

A intensidade, tipo e origem da carga cíclica interferem na vida em fadiga dos materiais. A solitação pode acontecer de diferentes formas, de modo que a carga aplicada pode ser axial ou multiaxial, de torção, flexão ou uma combinação dessas formas. Além disso, o estado de tensão de um material pode variar ao longo de sua seção. Em geral, cargas aplicadas de maneira multiaxial reduzem a vida em fadiga em comparação às cargas aplicadas em uma única direção (ELLYIN, 1997).

O aumento da intensidade da carga aplicada reduz a vida em fadiga dos materiais. A carga aplicada em um material deve ser analisada como a tensão a qual esse material está submetido e seu valor médio é calculado pela média entre os valores máximo e mínimo aplicados (EQ 2.11). Tensões resultantes positivas, ou tensões de tração, tendem a reduzir a vida de fadiga dos materiais, enquanto as tensões negativas, tensões de compressão, tendem a aumentar a vida de fadiga dos materiais como já mencionado no tópico 2.3.2 (ELLYIN, 1997).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.11)$$

### 2.3.5 Influência do acabamento e geometria do material

O acabamento superficial do material é um fator que aumenta ou diminui a vida de fadiga do material. Rugosidade, presença de arranhões ou pequenos entalhes favorecem a concentração de tensões e, conseqüentemente, diminuem a vida em fadiga por facilitar a inicialização da trinca. Componentes que apresentam descontinuidades em sua geometria criam concentradores de tensões que também tendem a reduzir a vida de fadiga do mesmo. Entre exemplos das descontinuidades que muitas vezes são necessárias são a presença de furos, entalhes e soldas (ELLYIN, 1997).

A falha por fadiga inicia-se preferencialmente na superfície do material, então, quanto maior a área do material, maior é o volume na superfície submetido à tensão máxima. Deste modo, há uma maior probabilidade da iniciação de uma trinca de fadiga (SANTOS, 2008). A TAB 2.6 apresenta o limite de resistência à fadiga de um mesmo material para três diâmetros de corpo de prova diferentes.

TABELA 2.6

Efeito do tamanho do corpo de prova no limite de resistência à fadiga

<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Limite de resistência à fadiga (MPa)</b>
7,62	227
38,1	190
171,45	119

FONTE - FAUPEL et al., 1981 apud SANTOS, 2008

### 2.3.6 Influência de uniões

Alguns componentes mecânicos são formados por união de duas ou mais peças. A união dessas peças é feita por juntas que podem ser do tipo mecânico, solda ou colagem. Juntas mecânicas são geralmente realizadas por pinos, parafusos ou rebites. A montagem dessas juntas reduz as forças de fadiga a pequenas frações quando comparada ao conjunto inteiro. As juntas mecânicas introduzem concentradores de tensão na peça que afetam negativamente a vida em fadiga do conjunto, além do contato superficial das juntas acontecer por atrito, que também diminui a vida em fadiga (CHARLES et al., 1997).

Juntas soldadas apresentam resistência à fadiga sempre menor em comparação com os materiais que não apresentam soldas, mesmo que a resistência da junta seja igual ao do material. As forças de fadiga em juntas soldadas são influenciadas pelo tamanho e distribuição de defeitos na deposição da solda, pela intensidade de concentração de tensões na junta da solda com o metal base e na possível perda de carbono da superfície do material (no caso dos metais) com efeito do aquecimento da zona superficial (CHARLES et al., 1997).

Alguns componentes apresentam junções por meio de adesivos ou colas, como por exemplo, a junção de painéis de alumínio na indústria automotiva. As ligações adesivas possuem vantagens que as tornam interessantes quando comparadas às uniões mecânicas ou soldadas, tais como baixo peso, capacidade de elementos com composições diferentes, boa vedação, baixo custo de produção e boas propriedades de amortecimento e vibração, sendo muito aplicadas na indústria automotiva e aeroespacial. As uniões adesivas, quando comparada aos dois outros tipos citados, apresentam alta resistência à fadiga, resultando em uma vida em fadiga mais longa (WAHAB, 2012). Essas junções permitem uma distribuição mais uniforme das tensões que as juntas mecânicas e evitam problemas das juntas soldadas como tensões residuais e defeitos da solda, tornando esse tipo de ligação favorável para a vida em fadiga dos componentes (CHARLES et al., 1997).

## **2.4 Metodologia de projeto**

Segundo Budynas et, al. (2016) projetar é: “formular um plano para atender a uma necessidade específica ou resolver um problema”. Shigley et al. (2005) também afirma que “projetar consiste tanto em formular um plano para a satisfação de uma necessidade específica quanto em solucionar um problema”. Então, projeto está relacionado à ideia de criação de algo com fins específicos, devendo o produto ser confiável e seguro. Projetar é um processo onde os envolvidos devem possuir amplo conhecimento na área, pois inevitavelmente será preciso tomar decisões com poucas informações que podem interferir no produto final (BUDYNAS et al., 2006).

Projeto de engenharia é definido como “o processo de aplicação de várias técnicas e princípios científicos com o intuito de definir um dispositivo, um método ou um sistema suficientemente pormenorizado para permitir sua realização” (NORTON, 2004). Os

projetos de engenharia são incentivados na maior parte das vezes pela necessidade de encontrar soluções para problemas técnicos ou por necessidade do mercado. O desenvolvimento de máquinas, equipamentos ou produtos é uma tarefa complexa, pois a pessoa ou o grupo responsável pelo projeto deve possuir conhecimentos sólidos em diversas áreas como matemática, física, química, mecânica, tecnológica e elétrica. Paralelamente ao conhecimento técnico, o desenvolvimento de projetos requer também habilidades pessoais, como capacidade de organização, liderança, tomada de decisões, criatividade e boa relação com outras pessoas. Fatores externos também influenciam na elaboração de projetos que podem inviabilizá-los, tais como recursos financeiros e restrições legais e ambientais (PAHL, 2005).

A organização do fluxo de trabalho no desenvolvimento de projetos é fundamental para minimizar os erros e para ter uma dimensão do que já foi realizado e das tarefas pendentes a serem cumpridas. O fluxo de trabalho deve levar em conta o planejamento de todo o processo, considerando os prazos, custos e meios para a realização do projeto (PAHL et al., 2005).

#### 2.4.1 Planejamento do processo

O planejamento do processo consiste em planejar as tarefas a serem executadas e o esclarecimento das mesmas, identificando os problemas e elaborando as soluções preliminares por meio de estruturas modulares com subconjuntos (PAHL et al., 2005).

Diferentes autores tratam o planejamento de processo de projeto de maneiras distintas. Budynas et al. (2016) e Shigley et al. (2005) dividem o processo de projeto completo em seis fases, sendo que o projeto é um processo iterativo que passa diversas vezes por cada fase até sua conclusão (FIG 2.8). O projeto deve iniciar com a identificação de uma necessidade. Em seguida, deve-se passar para a fase de definição do problema, na qual são relatados todos os possíveis problemas e inclusas as especificações do objeto a ser projetado, levando em consideração desde o espaço físico, capacidade e limitações do objeto até o custo de fabricação, confiabilidade e vida útil (BUDYNAS et al., 2016). Outros aspectos devem ser analisados na fase de definição do problema, como a viabilidade do projeto, os meios para fabricação e as instalações do local devem ser

consideradas como uma restrição ao projeto podendo ser uma limitação para a liberdade de escolha do projetista (BUDYNAS et al., 2016).

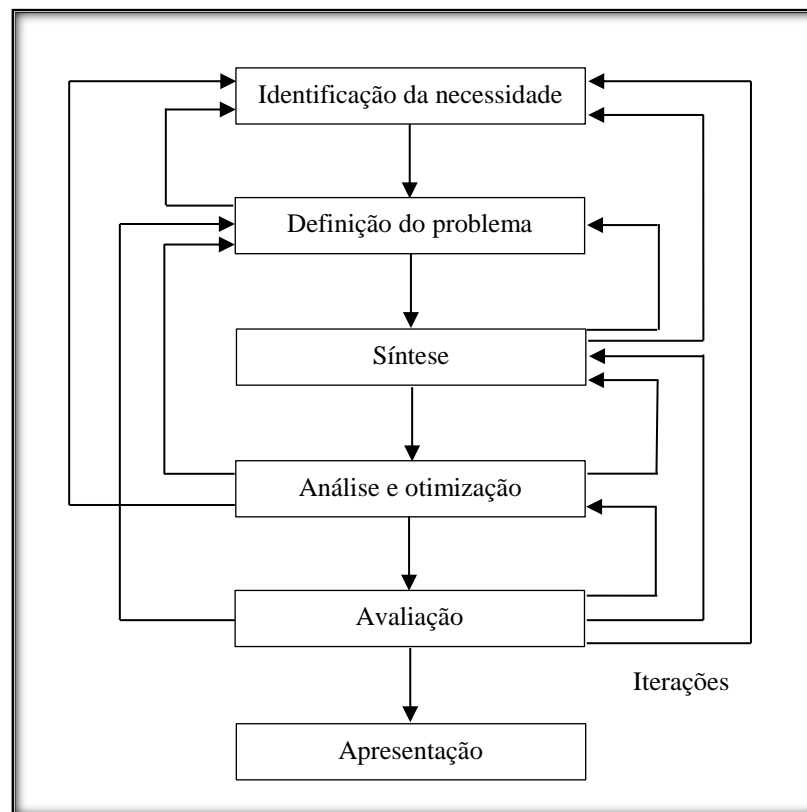


FIGURA 2.8 - As fases do projeto com as devidas iterações

FONTE - BUDYNAS et al., 2016

A terceira fase citada por Budynas et al. (2016) e Shigley et al. (2005) é a fase denominada síntese. Esta etapa também é conhecida por concepção e invenção e consiste na organização e coleta de alternativas para solucionar os problemas identificados na fase anterior sem preocupação com a viabilidade ou custo (NORTON, 2004). As alternativas propostas pela fase de síntese são analisadas e aceitas, rejeitadas ou modificadas na fase de análise e otimização.

A quinta fase, denominada avaliação, é a prova final do projeto. Nesta fase, a alternativa mais plausível verificada anteriormente é selecionada e realizado o seu detalhamento, onde são feitos croquis, identificação de fornecedores, especificações de fabricação entre outras particularidades de cada projeto (NORTON, 2004). No final, são produzidos protótipos para comprovar a eficácia do projeto e se ele realmente atende às necessidades indicadas inicialmente (BUDYNAS et al., 2016). Quando o projeto é

voltado a terceiros, é necessária a apresentação do mesmo, que acontece na sexta fase do processo.

#### 2.4.1.1 Seleção de materiais para projetos mecânicos

A seleção do material passa pela necessidade do projetista. Cada classe de materiais (metais, cerâmicas, polímeros e compósitos) possui vantagens e limitações em relação à outra. Os metais apresentam módulos e resistência à deformação bem definidos (ao contrário dos polímeros), além de serem conformáveis, apresentando ductilidade de 20% ou mais. O uso desses materiais em projetos leva a uma abordagem de fator de segurança. Ao contrário dos materiais cerâmicos, os metais podem ser usados sob cargas estáticas próximas de sua resistência máxima com a confiança de que não ocorrerão falhas permanentes (ASHBY et al., 2007).

O uso de fator de segurança para polímeros é mais complexo que para materiais dúcteis, uma vez que sua tolerância à concentrações de tensão ou a altas tensões de contato é baixa, ou seja, o material cerâmico não consegue rearranjar ou redistribuir cargas se alguma anormalidade for detectada, como por exemplo, um pino de articulação de uma estrutura mal ajustado (ASHBY et al., 2007).

Os polímeros muitas vezes são selecionados de forma equivocada em projetos, o que reduz sua vida útil e, conseqüentemente, seu leque de aplicações. Algumas vantagens para utilização dos polímeros em projetos são: baixa densidade, conformabilidade, resistência à corrosão, podem não necessitar de acabamento, baixo coeficiente de atrito e permitem altos valores de deformações elásticas (ASHBY et al., 2007).

Os compósitos podem superar as deficiências de um material pela combinação com outro, entretanto isso gera um alto custo. Os componentes que formam os compósitos geralmente são caros e difíceis de conformar ou unir (ASHBY et al., 2007).

A TAB 2.7 apresenta algumas propriedades dos materiais polímeros, cerâmicos e metálicos de forma comparativa. Percebe-se a diferença de uma classe de material para outra, sendo que cada característica pode ser aproveitada ou não, dependendo da aplicação.

TABELA 2.7

Comparação de algumas propriedades de diferentes classes de materiais

Material	Rigidez	Resistência	Maleabilidade	Condutividade elétrica	Condutividade térmica	Densidade
<b>Cerâmica</b>	Alta	Muito alta	Nula	Muito baixa	Baixa	Média
<b>Metal</b>	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
<b>Polímero</b>	Baixa	Baixa	Alta	Muito baixa	Muito baixa	Baixa

FONTE - Courtney, 1997

A seleção do material deve levar em conta, além das suas propriedades, os processos mecânicos aos quais o material será submetido até chegar ao produto acabado. A escolha inadequada do material pode gerar custos excessivos no processo de manufatura, aumentando desnecessariamente o custo final do produto. Além disso, as propriedades dos materiais podem ser alteradas (DIETER, 1997). A FIG 2.9 resume a interligação entre projeto, materiais e processos de fabricação e fica evidente que a escolha de um pode afetar o desempenho do outro. Também fica claro que o custo é uma variável que influencia sobremaneira o desenvolvimento do projeto.

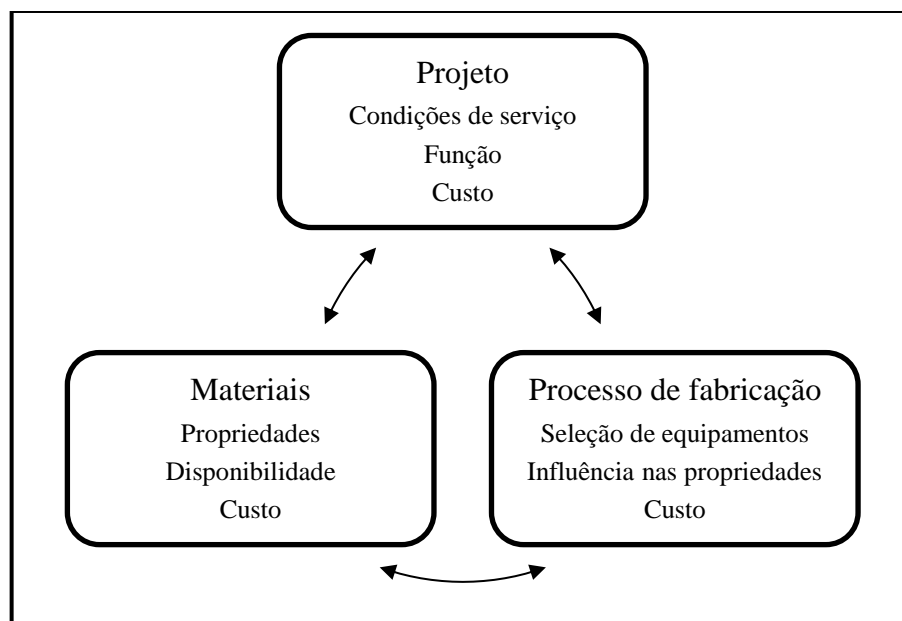


FIGURA 2.9 - Relação entre projeto, materiais e processo de fabricação

FONTE - DIETER, 1997

#### 2.4.1.2 Recursos e ferramentas para elaboração de projetos

Recursos tecnológicos estão cada vez mais desenvolvidos para facilitar o trabalho dos projetistas na criação e organização de seu trabalho, devendo sempre ser utilizados



desde que a ferramenta sirva para facilitar o trabalho e não para dificultá-lo. Estas ferramentas estão cada vez mais confiáveis, entretanto, o bom senso e a base sólida de conhecimentos do responsável pelo projeto não podem ser ignorados na tomada de decisões.

Programas computacionais são utilizados para elaboração de desenhos e projetos bi e tridimensionais, o que facilita a análise e simulação de componentes mecânicos, além de acelerar a elaboração e permitir a visualização de possíveis erros geométricos ou de interferência. Outras vantagens da inclusão de ferramentas computacionais associadas aos projetos são a criação de banco de dados e a realização de cálculos rápidos e precisos de massa, centro de gravidade, momentos de inércia, distância entre pontos e outras propriedades (BUDYNAS et al., 2016).

#### 2.4.1.3 Informações complementares sobre projetos

Algumas características, tais como resistência mecânica e à corrosão, funcionalidade, segurança, custo, tamanho e manutenção são denominados considerações de projeto e uma boa quantidade dessas características deve ser considerada no projeto (SHIGLEY et al., 2005). Além das considerações já citadas, existem outras que influenciam a dimensão, material, processamento mecânico e união de peças ou do conjunto (SHIGLEY et al., 2005).

O projeto deve resultar em um produto que desempenhe sua função de forma eficiente, dentro dos requisitos legais, sociais, de segurança e não deixando de lado o fator econômico e de confiabilidade (FARAG, 1997). O projeto deve iniciar pelo entendimento do problema, identificação de dados e incógnitas, formulação de estratégias de solução estabelecendo todas as hipóteses para tomar decisões corretas, avaliar o problema e a solução proposta e apresentar a solução (SHIGLEY et al., 2005).

Peças mecânicas como barras chatas, parafusos, rolamentos, entre outros, são encontrados comercialmente com dimensões padronizadas. Segundo Shigley et al. (2005): “*padrão* é um conjunto de especificações para peças, materiais ou processos destinado a atingir uniformidade, eficiência e uma qualidade determinada”. O uso da

padronização de tamanho possibilitou a redução de custos, mas tornou-se uma consideração de projeto.

De forma análoga à necessidade da criação de um padrão dimensional para peças e componentes, códigos (ou normas) foram elaborados e são utilizados para que seja atingido um grau especificado de segurança, eficiência, desempenho ou qualidade e devem ser seguidas em projetos civis, mecânicos, elétricos, entre outros (BUDYNAS et al., 2016).

Alguns outros pontos não citados fazem parte da elaboração de projetos, principalmente quando o produto é destinado à produção em série. Esses pontos são: incertezas, tolerâncias, confiabilidade, unidades de medida e fatores de projeto e de segurança.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento e construção da máquina para ensaio de fadiga por flexão, desde o conceito da máquina com os componentes necessários para realizar o ensaio de fadiga até sua montagem final.

A metodologia de projeto proposta por Budynas (2016) e Shigley (2005) foi adaptada para o projeto com o seu conceito e algumas características mantidas. A TAB. 3.1 mostra os conceitos utilizados no projeto em questão.

TABELA 3.1  
Metodologia de projeto para a máquina de fadiga

<b>Fase</b>	<b>Descrição</b>
Identificação da necessidade	Projetar, fabricar e validar uma máquina para realização de ensaios de fadiga por flexão
Definição do problema	Construir uma máquina resistente, compacta, que atenda aos ensaios de diferentes geometrias de corpos de prova e com baixo custo
Síntese	Projetar e comprar a fabricação de uma empresa ou projetar e fabricar no Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG.
Análise e otimização	Divisão do projeto em subconjuntos e definição da fabricação e validação ocorrendo no Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG
Avaliação	Elaboração de croquis de uma máquina modelo, detalhamento em 3-D e 2-D, aquisição de peças e ferramentas, fabricação e montagem, realização de ensaios de fadiga
Apresentação	Não realizado

FONTE - Autor

A seguir serão apresentadas as partes fundamentais da máquina para ensaio de fadiga. A máquina foi dividida em subconjuntos para facilitar o entendimento e a necessidade de cada elemento utilizado. Informações complementares deste capítulo como a programação utilizada, dimensionamento dos eixos, calculo das tensões aplicadas nos corpos de prova e o detalhamento bidimensional da máquina são apresentadas no Anexo A, Anexo B, Anexo C e Anexos D1 ao D22, respectivamente.

### 3.1 Princípios básicos

A máquina para ensaio de fadiga necessita de componentes estruturais que sejam responsáveis por fixar e sustentar os elementos da máquina. Além da estrutura, o ensaio necessita de um sistema dinâmico que realize a movimentação e transmissão de torque necessário durante cada ensaio. O entendimento operacional é fundamental para avaliar os recursos necessários para a construção da máquina.

A realização do ensaio só é possível com a utilização de alguns elementos que são imprescindíveis, como o motor para fornecer o torque necessário ao ensaio, eixo para transmissão do torque para demais elementos da máquina, mancais para apoiar o eixo e um mecanismo capaz de transformar o movimento circular em movimento alternativo, como um mecanismo biela - manivela, por exemplo. A FIG 3.1 apresenta os elementos mínimos necessários para a fabricação da máquina e que foi utilizado como modelo inicial.

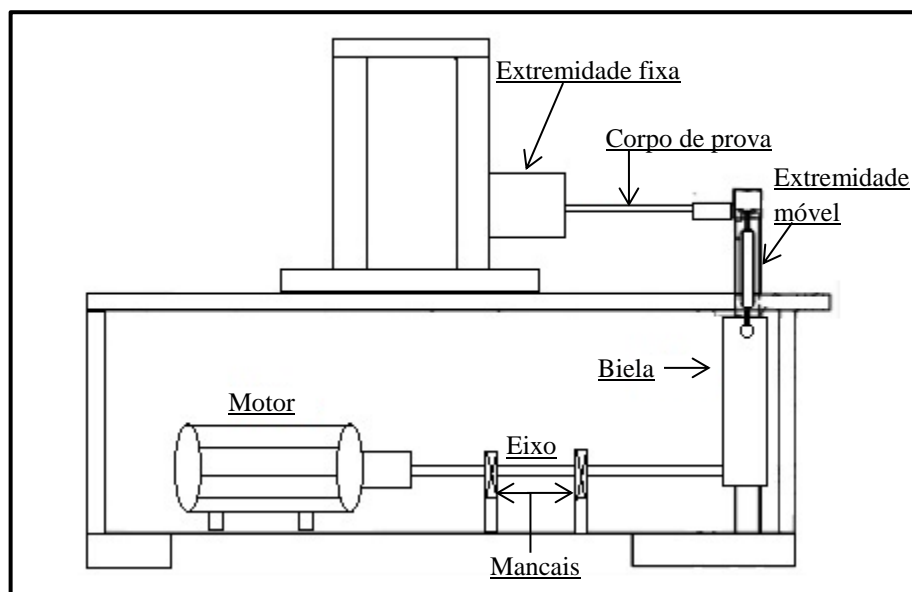


FIGURA 3.1 - Representação básica da máquina para ensaio de fadiga por flexão

FONTE - Autor

Durante a realização do ensaio, o corpo de prova deve ser fixado em duas extremidades, uma fixa e outra que realiza movimentos alternados de flexão. Para isso, a extremidade móvel deve ser acoplada aos elementos ligados à biela. O movimento circular do eixo é transformado em retilíneo pela biela, de modo que cada revolução corresponde a um

ciclo alternado no movimento vertical da biela. Essa movimentação retilínea é transmitida ao corpo de prova e a repetição dos ciclos deve ocorrer até o rompimento do material, finalizando o ensaio.

No Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG encontra-se uma máquina para ensaio de fadiga por flexão utilizada como modelo para este projeto (FIG 3.2). Esta máquina foi utilizada para se entender os procedimentos presente de realização do ensaio de fadiga por flexão, analisar a estrutura e prever os processos de fabricações necessários para criação de uma máquina semelhante, além de serem observados aspectos elétricos, eletrônicos e dimensionais.



FIGURA 3.2 - Máquina para ensaio de fadiga por flexão existente no DEES da EE - UFMG

FONTE - Autor

Após a compreensão do funcionamento da máquina e de seus componentes básicos, foi realizado o levantamento dimensional. Para isso, foram elaborados croquis utilizando paquímetro e trena. O levantamento dimensional da máquina existente foi imprescindível para criar o formato da máquina a ser construída, entretanto, nem todas as peças ou conjuntos de peças utilizadas na máquina de fadiga fabricada seguiram o modelo da máquina existente. As principais diferenças estão no mecanismo responsável pela variação da amplitude da flecha e nos acessórios utilizados pela parte dinâmica da

máquina, conseqüentemente, o projeto e a fabricação da máquina difere do projeto da máquina existente no DEES, ainda que ambas possuam a mesma finalidade.

### 3.2 Subconjuntos da máquina

A partir do conceito da máquina, é necessário buscar componentes e alternativas para garantir sua fabricação, realização dos ensaios e coleta de dados. A máquina para ensaios de fadiga por flexão fabricada foi dividida em subconjuntos distintos, cada um com sua função específica. Os subconjuntos devem trabalhar em harmonia para que seja possível a realização de cada ensaio. Os subconjuntos que constituem a máquina de fadiga por flexão são: estrutural, dinâmico e de controle e coleta de dados.

#### 3.2.1 Subconjunto estrutural

A estrutura da máquina deve possibilitar resistência mecânica e estabilidade apropriadas para que a máquina suporte os esforços solicitados durante os ensaios sem interferir nos resultados coletados. Além disso, a estrutura da máquina deve permitir que os demais elementos necessários para a realização dos ensaios sejam montados. A FIG 3.3 representa o subconjunto estrutural com suas peças e acessórios. O subconjunto estrutural também se encontra detalhado em duas dimensões nos Anexos D1 ao D22.

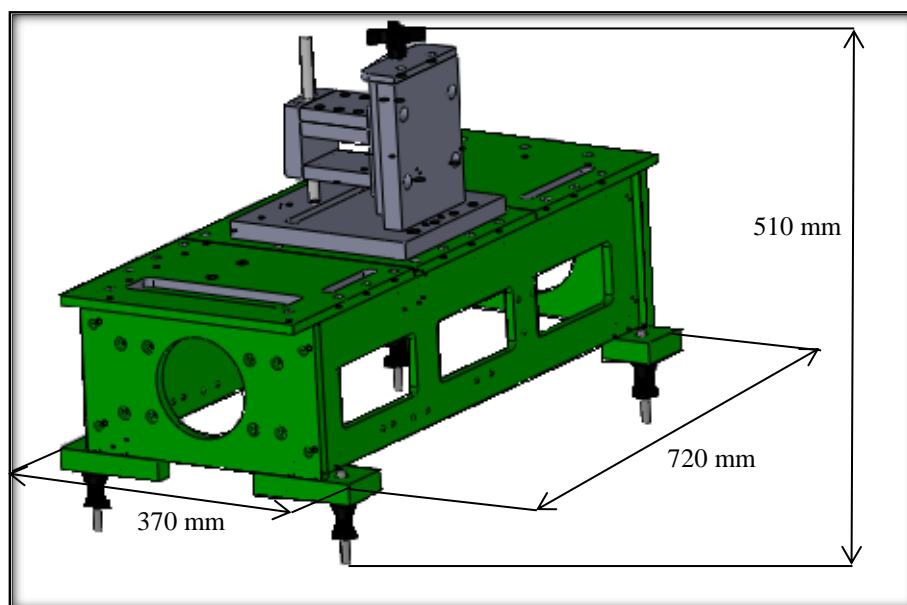


FIGURA 3.3 - Representação da estrutura da máquina de fadiga e suas dimensões externas

FONTE - Autor

A FIG 3.4 representa a parte superior da máquina, que é constituída por três tampas e um conjunto de peças denominado fixador, FIG 3.4 (A) e FIG 3.4 (B), respectivamente. A variação da geometria dos corpos de prova para o ensaio de fadiga por flexão não possibilita que o conjunto fixador seja fixado permanentemente nas tampas superiores, assim foram produzidos furos oblongos nas tampas como recurso para possibilitar a fixação do conjunto em diferentes posições na tampa, permitindo que o comprimento do corpo de prova varie conforme a necessidade.

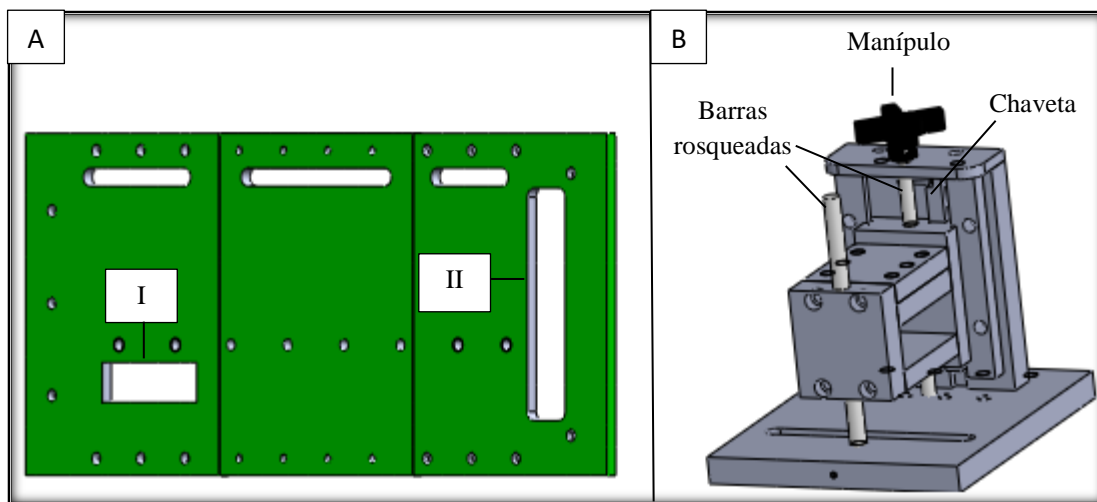


FIGURA 3.4 - Representação da parte superior da estrutura da máquina de ensaio de fadiga por flexão:  
(A) tampas; (B) conjunto fixador

FONTE - Autor

Além dos furos, as tampas representadas na FIG 3.4 (A) possuem uma abertura utilizada para facilitar a fixação do motor (I) e outra abertura utilizada para permitir o movimento das peças responsáveis pela parte móvel do ensaio (II), como será visto durante a descrição do subconjunto dinâmico.

O conjunto fixador, FIG 3.4 (B), foi projetado para fixar uma das extremidades do corpo de prova de modo que esta não varie de posição durante o ensaio. O conjunto possibilita a movimentação por meio de uma barra rosqueada conectada a um manípulo. Essa variação vertical do conjunto é necessária devido às diferentes espessuras de corpos de prova, possibilitando que o momento no corpo de prova antes de se iniciar o ensaio seja nulo ou não. O travamento do conjunto fixador na posição desejada é garantido por uma chaveta e por outra barra rosqueada com duas porcas.

A máquina foi projetada prevendo melhorias futuras. O conjunto fixador apresenta peças com recursos destinados tanto à fixação do corpo de prova quanto a possibilidade de inserir uma célula de carga. As peças possuem furos com ou sem rosca e elementos necessários à fixação, movimentação e rigidez do subconjunto. Todas as peças detalhadas estão disponíveis nos Anexos D1 ao D22.

As peças que, em conjunto, formam as paredes e os pés da máquina são utilizadas para garantir sustentação, resistência e pontos de apoio para os demais componentes da máquina (FIG 3.5). Essas peças são conectadas por parafusos e dispostas de maneira alinhada, sendo que cada peça possui sua particularidade geométrica conforme a necessidade de projeto.

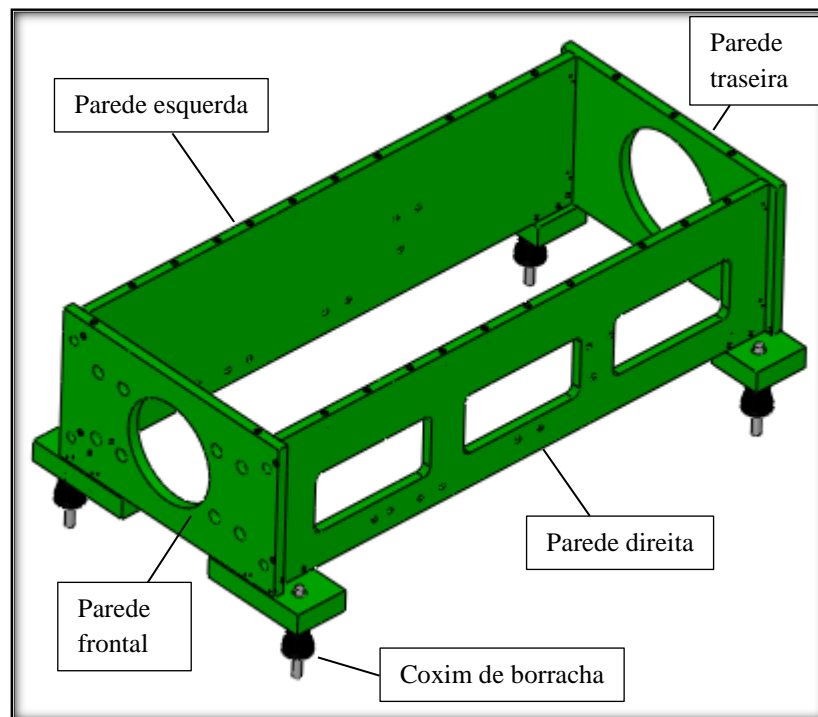


FIGURA 3.5 - Representação das paredes e parte inferior da máquina

FONTE - Autor

As paredes frontal e traseira possuem aberturas circulares necessárias ao acesso para variação da amplitude da flecha e à ventilação do motor, respectivamente. A parede frontal também possui furos que possibilitam a fixação dos mancais utilizados para guiar o movimento vertical da parte dinâmica da máquina.



Como descrito anteriormente, o conjunto fixador deve ser parafusado nas tampas através dos furos. Com o objetivo de facilitar esta etapa, três aberturas foram realizadas na parede direita da máquina para permitir o acesso ao interior da máquina e facilitar a fixação do conjunto nas tampas.

Os quatro pés da máquina possuem orifícios que possibilitam a utilização de coxins de borracha para nivelar a máquina e diminuir a transmissão de vibrações da máquina para o ambiente. O nivelamento foi necessário para a inclusão das polias com o objetivo de aumentar o torque e o uso de coxins de borracha possibilitou uma redução no peso final da máquina, pois as quatro peças que formam as paredes da máquina não precisaram ter sua altura modificada, reduzindo a quantidade de materiais utilizados.

As paredes da máquina também foram utilizadas como pontos de apoio para fixação de cantoneiras e de um bloco retangular necessários para a fixação dos elementos da parte dinâmica, como os mancais e o motor elétrico (FIG 3.6).

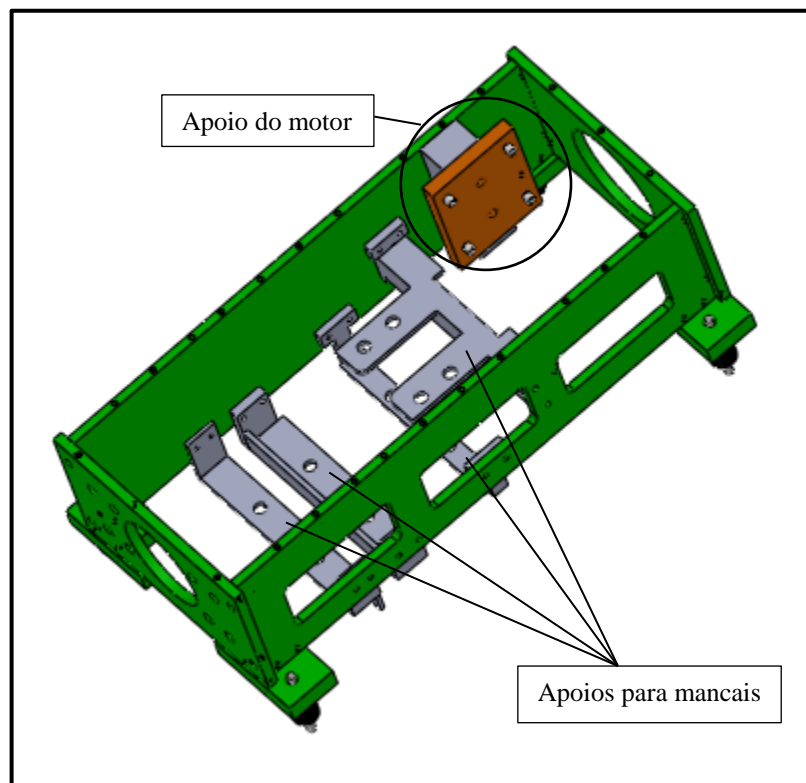


FIGURA 3.6 - Representação dos acessórios utilizados para fixação da parte dinâmica

FONTE - Autor

As cantoneiras são utilizadas para fixação dos mancais e sua geometria varia conforme necessidade. Um bloco retangular em conjunto com um bloco de material polimérico é utilizado para fixar o motor no centro da máquina. O bloco de material polimérico foi utilizado com o objetivo de absorver vibrações e possibilitar certo deslocamento do motor durante seu funcionamento.

As partes estruturais da máquina (exceto o conjunto fixador e os acessórios com os materiais já descritos) são fabricadas em aço ABNT 1020 por ser um material facilmente encontrado no mercado e possuir características desejadas como boa resistência mecânica, boa usinabilidade e baixo custo. O conjunto fixador é fabricado em aço ABNT 1045, que é um aço temperável facilmente encontrado no mercado, entretanto, possui maior resistência mecânica que o aço ABNT 1020, característica importante já que este conjunto sofre esforços diretos durante o ensaio de fadiga.

### 3.2.2 Subconjunto dinâmico

O sistema dinâmico da máquina (FIG 3.7) é responsável por fornecer o torque necessário à realização dos ensaios de fadiga e, para isso, componentes e acessórios devem atuar de modo sincronizado a fim de fornecer aos corpos de prova esforços cíclicos alternativos até sua ruptura. Para realizar tal operação é necessário um motor que converta a energia elétrica em torque necessário para a realização dos testes. O motor fornece torque e deseja-se que a máquina realize ensaios de fadiga por meio de movimento retilíneo, portanto, componentes intermediários devem ser acrescentados entre o motor e o corpo de prova. A seguir são detalhados os componentes necessários para que o sistema dinâmico funcione corretamente.

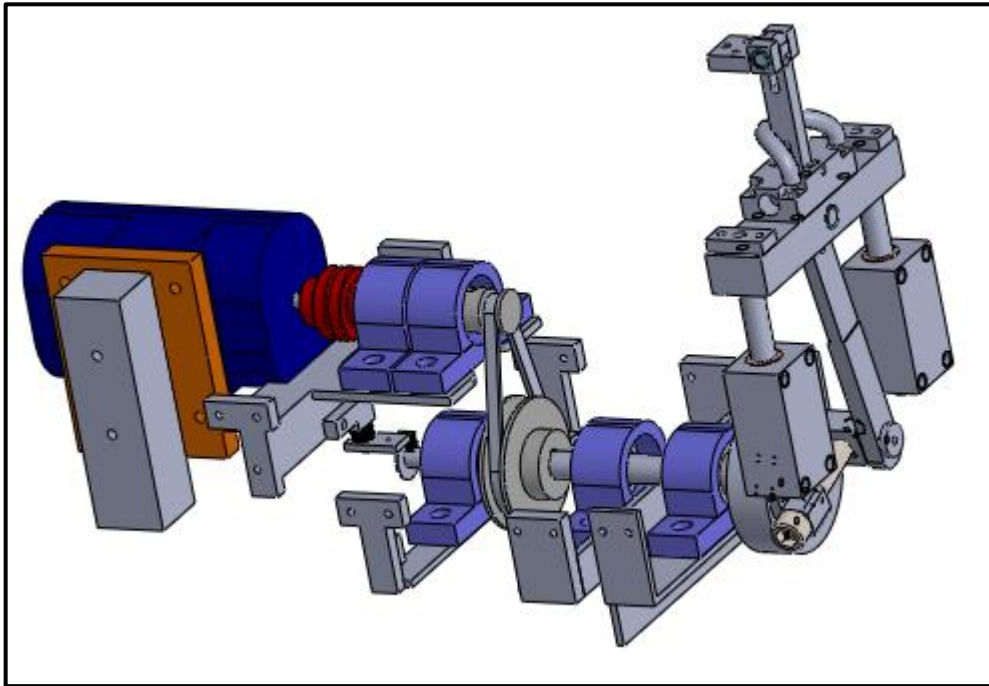


FIGURA 3.7 - Subconjunto dinâmico com as peças estruturais de fixação e os sensores responsáveis pelo controle do ensaio

FONTE - Autor

### 3.2.2.1 Motor e inversor de frequência

O motor elétrico (FIG 3.8) utilizado na máquina para ensaio de fadiga por flexão é da marca Voges (trifásico, rotação de 3370 rpm e potência de 367 W). Este motor foi escolhido por ser considerado de alta eficiência, baixo custo e robusto. A TAB. 3.2 mostra os dados técnicos do motor elétrico utilizado.

TABELA 3.2

Dados técnicos do motor utilizado na máquina

<b>Informação</b>	<b>Descrição</b>
Fabricante	Voges
Modelo	B 63 B2
Número de Série	280711
Potência	370 W
Torque máximo	0,3 kgfm
Frequência	60 Hz
Rotação máxima	3370 rpm

FONTE - Autor



FIGURA 3.8 - Motor trifásico utilizado na máquina para ensaio de fadiga

FONTE - Autor

O controle de velocidade durante o teste é influenciado diretamente pela rotação do motor, sendo assim, a utilização de um inversor de frequência torna-se necessária para controlar a rotação e, conseqüentemente, a velocidade do teste de fadiga (FIG 3.9). O inversor de frequência também possibilita que o sentido do giro do motor varie, mas esta alternativa não será utilizada na máquina de fadiga por não influenciar nos ensaios.



FIGURA 3.9 - Inversor de frequência utilizado na máquina para ensaio de fadiga

FONTE - Autor

### 3.2.2.2 Redução

A tensão aplicada durante a realização dos ensaios depende diretamente da amplitude da flecha e das características do corpo de prova. O motor elétrico fornece um torque máximo de 0,3 kgfm (TAB. 3.2). Assim, a força que o motor disponibiliza em conjunto com os componentes da máquina para o ensaio no ponto mais afastado do volante é de 70,8 N, visto que o raio do volante é de 41,5 mm (EQ 3.1).

$$\text{Torque} = F \times r \quad (3.1)$$

$$F = \frac{2,94 \text{ Nm}}{0,0415 \text{ m}}$$

$$F = 70,8 \text{ N}$$

Uma redução de 3:1 foi utilizada para aumentar o torque disponibilizado pelo motor de 0,3 kgfm para 0,9 kgfm (ignorando perdas). O aumento do torque também aumenta a força disponibilizada para os ensaios, o que possibilita a realização de ensaios que necessitem de maior tensão, entretanto, a redução também submete o sistema a uma diminuição da velocidade máxima disponibilizada pelo motor de 3370 rpm para aproximadamente 1123 rpm. Como existe a possibilidade de variação da posição do pino no volante para variar o excêntrico, a força disponibilizada também é alterada conforme relação mostrada na EQ 3.1.

A redução foi obtida por meio da utilização de duas polias em V, uma ligada ao eixo motor (polia motora) e outra ligada ao eixo secundário (polia movida) e uma correia. A polia motora possui 30 mm de diâmetro e transmite rotação e torque do motor para a polia movida por meio da correia. A polia movida possui 90 mm de diâmetro e está ligada ao eixo secundário, que possui em uma das suas extremidades o conjunto responsável por transformar o movimento circular em movimento retilíneo.

A FIG 3.10 apresenta imagens das duas polias utilizadas na máquina de fadiga. A polia de 90 mm foi encontrada comercialmente, mas a polia de 30 mm foi fabricada no Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG. As duas polias são de alumínio, o que lhes garante baixo peso e a resistência necessária à operação.

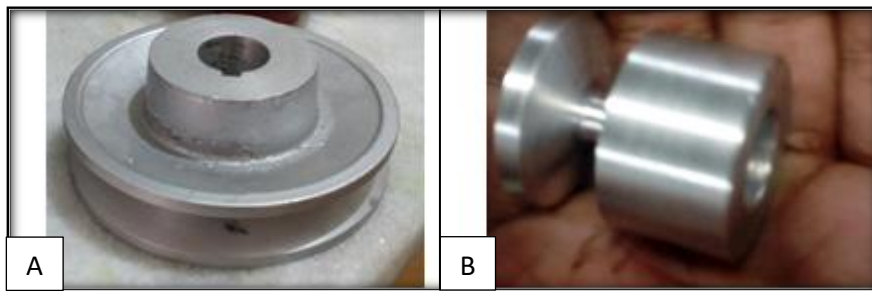


FIGURA 3.10 - Polias utilizadas para a redução: (A) polia movida de 90 mm encontrada comercialmente; (B) polia motora de 30 mm

FONTE - Autor

### 3.2.2.3 Conjunto biela-base móvel

O movimento circular fornecido pelo motor elétrico deve ser transformado em movimento retilíneo para que o ensaio de fadiga por flexão seja possível. O conjunto biela - base móvel (FIG 3.11) possibilita essa conversão. O conjunto também possibilita a variação da amplitude da flecha, como será discutido no subtópico seguinte.

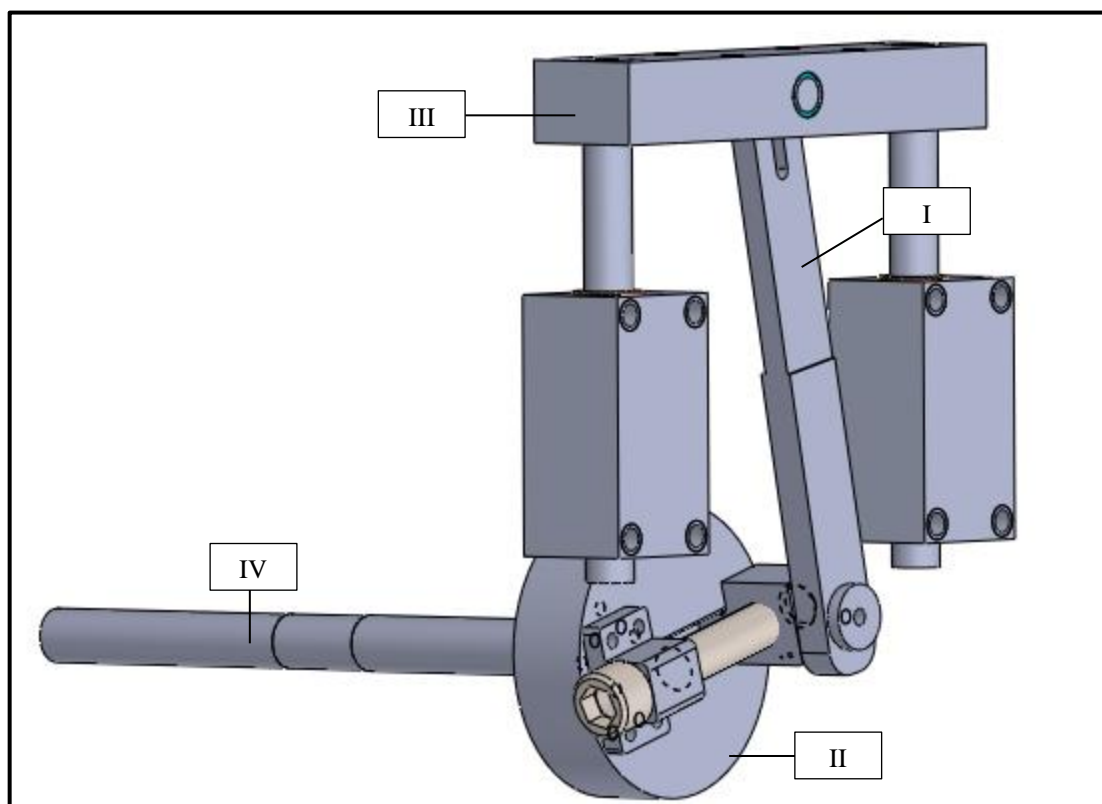


FIGURA 3.11 - Representação do mecanismo para transformar o movimento circular em movimento vertical da máquina para ensaio de fadiga

FONTE - Autor

O conjunto biela-base móvel assemelha-se aos mecanismos biela-manivela encontrados em diferentes máquinas que necessitam realizar a transformação de movimento circular para retilíneo ou vice-versa. No mecanismo representado na FIG 3.11, a biela (I) é conectada em suas extremidades ao volante (II) e à base móvel (III) por pinos. O movimento circular do eixo secundário (IV) é transmitido para a biela, que realiza a transformação para movimento retilíneo na base móvel. O movimento retilíneo resultante é possibilitado pelo auxílio de eixos guias, mancais e buchas que direcionam e mantêm e perfeito alinhamento no movimento base móvel.

A máquina de fadiga por flexão deve permitir que a amplitude da flecha responsável pela deformação do corpo de prova seja variável de modo que o ensaio ocorra com um valor de flecha determinado previamente pelo usuário da máquina. A variação da flecha é possível por meio da variação da posição do pino utilizado para conectar a biela ao volante, de modo que o pino possa ser fixado livremente em relação a um excêntrico. A FIG 3.12 mostra como a variação da posição do pino no excêntrico modifica a amplitude da flecha do ensaio.

As principais peças utilizadas para a variação do excêntrico são: base móvel, biela, pino, volante e eixo, vide FIG 3.12 (A). Quando o pino que liga a biela ao volante está na posição central, o giro do bloco não realiza movimento vertical da base móvel, desta maneira a amplitude da flecha é nula, FIG 3.12 (B). A movimentação do pino sobre o volante em direção à sua extremidade possibilita que, com o giro do eixo e do volante, a base móvel realize o movimento vertical, FIG 3.12 (C) e FIG 3.12 (D). A amplitude do movimento dependerá da localização do pino sobre o volante, de modo que quanto mais próximo à extremidade do bloco, maior será a amplitude da flecha. As FIG 3.12 (C) e FIG 3.12 (D) também apresentam uma relação direta entre a distância do pino até o centro do volante com a amplitude da flecha de maneira que o valor da amplitude seja o dobro da distância do pino até o centro do volante, ou seja, pode-se determinar a amplitude de ensaio sabendo a localização do pino sobre o volante. Essa representação da variação da amplitude da flecha com a distância do pino até o centro do volante está indicada por um valor  $x$  aleatório e pela posição do pino na extremidade do volante nas FIG 3.12 (C) e FIG 3.12 (D), respectivamente.

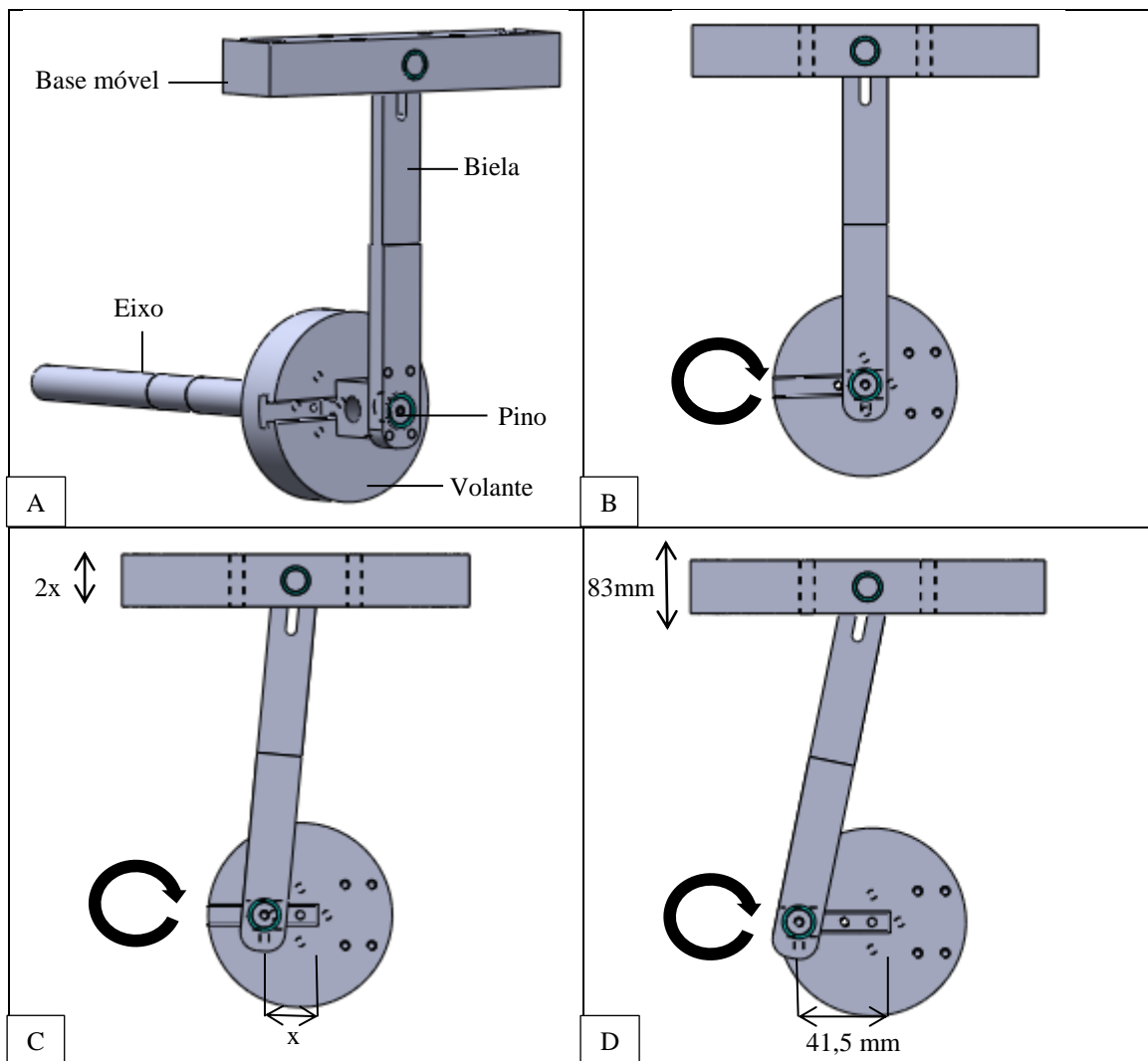


FIGURA 3.12 - Variação da amplitude da flecha: (A) representação das peças; (B) pino sobre o centro do volante (valor de flecha nulo); (C) pino localizado à distância  $x$  do centro (igual a  $2x$ ); (D) pino localizado à extremidade do volante a uma distância de 41,5 mm do centro (flecha igual a 83 mm)

FONTE - Autor

O volante possui diâmetro de 103 mm, de forma que o centro do pino pode se movimentar da posição central (0 mm) até 41,5 mm do centro do volante por causa da geometria do conjunto (FIG 3.13). Desta maneira, a amplitude da flecha possível para a máquina de ensaio de fadiga por flexão pode variar entre 0 e 83 mm.



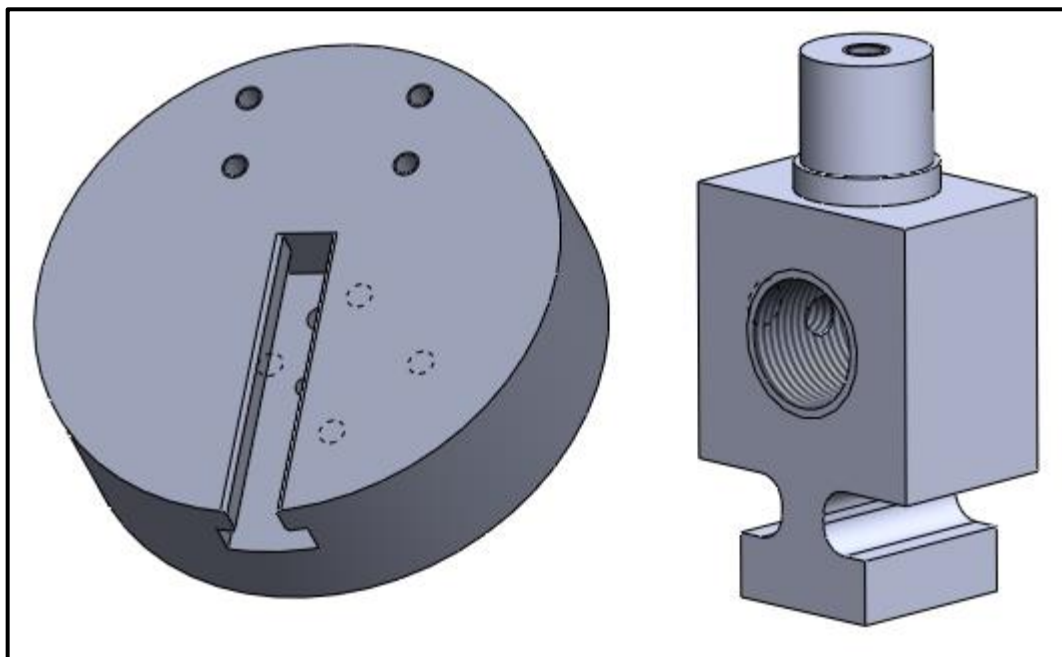


FIGURA 3.13 - Representação (fora de escala) do volante com rasgo (esquerda) e do pino adaptado (direita) para possibilitar a variação da amplitude da flecha

FONTE - Autor

A variação da amplitude descrita anteriormente só é possível com a inclusão de outros acessórios ao mecanismo. Para ser possível a movimentação do pino sobre o volante, foi necessário usinar um canal no volante e o pino teve sua base adaptada para possibilitar a movimentação (FIG 3.13). Um parafuso com cabeça sextavada foi utilizado para realizar a movimentação e travamento do pino; para isso, o parafuso foi fixado ao volante não permitindo seu movimento no sentido horizontal ou vertical em relação ao volante, apenas o movimento rotacional. A base do pino foi rosqueada de modo que quando o parafuso é girado no sentido horário, o pino se desloca para o centro do volante e, quando o parafuso é girado no sentido anti-horário, o pino se desloca para a extremidade do bloco. A realização do movimento rotacional do bloco, o deslocamento em apenas um sentido da base móvel e a transição do movimento circular para movimento retilíneo possibilitado pela biela somente são possíveis com a utilização de mancais, buchas, eixos guias, rolamentos e pinos que serão descritos posteriormente.

O eixo secundário ligado ao volante é acionado pela polia com 90 mm de diâmetro. Cada movimento alternativo da base móvel representa um ciclo no ensaio de fadiga e, como a base móvel está ligada ao volante pela biela, cada rotação completa do volante significa um ciclo completo da base móvel. Deste modo, pode-se concluir que a

quantidade de ciclos realizados por minuto no ensaio de fadiga é aproximadamente três vezes menor que o valor da rotação na saída do motor.

A flecha disponibilizada pelo mecanismo descrito deve ser transferida para o corpo de prova para a realização do ensaio. Três peças mecânicas com alguns acessórios foram utilizadas para realizar essa operação (FIG 3.14): uma haste (I), a base da haste (II) e o fixador móvel (III). A base da haste, que é fixada por quatro parafusos na parte superior da base móvel, possui seu interior vazado para que um pino seja inserido entre a peça e uma das extremidades da haste, que também são vazadas. A outra extremidade da haste é conectada por outro pino ao fixador móvel. O fixador móvel possibilita a fixação de uma extremidade do corpo de prova com o auxílio de três parafusos. Desta maneira, o movimento vertical da base móvel é transferido para a extremidade do corpo de prova parafusado nele. Outros componentes são utilizados para permitir a correta movimentação das peças e fixação das mesmas, como rolamentos e duas peças auxiliares (IV) utilizadas para fixar os eixos guias (V) à base móvel.

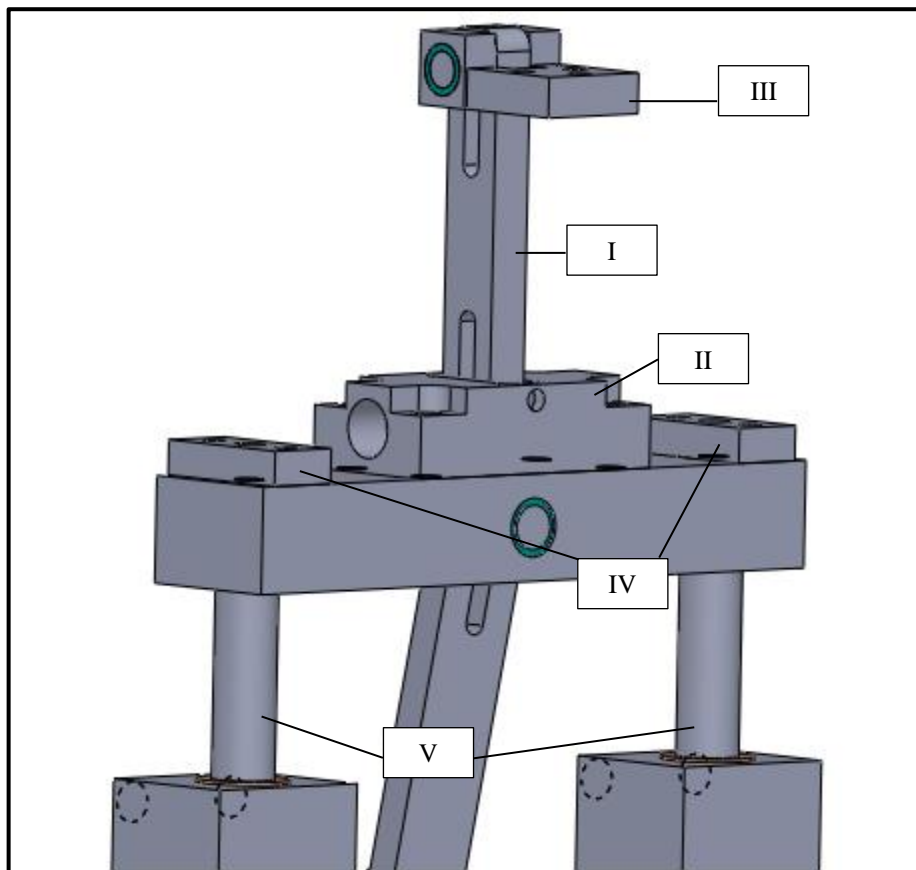


FIGURA 3.14 - Mecanismo responsável por transmitir a flecha para o corpo de prova

FONTE - Autor

Como dito, o torque final disponibilizado para a realização dos ensaios é de aproximadamente 0,9 kgfm. A realização dos ensaios de fadiga leva em consideração tensões a qual o corpo de prova está submetido, deste modo, a tensão deve ser calculada antes de cada ensaio para assegurar que o torque disponibilizado seja suficiente para a realização do ensaio. A tensão de cada ensaio varia em função da amplitude da flecha escolhida e da geometria e material selecionado para o corpo de prova. A metodologia para encontrar seu valor é apresentada no Anexo C.

#### 3.2.2.4 Outros elementos dinâmicos

Para transmitir o torque do motor para o sistema dinâmico, foi utilizado um acoplamento flexível. Este tipo de acoplamento foi selecionado por atender aos requisitos da máquina, absorvendo as vibrações do sistema e permitindo certo nível de desalinhamento entre o eixo e o motor.

A seleção do acoplamento foi realizada a partir dos dados do motor, considerando fatores técnicos como potência e rotação máxima e outros aspectos como a necessidade de transmitir potência de modo suave para minimizar vibrações. Assim, o modelo de acoplamento escolhido foi o elástico. Este tipo de acoplamento é apropriado para transmitir rotação, torque, amortecer choques e minimizam vibrações e ruídos, além de ser capaz de neutralizar desalinhamentos, como esquematizado na FIG 3.15.

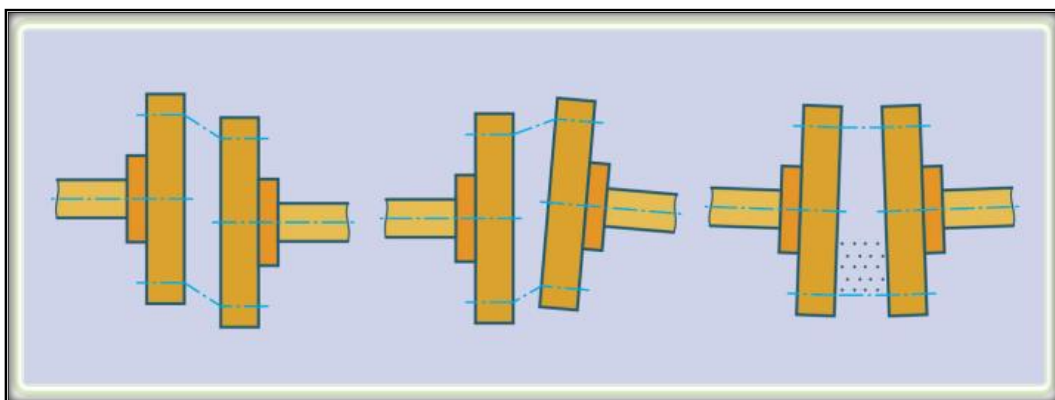


FIGURA 3.15 - Neutralização de desalinhamentos entre árvores por meio de acoplamento elástico  
FONTE - FRANCESCHI et al., 2014

O uso de mancais de deslizamento e de rolamento foi necessário em diferentes pontos da máquina. Os mancais utilizados são encontrados comercialmente e os eixos e pinos

foram fabricados com dimensões que atendem tanto aos esforços solicitados quanto às dimensões encontradas comercialmente dos mancais. A localização e os tipos de mancais utilizados na máquina de fadiga estão presentes nos detalhamentos apresentados nos Anexos D1 ao D22.

Apenas dois mancais utilizados como guias para a parte móvel não são encontrados comercialmente e foram fabricados exclusivamente para esta aplicação. Em cada mancal foi introduzido uma bucha de bronze com um orifício para possibilitar a movimentação vertical dos eixos guias, garantindo o alinhamento da parte móvel da máquina durante o ensaio. A FIG 3.16 mostra a necessidade da utilização dos mancais com suas respectivas buchas de bronze para garantir que o movimento alternado realizado em cada ciclo não ocorra com variação da posição horizontal.

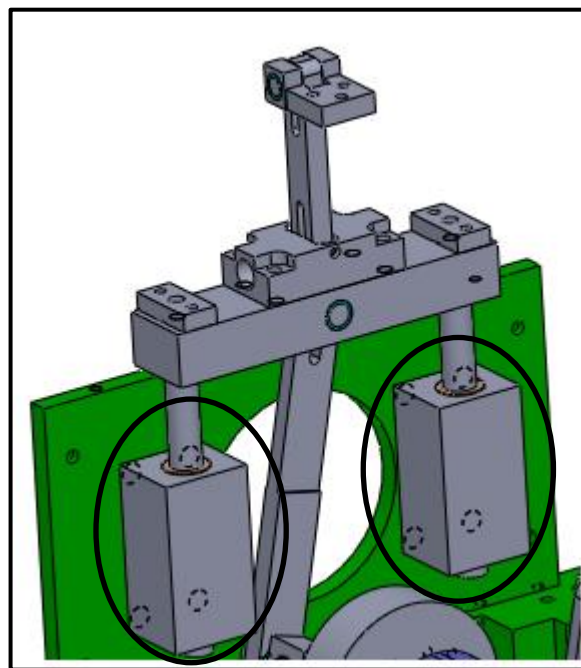


FIGURA 3.16 - Representação dos mancais e buchas fabricados

FONTE - Autor

Devido à necessidade de uma redução para aumento do torque aplicado ao corpo de prova, foi necessária a utilização de dois eixos, um movido pelo motor (eixo motor) e outro movido pela polia conectada ao eixo motor (eixo movido). A geometria dos eixos foi dimensionada (Anexo B) para suportar os esforços durante o ensaio de fadiga e para atender às dimensões dos mancais e rolamentos encontrados comercialmente. O material selecionado para os dois eixos foi o aço ABNT 1045, por ser um material

comercial e possuir boas propriedades mecânicas para esta aplicação. Os eixos utilizados são apresentados em detalhamento bidimensional nos Anexos D1 ao D22.

Algumas peças mecânicas necessitam de liberdade para realização de movimentos oscilatórios. Estas peças são fixadas através de pinos ligados aos mancais. Os pinos de aço ABNT 1045 possuem geometria para suportar os esforços solicitados e para atender aos tipos de mancais encontrados comercialmente.

### 3.2.3 Controle da máquina de fadiga e coleta de dados

A parte mecânica é fundamental para que o teste seja executado, entretanto, também é necessária a inclusão de elementos eletrônicos para que se possa realizar a coleta e armazenamento dos resultados de cada ensaio. Para isso, um sistema eletrônico foi utilizado para contabilizar o número de ciclos ao qual o corpo de prova é submetido até a sua ruptura.

Para automatizar a contagem do número de ciclos é necessário que um sensor seja utilizado e, além disso, que o contador encerre a contagem quando o corpo de prova romper, por meio de um elemento conhecido como fim de curso. Outros acessórios também serão necessários, como *display* LCD e um dispositivo para coleta e armazenamento de dados do ensaio. Todos os sensores e dispositivos eletrônicos são comandados por uma plataforma *Arduino* (FIG 3.17).

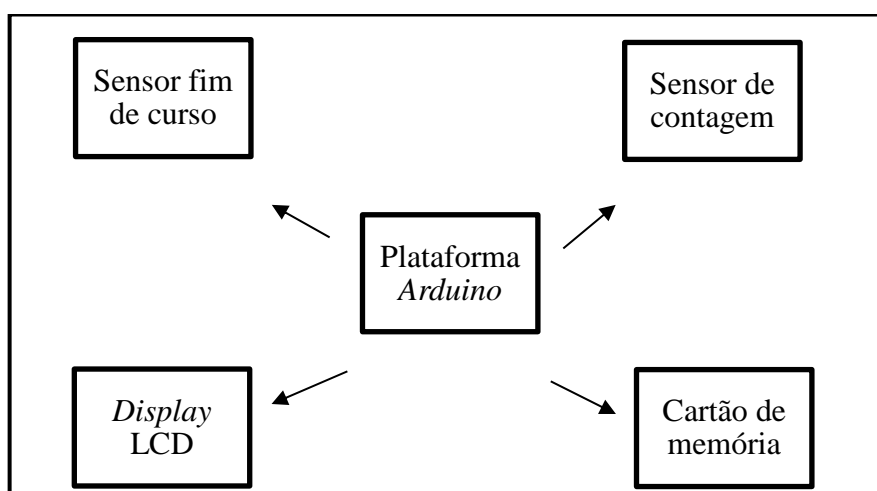


FIGURA 3.17 - Esquema dos dispositivos eletrônicos utilizados na máquina de fadiga

FONTE - Autor

O ensaio de fadiga verifica quantos ciclos são necessários para que um material frature por fadiga sob determinada tensão e para a realização da contagem foi utilizado um sensor associado a um *encoder* (FIG 3.18). O sensor utilizado foi o Fairchild H22A, utilizado para medir rotação de motores, contagem de pulsos e como controlador de posicionamento. Na presente aplicação, a função do sensor é contabilizar o número de rotações do eixo secundário e, conseqüentemente, a quantidade de ciclos de flexão de cada ensaio. O sensor possibilita a leitura do número de ciclos através de dois componentes ligados à estrutura do sensor, sendo que um lado do sensor possui emissores infravermelhos e do outro lado existe fototransistores que detectam a radiação infravermelha. O *encoder* é um disco com um rasgo localizado entre o emissor e o receptor da radiação infravermelha, sendo assim, os fototransistores só detectam a radiação quando o rasgo do *encoder* encontra-se alinhados com o feixe e quando isso ocorre, o sensor contabiliza uma volta (ciclo).

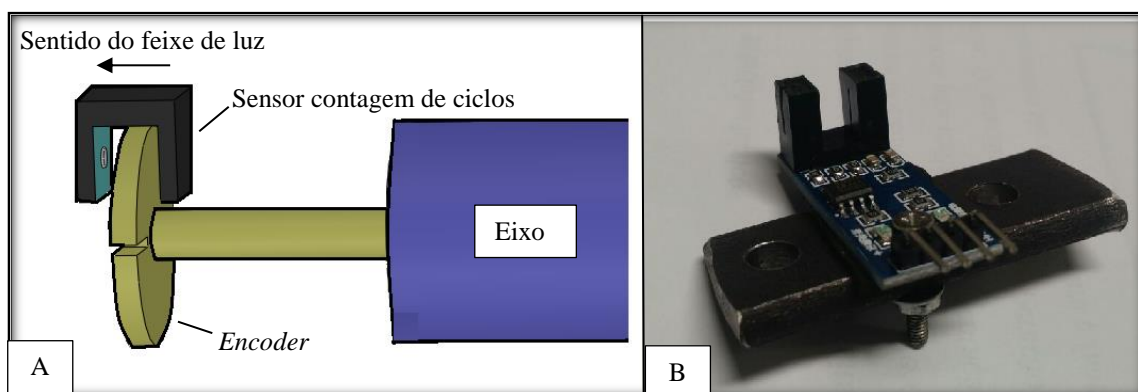


FIGURA 3.18 - Mecanismo para contagem de ciclos: (A) representação do mecanismo; (B) sensor de contagem de ciclos e base para apoio utilizados

FONTE - Autor

Para realizar a contabilização, o *encoder* foi fixado no eixo movido. O sensor foi preso à cantoneira, inicialmente projetada para fixar os mancais do eixo motor, e foi posicionado de modo que o *encoder* fique entre os sensores. Deste modo, quando o eixo movido estiver em movimento o *encoder* também estará e será contabilizado um ciclo cada vez que o rasgo do *encoder* estiver alinhado com os sensores.

A contabilização do número de ciclos durante o teste é realizada com o mecanismo explicado anteriormente. Como o número de ciclos está diretamente relacionado com o funcionamento operacional da máquina, é necessário que esta encerre suas atividades

logo após a ruptura do corpo de prova, finalizando a contagem de ciclos. Para isso, um sensor de fim de curso foi utilizado (FIG 3.19).

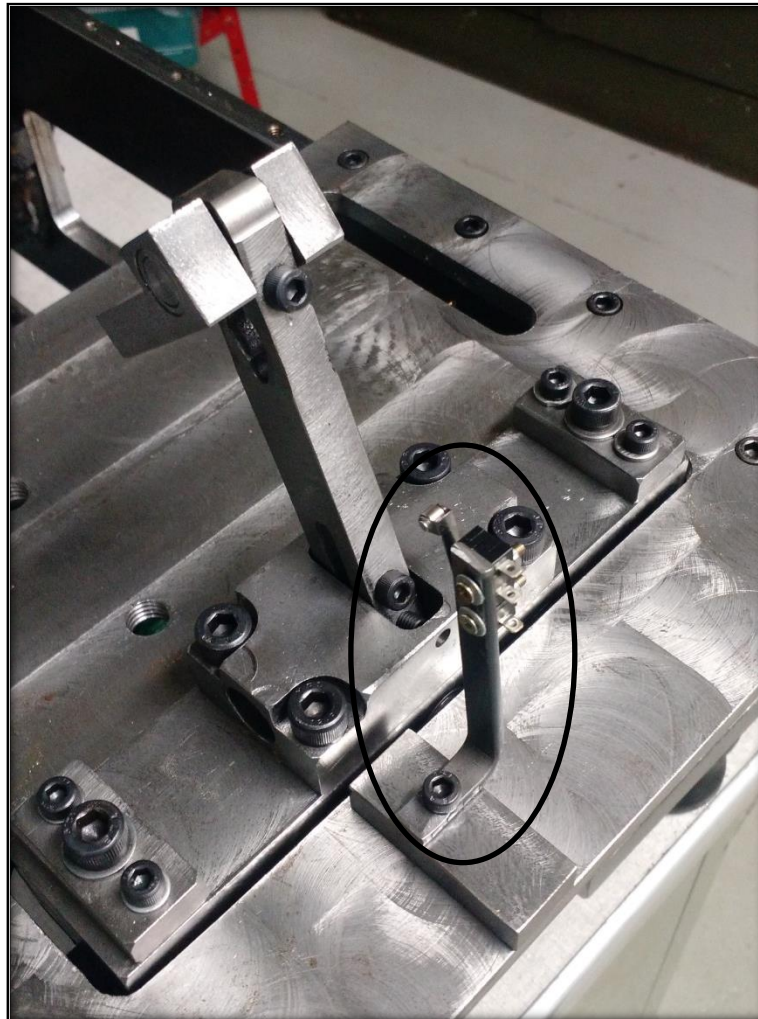


FIGURA 3.19 - Sensor fim de curso

FONTE - Autor

O sensor fim de curso foi posicionado em local estratégico para que o ensaio seja interrompido quando o corpo de prova fraturar. Quando ocorre a fratura, uma mola movimenta a haste móvel de encontro ao sensor, acionando-o e encerrando o ensaio. O sensor de fim de curso quando acionado envia um comando para a plataforma *Arduino* que finaliza a operação e encerra a contagem de ciclos.

A leitura das informações e aplicação de comandos para início e interrupção do funcionamento da máquina de fadiga é possível por meio da utilização de uma plataforma *Arduino UNO*. A programação utiliza linguagem C++ e é apresentada no



Anexo A. A programação foi elaborada de modo que antes de iniciar o funcionamento da máquina seja necessário colocar o número de ciclos de operação desejados, que pode variar de 0 a infinito, e somente após esta definição o motor pode ser acionado. Um *display* LCD com teclas foi utilizado para permitir que os dados de entrada sejam inseridos e que o número de ciclos seja apresentado em tempo real (FIG 3.20).



FIGURA 3.20 - *Display* LCD pronto para receber o números de ciclos desejados na operação

FONTE - Autor

Um cartão de memória SanDisk micro SD (FIG 3.21) foi utilizado para registrar os dados de cada ensaio, garantindo que estes não se percam mesmo na ocorrência de falha ou pane elétrica. Cada ensaio é registrado no cartão de memória e os dados são apresentados em um relatório individual que fornece o horário em que o ensaio foi iniciado, a duração, os dados de entrada utilizados (números de ciclos selecionados) e se a finalização do ensaio ocorreu devido ao acionamento do sensor fim de curso ou se o ensaio foi finalizado quando o número desejado de ciclos foi atingido.

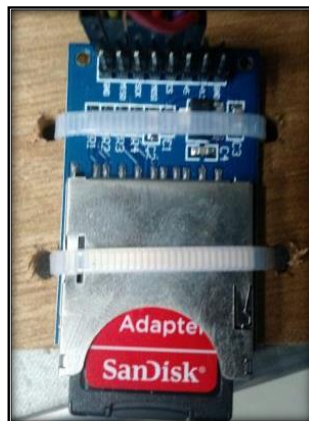


FIGURA 3.21 - Cartão de memória inserido no circuito eletrônico da máquina de fadiga

FONTE - Autor



### 3.2.4 Realização dos ensaios de fadiga

A programação elaborada para a máquina impõe alguns passos que o operador deve seguir para que a máquina seja acionada e realize o ensaio corretamente. Antes de ligar a máquina, o corpo de prova já deve estar devidamente aparafusado ao conjunto fixador e ao fixador móvel. Os passos a seguir devem ser seguidos para que o ensaio seja realizado:

- a) Selecionar o número de ciclos desejados para o ensaio no *display* (selecionar infinito para ensaios que objetivam alcançar a ruptura ou a vida infinita do corpo de prova).
- b) Pressionar a tecla “*select*” no *display* para permitir que o motor seja acionado.
- c) Selecionar a rotação desejada no inversor de frequência e pressionar a tecla verde no inversor. Após esse momento o motor é acionado e o ensaio é iniciado.

Uma vez iniciado o ensaio, sua finalização ocorre quando o sensor fim de curso for acionado na ruptura do material ou quando o número de ciclos inseridos inicialmente for atingido. Os dados do ensaio são registrados no cartão de memória garantindo o seu arquivamento, sendo composto pelo número de ciclos realizados, rotação média do eixo movido, horário de início e término e o modo de finalização do ensaio (ruptura do corpo de prova ou número de ciclos inserido atingido). A FIG 3.22 apresenta a sequência utilizada na realização de cada ensaio.

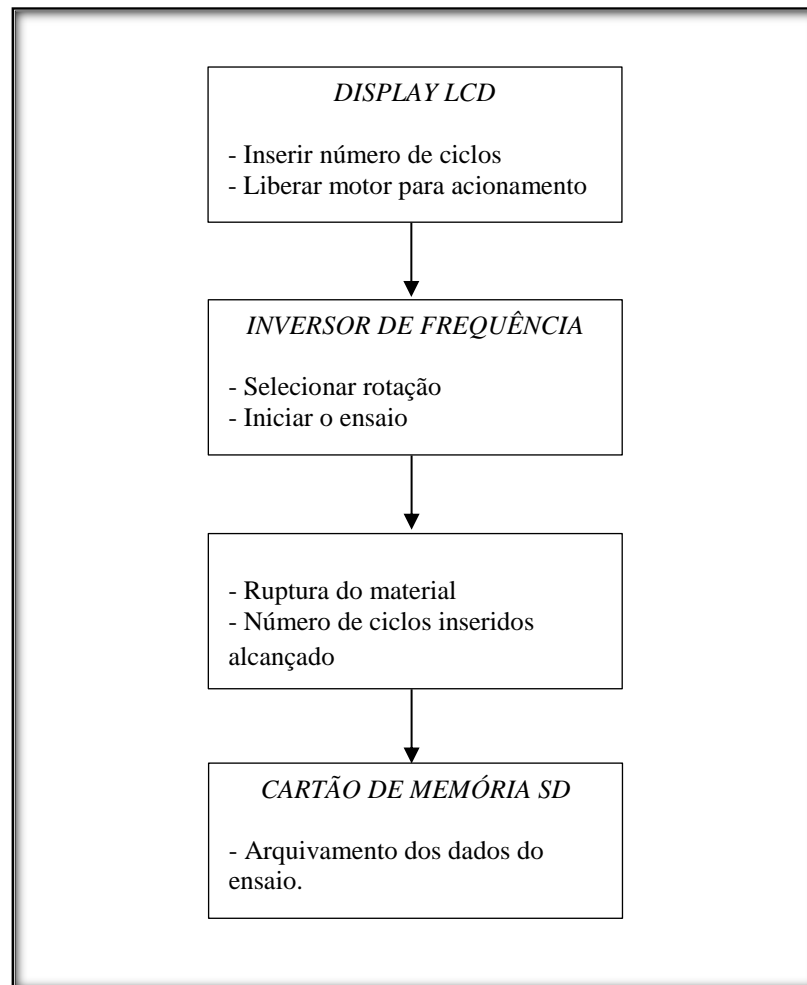


FIGURA 3.22 - Metodologia para realização e obtenção de dados dos ensaios de fadiga

FONTE - Autor

### 3.3 Dimensionamento da máquina de fadiga

Após o levantamento dimensional e definidos os subconjuntos necessários para que a máquina de fadiga consiga realizar os ensaios, realizou-se o dimensionamento das peças dos subconjuntos citados anteriormente com o objetivo de fazer a montagem digital e verificar a ocorrência de erros de interferência ou de funcionamento. O modelamento foi realizado no *software SolidWorks*. As peças foram modeladas individualmente e montadas de maneira a formar os subconjuntos citados anteriormente. Os subconjuntos foram conectados entre si formando a máquina completa. A FIG 3.23 apresenta o modelamento completo da máquina com todos os subconjuntos (estrutural, dinâmico e de controle e coleta dos dados).

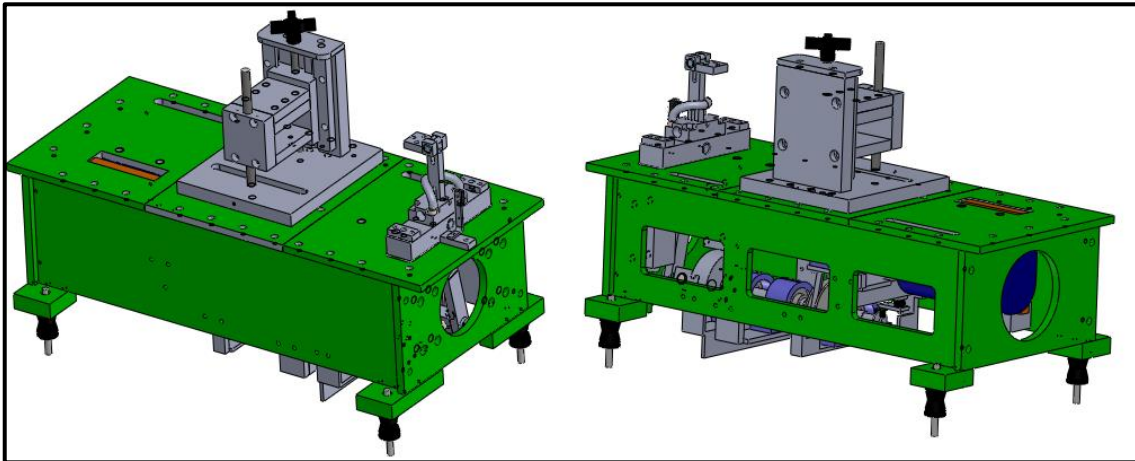


FIGURA 3.23 - Modelamento completo da máquina em dois ângulos diferentes

FONTE - Autor

O *software Solidworks*, além de permitir o modelamento das peças e conjuntos em três dimensões, possui recursos para transpor a modelagem em três dimensões para duas dimensões com as devidas cotas, vistas e lista de materiais necessários para a fabricação e aquisição das peças. Esse recurso foi utilizado para detalhar a máquina e o detalhamento encontra-se nos Anexos D1 ao D22.

O dimensionamento da máquina manteve as características da máquina de fadiga utilizada como modelo. O eixo foi dimensionado considerando os esforços mecânicos do ensaio de fadiga e encontra-se no Anexo C. Mancais e acoplamentos foram selecionados em catálogos comerciais tendo referência o tamanho mínimo do eixo, a rotação máxima (3370 rpm) e a carga máxima admissível.

### 3.4 Materiais

Diferentes materiais foram utilizados na construção da máquina. Tais materiais devem resistir aos esforços provocados pelos ensaios de fadiga e acomodar os acessórios necessários para a realização dos testes. Além de garantir rigidez durante o ensaio, os materiais foram selecionados levando em consideração sua disponibilidade comercial, usinabilidade e custo.

A maioria das peças da máquina é constituída dos aços baixo carbono ABNT 1020 e médio carbono ABNT 1045, sendo o primeiro destinado à parte estrutural da máquina e

o segundo à parte dinâmica da máquina, como eixos e pinos. Esses aços foram adquiridos na forma de barras chatas, placas retangulares ou barras cilíndricas. As dimensões de aquisição foram maiores que as dimensões finais de cada peça, pois as peças necessitam de passar por posterior fabricação e acabamento, como será citado no tópico referente à fabricação e montagem da máquina.

Os eixos e pinos utilizados foram projetados para suportar os esforços dos ensaios e também para que acessórios ligados a eles pudessem ser encontrados comercialmente, evitando assim a fabricação de alguns mancais.

Além dos aços ABNT 1020 e 1045, outros materiais foram utilizados na máquina e estes foram citados em cada subconjunto da máquina citado anteriormente. Cantoneiras de aço foram utilizadas como apoios aos mancais que sustentam a parte dinâmica da máquina. Para absorver e/ou minimizar vibrações, entre o motor e a estrutura metálica responsável por sua fixação, foi inserido um bloco de material polimérico e nos pés da mesa foram inseridos coxins de borracha que isolam a máquina da mesa. Todos os materiais são citados na lista de materiais presente no detalhamento em duas dimensões da máquina nos Anexos D1 ao D22.

### **3.5 Fabricação e montagem mecânica**

A fabricação das peças foi realizada no Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG. O equipamento mais utilizado para a fabricação das peças da máquina de fadiga foi o centro de usinagem Romi Discovery 560. O centro de usinagem permite que a realização de diversas operações de usinagem, sendo as mais utilizadas o fresamento e furação. O equipamento possibilita a fabricação de peças garantindo a correta geometria das peças usinadas graças ao seu comando numérico computadorizado.

Após o fresamento nas dimensões externas, as peças acabadas (que não necessitam de mais nenhum tipo de usinagem) foram separadas para montagem e as peças que ainda necessitavam de usinagem poderiam seguir dois caminhos: serem usinadas no próprio centro de usinagem ou serem usinadas em outra máquina ferramenta. Apesar do centro de usinagem possibilitar a usinagem completa de muitas peças mecânicas, foi frequente a retirada das peças já fresadas até suas dimensões externas para que sua fabricação seja

finalizada em outra máquina. Deste modo, o centro de usinagem ficaria disponível para trabalhar outra peça, reduzindo o tempo de fabricação final das peças.

As peças cilíndricas da máquina de fadiga como os eixos, buchas e pinos foram usinadas no torno convencional. Além do torneamento, o equipamento também possibilita que sejam realizadas outras operações, como a furação e o rosqueamento concêntricos.

Outros equipamentos utilizados foram furadeira, prensa mecânica, esmeril e algumas ferramentas para abertura de roscas, acabamento, corte e solda. Estes equipamentos e ferramentas foram utilizados para a fabricação e montagem dos subconjuntos que formam a máquina.

Depois de fabricadas individualmente, cada peça deve ser fixada às demais, formando os subconjuntos e a máquina completa. As montagens das peças ocorreram de diferentes maneiras dependendo da necessidade de permitir uma possível desmontagem futura, a facilidade na montagem e o custo da montagem, desde que não comprometessem a rigidez da máquina. A união de peças ocorreu predominantemente por meio de parafusos de diferentes geometrias, o que possibilita que a desmontagem seja feita de maneira rápida e simples.

Algumas outras montagens ocorreram com outros recursos diferentes do aparafusamento. As buchas de bronze inseridas dentro dos mancais utilizados para guiar verticalmente o subconjunto dinâmico foram montadas com interferência. Esse recurso foi utilizado para garantir que a bucha esteja completamente presa ao mancal, evitando desbalanceamento da parte móvel durante os ensaios. A FIG 3.24 apresenta a bucha montada no mancal através da prensagem.

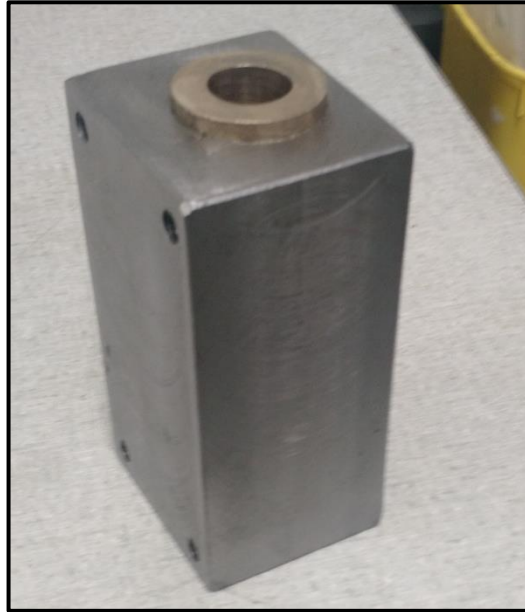


FIGURA 3.24 - Bucha de bronze prensada no interior do mancal

FONTE - Autor

A cantoneira utilizada para apoiar os mancais que sustentam o eixo motor apresenta duas peças fixadas em seu corpo por cordões de solda. A soldagem foi utilizada nesse conjunto para facilitar a construção, uma vez que a fabricação de uma peça na geometria final desejada seria muito complexa. A operação de soldagem foi evitada ao máximo para que a máquina possa ser desmontada, facilitando sua manutenção e movimentação.

### 3.5 Limitações mecânicas

A máquina em questão foi projetada para atender às necessidades de ensaios de fadiga por flexão, sendo este o único tipo de ensaio possível de se realizar. Os corpos de prova podem ser de diferentes materiais conforme necessidade, entretanto, a geometria do corpo de prova deve possuir suas extremidades planas com furos para permitir a sua fixação à máquina.

As cargas aplicadas no ensaio possuem frequência constante, entretanto as cargas de tração e compressão podem apresentar magnitudes iguais ( $\sigma_m = 0$ ) ou diferentes ( $\sigma_m \neq 0$ ). A variação ou não da magnitude depende da fixação do corpo de prova antes do início de cada ensaio, ou seja, tensões podem ser aplicadas ao material ensaiado utilizando o bloco fixador na extremidade fixa do corpo de prova.

O comprimento e espessura dos corpos de prova são limitados pelo dimensionamento e posicionamento dos elementos mecânicos responsáveis pela fixação deste corpo de prova. Deste modo, a máquina admite corpos de prova com comprimentos variando aproximadamente de 110 mm até 402 mm.

As características do corpo de prova e a amplitude da flecha não devem exigir esforços superiores ao que o motor consegue fornecer. Deste modo, apesar da redução utilizada, as tensões utilizadas nos ensaios não devem exigir um torque superior a 0,9 kgfm disponibilizado pelo motor em conjunto com o sistema de redução utilizado.

O motor elétrico possui rotação nominal de 3330 rpm, entretanto, a rotação pode ser variada de 100 até 3330 rpm através do inversor de frequência de frequência utilizado. A faixa de rotação recomendada segundo o manual do fabricante do motor é de 2800 rpm.

Como a máquina realiza movimentos rotativos e lineares, é extremamente importante estar atento à lubrificação de mancais, guias e eixos para que a máquina realize seu trabalho adequadamente e tenha maior durabilidade. Outros pontos da máquina devem ser verificados sempre: correia, rolamento do pino do volante, aperto dos parafusos, ruído e vibrações excessivos.

### **3.6 Estimativas de custos**

A fabricação e montagem da máquina para ensaio de fadiga por flexão plana, além de demandar tempo de estudo e do projeto, demanda custos financeiros. Na máquina em questão, existem os custos diretos que podem ser contabilizados e os custos indiretos que não podem ser contabilizados. Custos diretos podem ser exemplificados como as peças brutas de aço ABNT 1020 e 1045, acessórios para fixação, ferramentas adquiridas para fabricação e montagem, acessórios não fabricados no laboratório (rolamentos, acoplamento e alguns mancais), sensores, entre outros. Custos indiretos podem ser exemplificados como a energia elétrica utilizada, o desgaste e manutenção das máquinas e ferramentas utilizadas para a fabricação das peças, o aproveitamento de peças e

componentes já existentes, como o motor elétrico que foi doado pelo Laboratório de Usinagem e Automação.

Os valores dos custos diretos da máquina estão citados na tabela 3.3. Os custos foram divididos pelo valor da fabricação de cada um dos subconjuntos da máquina e o valor das ferramentas adquiridas para que a fabricação e a montagem fossem realizadas.

TABELA 3.3  
Estimativa de custos da máquina

Item	Descrição	Valor (R\$)
Estrutura	Peças de aço ABNT 1020 e 1045, cantoneiras, manípulo, barras roscadas.	1168,79
Dinâmica	Peças de aço ABNT 1020 e 1045, bronze, barra quadrada de alumínio, rolamentos, mancais, polia de 90 mm, correia, acoplamento.	724,00
Controle do ensaio	Sensores, <i>Arduino</i> , display LCD, cartão de memória.	129,28
Ferramentas	Fresas, jogos de macho, parafusos, porcas, arruelas, brocas, chaves <i>allen</i> .	428,90

FONTE - Autor

Com base na tabela 3.3, a estimativa do total dos custos diretos da máquina de fadiga é de R\$2.450,97. Os recursos diretos e indiretos foram financiados pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O motor elétrico e inversor de frequência têm valor considerável e foram doados ao laboratório, portanto, não foram incluídos na Tabela 3.3.



## 4 TESTES DE VALIDAÇÃO

Testes de validação da máquina para ensaio de fadiga por flexão foram realizados para confirmar se o equipamento foi projetado e construído corretamente. Para isso, foram usinados corpos de prova para serem ensaiados na máquina sob diferentes tensões e os resultados coletados foram inseridos em um gráfico de tensão *versus* número de ciclos. A máquina pronta para a realização dos testes é apresentada na FIG 4.1.

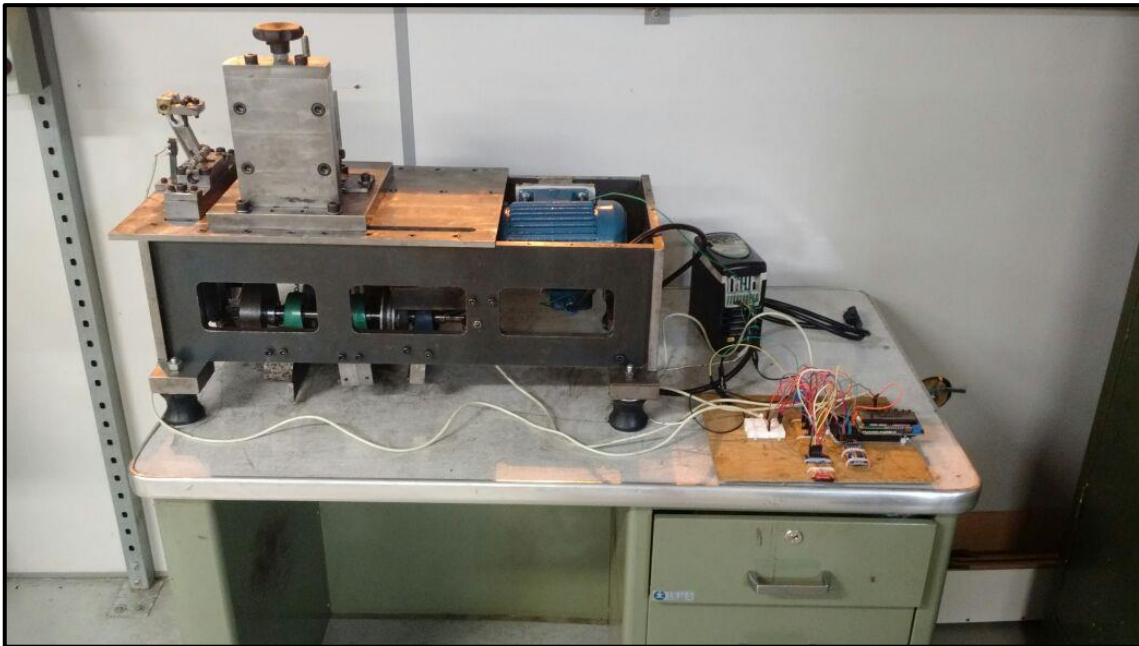


FIGURA 4.1 - Máquina para ensaio de fadiga por flexão

FONTE - Autor

A FIG 4.2 apresenta as dimensões dos corpos de prova utilizados nos testes. No total, oito amostras de aço baixo carbono ABNT 1020 foram usinadas e ensaiadas. O material foi adquirido no formato de barras chatas com 31,75 mm de largura, 6,35 mm de espessura e 500 mm de comprimento, geometria escolhida para facilitar a usinagem. Todos os corpos de prova passaram pelo mesmo processo de fabricação, mantendo-se constante os parâmetros de corte para evitar uma variação nas características superficiais dos corpos de prova.

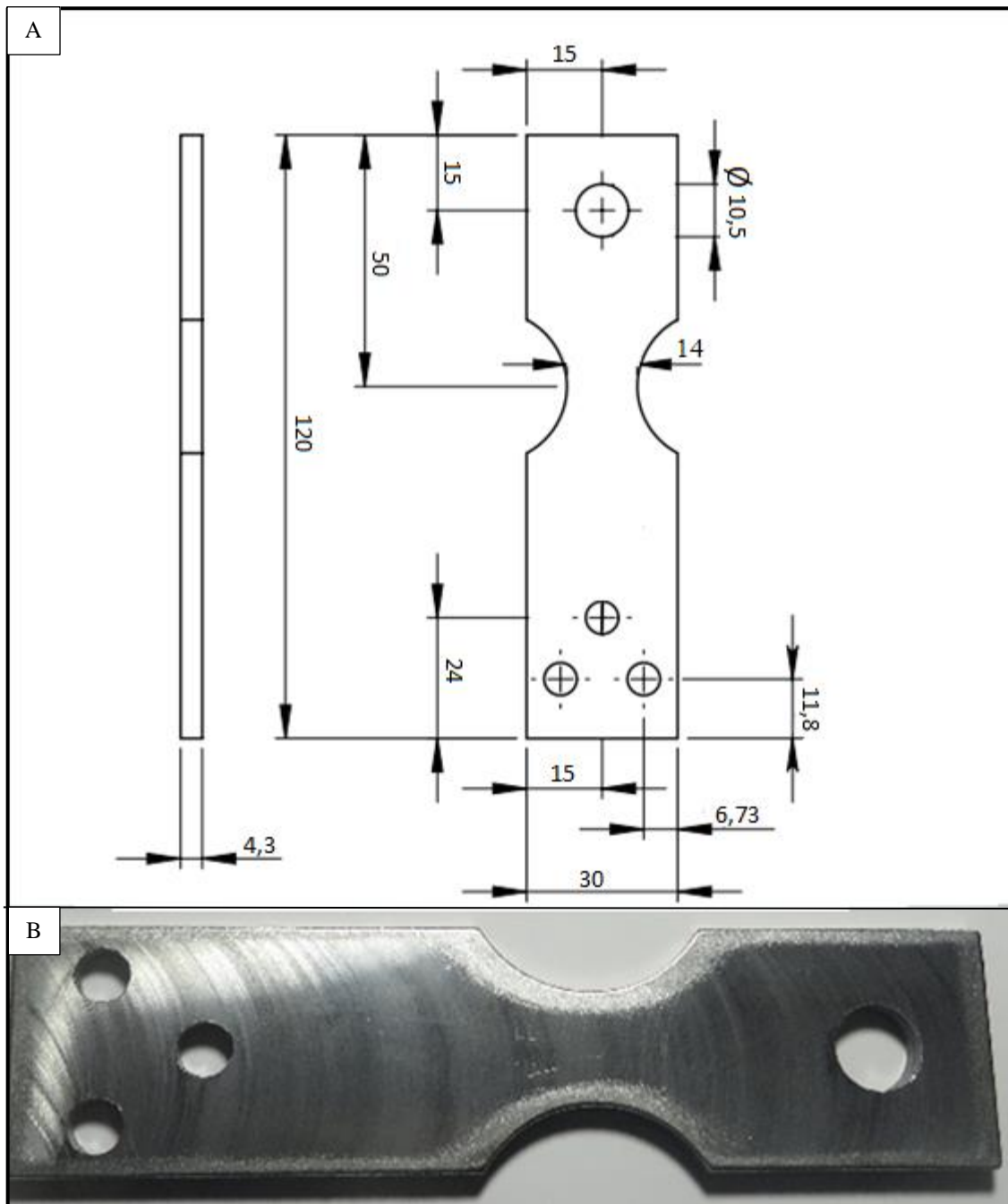


FIGURA 4.2 - Corpo de prova para a validação da máquina: (A) dimensionamento do corpo de prova;  
(B) imagem de um dos corpos de prova utilizados

FONTE - Autor

Antes de cada ensaio, os corpos de prova foram submetidos a uma avaliação de rugosidade. Os testes foram realizados no perfilômetro HOMMELWERKE T4000 do Laboratório de Recobrimentos Tribológicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. A FIG 4.3 apresenta a realização de um dos ensaios de medição de rugosidade, sendo destacado o contato entre o apalpador que varre a superfície do corpo de prova e o próprio corpo de prova.

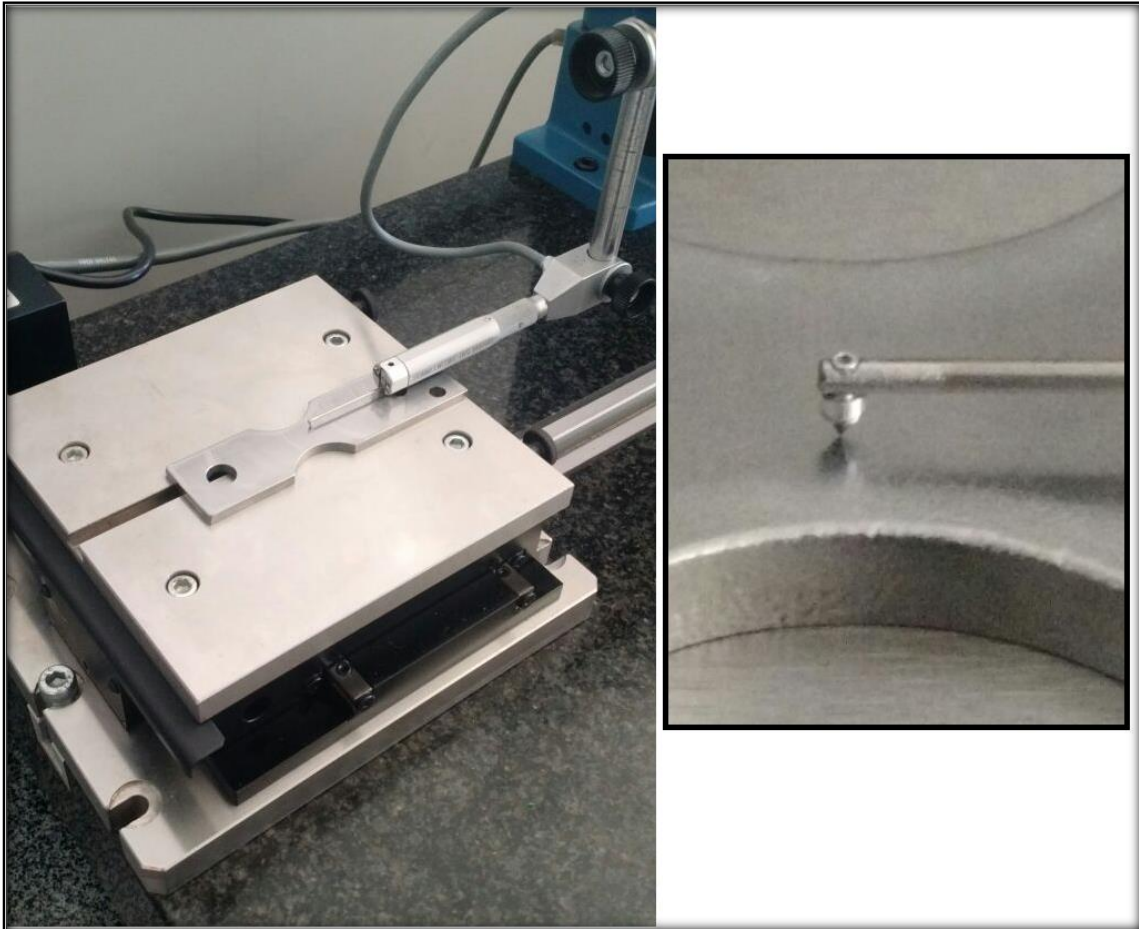


FIGURA 4.3 - Medição de rugosidade de um dos corpos de prova e apalpador em destaque

FONTE - Autor

A área analisada foi de 10 x 12 mm, sendo que a região situa-se na seção mais estreita do corpo de prova, onde é prevista a falha por fadiga. Cada corpo de prova foi analisado duas vezes, na região superior e inferior da amostra. Foram realizadas 26 medições com passo de 0,4 mm em cada superfície e a velocidade do ensaio foi de 1 mm/s. A FIG 4.4 apresenta um exemplo de perfil de rugosidade extraído.

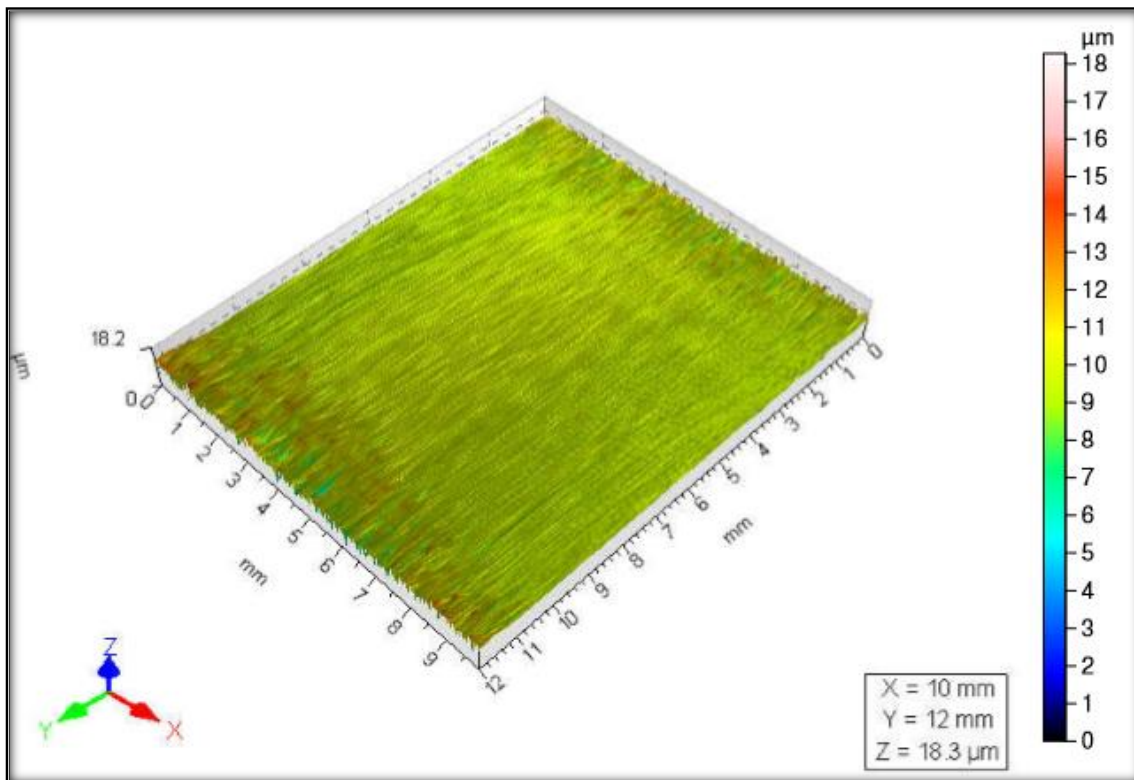


FIGURA 4.4 - Exemplo de perfil de rugosidade de um corpo de prova

FONTE - Autor

Apesar de fornecer diversos dados sobre o perfil da superfície do corpo de prova, utilizou-se neste trabalho apenas o desvio médio aritmético ( $R_a$ ). A TAB 4.1 apresenta os dados de  $R_a$  para cada amostra.

TABELA 4.1

Rugosidade média dos corpos de prova

Corpo de prova	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) - lado superior	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) - lado inferior
1	0,860	0,797
2	0,574	0,623
3	0,322	0,758
4	0,382	0,263
5	0,478	0,950
6	0,425	0,592
7	0,360	0,504
8	0,434	0,449
Média	0,479	0,617
Desvio padrão	0,161	0,203

FONTE - Autor

As FIG 4.5 e FIG 4.6 mostram imagens anterior e posterior à realização dos ensaios de fadiga, respectivamente. Os resultados dos ensaios são apresentados na TAB 4.2 e



representados no GRA 4.1. A metodologia para o cálculo das tensões apresentadas na TAB 4.2 é apresentada no Anexo C.

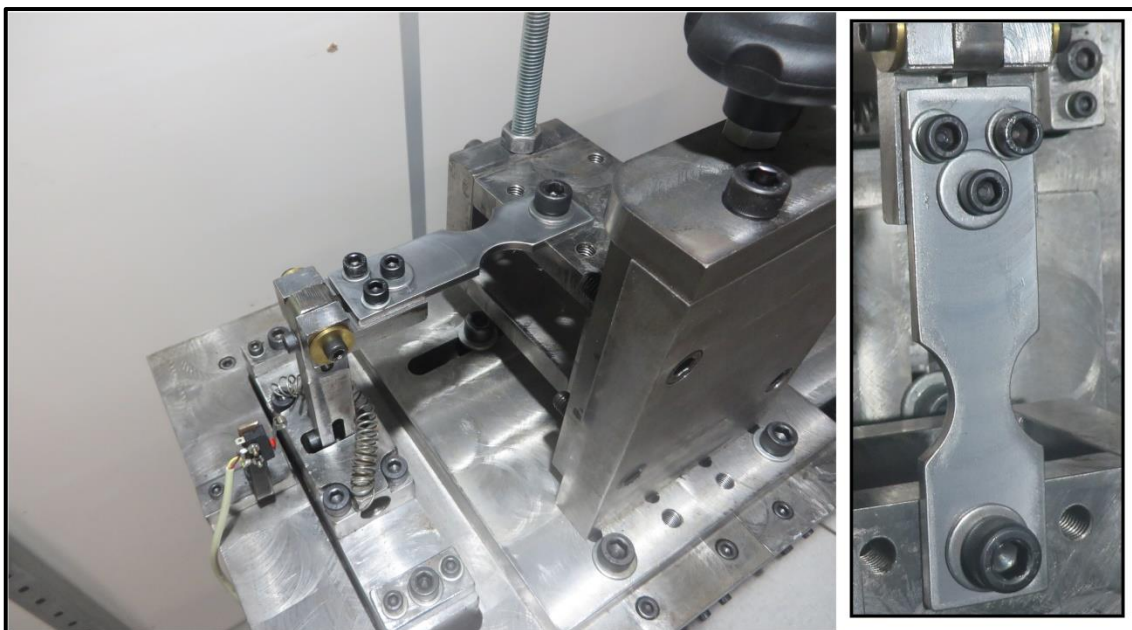


FIGURA 4.5 - Imagem antes da inicialização do ensaio de validação da máquina de fadiga com destaque para a fixação do corpo de prova

FONTE - Autor

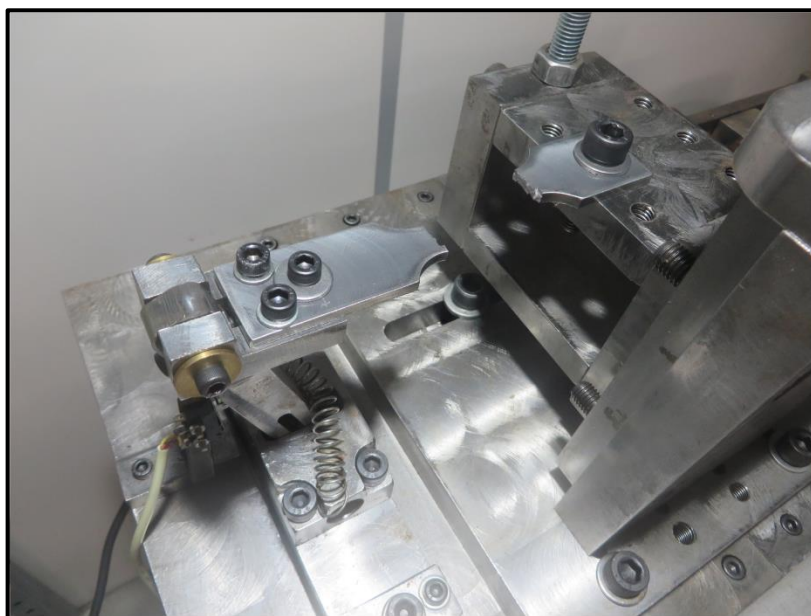


FIGURA 4.6 - Imagem após o ensaio de validação da máquina de fadiga

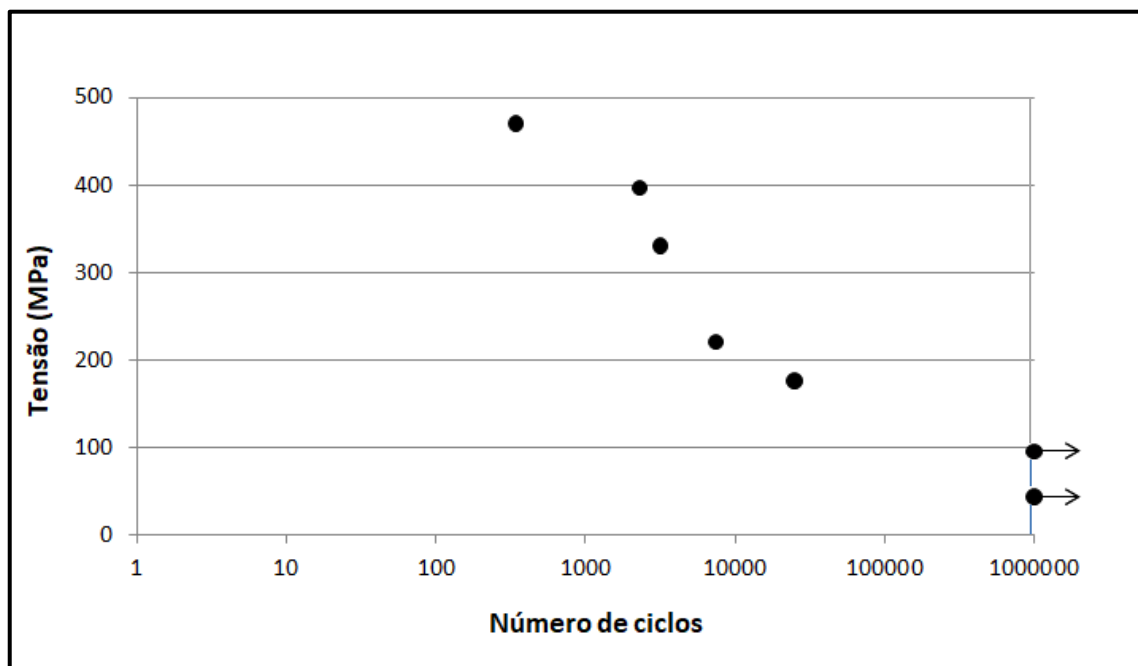
FONTE - Autor

TABELA 4.2

Dados dos ensaios de fadiga de validação da máquina

Corpo de prova	Flecha (mm)	Tensão (MPa)	Ciclos
1	9,3	-	X
2	0,6	44	$> 10^5$
3	1,3	95	$> 10^5$
4	6,4	470	344
5	5,4	397	2289
6	3,0	220	7422
7	2,4	176	24966
8	4,5	330	3146

FONTE - Autor

GRÁFICO 4.1 - Tensão *versus* número de ciclos realizados

FONTE - Autor

O corpo de prova número 1 foi ensaiado, entretanto, seus dados não foram aproveitados porque foi observada a presença de alguma anormalidade, uma vez que a amplitude da flecha coletada resulta em um valor de tensão muito acima do permitido para o material. Assim, este ensaio foi descartado. O problema ocorrido foi resolvido ajustando o conjunto fixador que não estava engastando adequadamente à extremidade fixa do corpo de prova. Em seguida os outros testes foram realizados.

Nota-se no GRA 4.1 que o comportamento do material é semelhante à curva de Wöhler clássica (ver GRA 2.11), ou seja, o número de ciclos para fadiga aumenta à medida que a tensão é reduzida.

## 5 CONCLUSÃO

Uma máquina para ensaio de fadiga por flexão foi projetada, fabricada e montada no Laboratório de Usinagem e Automação da Universidade Federal de Minas Gerais. O equipamento funciona corretamente e está apto para realizar ensaios de fadiga de corpos de prova de diferentes materiais e geometrias. O projeto e fabricação da máquina foram desenvolvidos para atender os objetivos estabelecidos levando em consideração os recursos financeiros, materiais e humanos. O tempo para a realização de todo o processo também foi uma variável que influenciou em várias tomadas de decisões para que a máquina fosse finalizada no tempo estimado.

A construção da máquina foi realizada em etapas, iniciada pela fase de projeto onde a mesma foi dividida nos subconjuntos estrutural e dinâmico, cada um com suas características e funções particulares que trabalham em harmonia possibilitando a utilização da máquina. Cada subconjunto foi projetado e analisado utilizando *softwares* auxiliares antes de se passar para a fase seguinte que consistiu na fabricação de cada peça dos subconjuntos. A aquisição dos materiais a serem fabricados para dar forma a máquina foi realizada de maneira que, após a fabricação, as peças alcancem as dimensões apresentadas no projeto. A fabricação e montagem utilizaram equipamentos e ferramentas disponibilizados pelo Laboratório de Usinagem e Automação e aconteceram de modo paralelo com objetivo de reduzir o tempo e corrigir possíveis erros, evitando retrabalho excessivo. Além dos subconjuntos, foi introduzido um sistema eletrônico com sensores e dispositivos que possibilitam a contagem de ciclos, início e encerramento dos ensaios e armazenamento dos principais dados de cada ensaio.

Após a construção da máquina, testes de validação foram realizados. A máquina foi submetida tanto a forças elevadas quanto a testes prolongados (número de ciclos superior a  $10^5$ ), apresentando resultados satisfatórios quanto à funcionalidade da mesma. Os testes foram realizados exclusivamente para se verificar a funcionalidade do equipamento, não havendo preocupação em controlar minuciosamente as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos corpos de prova e características relativas aos ensaios,

tais como temperatura, realização dos ensaios (sem interrupções), velocidade, entre outros. De todo modo, procurou-se realizar os ensaios de maneira semelhante para todos os corpos de prova a fim de obter um resultado mais confiável e realista, entretanto, uma possível variação nas propriedades citadas acima não interfere na validação da máquina que realizou seu trabalho de maneira adequada.

O gráfico de tensão *versus* número de ciclos resultante dos ensaios de validação da máquina de fadiga apresenta resultados para valores de tensão escolhidos aleatoriamente e número de ciclos máximos de  $10^5$ . Para se traçar a curva é necessário um número maior de ensaios com intervalos de tensão menores e mais regulares. Pode-se concluir que a região de vida infinita para o material ensaiado possui seu limite máximo entre as tensões de 176 MPa e 95 MPa.

Em relação à máquina de fadiga do DEES utilizada como modelo, a máquina de fadiga desenvolvida neste trabalho apresenta algumas vantagens. A manutenção do equipamento é realizada de maneira fácil, pois a máquina foi projetada e fabricada utilizando produtos encontrados facilmente no mercado nacional, além de ser acessível o detalhamento da máquina e a programação em linguagem C++ utilizada, o que também facilita a inclusão de melhorias. O armazenamento dos dados dos ensaios em um cartão de memória dispensa o uso de computadores para a realização dos ensaios, como acontece no ensaio utilizando a máquina do DEES, tornando mais prático e seguro o armazenamento dos dados, uma vez que os resultados são armazenados em local seguro e de fácil acesso.



## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A máquina para ensaio de fadiga por flexão foi projetada e fabricada para atender os requisitos operacionais mínimos, entretanto, diversas melhorias podem ser implementadas. Uma melhoria possível é a inclusão de uma célula de carga para medir a força aplicada ao corpo de prova durante cada ensaio, dispensando cálculos manuais e fornecendo o valor real de tensão. A máquina no seu estado atual apresenta locais que possibilitam uma fácil instalação da célula de carga, dispensando a necessidade de modificações no projeto.

O mecanismo responsável pela variação da amplitude da flecha pode ser melhorado com o projeto e fabricação de um manípulo e um fuso com rosca trapezoidal, substituindo o parafuso usado para variação da flecha.

O subconjunto dinâmico pode ser melhorado pela substituição das polias e correia por um conjunto de engrenagens em contato direto ou por meio de correntes. Essa modificação garantirá que não haverá escorregamento na transmissão de torque do eixo motor para o movido. Algumas peças em aço ABNT 1045 utilizadas na parte dinâmica podem ser substituídas por outras com geometria semelhante e menor densidade, como alumínio, por exemplo, desde que a resistência e a rigidez da máquina sejam garantidas. Com essa alteração, o peso dos componentes dinâmicos diminuirá e, conseqüentemente, o torque necessário para manter essas peças em funcionamento durante o ensaio será reduzida, o que aumentará o torque final disponível para a realização dos ensaios.

Outra melhoria consiste em utilizar um sensor para avaliar o sinal de emissão acústica emitidos pelo corpo de prova durante a realização de ensaios, o que permitirá detectar a inicialização e propagação de trincas durante o ensaio.

## ABSTRACT

Knowledge regarding the properties of materials is of utmost importance for engineering applications. Chemical, physical and mechanical properties of material vary from one to another and due to these differences, it is possible to take advantage of the current technology and well-being. The study of these properties is necessary for the development of new equipment or products and an important property is the fatigue resistance of materials used for manufacturing of components which will be subjected to cyclic loads because fatigue failure can occur unexpectedly. The goal of this work is to design and build a machine for bending fatigue testing to be used in the study of the behavior of metallic materials found in flat geometry, common in several machining processes, allowing the study of fatigue resistance by varying the parameter of milling, for example. Machine design has been split in two large groups named structural and dynamic, consisting of parts and accessories with the aim of, together, performing fatigue tests. As distinct bending fatigue test standards require specimens with varied dimensions, the machine was built in order to enable testing of specimens with different sizes and shapes. AISI 1020 and AISI 1045 steels were predominantly employed in the manufacture of the machine, however, polymeric materials were occasionally used for specific purposes. An electronic circuit consisting basically of an *Arduino* microcontroller, an encoder, a photodetector and an interruption sensor was developed and built to count the number of cycles and halt the test immediately after specimen fracture. Machine validation tests were performed using eight annealed AISI 1020 steel specimens and indicated that the machine presents satisfactory performance, thus allowing to collect reliable data for plotting Wöhler curve.

**Key word:** *Bending fatigue test; fatigue; design of machines; Wöhler curve.*

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ABRAHÃO, R. R. R.; BITTENCOURT, C.; TSURUTA, K. M.; RADE, R. S. L. **Fadiga em Materiais - Uma Revisão Bibliográfica**. In: XII Seminário de Iniciação Científica, 2008, Uberlândia.
- 2 AMARAL, O. C. **Curso básico de Resistência dos Materiais**. Belo Horizonte, 2002.
- 3 ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. **Engenharia de Materiais**. v2; Tradução de Arlete Simille Marques. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- 4 ASHBY, M. F.; JONES, D. R. **Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design**. 4. ed. Butterworth-Heinemann, 2012.
- 5 ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014. Tradução Solange Aparecida Visconti.
- 6 ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. Revisão técnica Glória Dulce de Almeida, Ivan Napoleão Bastos, Wagner Figueiredo Sacco; Tradução Vertice Translate e All Tasks.
- 7 BRANDÃO, R. P. **Projeto Mecânico de uma Máquina de Ensaio de Fadiga por Flexão Rotativa**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro, 2012.
- 8 BUDINSKI, K. G.; BUDINSKI, M. K. **Engineering Materials: Properties and Selection**. 9. ed. New Jersey: Prencite Hall, 2010.
- 9 BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. Tradução: João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar, José Benaque Rubert. ISBN 978-85-8055-554-7.

- 10 CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7<sup>a</sup> ed. Editora LTC, 2008.
- 11 CHARLES, J.A.; CRANE, F.A.A.; FURNESS, J.A.G. **Selection and Use of Engineering Materials**. 3. ed. Butterworth-Heinemann, 1997.
- 12 COLLINS, J. A. **Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, prediction, prevention**. 2. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons INC, 1993. ISBN 0-471-55891-5.
- 13 COURTNEY, T. H. **Overview of the Materials Selection Process**. Universidade de Maryland. In: ASM Handbook, Materials Selection and Design, vol 20, 1997.
- 14 DIETER, G. E. **Fundamental Structure-Property Relationships in Engineering Materials**. Universidade Tecnológica Michigan. In: ASM Handbook, Materials Selection and Design, vol 20, 1997.
- 15 ELLYIN, F. **Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction**. 1. ed. Chapman & Hall, 1997.
- 16 FARAG, M. M. **Properties Needed for the Design of Static Structures**. In: ASM Handbook, Materials Selection and Design, vol 20, 1997.
- 17 FINE, M. E.; CHUNG Y. **Fatigue Failure in Metals**. Departamento de Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Northwestern. In: ASM Handbook, Fatigue and Fracture, vol 19, 1996.
- 18 FRANCESCHI, A.; ANTONELLO, M. G. **Elementos de máquinas** – Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. Rede e-Tec Brasil, 2014.
- 19 GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Edição única. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

- 20 GDOUTOS, E. E. **Fracture Mechanics Critical and Application**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1948.
- 21 HERTZBERG, R. W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 4. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons INC, 1937. ISBN 0-471-01214-9.
- 22 HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. Pearson Prentice Hall, 2010.
- 23 LEE, Y.; PAN, J.; HATHAWAY, R.; BARKEY, M. **Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice**. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- 24 LEMAIRE, J.; DESMORAT, R. **Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures**. Springer, 2010.
- 25 MARQUES, F. C. S.; AREVALOS, R. M. **Modernização da Máquina de Fadiga por Flexão Rotativa do Laboratório de Ensaios de Materiais**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2011.
- 26 MANESCHY, J. E.; MIRANDA, C. A. J. **Mecânica da Fratura na Indústria Nuclear**. Rio de Janeiro: Lithos Edições de Arte, 2014.
- 27 MILELLA, P. P. **Fatigue and Corrosion in Metals**. 1. ed. Itália: Springer, 2013.
- 28 MITCHELL, M. R. **Fundamentals of Modern Fatigue Analysis for Design**. Centro de Ciência Rockwell. In: ASM Handbook, Fatigue and Fracture, vol 19, 1996.
- 29 NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. ISBN 0-13-017706-7
- 30 PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. São Paulo: Edgar Blücher, 2005. Tradução Hans Andreas Werner; revisão Nazem Nascimento.

- 31 PAVLINA, E. J.; VAN TYNE, C. J. **Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels**. Journal of Materials Engineering and Performance, vol 16, 2008.
- 32 ROSA, E. **Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga**. Universidade Federal de Santa Catarina; Departamento de Engenharia Mecânica. Santa Catarina, 2002.
- 33 SANTOS Jr., A. A. **Sistemas mecânicos - Introdução e fadiga**. Apostila do Departamento de Projetos Mecânicos, FEM - UNICAMP, 2002.
- 34 SANTOS, L. V. **Análise da Falha por Fadiga em Eixos de Motores para Sistemas de Arrefecimento**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- 35 SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. 2. ed. Springer, 2009.
- 36 SHACKELFORD, J. F. **Introduction to Materials Science for Engineers**. New Jersey: Prencite Hall, 2000. 5. ed. ISBN 0-13-011287-9.
- 37 SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. ISBN 978-85-363-0562-2.
- 38 SMITH, W. F. **Princípio de ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. McGRW-HILL, 1998.
- 39 SOUZA, E. D. **Análise do efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga do aço ASTM A743 CA6NM**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2011.
- 40 SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982. ISBN 978-85-212-0012-3.

- 41 TAKAHASHI, B. X. Metodologia Moderna para Análise de Fadiga Baseada em Elementos Finitos de Componentes Sujeitos a Fadiga Uni e Multiaxial.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.
- 42 WAHAB, M. M. A. Fatigue in Adhesively Bonded Joints: A Review.** International Scholarly Research Network, 2012, Article ID 746308.

## ANEXO A

### Código programação

Código em linguagem C++ utilizado pelo *Arduino* para a contagem de ciclos, encerramento e arquivamento de dados do ensaio.

```
// include the library code:
#include <LiquidCrystal.h>
#define SD_CS_PIN SS
#include <SPI.h>
#include "SdFat.h"
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"

RTC_DS1307 rtc; // Criando objeto do tipo RTC_DS1307
SdFat SD;      // Criando objeto do tipo SdFat
File myFile;   // Criando variável do tipo file para gravar na memória SD

// initialize the library with the numbers of the interface pins
// Quando aux1 é alterado para para o valor 2, significa que informações iniciais foram concluídas
int aux1 = 1;
unsigned long aux2 = 0; //diferença de tempo
int cont1 = 0; // numeros de ciclos para desligar o inverosor;
int passo = 0;
int Rele = 30; // Relé pino digital 30
volatile unsigned long cont2 = 0; // Contador de ciclos
volatile unsigned long pulso_segundo = 0; // Contador de ciclos
unsigned long timeold = 0; // Variável para calcular o tempo .....
unsigned long rpm = 0; //Inicializando variável que indica velocidade
String ano;      // VALOR DE REFERENCIA
String mes;     // VALOR DE REFERENCIA
String dia;     // VALOR DE REFERENCIA
String hora;    // VALOR DE REFERENCIA
String minuto;  // VALOR DE REFERENCIA
String segundo; // VALOR DE REFERENCIA
volatile int parada_F = 1; // 1 indica operação normal -- 2 indica parada forçada causada pela chave
fim de curso

//LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);

void contador()
{
  //Incrementa contador
  //Serial.println("cont2");
  cont2++;
  pulso_segundo++;
  //Serial.println(cont2);
}

void paradaForcada()
```



```

{
  parada_F = 2;
}

void setup() {
  // set up the LCD's number of columns and rows:
  lcd.begin(16, 2);
  Serial.begin(9600);

  // Inicio SD *****
  pinMode(53, OUTPUT);          // Valor necessário do arduino MEGA para o pino CS
  if (!SD.begin(SD_CS_PIN))    // Verificando se o cartão SD está inserido no shield
  {
    Serial.println("initialization SD failed!");
    return;
  }
  Serial.println("initialization SD done.");
  // FIM SD *****

  // Inicio RTC *****
  if (!rtc.begin())
  {
    Serial.println("Couldn't find RTC");
    while (1);
  }

  if (!rtc.isrunning())
  {
    Serial.println("RTC is NOT running!");
  }
  //rtc.adjust(DateTime(2017, 4, 1, 22, 52, 0)); // Ajustar o horário do RTC: função ativa apenas para
  inserir o valor certo.
  // FIM RTC *****

  pinMode(Rele, OUTPUT);
  digitalWrite(Rele, HIGH); // Inicializando o relé: sem acionar

  // Inicio Interrupcao ciclos *****
  pinMode(18, INPUT);
  attachInterrupt(5, contador, FALLING);

  // FIM Interrupcao ciclos *****

  // Inicio Interrupcao chave fim de curso *****

  pinMode(19, INPUT);
  attachInterrupt(4, paradaForcada, FALLING);

  // FIM Interrupcao chave fim de curso *****

}

void loop() {

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Ciclos?");
  lcd.setCursor(8,0);
  lcd.print ("P "); // diminuindo o passo
  lcd.setCursor(10,0);
  lcd.print (passo);

```

```

int botao;

while (aux1==1)
{
  botao = analogRead (0); //Leitura do valor da porta analógica A0
  //Serial.println(botao);
  lcd.setCursor(8,1);

  // Aumento do passo
  if (botao < 100) {
    //lcd.print ("Direita ");
    lcd.setCursor(8,0);
    lcd.print ("P ");
    lcd.setCursor(10,0);
    passo = passo+1;
    if (passo > 9)
    {
      passo = 9;
    }
    lcd.print (passo);
    delay(200);

  }
  // Incremento de ciclos
  else if (botao < 200) {
    //lcd.print ("Cima  ");
    lcd.clear();
    lcd.print("Ciclos?");

    lcd.setCursor(8,0);
    lcd.print ("P ");
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print (passo);

    cont1 = cont1+25;
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print (cont1);
    delay(passo*20);
  }

  //Decremento de ciclos
  else if (botao < 400){
    //lcd.print ("Baixo  ");
    lcd.clear();
    lcd.print("Ciclos?");

    lcd.setCursor(8,0);
    lcd.print ("P ");
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print (passo);

    cont1 = cont1-25;
    if (cont1 <0)
    {
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print ("Infinito");
      cont1 = -1;
    }
  }
  else{

```

```

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print (cont1);
    delay(passo*20);
}

}

else if (botao < 600){
//lcd.print ("Esquerda");
lcd.setCursor(8,0);
lcd.print ("P "); // diminuindo o passo
lcd.setCursor(10,0);
passo = passo-1;
if (passo<0)
{
    passo = 0;
}

lcd.print (passo);
delay(200);

}
else if (botao < 800){
lcd.setCursor(14,1);
lcd.print ("OK");
aux1 = 2;
}

}

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Açione o Motor");

digitalWrite(Rele, LOW);
delay(2000);
lcd.clear();
timeold = millis();
while(1)
{
    if (cont1<0)
    {
        if (parada_F == 1)
        {
            if (millis()-timeold>=1000)
            {
                aux2 = (millis()-timeold);
                rpm = (60000/aux2)*pulso_segundo;
                //rpm = (60000)/aux2;
                timeold = millis();
                pulso_segundo = 0;

                lcd.clear();
                lcd.setCursor(0,1);
                lcd.print(rpm);
                lcd.setCursor(13,1);
                lcd.print("rpm");

            }
            lcd.setCursor(0,0);

```

```

        lcd.print(cont2);
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("Ciclos");
    }
    else
    {
        digitalWrite(Rele, HIGH);
        break;
    }
}
else if (cont2<cont1) // condicao de parada com o numero de ciclos inserido pelo usuário
{
    if (parada_F == 2) // caso a peça romper antes de completar ciclos inseridos pelos usuário
    {
        digitalWrite(Rele, HIGH);
        break;
    }
    if (millis()-timeold>=2000)
    {
        aux2 = (millis()-timeold);
        rpm = (60000/aux2)*pulso_segundo;
        //rpm = (60000)/aux2;
        timeold = millis();
        pulso_segundo = 0;

        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(rpm);
        lcd.setCursor(13,1);
        lcd.print("rpm");

    }
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(cont2);
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print("Ciclos");
    }
    else
    {
        digitalWrite(Rele, HIGH);
        break;
    }
}

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(cont2);
lcd.setCursor(10,0);
lcd.print("Ciclos");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Fim da operacao");
gravarSD();
delay(1000);

while(1)
{
    delay(1000);
}

```

```

//lcd.setCursor(8,0);

}

void gravarSD()
{
  DateTime now = rtc.now();
  ano = String(now.year(),DEC);
  mes = String(now.month(),DEC);
  dia = String(now.day(),DEC);
  hora = String(now.hour(),DEC);
  minuto = String(now.minute(),DEC);
  segundo = String(now.second(),DEC);

  myFile = SD.open(ano+"_"+mes+"_"+dia+"_"+hora+"_"+minuto+"_"+segundo+".txt", FILE_WRITE);

  if (myFile)
  {
    myFile.print("Número de ciclos inserido pelo usuário: ");

    if (cont1 < 0)
    {
      myFile.println("Infinito");
    }
    else
    {
      myFile.println(cont1);
    }

    if (parada_F == 1)
    {
      myFile.println("Chave de fim de curso não foi acionada");
    }

    if (parada_F == 2)
    {
      myFile.println("Chave de fim de curso foi acionada");
    }

    myFile.print("Número de ciclos realizados: ");
    myFile.println(cont2);

    myFile.print("Tempo de duração do ensaio em ms: ");
    timeold = millis();
    myFile.print(timeold);

  }
  else
  {
    // if the file didn't open, print an error:
    Serial.println("Error opening Data.txt");
  }

  myFile.close();
}

```

## ANEXO B

### Dimensionamento dos eixos

O diâmetro dimensionado do eixo movido foi utilizado também para o eixo motor por este último estar solicitado a menores esforços.

Dados de entrada:

Potência gerada pelo motor: 0,5 cv = 367,749 W  
 Frequência gerada pelo motor: 60 Hz  
 Rotação máxima no eixo movido: 1200 rpm  
 Comprimento eixo movido: 0,240 m  
 Carga na pior situação: 212,400 N  
 Tensão de escoamento: 310 MPa  
 Fator de segurança: 1,6

Torque no eixo (T):

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{60 \times 367,749}{2\pi \times 1200} = 2,926 \text{ Nm}$$

Onde:  $P$  é a potência fornecida pelo motor e  $\omega$  é a velocidade angular.

Momento fletor (M)

$$M = F \times l = 212,400 \times 0,240 = 50,976 \text{ Nm}$$

Onde:  $F$  é a carga na pior situação e  $l$  é o comprimento linear do eixo.

Tensão de cisalhamento admissível ( $\tau_{adm}$ )

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_{esc}}{2 \times FS} = \frac{310}{2 \times 1,6} = 96,875 \text{ MPa}$$

Onde:  $\sigma_{esc}$  é a tensão de escoamento do aço ABNT 1045 e  $FS$  é o valor do fator de segurança utilizado. Importante observar que

Diâmetro mínimo do eixo (d)

$$d^3 = \frac{32 \sqrt{(T^2 + M^2)}}{\pi \times \tau_{adm}} = \frac{32 \sqrt{(2,926^2 + 50,976^2)}}{\pi \times 96,875 \times 10^6} = 5,260 \times 10^{-6}$$

$$d = (5,260 \times 10^{-6})^{\frac{1}{3}} = 0,0174 \text{ m} = 17,39 \text{ mm}$$

## ANEXO C

### Cálculo da tensão aplicada ao corpo de prova

Considerando o engaste perfeito em uma das extremidades do corpo de prova e a outra extremidade submetida à flexão, o cálculo das tensões aplicadas em cada corpo de prova segue os princípios dos cálculos para flexões em vigas simples. O cálculo é feito para o ensaio com flecha de 1,3 mm, entretanto, os cálculos podem ser utilizados para determinar as tensões para os outros ensaios.

Dados de entrada:

Comprimento total do corpo: 120 mm  
 Comprimento do corpo de prova do ponto engastado até a extremidade móvel (l): 108 mm  
 Comprimento extremidade móvel até região de fratura (lf): 70 mm  
 Largura menor do corpo de prova (b): 14 mm  
 Espessura do corpo de prova (h): 4,3 mm  
 Distância do centroide de área até a superfície do corpo de prova (y): 2,15 mm  
 Altura de flecha ( $\delta$ ): 1,6 mm  
 Modulo de elasticidade aproximada:  $205 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$

Momento de inércia do corpo de prova (I):

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{14 \times 4,3^3}{12} = 92,758 \text{ mm}^4$$

Força aplicada no ensaio (F):

$$F = \frac{3EI\delta}{l^3} = \frac{3 \times 205 \times 10^3 \times 92,758 \times 1,3}{108^3} = 58,871 \text{ N}$$

Momento na região onde ocorre a fratura (M):

$$M = F \times lf = 58,871 \times 70 = 4120,97 \text{ Nmm}$$

Tensão aplicada na região onde ocorre a fratura por fadiga ( $\sigma$ ):

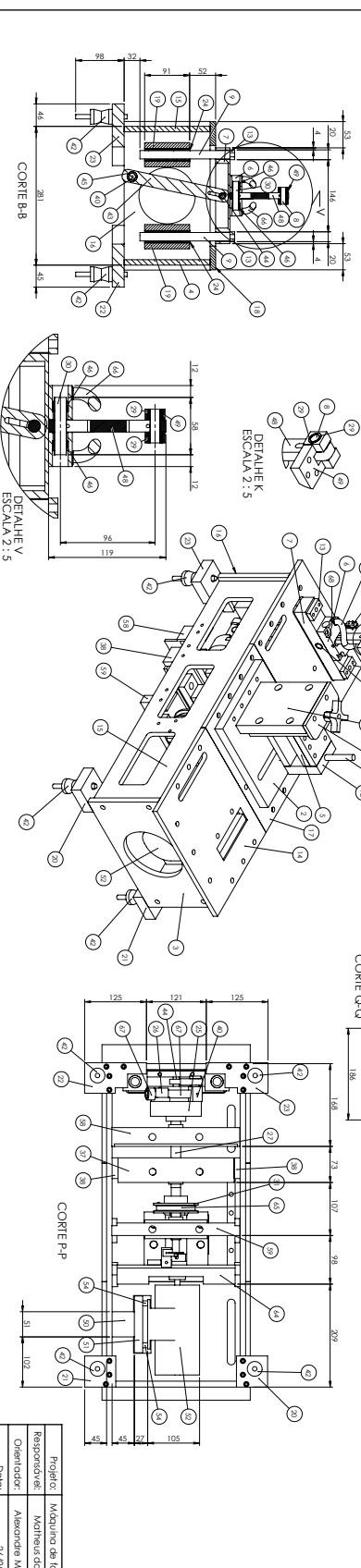
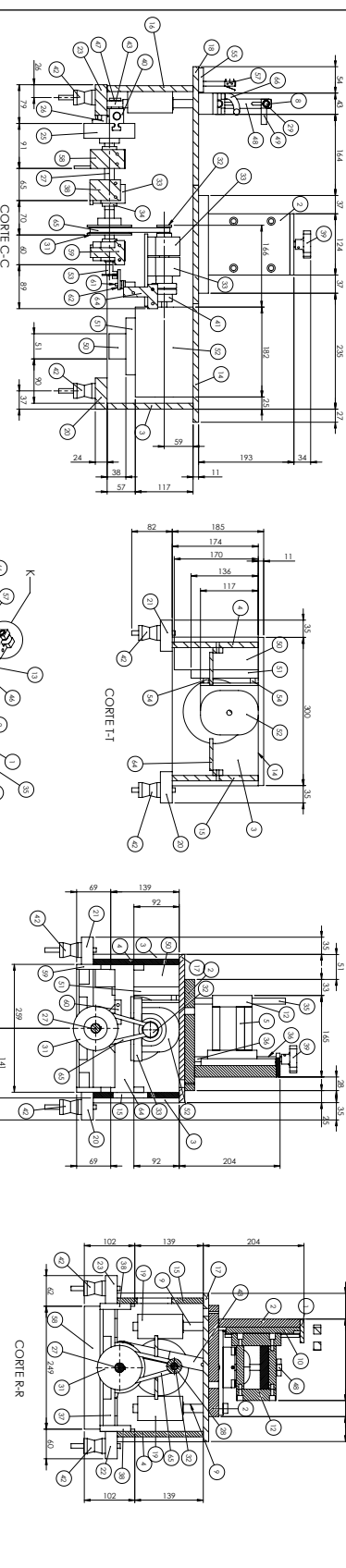
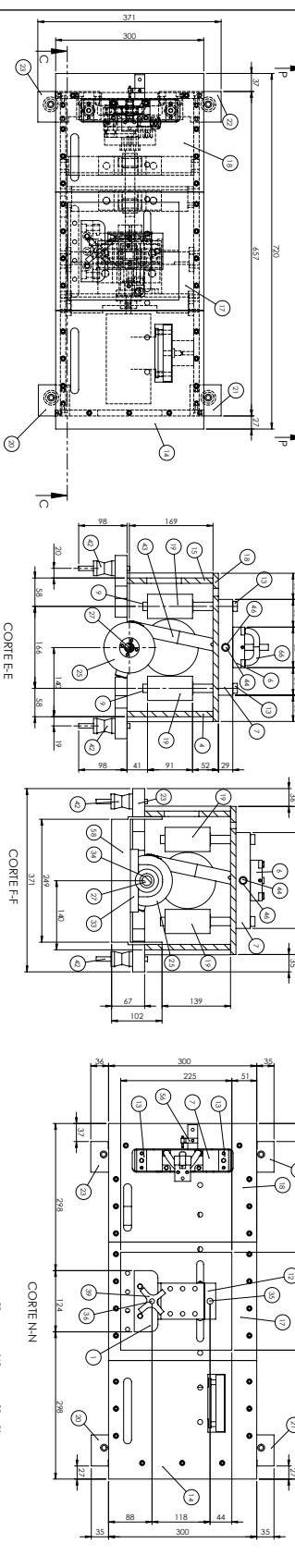
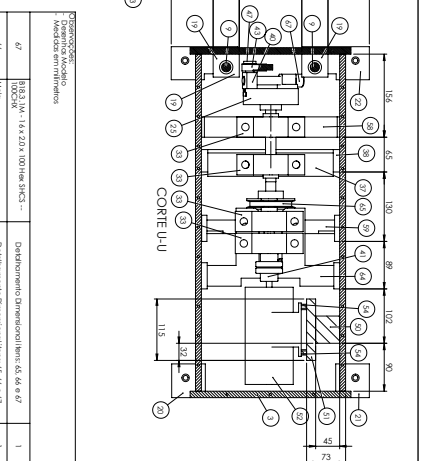
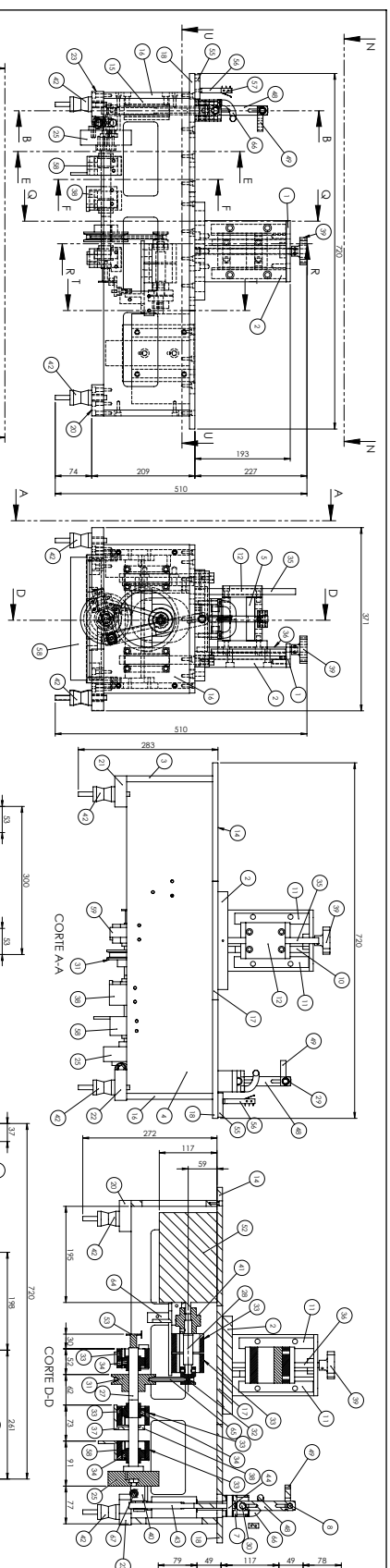
$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{4120,97 \times 2,15}{92,758} = 95,518 \text{ MPa}$$

## ANEXO D

### **Detalhamento bidimensional da máquina de fadiga por flexão**

A máquina de fadiga foi modelada em três dimensões utilizando o programa *SolidWorks*, sendo que para a fabricação foi utilizado o detalhamento bidimensional obtido diretamente do modelamento tridimensional. O detalhamento completo em duas dimensões é apresentado nas seções D1 à D22.





Itemização das Medidas em milímetros

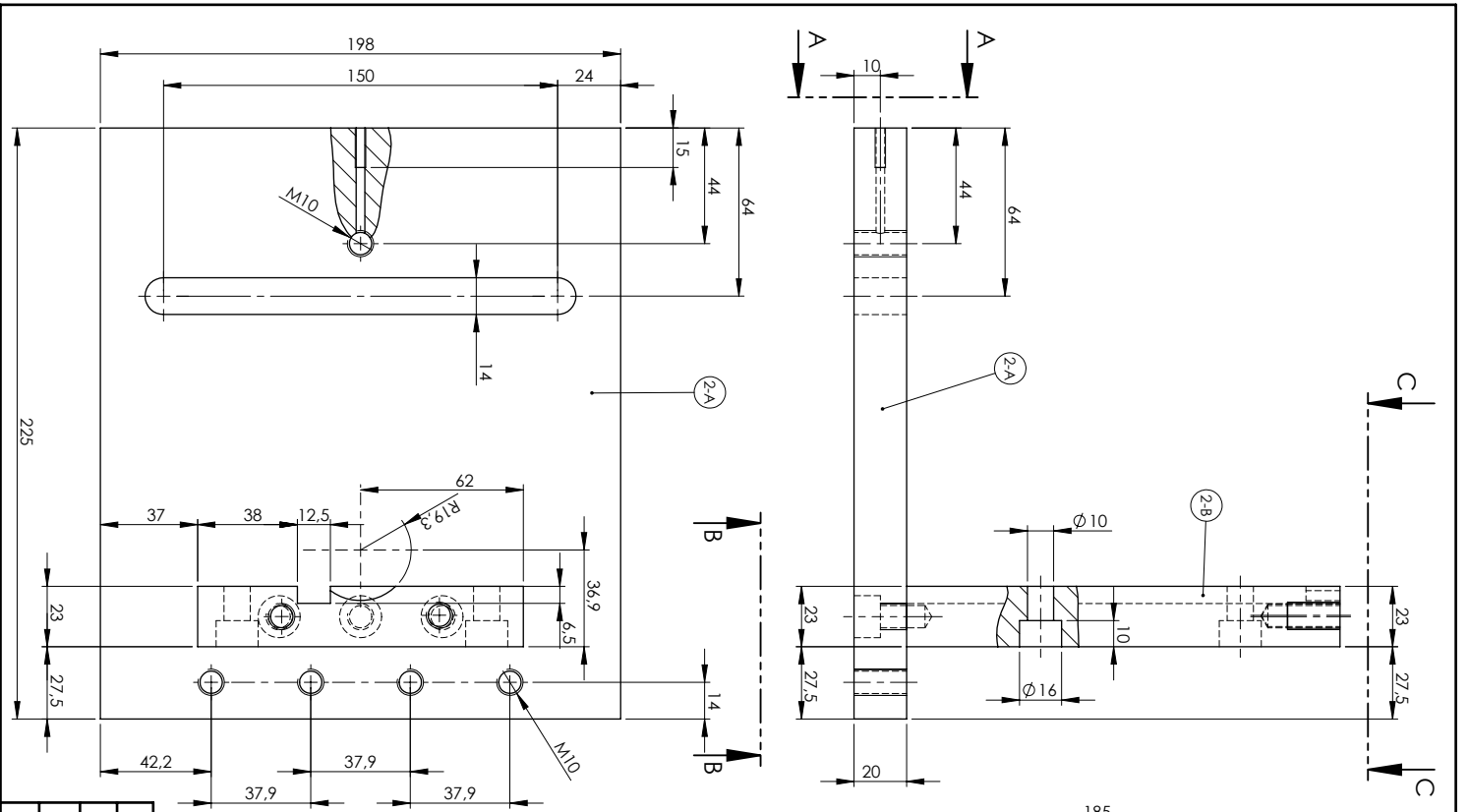
ITEM	FECA	DESCRICAO	QTD.
47	B&B N° 1 X 233 100 H&S H&S	Distribuição Dimensional Item: 45, 46 e 47	1
48	M&M	Distribuição Dimensional Item: 45, 46 e 47	1
49	Corbino	Distribuição Dimensional Item: 45, 46 e 47	1
50	Corbino de apoio 4	Distribuição Dimensional Item: 61, 62, 63 e 64	1
51	Penca corbino de apoio	Distribuição Dimensional Item: 61, 62, 63 e 64	1
52	Penca corbino de apoio 2	Distribuição Dimensional Item: 61, 62, 63 e 64	1
53	Contra 2	Distribuição Dimensional Item: 61, 62, 63 e 64	1
54	Super corbino de apoio 1	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
55	Contra 3	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
56	Contra 4	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
57	Super corbino de apoio 2	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
58	Super corbino de apoio 3	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
59	Super corbino de apoio 4	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
60	Super corbino de apoio 5	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
61	Super corbino de apoio 6	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
62	Super corbino de apoio 7	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
63	Super corbino de apoio 8	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
64	Super corbino de apoio 9	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
65	Super corbino de apoio 10	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
66	Super corbino de apoio 11	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
67	Super corbino de apoio 12	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
68	Super corbino de apoio 13	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
69	Super corbino de apoio 14	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
70	Super corbino de apoio 15	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
71	Super corbino de apoio 16	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
72	Super corbino de apoio 17	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
73	Super corbino de apoio 18	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
74	Super corbino de apoio 19	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
75	Super corbino de apoio 20	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
76	Super corbino de apoio 21	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
77	Super corbino de apoio 22	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
78	Super corbino de apoio 23	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
79	Super corbino de apoio 24	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
80	Super corbino de apoio 25	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
81	Super corbino de apoio 26	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
82	Super corbino de apoio 27	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
83	Super corbino de apoio 28	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
84	Super corbino de apoio 29	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
85	Super corbino de apoio 30	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
86	Super corbino de apoio 31	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
87	Super corbino de apoio 32	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
88	Super corbino de apoio 33	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
89	Super corbino de apoio 34	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
90	Super corbino de apoio 35	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
91	Super corbino de apoio 36	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
92	Super corbino de apoio 37	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
93	Super corbino de apoio 38	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
94	Super corbino de apoio 39	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
95	Super corbino de apoio 40	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
96	Super corbino de apoio 41	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
97	Super corbino de apoio 42	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
98	Super corbino de apoio 43	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
99	Super corbino de apoio 44	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1
100	Super corbino de apoio 45	Distribuição Dimensional Item: 38, 39 e 40	1

Projeto: Medição de Indagação Feições  
 Responsável: Márcio dos Santos Lages  
 Orientador: Alexandre Mendes André  
 Data: 26/05/2017

Título: Arquivo D1 - Detalhamento Dimensional  
 Montagem geral - Página 106

FECA  
 ESCALA: 1:5  
 DEFLAHEIRO: 1/22 | FORNARO: AI

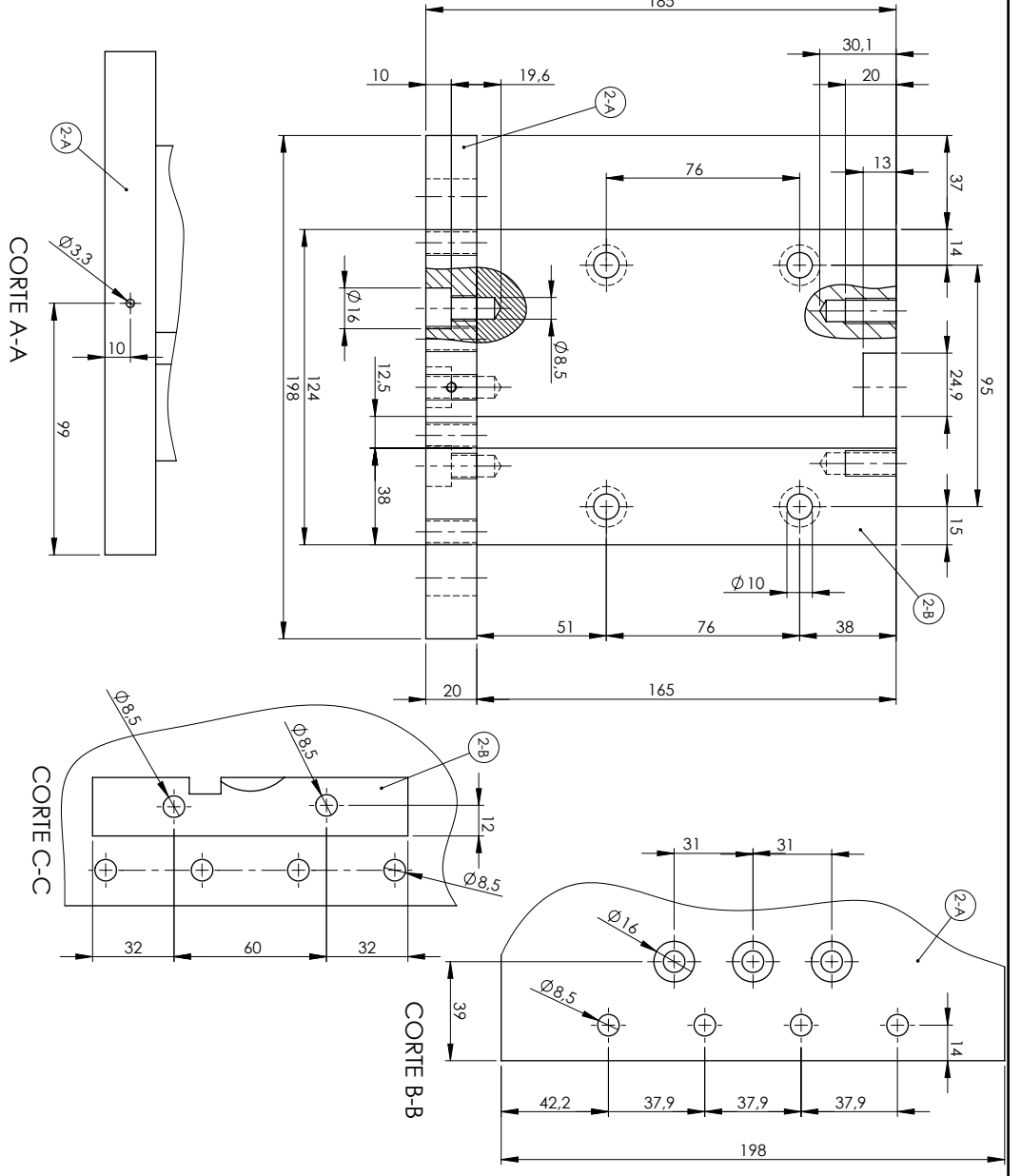
REV. 0

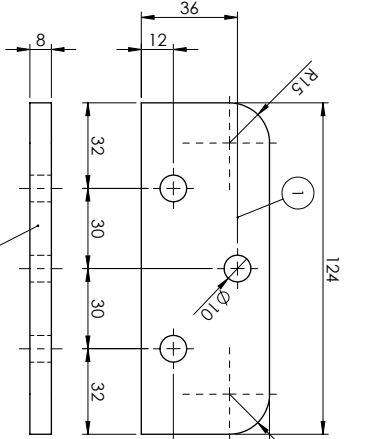
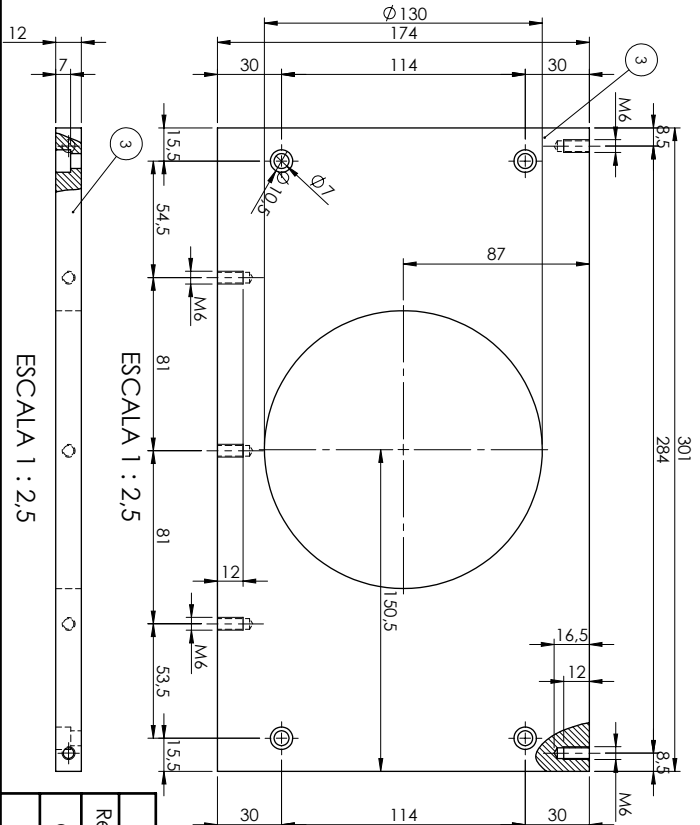
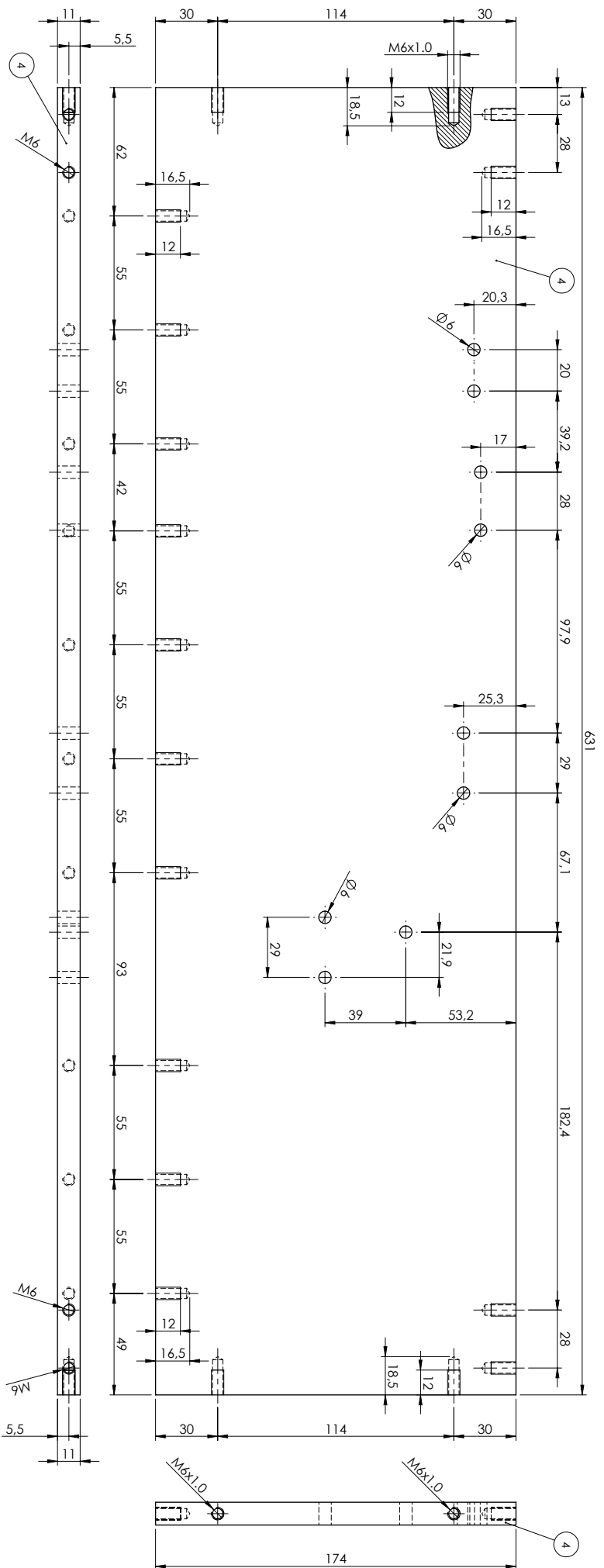


Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

Título:		Anexo D2: Detalhamento Dimensional	
Item:		Item: 2 - Página 107	
ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
2-B	Coluna pela fixador	ABNT 1045	1
2-A	Base peça fixador	ABNT 1045	1

Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22.  
 - Medidas em milímetros.  
 - Item 2 dividido em 2 peças.



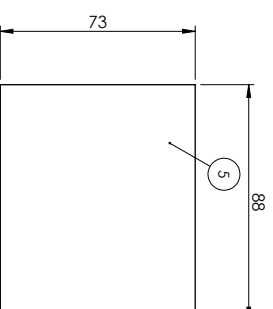
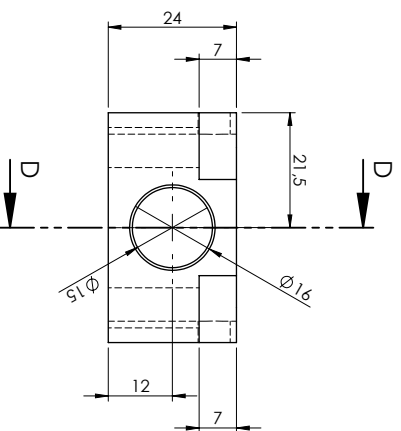
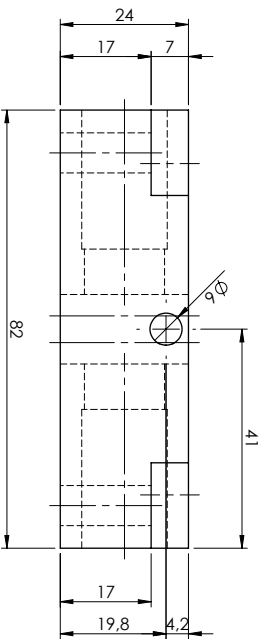


Observações:  
 - Referenciar: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros

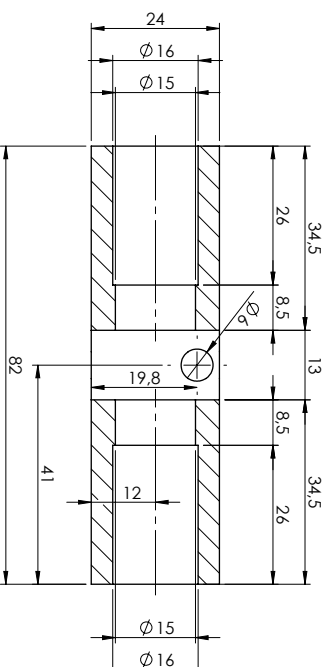
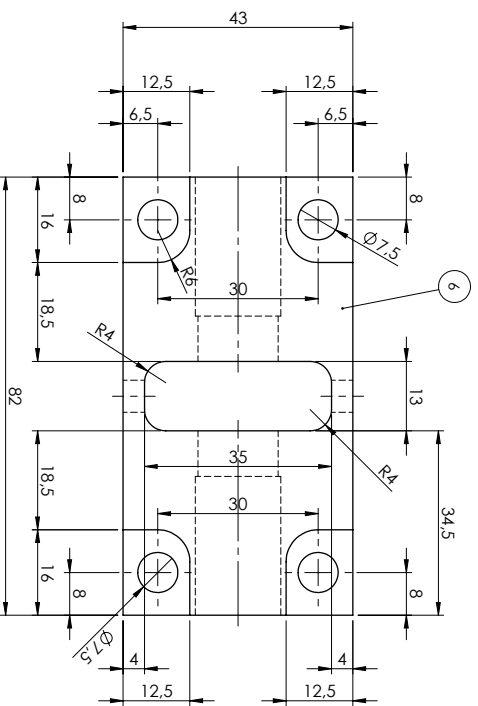
ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
4	Base lateral 1	ABNT 1020	1
3	Base traseira	ABNT 1020	1
1	Tampa fixador	ABNT 1045	1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão	Título:	Anexo D3: Detalhamento Dimensional	REV.	0
Responsável:	Mathheus da Silva Lopes	ESCALA: 1:2	DETALHAMENTO: 3/22	FORMATO:	A3
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão				
Data:	26/05/2017				

ESCALA 1 : 2,5



ESCALA 1 : 2

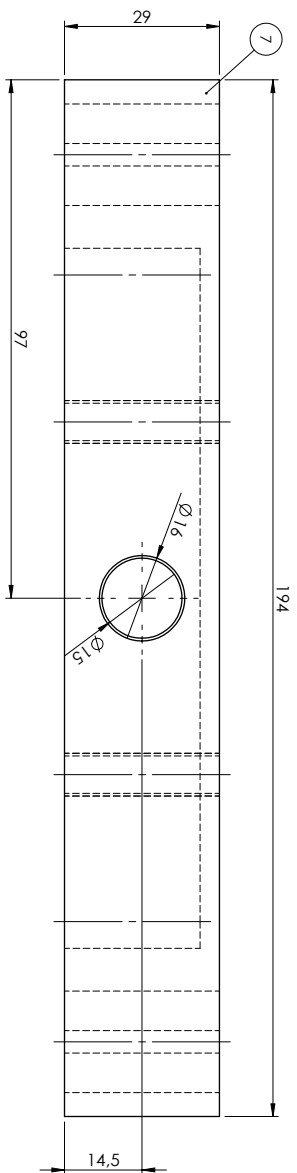


Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros

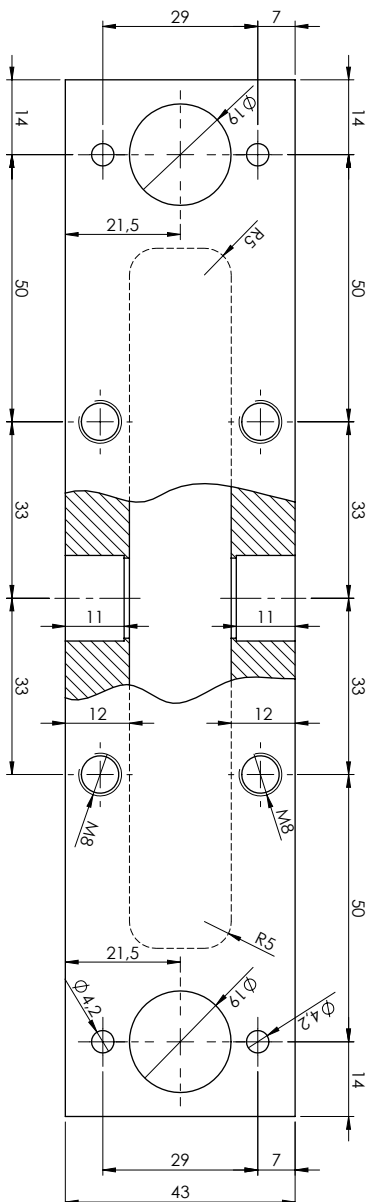
ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
6	Base da Haste	ABNT 1045	1
5	Peça apoio	ABNT 1045	1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

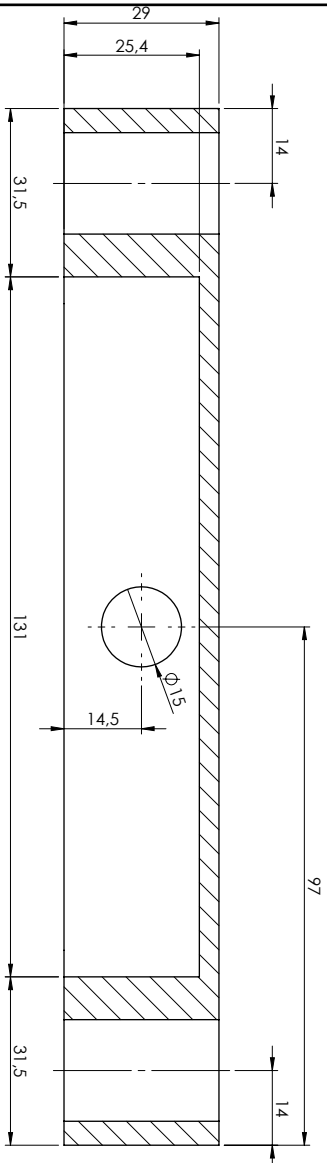
Título:		Anexo D4: Detalhamento Dimensional	REV.
Escala:		1:1	0
Formato:		A3	
Data:		26/05/2017	



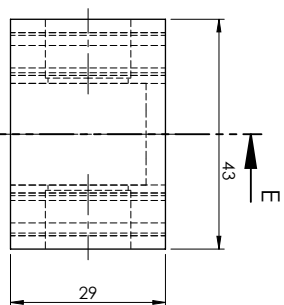
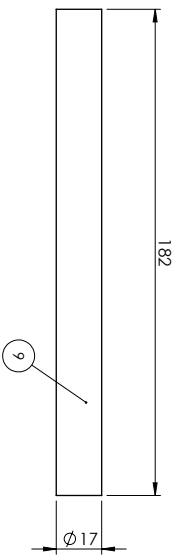
ESCALA 1 : 1



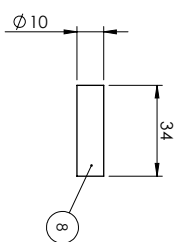
ESCALA 1 : 1



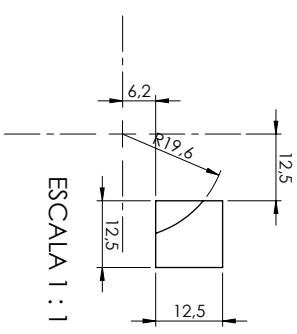
CORTE E-E  
ESCALA 1 : 1



ESCALA 1 : 1



ESCALA 1 : 1



ESCALA 1 : 1

Observações:  
- Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
- Medidas em milímetros

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
10	Chaveta	ABNT 1045	1
9	Eixo guia	ABNT 1020	2
8	Pino 1	ABNT 1045	1
7	Base Móvel	ABNT 1045	1

Título:

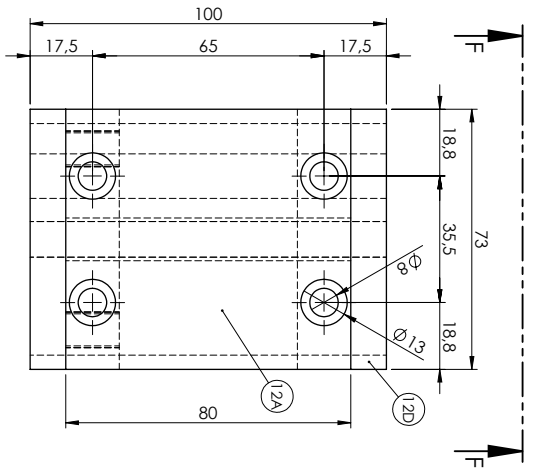
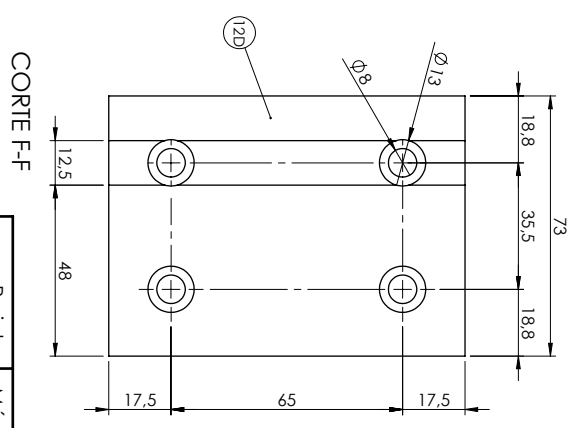
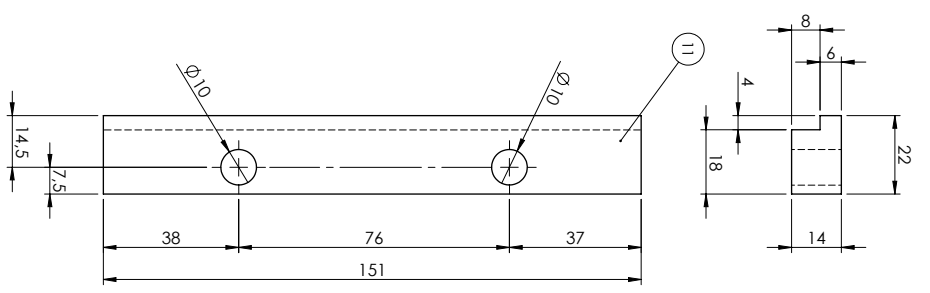
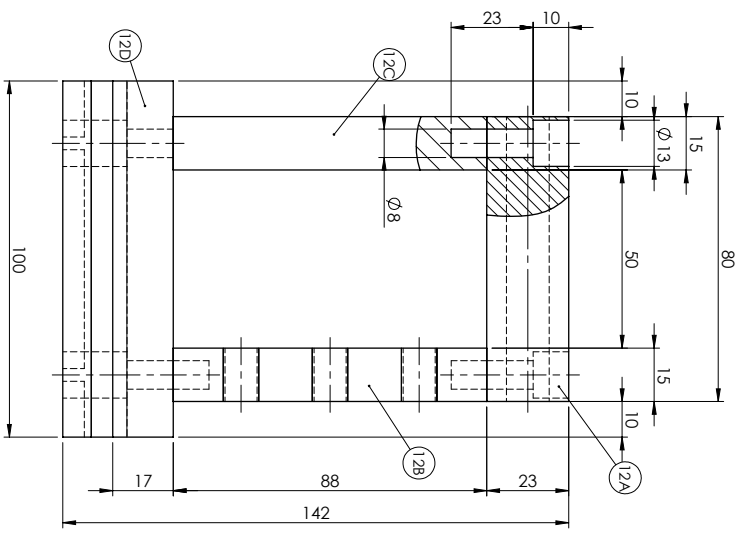
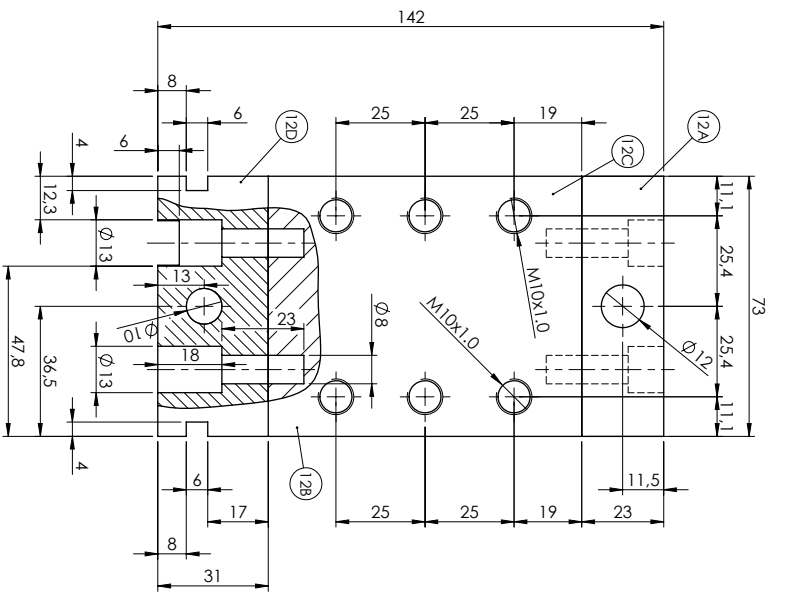
Anexo D5: Detalhamento Dimensional  
Itens: 7, 8, 9 e 10 - Página 110

REV.

0

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lopes
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

ESCALA:1:2	DETALHAMENTO: 5/22	FORMATO: A3
------------	--------------------	-------------

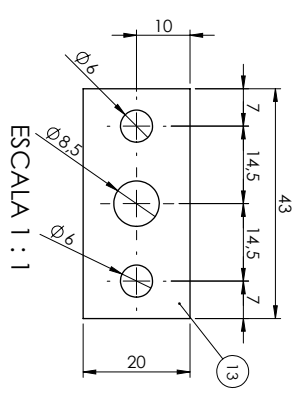
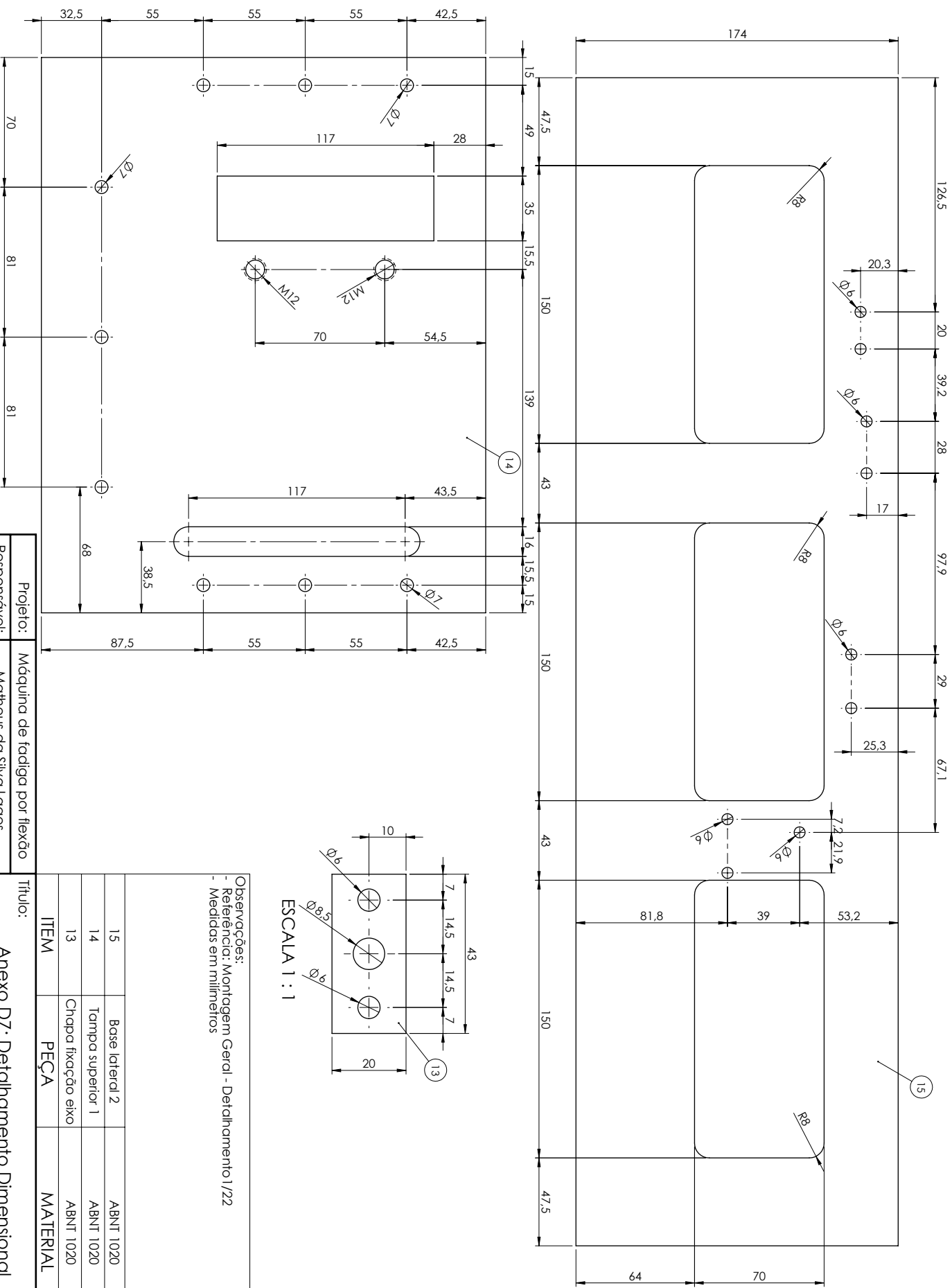


Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros  
 - O item 12 foi subdividido em 4 peças

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
12D	Peça 12D	ABNT 1020	1
12C	Peça 12C	ABNT 1020	1
12B	Peça 12B	ABNT 1020	1
12A	Peça 12A	ABNT 1020	1
12	Bloco fixador	-	1
11	Guia bloco	ABNT 1020	2

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Mathheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

Título:	Anexo D6: Detalhamento Dimensional		
Item:	Itens: 11 e 12 - Página 111		
ESCALA:	1:1.5	DETALHAMENTO:	6/22
FORMATO:			A3
REV.	0		



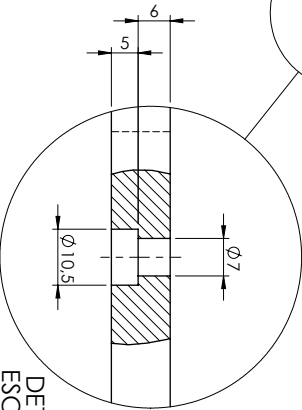
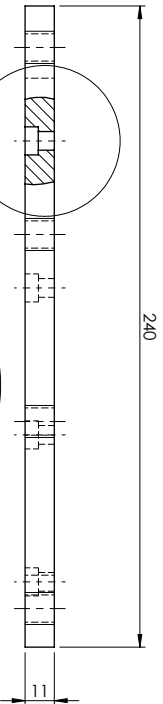
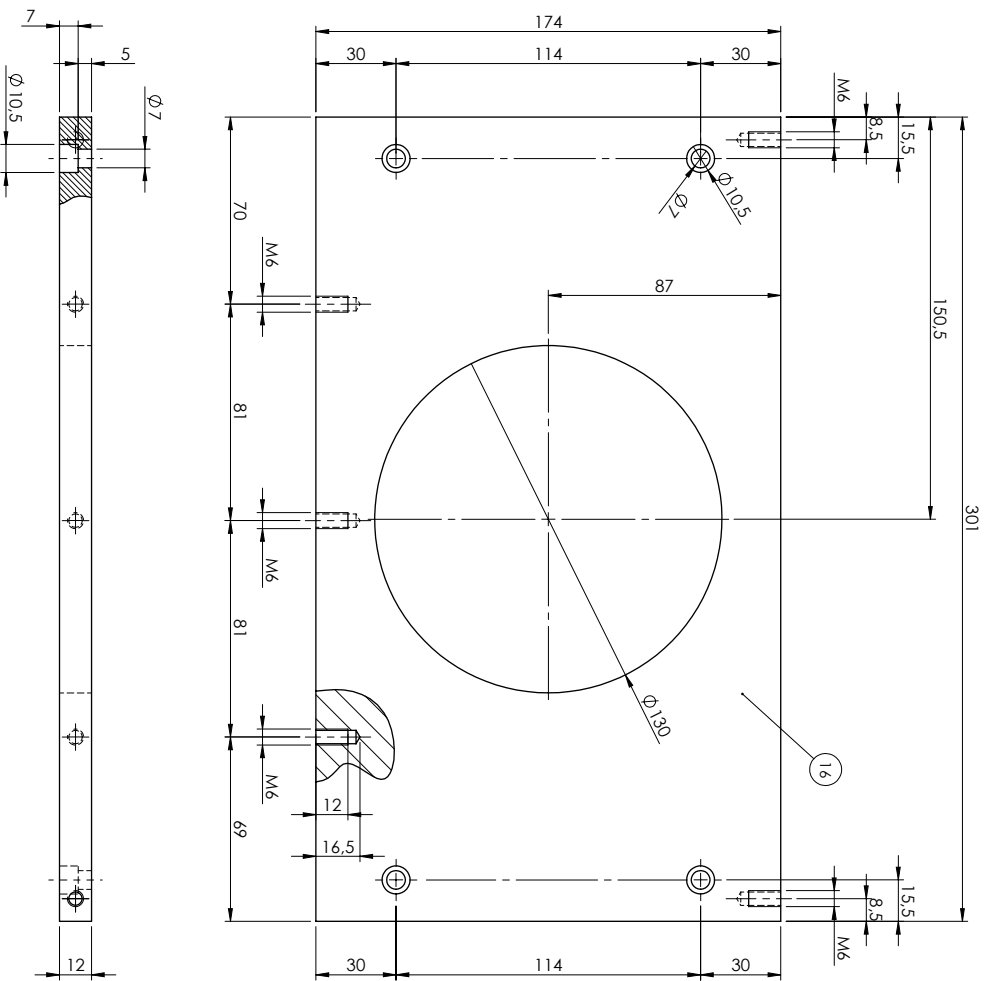
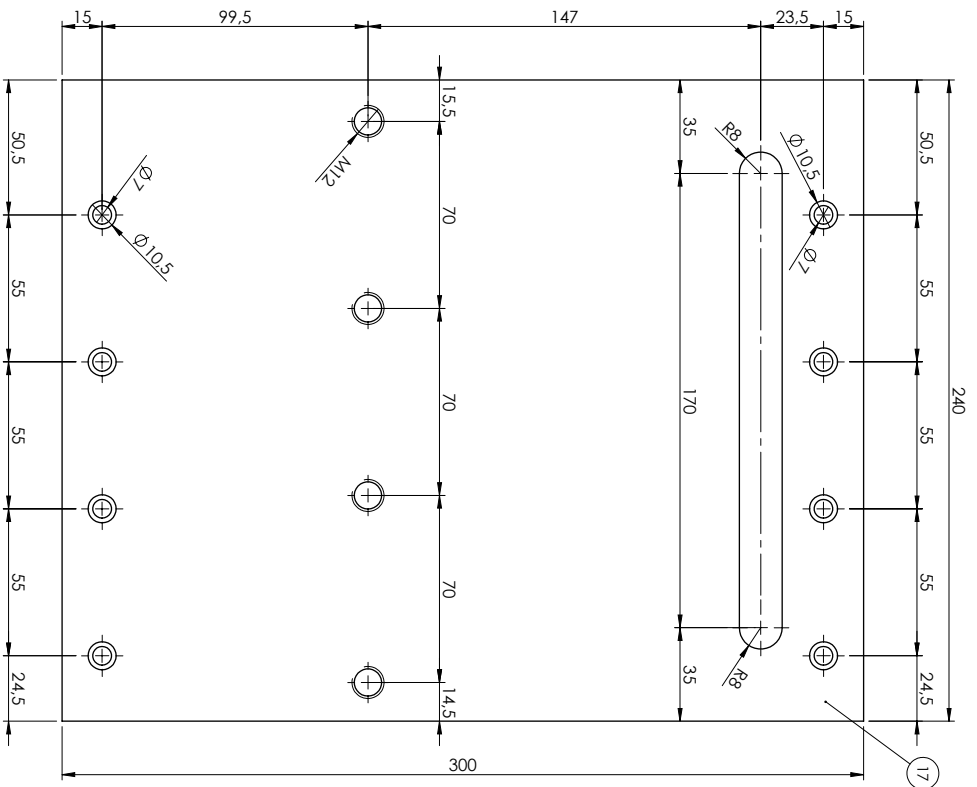
ESCALA 1 : 1

Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
15	Base lateral 2	ABNT 1020	1
14	Tampa superior 1	ABNT 1020	1
13	Chapa fixação eixo	ABNT 1020	2

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

Título:		Anexo D7: Detalhamento Dimensional	REV.
Ítems: 13, 14 e 15 - Página 112			
ESCALA: 1:2	DETALHAMENTO: 7/22	FORMATO: A3	



DETALHE G  
ESCALA 1 : 1

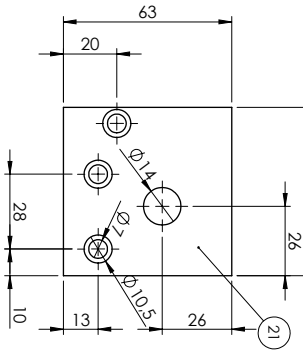
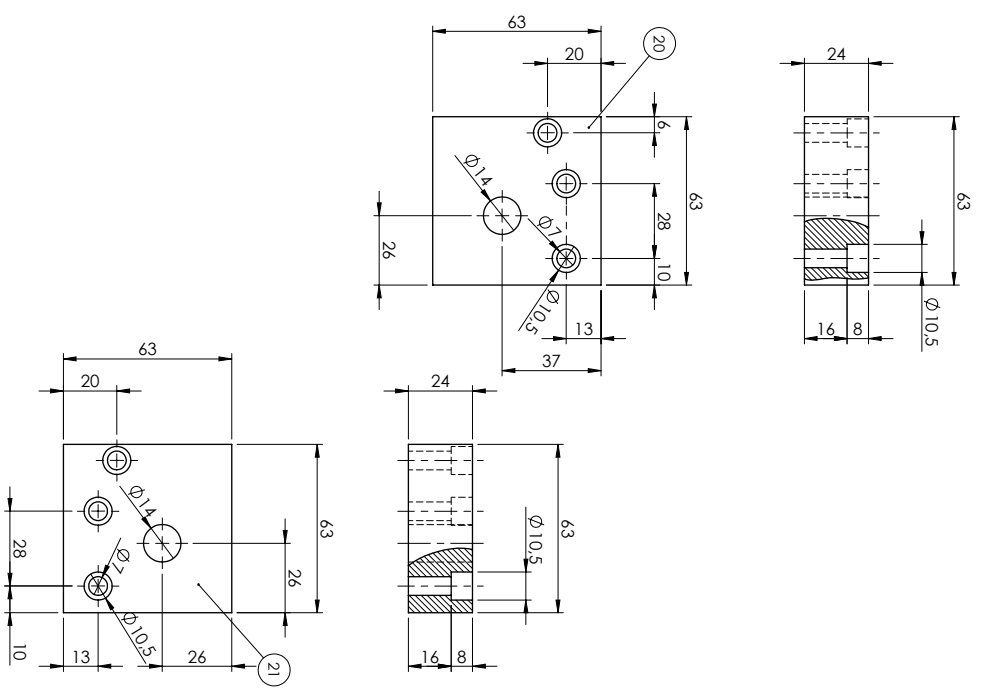
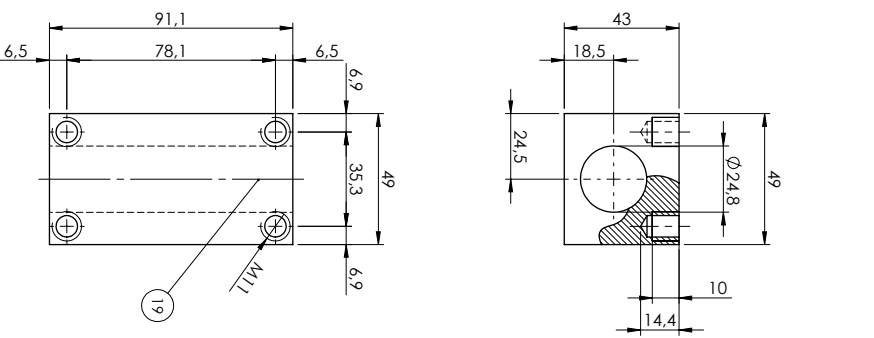
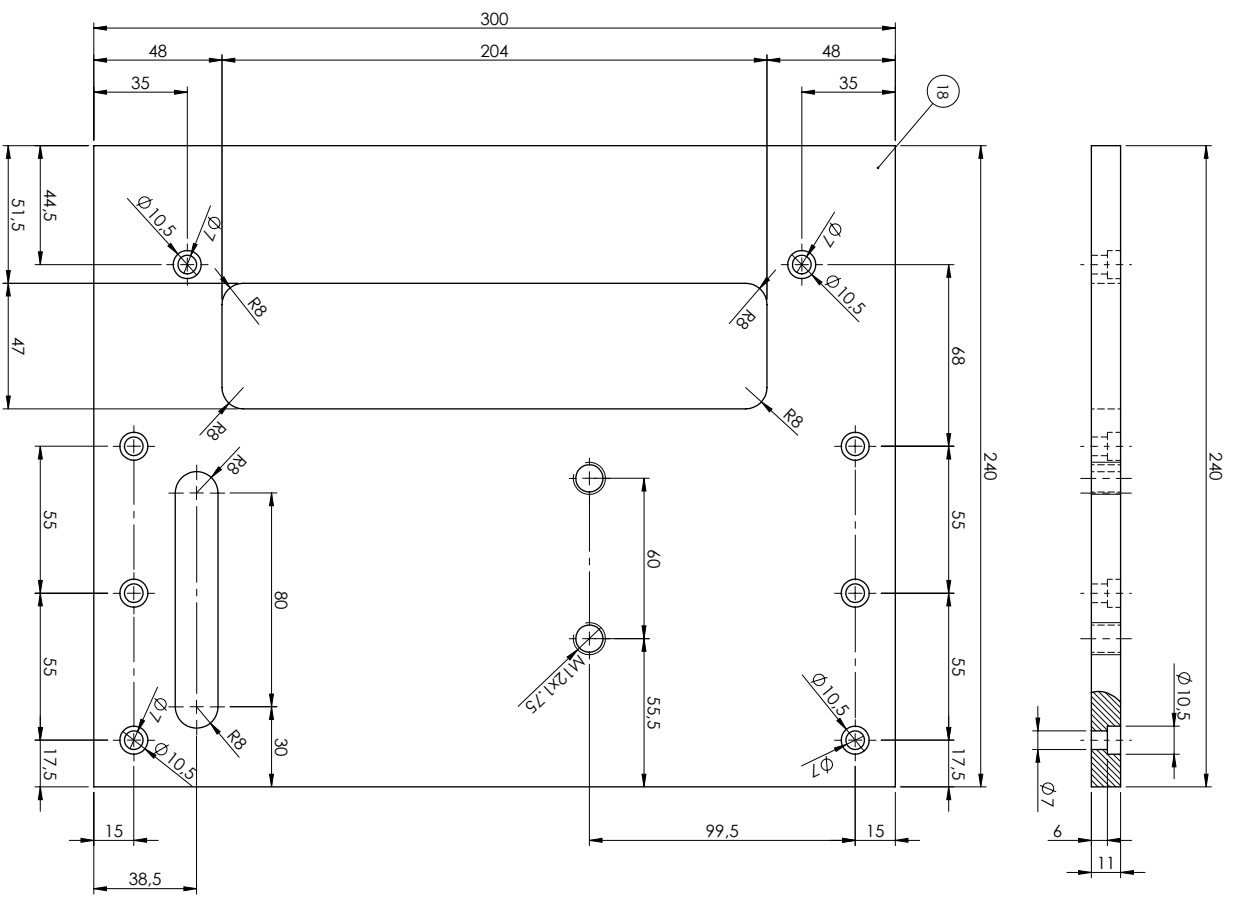
Observações:  
- Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
- Medidas em milímetros

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
17	Tampa superior 2	ABNT 1020	1
16	Base frontal	ABNT 1020	1

Anexo D8: Detalhamento Dimensional  
Itens: 16 e 17 - Página 113

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão	Título:	ESCALA:1:2	FORMATO:	A3
Responsável:	Matheus da Silva Lages	Observações:	ESCALA:1:2	DETALHAMENTO:	8/22
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão	Referência:	ESCALA:1:2	FORMATO:	A3
Data:	26/05/2017	Medidas em milímetros:	ESCALA:1:2	FORMATO:	A3



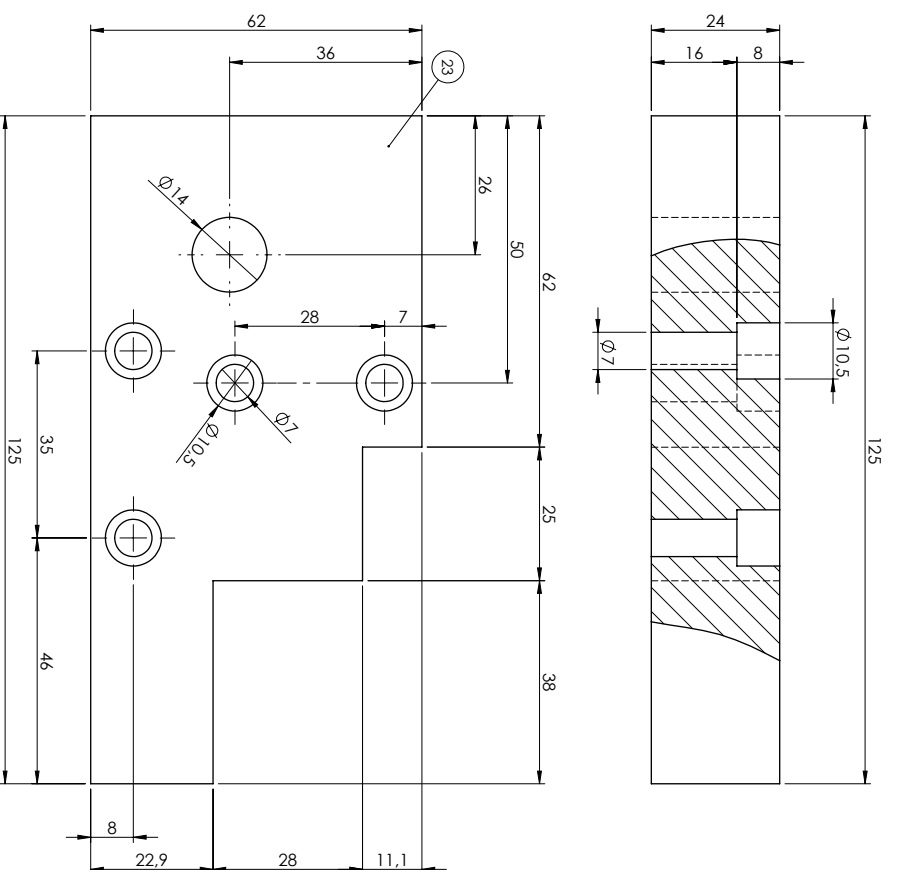
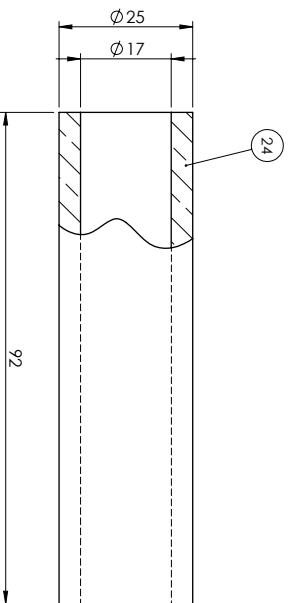
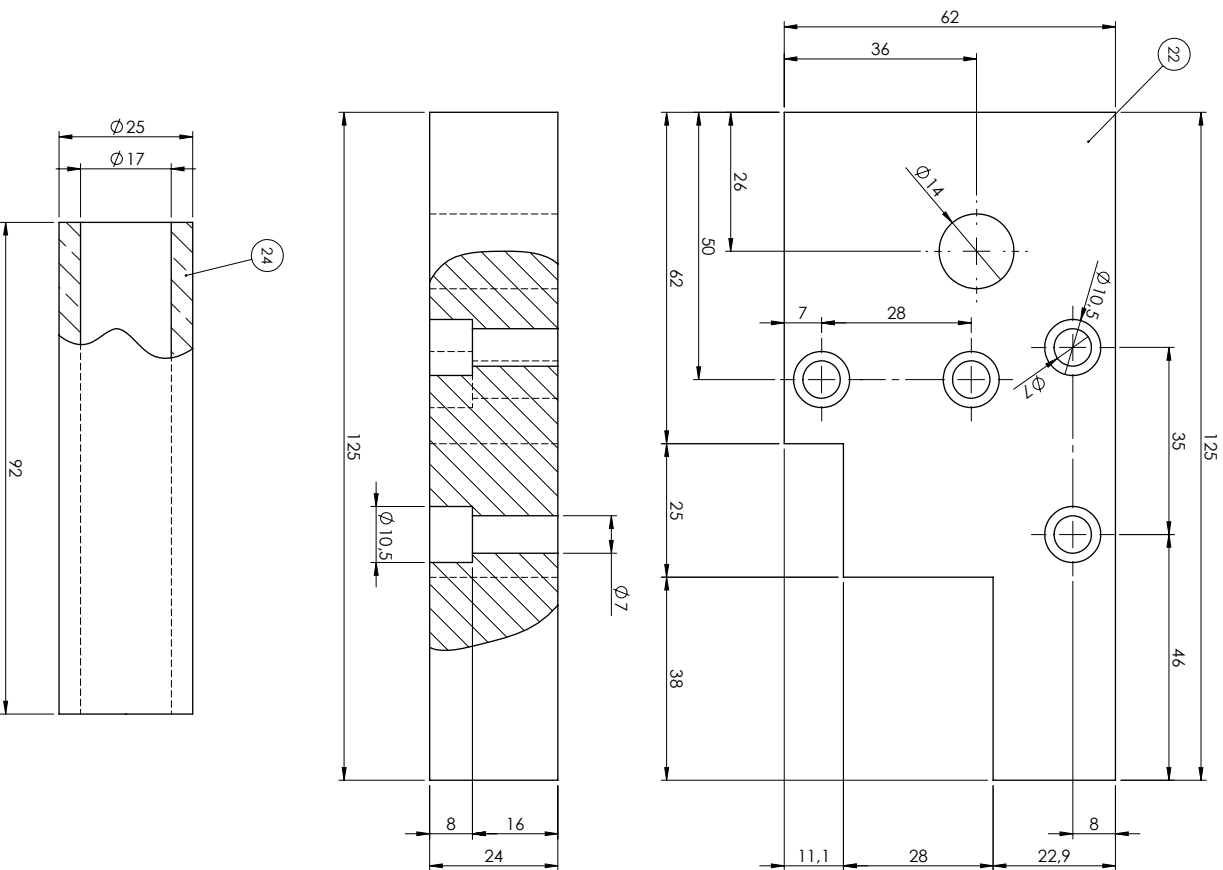


Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
21	Pé 2	ABNT 1020	1
20	Pé 1	ABNT 1020	1
19	Guia do eixo	ABNT 1020	2
18	Tampa superior 3	ABNT 1020	1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

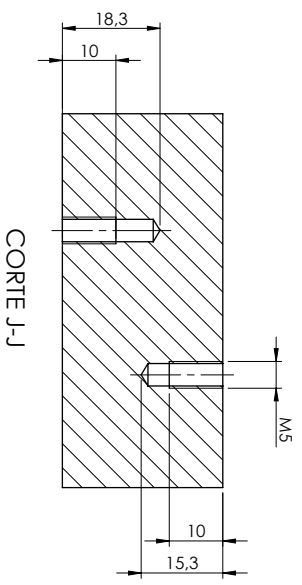
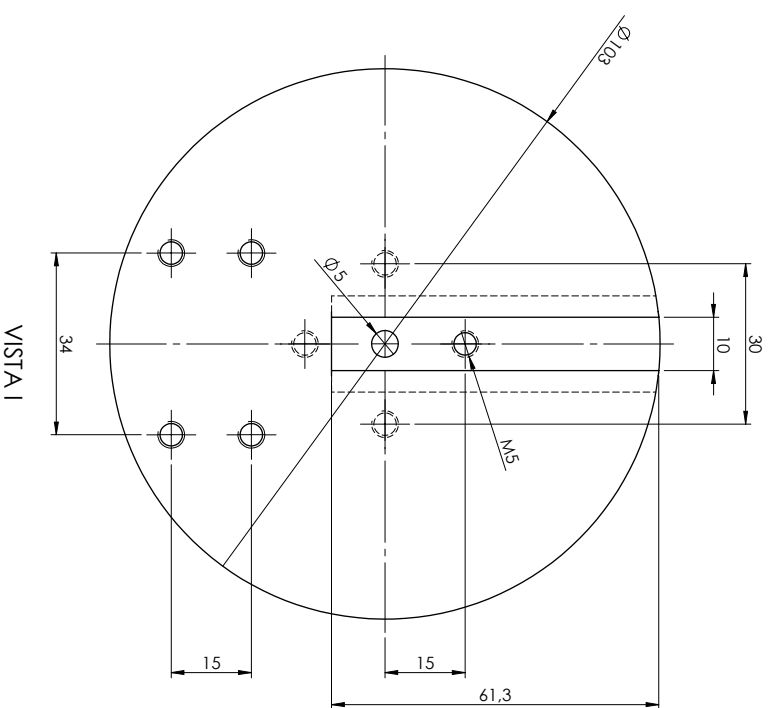
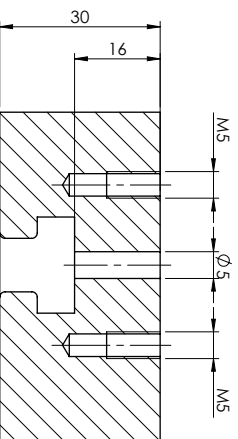
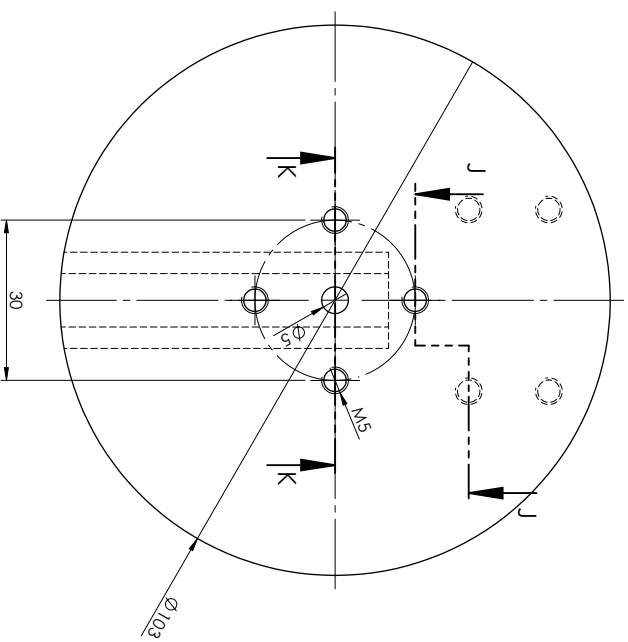
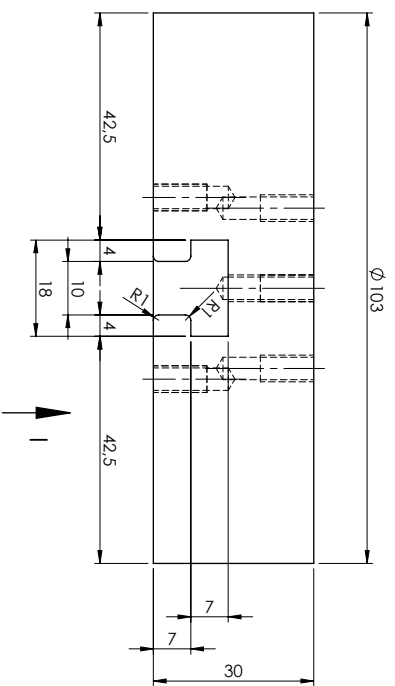
Título:	Anexo D9: Detalhamento Dimensional	REV.
ESCALA: 1:2	Itens: 18, 19, 20 e 21 - Página 114	0
DETALHAMENTO: 9/22	FORMATO: A3	



Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
24	Bucha	Bronze	2
23	Pé 4	ABNT 1020	1
22	Pé 3	ABNT 1020	1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão	Título:	Anexo D10: Detalhamento Dimensional	REV.	0
Responsável:	Matheus da Silva Lages	ESCALA:	1:1	DETALHAMENTO:	10/22
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão	FORMATO:	A3		
Data:	26/05/2017				



CORTE K-K

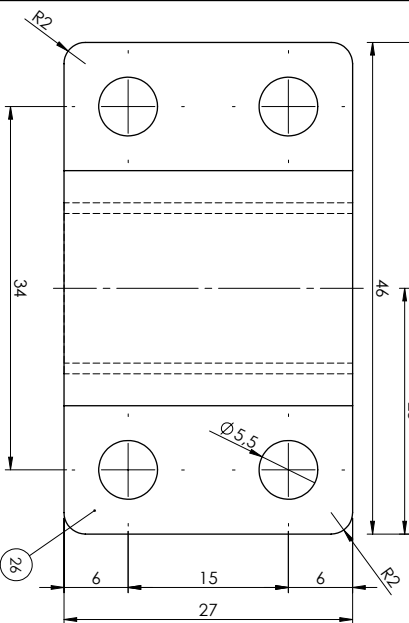
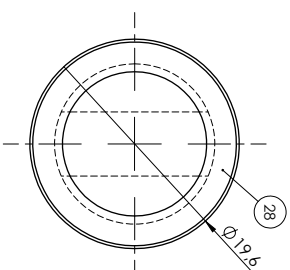
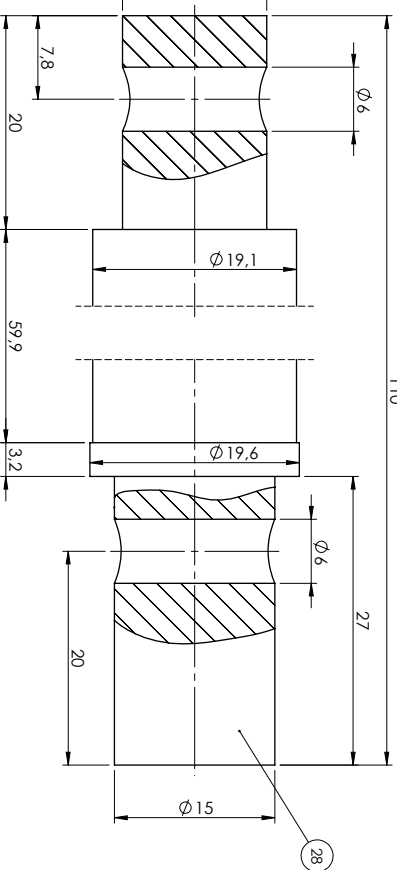
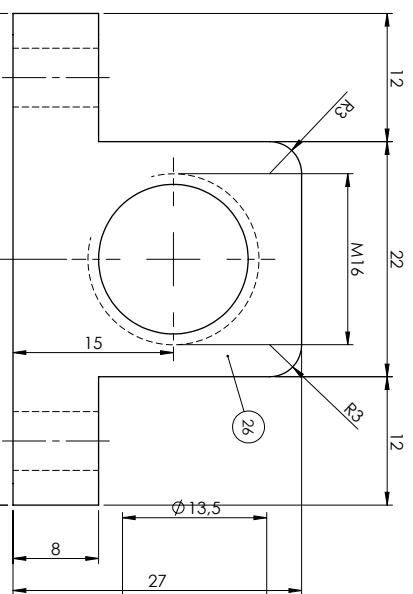
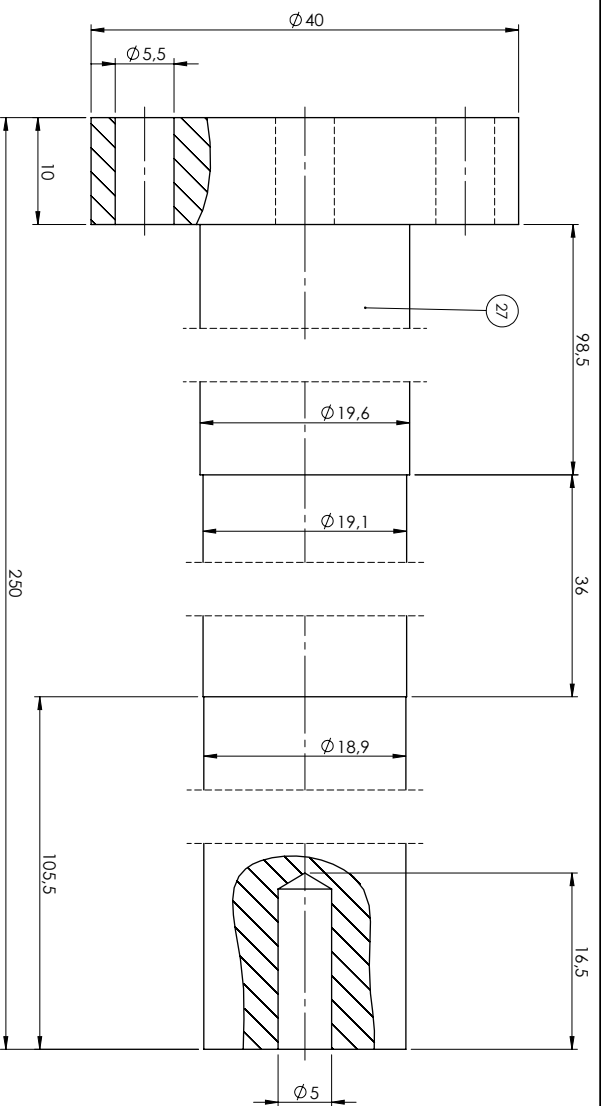
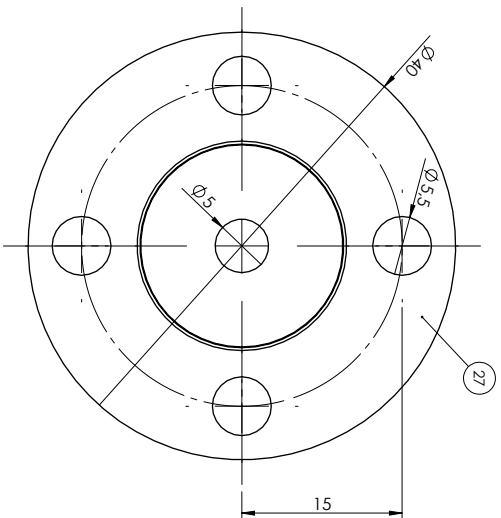
CORTE J-J

VISTA I

Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

Título:		Anexo D11: Detalhamento Dimensional		REV.	0
ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.		
25	Volante	ABNT 1045	1		
ESCALA: 1:1		DETALHAMENTO: 11/22		FORMATO: A3	



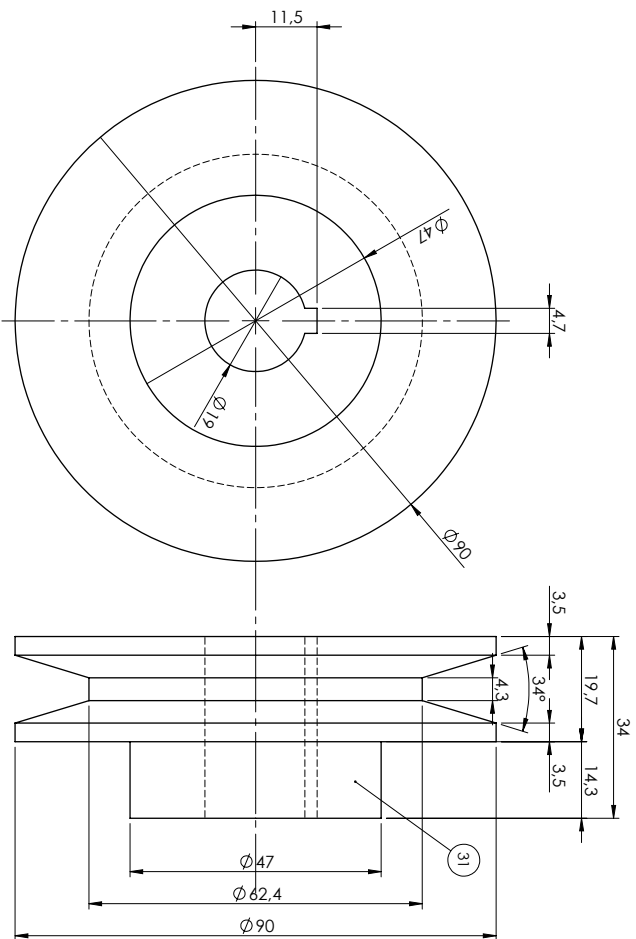
Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros  
 - Peça feita furo roscado M16 x 1,5

28	Eixo motor	ABNT 1045	1
27	Eixo movido	ABNT 1045	1
26	Peça fêmea	ABNT 1045	1
ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.

Título:  
**Anexo D12: Detalhamento Dimensional**  
 Itens: 26, 27 e 28 - Página 117

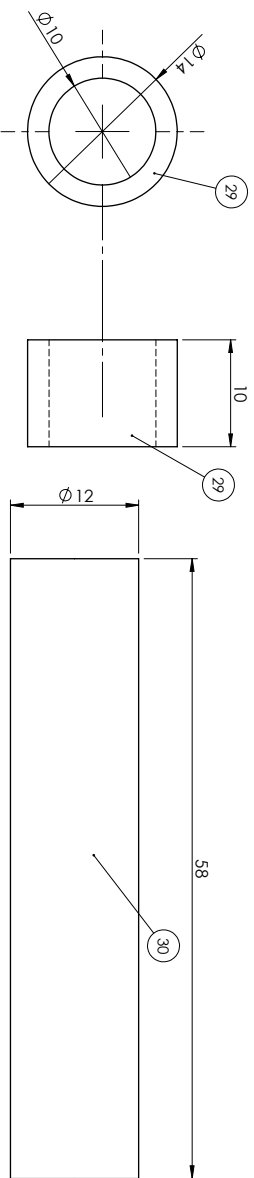
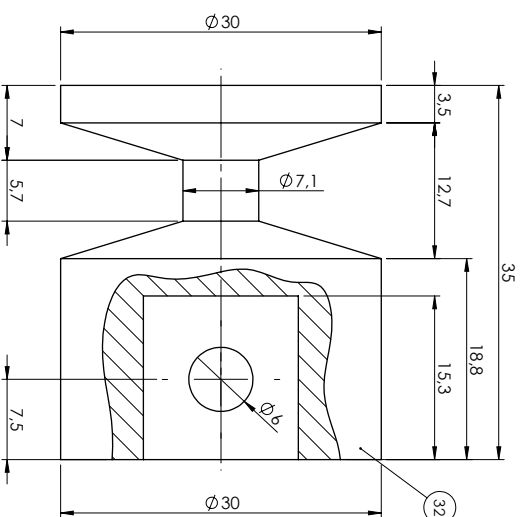
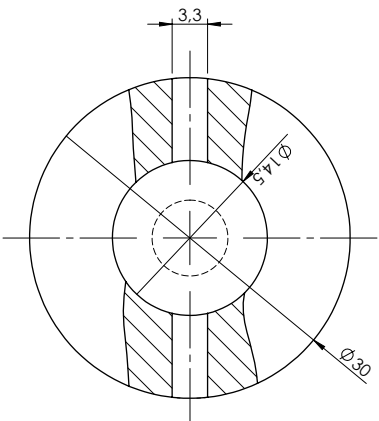
Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

ESCALA:2:1	DETALHAMENTO: 12/22	FORMATO: A3
REV. 0		



ESCALA 1:1

ESCALA 1:1



Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros  
 - Rolamento de rolos de agulha

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
32	Polia motora	Alumínio	1
31	Polia movida	Alumínio	1
30	Pino 2	ABNT 1045	1
29	Rolamento 10x14x10	-	2

Título:

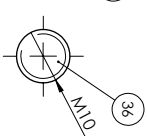
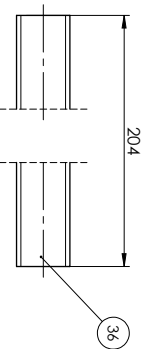
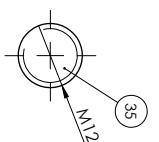
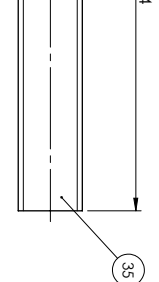
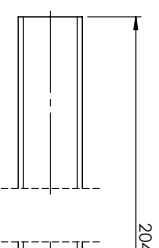
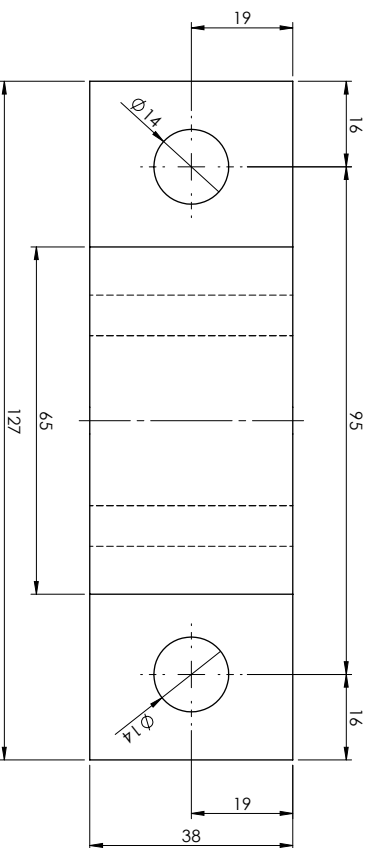
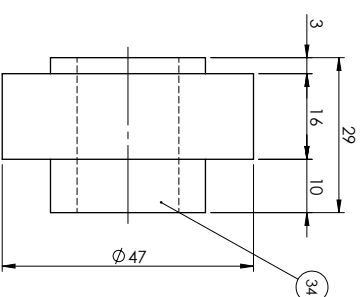
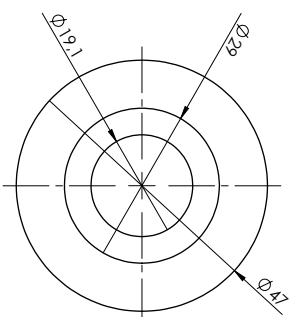
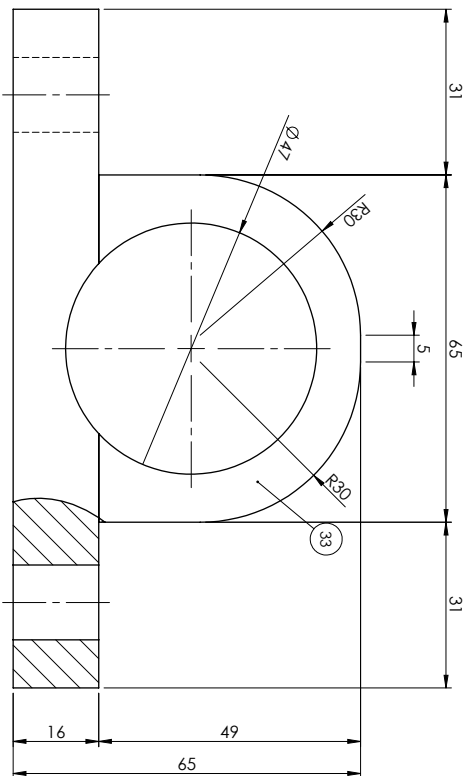
Anexo D13: Detalhamento Dimensional  
 Itens: 29, 30, 31 e 32 - Página 118

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

ESCALA: 2:1	DETALHAMENTO: 13/22	FORMATO: A3
-------------	---------------------	-------------

REV.

0

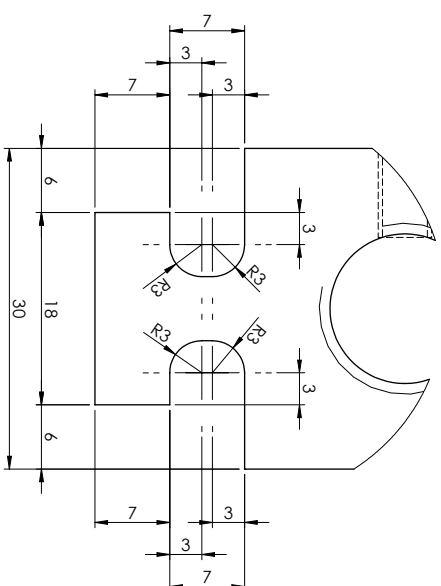
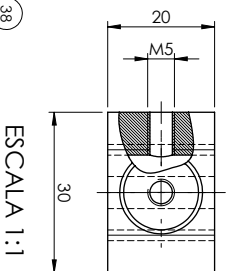
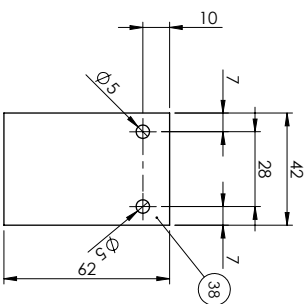
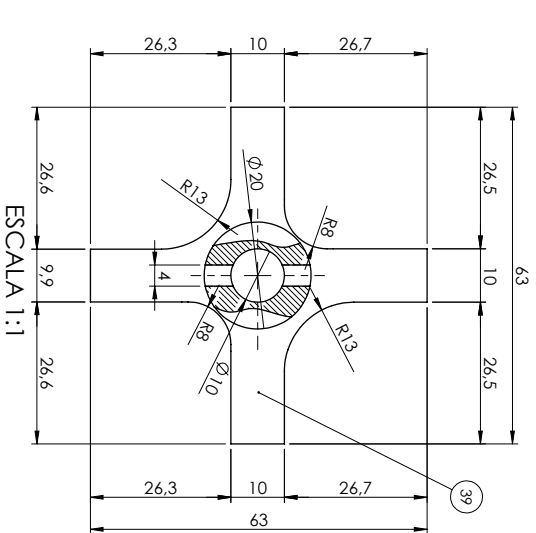
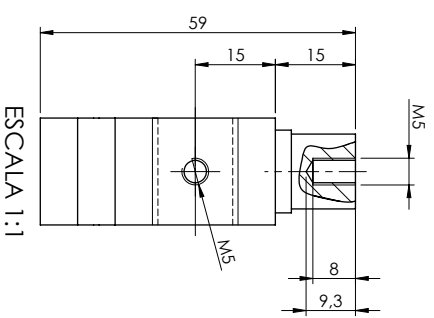
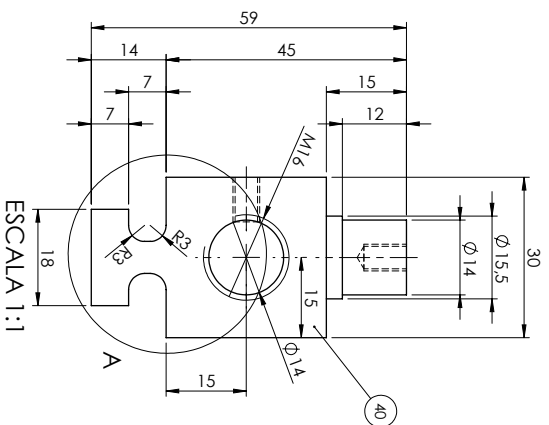
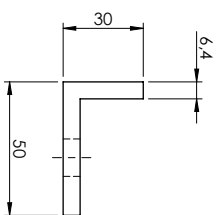
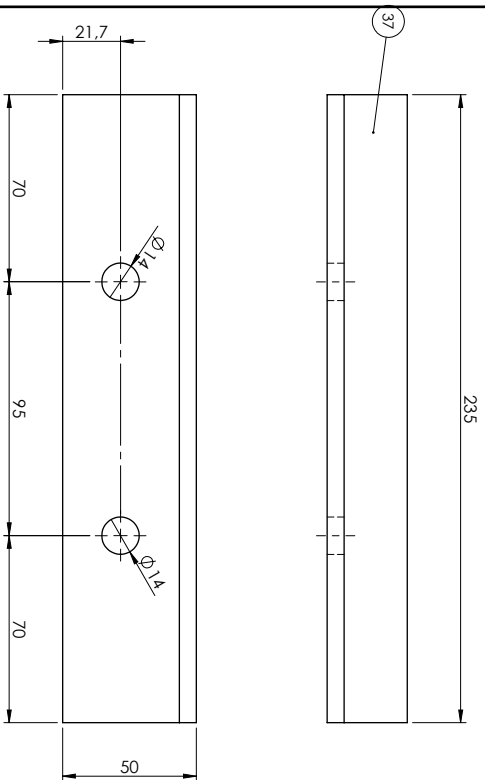


Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros  
 - Rolamentos de rolos cilíndricos  
 - Mancais e rolamentos adquiridos em pares

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
36	Barra rosçada M10	Aço	1
35	Barra rosçada M12	Aço	1
34	Rolamento 19,05	-	5
33	Mancais	-	5

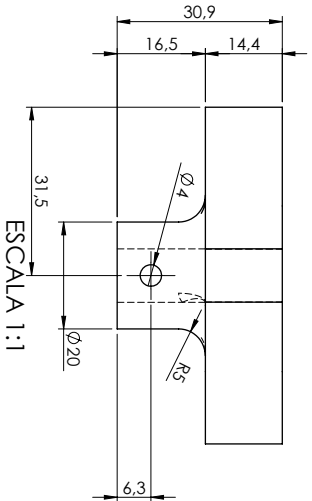
Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

Título:	Anexo D14: Detalhamento Dimensional	REV.	0
Itens:	33, 34, 35 e 36 - Página 119		
ESCALA: 1:1	DETALHAMENTO: 14/22	FORMATO:	A3



DETALHE A  
ESCALA 2 : 1

ESCALA 1 : 1



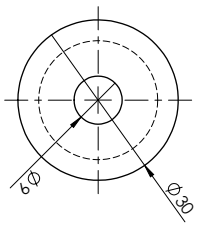
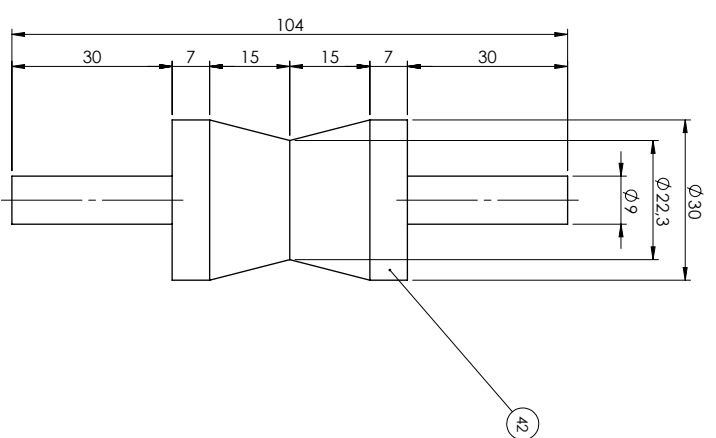
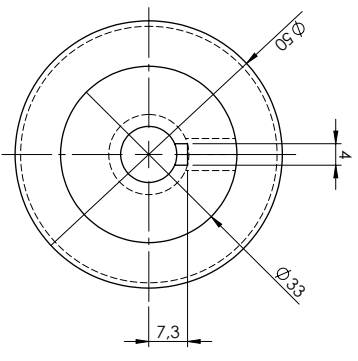
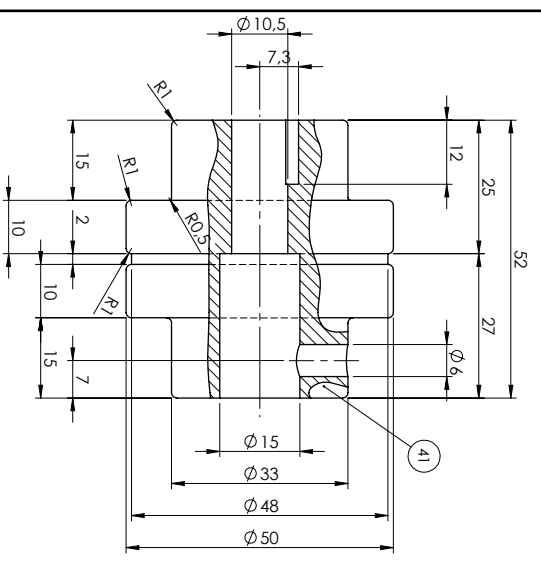
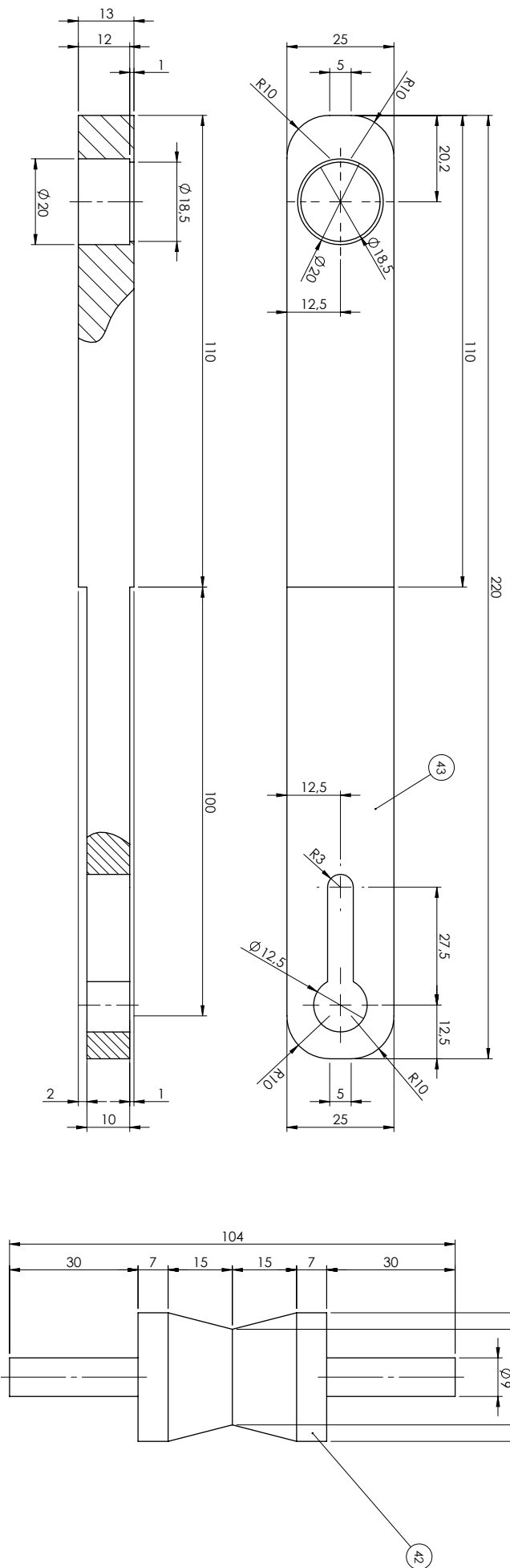
ESCALA 1 : 1

Observações:  
- Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
- Medidas em milímetros

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
40	Pino variação amplitude	ABNT 1045	1
39	Manipulo	Plástico	1
38	Suporte fixação cantoneira 1	ABNT 1020	2
37	Cantoneira de apoio 1	Aço	1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lopes
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

Título:	Anexo D15: Detalhamento Dimensional Itens: 37, 38, 39 e 40 - Página 120	REV.	0
ESCALA:1:2	DETALHAMENTO: 15/22	FORMATO:	A3

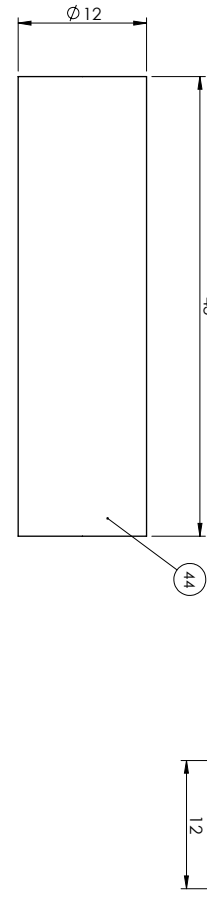
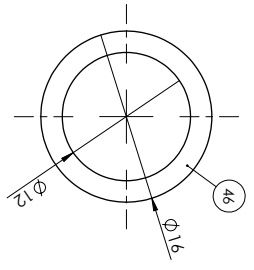
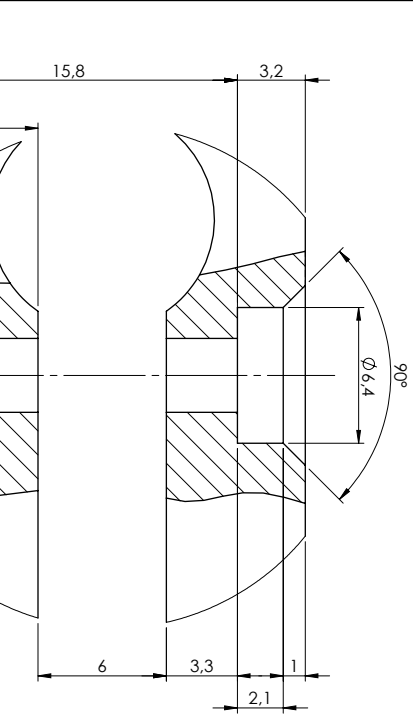
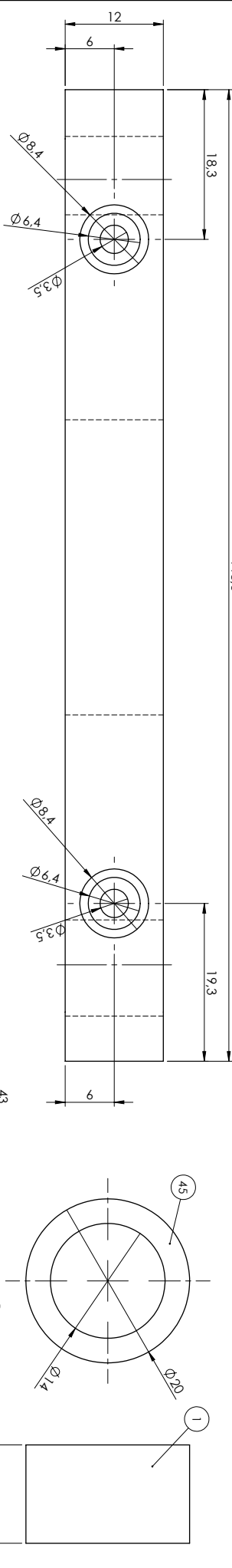
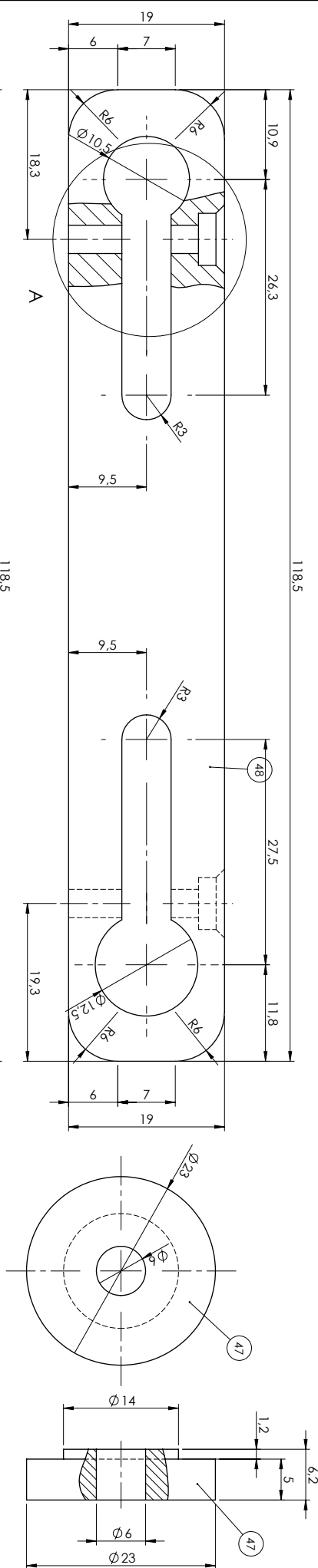


Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros  
 - Acoplamento flexível Normex E - 50

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
43	Bielã	ABNT 1045	1
42	Coxim 1	Borracha	4
41	Acoplamento flexível	-	1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão	Título:	Anexo D16: Detalhamento Dimensional	REV.	0
Responsável:	Mathheus da Silva Lages		Itens: 41, 42 e 43 - Página 1/21		
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão				
Data:	26/05/2017	ESCALA: 1:1	DETALHAMENTO: 16/22	FORMATO:	A3





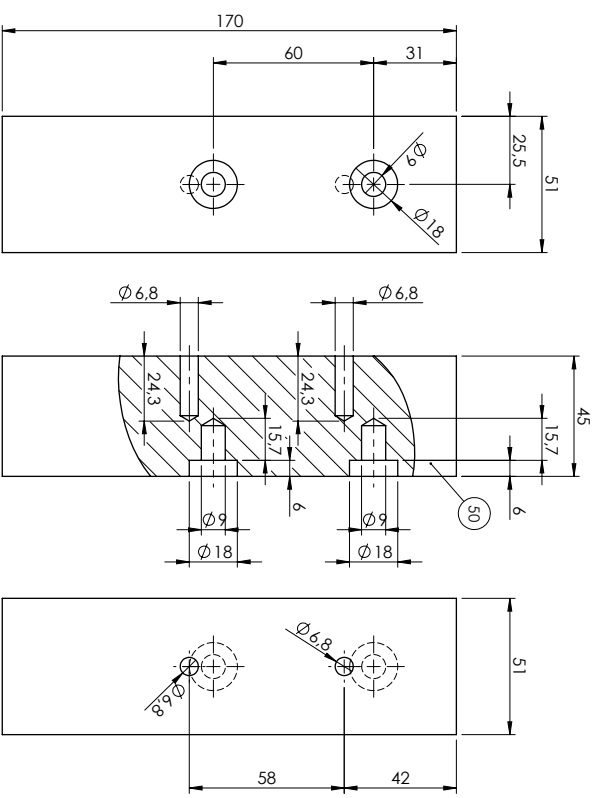
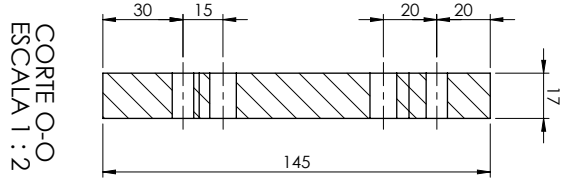
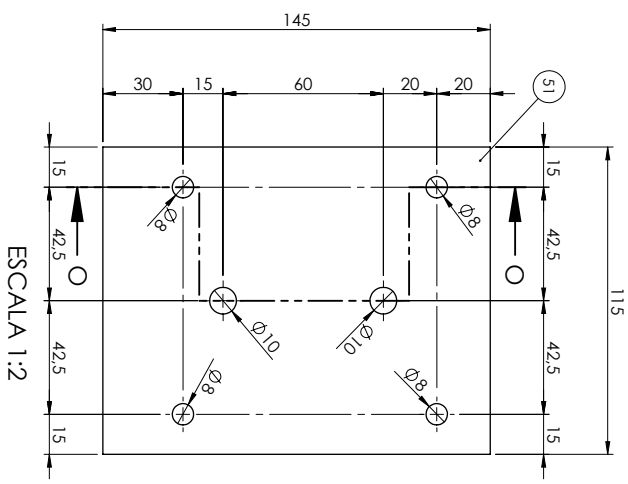
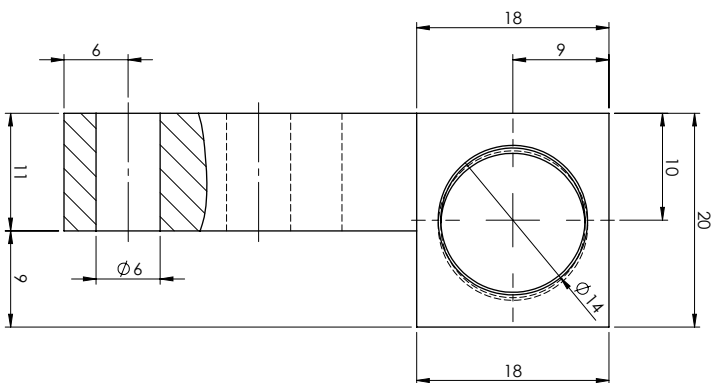
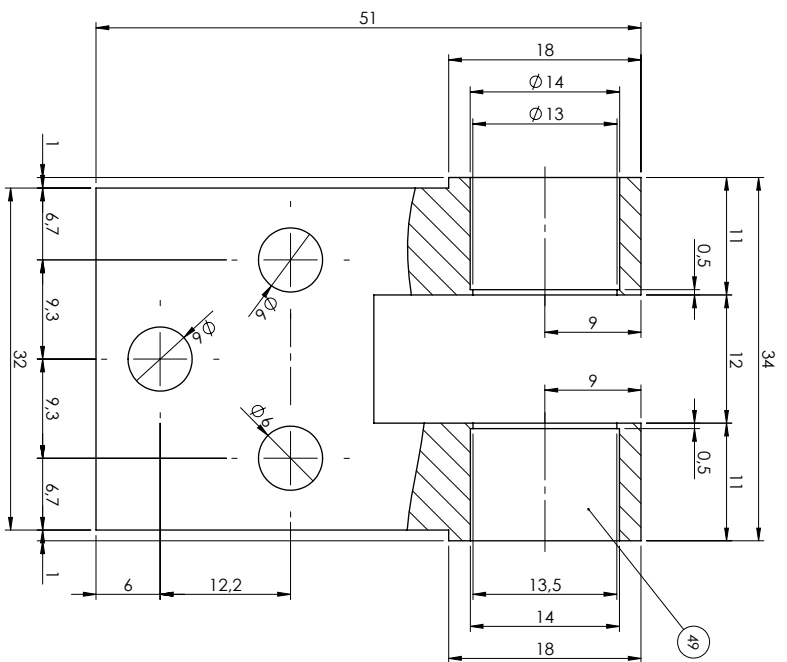
Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros  
 - Rolamentos de rolos de agulha

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
48	Haste	ABNT 1045	1
47	Trova branca	ABNT 1020	1
46	Rolamento 12x16x10	-	4
45	Rolamento 14x20x12	-	1
44	Pino 3	ABNT 1045	1

DETALHE A  
 ESCALA 4 : 1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

Título:	Anexo D17: Detalhamento Dimensional	REV.	0
Itens:	44, 45, 46, 47 e 48 - Página 122		
ESCALA: 2:1	DETALHAMENTO: 17/22	FORMATO:	A3

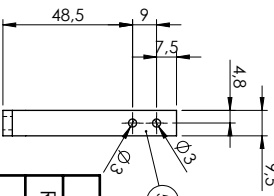
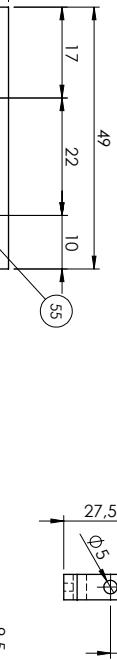
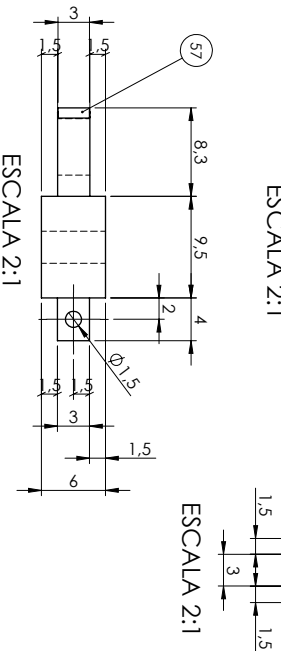
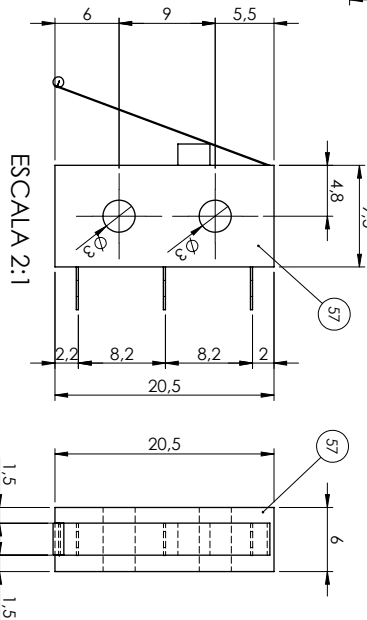
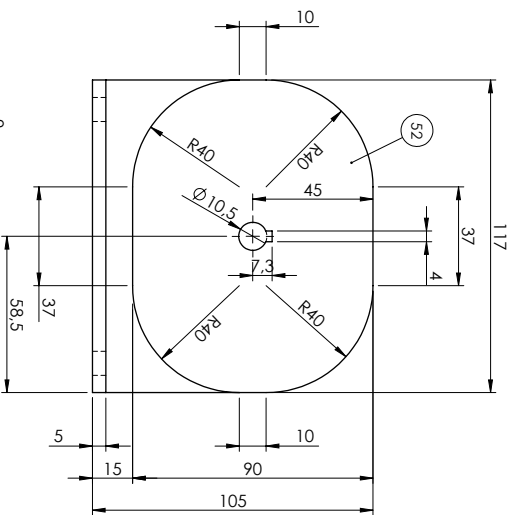
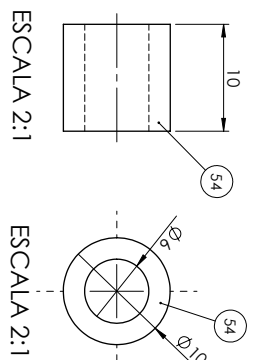
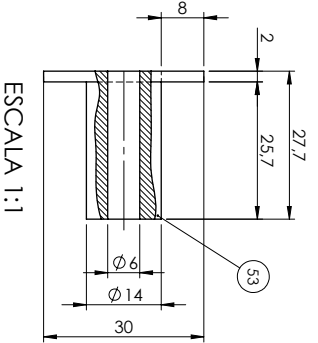
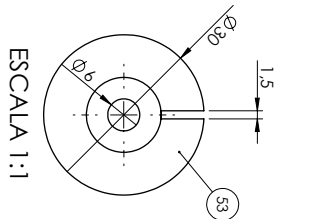
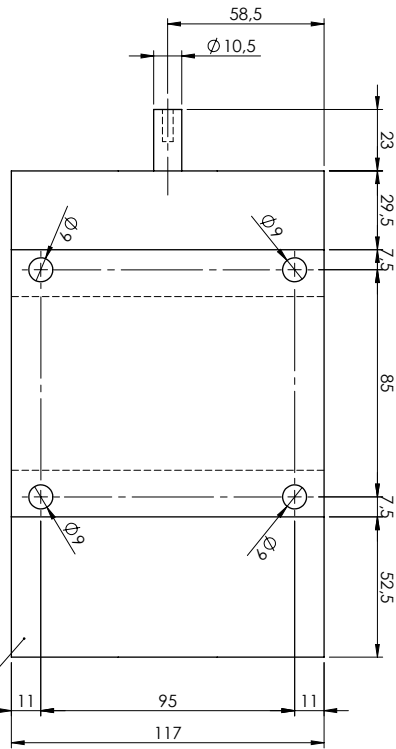
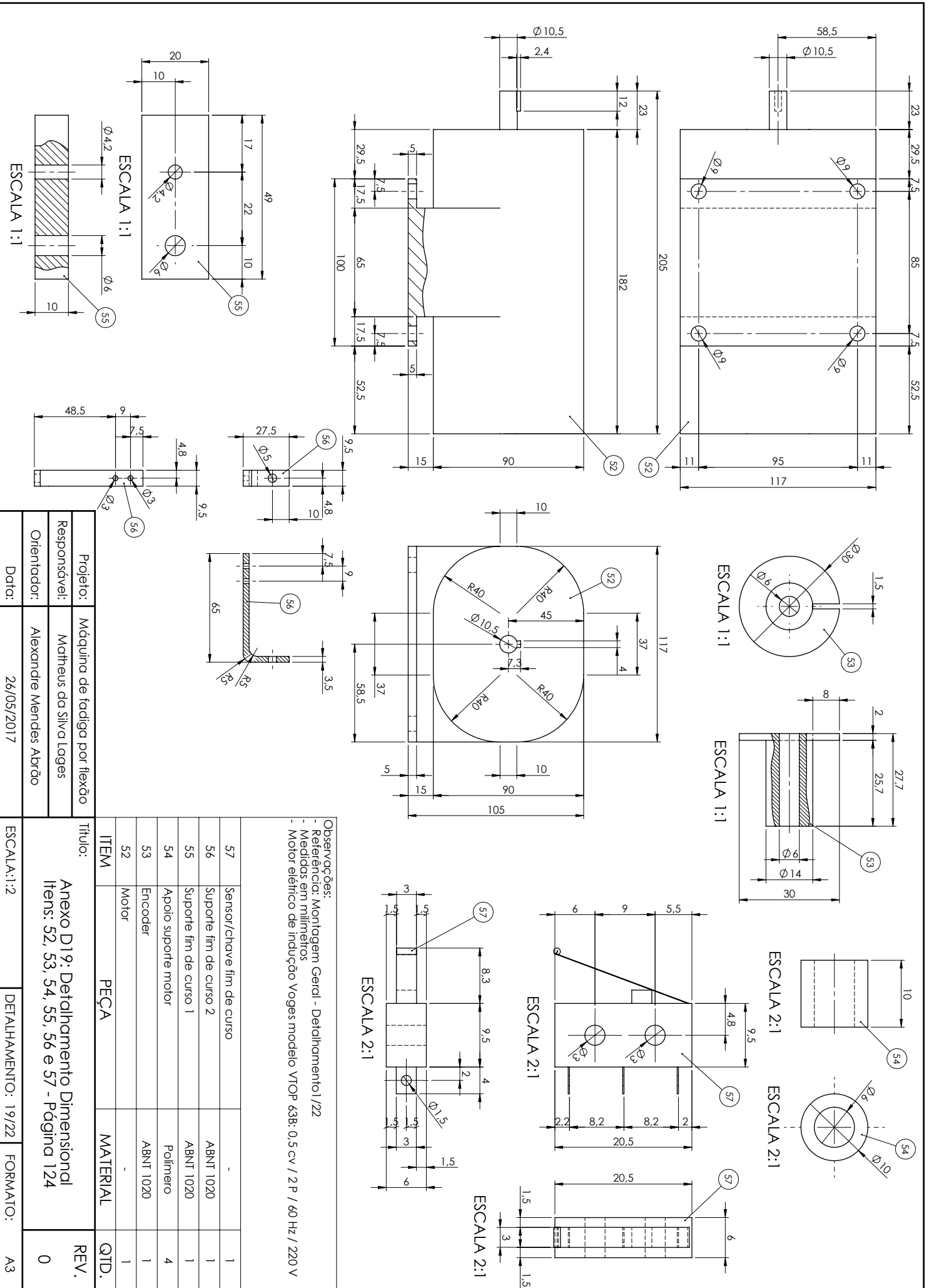


Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
51	Fixação motor	Medeira	1
50	Suporte fixação do motor	ABNT 1020	1
49	Fixador móvel	ABNT 1045	1

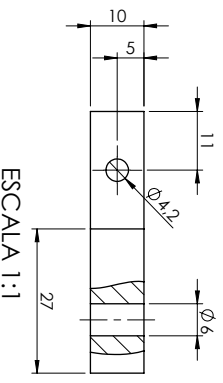
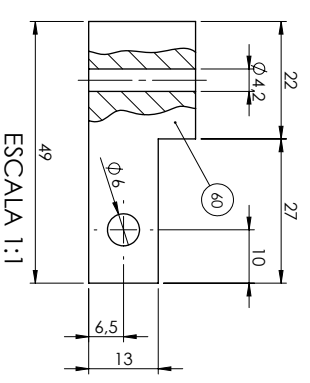
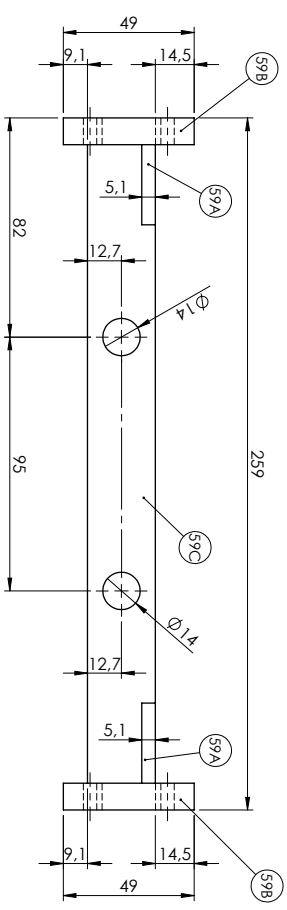
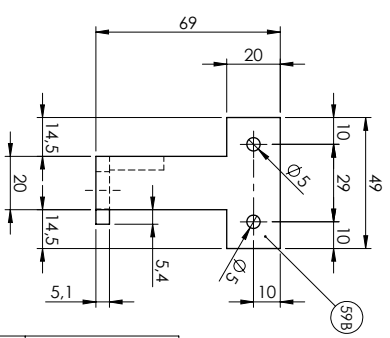
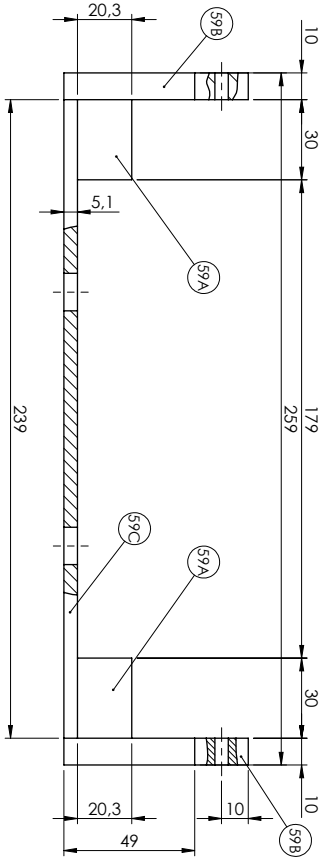
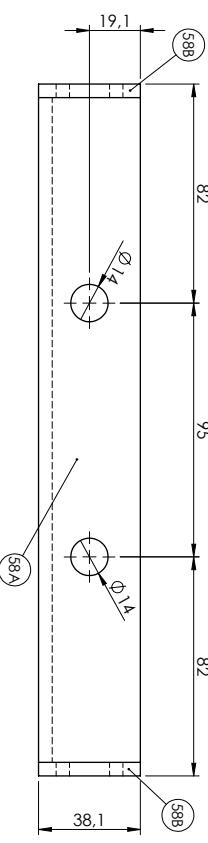
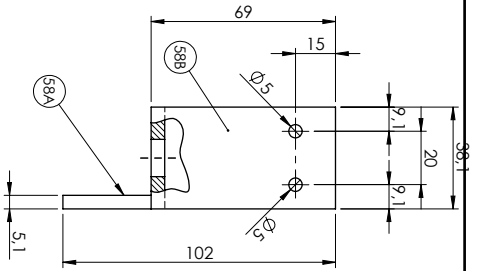
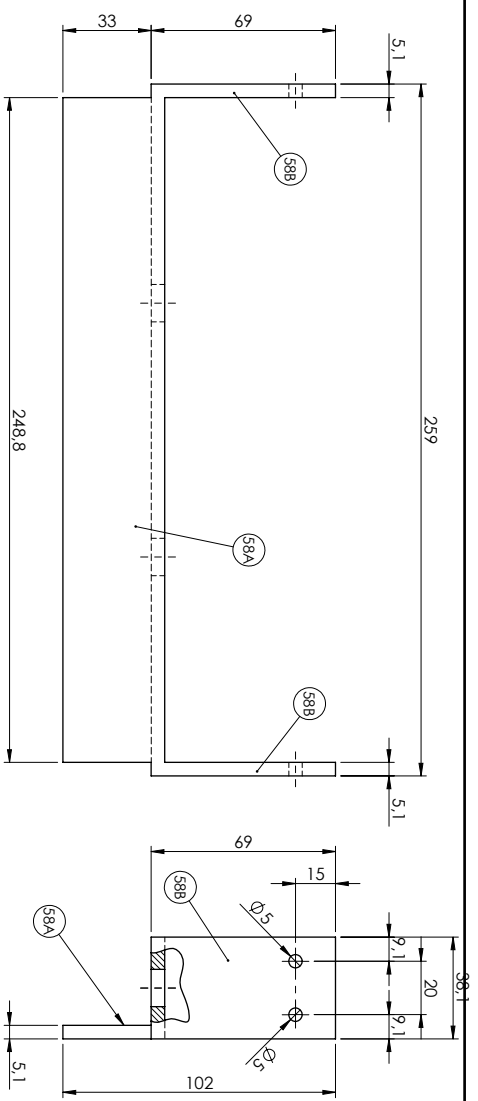
Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros

Título:	Anexo D18: Detalhamento Dimensional	REV.	0
ESCALA:2:1	DETALHAMENTO: 18/22	FORMATO:	A3



Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

Título:	Anexo D19: Detalhamento Dimensional
Itens:	52, 53, 54, 55, 56 e 57 - Página 124
Rev.:	0
Detalhamento:	19/22
Formato:	A3

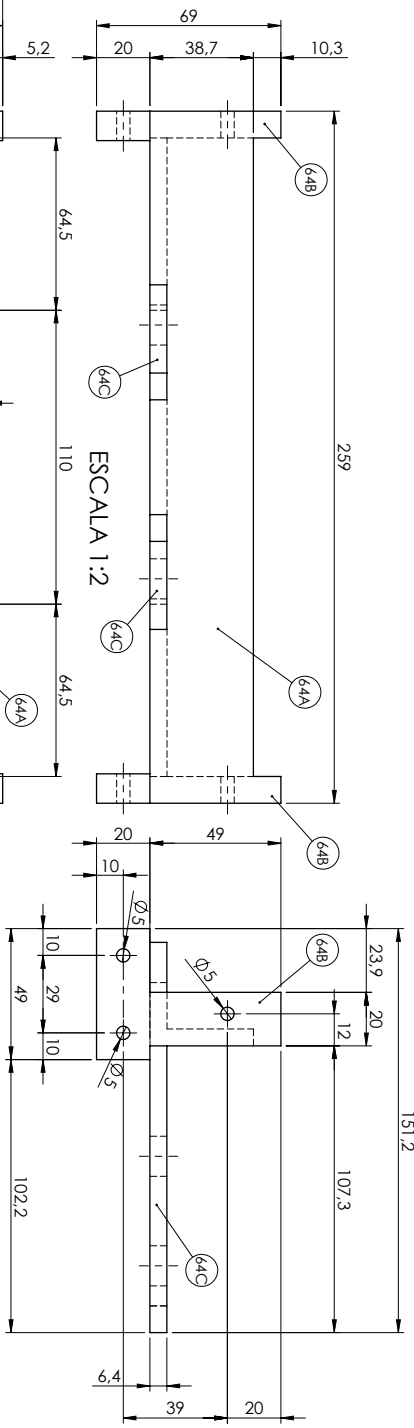
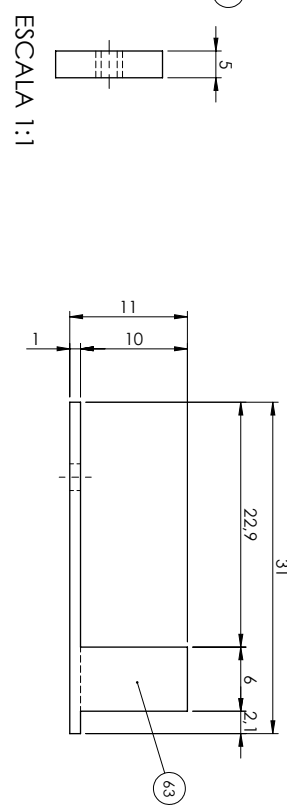
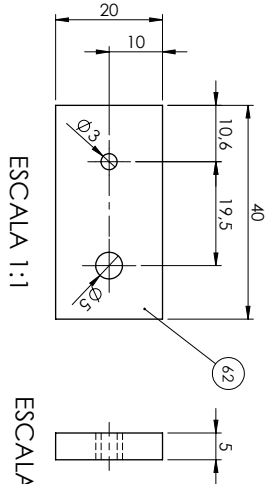
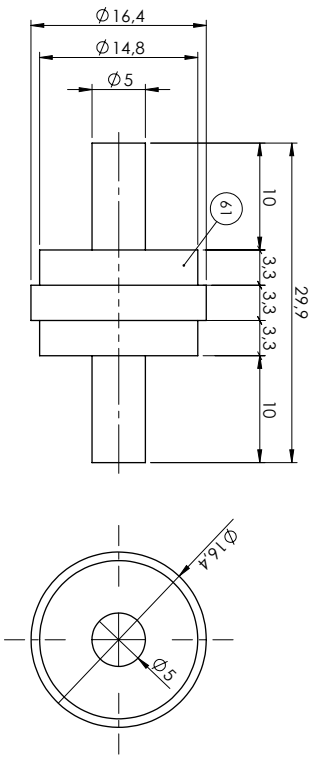


Observações:  
 - Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros  
 - Itens 58 e 59 foram subdivididos

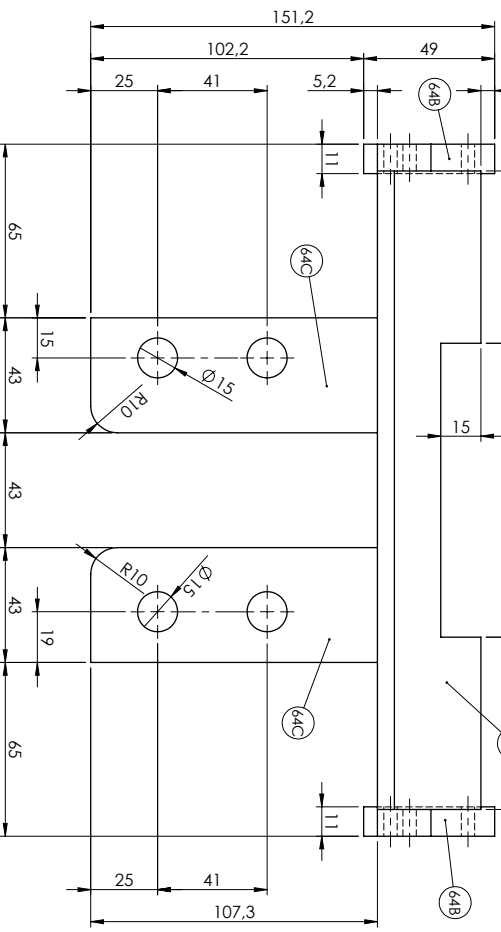
ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
60	Suporte sensor contagem de ciclos 1	ABNT 1020	1
59 C	Cantoneira 3	Aço	1
59 B	Fixação cantoneira 3-b	ABNT 1020	2
59 A	Fixação cantoneira 3-a	ABNT 1020	2
59	Cantoneira de apoio 2	-	1
58 B	Fixação cantoneira 2	ABNT 1020	2
58 A	Cantoneira 2	Aço	1
58	Cantoneira de apoio 1	-	1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Mathheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

Título:	Anexo D20: Detalhamento Dimensional	REV.	0
Item:	Itens: 58, 59 e 60 - Página 1/25	DETALHAMENTO:	20/22
Formato:	ESCALA: 1:2	FORMATO:	A3



ESCALA 1:2



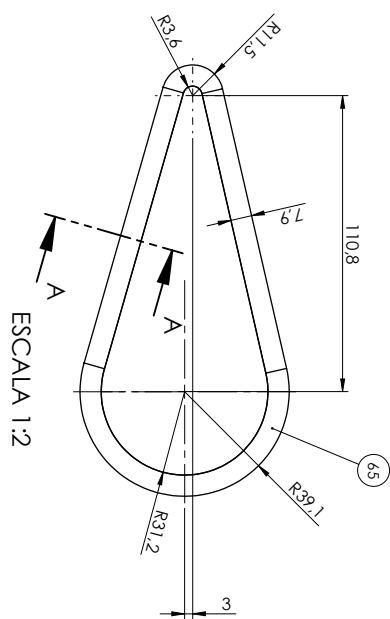
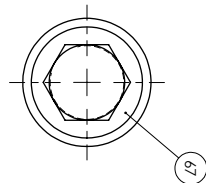
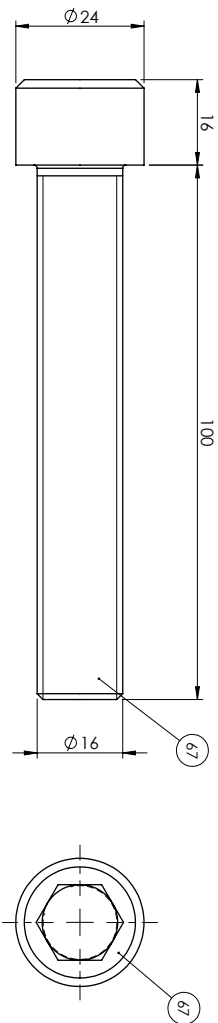
ESCALA 1:2

Observações:  
 - Referências: Montagem Geral - Detalhamento 1/22  
 - Medidas em milímetros  
 - Item 64 subdividido

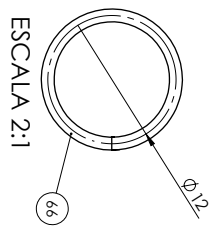
ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
64C	Apoio mancal	Aço	2
64B	Ficção cantoneira 4	ABNT 1020	2
64A	Cantoneira 4	Aço	1
64	Cantoneira de apoio 4	-	1
63	Sensor contagem de ciclos	-	1
62	Suporte contagem de ciclos 2	ABNT 1020	1
61	Coxim 2	Borracha	1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão
Responsável:	Matheus da Silva Lages
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão
Data:	26/05/2017

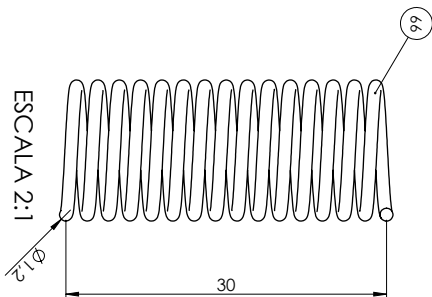
Título:	Anexo D21: Detalhamento Dimensional	REV.	0
Item:	Itens: 61, 62, 63 e 64 - Página 126	DETALHAMENTO:	21/22
Formato:	ESCALA:2:1	FORMATO:	A3



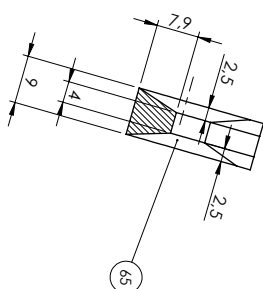
ESCALA 1:2



ESCALA 2:1



ESCALA 2:1



CORTE A-A

- Observações:
- Referência: Montagem Geral - Detalhamento 1/22
  - Medidas em milímetros
  - Correia em V lisa, perfil A, tamanho 15
  - Parafuso M16, passo 1,5

ITEM	PEÇA	MATERIAL	QTD.
67	Parafuso variação amplitude	-	1
66	Mola	-	1
65	Correia	Borracha	1

Projeto:	Máquina de fadiga por flexão	Título:	Anexo D22: Detalhamento Dimensional	REV.	0
Responsável:	Matheus da Silva Lopes	Ítem:	65, 66 e 67 - Página 127		
Orientador:	Alexandre Mendes Abrão	ESCALA: 1:1	DETALHAMENTO: 22/22	FORMATO:	A3
Data:	26/05/2017				