

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

JONATHAN MACIEL ZIEHLSDORFF

PROJETO MECÂNICO DE UM EQUIPAMENTO DIDÁTICO PARA ENSAIO DE
FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA EM BARRAS CILÍNDRICAS

Jaraguá do Sul

03 de julho de 2017

JONATHAN MACIEL ZIEHLSDORFF

PROJETO MECÂNICO DE UM EQUIPAMENTO DIDÁTICO PARA ENSAIO DE
FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA EM BARRAS CILÍNDRICAS

Monografia apresentada ao
Curso Superior de
Tecnologia em Fabricação
Mecânica do Campus
Jaraguá do Sul - Rau do
Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção
do diploma de Tecnólogo
em Fabricação Mecânica.

Orientador: Eduardo
Cardoso Castaldo, Me.

Jaraguá do Sul

03 de julho de 2017

Ziehlsdorff, Jonathan Maciel.

PROJETO MECÂNICO DE UM EQUIPAMENTO DIDÁTICO PARA ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA EM BARRAS CILÍNDRICAS / Jonathan Maciel Ziehlsdorff; orientação de Eduardo Cardoso Castaldo. Jaraguá do Sul, SC, 2017.

80p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Jaraguá do Sul - Rau, Curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Jaraguá do Sul, 2017.

Orientador: Eduardo Cardoso Castaldo.

1. Fadiga. 2. Flexão Rotativa. 3. Projeto. 4. Máquina. 5. Metodologia de Projeto. I. Eduardo Cardoso Castaldo.

CDD 001.4

JONATHAN MACIEL ZIEHLSDORFF

PROJETO MECÂNICO DE UM EQUIPAMENTO DIDÁTICO PARA ENSAIO DE
FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA EM BARRAS CILÍNDRICAS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora
abaixo indicada.

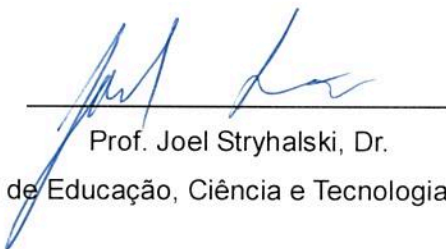
Jaraguá do Sul, 03 de julho de 2017.



Prof. Eduardo Cardoso Castaldo, Me.

Orientador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Prof. Joel Stryhalski, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Prof. Cassiano Rodrigues Moura, Me.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

A Deus
À minha família

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder saúde, conhecimento e sabedoria para chegar até aqui. Agradeço também aos meus pais que sempre me deram todo o incentivo e apoio com meus estudos e minhas conquistas. Agradeço à minha esposa pela paciência, companheirismo e dedicação para que eu pudesse concluir a graduação com êxito. Agradeço ainda ao meu professor orientador, Sr. Eduardo Cardoso Castaldo, Me., pela dedicação e ajuda, que sempre se mostrou disposto a contribuir na realização deste trabalho e para a minha formação. Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, especialmente ao Câmpus Jaraguá do Sul - Rau e seus profissionais, pela minha formação acadêmica e pelos conhecimentos aqui adquiridos.

Para desenvolver um produto com eficiência e eficácia, é necessário saber *o que fazer, para quem fazer, quando fazer, com que fazer e como fazer.*

(Back et al, 2008)

RESUMO

Este trabalho surgiu com a necessidade de desenvolver trabalhos práticos nas disciplinas de Elementos de Máquinas e Resistência dos Materiais, dos cursos de Engenharia e Tecnologia do Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Jaraguá do Sul - Rau, a fim de possibilitar o estudo prático dos fenômenos da fadiga. Ele tem como principal objetivo a realização do projeto de um equipamento didático de ensaio de fadiga por flexão em barras simétricas rotativas. Para isso, além do aprofundamento teórico sobre o fenômeno da fadiga, buscou-se metodologias de desenvolvimento de produto, dentre as quais, a metodologia de Nelson Back et al. (2008), a qual serviu de base para o desenvolvimento do projeto. O presente trabalho é um reprojeto de equipamentos já existentes no mercado, visando a otimização dos projetos atuais. Considera-se que os resultados finais esperados foram alcançados e chegou-se a uma concepção considerada simples e eficaz, podendo facilmente ser fabricada e utilizada como meio de aprendizado para os alunos do IFSC.

Palavras-Chave: Fadiga. Flexão. Rotativa. Projeto. Máquina.

ABSTRACT

This work arose with the need to develop practical work in the disciplines of Machine Elements and Resistance of Materials, Engineering and Technology courses of the Federal Institute of Santa Catarina - Câmpus Geraldo Werninghaus, in order to enable the practical study of fatigue phenomena. It has as main objective the realization of a design of a equipment of fatigue test by flexion in rotating symmetrical bars. For this, in addition to the theoretical deepening on the phenomenon of fatigue, we searched for methodologies of product development, among which, the methodology of Nelson Back et al. Served as the basis for the development of the project. The present work is a redesign of existing equipment in the market, aiming at the optimization of current projects. It is considered that the expected final results were achieved and a design concept considered simple and effective, and can easily be manufactured and used as a learning medium for the students of the Institute.

Keywords: Fatigue. Flexion. Rotary. Project. Machine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Origem da trinca de fadiga em um ponto de concentração de tensão (rasgo de chaveta).....	21
Figura 2 - Linhas de praia e estrias em uma superfície rompida por fadiga.....	23
Figura 3 - Esquema de funcionamento de uma máquina de ensaio de fadiga de flexão alternada.....	25
Figura 4 -Esquema mecânico de uma máquina de ensaio de fadiga bidimensional alternada	26
Figura 5 - Máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa.....	27
Figura 6 - Máquina de ensaio de fadiga por R. R. Moore.....	27
Figura 7 - Gráfico da curva S-N para materiais que exibem limite de resistência à fadiga.....	28
Figura 8 - Gráfico da curva S-N para materiais que não exibem limite de resistência à fadiga.....	29
Figura 9 - Fases do desenvolvimento de produto	31
Figura 10 - Organograma das fases do projeto.....	37
Figura 11 - Máquina de ensaio de fadiga por R. R. Moore	39
Figura 12 - Equipamento de ensaio de fadiga apresentado por Askeland e Wright ..	40
Figura 13 - Equipamento didático do fabricante Edibon	41
Figura 14 - Leiaute da máquina conforme concepção escolhida	49
Figura 15- Componentes principais do equipamento	50
Figura 16 - Motor elétrico carcaça 63.....	51
Figura 17 - Distâncias geradoras de Momento Fletor	51
Figura 18 - Rolamento UCR-205.....	54
Figura 19 - Representação do mancal utilizado	55
Figura 20 - Acoplamento elástico de fole metálico KB-2	55
Figura 21 - Mandril de aperto rápido ROHM Supra 136.....	56
Figura 22 - Rolamento autocompensador de esferas	56
Figura 23 - Dinamômetro de precisão	57
Figura 24- Corpo de prova	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados do Benchmarking	41
Tabela 2 - Primeira Matriz da Qualidade (casa da qualidade)	43
Tabela 3 - Especificações de projeto	45
Tabela 4 - Matriz Morfológica	47
Tabela 5 - Matriz de Concepções	48
Tabela 6 - Lista de componentes	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AV-28 – Referência comercial do acoplamento

cv – cavalo-vapor

DIN - Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatização)

EUA – Estados Unidos da América

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

in – Polegada americana

JS/Rau – Câmpus Jaraguá do Sul - Rau

kg – quilogramas

mm – milímetro

N - Newton

NP3- – Referência comercial do mancal

PIB – Produto Interno Bruto

QFD - Quality Function Deployment (Desdobramento das Funções da Qualidade)

rev/min – Revoluções por minuto

rpm – Rotações por minuto

U\$ - Dólares

UCR-205 – Referência comercial do rolamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Definição do problema.....	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo geral	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 Introdução.....	18
2.2 A Fadiga	20
2.2.1 Nucleação de Trincas	22
2.2.2 Propagação da Trinca	23
2.2.3 Ensaio de fadiga.....	24
2.3 Desenvolvimento de produto	30
2.3.1 Tipos de projetos de desenvolvimento de produto	31
2.3.2 – Fases do desenvolvimento do produto.....	32
2.3.2.1 Fase 1 – Planejamento do Projeto	32
2.3.2.2 Fase 2 – Projeto informacional.....	33
2.3.2.3 Fase 3 - Projeto conceitual.....	34
2.3.2.4 Fase 4 – Projeto preliminar	35
2.3.2.5 Fase 5 – Projeto detalhado.....	36
3 METODOLOGIA	37
3.1 Projeto Informacional.....	37
3.1.1 Benchmarking	38
3.1.1.1 Máquina de ensaio de fadiga por R. R. Moore	38
3.1.1.2 Equipamento de ensaio de fadiga apresentado por Askeland e Wright.....	39
3.1.1.3 Equipamento didático Edibon.....	40
3.1.2 Necessidades dos consumidores.....	42
3.1.3 Especificações de projeto do produto.....	44
3.2 Projeto Conceitual.....	45
3.2.1 Matriz morfológica	45
3.2.2 Escolha da concepção	47
3.3 Projeto detalhado	49

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
4.1 Considerações sobre o projeto.....	59
5 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS.....	62
APÊNDICE A – DESENHOS DETALHADOS	63

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o mercado industrial se apresenta cada vez mais exigente no que diz respeito à qualidade de materiais e serviços. Para se manterem competitivas nesse contexto, as indústrias costumam testar seus materiais para que não haja um equívoco por parte da engenharia, ou até mesmo um *déficit* de qualidade no material comprado para sua produção. Esses testes geralmente são efetuados em laboratório da própria empresa, quando disponível, ou é terceirizado para um laboratório especializado fornecer esses dados à indústria.

Entre os diversos testes efetuados está o ensaio de fadiga por flexão rotativa alternada simétrica, que consiste em um eixo submetido a esforços de flexão, os quais resultam em tensões de tração e compressão aplicadas simultaneamente à rotação no mesmo. Este teste é importante para determinar a vida de fadiga que determinado material terá se submetido a uma carga de valor conhecido. Torna-se possível simular e comparar situações nas quais os eixos são expostos cotidianamente, trazendo mais confiabilidade ao produto.

Segundo Collins (2006) as cargas repetitivas, variáveis e as cargas rapidamente aplicadas são muito mais comuns do que as cargas estáticas nas diversas práticas da engenharia atual. Além disso, a maior parte dos componentes de máquinas presentes em projetos de engenharia está sujeita a cargas variáveis ou cíclicas. Segundo Juvinal e Marshek (2008), até o início do século XIX os engenheiros tratavam as cargas cíclicas da mesma forma que um carregamento estático e utilizavam altos fatores de segurança.

Esse fenômeno foi observado pela primeira vez por volta do ano 1800 quando, após um pequeno período em serviço, os eixos de vagões de trem começaram a falhar. Apesar de serem fabricados de aço dúctil, apresentavam fraturas características de materiais frágeis. Os eixos eram fabricados com todo o cuidado e engenharia disponível na época, porém eram baseados em estudos com estruturas carregadas estaticamente. Cargas dinâmicas ou cíclicas, naquela época, eram um fenômeno novo vindo da introdução da máquina a vapor. Um engenheiro alemão chamado August Wöhler realizou, durante 12 anos, uma investigação científica sobre o fenômeno que estava sendo chamado de falha por fadiga. Suas descobertas foram publicadas em 1870 e identificavam o número de ciclos de tensão variante no tempo como os causadores do colapso e a descoberta de uma tensão limite de resistência à fadiga para os aços, ou seja, um determinado nível de tensões

que suportaria milhões de ciclos de uma tensão flutuante sem levar o corpo à ruptura. Sob o aspecto econômico, as falhas por fadiga representam um custo significativo para a indústria e para o estado. Segundo estudos divulgados, o custo anual de fadiga de materiais representou, em 1982, 3% do PIB dos EUA, isto é, U\$ 100 bilhões. Esses custos dizem respeito à ocorrência ou prevenção de falhas em veículos terrestres, ferroviários e aéreos, bem como em pontes, equipamentos industriais, estruturas marítimas e diversos outros equipamentos domésticos (NORTON, 2013).

Segundo Juvinal e Marshek (2008) a fratura por fadiga se inicia com uma trinca geralmente microscópica em uma área crítica que recebe uma alta tensão local. Isso quase sempre ocorre quando existe um concentrador de tensões geométrico. Trincas pré-existentes estão, quase sempre, correlacionadas.

Na maioria dos ensaios das propriedades dos materiais que tem relação com o diagrama tensão-deformação, a carga é aplicada de forma gradual, visando dar tempo para a deformação se desenvolver plenamente. Além disso, as tensões são aplicadas somente uma vez e de forma contínua, evitando o emprego de ciclos alternados de carregamento. Ensaios dessa forma são aplicados em situações conhecidas como condições estáticas. Contudo, frequentemente aparecem situações onde a tensão varia com o tempo ou flutua em diferentes níveis. Como exemplo, uma fibra particular da superfície de um eixo em rotação sujeita a cargas de flexão é submetida à tração e compressão a cada revolução do eixo. Supondo que esse eixo pertença a um motor elétrico girando a 1725 rev/min, essa fibra no eixo sofrerá esforços de tração e compressão 1725 vezes a cada minuto. Esse e outros gêneros de carregamento ocorrendo em componentes de máquinas produzem tensões conhecidas como tensões variáveis, repetidas, alternantes ou flutuantes (BUDYNAS e NISBETT, 2011).

1.1 Justificativa

Este trabalho se justifica pelo fato de que o estudo da fadiga é realizado de maneira bastante teórica, necessitando de um equipamento que possa ensaiar e apresentar resultados que possam ser comparados com a aproximação matemática de determinadas situações reais encontradas. Esta máquina poderá ser utilizada didaticamente nas aulas de Elementos de Máquinas e Resistência dos Materiais dos

cursos da área mecânica, tanto de nível técnico quanto de nível superior.

Outra justificativa é a possibilidade de criar linhas de pesquisa dentro da instituição para estudar o fenômeno da fadiga, uma vez que é fundamental possuir um equipamento desse tipo para promover pesquisas nessa área. Assim como o IFSC – JS/RAU está situado em um polo industrial metal-mecânico, diferentes possibilidades de trabalho podem surgir em conjunto com as empresas da região.

1.2 Definição do problema

O fenômeno da fadiga por flexão alternada em barras rotativas, por vezes, não é bem compreendido por estudantes da área de engenharia e tecnologia mecânica devido à dificuldade em visualizar corretamente como surgem e atuam os esforços mecânicos causadores das falhas em componentes de máquinas, o que leva a total ou parcial incompreensão dos fenômenos físicos atuantes. Além disso, uma aula totalmente teórica sobre este assunto por vezes torna-se pouco atraente, o que corrobora para que o assunto seja pouco ou mal compreendido. Sob essa óptica, surge uma questão problema: Que máquina ou dispositivo melhor atenderia as necessidades de ensaio de fadiga por flexão alternada em barras rotativas dentro da instituição de ensino para uma melhor compreensão didática por parte dos estudantes?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral projetar, utilizando uma metodologia de projeto, um equipamento capaz de realizar ensaios de fadiga por flexão rotativa utilizando corpos de prova normatizados.

1.3.2 Objetivos específicos

- Pesquisar e fundamentar conceitualmente a fadiga e seus fenômenos;
- Pesquisar sobre métodos de desenvolvimento de novos produtos;
- Aplicar ferramentas de desenvolvimento de produtos;
- Projetar um equipamento capaz de realizar os testes de fadiga por flexão alternada em barras rotativas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, será abordada uma revisão de literatura sobre o assunto estudado para que sirva de embasamento teórico para o desenvolvimento do projeto. É essencial que se estude a fadiga e seus fenômenos, bem como se encontrem métodos e ferramentas de desenvolvimento de produto, para que o projeto possa ter bases sólidas de elaboração.

2.1 Introdução

Até meados do século XIX os engenheiros tratavam os esforços cíclicos da mesma forma que os esforços estáticos com a diferença de utilizarem um maior coeficiente de segurança (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

Atualmente, no cenário industrial, a maioria das falhas em máquinas não acontece por esforços estáticos, mas sim devido a cargas que variam no tempo. Essas falhas, geralmente ocorrem em níveis de tensão significativamente abaixo dos valores de tensão de escoamento dos materiais (NORTON, 2013).

Um dos fatores cruciais para o estudo do fenômeno da fadiga é o impacto na economia. Baseado em estudos realizados por Reed et al. Do governo dos Estados Unidos, Dowling sugere que:

O custo anual da fadiga de materiais para a economia dos EUA em 1982 está por volta dos U\$ 100 bilhões, correspondendo a aproximadamente 3% do produto interno bruto (PIB). Esses custos são resultados da ocorrência ou da prevenção da falha por fadiga em veículos terrestres, veículos ferroviários, aviões de todos os tipos, pontes, guindastes, equipamentos industriais, estruturas marítimas de poços de petróleo e uma ampla variedade de mecanismos e equipamentos incluindo itens de uso doméstico, brinquedos e equipamentos esportivos. (NORTON, 2013, p.305)

O custo pode ainda sair do âmbito material e envolver vidas humanas. O primeiro avião a jato comercial de passageiros, conhecido como *COMET*, despedaçou-se duas vezes em 1954 devido aos efeitos da fadiga em sua fuselagem causados pelas constantes pressurizações e despressurizações de sua cabine. Mais recentemente, em 1988, um Boeing 737 de uma companhia havaiana perdeu cerca de um terço de sua cabine durante um vôo a 25000 pés de altitude. Muito trabalho vem sendo realizados nos últimos 150 anos para compreender o mecanismo físico da falha por fadiga. Desde a Segunda Guerra Mundial, as solicitações exigidas dos

materiais nas aplicações diversas em naves e aviões vêm motivando um aumento de investimentos na área do estudo do fenômeno da fadiga (NORTON, 2013).

O fenômeno da fadiga foi observado pela primeira vez por volta de 1800 quando os eixos de vagão ferroviário passaram a apresentar falhas após um pequeno período em serviço. Esses eixos, apesar de fabricados em aço dúctil, apresentavam fraturas com características de materiais frágeis. Um artigo publicado em 1843 por Rankine e intitulado “As Causas da Ruptura Inesperada em Munhões de Eixos Ferroviários” dizia que o eixo havia cristalizado e se tornado frágil devido à exposição às tensões flutuantes. Apesar da utilização de toda a engenharia disponível na época, esses eixos apresentavam falhas devido ao fato de os cálculos serem feitos sob experiências com eixos estáticos, não considerando as cargas cíclicas às quais os mesmos seriam submetidos, pois o fenômeno da fadiga era algo novo, até então nunca estudado (NORTON, 2013).

O termo “Fadiga” foi aplicado à situação de cargas flutuantes no tempo pela primeira vez por Poncelet em 1839. O mecanismo de falha, não compreendido até então, e a aparência frágil da fratura em materiais dúcteis levavam os pesquisadores da época a especular que, de alguma forma, o material sofria “cansaço” e fragilizava-se devido às oscilações de carga nele aplicadas. Um engenheiro alemão chamado August Wöhler realizou, durante 12 anos, a primeira investigação científica sobre o fenômeno que estava sendo chamado de “falha por fadiga” efetuando testes em laboratório levando eixos até a ruptura sob carregamento alternado. Suas descobertas foram publicadas no ano de 1870 e identificavam o número de ciclos de tensão variante no tempo como principal causador do colapso e a descoberta da existência de uma tensão limite de resistência a fadiga para aços, ou seja, um nível de tensão ao qual, se submetido, o eixo suportaria milhões de ciclos de tensão alternada (NORTON, 2013).

Este breve histórico demonstra que o estudo dedicado à fadiga dos materiais é algo relativamente recente (século XIX) e o mesmo não está totalmente compreendido, uma vez que muitos pesquisadores continuam em busca de respostas para questões relacionadas ao mecanismo físico da fadiga em si (NORTON, 2013).

2.2 A Fadiga

A falha de elementos mecânicos é um processo que pode atingir as mais distintas formas, dependendo das condições de solicitação, tipo de material e as condições ambientais. De um modo genérico, a falha pode ser definida como a incapacidade de um componente suprir a demanda que lhe é exigida, ou seja, sua capacidade é inferior à demanda. Em alguns casos, a falha não é necessariamente a ruptura do material, mas a deformação suficiente para que ele deixe de apresentar resultados dentro de um limite de tolerância do trabalho, desta forma, apresenta defeito em seu funcionamento antes mesmo de ser levado à ruptura (ROSA, 2002).

Quando as peças de máquinas falham estaticamente elas sofrem uma deflexão muito grande, pois a tensão excede o limite de escoamento do material e, geralmente, permite que a peça seja substituída antes que o material venha a sofrer ruptura completa. Dessa forma, muitas falhas estáticas podem ser previstas antes mesmo que aconteça. Por outro lado, a falha por fadiga é difícil de detectar. Ela simplesmente acontece de maneira súbita e total (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

A fadiga é um processo de redução da capacidade de carga dos componentes estruturais pela ruptura lenta do material, através do avanço quase infinitesimal da trinca a cada ciclo de carregamento. A fadiga ocorre devido a tensões que variam com o tempo e que provocam deformações plásticas cíclicas localizadas nos pontos mais críticos, como entalhes, transição entre diâmetros e rebaixos. Essas deformações levam a deterioração do material e induzem o surgimento de uma trinca por fadiga que, com a continuação do carregamento variável, vai aumentando suas proporções até levar o material à ruptura final (ROSA, 2002).

As falhas por fadiga sempre têm início em uma pequena trinca. Essa pode estar presente no material desde sua fabricação ou surgir ao longo do tempo pelos esforços cíclicos aplicados ao redor de concentrações de tensões (NORTON, 2013).

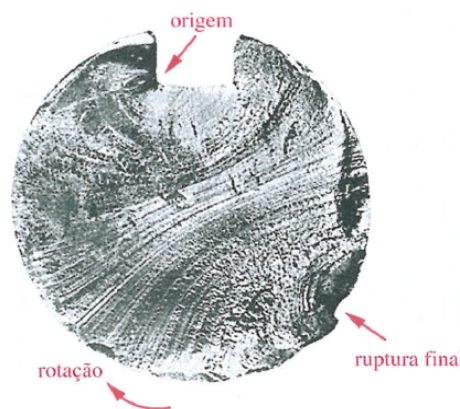
Como já citado, a maioria dos componentes de engenharia estão sujeitos à cargas cíclicas embora, muitas vezes, as cargas são observadas como estáticas em um primeiro momento. A fadiga do material pode ocorrer dentro de uma enorme gama de ciclos, desde valores da ordem de 10 ciclos até mais de 10^7 ou 10^8 ciclos. O número de ciclos que o componente resiste varia de acordo com o regime de trabalho e a carga aplicada; sendo assim, quanto maior a carga dinâmica aplicada

menor será sua vida de fadiga se comparada a uma aplicação com solicitação cíclica menor, onde se terá uma vida de fadiga aumentada. Essa vida deve assegurar uma operação segura e sem falhas, o que significa que as eventuais trincas formadas no material durante sua operação não devem comprometer a operação do equipamento (ROSA, 2002).

Fischer e Yen mostraram que praticamente todas as partes de uma estrutura contêm descontinuidades, variando de microscópicas ($<0,0010$ in) até macroscópicas, introduzidas nos seus processos de fabricação ou de manufatura. As trincas geralmente tem início em um entalhe ou em outro elemento de concentração de tensão (NORTON, 2013, p.306).

Quando se tem um material isento de defeitos estruturais, no caso de existirem pontos de concentração de tensão, esses serão responsáveis pelo início do processo de nucleação da trinca, podendo levar a uma consequente falha, conforme Figura 1. Em materiais dúcteis, para que o processo de nucleação aconteça é necessário que ocorram deformações plásticas no material, seja localizada ou generalizada. Em máquinas e componentes bem projetados, as tensões nominais dadas pelo carregamento externo não ultrapassam o regime elástico do material. Ainda assim, devido à possíveis descontinuidades geométricas ou estruturais, ocorrem pontos de concentração de tensão, gerando plastificação localizada e tendo o restante do material ainda apresentando resposta elástica. Nesses pontos de escoamento é que se inicia o processo de nucleação da trinca de fadiga (ROSA, 2002).

Figura 1 - Origem da trinca de fadiga em um ponto de concentração de tensão (rasgo de chave).



Fonte: D.J. WULPI (1990 apud NORTON, 2013, Fig 6-4a, p.309)

Segundo Norton (2013, p307):

Conforme as tensões no entalhe oscilam, podem ocorrer escoamento local devido a concentração de tensão, mesmo que a tensão nominal, na sessão esteja bem abaixo do valor da tensão de escoamento do material. A deformação plástica localizada causa distorções e cria bandas de deslizamento (regiões de intensa deformação devido a movimentos cisalhantes) ao longo dos contornos dos cristais do material. À medida que os ciclos de tensão ocorrem, bandas de deslizamentos adicionais aparecem e agrupam-se em trincas microscópicas.

Em muitos casos a trinca que leva à falha não passa pelo processo de nucleação. Nesses casos trata-se de uma trinca preexistente na peça, seja oriundo do processo de fabricação, como incrustações na estrutura do material ou pontos de concentração de tensão decorrentes de processo de usinagem, tensões residuais de laminação, extrusão ou outro processo de conformação; devido à um tratamento térmico muito severo aplicado incorretamente ou, ainda, devido à um ataque químico que acarreta em uma oxidação do material da peça.

Mesmo na ausência de um entalhe (como em corpos de prova planos) este mecanismo ainda ocorrerá, desde que se exceda o limite de escoamento em alguma região do material. Vazios ou inclusões preexistentes servirão como intensificadores de tensão para iniciar a trinca (NORTON, 2013, p.307).

2.2.1 Nucleação de Trincas

A falha por fadiga está geralmente associada às deformações plásticas, que ocorrem através do movimento de discordâncias sob ação de tensões cisalhantes. Este movimento é o resultado do deslocamento entre dois planos cristalinos que é mais acentuado quando a tensão cisalhante é maior (ROSA, 2002).

Para um material policristalino, onde os grãos não possuem uma organização definida de planos cristalinos, a deformação plástica inicia nos grãos mais desfavoravelmente orientados, ou seja, com os planos de deslizamento mais próximos da direção da tensão cisalhante máxima. Dessa forma, pode ocorrer deslizamento de poucos grãos somente, permanecendo o restante do material ainda no regime elástico. Nesse caso é muito difícil detectar a deformação plástica, pois a mesma possui magnitude quase insignificante. Portanto, é impossível afirmar que, mesmo abaixo do limite de proporcionalidade do material, ele permaneça integralmente e somente com deformações elásticas (ROSA, 2002).

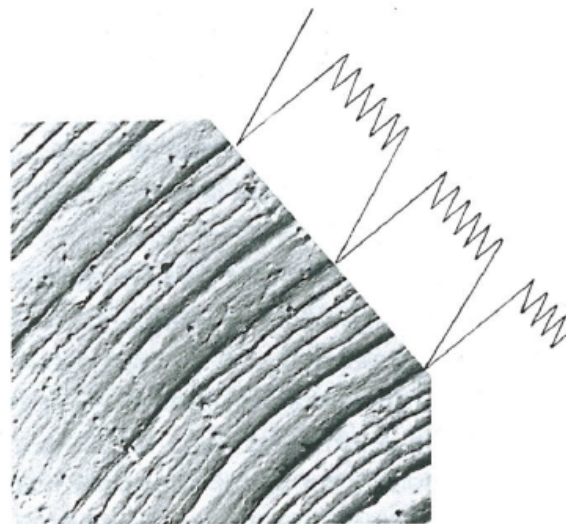
2.2.2 Propagação da Trinca

Os deslizamentos cíclicos formam pequenas fendas na superfície do material, ocasionando a formação de picos e vales como uma cadeia de montanhas. Esse fenômeno ocorre no estágio I, que se refere a nucleação da trinca, onde a tensão cisalhante é o fator determinante para essa formação.

Nesse estágio, essas fendas se transformam em microtrincas que, por sua vez, crescem até que atinjam dimensões que as façam se desenvolver de maneira perpendicular as tensões de tração do carregamento (ROSA, 2002).

A taxa de crescimento ou propagação da trinca é muito pequena, da ordem de 10^{-8} até 10^{-4} in por ciclo, mas após um grande número de ciclos, torna-se significativa. Se a superfície de ruptura for vista bastante ampliada, as estrias, devido a cada ciclo de tensão, podem ser vistas conforme a Figura 2, que mostra a superfície de falha de um corpo de prova de alumínio, com uma ampliação de 12000x, juntamente com a representação do modelo de tensão cíclica atuante na peça que falhou. (NORTON, 2013, p.307).

Figura 2 - Linhas de praia e estrias em uma superfície rompida por fadiga



Fonte: D.BROEK (1988 apud NORTON, 2013, Fig 6-3, p.308)

O tamanho da microtrinca em que ocorre a transição entre o estágio I e o estágio II depende do nível de tensão, pois no caso de materiais altamente solicitados, a transição entre estágios ocorrerá antes do que em casos de solicitações mais baixas (ROSA, 2002).

Em corpos que não possuem entalhes, o estágio I corresponde a aproximadamente 70% de sua vida, sendo responsável pela nucleação e

desenvolvimento da trinca. No restante da vida do componente acontece a propagação da trinca no estágio II.

A propagação da trinca no estágio I corresponde ao modo microscópico, onde a trinca possui dimensões da ordem de tamanho de grão. Nesse estágio, a trinca é muito sensível às diferenças locais de microestrutura, mudanças de direção dos planos cristalográficos e contornos de grão (ROSA, 2002).

A propagação no estágio II representa a fase macroscópica da trinca, na qual o material passa a ser considerado homogêneo. Dessa forma, as propriedades médias do material são importantes, enquanto as diferenças a nível metalúrgico se tornam irrelevantes.

Uma característica importante desse estágio é a formação das estrias microscópicas que marcam o crescimento da trinca a cada ciclo de carregamento, dando origem às chamadas linhas de praia. Essa característica pode ser observada a olho nu, geralmente em formato semicircular partindo do ponto de início da trinca e se afastando gradativamente do mesmo. Essas marcas são encontradas em componentes que sofrem paradas durante a aplicação da carga, como em máquinas operando em turnos de trabalho. Cada intervalo de crescimento da trinca forma uma linha de praia (ROSA, 2002).

Nas linhas de praia, com o auxílio de um microscópio, podem ser observadas as estrias que representam o avanço da trinca em um único ciclo de carga. A largura dessas estrias irá variar de acordo com a amplitude da carga aplicada. Apesar das semelhanças entre as marcas de praia e as estrias, é importante salientar que elas são diferentes tanto na origem quanto no tamanho. Dentro de uma marca de praia é possível encontrar milhares de estrias (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012).

2.2.3 Ensaio de fadiga

Da mesma forma que ocorre com as demais propriedades mecânicas dos materiais, as características de fadiga podem ser obtidas por meio de ensaios de laboratório. Um aparato de ensaios deve ser projetado de forma que se consiga reproduzir no corpo de prova, as condições de serviço (como nível de tensão, frequência no tempo e padrão de tensões) (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012).

Alguns ensaios de fadiga são amplamente utilizados para determinar essas

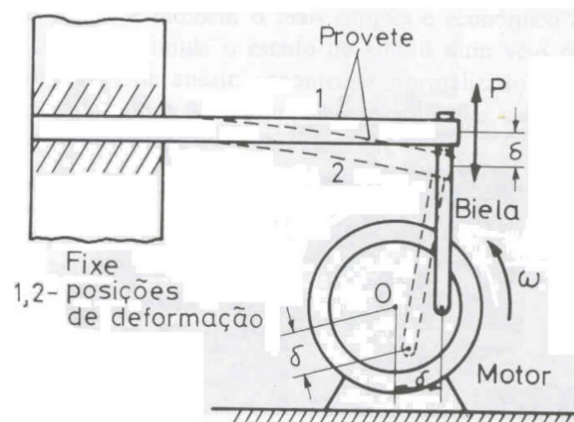
propriedades; são eles: por flexão em eixos rotativos; ensaio sob força normal (carregamento bidimensional alternado); eixo em balanço sob flexão alternada e ensaio de torção alternada. O tipo de ensaio escolhido depende do tipo de sollicitação desejada (NORTON, 2013).

O ensaio de fadiga com eixo em balanço sob flexão alternada consiste em um corpo de prova fixo horizontalmente sem sofrer qualquer rotação, conforme Figura 3. O corpo de prova em questão possui uma extremidade fixa e a outra sujeita a um carregamento vertical para cima e para baixo alternadamente, provendo tensões de flexão alternada (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

Segundo os mesmos autores, neste tipo de ensaio as tensões máximas encontram-se exclusivamente nas regiões superior e inferior do corpo de prova. Estatisticamente, há uma grande probabilidade de que o ponto mais frágil da seção do material não esteja localizado exatamente nessas regiões, podendo haver uma dispersão de resultados entre os demais testes de fadiga. Esta dispersão é, geralmente, desprezível.

Segundo Norton (2013), este tipo de ensaio é menos utilizado se comparado ao ensaio de flexão rotativa ou força normal, mas é, geralmente, a alternativa menos cara em relação à última citada.

Figura 3 - Esquema de funcionamento de uma máquina de ensaio de fadiga de flexão alternada.



Fonte: <http://documents.tips/documents/fadiga1.html>

Segundo Norton (2013), os ensaios de fadiga por torção alternada são realizados em corpos de prova cilíndricos sujeitos a um esforço de torção alternado.

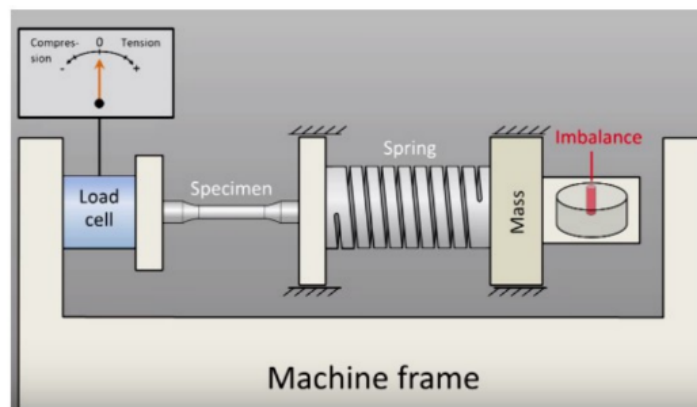
No que diz respeito à relação entre resistência à fadiga por torção e por flexão alternada, Juvinall e Marshek (2008, p.167) sugerem que:

Para os metais dúcteis, o limite de resistência à fadiga (ou resistência à fadiga para vida infinita) no caso da torção alternada é igual a aproximadamente 58% do limite de resistência à fadiga (ou resistência à fadiga para vida infinita) no caso de flexão alternada.

Poucos são os dados disponíveis no que diz respeito ao comportamento generalizado dos materiais frágeis sob tensões de flexão. Dessa forma, diz-se conveniente obter dados experimentais sobre fadiga em carregamento específico de um problema em particular (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

O ensaio sob carregamento bidimensional alternado (força normal) é realizado através da imposição de cargas cíclicas em um corpo de prova, geralmente cilíndrico, por meio de uma máquina servo-hidráulica, conforme representado na Figura 4. A principal diferença em relação ao ensaio de flexão rotativa é que aqui toda a seção transversal é solicitada uniformemente em tração e compressão axial, enquanto que no ensaio por flexão rotativa o corpo de prova sofre uma distribuição linear das tensões ao longo da seção transversal do eixo, sendo que a máxima tensão se encontra na fibra mais externa, enquanto que a fibra central do diâmetro sofre carregamento nulo.

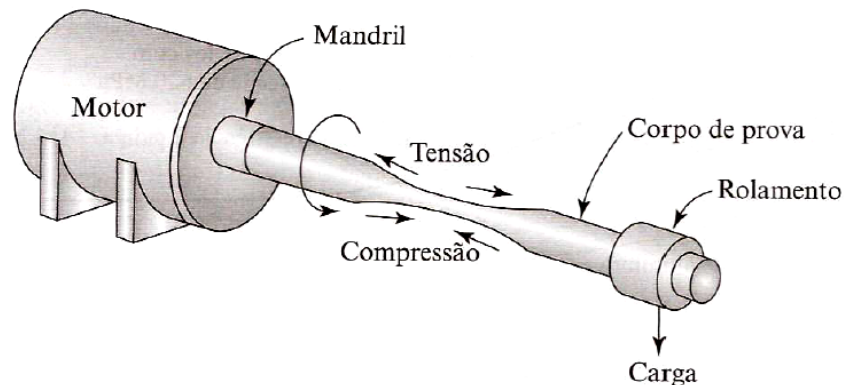
Figura 4 -Esquema mecânico de uma máquina de ensaio de fadiga bidimensional alternada



Fonte: <http://documents.tips/documents/fadiga1.html>

O equipamento de ensaio giratório com dobramento provoca tensões de tração e compressão, simultaneamente ao giro do eixo, levando o corpo de prova a níveis de tensão alternados no tempo, ocasionando a formação e propagação da trinca até o ponto de ruptura. Este método é comumente utilizado para ensaios de fadiga por flexão alternada em eixos rotativos, conforme Figura 5 (COLLINS, 2006).

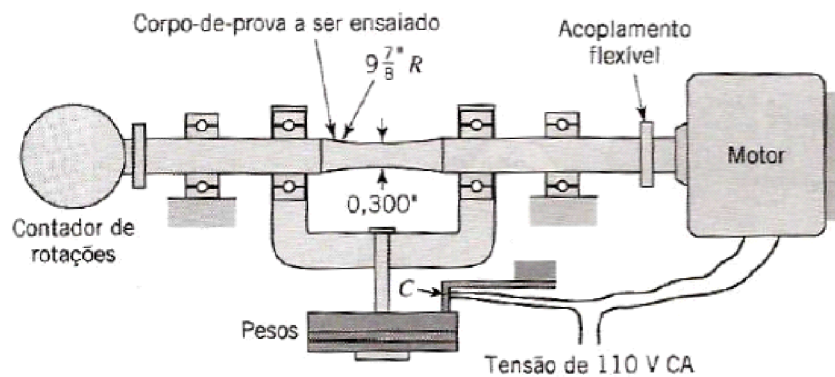
Figura 5 - Máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa



Fonte: ASKELAND; WRIGHT (2015, Fig 7-15, p.217)

A Figura 6 representa a máquina de teste de fadiga por flexão alternada de barras rotativas criada por R.R. Moore. É possível verificar que as mancalizações dispostas simetricamente conferem tensões de flexão pura ao corpo de prova, isto é, com tensões de cisalhamento transversal nulas. A tensão em qualquer ponto do corpo se desenvolve alternadamente entre tração e compressão em cada ciclo de carregamento (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

Figura 6 - Máquina de ensaio de fadiga por R. R. Moore



Fonte: JUVINALL; MARSHEK (2008, Fig. 8.3, p.163)

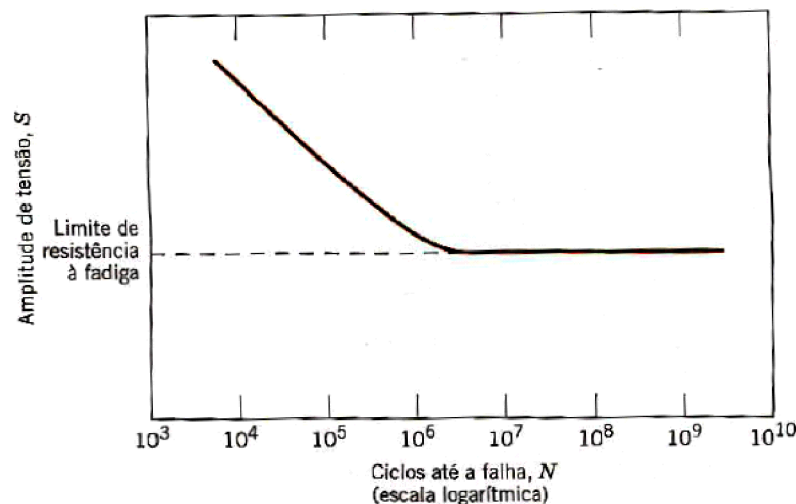
O nível mais alto de tensão é conferido ao centro do eixo, onde encontra-se o menor diâmetro do corpo de prova, padronizado em 0,3 polegadas (7,62 mm). O grande raio de curvatura evita que haja pontos de concentração de tensões. Uma vasta gama de pesos é escolhida a fim de se obter variados níveis de tensão. A velocidade do motor é, geralmente, de 1750 rpm. Quando o corpo de prova rompe, o peso cai, abrindo o contato elétrico e desligando o motor. O número de ciclos até a

condição de falha é indicado pelo contador de voltas, acoplado à ponta do corpo de prova (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

Para se obter o comportamento do material nas condições descritas de fadiga, uma série de ensaios é iniciada com níveis de carregamento que podem atingir dois terços da tensão de escoamento do material. O número de ciclos até o momento da falha é contado. Esse procedimento é aplicado em outros corpos de prova de mesmo material, diminuindo-se gradativamente a carga aplicada e observando-se o número de ciclos em cada caso. Os dados obtidos são traçados em um gráfico da tensão 'S' em função do logaritmo do número de ciclos 'N' causador de falha para cada um dos corpos de prova ensaiados (COLLINS, 2006).

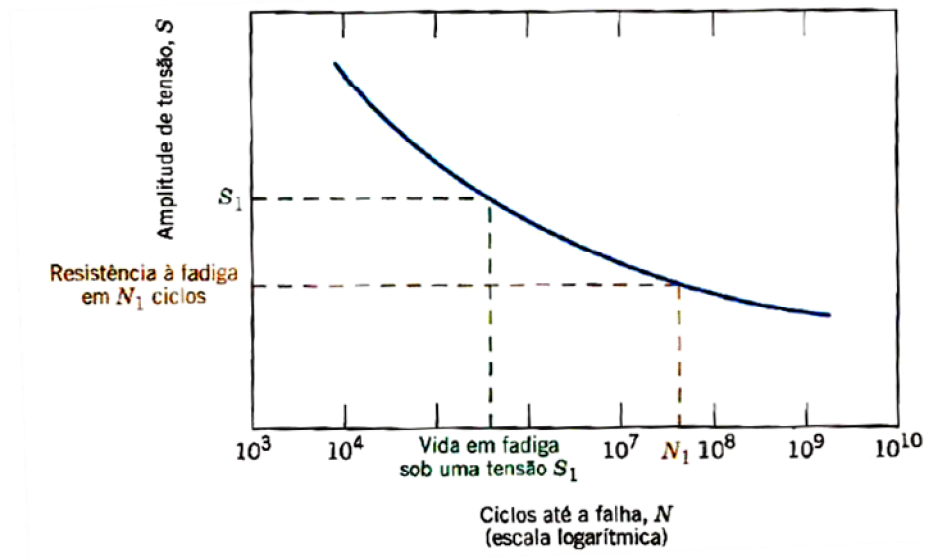
Na Figura 7 e na Figura 8 é possível verificar dois gráficos com comportamentos S-N distintos. Conforme eles indicam, quanto maior a tensão aplicada, menor será o número de ciclos que o material irá suportar até a falha. Para algumas ligas ferrosas e de titânio, a curva se mantém horizontal para números *N* mais altos. Dessa forma, é possível afirmar que existe um valor de tensão limite, chamado de limite de resistência à fadiga, abaixo do qual não ocorrerá falha por fadiga. Para os aços, esse valor representa o valor de tensão variável que não acarretará falha por fadiga no material após um número infinito de ciclos (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012).

Figura 7 - Gráfico da curva S-N para materiais que exibem limite de resistência à fadiga



Fonte: CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH (2012, Fig. 8.19a, p. 221)

Figura 8 - Gráfico da curva S-N para materiais que não exibem limite de resistência à fadiga



Fonte: CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH (2012, Fig. 8.19b, p. 221)

A maioria das ligas não ferrosas como, por exemplo, o alumínio, o magnésio e o cobre, não possuem o limite de resistência à fadiga, ou seja, a curva S-N continua em tendência decrescente até os menores valores de S. Sendo assim, uma falha por fadiga ocorrerá ao final independente da magnitude da tensão aplicada. Para esses materiais, a resposta à fadiga é denominada resistência à fadiga, que caracteriza o nível de tensão no qual ocorrerá falha para um número específico de ciclos (10⁷ por exemplo). (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012).

Outro parâmetro importante que caracteriza o comportamento à fadiga de um material é a vida em fadiga N_f . Ela corresponde ao número máximo de ciclos suportados pelo material até a falha à um nível de tensão específico.

Infelizmente, há sempre uma dispersão nos valores obtidos de N para vários corpos de prova de um mesmo material aplicando-se o mesmo nível de tensão. Essa variação pode levar o projetista a incertezas de projeto, quando a vida em fadiga tiver de ser levada em consideração. A dispersão dos valores se deve à sensibilidade da fadiga à diversos parâmetros do ensaio e do material, impossíveis de serem controlados com tamanha precisão. Esses parâmetros incluem a fabricação do corpo de prova, acabamento superficial, alinhamento do equipamento de teste e as variáveis metalúrgicas do material testado (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012).

2.3 Desenvolvimento de produto

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), desenvolver produtos consiste em um conjunto de atividades por meio das quais busca-se chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, para que a manufatura seja capaz de produzi-lo. Esse processo se dá a partir das necessidades do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, e considerando a estratégia competitiva e de produto da empresa.

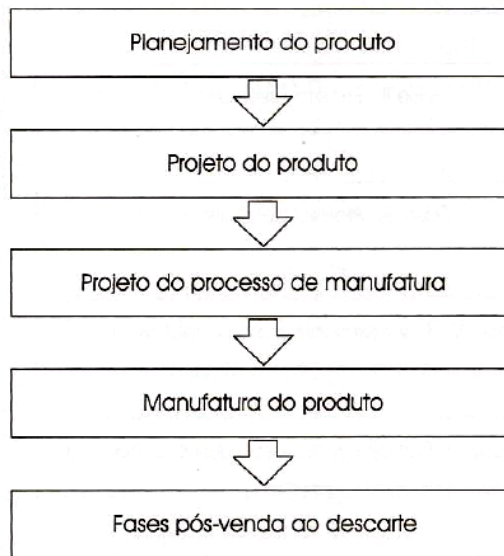
Segundo Back et al. (2008), para se desenvolver um produto com eficiência e eficácia, é necessário saber o que fazer, para quem fazer, quando fazer, com o que fazer e como fazer. A esta organização chama-se a metodologia de projeto, ou metodologia de desenvolvimento de produto.

Segundo Back et al. (2008), é grande o número de proposições de metodologias de desenvolvimento de projeto de produtos e todas elas são válidas. Os procedimentos prescritivos tradicionais foram usados por muito tempo e ainda hoje são empregados por apresentarem bons resultados.

A partir de meados de 1980, o aumento da complexidade dos produtos fez com que se desenvolvessem novas metodologias visando fazer frente à concorrência por meio da redução de tempo de lançamento, redução de custos, melhoria de qualidade.

Segundo Back et al. (2008), a maioria dos procedimentos pesquisados possui enfoque no processo do projeto, o qual faz parte de um processo mais amplo que é o desenvolvimento do produto, como mostra a Figura 9. Este, por sua vez, engloba também o projeto do processo de manufatura e o planejamento das fases pós-venda: distribuição, transporte, utilização, manutenção e descarte.

Figura 9 - Fases do desenvolvimento de produto



Fonte: BACK et al. (2008, Fig. 2.1, p.33)

2.3.1 Tipos de projetos de desenvolvimento de produto

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), diversos critérios podem ser utilizados para a classificação dos tipos de projetos de desenvolvimento de produto. O critério mais comum para esse tipo de classificação é o grau de mudança que o projeto representa em relação a projetos anteriores, que se divide basicamente em:

- Projetos radicais: tratam-se de projetos cujas modificações do processo existente ou do projeto do produto são altamente significativas, resultando em uma nova categoria ou família de produto para a empresa. Geralmente requerem um novo processo de manufatura bem como desenvolvimento de novos materiais.
- Projetos plataforma ou próxima geração: de maneira geral representam alterações significativas tanto no processo quanto no produto, sem a inclusão de novas tecnologias ou materiais em sua manufatura. Dessa forma, pode apresentar um novo sistema de solução para o cliente, resultando em uma nova geração do produto ou de uma família de produtos previamente existentes.
- Projetos incrementais e derivados: apresentam pequenas alterações em relação a projetos já existentes. Isso pode representar redução de custo de produto e projeto, porém com inovações incrementais. Geralmente

requerem menos recursos, pois partem de produtos ou processos pré-existentes, estendendo sua aplicabilidade e seu ciclo de vida.

Segundo Back et al. (2008), novos produtos não significam exatamente produtos originais, podendo ser obtidos com melhorias e modificações de produtos já existentes. Para o autor, os novos produtos podem ser classificados como:

- Variantes de produtos existentes: incluem extensões de linha, reposicionamento do produto no mercado em relação ao seu uso, versões modificadas, novas formas e embalagem de produtos existentes.
- Inovativos: resultam de modificações realizadas em produtos existentes gerando produtos de elevado valor agregado. Geralmente, quanto maior o grau de inovação, maior o tempo e o custo envolvidos no desenvolvimento.
- Criativos: normalmente são produtos inexistentes no mercado até então. O tempo e o custo investidos no seu desenvolvimento são elevados, bem como os riscos de introdução do produto no mercado. Caso obtenha sucesso, o produto poderá quebrar paradigmas e potencializar novos campos industriais.

2.3.2 – Fases do desenvolvimento do produto

Para a execução deste trabalho, foram analisadas algumas metodologias de desenvolvimento de produto, dentre elas estão as obras dos autores: Rozenfeld; Pahl e Beitz e ainda Nelson Back. Dentre estes, o modelo de referência para o desenvolvimento deste trabalho será o de Nelson Back, o qual está decomposto em três macro-fases: planejamento do projeto; elaboração do projeto do produto; implementação do lote piloto. Cada uma dessas fases é subdividida em outras, gerando oito fases ao total, as quais dão origem à resultados intermediários.

2.3.2.1 Fase 1 – Planejamento do Projeto

De acordo com Back et al. (2008), essa fase destina-se ao planejamento de um novo projeto de acordo com as estratégias de negócio da empresa e da organização do trabalho a ser desenvolvido ao longo do processo. A partir do plano estratégico de produtos é iniciado o planejamento de marketing; uma vez aprovado,

é liberado a criação do termo de abertura de projeto ou carta de projeto, que formaliza a existência de um projeto dentro da organização.

Para Rozenfeld et al. (2006), essa fase é denominada planejamento estratégico de produto, da qual resultam dois principais documentos. Um deles é o portfólio de produtos contendo a descrição de cada produto, data de início de desenvolvimento e data de lançamento, segundo perspectivas mercadológicas e tecnológicas. O segundo documento diz respeito ao primeiro documento relacionado ao projeto especificamente: a minuta do projeto. Ela contém uma descrição bastante sucinta do projeto apenas com a função de delimitá-lo. Este documento serve de entrada para a fase de planejamento do projeto, que, ao final, apresentará um plano detalhado com prazos, atividades, recursos necessários, riscos e uma primeira análise econômico-financeira, denominado Plano do Projeto.

2.3.2.2 Fase 2 – Projeto informacional

Segundo Back et al. (2008), trata-se da primeira fase do projeto do produto e destina-se às especificações de projeto e nela são realizadas diversas tarefas que visam buscar a definição de fatores que influenciam no projeto do produto. Paralelamente, continua-se os trabalhos de planejamento de marketing, monitorando-se o mercado em busca de variações que possam influenciar nas especificações do projeto.

Para Rozenfeld et al. (2006), esta é a primeira fase do desenvolvimento do projeto, a qual, baseado no Plano de Projeto, tem como objetivo desenvolver um conjunto de informações, o mais completo possível, chamado de Especificações-Meta do futuro produto. São aquelas que se deseja obter ao final das atividades de engenharia, compostas das informações qualitativas e dos requisitos do futuro produto.

De acordo com Back et al. (2008), para estabelecer as especificações de projeto, primeiramente são identificadas as necessidades dos clientes e/ou usuários que são desdobradas em requisitos dos usuários. A partir desses requisitos, são definidos os requisitos de projeto do produto, considerando diferentes atributos: funcionais, ergonômicos, de segurança, de confiabilidade, de modularidade, estéticos e legais, entre outros. Conhecidos os requisitos de projeto, é realizada uma avaliação comparativa com os produtos disponíveis no mercado, que permite

verificar o atendimento dos mesmos aos requisitos dos usuários e aos do projeto.

A partir dos requisitos de projeto são extraídas as especificações de projeto, ou seja, os objetivos a que o produto a ser projetado deverá atender. Com esses dados são definidos: os fatores de influência no plano de manufatura; a estratégia para o envolvimento de fornecedores de componentes; as informações sobre segurança no ciclo de vida; as metas de dependabilidade; e o custo meta do produto.

Segundo Rozenfeld et al. (2006), as especificações-meta devem refletir as características que o produto deverá apresentar para satisfazer as necessidades dos clientes. Em seguida, parte-se para a definição do problema de projeto, no qual busca-se o entendimento claro e total do problema a ser enfrentado. É momento de aprofundar as informações obtidas na fase de planejamento e buscar novas informações sobre aspectos tecnológicos e de produtos concorrentes.

Para a conclusão desta fase de projeto informacional, as especificações de projeto são submetidas à aprovação, considerada como critério que permite o progresso para a fase seguinte, sendo realizadas as análises econômica e financeira e a atualização do plano de projeto.

2.3.2.3 Fase 3 - Projeto conceitual

De acordo com Back et al. (2008), essa fase tem por objetivo o desenvolvimento da concepção do produto. Para isso, são realizadas diversas atividades que buscam, primeiramente, estabelecer a estrutura funcional do produto. Determinadas as funções a serem realizadas pelo produto, inicia-se o estudo de estruturas funcionais alternativas, a fim de se encontrar a mais adequada. Sobre a estrutura funcional selecionada, são desenvolvidas concepções alternativas.

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), nesta fase de concepção do produto, são geradas soluções de projeto e estas estudadas detalhadamente até que se encontre a melhor solução possível que seja capaz de atender as especificações-meta concebidas na fase anterior. As soluções de projeto são especificadas em um conjunto de documentos que receberá a designação de Concepção do Produto.

Para Rozenfeld et al. (2006), nesta fase os desenvolvedores poderão lidar com uma única concepção selecionada entre as alternativas, ou com mais de uma paralelamente. Após a realização do primeiro ciclo de detalhamento, chamado Projeto Preliminar, será adotada apenas uma das concepções.

Segundo Back et al. (2008), para a seleção da concepção é realizada uma análise comparativa entre elas considerando: as especificações de projeto; o custo meta; os riscos de desenvolvimento; e as metas de qualidade, de segurança e de dependabilidade.

Uma vez selecionada a concepção do produto, iniciam-se os estudos para identificação dos processos de fabricação possíveis de serem utilizados. Paralelamente, acontecem as negociações e definições de prazos junto a fornecedores para o desenvolvimento dos projetos preliminar e detalhado das subfunções especificadas na estrutura funcional e é iniciado o estudo de segurança na concepção escolhida. Antes da aprovação da concepção, a mesma passa por uma avaliação quanto ao atendimento do escopo do projeto.

2.3.2.4 Fase 4 – Projeto preliminar

Esta fase é destinada a estabelecer o leiaute final do produto e à determinar a viabilidade técnica e econômica. Para estabelecer o leiaute final do produto, são realizadas tarefas como: identificação das especificações de projeto que citam requisitos de forma (dimensões), leiaute (posições), material, segurança, ergonomia e manufatura; definição dos componentes a serem utilizados (comprados e/ou desenvolvido pelos fornecedores); revisão das patentes e definições sobre aspectos legais e de segurança; seleção de leiautes alternativos a fim de atender os diferentes modelos do produto definidos no plano de marketing, definição das dimensões principais, tipo de material, processos de fabricação, tolerâncias dimensionais e de posição.

Uma vez estabelecido o leiaute final, dá-se início ao desenvolvimento do plano de fabricação e de teste do protótipo, bem como a elaboração da estrutura preliminar do protótipo que servirá de parâmetro para o cálculo inicial de custo do produto. Com isso, definem-se os requisitos de manufatura do protótipo, avalia-se a capacidade de produção interna e externa dos componentes e executa-se a análise de segurança sobre o leiaute final. Em seguida, determina-se a viabilidade econômica.

Finalizando a fase de projeto preliminar, a viabilidade econômica deverá ser aprovada, sendo critério para o progresso à próxima fase, a do projeto detalhado.

2.3.2.5 Fase 5 – Projeto detalhado

A fase de elaboração do projeto detalhado possui vários propósitos, dentre eles: aprovação do protótipo; finalização das especificações dos componentes; detalhamento do plano de manufatura; e preparação da solicitação de investimento. O protótipo é construído e são realizados os testes em laboratório e em campo, de acordo com os planos de fabricação e de testes elaborados na etapa anterior. No decorrer da realização dos testes, são realizadas diversas análises relacionadas à segurança do protótipo e de seus componentes.

Paralelamente à construção, testes e aprovação do protótipo, é realizada a otimização das especificações dos componentes. Na sequência, a estrutura do produto é completada, os componentes são certificados, o plano de manufatura é detalhado e as especificações técnicas fixadas. Nesta etapa, dá-se início à elaboração do manual de instruções, do manual de assistência técnica e do catálogo de peças.

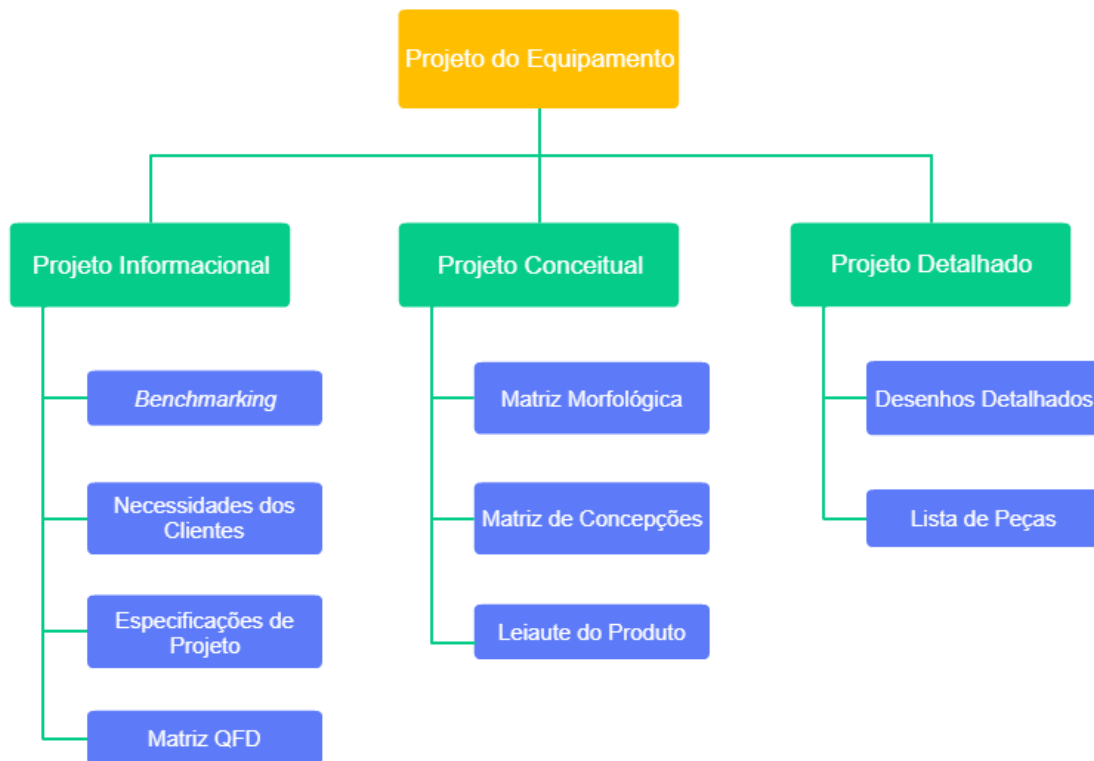
Tendo o projeto do produto e o plano de manufatura concluídos, iniciam-se a revisão de toda a documentação gerada e a implementação do controle das mudanças de projeto. A partir do projeto do produto e do plano de manufatura, prepara-se a solicitação de investimento, a qual é submetida à avaliação e aprovação de acordo com o plano estratégico e de negócios da empresa.

Ao encerrar a fase do projeto detalhado, por meio da aprovação já mencionada, a decisão de passagem para a fase de produção é submetida à aprovação de toda a equipe de desenvolvimento.

3 METODOLOGIA

Nesta etapa do trabalho serão apresentadas e analisadas as principais concepções existentes no mercado para ensaio de fadiga por flexão rotativa em barras cilíndricas, encontradas em catálogos, trabalhos acadêmicos, vídeos de apresentação do canal de internet *Youtube*, entre outros. As informações aqui apresentadas servirão de base para a determinação de parâmetros de projeto, com o objetivo de encontrar uma melhor concepção para o projeto do equipamento em questão. Na Figura 10, é apresentado um organograma com todas as fases do projeto e as respectivas ferramentas utilizadas em cada uma delas.

Figura 10 - Organograma das fases do projeto



Fonte: O autor (2017)

3.1 Projeto Informacional

De maneira genérica, o que se deseja de um equipamento deste tipo é que ele seja capaz de realizar ensaios de fadiga por flexão alternada em corpos cilíndricos de diferentes tipos de material, utilizando-se de corpos de prova com dimensões estabelecidas pela norma ISO 1143:2010. A quantidade de rotações aplicadas no corpo ensaiado deverá ser conhecida e o ensaio deverá ser

interrompido no momento da ruptura do corpo de prova em questão. O valor de carga aplicada no corpo de prova também deverá ser uma grandeza de fácil leitura e/ou obtenção.

3.1.1 Benchmarking

Na sequência, listam-se alguns equipamentos encontrados no mercado, destinados a este fim, onde para cada um deles serão descritos alguns comentários.

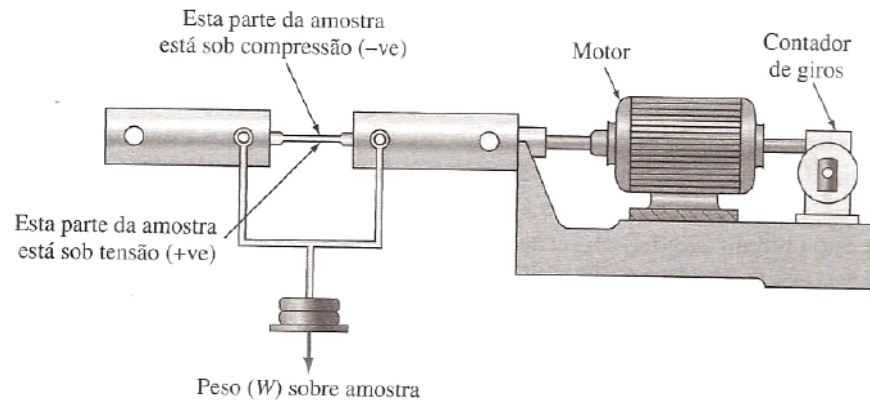
3.1.1.1 Máquina de ensaio de fadiga por R. R. Moore

O equipamento de ensaio de fadiga por flexão rotativa em barras cilíndricas concebido por R. R. Moore (Figura 11), compreende um motor elétrico responsável por prover o giro do corpo de prova, quatro mancalizações ao todo sendo duas delas fixas em uma base e outras duas acopladas à um suporte, onde se apoiarão os pesos que irão conferir as tensões de flexão na barra ensaiada. Na ponta do eixo pode-se encontrar um contador de voltas para a obtenção dos valores finais de número de ciclos realizados durante o ensaio. Abaixo da estrutura, adjunto ao suporte dos pesos, há um contato elétrico, o qual irá se abrir no momento da ruptura do material, desligando o motor e cessando o giro do sistema.

Esse equipamento possui controle do número de ciclos por meio de um contador de voltas acoplado no lado oposto ao motor, porém o sistema de desligamento do mesmo pode ser considerado pouco eficaz. A máquina só terá seu funcionamento interrompido após a ruptura total do corpo de prova. Isso representa uma probabilidade considerável de dano na superfície de ruptura, impedindo uma análise mais criteriosa da progressão da trinca em questão.

Outro ponto a ser considerado é o apoio dos pesos, que fornecerão a tensão de flexão sobre o corpo de prova. É necessário considerar a massa dos mancais e do próprio suporte, somando-os à massa total a ser aplicada. Dessa forma, não é possível ensaiar com níveis de tensões abaixo do proporcionado pela massa do conjunto citado. De forma geral, pode-se afirmar que cumpre o papel ao qual é proposto, com algumas ressalvas já citadas.

Figura 11 - Máquina de ensaio de fadiga por R. R. Moore



Fonte: HAYDEN; MOFFAT e WULFF (1965 apud SMITH; HASHEMI, 2012, Fig. 7.17, p. 207)

3.1.1.2 Equipamento de ensaio de fadiga apresentado por Askeland e Wright

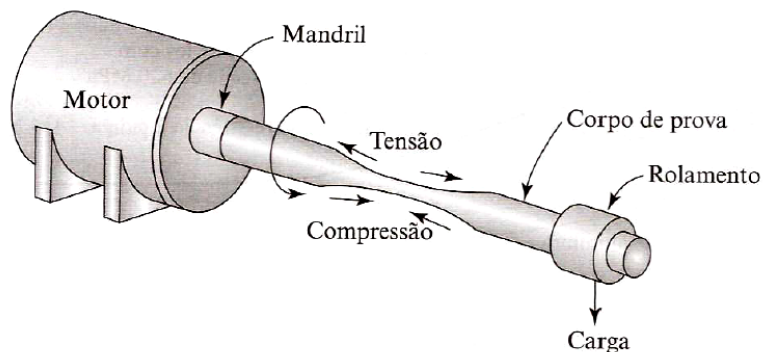
Askeland e Wright (2015) apresentam em sua literatura uma concepção de equipamento que tem como princípio a aplicação da sollicitação na extremidade do corpo de prova e não no centro do mesmo, como na concepção anterior de R. R. Moore. Apresenta-se de forma construtiva mais simplificada, porém sem perder as principais características de funcionalidade (Figura 12).

De acordo com as pesquisas realizadas, é impossível determinar com precisão o local de instalação do contador de voltas, mas o fato é que ele se faz necessário para a obtenção dos dados principais do ensaio.

A fixação do corpo de prova a ser ensaiado, em uma das extremidades, se faz por meio de um mandril, enquanto na outra extremidade a carga é aplicada sobre um rolamento, para que não haja esforços indesejados e forças de atrito consideráveis durante o ensaio.

Assim como no equipamento anterior, não se percebe a existência de proteção mecânica a fim de evitar contato acidental do usuário com as partes móveis do equipamento. É desconhecida também a forma de desligamento da máquina, se existe e como é feito o encerramento do processo de ensaio.

Figura 12 - Equipamento de ensaio de fadiga apresentado por Askeland e Wright



Fonte: ASKELAND; WRIGHT (2015, Fig 7-15, p.217)

3.1.1.3 Equipamento didático Edibon

Este equipamento é comercializado pela empresa Edibon Equipamentos Técnico-Didáticos e apresenta um conceito semelhante ao apresentado anteriormente por Askeland e Wright (2015), aplicando a carga na extremidade do corpo de prova. Neste equipamento percebe-se a presença de um sistema de controle eletrônico, que inclui contador de voltas e verificação do nível de carregamento na peça por meio de uma célula de carga.

Percebe-se um cuidado mais refinado no que diz respeito à segurança do usuário, contendo proteções das partes girantes, incluindo o corpo de prova que, ao se partir, poderá projetar fragmentos para o exterior do equipamento. Essa proteção, de certa forma, compromete a visualização do ensaio e da trinca a se formar no material, o que dificulta o acompanhamento da mesma. Mesmo com a proteção, é possível que haja algum incidente envolvendo o usuário, pois ainda há partes girantes expostas.

A carga é aplicada na extremidade da barra a ser ensaiada com o auxílio de um parafuso, sendo que, à medida que ele é roscado, se aumenta ou diminui a carga aplicada, e esta pode ser medida de diversas formas, entre elas, com o uso de uma célula de carga, que é o caso deste equipamento.

A mancalização do eixo é simples e eficaz, facilmente encontrada no comércio especializado, sem que haja necessidade de fabricar especialmente para o projeto.

A Figura 13 ilustra sua concepção, a qual percebe-se avanços em relação ao

seu projeto base apresentado por Askeland e Wright (2015), porém há pontos a serem observados com mais perícia a fim de que atenda os requisitos dos clientes.

Figura 13 - Equipamento didático do fabricante Edibon



Fonte: <http://www.edibon.com/products/index.php?area=mechanicsmaterials&subarea=strengthmaterials&lang=pt>

Uma análise comparativa pode ser observada na Tabela 1, que traz os pontos atendidos ou não por cada produto analisado.

Tabela 1 - Resultados do Benchmarking

Necessidades dos Clientes	Equipamentos		
	R.R. Moore	Askeland	Edibon
Desligamento automático	A	N/D	A
Reprodutibilidade e Repetibilidade	A	A	A
Versátil (didático ou pesquisa)	A	A	A
Robusta	A	N/D	A
Facil ajuste de carga (0 a max)	N/A	N/D	A
Capaz de testar corpos de prova diferentes e de diâmetros diferentes	N/D	A	N/D
Facil Operação	A/R	A	A/R
Segura	N/D	N/D	A/R
Baixo Custo de Fabricação	N/A	A	N/A
Deve ser portátil	N/A	A	A
Bivolt	N/D	N/D	N/D

Legenda:

A = Atende

A/R = Atende com Restrições

N/A = Não Atende

N/D = Não Disponível

Fonte: O autor (2017)

3.1.2 Necessidades dos consumidores

Até aqui foram listados os potenciais fornecedores para o produto, bem como os aspectos mecânicos relacionados ao equipamento que visam nortear o desenvolvimento do projeto.

De posse dessas informações, parte-se para um aprofundamento na caracterização da qualidade esperada do produto tendo por base as necessidades dos consumidores. Tais necessidades foram obtidas junto a professores do IFSC – Jaraguá do Sul – Rau, diretamente ligados ao uso deste equipamento, bem como da análise de outros projetos de máquinas similares já citadas neste trabalho.

Dessa forma, na Tabela 2 serão listadas tais necessidades de forma qualitativa e serão convertidas em requisitos de projeto (quantitativa) através da ferramenta QFD (Quality Function Deployment), originando assim as especificações de projeto do produto. Deve se ressaltar ainda que será utilizada somente a 1ª Matriz do QFD, conhecida como Casa da Qualidade, não sendo realizados os desdobramentos das demais matrizes.

Os principais resultados da Matriz QFD são os pontos que mais têm influência na decisão final do cliente, ou seja, são as especificações de projeto que tem maior ligação com as necessidades dos clientes. Estas especificações devem ser priorizadas na concepção do projeto afim de assegurar a satisfação dos clientes.

Dessa forma, pode-se afirmar que, na sequencia, os pontos a serem priorizados são: Facilidade de operação; robustez do conjunto; controle de velocidade do motor; facilidade de regular a carga aplicada e desligamento automático. Os demais itens também apresentaram importância relevante, porém os citados foram os principais. O resultado completo pode ser visualizado na matriz.

No telhado da Matriz QFD, foram realizadas as interações entre as especificações de projeto, a fim de verificar o impacto que pode ser causado entre elas dentro do projeto. A facilidade de operação foi o aspecto que mais teve interações positivas, enquanto o custo de fabricação sofreu o maior impacto negativo. Isso representa que, para atender algumas especificações de projeto mais prioritárias, sacrificaria o quesito custo de fabricação.

Tabela 2 - Primeira Matriz da Qualidade (casa da qualidade)

		<table border="1"> <tr><td>Peso máx. 20kg</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Sistema monofásico</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Robustez do conjunto</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Proteções mecânicas em partes girantes</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Custo de fabricação máximo de R\$1500,00</td><td>-</td><td></td><td>-</td><td>-</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Facilidade de fixação do corpo de prova</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>-</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Desligamento automático</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>-</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Facilidade para regular a carga aplicada</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>-</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Controle de velocidade do motor</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>-</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Isento de manutenção</td><td></td><td></td><td>++</td><td></td><td>-</td><td></td><td>-</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Facilidade de operação</td><td></td><td></td><td></td><td>-</td><td></td><td>++</td><td>++</td><td>++</td><td>++</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Nível de vibração</td><td>--</td><td></td><td>++</td><td>-</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Direcionador de melhoria >>>></td><td><<</td><td>0 >></td><td>>></td><td><<</td><td>>></td><td>>></td><td>>></td><td>>></td><td>>></td><td>>></td><td><<</td><td></td></tr> </table>											Peso máx. 20kg													Sistema monofásico													Robustez do conjunto	--												Proteções mecânicas em partes girantes	--												Custo de fabricação máximo de R\$1500,00	-		-	-									Facilidade de fixação do corpo de prova					-								Desligamento automático					-								Facilidade para regular a carga aplicada					-								Controle de velocidade do motor					-								Isento de manutenção			++		-		-						Facilidade de operação				-		++	++	++	++				Nível de vibração	--		++	-									Direcionador de melhoria >>>>	<<	0 >>	>>	<<	>>	>>	>>	>>	>>	>>	<<		<table border="1"> <tr><th colspan="2">Correlação entre requisitos de cliente e de produto</th></tr> <tr><td>9</td><td>●</td><td>Forte</td></tr> <tr><td>3</td><td>○</td><td>Moderado</td></tr> <tr><td>1</td><td>△</td><td>Fraco</td></tr> <tr><th colspan="2">Correlação</th></tr> <tr><td>++</td><td>Posit. Forte</td></tr> <tr><td>+</td><td>Posit. Fraco</td></tr> <tr><td></td><td>Inexistente</td></tr> <tr><td>-</td><td>Neg. Fraca</td></tr> <tr><td>--</td><td>Neg. Forte</td></tr> </table>				Correlação entre requisitos de cliente e de produto		9	●	Forte	3	○	Moderado	1	△	Fraco	Correlação		++	Posit. Forte	+	Posit. Fraco		Inexistente	-	Neg. Fraca	--	Neg. Forte	qualidade planejada	
Peso máx. 20kg																																																																																																																																																																																																																		
Sistema monofásico																																																																																																																																																																																																																		
Robustez do conjunto	--																																																																																																																																																																																																																	
Proteções mecânicas em partes girantes	--																																																																																																																																																																																																																	
Custo de fabricação máximo de R\$1500,00	-		-	-																																																																																																																																																																																																														
Facilidade de fixação do corpo de prova					-																																																																																																																																																																																																													
Desligamento automático					-																																																																																																																																																																																																													
Facilidade para regular a carga aplicada					-																																																																																																																																																																																																													
Controle de velocidade do motor					-																																																																																																																																																																																																													
Isento de manutenção			++		-		-																																																																																																																																																																																																											
Facilidade de operação				-		++	++	++	++																																																																																																																																																																																																									
Nível de vibração	--		++	-																																																																																																																																																																																																														
Direcionador de melhoria >>>>	<<	0 >>	>>	<<	>>	>>	>>	>>	>>	>>	<<																																																																																																																																																																																																							
Correlação entre requisitos de cliente e de produto																																																																																																																																																																																																																		
9	●	Forte																																																																																																																																																																																																																
3	○	Moderado																																																																																																																																																																																																																
1	△	Fraco																																																																																																																																																																																																																
Correlação																																																																																																																																																																																																																		
++	Posit. Forte																																																																																																																																																																																																																	
+	Posit. Fraco																																																																																																																																																																																																																	
	Inexistente																																																																																																																																																																																																																	
-	Neg. Fraca																																																																																																																																																																																																																	
--	Neg. Forte																																																																																																																																																																																																																	
RC: Requisitos do Cliente	Peso máx. 20kg	Sistema monofásico	Robustez do conjunto	Proteções mecânicas em partes girantes	Custo de fabricação máximo de R\$1500,00	Facilidade de fixação do corpo de prova	Desligamento automático	Facilidade para regular a carga aplicada	Controle de velocidade do motor	Isento de manutenção	Facilidade de operação	Nível de vibração	Plano	Índice de melhoria	Argumento de vendas	Peso absoluto	Peso relativo																																																																																																																																																																																																	
	Desligamento automático	△	○	△	○	●	△	○	△	○	△	○	△	1	1	1	10	13,7																																																																																																																																																																																																
	Reprodutibilidade e Repetibilidade	△	△	●	△	○	○	●	○	○	○	○	○	1	1	1	10	13,7																																																																																																																																																																																																
	Versátil (didático ou pesquisa)	1	1	9	9	3	9	9	9	9	9	9	3	1	1	1	9	12,3																																																																																																																																																																																																
	Robusta	●	△	●	●	●	○	△	△	△	○	○	●	1	1	1	9	12,3																																																																																																																																																																																																
	Facil ajuste de carga (0 a max)	△	△	○	○	○	△	○	○	△	○	○	△	1	1	1	9	12,3																																																																																																																																																																																																
	Capaz de testar corpos de prova diferentes e de diâmetros diferentes	△	△	●	△	△	●	△	○	○	△	○	○	1	1	1	8	11																																																																																																																																																																																																
	Facil Operação	△	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	1	1	1	7	9,59																																																																																																																																																																																																
	Segura	●	△	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	1	1	1	5	6,85																																																																																																																																																																																																
	Baixo Custo de Fabricação	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1	1	1	3	4,11																																																																																																																																																																																																
	Deve ser portátil	●	○	○	○	△	△	△	△	△	△	△	○	1	1	1	2	2,74																																																																																																																																																																																																
	Bivolt	△	○	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	1	1	1	1	1,37																																																																																																																																																																																																
	Grau de importância (req. produto)	308,2	187,7	647,9	491,8	434,2	437,0	582,2	593,2	606,8	346,6	768,5	442,5	5846,6																																																																																																																																																																																																				
Percentual	5,3	3,2	11,1	8,4	7,4	7,5	10,0	10,1	10,4	5,9	13,1	7,6	100,0																																																																																																																																																																																																					
Classificação	11	12	2	6	9	8	5	4	3	10	1	7																																																																																																																																																																																																						

Direcionador de melhoria	
0	não importa a variação do valor
>>	quanto maior o valor melhor
<<	quanto menor o valor melhor

3.1.3 Especificações de projeto do produto

O estudo das especificações de projeto do produto se faz necessário antes da fase de concepção do produto, pois permitirá um melhor entendimento do problema do projeto e dos aspectos e características que o mesmo deverá atender.

Inicialmente são explorados os consumidores em potencial para o produto aqui em desenvolvimento, que são, basicamente, professores, alunos e pesquisadores das áreas de engenharia e tecnologia que necessitam de um equipamento capaz de realizar ensaios de fadiga por flexão alternada em barras rotativas simétricas.

No que diz respeito aos aspectos mecânicos os principais estão ligados ao tamanho adequado para a aplicação, sendo que neste âmbito está inclusa a portatibilidade e robustez a fim de garantir resultados fidedignos e permitir fácil transporte do equipamento; para isso, busca-se obter um peso máximo final de 20kg.

Em se tratando de alimentação elétrica, o sistema mais comumente encontrado é o monofásico. O sistema trifásico está presente nas indústrias e instituições de ensino, porém em menor quantidade de tomadas disponível. Portanto, a alimentação monofásica tornaria o equipamento mais versátil, podendo ser alimentado na grande maioria das tomadas convencionais.

A segurança também é um aspecto de suma importância, portanto, o equipamento deverá possuir anteparos e proteções nas partes móveis e girantes, a fim de garantir a integridade física do operador. Além disso, o equipamento deverá desligar no momento da ruptura do corpo de prova, para que a zona fraturada não seja danificada, e também, como já citado, para segurança do operador.

Evidentemente o projeto de um equipamento deve visar a facilidade de preparação e operação do mesmo. Desta forma, algumas de suas funções deverão ser estudadas com cautela, como: fixação do corpo de prova, método de regulagem da carga e método de controle de velocidade do motor.

Uma explanação mais simplificada pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações de projeto

Requisitos	Unid.	Objetivos	Sensor	Saidas Indesejáveis
Massa	kg	20	Balança	Peso muito superior a 20kg
Alimentação	V	220 V monofásico		Sistema trifásico
Proteção	%	100% das partes girantes	Visual	Proteção muito inferior a 100% das partes girantes
Desligamento		Momento da ruptura	Visual	Não desligar o equipamento no momento da ruptura do corpo de prova
Preparação e Operação		Facilidade de Preparação e Operação		Ser difícil de preparar e operar

Fonte: O autor (2017)

3.2 Projeto Conceitual

Após o levantamento realizado no projeto informacional, parte-se para o projeto conceitual, que consiste na geração de soluções alternativas que atendam às especificações definidas. O principal objetivo desta etapa é comparar possíveis soluções para um mesmo problema e, ao longo desse processo, definir a melhor e mais inovadora combinação de soluções para o produto.

Para alcançar esse objetivo, além de criatividade, a equipe de projeto precisa utilizar alguns métodos e procedimentos que lhe permita obter, de forma rápida e precisa, um conjunto de soluções inovadoras.

No presente trabalho, optou-se por utilizar um método sistemático de geração de concepções baseado em uma ferramenta chamada de “Matriz Morfológica”. Esse método consiste em uma pesquisa sistemática de diferentes combinações de elementos ou parâmetros, com o objetivo de encontrar novas soluções para o problema.

3.2.1 Matriz morfológica

A matriz morfológica parte das especificações de projeto. Esta última indicará quais os principais pontos do equipamento merecem atenção e devem ser repensadas. Esses são os problemas a serem solucionados por novas ideias e combinações.

Conforme já visto no capítulo anterior, as especificações de projeto resumem-se em: Peso máx. 20kg; sistema monofásico 220V; robustez do conjunto; proteções

mecânicas em partes girantes; custo de fabricação máximo de R\$1500,00; facilidade de fixação do corpo de prova; desligamento automático; facilidade para regular a carga aplicada; controle de velocidade do motor; isento de manutenção; facilidade de operação; baixo nível de vibração.

Baseado nessas informações, o próximo passo é identificar as funções ou operações desencadeadas pelo processo. Examinando o processo da máquina de ensaio de fadiga por flexão em barras simétricas rotativas, têm-se a sequencia de operações: Alimentar o corpo de prova na máquina; realizar a fixação do mesmo; aplicar carga controlada transversalmente ao eixo; proteger partes girantes do equipamento; acionar o motor; controlar velocidade do motor; realizar leitura de número de revoluções; controlar o desligamento da máquina.

A primeira coluna da matriz é preenchida com as funções ou parâmetros do problema. Essas funções gerais podem sofrer desdobramentos que deverão aparecer na segunda coluna da tabela. As colunas subsequentes acomodarão as alternativas de soluções para cada desdobramento de cada problema. É a busca por diferentes formas de resolver um mesmo problema, ou, realizar determinada tarefa sem se preocupar com as demais linhas da matriz. Essas soluções alternativas podem ser descritas de forma literal ou representadas graficamente. As soluções alternativas podem surgir através de pesquisas, *brainstorming*, *benchmarking* e, inclusive, usando-se da experiência da equipe de projeto. Para cada linha, serão preenchidas tantas colunas quantas soluções forem encontradas.

Ao término do preenchimento da matriz, é momento de analisar e buscar concepções alternativas para o problema global. A matriz morfológica (Tabela 4) servirá de ponto de partida para uma verdadeira mistura de soluções de problemas individuais visando resolver o problema global, surgindo assim, as concepções do produto.

Tabela 4 - Matriz Morfológica

Alimentação	a.1 Alimentação do corpo de prova				
Fixação	b.1 Fixação dos componentes na base				
	b.2 Fixação do corpo de prova				
	b.3 Fixação da carga no corpo de prova				
	b.4 Mancalização das partes girantes				
Acionamento	c.1 Liga/Desliga				
Controle	e.1 Controle de carga aplicada				
	e.2 Controle de velocidade do motor				
	e.3 Controle do numero de revoluções				
	e.4 Controle do desligamento				
Proteção	Proteção elétrica				
	Proteção mecânica				

3.2.2 Escolha da concepção










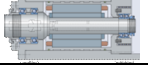














As duas concepções extraídas da matriz morfológica são apresentadas na Tabela 5 de modo que sua fabricação e utilização são perfeitamente viáveis. A concepção B utiliza-se de alguns materiais mais caros, que trazem bons resultados, porém dificultam a fabricação do equipamento, por serem mais complexos. Como exemplo disso, pode-se citar a fixação do corpo de prova através de pinça. Trata-se de uma excelente solução, porém é algo que dificultaria muito a fabricação da máquina, pois requer a usinagem precisa de um cone morse interno para alojar o porta-pinça.

Em relação ao controle de carga aplicada no corpo de prova, as duas opções se assemelham, sendo distintas apenas pelo seu tamanho. O dinamômetro da

concepção A ocupa menos espaço, otimizando o projeto. A mancalização do eixo árvore da máquina também se diferencia pela complexidade de fabricação. Na concepção B, tem-se um cabeçote montado com várias peças usinadas, além dos rolamentos. Na concepção A, utiliza-se de mancais prontos, disponíveis no mercado.

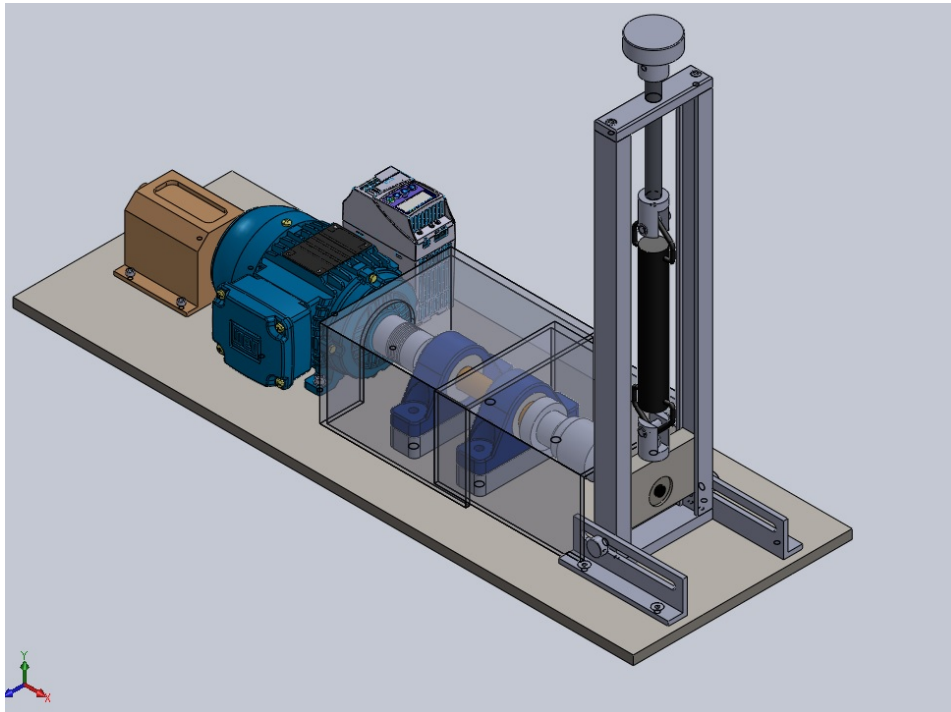
As proteções mecânicas também sofrem uma distinção entre as duas concepções. Na concepção A, tem-se proteções fabricadas de policarbonato, uma excelente solução que permite a visualização de toda a máquina, mantendo sua principal função de proteger o operador das partes móveis do equipamento. Na concepção B, tem-se uma proteção de chapa perfurada 10x10mm, que também atenderia os requisitos de segurança, porém prejudica a estética e a visibilidade do equipamento durante sua operação.

Tabela 5 - Matriz de Concepções

Alimentação	a.1 Alimentação do corpo de prova		
Fixação	b.1 Fixação dos componentes na base		
	b.2 Fixação do corpo de prova		
	b.3 Fixação da carga no corpo de prova		
	b.4 Mancalização das partes girantes		
Acionamento	c.1 Liga/Desliga		
Controle	e.1 Controle de carga aplicada		
	e.2 Controle de velocidade do motor		
	e.3 Controle do numero de revoluções		
	e.4 Controle do desligamento		
Proteção	Proteção elétrica		
	Proteção mecânica		
		Concepção A	Concepção B

Após análise das duas concepções, optou-se pela concepção A, uma vez que essa concepção apresenta uma funcionalidade bastante satisfatória para o atendimento dos requisitos de projeto, aliado a um custo menor de fabricação. Simplicidade, robustez e confiabilidade são encontradas nessa concepção que terá o leiaute aproximado conforme a Figura 14:

Figura 14 - Leiaute da máquina conforme concepção escolhida



Fonte: O autor (2017)

3.3 Projeto detalhado

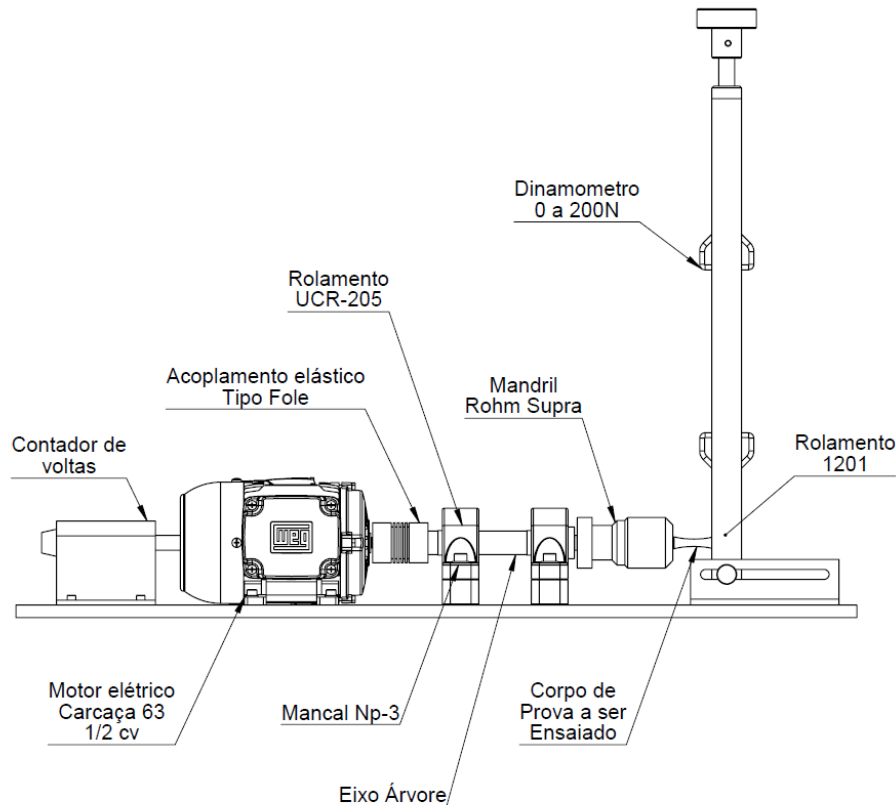
Esta fase do projeto, foi realizada com base em alguns pontos da metodologia de Back et al. (2008) por se tratar de um projeto sem a realização montagem física do equipamento. Back et al. (2008) sugere, conforme visto anteriormente, a fabricação de um protótipo, avaliação e validação deste, o que não é o objetivo do presente trabalho.

O objetivo do projeto do equipamento em questão é suprir o maior número possível de necessidades dos clientes, utilizando para isso os requisitos de projeto. Nessa fase, serão apresentados os detalhes do projeto do equipamento, como: lista de peças, desenho final do conjunto e especificação das peças a serem adquiridas junto aos fornecedores. A Figura 15 representa os componentes principais do

equipamento, citados no decorrer deste capítulo.

Adotou-se uma sequência considerada lógica por se tratar de fatores que delimitam dimensões importantes para o projeto. Dessa forma, o primeiro sistema a ser abordado é o de propulsão (motor), seguido do eixo árvore, rolamentos, mancais, fixação e controle de carga.

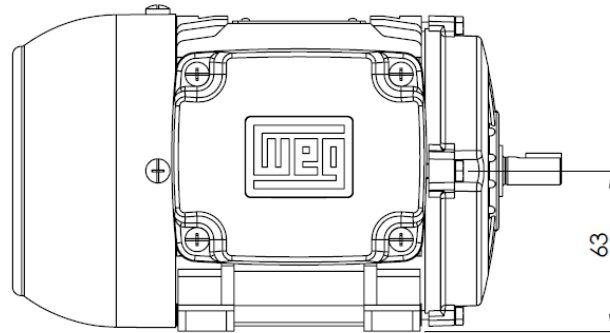
Figura 15- Componentes principais do equipamento



Fonte: O autor (2017)

O conjunto de acionamento do equipamento é composto por um motor de $\frac{1}{2}$ cv de carcaça fundida 63. A potência é baixa pelo fato do sistema exigir baixo torque, uma vez que não haverá carga de torque durante o processo, somente cargas de flexão. A carcaça 63 se justifica pelo fato de ser a menor carcaça fundida encontrada comercialmente. Ela tem por característica física principal e crucial ao desenvolvimento do projeto, a distância de 63 mm entre o pé e o centro do eixo do mesmo, conforme ilustra a Figura 16.

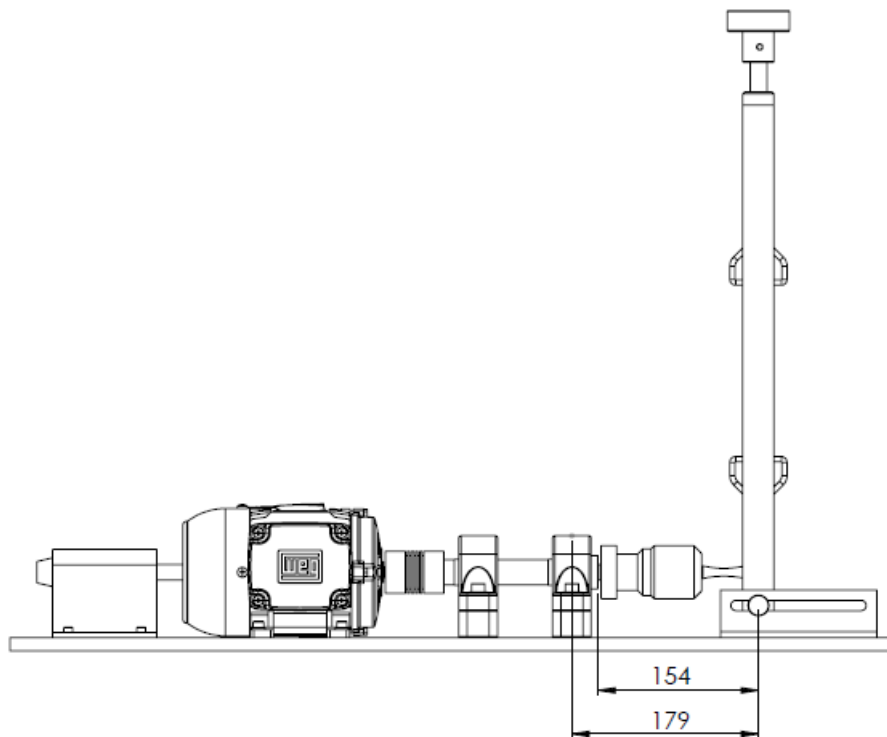
Figura 16 - Motor elétrico carcaça 63



Fonte: O autor (2017)

O eixo árvore do equipamento foi dimensionado de acordo com a norma ASME B106.1M-1985 apresentada por Norton (2013). Primeiramente encontrou-se a maior tensão de flexão atuante no eixo. Esse ponto está localizado no centro do mancal dianteiro a uma distância de 179 mm do ponto de aplicação da carga, conforme ilustrado na Figura 17 .

Figura 17 - Distâncias geradoras de Momento Fletor



Fonte: O autor (2017)

Portanto:

- Momento Fletor Máximo:

$$MF = F \cdot d$$

$$MF = 200.179$$

$$MF = 35800 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

- Momento Fletor no Ponto Crítico

$$MF = F \cdot d$$

$$MF = 200.154$$

$$MF = 30800 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

- Diâmetro estimado do eixo:

Segundo Norton (2013), Apêndice A, Tabela A-9, P.993, a σ_{asc} do aço 4140 temperado e revenido é 1641 MPa. Portanto, com $F.S. = 2,5$, tem-se:

$$\sigma_{adm} = \frac{1641}{2,5}$$

$$\sigma_{adm} = 656,4 \text{ MPa}$$

Utilizando-se desses dados, o diâmetro aproximado do eixo no ponto crítico é definido por:

$$d \cong \sqrt[3]{\frac{32 \cdot Mf}{\pi \cdot \tau_{adm}}}$$

$$d \cong 7,82 \text{ mm}$$

- Fator de segurança (Nf)

$$Nf = 2,5$$

- Fator de sensibilidade ao entalhe (q)

Segundo a figura 6-36 Parte 1 da página 344 de Norton (2013), adotou-se a tensão de ruptura de 1379 MPa por ser a curva que mais se aproxima do valor de tensão do aço 4140 temperado. Considerando o raio da ferramenta de usinagem de 0,4 mm, encontrou-se o fator de sensibilidade ao entalhe:

$$q = 0,88$$

- Fator geométrico de concentração de tensão (Kt)

Por escolha do projetista, o diâmetro maior (D) será o dobro do diâmetro menor (d), portanto, segundo a figura C-2 de Norton (2013), Apêndice C, Pág. 1000, tem-se:

$$Kt = A \cdot \left(\frac{r}{d}\right)^b$$

$$Kt = 2,12$$

- Fator de concentração de tensão por fadiga (Kf)

Segundo a equação 6.11b da pág 563 de Norton (2013) obtêm-se:

$$Kf = 1 + q \cdot (Kt - 1)$$

$$Kf = 1,99$$

- Limite de resistência à fadiga (S_n')

Segundo Norton (2013) pág. 328, para aços têm-se:

$$S_n' = 0,5 \cdot S_{ut}$$

Portanto:

$$S_n' = 886 \text{ MPa}$$

- Fator de carga (CL)

Segundo Norton (2013), pág. 330, para flexão:

$$CL = 1$$

- Fator de tamanho ou gradiente

Segundo Norton (2013), p. 331, eq. 6.7b:

Para diâmetros entre 0,3 e 10 in, usa-se:

$$CG = 0,896 \cdot d^{-0,097}$$

Portanto:

$$CG = 0,97$$

- Fator de Superfície (CS)

Tendo por base a Figura 6-26 da pág 332 de Norton (2013), usou-se a curva de acabamento usinado com resistência $S_{ut} = 257$ kpsi. Dessa forma, têm-se:

$$CS = 0,52$$

- Fator de resistência à fadiga corrigido (S_n)

$$S_n = S_n' \cdot CL \cdot CG \cdot CS$$

$$S_n = 446,9 \text{ MPa}$$

- Torque do motor (MT)

$$MT = \frac{30000 \cdot 368}{\pi \cdot 1720}$$

$$MT = 2043,1 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

- Tensão de escoamento (S_y)

Segundo Norton (2013), Apêndice A, Tabela A-9: A resistência ao escoamento

do aço 4140 temperado e revenido é: $S_y = 1641 \text{ MPa}$

- Cálculo do diâmetro do eixo (d)

$$d = \left\{ \frac{32 \cdot N_f}{\pi} \cdot \left[\left(K_f \cdot \frac{M a}{S_n} \right)^2 + \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{T m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = 15,17 \text{ mm}$$

Por meio dos cálculos apresentados acima, determina-se que o menor diâmetro admissível do eixo árvore se encontra imediatamente após a mancalização dianteira, onde está o momento fletor crítico do eixo. O diâmetro citado não pode ser menor do que 15,17 mm.

Os rolamentos a serem utilizados na mancalização do eixo árvore devem ser compatíveis com as medidas do projeto do eixo, determinado pelo projetista em 25mm de diâmetro. Portanto, por indicação do catálogo do mancal, foi utilizado o rolamento UCR-205, apresentado na Figura 18, quem tem por medida do diâmetro interno 25 mm. A escolha do rolamento serve de parâmetro norteador para a seleção correta do mancal.

Figura 18 - Rolamento UCR-205



Fonte: <http://www.rolautorolamentos.com.br/Produto-Rolamentos-Pillow-Block-Rolamento-UC-Rolamento-com-Fixacao-por-Parafusos--UC-211-32-versao-238-278.aspx>

Partindo da seleção do rolamento, foi utilizado um mancal NP-3 (Figura 19), que tem por principal característica a distância da base até o centro do mancal de 36,5 mm. Isso corresponde a 26,5 mm de desalinhamento entre o eixo árvore do equipamento e o motor de acionamento. Para promover o alinhamento correto dos conjuntos citados, será necessária a fabricação de calços com espessura de 26,5 mm a serem instalados embaixo dos mancais.

Figura 19 - Representação do mancal utilizado



Fonte: Catálogo Rolmax

Para realizar a transmissão de movimento entre o motor e o eixo árvore, optou-se por um acoplamento elástico, impedindo o escorregamento na transmissão, ao passo que compensa-se possíveis desalinhamentos oriundos do processo de montagem. Conforme a Figura 20, o acoplamento escolhido foi o de fole metálico KB 2/100-57-40,5, pois possui características compatíveis com o restante do projeto e permite um desalinhamento angular de até 2 graus. Os rasgos de chaveta seguem a norma DIN 6885.

Figura 20 - Acoplamento elástico de fole metálico KB-2



Fonte: <http://catalogo.imetex.com.br/item/acoplamento-de-fole-kbk/acoplamento-de-fole-metalico-kb-2/kb-2-100-57-40-5>

Para a fixação do corpo de prova, optou-se pelo mandril de aperto rápido ROHM Supra 136 (Figura 21). Sua fixação no eixo árvore é simplificada por meio de um cone padrão B18 e o range de abertura é de 3 a 16 mm, concedendo versatilidade ao conjunto. Outra característica crucial na escolha do acessório foi a possibilidade de aperto do conjunto de castanhas do mandril sem a utilização de

qualquer ferramenta, facilitando a preparação e operação da máquina.

Figura 21 - Mandril de aperto rápido ROHM Supra 136



Fonte: <https://www.mscdirect.com/product/details/98886013>

Na extremidade oposta à do mandril, há a fixação do corpo de prova no sistema de aplicação de carga. Para tal função, optou-se pelo rolamento autocompensador de esferas 1201 (Figura 22). Seu diâmetro interno é de 12 mm, compatível com o corpo de prova normatizado. A escolha do autocompensador se dá ao fato de que ele apresenta um desalinhamento permissível maior do que os demais. Esse desalinhamento acontece durante o teste devido à flexão à qual o corpo de prova é submetido e deve ser cuidadosamente compensado para que o corpo de prova não sofra tensões axiais.

Figura 22 - Rolamento autocompensador de esferas



Fonte: Catálogo NSK

O controle de carga aplicada no corpo de prova deve ser preciso e prático. Para isso foi utilizado um dinamômetro de mola de precisão, com escala de 0 a 200N, conforme apresentado na Figura 23. Esse dinamômetro é instalado na ponta do corpo de prova com o intuito de fornecer os valores de força que gerarão cargas

de flexão no mesmo. Ele é tracionado por um conjunto de acionamento manual composto por um eixo e um furo roscados.

Figura 23 - Dinamômetro de precisão

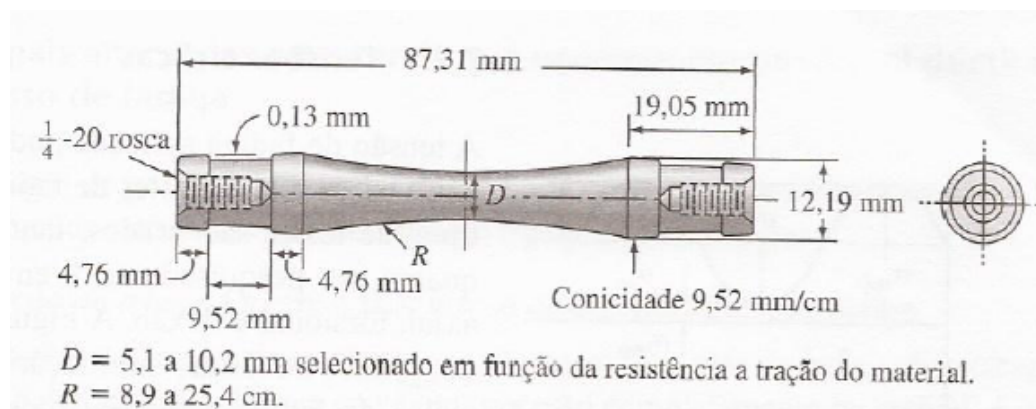


Fonte: <http://www.emporionet.net/?page=produtos&categoria=55>

O acionamento do motor elétrico é realizado por meio de um inversor de frequência que será responsável por possibilitar o controle de velocidade de giro do conjunto, sendo este mais uma variável para a realização dos ensaios. A frequência elétrica de trabalho do motor será ajustada por meio de entradas analógicas do inversor de frequência, controlada por um potenciômetro analógico instalado ao alcance do operador.

O corpo de prova a ser ensaiado, segue o padrão apresentado por SMITH e HASHEMI, (2012), contendo as dimensões de acordo com a Figura 24.

Figura 24- Corpo de prova



Fonte: ASTM (1949 apud SMITH; HASHEMI, 2012, Fig. 7.16, p 207)

A lista de componentes manufaturados e dos componentes comercialmente disponíveis encontra-se na Tabela 6. O desenho do conjunto completo, com a lista de peças, e os detalhamentos de cada uma das peças que o compõem, encontram-se no Apêndice A.

Tabela 6 - Lista de componentes

Itens manufaturados		Itens comerciais	
Item	Qtd.	Item	Qtd.
Base	1	Motor elétrico 63 ½ cv	1
Corpo de prova	1	Mancal NP-3	2
Mancal dianteiro	1	Rolamento UCR-205	2
Guias frontais	2	Rolamento 1201	1
Eixo árvore	1	Mandril Rohm Supra 136	1
Topo frontal	1	Dinamômetro 0-200N	1
Fuso de regulagem	1	Parafuso M6x25	3
Adaptador superior	1	Parafuso M5x25	4
Adaptador inferior	1	Inversor de Frequencia CFW100	1
Manípulo	1	Arruela lisa M6	4
Base Inferior	1	Parafuso M6x20	4
Cantoneira de regulagem	2	Parafuso M6x15 cab. Esc.	4
Proteção	1	Parafuso M8x25	1
Pino do dinamômetro	2	Anel de retenção RS8	2
Parafusos fixação das hastes	2	Pino guia 6x30	1
Arruela da ponta do fuso	1	Contador de voltas analógico	1
Calço dos mancais	2	Parafuso M5x10	4
Proteção dianteira	1	Acoplamento Fole	1
		Parafuso M8x55	4
		Arruela lisa M8	4

Fonte: O autor (2017)

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Primeiramente, pode-se dizer que o desenvolvimento desse projeto foi um importante passo para a obtenção de um equipamento capaz de atender as necessidades dos acadêmicos, professores, e pesquisadores das instituições de ensino superior e de pesquisa, especialmente do IFSC JS/RAU, no que diz respeito à ensaios de fadiga por flexão rotativa.

A seguir, serão feitas conclusões mais detalhadas sobre o equipamento projetado, bem como serão propostas possíveis melhorias para o equipamento.

4.1 Considerações sobre o projeto

No que diz respeito ao projeto desenvolvido, este atingiu os principais objetivos propostos com relação às especificações de projeto, sendo um produto relativamente portátil, com baixo custo de fabricação, alta rigidez mecânica e baixa complexidade técnica, aliado a bons níveis de segurança, versatilidade e facilidade de operação.

Devido a não fabricação do protótipo do equipamento é impossível comprovar a eficácia da máquina, porém acredita-se, baseado na análise técnica do projeto, ser um equipamento eficaz e confiável para sua aplicação didática.

O projeto é constituído por todos os elementos mecânicos necessários ao funcionamento do equipamento. Alguns controles, exclusivamente elétricos, não foram englobados no projeto da máquina, porém foram escolhidos os principais elementos norteadores que a equipe de projeto utilizaria.

Com relação às ferramentas de projeto, foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e serviram para nortear muitas das decisões necessárias durante a fase de desenvolvimento do produto final. Portanto, a metodologia de Back et al. (2008) foi fundamental no que diz respeito às orientações fornecidas à equipe de projeto.

A ferramenta de Desdobramento da Função da Qualidade (QFD) foi fundamental para a tomada de decisões quando da determinação dos itens a serem priorizados no projeto. Um *software* voltado à confecção de planilhas foi essencial para a obtenção da mesma.

Um *software* de modelagem em três dimensões foi crucial para que o projeto pudesse ser realizado com mais clareza e agilidade. Dele foram extraídos os

desenhos finais das peças que englobam o equipamento, com todas as dimensões e tolerâncias dimensionais necessárias para sua confecção e montagem.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa sugerida pelo presente trabalho retornou resultados bastante interessantes no que diz respeito ao conhecimento adquirido sobre fadiga, seus fenômenos e comportamentos nos materiais de construção mecânica. Sem esse embasamento, a equipe de projeto teria sérias dificuldades em compreender, de fato, o que se esperava do equipamento.

A ferramenta de *benchmarking* auxiliou significativamente para entender o que outros projetistas já pensaram, desenvolveram e testaram a respeito. Equipamentos já presentes no mercado acabam se tornando ferramentas para um reprojeto, buscando atender novas necessidades de clientes.

Diversas foram as ferramentas de desenvolvimento de projeto utilizadas. Conforme já citado, a metodologia de Back et al. (2008) foi a base do presente desenvolvimento, porém muitas de suas ferramentas não foram aqui aplicadas.

Duas concepções de projeto foram encontradas durante análise das ferramentas de desenvolvimento, o que demonstra que mais de uma alternativa pode ser considerada viável para a solução de problemas do projeto. Isso acaba tornando o projeto flexível e suscetível a adaptações. Sendo assim, a equipe de projeto considera o resultado do projeto bastante satisfatório.

Por fim, tem-se em mente que equipamentos didáticos facilitam o aprendizado do acadêmico, pois o mesmo visualiza na prática o que aprende na teoria, conseguindo, dessa forma, conciliar as informações e as experiências, aprimorando sua aprendizagem.

REFERÊNCIAS

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J.. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015. 648 p. Tradução da 3ª edição norte-americana.

BACK, Nelson et al. **PROJETO INTEGRADO DE PRODUTOS: Planejamento, Concepção e Modelagem**. Barueri: Manole Ltda., 2008. 601 p.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **ELEMENTOS DE MÁQUINAS DE SHIGLEY: PROJETO DE ENGENHARIA MECÂNICA**. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 1084 p.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **FUNDAMENTOS DA CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS: Uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. 817 p.

COLLINS, Jack A.. **PROJETO MECÂNICO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS: UMA PERSPECTIVA DE PREVENÇÃO DA FALHA**. Rio de Janeiro: Ltc, 2006. 740 p.

INTERNATIONAL, Edibon. **Equipamento de ensaio de fadiga**. Disponível em: <<http://www.edibon.com/products/index.php?area=mechanicsmaterials&subarea=strengthmaterials&lang=pt>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M.. **FUNDAMENTOS DO PROJETO DE COMPONENTES DE MÁQUINAS**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 500 p.

NORTON, Robert L.. **PROJETO DE MÁQUINAS: UMA ABORDAGEM INTEGRADA**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.

PAHL, Gerhard et al. **PROJETO NA ENGENHARIA: Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos - Métodos e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2005. 412 p. Tradução da 6ª edição alemã.

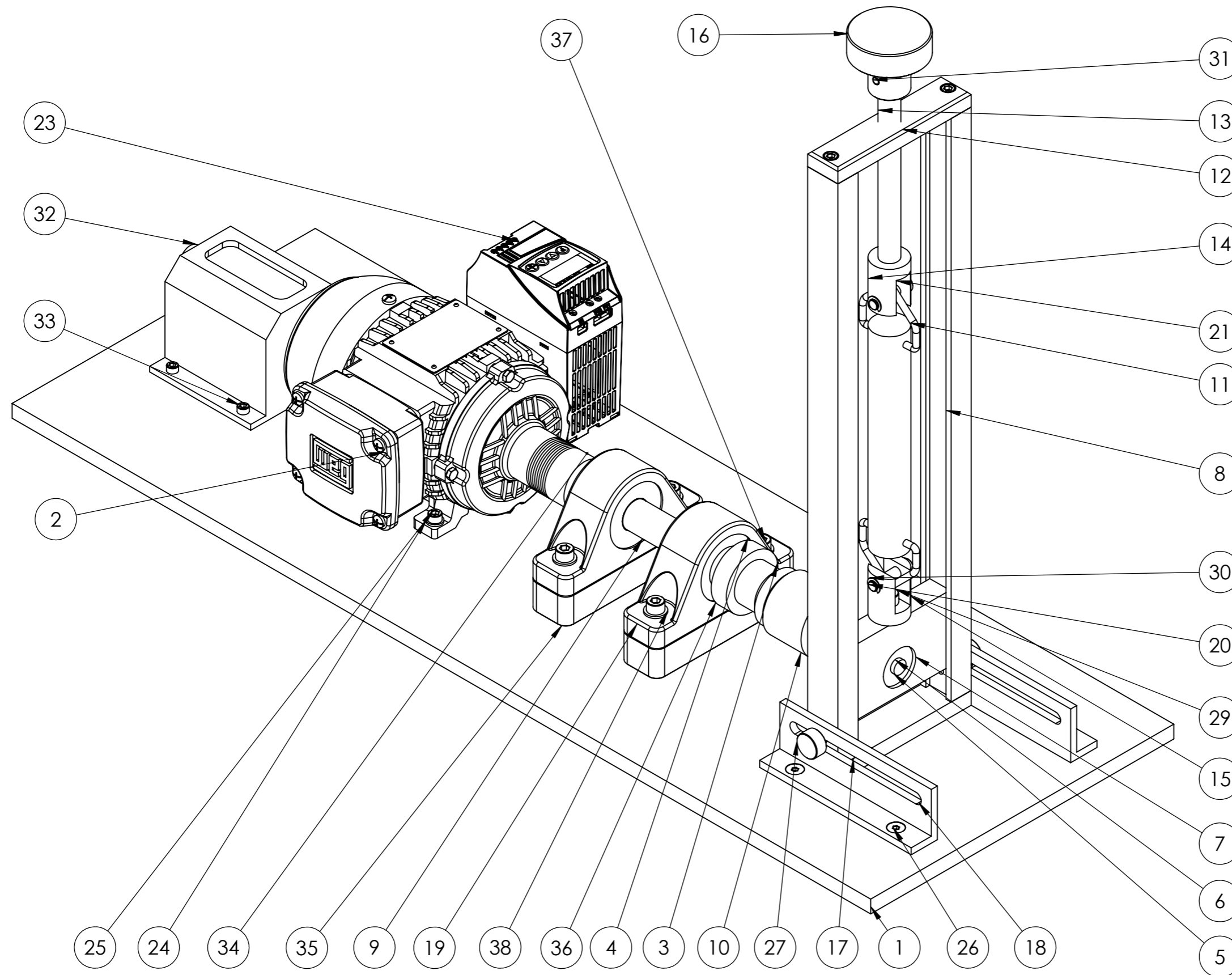
PEREIRA, Antonio Pinto. **Fadiga**. Disponível em: <<http://documents.tips/documents/fadiga1.html>>. Acesso em: 28 fev. 2017

ROSA, Edison da. **Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga**. Florianópolis: Ufsc, 2002.

ROZENFELD, Henrique et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006. 542 p.

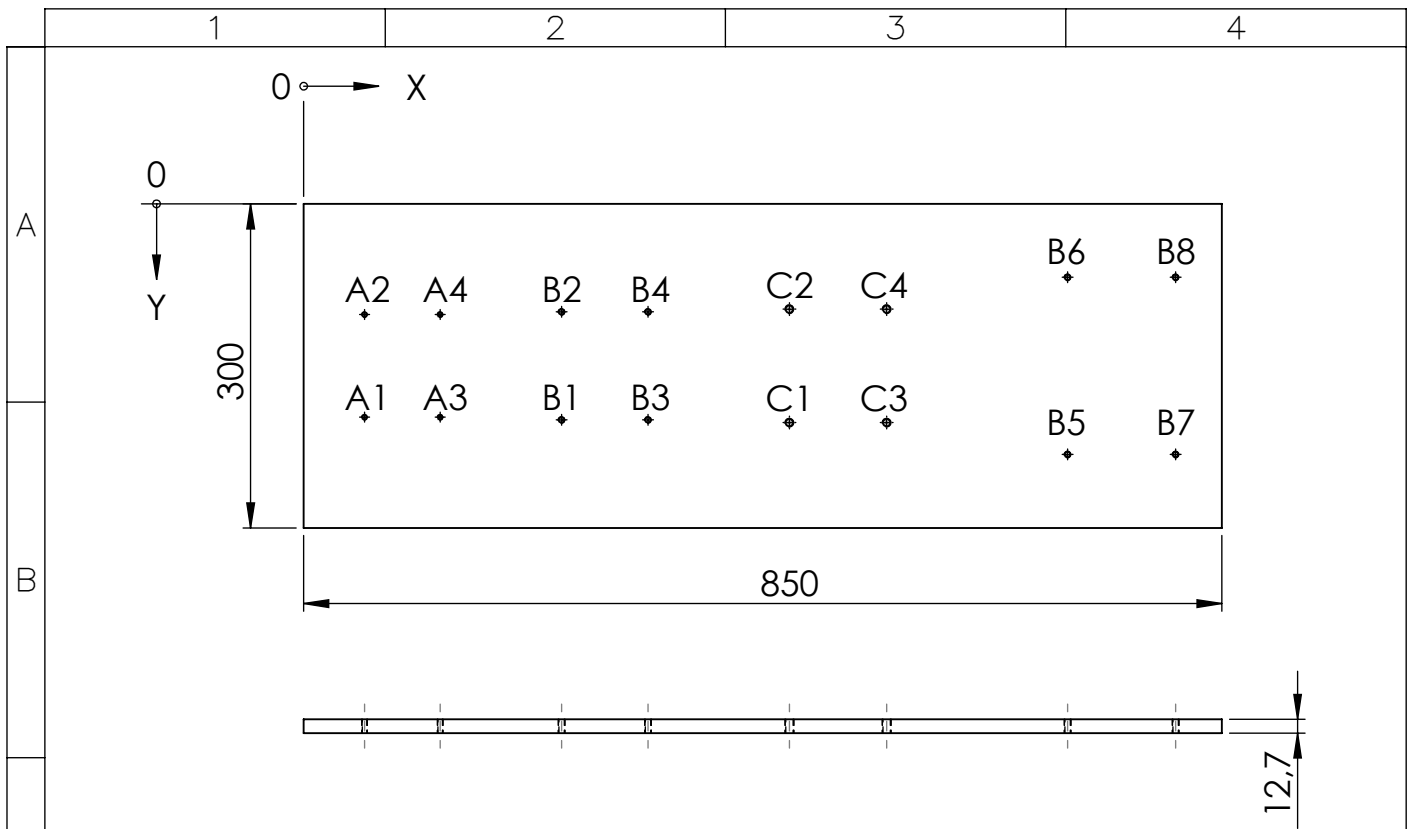
SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2012. 707 p.

APÊNDICE A – DESENHOS DETALHADOS



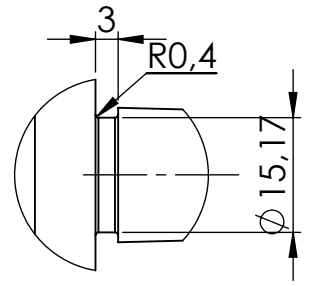
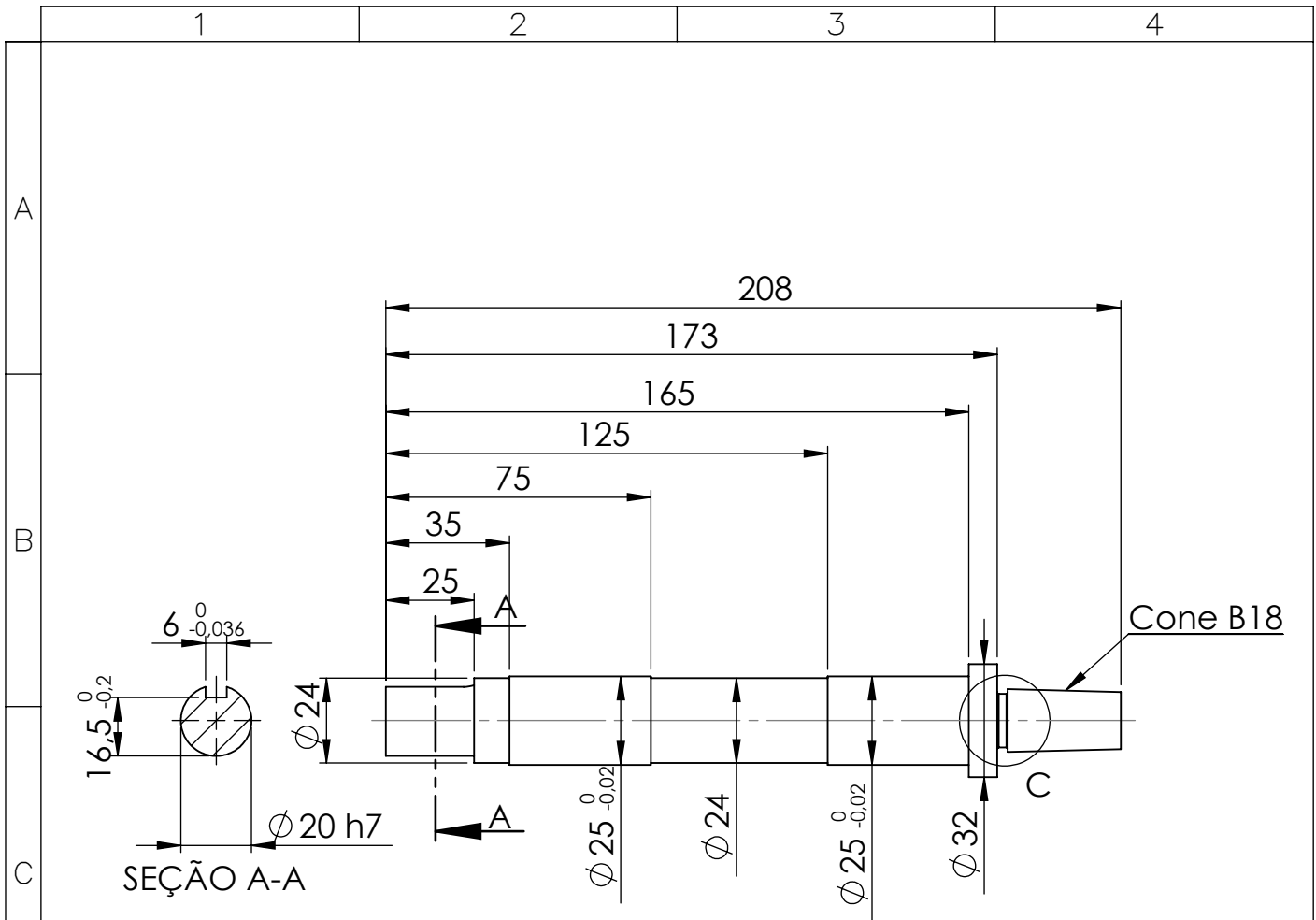
ITEM	DESCRIÇÃO DA PEÇA	QTD.
1	Base	1
2	Motor Carcaça 63	1
3	Mancal NP-3	2
4	Rolamento UCR-205	2
5	Corpo de prova	1
6	Rolamento 1201	1
7	Mancal dianteiro	1
8	Guias frontais	2
9	Eixo árvore	1
10	Mandril Rohm Supra	1
11	Dinamômetro 0-200N	1
12	Topo Frontal	1
13	Fuso regulagem	1
14	Adaptador Superior	1
15	Adaptador inferior	1
16	Manípulo	1
17	Base inferior	1
18	Cantoneira regulagem	2
19	Proteção	1
20	Pino do dinamometro	2
21	Parafuso M6x25	3
22	Parafuso M5x25	4
23	CFW100	1
24	Arruela lisa M6	4
25	Parafuso M6x20	4
26	Parafuso M6x15 escareado	4
27	Parafusos Fixação hastes	2
28	Arruela ponta fuso	1
29	Parafuso M8x25	1
30	Anel retenção RS8	2
31	Pino guia 6x30mm	1
32	Contador de voltas	1
33	Parafuso M5x10	4
34	Acoplamento Fole	1
35	Calço dos mancais	2
36	Proteção dianteira	1
37	Parafuso M8x55	4
38	Arruela lisa M8	4

TOLERÂNCIA		MATERIAL		ESCALA/SCALE		1:3	
ECM	LOC	RESUMO DE MODIFICAÇÕES SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTADO EXECUTED	VERIFICADO CHECKED	LIBERADO RELEASED	DATA DATE
EXEC	JONATHAN			CONJUNTO		IFSC - GW	
VERIF/CHECKED	JONATHAN						
LIBER/RELEASED	EDUARDO						
DT LIBER/REL DT	03/07/17						
				FOL/SHEET		1 / 1	

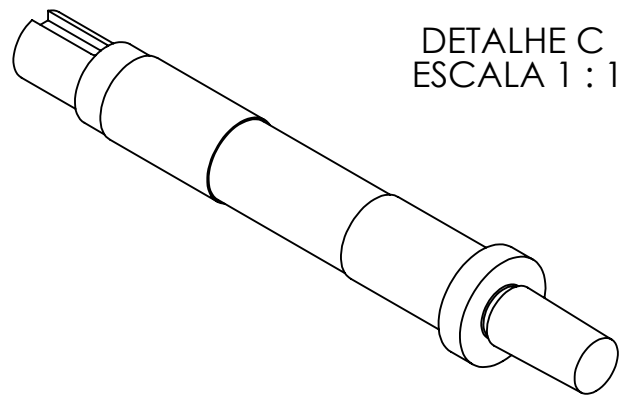


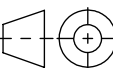
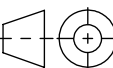
RÓTULO	LOC X	LOC Y	TAMANHO
A1	56,20	197,50	Ø 4.20 PASSANTE TOTAL M5x0.8 - 6H PASSANTE TOTAL
A2	56,20	102,50	
A3	126,20	197,50	
A4	126,20	102,50	
B1	238,60	200	Ø 5 PASSANTE TOTAL M6x1.0 - 6H PASSANTE TOTAL
B2	238,60	100	
B3	318,60	200	
B4	318,60	100	
B5	707	232	
B6	707	68	
B7	807	232	
B8	807	68	
C1	449,50	202,50	Ø 6.80 PASSANTE TOTAL M8x1.25 - 6H PASSANTE TOTAL
C2	449,50	97,50	
C3	539,50	202,50	
C4	539,50	97,50	

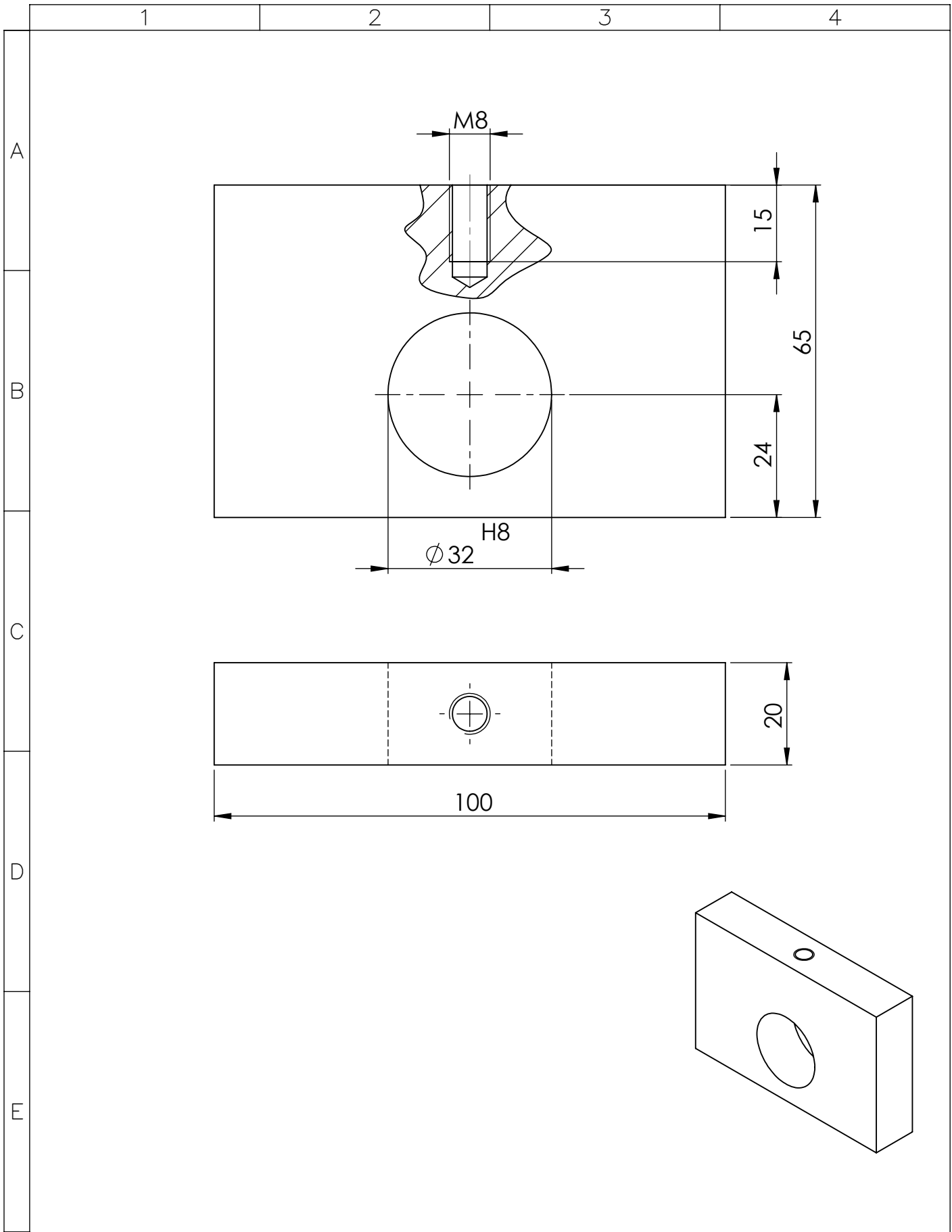
TOLERÂNCIA		0,2 mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		1:7	
EXEC		Jonathan		RESUMO DE MODIFICAÇÕES SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTADO EXECUTED		VERIFICADO CHECKED		LIBERADO RELEASED	
VERIF/CHECKED		Jonathan		Base						IFSC - GW	
LIBER/RELEASED		Eduardo									
DT LIBER/REL DT		03/07/17				FOL/SHEET		1 / 1			

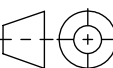
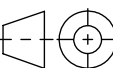


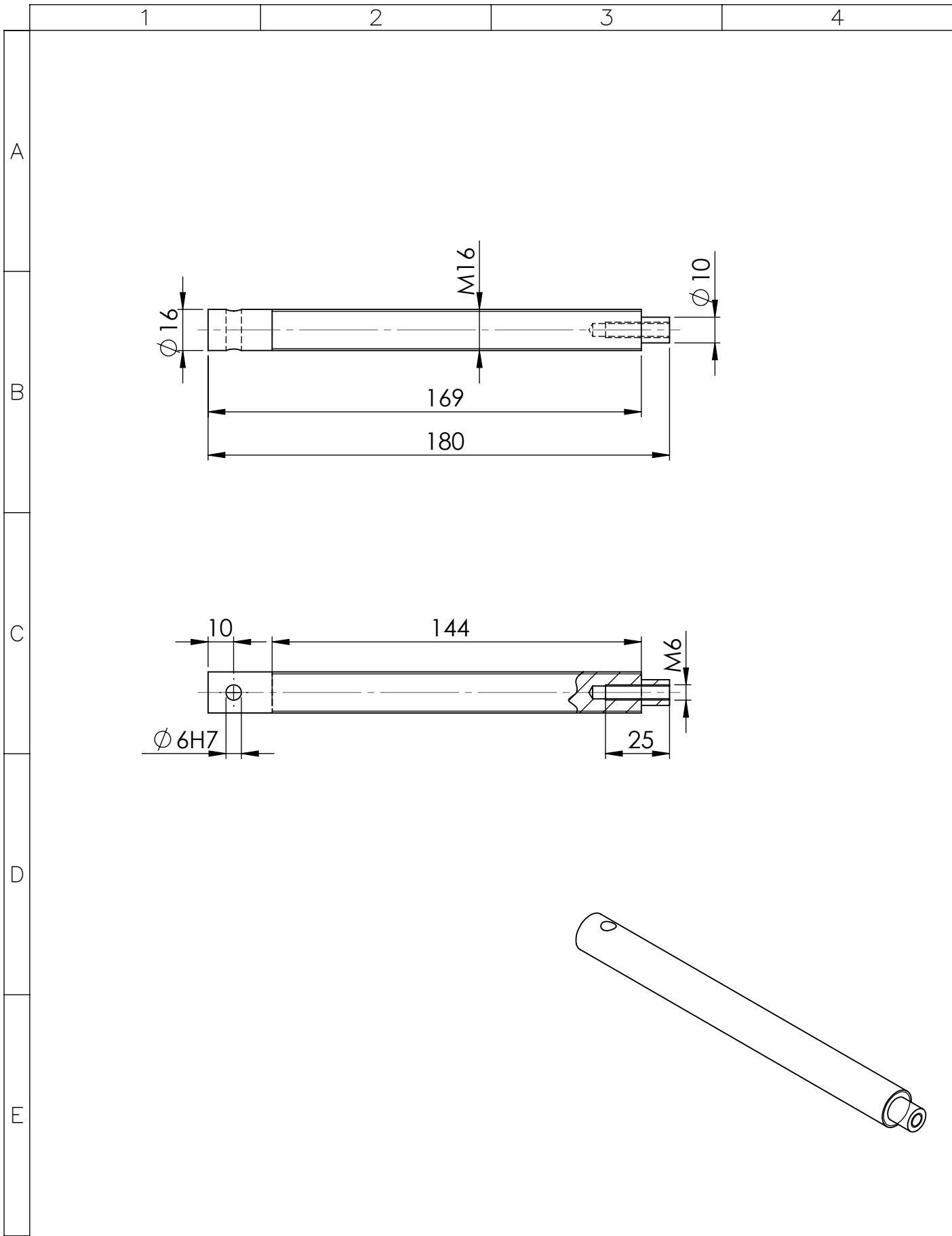
DETALHE C
ESCALA 1 : 1



TOLERÂNCIA		0,1 mm		MATERIAL		1045		ESCALA/SCALE		1:2	
ECM		LOC		RESUMO DE MODIFICAÇÕES SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTADO EXECUTED		VERIFICADO CHECKED		LIBERADO RELEASED	
EXEC		Jonathan				Eixo Árvore				IFSC - GW	
VERIF/CHECKED		Jonathan									
LIBER/RELEASED		Eduardo									
DT LIBER/REL DT		03/07/17									
						FOL/SHEET		1 / 1			



TOLERÂNCIA		0,1 mm		MATERIAL		Alumínio		ESCALA/SCALE		1:1	
EXEC		Jonathan		RESUMO DE MODIFICAÇÕES		EXECUTADO		VERIFICADO		LIBERADO	
VERIF/CHECKED		Jonathan		SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTED		CHECKED		RELEASED	
LIBER/RELEASED		Eduardo				Mancal Dianteiro				IFSC - GW	
DT LIBER/REL DT		03/07/17									



TOLERÂNCIA		0,1 mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		1:2	
ECM		LOC		RESUMO DE MODIFICAÇÕES SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTADO EXECUTED		VERIFICADO CHECKED		LIBERADO RELEASED	
EXEC		Jonathan				Fuso de Regulagem				IFSC - GW	
VERIF/CHECKED		Jonathan									
LIBER/RELEASED		Eduardo									
DT LIBER/REL DT		03/07/17				FOL/SHEET		1 / 1			

1

2

3

4

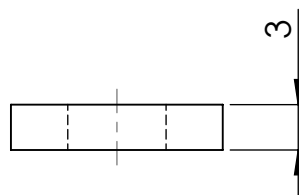
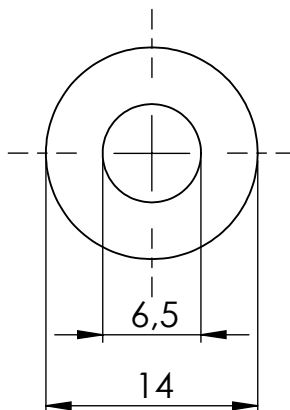
A

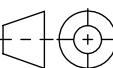
B

C

D

E



TOLERÂNCIA		0,1 mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		2:1	
EXEC		Jonathan				Arruela		IFSC - GW		FOL/SHEET 1 / 1	
VERIF/CHECKED		Jonathan									
LIBER/RELEASED		Eduardo									
DT LIBER/REL DT		03/07/17									
ECM		LOC		RESUMO DE MODIFICAÇÕES SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTADO EXECUTED		VERIFICADO CHECKED		LIBERADO RELEASED	
DATA DATE		VER									

1

2

3

4

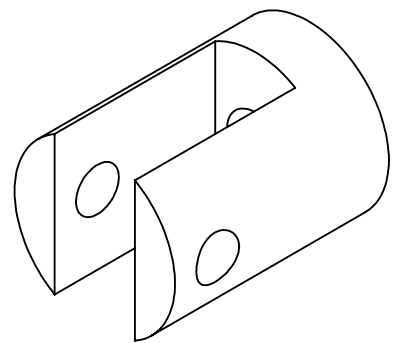
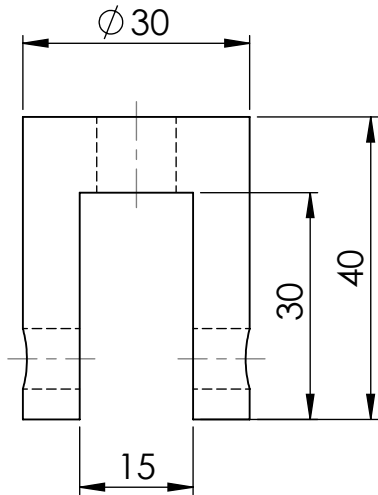
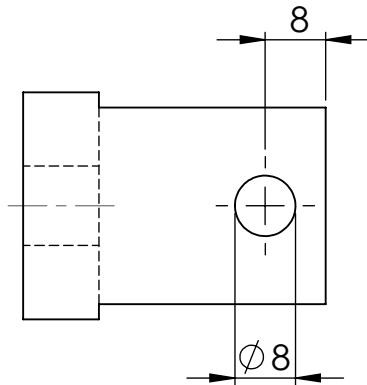
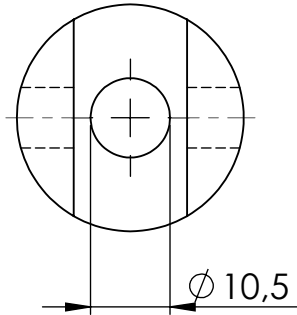
A

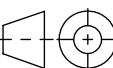

B

C

D

E



TOLERÂNCIA		0,1 mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		1:1	
EXEC		Jonathan		RESUMO DE MODIFICAÇÕES		EXECUTADO		VERIFICADO		LIBERADO	
VERIF/CHECKED		Jonathan		SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTED		CHECKED		RELEASED	
LIBER/RELEASED		Eduardo				Adaptador superior				IFSC - GW	
DT LIBER/REL DT		03/07/17									

1

2

3

4

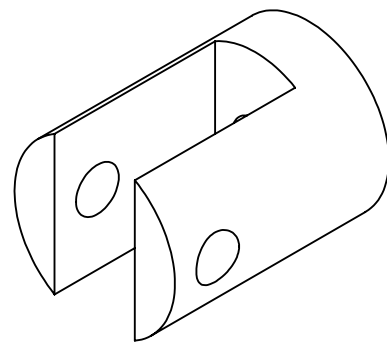
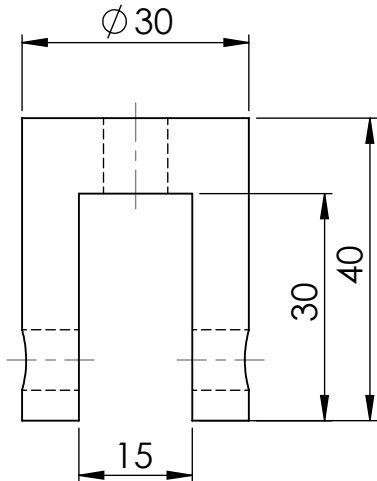
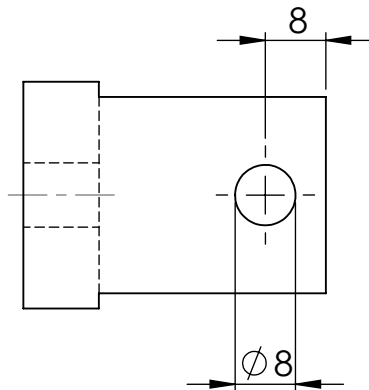
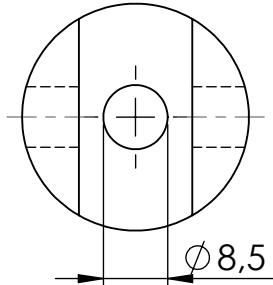
A

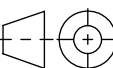
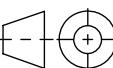
B

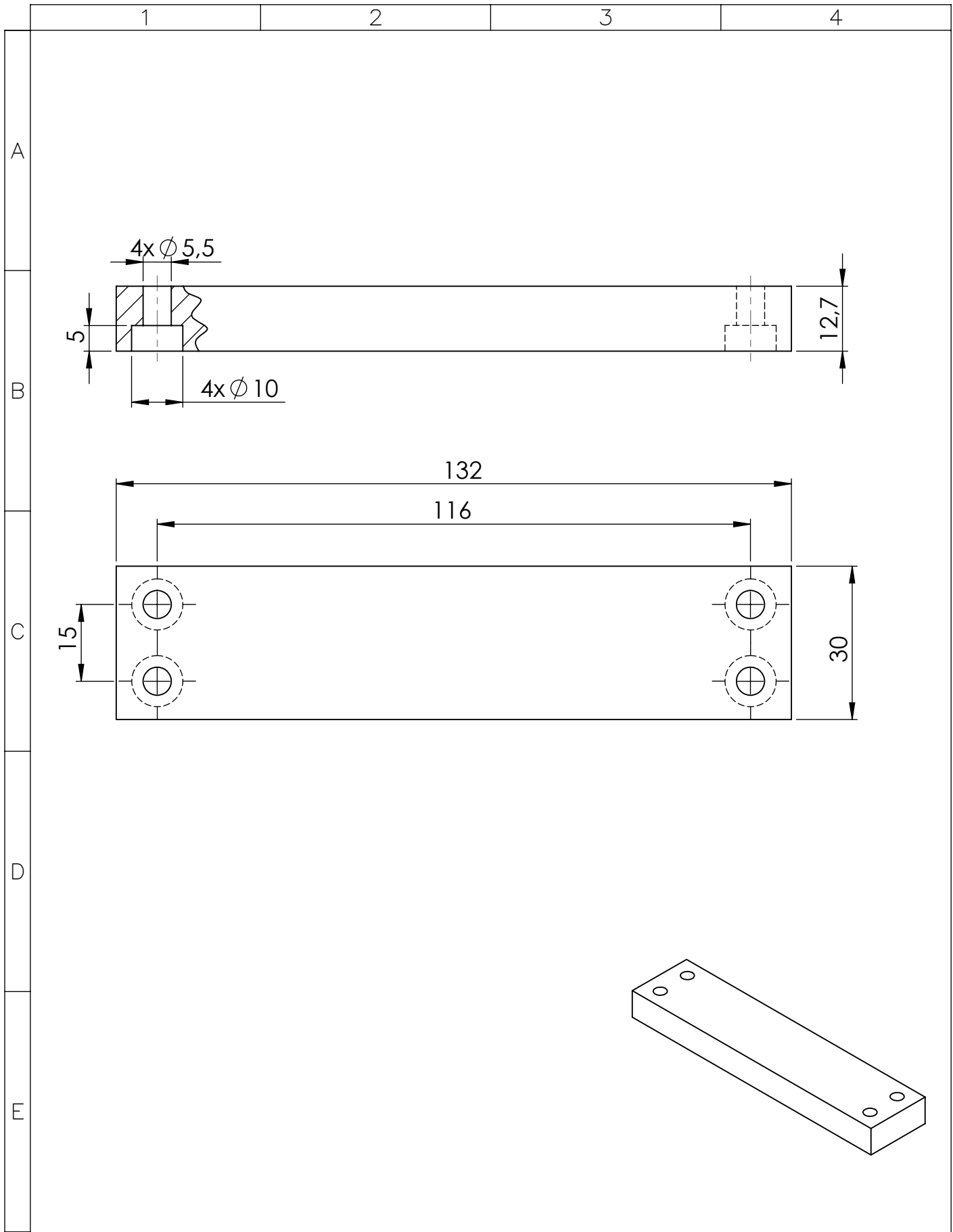
C


D

E



TOLERÂNCIA		0,1 mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		1:1	
EXEC		Jonathan		RESUMO DE MODIFICAÇÕES		EXECUTADO		VERIFICADO		LIBERADO	
VERIF/CHECKED		Jonathan		SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTED		CHECKED		RELEASED	
LIBER/RELEASED		Eduardo				Adaptador inferior				IFSC - GW	
DT LIBER/REL DT		03/07/17									



TOLERÂNCIA		0,2 mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		1:1			
ECM		LOC		RESUMO DE MODIFICAÇÕES SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTADO EXECUTED		VERIFICADO CHECKED		LIBERADO RELEASED		DATA DATE	VER
EXEC		Jonathan		 Base Inferior		 		 		 		IFSC - GW	
VERIF/CHECKED		Jonathan											
LIBER/RELEASED		Eduardo											
DT LIBER/REL DT		03/07/17											
						FOL/SHEET		1 / 1					

1

2

3

4

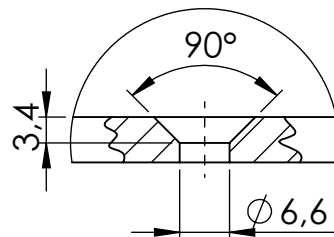
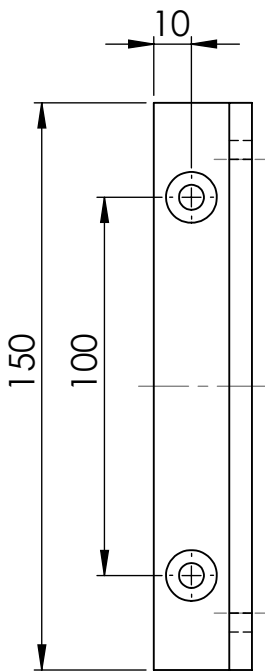
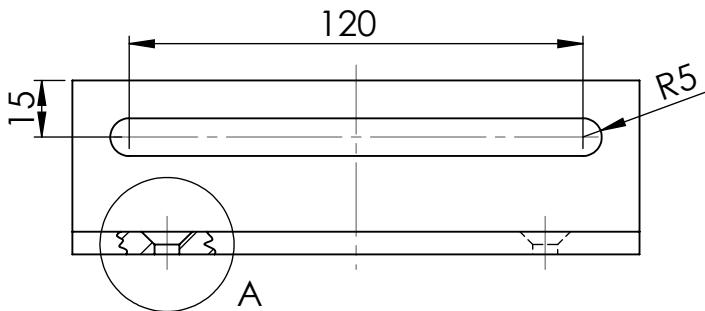
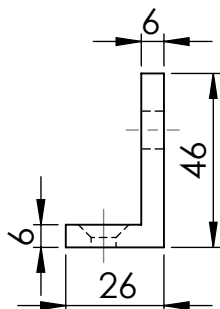
A

B

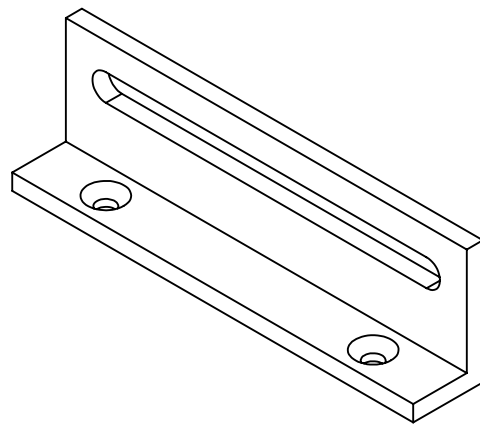
C

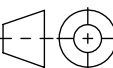
D

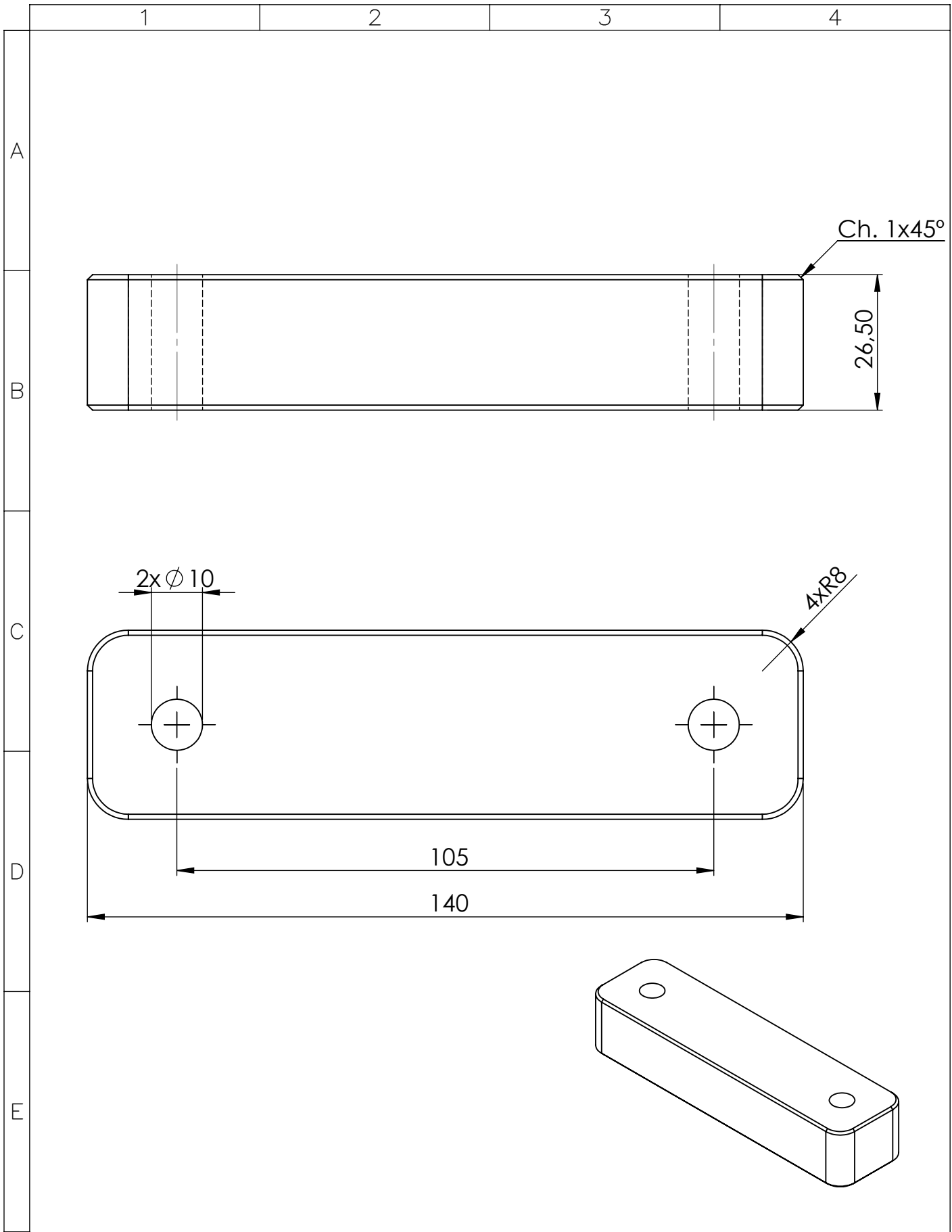
E



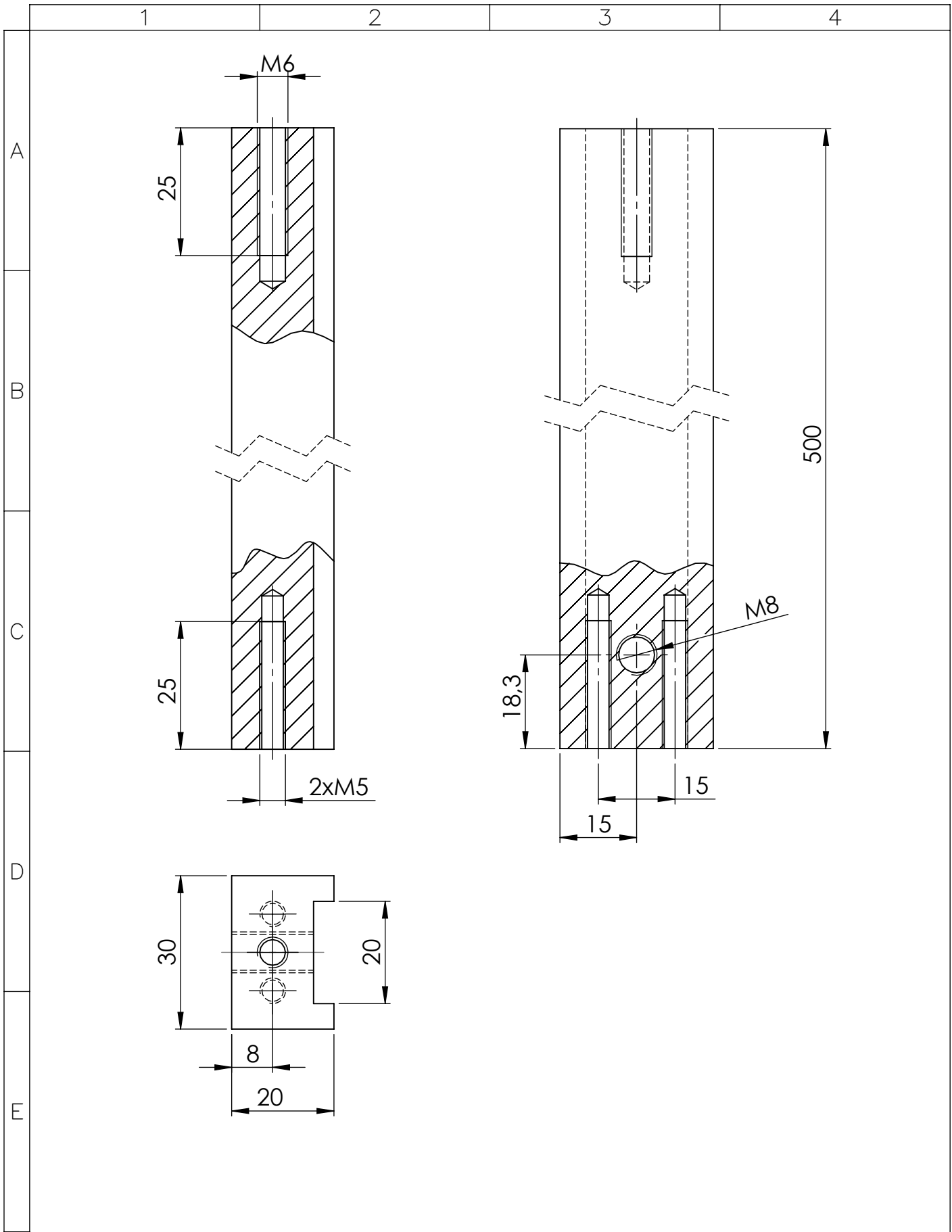
DETALHE A
ESCALA 1 : 1

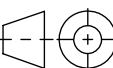
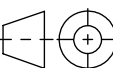


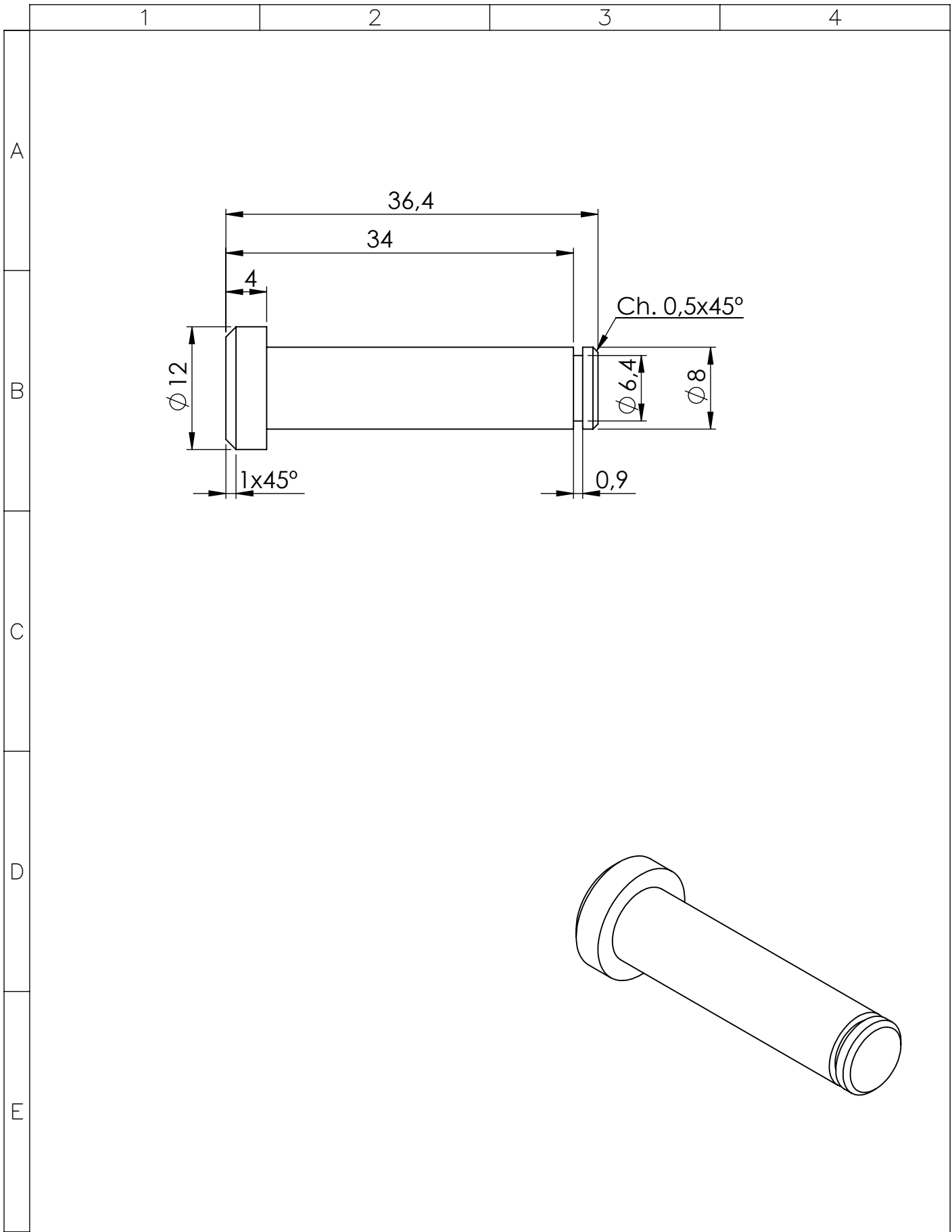
TOLERÂNCIA		0,2mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		1:2	
ECM		LOC		RESUMO DE MODIFICAÇÕES SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTADO EXECUTED		VERIFICADO CHECKED		LIBERADO RELEASED	
EXEC		Jonathan		 Guia de Regulagem						IFSC - GW	
VERIF/CHECKED		Jonathan									
LIBER/RELEASED		Eduardo									
DT LIBER/REL DT		03/07/17									
						FOL/SHEET		1 / 1			

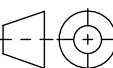



TOLERÂNCIA		0,2mm		MATERIAL		Aço 1045		ESCALA/SCALE		1:1	
ECM		LOC		RESUMO DE MODIFICAÇÕES SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTADO EXECUTED		VERIFICADO CHECKED		LIBERADO RELEASED	
EXEC		Jonathan				Calço do mancal				IFSC - GW	
VERIF/CHECKED		Jonathan									
LIBER/RELEASED		Eduardo									
DT LIBER/REL DT		03/07/17									
						FOL/SHEET		1 / 1			



TOLERÂNCIA		0,2 mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		1:1	
EXEC		Jonathan		RESUMO DE MODIFICAÇÕES		EXECUTADO		VERIFICADO		LIBERADO	
VERIF/CHECKED		Jonathan		SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTED		CHECKED		RELEASED	
LIBER/RELEASED		Eduardo				Guia				IFSC - GW	
DT LIBER/REL DT		03/07/17									



TOLERÂNCIA		0,1 mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		2:1	
EXEC		Jonathan		RESUMO DE MODIFICAÇÕES		EXECUTADO		VERIFICADO		LIBERADO	
VERIF/CHECKED		Jonathan		SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTED		CHECKED		RELEASED	
LIBER/RELEASED		Eduardo				Pino				IFSC - GW	
DT LIBER/REL DT		03/07/17									

1

2

3

4

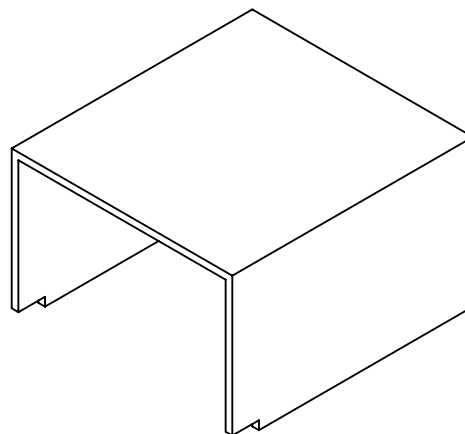
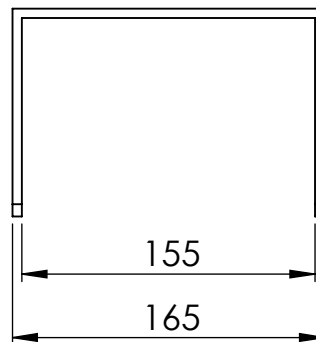
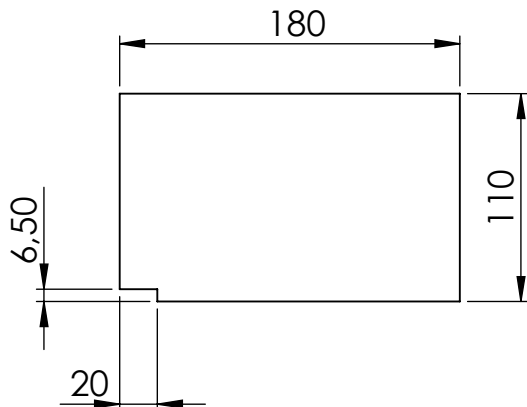
A


B

C

D

E



TOLERÂNCIA		0,5 mm		MATERIAL		Policarbonato translucido		ESCALA/SCALE		1:4	
ECM		LOC		RESUMO DE MODIFICAÇÕES SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTADO EXECUTED		VERIFICADO CHECKED		LIBERADO RELEASED	
EXEC		Jonathan		 Proteção dianteira						IFSC - GW	
VERIF/CHECKED		Jonathan									
LIBER/RELEASED		Eduardo									
DT LIBER/REL DT		03/07/17				FOL/SHEET		1 / 1			

1

2

3

4

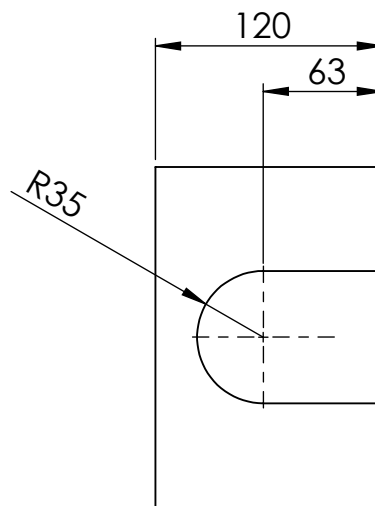
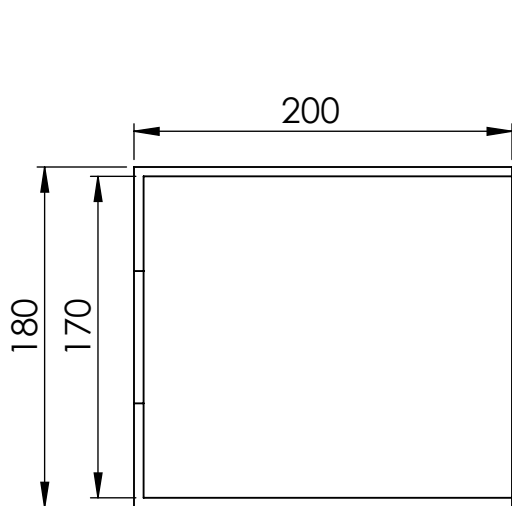
A

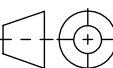
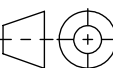
B

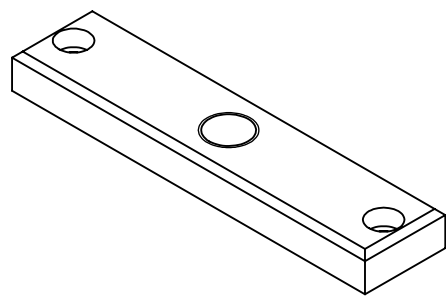
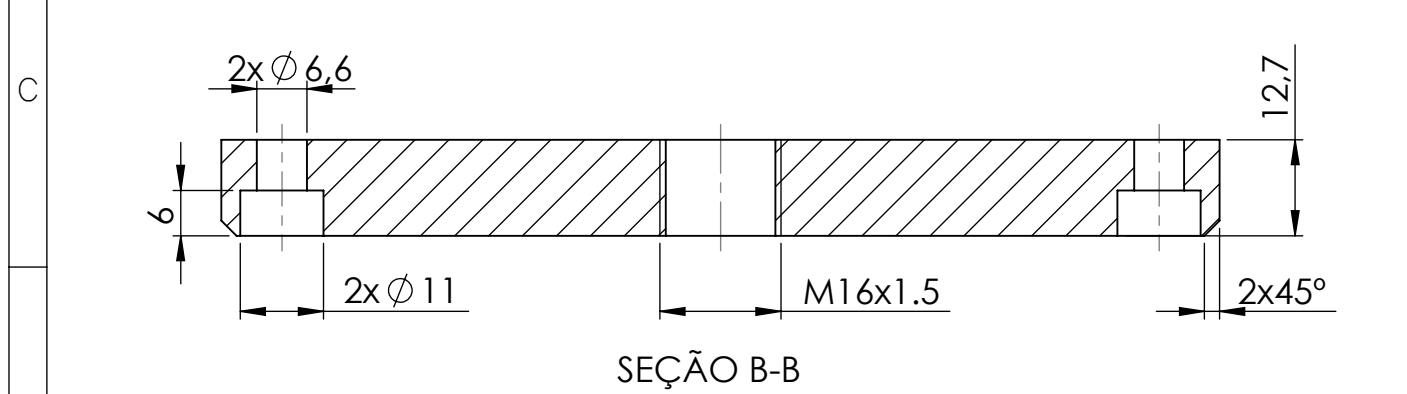
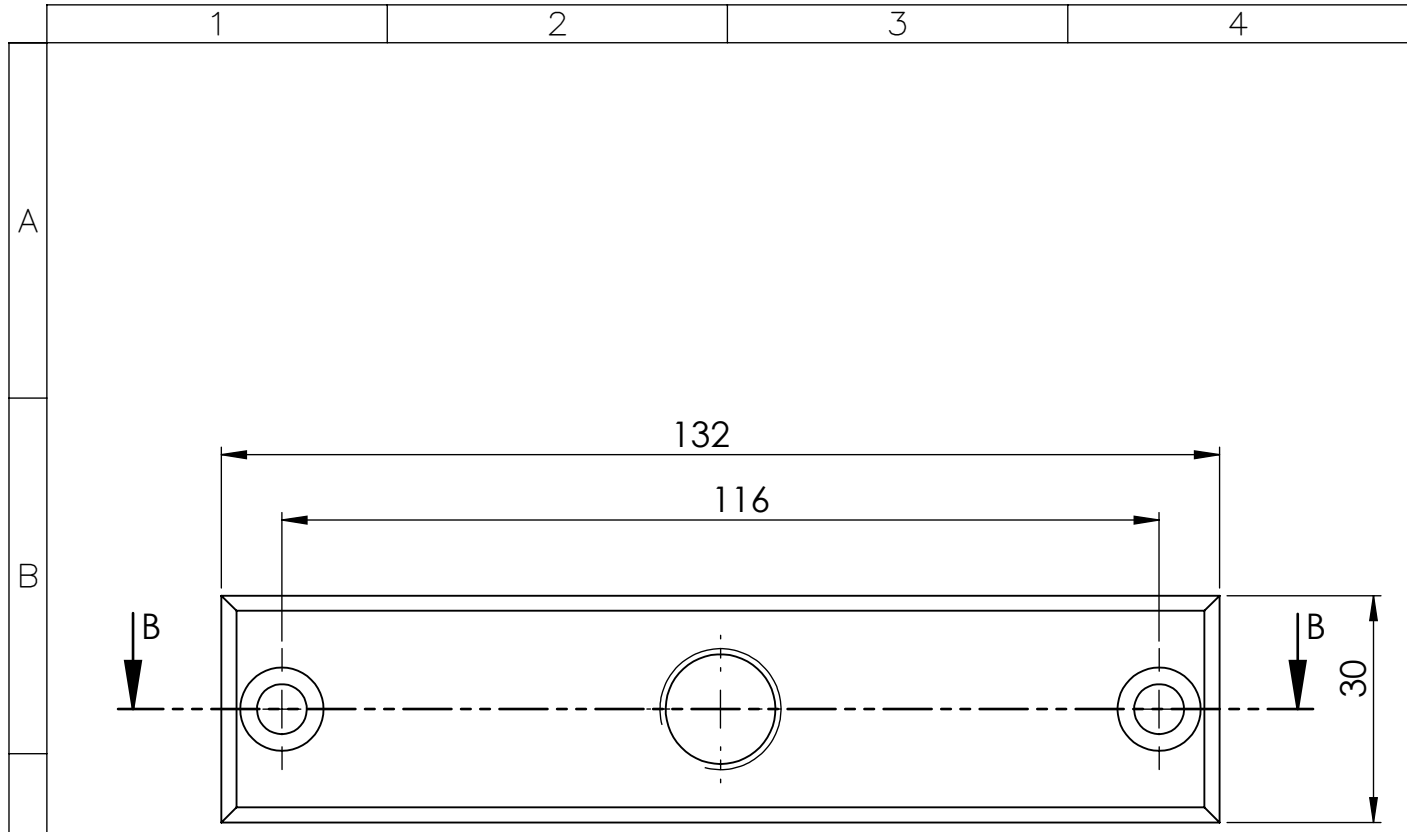
C

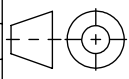
D

E



TOLERÂNCIA		0,5 mm		MATERIAL		Policarbonato translucido		ESCALA/SCALE		0,5 mm	
EXEC		Jonathan				Proteção				IFSC - GW	
VERIF/CHECKED		Jonathan									
LIBER/RELEASED		Eduardo									
DT LIBER/REL DT		03/07/17									
FOL/SHEET		1 / 1									



TOLERÂNCIA		0,2 mm		MATERIAL		1020		ESCALA/SCALE		1:1	
EXEC		Jonathan		RESUMO DE MODIFICAÇÕES		EXECUTADO		VERIFICADO		LIBERADO	
VERIF/CHECKED		Jonathan		SUMMARY OF MODIFICATIONS		EXECUTED		CHECKED		RELEASED	
LIBER/RELEASED		Eduardo		 Topo do Guia		 		 		 	
DT LIBER/REL DT		03/07/17									
IFSC - GW											