



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise Estrutural Dos Cubos Das Rodas Dos Atrelados**

**Caso de Estudo: MPDC**

**Discente:**

Mugunda, Francisco Machua Basílio

**Supervisor da UEM:**

Eng<sup>o</sup>. Roberto David

**Supervisor do MPDC:**

Eng<sup>o</sup>. Stélio Salatiel

Maputo, Julho de 2022



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise Estrutural Dos Cubos Das Rodas Dos Atrélados**

**Caso de Estudo: MPDC**

**Discente:**

Mugunda, Francisco Machua Basílio

**Supervisor da UEM:**

Eng<sup>0</sup>. Roberto David

**Supervisor do MPDC:**

Eng<sup>0</sup>. Stélio Salatiel

Maputo, Julho de 2022



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise Estrutural Dos Cubos Das Rodas Dos Atrrelados**

**Caso de Estudo: MPDC**

Eu, Francisco Machua Basílio Mugunda, estudante do 5<sup>o</sup> nível do curso de Licenciatura em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, submeto este trabalho como requisito para a aquisição do grau de Licenciado em Engenharia Mecânica.

Aprovado por:

.....

Eng<sup>o</sup>. Roberto David, Supervisor da UEM

.....

Eng<sup>o</sup>. Stélio Salatiel, Supervisor do MPDC

.....

Membro de júri 1

.....

Membro de júri 2

.....

Membro de júri 3

Maputo, Julho de 2022

## **Dedicatória**

Dedico o presente trabalho aos meus pais Basílio Francisco Mugunda e Helena Filipe Macamo e a todos que apoiaram-me durante toda jornada estudantil.

## **Agradecimentos**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por guiar-me e acompanhar me durante todo o meu percurso acadêmico e social, dando-me saúde, força e coragem face às adversidades que tenho enfrentado. Aos meus pais, e aos meus irmãos, por me apoiarem diariamente em tudo que eu precisasse, sempre me motivando a seguir em frente enfrentando todas as dificuldades de forma positiva.

Gostaria de fazer um especial agradecimento aos meus primos, Lucas e sua esposa Ivone, e Ângelo, por me acolherem e acompanhar de perto toda essa fase da minha vida, sempre me apoiando, incentivando e acreditando em mim.

Aos meus supervisores, Eng.º Roberto David e Eng.º Stélio Salatiel pela disponibilidade de apoio e confiança durante o desenvolvimento deste trabalho.

Por último, porém não menos importante, a equipe da MPDC em especial ao departamento de manutenção, por terem facilitado a integração e o aprendizado durante o estágio.

## **Resumo**

O presente relatório visa realizar uma análise estrutural dos cubos de roda dos atrelados, tendo em conta o índice de frequência de ruptura dos parafusos de união entre o cubo e a jante da roda, e a perda de capacidade de trabalho dos rolamentos do cubo da roda dos atrelados durante o transporte de minério. Assim visou-se compreender porquê e como ocorre a falha nos pernos e rolamentos do cubo. Esse tipo de ocorrência exige dos atrelados longos períodos de paragens para que se possa fazer a resolução do problema. Tal facto ocorre durante operações de manuseamento de minério, em que atrelado é carregado por duas banheiras de minério com peso de 25000 kg cada, fazendo um trajecto desde as bancas até ao cais de carregamento do navio, deste modo existem situações diversas que contribuem e levam a falha dos parafusos e rolamentos do cubo da roda. Mediante tal problema, este trabalho tem como principal objectivo compreender as principais causas que ocasionam as falhas sucessivas nos cubos das rodas dos atrelados, apontando a melhor forma de reduzir o mesmo e evitar a indisponibilidade do equipamento. A partir da análise estrutural feita nos cubos das rodas dos atrelados, foi possível evidenciar que os pernos e rolamentos resistem às solicitações de carga. Diante de todo estudo é possível compreender que o estado da via e o tipo de manutenção usada são um dos principais motivos para a ocorrência de falhas sucessivas nos cubos das rodas. para evitar-se a ocorrência destas falhas, o ideal é melhorar o tipo de manutenção, isto é obedecer um plano semanal de manutenção preventiva, colocação de trancadores nas porcas dos pernos para evitar o auto-desaperto, verificar o torque de aperto dos pernos e verificação do estado das tampas dos cubos das rodas dos atrelados.

## Índice

Dedicatória .....	i
Agradecimentos .....	ii
Resumo .....	iii
Lista de figuras .....	v
Lista de tabelas .....	v
Lista de símbolos .....	vi
Capítulo I.....	1
1.1. Apresentação da Empresa .....	1
1.2. Introdução.....	4
1.3. Objectivos.....	5
1.3.1. Objectivo Geral .....	5
1.3.2. Objectivos Específicos .....	5
1.4. Justificativa.....	5
1.5. Metodologia.....	5
Capítulo II.....	6
2.1. Revisão Bibliográfica .....	6
2.1.2. Caracterização de rodas de veículos .....	6
2.1.3. Partes que compõem uma roda.....	6
2.1.5. Componentes do conjunto Cubo de Roda .....	7
2.1.6. Resistência mecânica dos metais .....	8
2.1.7. Diagramas de carregamento .....	8
2.1.8. Fadiga dos metais .....	10
2.1.9. Mecanismo de falha por fadiga .....	11
2.1.10. Falha por fadiga em parafusos .....	12
2.1.11. Falha por fadiga em rolamentos .....	13
2.1.12. Corrosão dos metais .....	14
2.1.12.1. Tipos de corrosão.....	15
2.1.12.2. Meios corrosivos.....	15
2.1.13. Atrelados <i>low bed trailer</i> .....	18
2.1.13.1. Cubos de roda usados nos atrelados <i>low bed trailer</i> .....	18
2.1.13.2. Manutenção .....	18
2.2. Análise Estrutural Dos Cubos Das Rodas Dos Atrelados .....	19
2.2.1. Apresentação do atrelado usado durante transporte de minério.....	19
2.2.2. Características técnicas do atrelado <i>low bed trailer</i> : .....	19
2.2.3. Análise estrutural dos esforços que actuam no conjunto cubo da roda .....	20

2.2.4.	Determinação das reacções de apoio no atrelado .....	20
2.2.5.	Teste de resistência dos rolamentos .....	22
	Esquema de montagem dos rolamentos do cubo da roda .....	24
2.2.6.	Teste de resistência dos parafusos do cubo de roda .....	28
2.3.	Resumo do cálculo.....	33
Capítulo III .....		34
3.1.	Conclusão e recomendações.....	34
3.2.	Referências bibliográficas .....	35

## Lista de figuras

Figura 1:	Logotipo da empresa.....	1
Figura 2:	Ilustração do conjunto cubo de roda .....	6
Figura 3:	Carga alternada com reversão total.....	9
Figura 4:	Carga variável sem reversão .....	9
Figura 5:	Carregamento variável com reversão parcial.....	9
Figura 6:	Carregamento variável sem reversão .....	9
Figura 7:	Curva da fadiga.....	10
Figura 8:	Diagrama de Goodman modificado .....	11
Figura 9:	Ilustração de uma falha por fadiga.....	12
Figura 10:	Cargas aplicadas aos rolamentos .....	13
Figura 11:	Processo de degradação dos metais .....	14
Figura 12:	Tipos de corrosão.....	15
Figura 13:	Acção corrosiva do mar em bóia marítima .....	16
Figura 14 :	Tug master conectado a um atrelado low bed com carga. ....	19
Figura 15:	Determinação das reacções de apoio .....	20
Figura 16:	Esquema de montagem e característica dimensionais dos rolamentos.....	24
Figura 17:	Tensões – limite .....	29

## Lista de tabelas

Tabela 1:	Caracterização dos terminais de carga .....	2
Tabela 2:	Tipos de atrelados para o transporte de minério.....	19
Tabela 3:	Resultado do cálculo .....	21
Tabela 4:	Parâmetros do rolamento do ponto 1 .....	24
Tabela 5:	Parâmetros do rolamento do ponto 2.....	26
Tabela 6:	Vista frontal do cubo de roda .....	28
Tabela 7:	Características dos parafusos.....	28
Tabela 8:	Resumo do cálculo .....	33

## Lista de símbolos

Símbolo	Unidades	Designação
<b>Símbolos gregos</b>		
$\sigma_a$	Mpa	Amplitude das tensões normais
$\tau_a$		Amplitude das tensões tangenciais
$\theta$	°	Ângulo
$s_\tau$	-	Coefficiente de segurança de resistência à fadiga para tensões de tangenciais.
$d$	mm	Diâmetro
$\sigma_{-1}$	Mpa	Limite de fadiga à flexão do material
$\tau_{-1}$	Mpa	Limite de fadiga ao cisalhamento do material
$\eta_g$	-	Rendimento global
$\sigma_m$	Mpa	Tensão normal média
$\tau_m$	Mpa	Tensão tangencial média
<b>Símbolos romanos</b>		
[C]	N	Capacidade de carga dinâmica admissível dos rolamentos
$C$	N	Capacidade de carga dinâmica calculada dos rolamentos
$Y$		Coefficiente de carga radial do rolamento
$s$	-	Coefficiente de segurança
[s]	-	Coefficiente de segurança admissível
$s_\sigma$	-	Coefficiente de segurança de resistência à fadiga para tensões de flexão.
$K_{ano}$	-	Coefficiente de utilização durante o ano
$K_{dia}$	-	Coefficiente de utilização durante o dia
$\alpha$	°	Coefficiente que considera a concentração de tensões
$d_{cr}$	mm	Diâmetro crítico do veio
$R$	N	Força radial que actua sobre o rolamento
$n$	rpm	Frequência de rotações
$E$	Mpa	Módulo de elasticidade

$I$	$mm^4$	Momento de inércia
$M_f$	$N.mm$	Momento flector
$r$	$mm$	Raio
$L$	[milhões devolta.	Tempo de vida do rolamento
$L_h$	[h]	Tempo de vida do rolamento
$t_\omega$	$h$	Tempo do trabalho do mecanismo

## Capítulo I

### 1.1. Apresentação da Empresa



Figura 1: Logotipo da empresa

**MPDC** - Companhia de Desenvolvimento do Porto de Maputo, é uma empresa privada, nacional que resulta da parceria entre os Caminhos de Ferro de Moçambique e a Portus Indico, constituída pela Gringrod, DP World e a empresa Mozambique Gestores.

A 15 de Abril de 2003 foi atribuída à MPDC a concessão do Porto de Maputo por um período de 15 anos, com uma opção de extensão por mais 15 anos. Em Junho de 2010 o período de concessão foi estendido por mais 15 anos, com opção de mais 10 para operações após 2033.

A MPDC detém os direitos de financiamento, reabilitação, construção, operação, gestão, manutenção, desenvolvimento e optimização de toda a área de concessão. A empresa tem também o poder de Autoridade Portuária, sendo responsável pelas operações marítimas, reboque, estiva, operações nos terminais e armazéns, bem como planeamento e desenvolvimento portuário.

A sua principal actividade é o manuseamento de carga como **minério** (Ferro, Crómio, Clinquer e Níquel), sendo maior contribuinte no volume de carga manuseada no Porto de Maputo, e carga geral (Produtos alimentares e diversos).

## Visão

Porto Maputo – Ancorando o orgulho nacional, impulsionando a região para a frente.

## Missão

Traçar o crescimento regional, fornecendo um serviço portuário atraente, competitivo e integrado, pilotado pela inovação e integridade.

A empresa é composta por uma área operacional, refeitórios e uma área administrativa. A área operacional é composta por cais (cabotagem até cais 11) e bancas.

Caracterização dos terminais de carga:

Tabela 1: Caracterização dos terminais de carga

Cais	Comprimento	Profundidade	Utilização
Cabotagem/Cais 1	293 m	7 m	Navios de costeiros
Cais 2	220 m	7.2 m	Pequenas embarcações
Cais 3	263m	9m	Ro-Ro e Navios de Cruzeiro
Cais 4	273m	9m	Carga geral
Cais 5	230m	12m	Carga a granel e geral
Cais 6	246m	9.5m	Melaço, ancoradouro
Cais 7	240m	12m	Carga a granel e geral
Cais 8	202m	12m	Açúcar a granel
Cais 9	436m	12m	Ferro-cromio e níquel
Cais 10	308m	12m	Contentores
Cais 11	177m	12m	Clinker, gesso, carvão e carga geral
Cais 12	169m	12m	Óleos vegetais

O MPDC dispõe de diverso equipamento móvel portuário, a saber:

- Gruas Moveis;
- Tipplers;
- Empilhadeiras;
- Pás-Mecânicas;
- Tractores;
- Tug - Masters;
- Atrelados;
- Escavadoras.

### **Departamento de Manutenção (Plant and Equipment)**

Este departamento é responsável pela planificação, execução e controle da manutenção do equipamento móvel portuário. O mesmo está subdividido em seguintes secções:

- **Secção gruas móveis** – Responsável pela assistência e manutenção das gruas móveis e tipplers;
- **Secção da Kalmar** – Empresa contratada, responsável pela assistência e manutenção das empilhadeiras e tug-masters;
- **Secção da Choice Diesel** – Empresa contratada, responsável pela assistência e manutenção das pás-mecânicas;
- **Secção da serralharia** – Responsável pelos trabalhos de serralharia e da parte estrutural do equipamento móvel portuário;
- **Secção da oficina** – Responsável pela assistência e manutenção das escavadoras (de porão e vagões), tractores, tug-masters, empilhadeiras e atrelados.
- **Secção Tyre Corporation** – Empresa contratada, responsável pela manutenção das rodas (Pneus e jantes) do equipamento móvel portuário.

## **1.2. Introdução**

O cubo de roda é uma peça importantíssima, este elemento é responsável por transmitir o torque da junta hemocinética para as rodas dos veículos e garante a segurança dos veículos, pois, este componente também tem a função de garantir o alinhamento do eixo com as rodas e de oferecer suporte ao disco de freio e/ou tambor.

É por meio do cubo de roda que a movimentação e tracção criadas pelo motor são transmitidas para as rodas. Devido à sua importância, essa peça é instalada em todos modelos de veículos, desde pequenos a grandes. No entanto, por ser pouco conhecida muitos mecânicos auto a vêem como um bicho-de-sete-cabeças.

Este trabalho visa investigar as causas das constantes falhas destes elementos nos atrelados usados no porto através da análise estrutural, onde testar – se – á a resistência mecânica dos elementos que compõem esta peça.

Este trabalho é dividido por três capítulos, capítulo da Introdução, Desenvolvimento e Conclusão respectivamente.

## **1.3. Objectivos**

### **1.3.1. Objectivo Geral**

- Compreender as principais causas que ocasionam as falhas sucessivas dos cubos das rodas dos atrelados.

### **1.3.2. Objectivos Específicos**

- Apresentar os principais componentes do cubo da roda do atrelado;
- Analisar os esforços que actua sobre a estrutura do cubo da roda;
- Analisar os esforços sobre os pernos e rolamentos do cubo da roda.

## **1.4. Justificativa**

A realização deste trabalho é motivada pela constante falha dos cubos da roda dos atrelados durante operações de transporte de minério.

Este problema afecta de forma directa na disponibilidade de atrelados fazendo com que o numero de combinações (Cabeça+Atrelado) seja baixo e conseqüente morosidade no processo de carregamento do navio.

Representa um potencial risco a segurança operacional podendo causar acidentes em caso de falha durante o deslocamento do atrelado.

Também tem um impacto negativo nos custos de manutenção, isto é, requer uma constante aquisição de novos cubos de roda.

## **1.5. Metodologia**

A elaboração do presente trabalho foi baseada na:

- Colecta de informações e conhecimentos técnico-científicos, adquiridos através do intercâmbio entre o Estudante e Técnicos, Operadores dos equipamentos na experiência adquirida ao logo do estágio;
- Sessões de consulta com os supervisores da faculdade, do supervisor do estágio e com alguns trabalhadores da MPDC;
- Pesquisas individuais nos manuais da empresa e a consultas na internet.

## Capítulo II

### 2.1. Revisão Bibliográfica

#### 2.1.2. Caracterização de rodas de veículos

Entre os esforços provenientes da movimentação de um veículo terrestre, além de uma parcela dividida entre forças gravitacionais e aerodinâmicas, o restante deles é gerado no contacto entre a roda e o solo [7].

A roda, para um veículo, é uma peça com função estrutural de segurança. Juntamente com o pneu, é responsável por manter o veículo em contacto com o solo e por transmitir, do veículo para o solo, todos os esforços provenientes do peso do veículo em ordem de marcha e dos sistemas de tracção, frenagem e direcção, bem como, em sentido inverso, por transmitir para o veículo todos os esforços provenientes das irregularidades e obstáculos da pista durante sua rodagem. Por ser uma peça que sofre rotação, os carregamentos e esforços a que está submetida variam ciclicamente em função do deslocamento do veículo.

#### 2.1.3. Partes que compõem uma roda

As rodas, independentemente do material de que são constituídas, podem ser divididas em três partes: o cubo, o disco ou raio e o aro.

As funções da roda são:

- Suportar a massa do veículo;
- Absorver as irregularidades do solo;
- Permitir tracção para acelerar e travar;
- Permitir controlo adequado de direcção e estabilidade.

#### 2.1.4. Cubo de roda

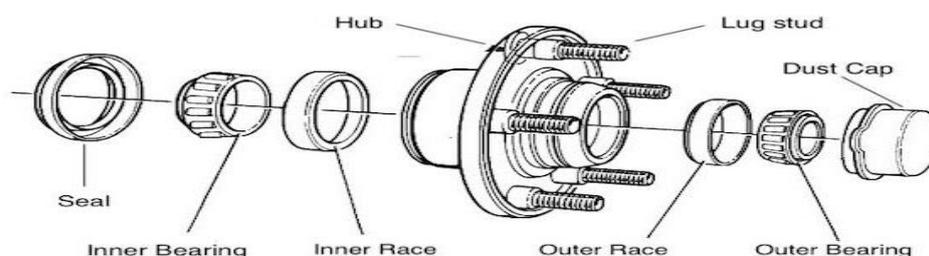


Figura 2: Ilustração do conjunto cubo de roda

## **O que é um conjunto de cubo de roda?**

O conjunto do cubo da roda é um componente que permite que a roda gire livremente enquanto permanece fixada ao carro/atrelado. O conjunto do cubo da roda consiste em um cubo com um rolamento em cada lado.

O cubo é a parte da roda que permite sua fixação na ponta do eixo do veículo ou atrelado. As rodas de veículos de ligeiros, normalmente, possuem três, quatro ou cinco furos para a passagem de parafusos de fixação. As rodas para veículos pesados podem ter mais de cinco furos. Além de permitir a fixação da roda, o cubo tem também a função de centralizar a roda no cubo do eixo, por meio do furo central, também conhecido como furo piloto, ou dos próprios furos de fixação e transmissão de potência para as rodas.

## **Material de fabricação do cubo da roda**

O cubo da roda é fabricado em ferro maleável, isto é, um material que permite a modelagem milimétrica mesmo de peças com geometria complexa.

As propriedades desse material são:

- Alta resistência mecânica;
- Baixa ductilidade;
- Resistência a compressão.

### **2.1.5. Componentes do conjunto Cubo de Roda**

Um conjunto de cubo de roda vem com vários componentes:

- Cubo;
- Rolamentos e casquilhos internos e externos;
- Parafusos da roda;
- Vedantes;
- Tampa de poeira.

Os cubos de roda costumam ser peças resistentes, mas eventualmente se desgastaram. Quando se desgastam, na verdade são os rolamentos que estão desgastados. Eles podem ser substituídos e o próprio cubo pode ser reutilizado. Às vezes, os rolamentos das rodas falham prematuramente. As causas mais comuns de uma falha prematura do rolamento são:

- Pneus de tamanho grande (mais pesados);
- Má instalação
- Freios mal conservados que super aquecem os rolamentos;
- Condução em estradas irregulares.

#### **2.1.6. Resistência mecânica dos metais**

A resistência mecânica é uma propriedade das peças que caracteriza a capacidade de não sofrer deformações residuais inadmissíveis ou resistir à destruição.

As deformações das peças provocam a mudança da interação normal entre as partes componentes das máquinas, o que altera as características de funcionamento. São exemplos destas deformações a quebra ou rotura das peças, a deterioração das superfícies de trabalho na forma de desgaste, fadiga, entre outros [5]

A resistência mecânica das peças é influenciada por factores como a composição do material, tratamento térmico e processos tecnológicos. Por exemplo, o recozimento das peças pode enfraquecê-las e a forjadura ou estampagem a frio e a têmpera podem elevar a resistência mecânica.

O projecto das peças de máquinas deve garantir que a forma e as dimensões seleccionadas eliminem a possibilidade de deformações residuais, roturas ou deterioração prematura das superfícies de trabalho.

#### **2.1.7. Diagramas de carregamento**

O tipo de destruição ou deterioração das peças é determinado pelas cargas que actuam, para além do carácter da conjugação entre as peças. Em geral, as cargas são variáveis. Mesmo as cargas constantes no espaço podem provocar tensões variáveis em peças giratórias [5]. As tensões variáveis são caracterizadas por meio de um dado ciclo de variação das tensões onde se distinguem algumas características como a presença ou ausência de mudança de sentido das mesmas tensões. Para simplificar consideram-se, inicialmente, apenas tensões normais.

A seguir os tipos de carregamentos:

**a) Carga alternada ou carga cíclica com reversão total**

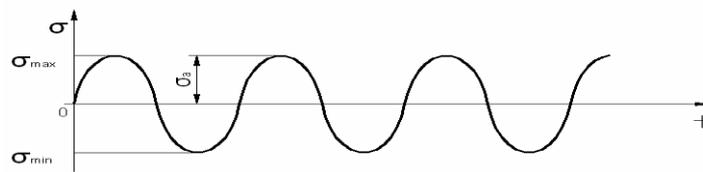


Figura 3: Carga alternada com reversão total

**b) Carga repetida ou carga variável sem reversão**

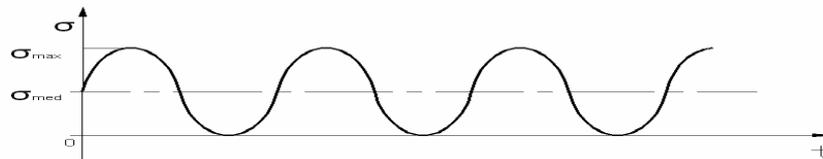


Figura 4: Carga variável sem reversão

**c) Carga variável com reversão parcial**

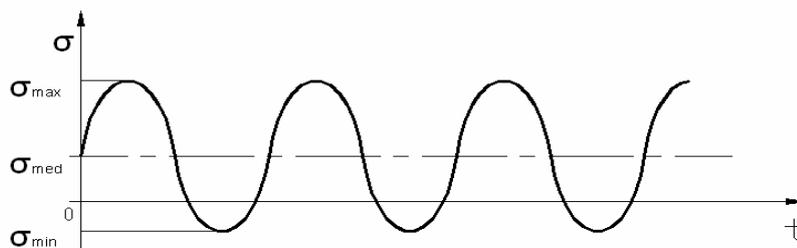


Figura 5: Carregamento variável com reversão parcial

**d) Carga variável sem reversão**

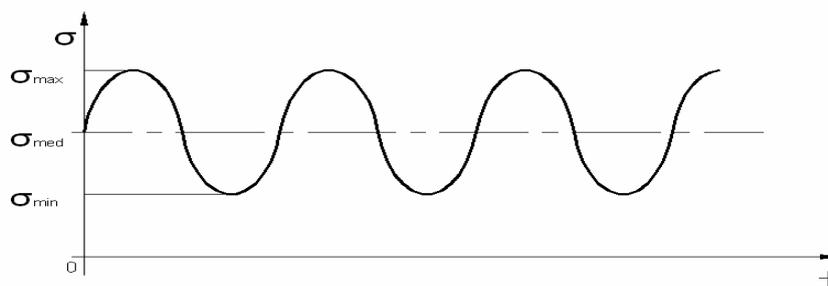


Figura 6: Carregamento variável sem reversão

Na prática, são muito raros os casos em que as peças de máquinas são sujeitas a cargas estritamente constantes. Mesmo assim, calcula-se um valor médio da carga que é considerado constante. Deste modo, a carga variável é considerada como sobreposição entre uma carga constante com o valor médio e uma carga alternada com amplitude igual à da variação observada.

### 2.1.8. Fadiga dos metais

A fadiga é um fenómeno de surgimento de micro-fissuras nas peças, causado por cargas cíclicas que podem ser muito inferiores às cargas estáticas admissíveis [5]

Geralmente, estas fissuras aparecem em diversos sítios e vão-se desenvolvendo até que a secção remanescente da peça se torna insuficiente para suportar as cargas de serviço. Nesta altura ocorre uma quebra repentina da peça. Por esta razão, as avarias por fadiga são muitas vezes inesperadas pois pode não haver sintomas externos, o que é diferente do desgaste.

O início destas falhas inicia em regiões microscópicas, normalmente na superfície do material onde as tensões localizadas são maiores que as tensões médias exercidas na secção total da peça. Sendo cíclica, esta tensão localizada maior, leva o surgimento de micro trincas [3]

A fadiga ocorre depois de um certo número de ciclos de carga. Quanto maior for a tensão a que a peça está sujeita, menor é o número de ciclos de carga que são necessários para causar fadiga. A curva de fadiga é dada na figura 7.

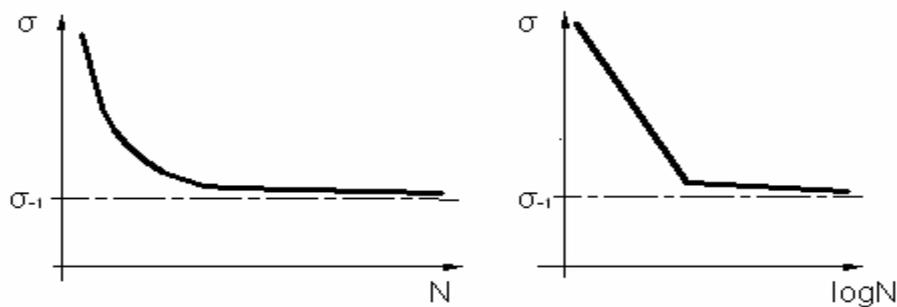


Figura 7: Curva da fadiga

Há valores de tensões  $\sigma$  para os quais, mesmo que se aplique um grande número de ciclos de variação da carga não ocorre fadiga. Ao valor máximo desta tensão chama-se "**limite de fadiga**",  $\sigma^{-1}$

A resistência das peças às cargas cíclicas depende não só da porção de carga variável como também da componente constante. Quanto maior for a componente constante da carga, menor é a tolerância das peças à variação de carga, tal como ilustra o diagrama de Goodman modificado.

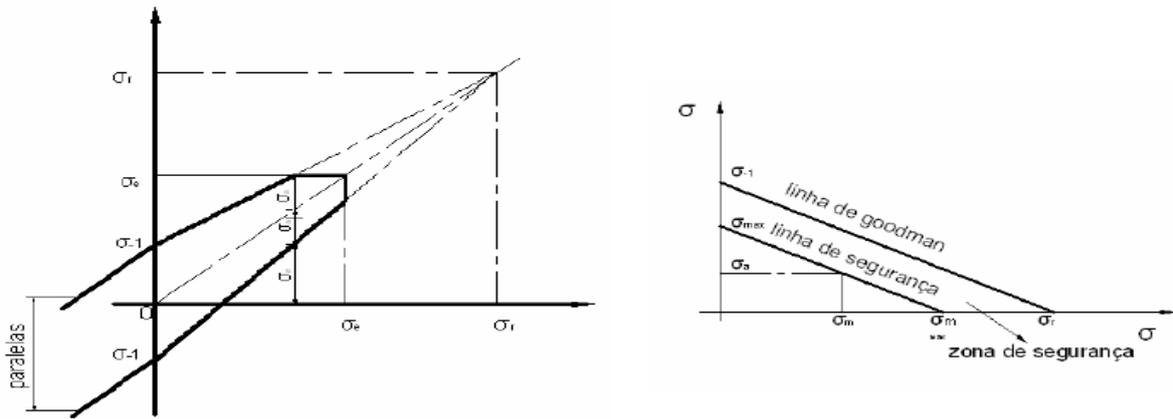


Figura 8: Diagrama de Goodman modificado

Observa-se que a grande maioria das estruturas criadas pela engenharia é elaborada para se sujeitar diversas e variáveis cargas que geralmente variam no tempo. Mesmo quando o carregamento pareça estático sob um primeiro olhar, a falha por fadiga poderá ocorrer em uma ampla gama de ciclos, com valores variáveis, da ordem de 10 ciclos até superiores. Embora o número de ciclos dependa do nível da sollicitação, a resistência é menor quando este se sujeita a uma maior carga dinâmica, diminuindo, assim, a vida útil.

### 2.1.9. Mecanismo de falha por fadiga

O início de uma falha por fadiga se dá pelo surgimento e posterior crescimento de trincas de magnitudes microscópicas. O surgimento das trincas ocorre em regiões onde há concentradores de tensão.

Após a fractura por fadiga, em uma inspecção visual, é possível notar o local de surgimento da trinca, conhecido também por nucleação da trinca, que revelam a propagação estável da trinca até o ponto onde ocorre propagação instável da trinca. A Figura demonstra a falha por fadiga e indica seus detalhes.

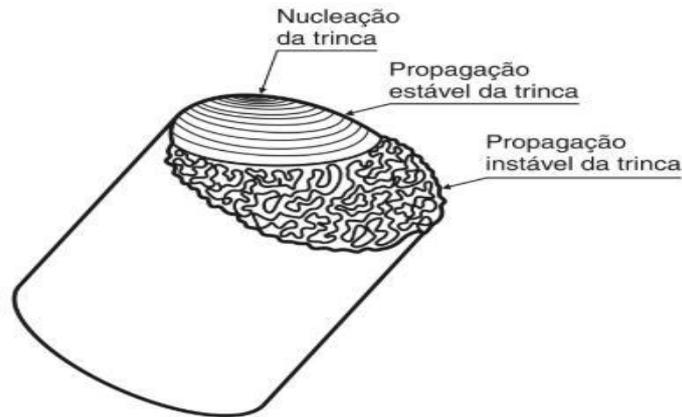


Figura 9: Ilustração de uma falha por fadiga

Deste modo, conceitua-se simplesmente a ruptura de um componente conforme a propagação de uma fissura que foi ocasionada por uma aplicação de tensões cíclicas, sendo a fadiga, a causa mais comum de rupturas em peças giratórias. As irregularidades superficiais, surgem devido às concentrações de tensões e geram deformação plástica, esta se localiza nos planos de deslizamento devido aos movimentos atômicos.

#### 2.1.10. Falha por fadiga em parafusos

Todos os materiais têm uma tendência a falhar sob um carregamento cíclico em um nível de tensão consideravelmente menor do que a força estática do material. Esta característica dos materiais é sabida porque a fadiga é uma causa comum de falha em muitas peças, incluídos os parafusos. A fadiga é estimada segundo [1], como sendo responsável por aproximadamente 85% dos casos de falha em parafusos. A maioria destas falhas ocorre em aplicações de tração, onde o parafuso está submetido a uma pequena pré-carga e uma carga externa alternada.

Em termos do torque aplicado, aparentemente existe uma estreita faixa de valores os quais aumentam a vida em fadiga da junta. É consenso que valores extremos são prejudiciais.

O aperto excessivo prejudica o desempenho quando este atinge níveis de escoamento do material.

As fracturas nos parafusos ocorrem em três regiões distintas:

- Raio do primeiro filete;
- Saída da rosca;
- Raio entre a cabeça e a haste.

### 2.1.11. Falha por fadiga em rolamentos

Rolamentos são componentes que permitem a movimentação de máquinas a velocidades extremamente altas e transportar cargas notáveis com facilidade, eficiência e precisão. Portanto, a partir desta definição, é fácil concluir que eles são extremamente utilizados em todos os sectores industriais. Eles podem ser classificados como:

- **Axiais:** suportam somente cargas axiais;
- **Radiais:** suportam cargas radiais e pequenas cargas axiais;
- **Combinadas:** suportam cargas radiais e axiais.

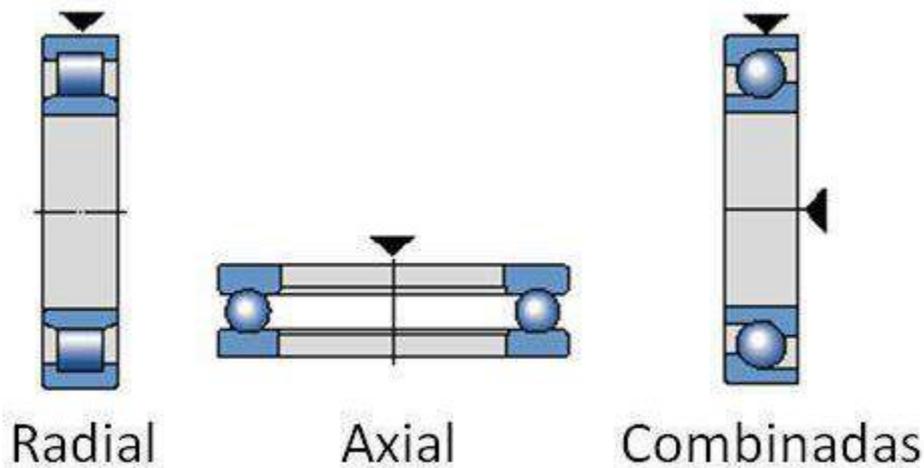


Figura 10: Cargas aplicadas aos rolamentos

Vários factores influenciam na vida dos rolamentos, e conseqüentemente na vida do cubo da roda.

A perda da capacidade de trabalho dos rolamentos é causada pelas seguintes falhas principais:

- Esmigalhamento por fadiga verificado em rolamentos que ultrapassam a duração útil projectada, funcionando em condições normais.
- Desgaste que ocorre quando a protecção contra partículas abrasivas (poeiras e outros depósitos) é insuficiente. O desgaste representa o principal tipo de destruição de rolamentos de automóveis, tractores, equipamento mineiro de construção e várias máquinas afins.
- Destruição da gaiola verificada especialmente em componentes com altas frequências de rotação.

- Quebra dos anéis e corpos de rolamento devida a cargas de choque e vibrações, montagem deficiente, engrenagens tortas, empenamento, entre outros. Este tipo de destruição é consequência de anomalias no funcionamento.
- Deformação residual nas pistas de rolamento, na forma de covachos e mossas, que ocorrem em rolamentos sobrecarregados que funcionam com baixa velocidade.

### 2.1.12. Corrosão dos metais

A corrosão é definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso (GENTIL, 2007).

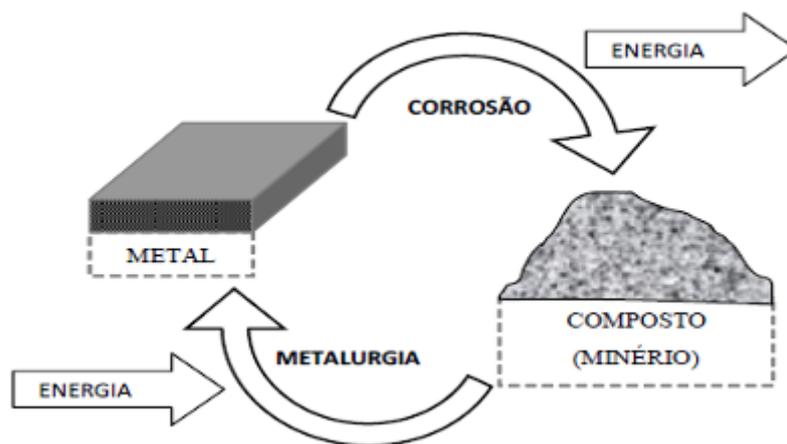


Figura 11: Processo de degradação dos metais

Os processos de corrosão dos materiais metálicos são representados por reação de oxidação e redução, sendo que o mesmo atua como agente redutor cedendo elétrons que são recebidos pelo agente oxidante, que é uma substância existente no eletrólito ou ambiente propício para a corrosão.

### 2.1.12.1. Tipos de corrosão

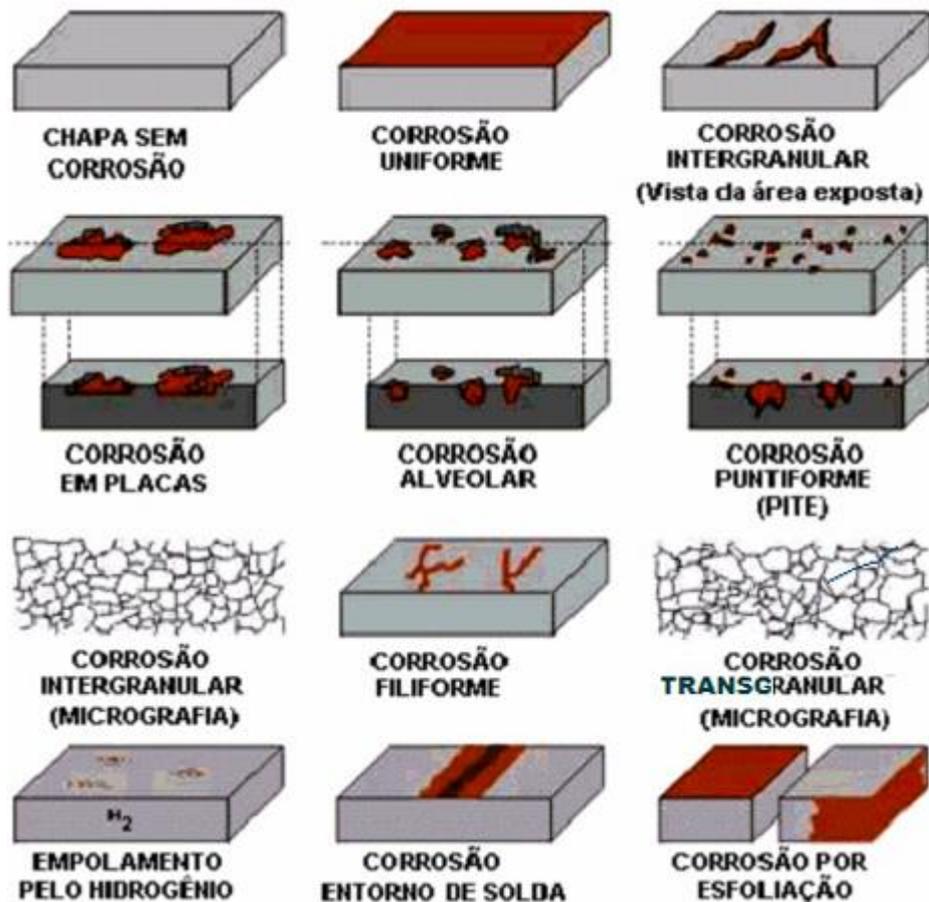


Figura 12: Tipos de corrosão

### 2.1.12.2. Meios corrosivos

#### a) Atmosfera

A ação corrosiva da atmosfera depende fundamentalmente dos seguintes fatores:

- Umidade relativa;
- Substâncias poluentes e gases;
- Temperatura;
- Tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica.

#### b) Humidade Relativa

Umidade Relativa A influência da umidade na ação corrosiva da atmosfera é acentuada, pois o ferro em atmosfera de baixa umidade relativa praticamente não sofre corrosão, em umidade relativa em torno de 60% o processo corrosivo é lento,

mais acima de 70 % ele é acelerado. A umidade relativa pode ser expressa pela relação entre teor de vapor de água encontrado no ar e o teor máximo que pode existir no mesmo, nas condições consideradas, ou então pela relação entre a pressão parcial de vapor da água no ar e a pressão de vapor da água saturado, na mesma temperatura.

**c) Gases poluentes**

Além dos gases constituintes da atmosfera, principalmente oxigênio e nitrogênio, são frequentemente encontrados monóxidos de carbono, dióxido de carbono, ozônio, dióxido de enxofre, trióxido de enxofre, entre outros. Embora haja predominância e maior frequência de ocorrência desses gases, são encontrados referências de corrosão de cobre devido à presença de ácidos orgânicos, como o ácido acético, na atmosfera. A presença desses gases está evidentemente associada aos diferentes tipos de indústrias bem como os combustíveis utilizados.

**d) Águas naturais**

Os materiais metálicos em contacto com água tendem a sofrer corrosão, a qual vai depender de várias substâncias que podem estar contaminando a água que são os gases dissolvidos, os sais dissolvidos, a matéria orgânica de origem animal ou vegetal, as bactérias e algas. Também devem ser considerados o pH da água, a velocidade de escoamento e temperatura. Dentre os agentes corrosivos naturais, a água do mar é um dos mais energéticos, pois, contendo concentrações relativamente elevadas de sais, funciona como um eletrólito forte, permitindo, assim, um processo eletroquímico de corrosão rápido.



Figura 13: Acção corrosiva do mar em bóia marítima

#### **e) Solo**

o comportamento do solo como meio corrosivo deve ser considerado de grande importância, levando-se em consideração as enormes extensões de oleodutos, gasodutos, cabos telefônicos e tubulações de água que exigem um controle rigoroso de manutenção para evitar corrosão acelerada. A velocidade de corrosão no solo não é muito influenciada por pequenas variações na composição ou estrutura do aço. O que vai influenciar mais é a natureza do solo. Assim, destacam-se os seguintes fatores: porosidade condutividade elétrica, sais dissolvidos, umidade, corrente de fuga, pH e bactérias.

#### **f) Produtos Químicos**

Em equipamentos usados em processos químicos, deve-se levar em consideração duas possibilidades: deterioração do material metálico do equipamento e contaminação do produto químico. Os fatores que influenciam são vários e complexos em alguns casos. Entre eles: pureza do metal, contato de metais dissimilares, natureza da superfície metálica, pureza do produto químico, concentração, temperatura e aeração.

#### **g) Alimentos**

A importância do efeito corrosivo dos alimentos está ligada à formação de possíveis sais metálicos tóxicos: geralmente emprega-se ácidos orgânicos como agentes conservadores dos alimentos, no entanto, esses ácidos podem atacar os recipientes metálicos.

#### **h) Substâncias Fundidas**

A corrosão ocasionada por esses meios corrosivos está ligada ao fato do material metálico ser solúvel no composto ou no metal fundido. No caso de metais fundidos tem-se a formação de ligas ou de compostos intermetálicos. No caso de compostos fundidos pode-se ter também o ataque do material metálico por ação de oxidação.

### **2.1.13. Atrelados *low bed trailer***

#### **2.1.13.1. Cubos de roda usados nos atrelados *low bed trailer***

Os cubos de roda usados nos atrelados são produzidos pela *Henred Fruehauf*, tendo como material de fabrico o aço forjado, com os seguintes componentes que são bases deste trabalho:

##### ➤ **Rolamentos**

Os rolamentos usados são os cónicos, eles são adequados para suportar cargas combinadas.

Estes rolamentos podem ser de pistas separáveis ou não, no caso dos modelos usados para cubos de rodas, os rolamentos são de pistas separáveis.

##### ➤ **Vedantes**

Vedante é um elemento de vedação, ele tem como principal função impedir a passagem de maneira estática ou dinâmica de líquidos, gases e sólidos (pó) de um meio para outro. Com relação aos cubos, os vedantes têm como principal função não deixar a graxa internados rolamentos sair e também não deixar nenhum contaminante entrar no cubo.

A montagem incorrecta dos vedantes é um dos principais causadores de falhas em cubos de roda.

##### ➤ **Parafusos**

Parafusos são elementos de fixação, empregados na união não permanente de peças, isto é, as peças podem ser montadas e desmontadas facilmente, bastando apertar e desapertar os parafusos que as mantém unidas.

Nestes cubos de roda, são usados pernos para a fixação da jante e o cubo.

#### **2.1.13.2. Manutenção**

O tipo de manutenção aplicado para os atrelados e seus componentes é a manutenção correctiva, em alguns casos aproveita-se uma avaria ou falta de navios para verificar o estado dos cubos, pernos, rolamentos e a estrutura dos atrelados

A lubrificação é periódica para evitar o desgaste dos componentes.

## 2.2. Análise Estrutural Dos Cubos Das Rodas Dos Atrrelados

### 2.2.1. Apresentação do atrelado usado durante transporte de minério

O transporte de minério das bancas até a ponte (cais) é feito através de atrelados conectados a tug-master e tractores.

A frota de atrelados é composta por dois tipos de atrelados:

Tabela 2: Tipos de atrelados para o transporte de minério

Tipo	Capacidade
Low bed Trailer (Atrrelado Rebaixado)	60 Toneladas
Flat Long Trailer (Atrrelado de plano longo)	50 toneladas

### 2.2.2. Características técnicas do atrelado low bed trailer:

- Peso do atrelado: 8900kg;
- Dimensões: 12900x2550x1712 [mm];
- Capacidade: 60000kg;
- Duas posições para banheiras de 30 toneladas de minério;
- Piscas com capas de protecção;
- 4 Rodas (Pneus, jantes e cubos).



Figura 14 : Tug master conectado a um atrelado low bed com carga.

### 2.2.3. Análise estrutural dos esforços que actuam no conjunto cubo da roda

Análise estrutural é a determinação dos efeitos de cargas sobre estruturas físicas e seus componentes. As estruturas submetidas a este tipo de análise incluem todas aquelas que devem resistir a cargas.

### 2.2.4. Determinação das reacções de apoio no atrelado

As reacções de apoio serão determinadas a partir do *software MD Solids*.

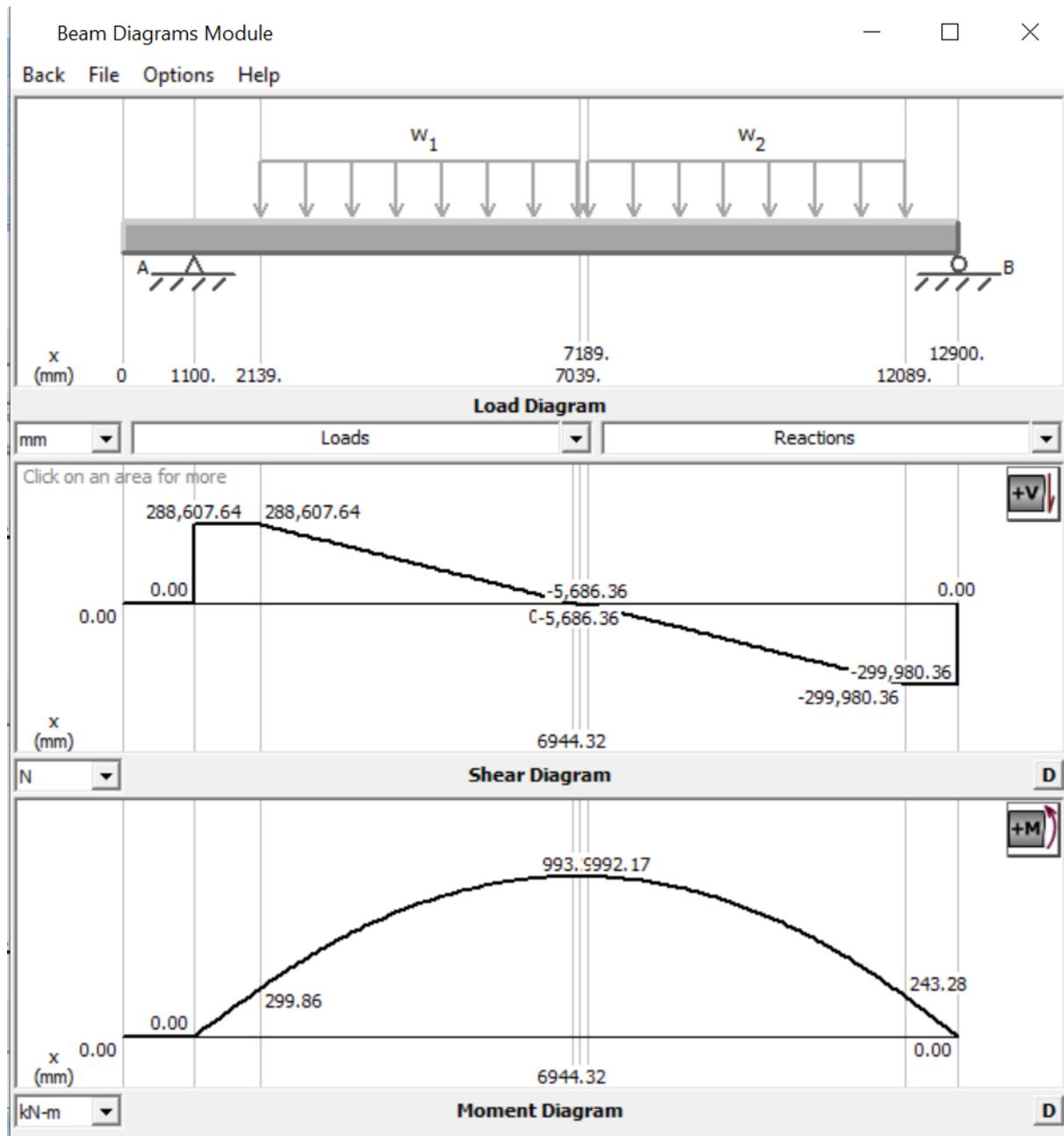


Figura 15: Determinação das reacções de apoio

Do *MD Solids*, tem – se:  $R_A = 72\,151.91\,N$  e  $R_B = 74\,995.09\,N$ .

Estas são as reacções que actuam nas rodas dianteiras e traseiras do atrelado, para achar as reacções que actuam no cubo da roda dividem – se as reacções  $R_A$  e  $R_B$  pelo número de rodas dianteiras e traseiras, então:

Tabela 3: Resultado do cálculo

	<b>Símbolo</b>	<b>Resultado</b>
Reacção no ponto A	$R_A$	14 430.38 N
Reacção no ponto B	$R_B$	14 999.02 N
Momento flector máximo	$M_f$	199 998.43 kN × m

### 2.2.5. Teste de resistência dos rolamentos

O cálculo dos rolamentos consiste na verificação da capacidade dinâmica do rolamento, se este girar a frequências maiores que 10 *rpm*, e na verificação da capacidade estática, se este girar a frequências inferiores a 10 *rpm*. Estes cálculos têm por objectivo verificar a não possibilidade de destruição por fadiga e deformações plásticas nos anéis dos rolamentos.

Para o presente projecto, tendo sido escolhidos os rolamentos com base nas dimensões dos escalões dos veios e recomendações para os tipos de rolamentos, e como todos rolamentos giram a mais de 10 *rpm*, faz – se o cálculo da capacidade dinâmica dos rolamentos, e caso não se verifiquem as condições de limitação da carga dinâmica, escolhe – se um rolamento da série mais pesada.

#### Capacidade de carga dinâmica dos rolamentos

A condição de trabalho é a limitação da carga dinâmica, e é expressa por:

$$C \leq [C]$$

Sendo que:

$$C = P \times L^{\frac{1}{\alpha}}$$

Onde:

L – tempo de vida do rolamento, em milhões de revoluções;

P – carga dinâmica reduzida que actua sobre o rolamento;

$\alpha$  – expoente de cálculo,  $\alpha = \frac{10}{3}$  para rolamentos de rolos

O tempo de vida do rolamento é dado por:

$$L = \frac{60 \times n \times L_h}{10^6} \quad [\text{Milhões de voltas}]$$

Onde:

$L_h$  é o tempo de vida dos rolamentos em horas;

$n$  – frequência de rotação do rolamento.

A carga dinâmica equivalente P é determinada em função da disposição dos rolamentos para a disposição em O, têm-se:

$$P = R_i + 1.12 \times Y \times F_{a\text{[cálc]}}[N] \quad \text{para} \quad \frac{F_{ac\acute{a}lc}}{R_i} \leq e$$

$$P = 0.67 \times R_i + 1.68 \times Y \times F_{a\text{[cálc]}}[N] \quad \text{para} \quad \frac{F_{ac\acute{a}lc}}{R_i} > e$$

Onde:

$R_i$ - é a reacção no apoio mais carregado;

$F_a$  – é a força axial que actua sobre o rolamento;

$Y$ - é o factor de carga axial.

$$F_{ac\acute{a}lc} = F_a + 0.5 \times \frac{R}{Y}$$

A vida útil do rolamento em milhões de horas é expressa por:

$$L_h = \frac{L \times 10^6}{n \times 60}$$

Onde:

$L_h$ - é a vida útil do rolamento, horas

$L$ - é a vida útil em milhões de voltas

$n$ - é a frequência de rotações [rpm]

## Esquema de montagem dos rolamentos do cubo da roda

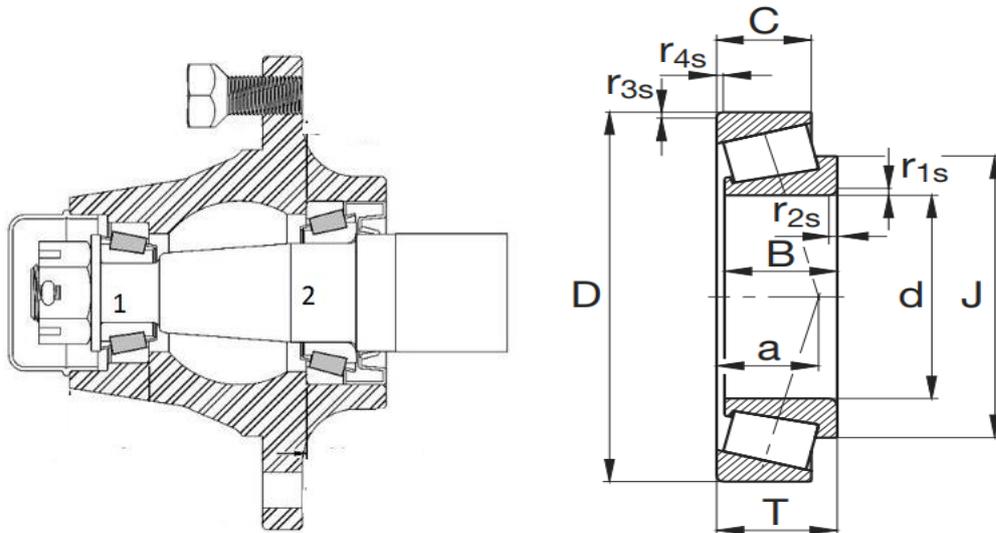


Figura 16: Esquema de montagem e características dimensionais dos rolamentos

### 2.2.5.1. Teste de resistência do rolamento do ponto 1

Os parâmetros dos rolamentos são:

Tabela 4: Parâmetros do rolamento do ponto 1

Parâmetros geométricos [mm]					
$d$	$D$	$B$	$a$	$C$	$T$
80	125	29	27	22	29
Parâmetros de carga				Frequência de rotação [rpm]	
[C]	$C_o$	$e$	$Y$	Limite	Referência
137 [kN]	121 [kN]	0.42	1.42	5000	3200

$$R_A = 14\,430.38\text{ N}$$

$$R_B = 14\,999.02\text{ N}$$

Para o teste de resistência usa – se o apoio mais carregado, neste caso é o apoio B (Rodas traseiras).

### Determinação da carga dinâmica equivalente

$$F_{a [c\acute{a}lc]} = F_a + 0.5 \times \frac{R_B}{Y} = 0 + 0.5 \times \frac{14\,999.02}{1.42} = 5\,281.35 \text{ N}$$

$$\frac{F_{a [c\acute{a}lc]}}{R_B} = \frac{6\,601.68}{18\,748.77} = 0.35 < e = 0.42 \text{ ent\~{a}o:}$$

$$P = R_B + 1.12 \times Y \times F_{a [c\acute{a}lc]} [N]$$

$$P = 14\,999.02 + 1.12 \times 1.42 \times 5\,281.35$$

$$P = 23\,398.48 \text{ N}$$

### Tempo de vida do rolamento

$$L_h = \frac{L \times 10^6}{n \times 60} \rightarrow L = \frac{L_h \times n \times 60}{10^6}$$

Onde:

$$L_h = 365 \times 24 \times K_{ano} \times K_{dia} \times L$$

$$K_{dia} = \frac{n^{\circ} \text{ de horas de trabalho por dia}}{24} = \frac{10}{24} = 0.42$$

$$K_{ano} = \frac{n^{\circ} \text{ de dias de trabalho durante o ano}}{365} = \frac{335}{365} = 0.92$$

Vida útil do equipamento  $L = 10 \text{ anos}$

$$L_h = 365 \times 24 \times 0.92 \times 0.42 \times 10 = 33848.64 \text{ horas}$$

Ent\~{a}o:

$$L = \frac{33848.64 \times 166.2 \times 60}{10^6} = 337.54 \text{ milh\~{o}es de voltas}$$

### Capacidade dinâmica equivalente

$$C = P \times L^{\frac{1}{\alpha}} = 23\,398.48 \times 337.54^{\frac{3}{10}} = 134\,179.2 \text{ N} < [C] = 137\,000 \text{ N}$$

A condi\~{c}o de resist\~{e}ncia do rolamento \`a carga verifica – se.

### 2.2.5.2. Teste de resistência do rolamento no ponto 2

Os parâmetros dos rolamentos são:

Tabela 5: Parâmetros do rolamento do ponto 2

Parâmetros geométricos [mm]					
<i>d</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>a</i>	<i>C</i>	<i>T</i>
120	165	29	29	23	29
Parâmetros de carga				Frequência de rotação [rpm]	
[C]	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>e</i>	<i>Y</i>	Limite	Referência
176 [kN]	310 [kN]	0.35	1.72	4000	2200

#### Determinação da carga dinâmica equivalente

$$F_{a [cál]} = F_a + 0.5 \times \frac{R_B}{Y} = 0 + 0.5 \times \frac{14\,999.02}{1.42} = 5\,281.35 \text{ N}$$

$$\frac{F_{a [cál]}}{R_B} = \frac{6\,601.68}{18\,748.77} = 0.35 < e = 0.42 \text{ então:}$$

$$P = R_B + 1.12 \times Y \times F_{a [cál]} [N]$$

$$P = 14\,999.02 + 1.12 \times 1.72 \times 5\,281.35$$

$$P = 25\,173.01 \text{ N}$$

#### Tempo de vida do rolamento

$$L_h = \frac{L \times 10^6}{n \times 60} \rightarrow L = \frac{L_h \times n \times 60}{10^6}$$

Onde:

$$L_h = 365 \times 24 \times K_{ano} \times K_{dia} \times L$$

$$K_{dia} = \frac{n^{\circ} \text{ de horas de trabalho por dia}}{24} = \frac{10}{24} = 0.42$$

$$K_{ano} = \frac{n^0 \text{ de dias de trabalho durante o ano}}{365} = \frac{335}{365} = 0.92$$

Vida útil do equipamento  $L = 10 \text{ anos}$

$$L_h = 365 \times 24 \times 0.92 \times 0.42 \times 10 = 33848.64 \text{ horas}$$

Então:

$$L = \frac{33848.64 \times 166.2 \times 60}{10^6} = 337.54 \text{ milhões de voltas}$$

### **Capacidade dinâmica equivalente**

$$C = P \times L^{\frac{1}{\alpha}} = 25\,173.01 \times 337.54^{\frac{3}{10}} = 144\,355.3 \text{ N} < [C] = 176\,000 \text{ N}$$

A condição de resistência do rolamento à carga verifica – se.

### 2.2.6. Teste de resistência dos parafusos do cubo de roda

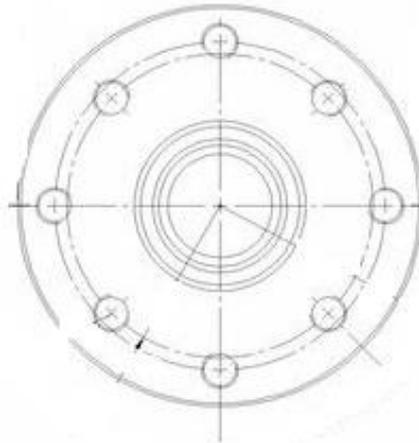


Tabela 6: Vista frontal do cubo de roda

O cubo da roda tem as seguintes características (concernente aos parafusos):

**Tabela 7: Características dos parafusos**

<b>Tipo de material</b>	Aço 30x
<b>Número de parafusos</b>	8
<b>Diâmetro do parafuso</b>	M24

#### 2.2.6.1. Teste de resistência dos parafusos à tensão normal

**Condição de resistência dos parafusos**

$$\sigma = \frac{F}{\pi \frac{d_1^2}{4}} \leq [\sigma]$$

**Tensão admissível**

$$[\sigma] = 0.6 \times \sigma_e$$

Da tabela 8 de [7]

Marca do aço	Limite de escoamento, $\sigma_r$ , em MPa	Limite de escoamento, $\sigma_e$ , em MPa	Limite de fadiga, $\sigma_{-1r}$
Ст 3 e 10	340	200	160
20	400	240	170
35	500	300	180
45	600	360	240
<b>30X</b>	<b>800</b>	<b>640</b>	<b>280</b>
30X ГСА	1000	900	300
BT16	1200	-	350

**Figura 17: Tensões – limite**

$$\sigma_e = 640 \text{ Mpa}$$

$$[\sigma] = 0.6 \times 640 = 385 \text{ Mpa}$$

### Tensão nos parafusos

$$\sigma = \frac{F}{\pi \frac{d_1^2}{4}}$$

Onde:

$$F = \frac{R_B}{8} = \frac{14\,999.02}{10} = 1\,499.9 \text{ N}$$

Divide – se  $R_B$  por 8, pois, o cubo tem 8 parafusos.

$$\sigma = \frac{1499.9}{\pi \times \frac{24^2}{4}} = 3.31 \text{ Mpa}$$

$$\sigma = 3.31 \text{ Mpa} < [\sigma] = 0.6 \times 640 = 385 \text{ Mpa}$$

A condição de resistência dos parafusos à tensão normal verifica – se.

### 2.2.6.2. Teste de resistência dos parafusos à tensão de cisalhamento

#### Condição de resistência dos parafusos

$$\tau = \frac{F}{\pi \times d_1 \times H \times K \times K_{irr}} \leq [\tau]$$

#### Tensão admissível

Da tabela 1.2 de [7]

$$[\tau] = (0.2 \dots 0.3) \times \sigma_e$$

$$[\tau] = 0.25 \times \sigma_e = 0.25 \times 640 = 160 \text{ Mpa}$$

#### Tensão nos parafusos

$$\tau = \frac{F}{\pi \times d_1 \times H \times K \times K_{irr}}$$

Onde:

$$H = 0.8 \times d_1 = 0.8 \times 24 = 19.2 \text{ mm}$$

$K = 0.87$  – para roscas triangulares

$$K_{irr} \approx 0.6$$

$$F = \frac{R_B}{10} = 1\,499.9 \text{ N}$$

Então:

$$\tau = \frac{1\,499.9}{\pi \times 24 \times 19.2 \times 0.87 \times 0.6} = 1.98 \text{ Mpa}$$

$$\tau = 1.98 \text{ Mpa} < [\tau] = 160 \text{ Mpa}$$

### 2.2.6.3. Teste de resistência dos parafusos à fadiga e carga estática

#### a) Teste de resistência à fadiga

$$s = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a \times K_\sigma + \psi_\sigma \times \sigma_m} \leq [s]$$

Onde:

$s$  - coeficiente de segurança de fadiga

$\sigma_{-1}$  - é o limite de resistência à fadiga do material do parafuso;

$\sigma_a$  - a amplitude da variação da tensão no parafuso;

$K_\sigma$  - é o coeficiente de concentração de tensões na rosca (experimental),  $K_\sigma = 4 \dots 5.5$  para aços de liga;

$\psi_\sigma$  - é o coeficiente de sensibilidade à assimetria do ciclo de tensões:  $\psi_\sigma \approx 0.1$ ;

$\sigma_m$  - é a tensão média no parafuso;

$$\sigma_m = \frac{F_{ap} + \frac{F_{par}}{2}}{A_{par}}$$

$$F_{ap} = K_{ap} \times F$$

$$F_{par} = \chi \times F$$

Onde:

$F_{ap}$  - é a força de aperto;

$\chi$  - é o coeficiente de carga externa,  $\chi = 0.2 \dots 0.3$ ;

$A_{par}$  - é a área do parafuso;

$F_{par}$  - carga externa;

$K_{ap}$  - coeficiente de aperto,  $K_{ap} = 2.5 \dots 4$

Então:

$$F_{ap} = 4 \times 1499.9 = 5999.6 \text{ N}$$

$$F_{par} = 0.3 \times 1499.9 = 449.97 \text{ N}$$

$$A_{par} = \frac{\pi \times d_1^2}{4}$$

Onde

$d_1$  - é o diâmetro da raiz do parafuso.

$$d_1 = 20.76 \text{ mm} \rightarrow A_{par} = \frac{\pi \times 20.76^2}{4} = 338.49 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{5\,999.6 + \frac{449.97}{2}}{338.49} = 18.39 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_a = \frac{F_{par}/2}{A_{par}} = \frac{449.97/2}{338.49} = 0.65 \text{ Mpa}$$

Da figura 14 tem – se:

$$\sigma_{-1} = 280 \text{ Mpa}$$

Então, o coeficiente de segurança é:

$$s = \frac{280}{0.65 \times 5 + 0.1 \times 18.39} = 55.02$$

Da tabela 1.2 de [7] tem – se:

$$[s] \geq 2.5 \dots 4$$

Como:

$$s > [s]$$

A condição de resistência dos parafusos verifica – se.

#### **b) Teste de resistência a carga estática**

$$s_e = \frac{\sigma_e}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{\sigma_e}{\sigma_a + \sigma_m} \geq [s_e]$$

Onde:

$s_e$  – é o coeficiente de segurança à carga estática;

$[s_e]$  – é o coeficiente de segurança admissível a carga estática

Da tabela 1.2 de [7] tem – se:

$$[s_e] = 1.5 \dots 2.5$$

$$s_e = \frac{640}{0.65 + 18.39} = 33.61$$

Como:

$$s_e > [s_e]$$

A condição de resistência dos parafusos à carga estática verifica – se.

### 2.3. Resumo do cálculo

Teste de resistência	Condição
Rolamento 1	Resiste
Rolamento 2	Resiste
Tensão normal do parafuso	Resiste
Tensão tangencial do parafuso	Resiste
Fadiga do parafuso	Resiste
Carga estática do parafuso	Resiste

**Tabela 8: Resumo do cálculo**

## Capítulo III

### 3.1. Conclusão e recomendações

Findo projecto, pode-se observar que os rolamentos resistem a carga aplicada durante o funcionamento, porém a carga submetida ao rolamento montado no ponto 1 é muito próxima à carga máxima suportada pelo mesmo, então deve-se prestar uma atenção especial neste rolamento e respeitar-se o tempo de vida útil deste. Os parafusos resistem aos esforços aplicados. Para além dos esforços mecânicos, outro factor que influencia na quebra dos parafusos e rolamentos é a exposição a ambientes corrosivos.

Os parafusos têm sofrido mais cisalhamento durante o processo de manuseamento da carga. As condições que favorecem este fenómeno podem ser:

- Condições da via, isto é, a via apresenta irregularidades em certos troços da mesma;
- Aplicação de torque de aperto excessivo;
- Falta de trancadores de porcas para evitar o auto desaperto;
- Desmontagens frequentes;
- Deficiente manutenção preventiva;
- Não observância de especificações recomendadas;

Para evitar a rápida perda de capacidade dos parafusos, rolamentos e outros componentes do conjunto cubo de roda, recomenda – se:

- Instalar conta – hora em todos atrelados para maior controlo de tempo de funcionamento do atrelado;
- Intensificar a manutenção preventiva de forma planificada;
- Evitar constantes desapertos;
- Usar vias sem irregularidades;
- Garantir uma lubrificação periódica.

Como forma de melhorar este estudo, recomenda – se aprofundar sobre análise dinâmica e redimensionar o cubo de roda.

### 3.2. Referências bibliográficas

- [1] BUDYNAS, Richard G., NISBETT, J. K., *Elementos de Máquinas de Shigley*, 10<sup>a</sup> Ed., Porto Alegre, 2016.
- [2] Catálogo de rolamentos FAG.
- [3] DA ROSA, Edinson, *Análise de Resistência Mecânica*, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2002.
- [4] MACHADO, Pedro V. S., *Fadiga em Materiais Naturalmente Defeituosos: Testes e Modelagem*, Brasília – Brasil, 2018.
- [5] RESHETOV, D. N., *Atlas de construção Mecânica*, Vol I, II e III, Brasil, 1979.
- [6] RUCHERT, Cassius, *Mecânica da Fratura e Fadiga dos Materiais*, Universidade de São Paulo, Brasil, 2014.
- [7] SITOE, Rui Vasco, *Manual da Disciplina de Órgãos de Máquinas I*, Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, 2005.