

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Pedro Rodrigues Gomes Simão

**CÁLCULO EM FADIGA DE UMA PONTA DE EIXO
PARA CUBOS DE RODA UNITIZADOS EM
VEÍCULOS COMERCIAIS E SUAS VANTAGENS.**

Taubaté – SP

2018

Pedro Rodrigues Gomes Simão

**CÁLCULO EM FADIGA DE UMA PONTA DE EIXO
PARA CUBOS DE RODA UNITIZADOS EM
VEÍCULOS COMERCIAIS E SUAS VANTAGENS.**

Monografia apresentada para obtenção do
Certificado de Especialização pelo Curso Projeto
Mecânico do Departamento de Engenharia da
Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projetos de Máquinas

Orientador: Prof. Me. Lucas Giovanetti

Taubaté – SP

2018

PEDRO RODRIGUES GOMES SIMÃO

**CÁLCULO EM FADIGA DE UMA PONTA DE EIXO PARA CUBOS DE RODA
UNITIZADOS EM VEÍCULOS COMERCIAIS E SUAS VANTAGENS.**

Monografia apresentada para obtenção do
Certificado de Especialização pelo Curso Projeto
Mecânico do Departamento de Engenharia da
Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projeto de Máquinas

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Lucas Giovanetti

Assinatura: _____

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes

Assinatura: _____

A minha esposa Caroline com muito amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me iluminar em todos os momentos.

A minha esposa por me apoiar e me ajudar nos momentos de preocupação.

Aos meus pais, por tudo que sou.

Aos meus avós, por serem um grande porto seguro em momentos difíceis.

Aos meus colegas de trabalho pela ajuda com relação ao projeto.

Ao professor Me. Lucas Giovanetti, pelas orientações, conhecimento e por ter me ajudado com tanto pouco tempo para a defesa.

A UNITAU, por me propiciar novos conhecimentos que serão aplicados em minha vida profissional.

“O maior erro que você pode cometer, é o de ficar o tempo todo com medo de cometer algum.”

Elbert Hubbard

RESUMO

Veículos comerciais são feitos para gerar renda, poucas pessoas compram um caminhão ou um ônibus para lazer, por isso há um grande foco em desenvolvimento de novas peças que possam ter maior vida e também que gerem baixo custo de manutenção, com isso, este trabalho tem como objetivo apresentar um novo conceito de cubo de roda de eixos dianteiros, chamado de cubo unitizado, que possui, além da vida infinita para a aplicação do veículo, zero manutenção se montado com todos os requisitos corretos, também mostra que é possível desenvolver, através de uma ponta de eixo já existente, uma que possa montar este novo conceito de cubo unitizado, calculando sua vida em fadiga. Para isso será realizado um comparativo entre o cubo de roda convencional e o cubo de roda unitizado, mostrando suas principais diferenças como montagem e manutenção, e então apresentar os cálculos feitos para a nova ponta de eixo inteiriça que será usada para a montagem do novo cubo de roda. Assim será mostrado que é possível atualizar veículos comerciais que já usam cubos convencionais em novos cubos unitizados, atualizando somente a ponta de eixo.

Palavras-chave: Fadiga, cubo de roda, ponta de eixo, veículos comerciais.

ABSTRACT

Commercial vehicles are made to generate money, few people buy a truck or a bus for leisure, so there is a great focus on developing new parts that can have a longer life and also that generate a low cost of maintenance, with this, this work has as a goal to present a new concept of wheel hub of front axles, called of hub unit, that possesses, beyond the infinite life for the application of the vehicle, zero maintenance if mounted with all the correct requirements, also shows that it is possible to develop, through of an existing wheel end, one that can mount this new concept of hub unit, calculating its life in fatigue. To do this, a comparison will be made between the conventional wheel hub and the unitized wheel hub, showing its main differences as assembly and maintenance, and then presenting the calculations made for the new wheel end tip that will be used to mount the new hub wheel. Thus it will be shown that it is possible to upgrade commercial vehicles that already use conventional hubs in new hub units, updating only the wheel end.

Keywords: Fatigue, wheel hub, wheel end, commercial vehicles.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contextualização	11
1.2	Problema de pesquisa	12
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo geral.....	13
1.3.2	Objetivos específicos	13
1.4	Objeto de pesquisa.....	13
1.5	Delimitação	14
1.6	Limitações da pesquisa.....	14
1.7	Hipóteses	14
1.8	Justificativa.....	15
1.9	Estrutura do trabalho	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Fadiga	16
2.2	Falha por fadiga.....	19
3	INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1	Eixos.....	20
3.2	Eixos direcionais	21
3.2.1	Bare Spindle	22
3.2.1.1	Viga do eixo.....	23
3.2.1.2	Mangas de eixo.....	24
3.2.1.3	Pino Mestre.....	25
3.2.1.4	Peças de direção.....	26
3.2.2	Peças anexadas ao eixo	26
3.2.2.1	Cubo de roda convencional	27
3.2.2.2	Rolamentos	27

3.2.2.3 Retentores	31
3.2.2.4 Cubos	31
3.2.2.5 Cubos de roda unitizados	33
3.2.2.6 Cubo unitizado	33
3.2.2.7 Flange de roda.....	34
3.2.2.8 Conjunto freio e tambor	35
4 COMPARAÇÃO: CUBOS CONVENCIONAIS x UNITIZADOS.....	36
4.1 Processo de montagem dos cubos de roda	36
4.1.1 Processo de montagem: cubo convencional.....	36
4.1.2 Processo de montagem: cubo unitizado.	38
4.2 Comparação entre ambos os sistemas	39
5 METODOLOGIA	40
5.1 Testes.....	41
5.2 Fator de sensibilidade ao entalhe (q)	43
5.3 Fator de concentração de tensão (Kt)	44
5.4 Fator de concentração de tensão em fadiga (Kf)	44
5.5 Tensão média e tensão alternada (σ_m e σ_a)	45
5.6 Limite de resistência (S'e).....	46
5.7 Fatores modificadores	47
5.7.1 Fator de superfície (ka)	47
5.7.2 Fator de tamanho (kb)	48
5.7.3 Fator de carregamento (kc)	49
5.7.4 Fator de temperatura (kd).....	50
5.7.5 Fator de confiabilidade (ke)	50
5.7.6 Fator de efeitos diversos (kf).....	51
5.8 Fator de segurança de fadiga	52
6 RESULTADOS E CÁLCULOS	53

6.1 Variando os fatores modificadores	53
6.1.1 Variando os fator modificador de superfície.....	54
6.1.2 Variando os fator modificador de confiabilidade.....	55
6.1.3 Variando os fator modificador de confiabilidade e de superfície juntos.	55
7 CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Veículos comerciais, na sua maioria, possuem eixos rígidos (REIMPELL, 2001), onde estes podem ser divididos em trativos ou direcionais (Figura 1). Estes eixos são dispostos no veículo, em sua grande maioria, como direcionais na dianteira e trativos na traseira, porém, em veículos com tração nas quatro rodas, pode-se ter eixos direcionais e trativos juntos, este veículos são chamados 4x4.

Todos estes eixos possuem cubos de roda, que basicamente são os rolamentos onde as rodas do veículo giram. Para montar estes cubos fazem-se necessárias pontas de eixo onde os rolamentos possam girar livremente, essas peças são chamadas “mangas de eixo” que é um componente estrutural amplamente utilizado no projeto de veículos automotivos (KLAVA, 2003).



Figura 1 - Eixo Dianteiro direcional com cubo de roda e tambor.

FONTE: Cardans Tencar – A Tecnologia em cardans, 2015.

Essas mangas são os pontos de entrada das acelerações que o solo aplica nos veículos, sendo necessários projetos muito robustos para resistir as tais acelerações. Com o avanço da tecnologia, novos projetos de cubos de roda foram desenvolvidos, com o intuito de melhorar a vida útil, desempenho, manutenção, entre outras qualidades do veículo. Assim, fez-se

necessário o desenvolvimento de novas mangas de eixo, que possibilitassem a montagem desses cubos e resistissem às mesmas aplicações dessas novas peças.

1.2 Problema de pesquisa

Empresas de rolamentos estão em constante desenvolvimento de novos produtos para melhoria de desempenho, vida útil, entre outros. Com isso, empresas montadoras de veículos comerciais ficam sempre pesquisando oportunidades para poder somar novas tecnologias a seus veículos, focando sempre no valor agregado que estes novos produtos poderão adicionar. Portanto, este trabalho propõe a realização do cálculo em fadiga de uma ponta de eixo para um novo conceito de cubo de roda, chamado de unitizado, usando como base uma ponta já existente, deve-se usar uma peça já existente porque uma manga de eixo possui diversos outros pontos de interface, como por exemplo, o freio de roda. Abaixo pode-se ver uma ponta de eixo cônica (Figura 2), usada em cubos de roda convencionais.



Figura 2 – Pontas de eixo cônicas.

FONTE: Dana – *Commercial vehicles*, 2018.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Esse estudo tem como objetivo geral calcular a vida em fadiga de uma ponta de eixo unitizada a partir de uma ponta de eixo já existente e mostrar os ganhos do uso do rolamentos unitizado.

1.3.2 Objetivos específicos

- Apresentar o novo conceito de cubo de roda para veículos comerciais;
- Mostrar a importância da realização do cálculo de vida em fadiga.
- Apresentar as consequências que possíveis desvios nos processos de fabricação podem afetar na vida das peças.

1.4 Objeto de pesquisa

Este trabalho trata-se de um estudo de caso real dentro de uma empresa multinacional de grande porte, fabricante de caminhões e ônibus, que busca mostrar o desenvolvimento de novas peças e a importância do cálculo de vida em fadiga para definição da vida útil do produto.

1.5 Delimitação

A presente pesquisa tem como limites de estudo a análise de uma situação real, dentro do setor de desenvolvimento de produto de uma indústria de veículos comerciais, situada na região Sul Fluminense – RJ.

1.6 Limitações da pesquisa

O trabalho limitou-se a mostrar um estudo de comparação com relação a cubos de roda convencionais e unitizados, mostrando os prós e contras do uso de cada um em veículos comerciais através de pesquisas feitas em sites e publicações de grandes empresas do mercado de veículos comerciais além de calcular a vida em fadiga da ponta de eixo com embasamento teórico.

1.7 Hipóteses

A hipótese deste trabalho é que, mesmo sendo um produto com um custo elevado, cubos unitizados agrega um valor que compensa o custo devido aos ganhos em manutenção e vida do produto, além de mostrar que é possível fazer a atualização dos veículos comerciais atuais para este novo produto atualizando somente a ponta do eixo do veículo para atender a nova montagem.

1.8 Justificativa

O trabalho contribui para mostrar as empresas, principalmente montadoras de veículos comerciais, os ganhos no uso de rolamentos unitizados e provando que o valor agregado que o produto soma ao veículo justifica o desenvolvimento e acréscimo de valor no produto final.

1.9 Estrutura do trabalho

O trabalho foi dividido em sete capítulos, onde o primeiro trata da introdução, mostrando resumidamente os pontos principais do projeto além dos objetivos do trabalho, limites e delimitações e, ainda, destaca hipóteses e justifica o mesmo. No segundo capítulo é realizada uma breve revisão de literatura com relação a fadiga, tendo como foco as falhas por fadigas e suas propagações. Já no terceiro capítulo, com o intuito de facilitar o entendimento do trabalho, foi realizada uma introdução teórica mostrando todos os componentes que compõe um eixo dianteiro onde são montados os cubos de roda. No capítulo quatro foi mostrado o comparativo entre os sistemas de cubo de roda convencional e unitizado para assim mostrar os ganhos deste novo sistema e justificar o trabalho, no capítulo cinco é mostrada a metodologia do trabalho e com isso os testes que foram reproduzidos pelos cálculos. No sexto capítulo foram realizados todos os cálculos para a vida em fadiga e ao final fora realizado a variação de alguns fatores modificadores para então finalizar o trabalho com o sétimo e último capítulo onde está a conclusão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fadiga

Segundo Callister (1999), estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes, como pontes, aeronaves e componentes de máquinas estão sujeitas a uma forma de falha, pode-se notar a mesma linha de pensamento quando Shigley (2005) descreve essa falha como a “ação de tensões repetidas ou flutuantes”. Porém antes de existirem diversas definições para a fadiga ou mesmo “falha por fadiga” o fato de corpos de provas falharem com tensões muito menores que seus valores de ruptura não possuíam uma explicação empírica, quando nos anos 1800 começaram a ocorrer falhas nos eixos de vagões de trem e Rankine publica em 1843, As causas da Ruptura Inesperada de Munhões de Eixos Ferroviários, dizendo que o material havia se tornado frágil devido a tensões alternadas e que o mesmo havia “cristalizado”. Porém, em 1860, ocorreu o primeiro estudo, realmente, sobre falha por fadiga, onde o engenheiro alemão August Wöhler realizou um estudo onde aplicava carregamentos alternados em eixos de aço. Foi através dos resultados desse estudo que Wöhler obteve dados suficientes para traçar a curva S-N, também chamadas de curva de Wöhler, e assim introduzir o conceito de tensão limite de fadiga.

Na Tabela 1 mostrada abaixo (Norton, 2004, p.294). pode-se ver de uma maneira exemplificada que muitos outros pesquisadores dedicaram-se a estudos com relação a fadiga:

Tabela 1 – Histórico sobre fadiga.**FONTE: Norton, 2004.**

Ano	Pesquisador	Evento ou Realização
1829	Albert	Primeiro a documentar uma falha devido a cargas repetidas.
1837	Rankine	Discutiu a teoria da cristalização da fadiga.
1839	Poncelet	Primeiro a utilizar o termo fadiga.
1849	Stephenson	Discutiu a responsabilidade do produto associada às falhas por fadiga em eixos ferroviários.
1850	Braithwaite	Primeiro a utilizar o termo fadiga em publicação de língua inglesa e também discutiu a teoria da cristalização da fadiga.
1864	Fairbairn	Relatou os primeiros experimentos com cargas repetidas.
1871	Wöhler	Publicou os resultados de 20 anos de pesquisas sobre falhas em eixos, desenvolveu os ensaios de flexão rotativa S-N e definiu o limite de fadiga.
1871	Baschinger	Desenvolveu um extensômetro com espelho com uma sensibilidade igual a E-6 e estudou a tensão-deformação inelástica.
1886	Baschinger	Propôs um "limite elástico natural" cíclico abaixo onde nunca ocorreria fadiga.
1903	Ewing/Humfrey	Descobriram linhas de deslizamento, trincas de fadiga e o crescimento da trinca até falha, mostrando os erros da teoria da cristalização na fadiga.
1910	Bairstow	Verificou a teoria do limite elástico natural de Bauschinger e o limite de fadiga de Wöhler.
1910	Basquim	Desenvolveu a lei exponencial para testes de fadiga.
1915	Smith/ Wedgewood	Separaram a componente cíclica de deformação plástica da deformação plástica total.
1921	Griffith	Desenvolveu um critério de falha e relaciona a fadiga ao crescimento da trinca.
1927	Moore/Kommers	Quantificaram os dados de fadiga de alto-ciclo para diversos materiais em "A Fadiga dos Metais".
1930	Goodman/Sod.	Determinaram de forma independente a influência das tensões médias na fadiga.

Ano	Pesquisador	Evento ou Realização
1953	Peterson	Publicou "Fatores da Concentração de Tensão para Projeto", fornecendo uma abordagem para considerar os entalhes.
1955	Coffin/Manson	Publicaram, de forma independente, a lei de fadiga de baixo-ciclo baseada na deformação específica (lei de Coffin-Manson).
1961	Paris	Publicou a lei da mecânica da fratura de Paris com o crescimento de trincas na fadiga.
1973	Hashin e Rotem/ Sims e Brogdon (1977)	Previram a fadiga de um compósito submetido à uma condição uniaxial de carregamento em diferentes direções.
1990	Ellyin e El Kadi	Demonstraram que a origem da densidade energética pode ser utilizada como um critério de fadiga.
1994	Ellyin e Fawaz	Modelo capaz de prever a vida de fadiga dos materiais estabelecendo-se em diferentes direções.
1999	Philippidis e Vassilopoulos	Mostrou que o modelo de Ellyin e Fawaz é muito sensível à linha de referência e os previsíveis deste modelo não são adequados para os cilindros.
1999	Plumtree e Cheng	Desenvolveram um novo modelo de fadiga para compósitos que seja independente de nível de stress.
2001	Plumtree e Petermann	*Ambos os modelos de Plumtree não foram capazes de prever a vida em fadiga dos carregamentos de compósitos unidirecionais na direção da fibra.
2004	Kawai	Modelo de previsão da vida em fadiga sob uma camada ortrópica em níveis positivos e negativos de stress e de direções arbitrárias.
2006	M.M. Shokrieh e F. Taheri-Behrooz	Este critério da falha em fadiga proporciona a capacidade de previsão de vida em fadiga para uma camada ortotrópica sob tensão-tensão e compressão-compressão de carregamento de fadiga com ângulos arbitrários das fibras.

2.2 Falha por fadiga

Como já descrito acima, falhas por fadiga ocorrem devido às tensões alternadas, essas tensões, segundo Shigley (2005) fazem surgir microtrincas que não são, em grande parte dos casos, visíveis a olho nu. Após esta etapa, é iniciado o avanço da trinca e então ocorre a passagem de micro para macrotrincas, ocorrendo assim, a fratura do material. Portanto, podemos exemplificar a falha em três etapas:

- Início da trinca;
- Avanço da trinca;
- Fratura frágil.

Já Dieter (1981) divide avanço da trinca em duas etapas respectivas, onde ele caracteriza o crescimento da trinca em banda de deslizamento como sendo “o aprofundamento inicial nos planos de alta tensão cisalhante” e o crescimento da trinca nos planos de alta tensão de tração como “o crescimento de uma trinca bem definida em direção normal à tensão de tração máxima”. Podendo-se então, explicar sua maneira de descrever a falha em quatro etapas:

- Início da trinca;
- Crescimento da trinca em banda de deslizamento,
- Crescimento de trinca nos planos de alta tensão de tração;
- Ruptura final estática.

3 INTRODUÇÃO TEÓRICA

Para um melhor entendimento do trabalho, será realizada uma introdução teórica sobre os eixos usados em veículos comerciais, também será explicado, porém mais detalhadamente, os eixos dianteiros e seus principais componentes. Também será neste capítulo que será mostrado o cubo unitizado e suas características.

3.1 Eixos

Shigley (2005, p. 864) define o eixo como “um membro rotativo, geralmente de secção circular, utilizado para transmitir potência ou movimento”, para ocorrerem às transmissões de potência é inserido ao eixo equipamentos mecânicos, como engrenagens, polias, ventiladores, entre outros. Porém, eixos dianteiros de veículos comerciais estão inseridos em uma família de eixos chamada “eixos fixos”, o mesmo autor define estes modelos como “um membro não rotativo que não transmite torque e que é usado para suportar rodas girantes”, analisando esta definição, pode-se ver que ela se enquadra ao tema estudado neste trabalho, os cubos são a sustentação das rodas no eixo, permitindo que elas girem livremente, enquanto que o eixo não transmite torque algum para as rodas. Porém estes estão apoiados em mangas de eixo que são ligadas ao sistema de direção do veículo, este sistema faz com que as mangas girem para que ele possa realizar curvas, logo, definir como um conjunto de peças e não apenas um membro, pode ser mais adequado ao tema.

Além do eixo citado acima, usualmente chamado de eixo direcional (Figura 4), os veículos comerciais também possuem outros modelos de eixo, os mais conhecidos são os motrizes e auxiliares. Eixos motrizes são aqueles que transmitem o torque do motor para as rodas do veículo, portanto são esses que dão tração ao mesmo, eles possuem um conjunto de engrenagens no seu interior chamado diferencial, este permite que as rodas girem com velocidades angulares diferentes uma da outra, já o auxiliar tem a finalidade de ser mais um ponto de apoio para o caminhão, este sim pode ser definido como um “eixo fixo” já que ele apenas suporta as rodas, eles são usados para poder aumentar o PBT (peso bruto total) dos veículos e são constituídos apenas de uma viga de secção circular ou retangular, cubos de roda e seus respectivos freios. Na figura 4 podemos ver um eixo direcional, que fora citado neste tópico:



Figura 4- Eixo direcional com freio a disco.

FONTE: Dana – *Comercial vehicles*, 2018.

3.2 Eixos direcionais

Eixo direcional, como já foi dito, permite que os veículos manobrem, mas para que isso ocorra, o eixo deve possuir um conjunto de peças que façam interface com seu sistema de direção, essas peças serão analisadas no decorrer deste capítulo.

Grande parte das indústrias recebe os eixos direcionais como “conjuntos eixo direcional”, isso porque geralmente os componentes do eixo são produzidos por empresas diferentes, como é mostrado na Figura 5.

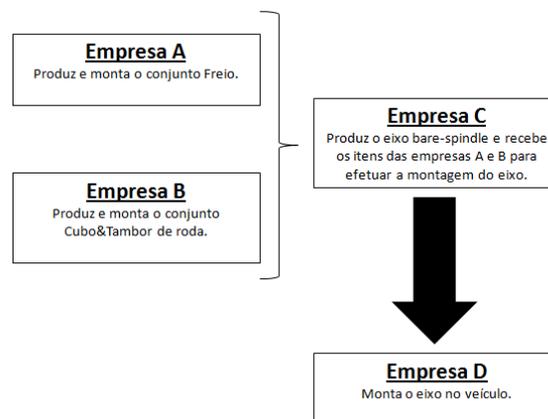


Figura 5- Fluxo de produção de um eixo direcional.

FONTE: Próprio autor.

As empresas fornecem seus componentes para uma última montar no *bare spindle* e assim fornecer para a montadora do veículo, portanto, pode-se dividir o eixo dianteiro em:

- Conjunto *bare spindle*;
 - Viga;
 - Mangas de eixo;
 - Pino mestre;
 - Braço de direção;
 - Braço de ligação – braço ackerman;
 - Barra de ligação – Tie Rod.
- Demais componentes;
 - Cubos de roda (convencional e unitizado);
 - Rolamentos;
 - Retentor;
 - Tambor de Freio;
 - Conjunto Freio.

Para a montagem destes componentes são usadas quantidades significativas de elementos de fixação, anéis de regulagem de folga, entre outros, porém como esse não é o foco do trabalho, será dada uma maior atenção aos componentes “macros” do eixo.

3.2.1 Bare Spindle

Este é o nome dado quando o eixo está sem seu conjunto freio e cubo tambor de roda, a Figura 6 mostra como é este conjunto. Pode-se ver que ele já possui as peças referentes a direção do veículo, mas a geometria da direção só será feita após a montagem do conjunto cubo tambor.

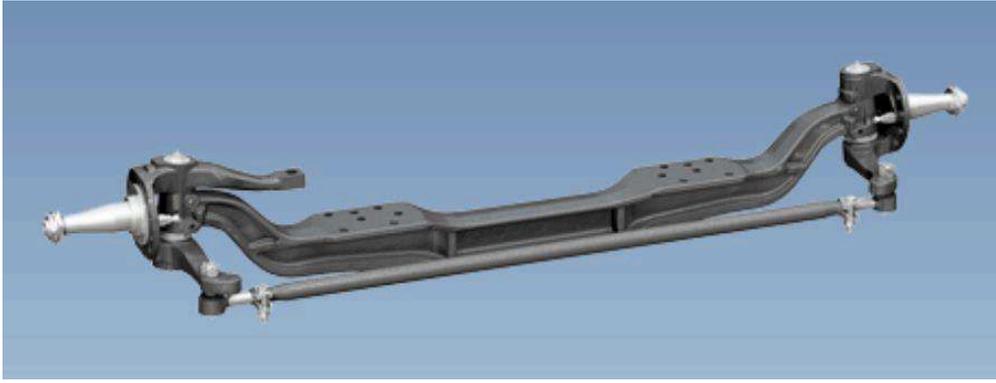


Figura 6- Bare spindle.

FONTE: Dana - Comercial vehicles, 2018.

3.2.1.1 Viga do eixo

Vigas são “elementos estruturais projetados para suportar carregamentos aplicados perpendicularmente ao seu eixo longitudinal” (Hibbeler, 2004), considerando que uma das medidas mais usadas no desenvolvimento de eixos é o GAW (gross axle weight), que é basicamente o quanto de carga perpendicular o eixo suporta, nota-se que a definição se ajusta perfeitamente a viga do eixo. O modelo usado em eixos dianteiros, em sua maioria, é a de perfil W (na Figura 7 podemos ver diversas vigas de eixo dianteiro) e seu processo de fabricação é, segundo uma grande empresa fornecedora de vigas de eixos dianteiros, como sendo por “martelo de contra golpe LASCO (400kJ) (Rába Automotive Holding Plc., 2007, tradução nossa) que pode ser visto na Figura 8.



Figura 7- Vigas de eixos dianteiros.

FONTE: Bharat Forge – Automotive Business, 2018

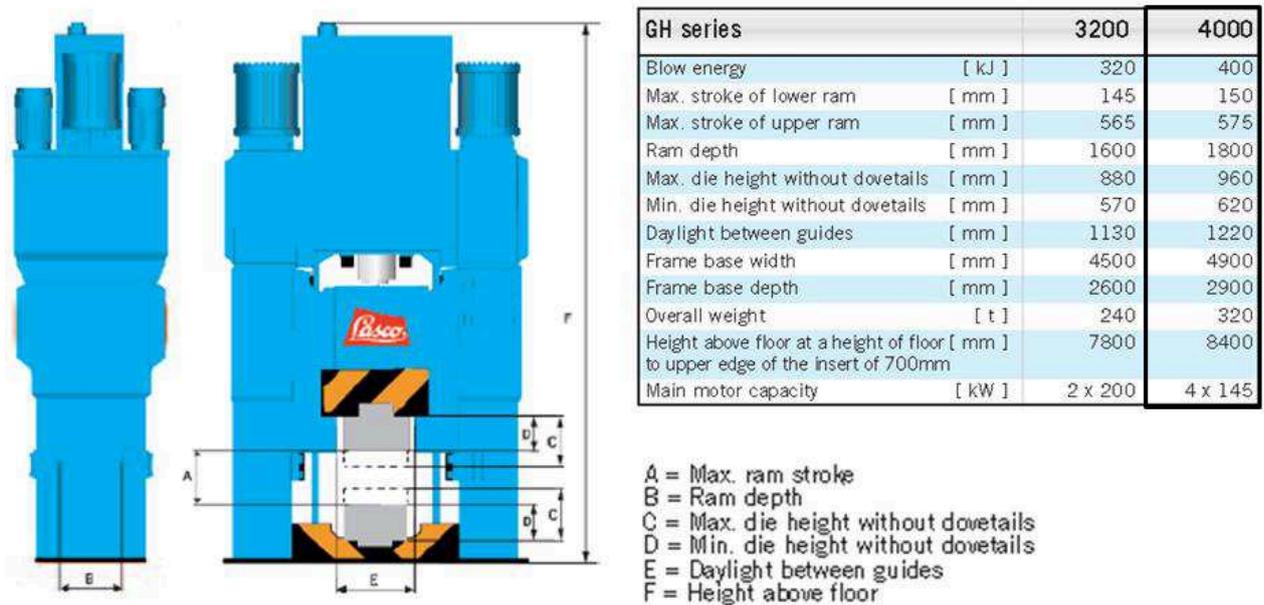


Figura 8- Martelo de contra-golpe LASCO.

FONTE: LASCO – *Machine for solid metal forming*, 2012.

3.2.1.2 Mangas de eixo.

São peças de aço forjado que fazem a interface da viga do eixo com o conjunto cubo tambor, nela também é montado o freio de roda, o braço de direção (somente em uma das mangas) e os braços de ligação. Na sua base fica a furação do spider do freio (que será mais bem explicado no tópico sobre os freios), o local onde são colocados os rolamentos do cubo são as pontas da manga de eixo, que são chamadas coloquialmente de “espigão”. O processo de fabricação é descrito, conforme a mesma empresa citada acima, como sendo “forjadas em prensas de 63.000 kN” (Rába Automotive Holding Plc., 2007, tradução nossa) e pode ser visto na Figura 9.



Figura 9- Manga de eixo sendo forjada e usinada.

FONTE: RABA – *Technologies forge*, 2007.

3.2.1.3 Pino Mestre.

O pino mestre (Figura 10) é um eixo de aço usinado que faz a junção entre a viga e a manga, quando montado é necessário analisar a folga vertical, segundo o manual de manutenção para eixos dianteiros da Meritor (2011, p. 13) “o resultado da leitura do relógio comparador deve estar entre 0,02 – 0,64 mm para eixos novos ou reconstruídos e 0,025 – 1,650 mm para eixos em uso” (Figura 11), essa regulagem é feita através de calços que variam de espessura.

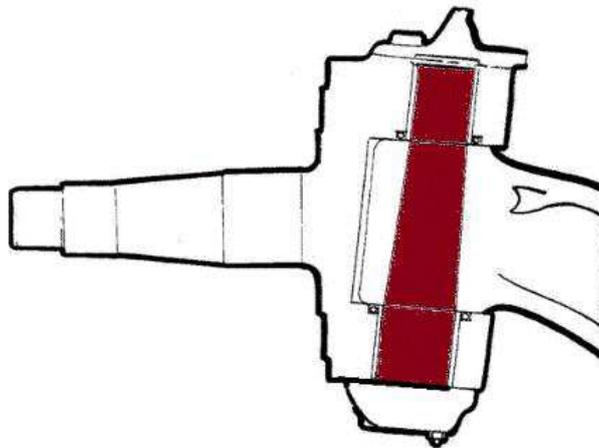


Figura 10- King pin indicado em vermelho.

FONTE: Carla Trucks - Geometria do eixo dianteiro, 2010.

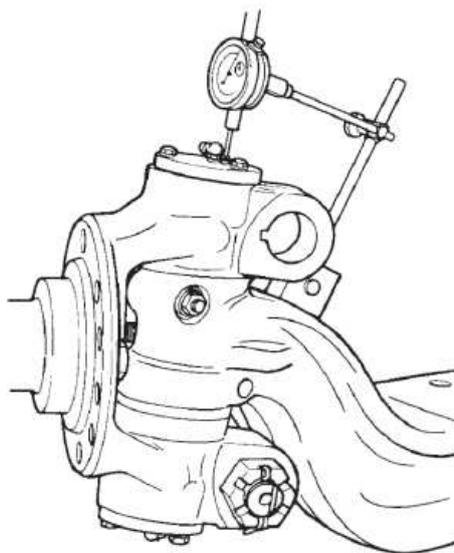


Figura 11- Relógio comparador.

FONTE: Meritor-Manual de Manutenção – Eixo Dianteiro (não trativo), 2011

3.2.1.4 Peças de direção.

Estas peças “transmitem o movimento de giro do volante, executado pelo motorista ou por algum outro agente mecânico, em movimento angular das rodas direcionais do veículo” (Berto, 2015). Este movimento chega ao eixo através do braço de direção que está ligado a uma das mangas de eixo. Quando esta manga se movimenta, ela transmite o movimento para o braço de ligação (Ackerman), um eixo dianteiro possui dois desses braços, um em cada manga, eles são ligados por uma barra de ligação, também chamada de Tie Rod, esta barra é a peça responsável por fazer as duas rodas girarem juntas quando se é necessário fazer uma curva. Todas as peças citadas acima podem ser vista na Figura 12 abaixo.

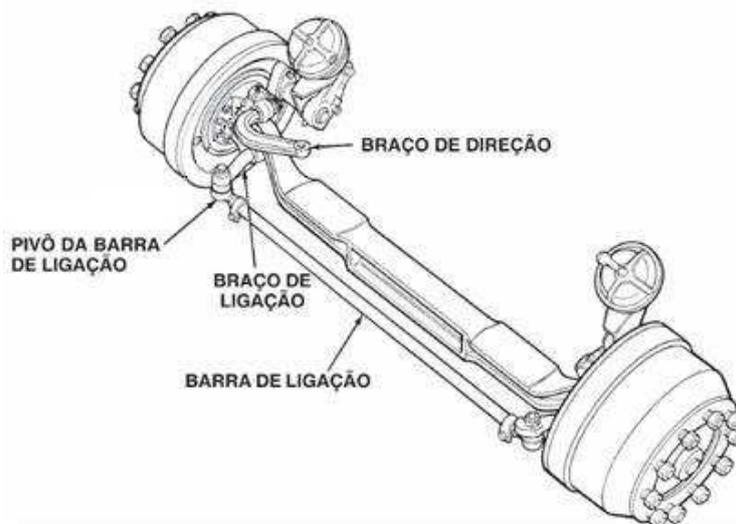


Figura 12- Peças de direção.

FONTE: Meritor-Manual de Manutenção – Eixo Dianteiro (não trativo), 2011

3.2.2 Peças anexadas ao eixo

Neste tópico serão apresentadas as peças que completam o eixo dianteiro, essas peças, como mostradas na Figura 5 são, em sua grande maioria, feitas por empresas especializadas que fornecem as mesmas para a empresa que produz *bare spindle*.

3.2.2.1 Cubo de roda convencional

Esta é a peça que motivou todo este trabalho, ela faz a interface entre a roda e o eixo e é montada nas extremidades das mangas, é constituída de uma peça de ferro fundido onde são alocados os rolamentos cônicos e um retentor. No capítulo 4 o seu processo de montagem será mais detalhado

3.2.2.2 Rolamentos

“Rolamentos são componentes que permitem a movimentação de máquinas a velocidades extremamente altas e transportar cargas notáveis com facilidade, eficiência e precisão” (ABMA, s.d., tradução nossa). Portanto, a partir desta definição, é fácil concluir que eles são extremamente utilizados em todos os setores industriais. Eles podem ser classificados como:

- Axiais: suportam somente cargas axiais;
- Radiais: suportam cargas radiais e pequenas cargas axiais;
- Combinadas: suportam ambos os tipos de cargas, radial e axial.

Pode-se ver essas cargas ilustradas na Figura 13 mostrada abaixo:

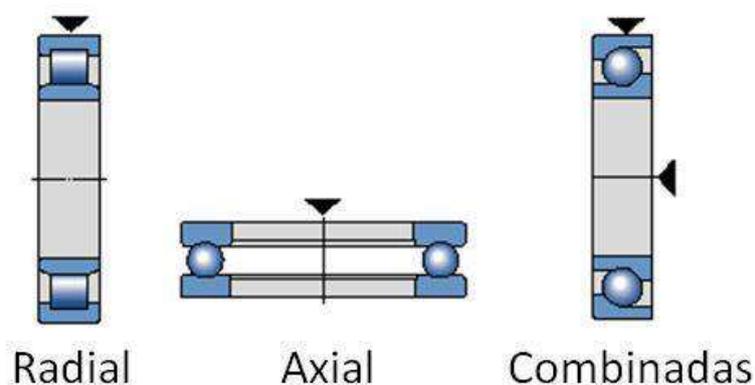


Figura 13- Cargas aplicadas aos rolamentos.

FONTE: SKF. Catálogo Geral SKF, 2010

Devido a essas três classificações existentes e seus possíveis tamanhos existem uma grande variedade de modelos de rolamentos existentes no mercado. Eles variam de acordo

com a carga e o trabalho que eles irão realizar, modelos de rolamentos com esferas realizam certos trabalhos que rolamentos com rolos cônicos não conseguiriam com a mesma efetividade. Para visualizar melhor este fato, basta pensar em um eixo sob rotação, ele pode variar no diâmetro, velocidade de rotação, temperatura de trabalho entre outras variáveis, todas estas características influenciam na escolha final do modelo de rolamentos que será usado.

No caso do eixo estudado neste trabalho, os rolamentos que são usados são os cônicos, eles são “especialmente adequados para suportar cargas combinadas” (Catálogo Geral SKF, 2009, p.603), se adequando perfeitamente a rotina de trabalho do mesmo. O motivo de eles suportarem estas cargas é devido ao ângulo de contato α (Figura 14 e 15), que existe entre o rolo e sua linha de centro.

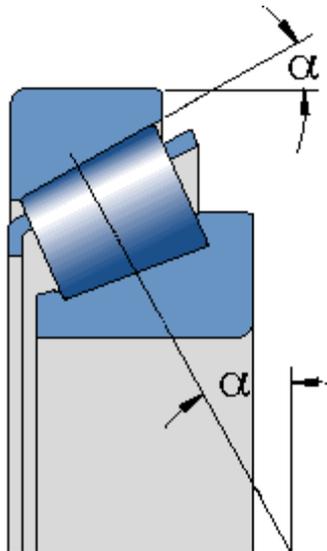


Figura 14- Ângulo de contato α .

FONTE: SKF. Catálogo Geral SKF, 2010

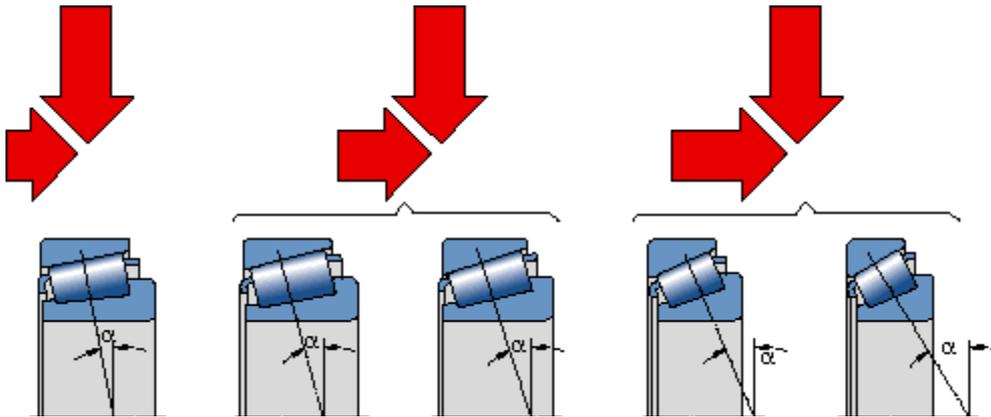


Figura 15- Relação do ângulo de contato com as cargas axiais e radiais.

FONTE: SKF. Catálogo Geral SKF, 2010

Esses rolamentos podem ser de pistas separáveis ou não, no caso dos modelos usados para os cubos de roda convencionais, os rolamentos são de pistas separáveis, as Figuras 16 e 17 são exemplos de rolamentos usados nesses cubos.

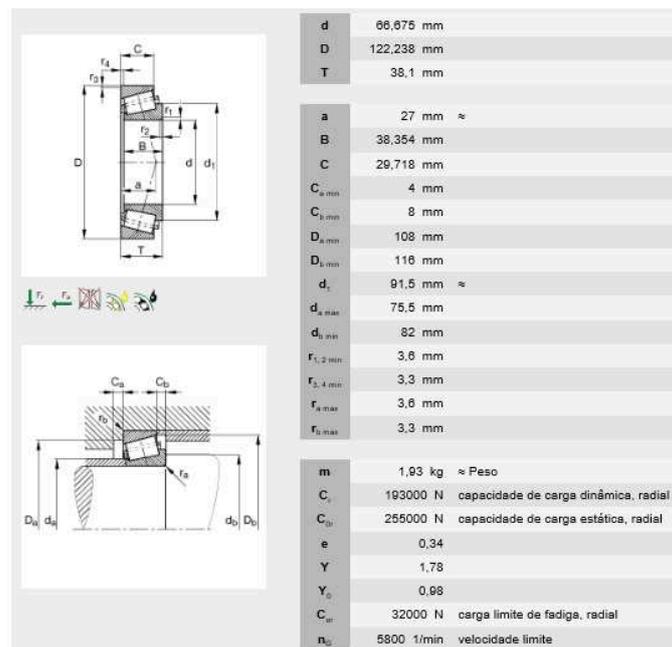


Figura 16- Rolamento KHM212049 - HM212011 (interno).

FONTE: SCHAEFFLER. Medidas - Rolamentos, sd.

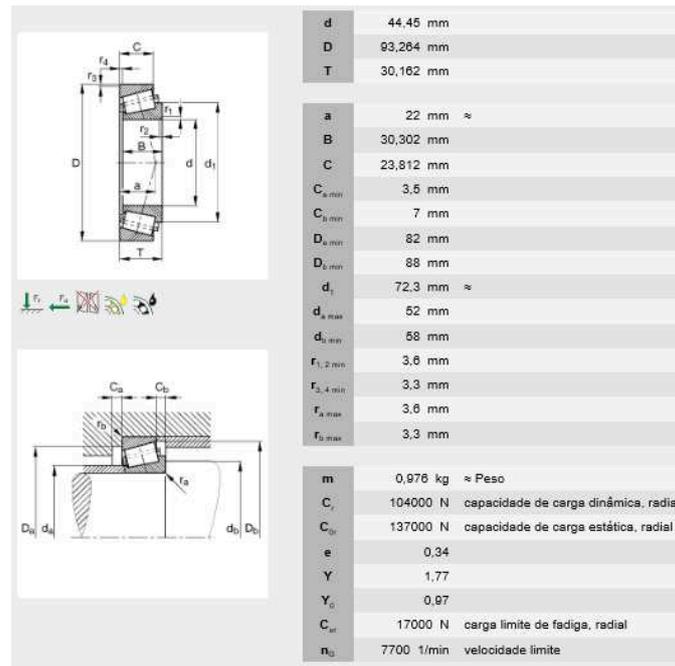


Figura 17- Rolamento KHM212049 - HM212011 (interno).

FONTE: SCHAEFFLER. Medidas - Rolamentos, sd.

Vários fatores influenciam na vida dos rolamentos, e conseqüentemente na vida do cubo de roda.

A redução do tempo de serviço pode ser causada por causa específica ou por uma combinação de vários outros fatores:

- Falha na montagem;
- Ajustagem inadequada;
- Lubrificação insuficiente;
- Contaminação;
- Manuseio impróprio ou negligente;
- Alojamento inadequado;
- Desalinhamento estático elevado ou deflexão do eixo e do alojamento;
- Práticas de manutenções insatisfatórias ou inconsistentes. (Análise de Falhas em Rolamentos Tinkem com Guia de Referência para Lubrificação, 2011, p.22)

Os fatores que influenciam diretamente na vida dos rolamentos de cubo de roda serão melhores explicados no próximo capítulo.

3.2.2.3 Retentores

Retentor é um elemento de vedação também conhecido como vedador de lábio, ele tem como principal função “impedir a passagem de maneira estática ou dinâmica de líquidos, gases e sólidos particulados (pó) de um meio para outro” (BARBOSA, sd), com relação aos cubos, os retentores tem como principal função não deixar a graxa interna dos rolamentos sair e também não deixar nenhum contaminante entrar no cubo. É formado por uma membrana elastomérica e uma parte estrutural mecânica (Figura 18) que permite sua fixação na posição de trabalho.

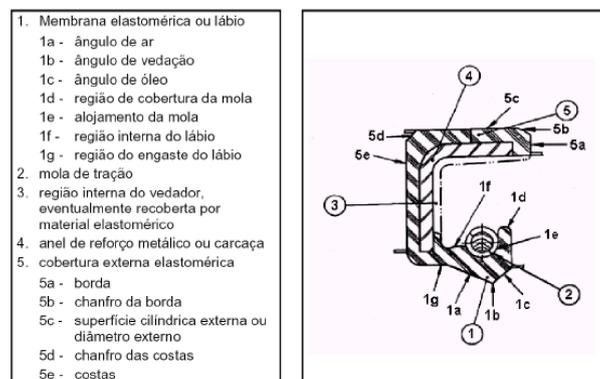


Figura 18- Retentor de lábios.

FONTE: Barbosa, João Paulo – Elementos de vedação, sd.

A montagem incorreta dos retentores é um dos principais causadores de falhas em cubos de roda.

3.2.2.4 Cubos

“Muitas aplicações de peças de ferro fundido envolvem solicitações de impacto” (GUESSER, 2009), como os cubos estão montados nas rodas, onde se pode dizer que os impactos são inevitáveis devido a buracos, quebra-molas entre outros obstáculos, o ferro fundido nodular é altamente usado como matéria prima para sua produção, onde o qual faz a interface entre a roda e a manga de eixo, possui a furação dos parafusos de roda, os guias para

o tambor de freio e os locais para a introdução via interferência das pistas dos rolamentos de roda. Na Figura 19 podemos ver um exemplo de ferro fundido nodular já com sua flange e na Figura 20 o cubo já com o tambor de freio montado na flange.



Figura 19- Cubo de roda com flange.

FONTE: Durametal: Tambores de freio, disco de freio e cubos de roda, 2016.



Figura 20- Pistas de acomodação dos rolamentos.

FONTE: Frum – Cubos de roda, 2018.

3.2.2.5 Cubos de roda unitizados



Figura 21 - Família SKF de rolamentos unitizados.

FONTE: SKF-*Hub units equipped with tapered roller bearings*, 2008

Este é o sistema de cubo de roda formado pelo cubo unitizado, na Figura 21 pode-se ver alguns exemplos desses cubos. A peça que faz interface com a roda é separada do cubo, portanto, fazendo a divisão das peças como foi feita no cubo convencional, temos:

- Cubo unitizado;
- Flange de roda.

Como no cubo convencional, estas duas peças somadas aos seus elementos de fixação formam o conjunto cubo de roda de um veículo comercial, porém ganhando em tempo de montagem, vida do cubo e segurança.

3.2.2.6 Cubo unitizado

“Cubos unitizados de caminhão são rolamentos de roda para veículos comerciais e máquinas que tem incorporado todos os equipamentos necessários para suas funções específicas” (SKF, 2008, tradução nossa). Como citado pela SKF, este sistema combina os elementos de um cubo convencional (rolamentos, lubrificante, retentor e cubo) em uma única peça blindada (como pode ser visualizado na Figura 22), por isso o nome unitizado (hub unit em inglês). Todas as peças são montadas em suas condições ótimas então uma vez montado

ele é selado e não pode ser mais desmontado, em caso de algo acontecer, como por exemplo, um dano no retentor, o cubo unitizado deve ser trocado.

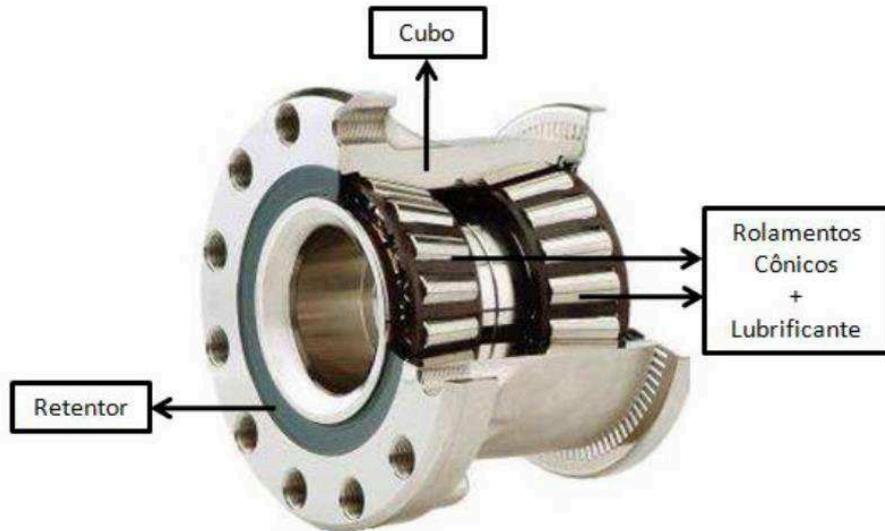


Figura 22 - Cubo unitizado explodido.

FONTE: SKF-*Hub units equipped with tapered roller bearings*, 2008

3.2.2.7 Flange de roda

É peça que faz a interface da roda com o cubo unitizado, nela será montado o tambor de freio e então a roda. Como pode ser observada na Figura 23, ela possui duas sequências de furações, interna e externa. A interna é o local onde são colocados os parafusos para prender o cubo unitizado e a externa são colocados os parafusos de roda.



Figura 23 - Flange do cubo unitizado.

FONTE: Trucks.nl – MAN TGX 18.440, 2018.

3.2.2.8 Conjunto freio e tambor

Caminhões podem ter freio a disco ou tambor, neste projeto o veículo possuía freio a tambor. Este modelo de freio possui sapatas que são impulsionadas contra uma superfície que gira junto com a roda, esta superfície é chamada tambor de freio. O freio é fixado na manga de eixo, essa região do freio é chamada de “spider” enquanto que o tambor é fixado no cubo, ou na flange (cubo unitizado). Na Figura 24 pode-se ver um freio pneumático, seu spider, câmara de freio e lonas.



Figura 24 – Freio para veículos comerciais.

FONTE: Master – Freios pneumáticos, 2016.

4 COMPARAÇÃO: CUBOS CONVENCIONAIS x UNITIZADOS

Este capítulo será realizado a comparação entre os cubos de roda convencionais e unitizados, abordando os processos de montagem de ambos os casos e com isso, mostrando as principais causas de falhas nos cubos convencionais e como o unitizado consegue eliminar os mesmos.

4.1 Processo de montagem dos cubos de roda

É de conhecimento que cada sistema possui uma maneira de ser montado, todavia, já que o cubo convencional é composto por várias peças separadas enquanto o unitizado possui apenas uma peça inteiriça e seu flange, é fácil concluir que a montagem do sistema unitizado será mais simples que o convencional. Abaixo serão explicados ambos os casos, e logo depois será feito o comparativo mostrando as principais diferenças.

4.1.1 Processo de montagem: cubo convencional

Para apresentar a montagem do cubo convencional, foi usado como referência o manual de manutenção de eixos dianteiros da Meritor, no manual existem dois sistemas de fixação do cubo, com porca dupla ou porca simples (Figura 25), neste trabalho foi analisado o sistema com porca simples.

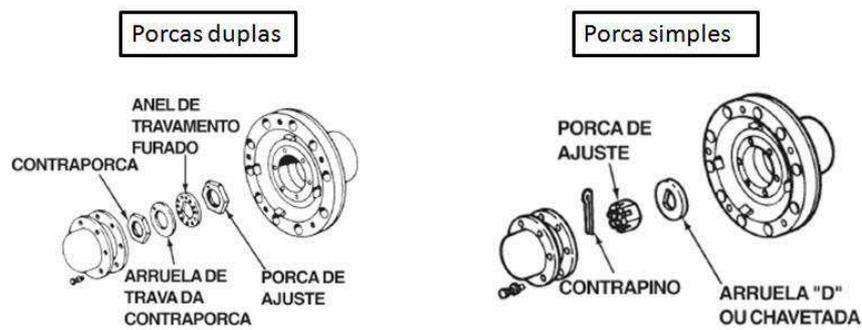


Figura 25 - Modos de fixação para cubos convencionais.

FONTE: Meritor-Manual de Manutenção – Eixo Dianteiro (não trativo), 2011

Primeiramente, para fazer uma montagem correta, é necessário avaliar se todas as peças estão limpas, sem contaminação de lubrificantes antigos ou detritos, contaminantes afetam na vida do rolamento, principalmente os detritos que podem entrar por entre os rolos e causar maiores danos. Após a verificação deve-se aplicar o lubrificante especificado pela empresa do veículo nos rolamentos (principalmente nos roletes) e no espaço entre as capas do rolamento no cubo, como pode ser visto na Figura 26:

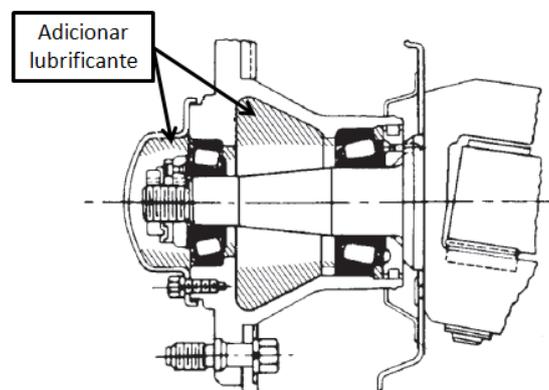


Figura 26 - Lubrificação para cubos convencionais.

FONTE: Meritor-Manual de Manutenção – Eixo Dianteiro (não trativo), 2011

Com isso é dado o início na montagem, instalando os rolamentos cônicos em suas respectivas capas e adicionando o retentor. Assim já podemos colocar o cubo com os rolamentos na manga de eixo e adicionar os elementos de fixação, a arruela “D” e a porca castelo (Figura 25). Após essas montagens é adicionado o tambor de freio e a roda já com os pneus, então, com a ajuda de um torquímetro, aplica-se um torque de 136 N.m girando o pneu livremente (para ocorrer o perfeito assentamento dos rolamentos), após este primeiro aperto solta-se a porca castelo completamente e faz novamente igual a primeira etapa de torque, porém usando 27 N.m. Para

finalizar o processo de montagem, volta-se a porca castelo em 1/8 de volta para alinhar o rasgo com a posição da cupilha (pode ser um pouco mais ou menos para encontra a posição correta da cupilha), após isso é medido a folga axial com a ajuda de um relógio comparador, este valor deve estar entre 0,025 – 0,127 mm, como na Figura 27.

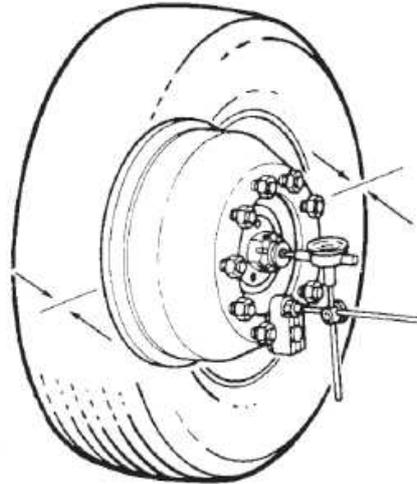


Figura 27 - Montagem do relógio comparador.

FONTE: Meritor-Manual de Manutenção – Eixo Dianteiro (não trativo), 2011

4.1.2 Processo de montagem: cubo unitizado.

Para apresentar a montagem do cubo unitizado, foi acompanhada a montagem do mesmo em uma oficina especializada em caminhões. Como no cubo convencional, o processo de montagem se inicia com a análise das peças para verificar se todas estão limpas e livres de detritos. Após isso é parafusado o guia na ponta da manga de eixo, o cubo unitizado pode ser montado sem este guia, porém, como suas dimensões são justas em relação a manga de eixo, o mecânico encontrar dificuldades para efetuar o trabalho.

Após a adição do pino guia é adicionado o cubo unitizado na manga do eixo. Após essa montagem o pino guia é retirado e colocado em seu lugar uma arruela de encosto (que irá garantir um aperto homogêneo no cubo) e a porca de pressão, onde é aplicado um torque de 800 N.m. Para finalizar é adicionado a flange de roda e aplicado torques de 270 N.m em seus parafusos.

4.2 Comparação entre ambos os sistemas

Comprando as montagens de ambos os cubos de roda já se pode concluir que ele é mais simples que o convencional. Como já foi dito no início do capítulo, o fato de ele ser uma única peça já diminui, e muito, a complexidade de montagem.

Além de ser mais complexo, o sistema convencional possui etapas da montagem que estão diretamente ligadas a vida útil do próprio sistema e a segurança do motorista do veículo. As etapas com relação a montagem do cubo convencional, principalmente com relação ao aperto e desaperto da porca castelo estão relacionadas ao processo de folga para não ocorrer pré carga nos rolamentos, se não efetuadas corretamente, podem causar sérios problemas aos sistema, sendo que, em casos extremos, isso pode fazer com que a roda solte, levando perigo ao motorista e as pessoas que estão em volta. Os defeitos relacionados a essas etapas podem ocorrer porque caso o mecânico que tenha efetuado a manutenção do cubo não lubrifique corretamente os rolamentos, não acople corretamente as pistas dos mesmos ou, como ocorre na maioria dos casos, aplique uma pré carga elevada nos rolamentos, fazendo com que as chances de que ocorram defeitos antes da vida normal cresçam. Já no sistema unitizado, não é necessário fazer a lubrificação ou deixar uma folga mínima, já que, como já foi explicado na introdução teórica, o sistema é todo blindado com a lubrificação e pré carga correta, portanto a única variável que pode levar a um problema é não aplicar os torques corretos ou esquecer-se de montar alguma peça, como por exemplo, a arruela de encosto.

A Figura 28 é um gráfico que é disponibilizado pela empresa SKF (empresa do setor de rolamentos), nele pode-se ver, quais são as principais ocorrências de defeitos em rolamentos de cubo de roda convencionais.

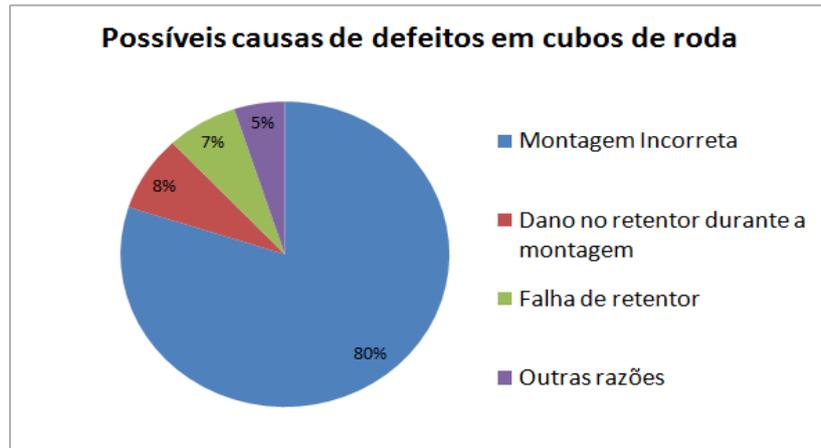


Figura 28 – Gráfico das possíveis falhas do cubo unitizado.

FONTE: SKF-Hub units equipped with tapered roller bearings, 2008

No gráfico, as montagens incorretas, que significam 80% dos casos de defeitos, englobam a pré carga elevada, folga elevada e montagem incorreta do sistema, pode-se notar que, como já foi dito anteriormente, estas possíveis causas estão diretamente ligadas as etapas de aperto e desaperto da porca castelo no processo de montagem do cubo convencional.

Portanto, a melhor maneira de eliminar estes possíveis problemas é fazer com que não seja mais necessário montar o cubo, que é exatamente o que o cubo unitizado faz.

5 METODOLOGIA

O estudo desenvolvido neste trabalho foi, a partir de um eixo que usa cubos de roda convencional, desenvolver um eixo que possa usar cubos unitizados. Para isso, se fez um comparativo entre dois eixos já existentes no mercado brasileiro de veículos comerciais, isso porque esses rolamentos unitizados não são disponibilizados em catálogos de rolamentos comuns. A premissa do projeto foi realizar a atualização sem mudar nenhuma característica do veículo, principalmente em relação a sua geometria de direção e posicionamento dos freios, qualquer mudança nesses dois fatores mencionados pode causar problemas de interferências ou folgas críticas em relação a outros componentes e também mudanças indevidas na geometria de direção causam problemas na dirigibilidade e desgaste excessivo de pneus. Como a manga de eixo é desmontável e, também, a única parte que tem interface com o cubo é a ponta da manga, concluiu-se que é necessário modificar apenas o diâmetro do

mesmo, já que os cubos unitizados possuem diâmetro contínuo enquanto os convencionais a ponta é escalonada devido à diferença de diâmetro entre os dois rolamentos. Não foi necessário mudar nenhum outro componente do eixo, portanto, foram mantidas as características mencionadas acima.

Assim, com a mudança da ponta de eixo, foi calculado o fsf da mesma a partir dos cálculos da reprodução do teste, como já foi mencionado no objetivo, para assim, poder definir se a nova ponta tem ou não vida infinita. Porém para o cálculo ser efetuado foi necessário encontrar todas as variáveis para, só então, finalizá-lo.

Para o trabalho o material usado na manga foi o aço SAE 4135H, suas propriedades mecânicas são:

- Densidade: $8,03 \text{ E}3 \text{ kg/m}^3$;
- Poisson: 0,27;
- Módulo de Elasticidade: 190 GPa;
- Limite de Resistência a Tração: 1158 MPa;
- Dureza: 335 HB

5.1 Testes

São dois testes tentando simular as cargas de uma roda na ponta de eixo, onde em um é aplicado uma carga vertical flutuante e em outro é aplicado uma carga lateral flutuante., nas Figuras 29 e 30 foram elaborados diagramas de força com a ponta simulada para poder mostrar basicamente como são aplicados os carregamentos na manga desenvolvida para os cubos convencionais

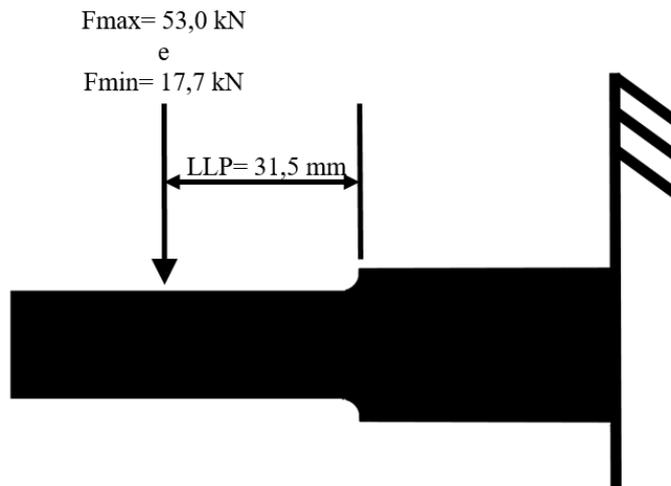


Figura 29 - Ponto de aplicação da carga vertical.

FONTE: Próprio autor.

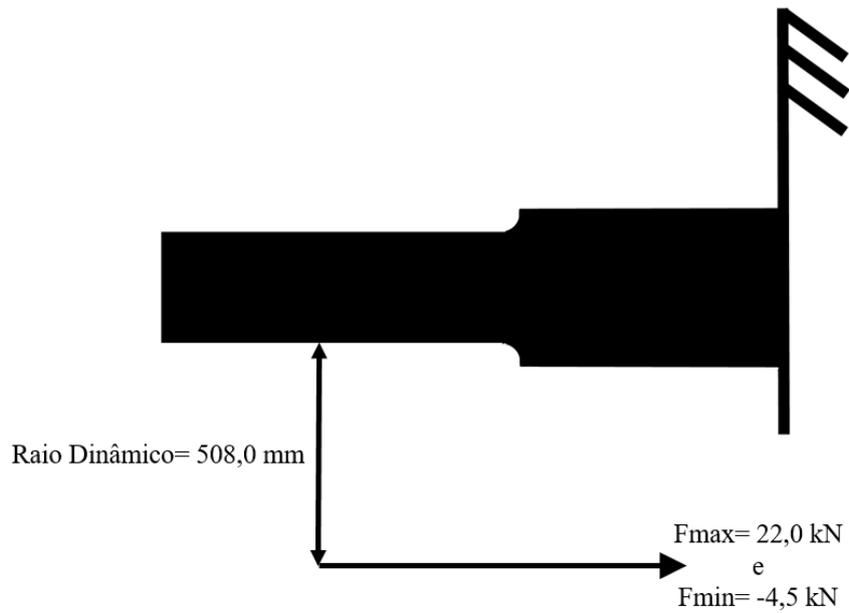


Figura 30 - Ponto de aplicação da carga lateral.

FONTE: Próprio autor.

5.2 Fator de sensibilidade ao entalhe (q)

O fator de sensibilidade ao entalhe deve ser encontrado devido ao raio que existe na base da ponta da manga de eixo, abaixo, segue o diagrama de sensibilidade ao entalhe para aços e ligas de alumínio para flexão e carregamentos axiais retirado do livro “Projeto de Engenharia Mecânica” (Shigley, 2005). Nota-se que o valor do raio do entalhe vai somente até 4 mm (Figura 31), portanto para valores maiores, podemos usar os resultados referentes ao mesmo.

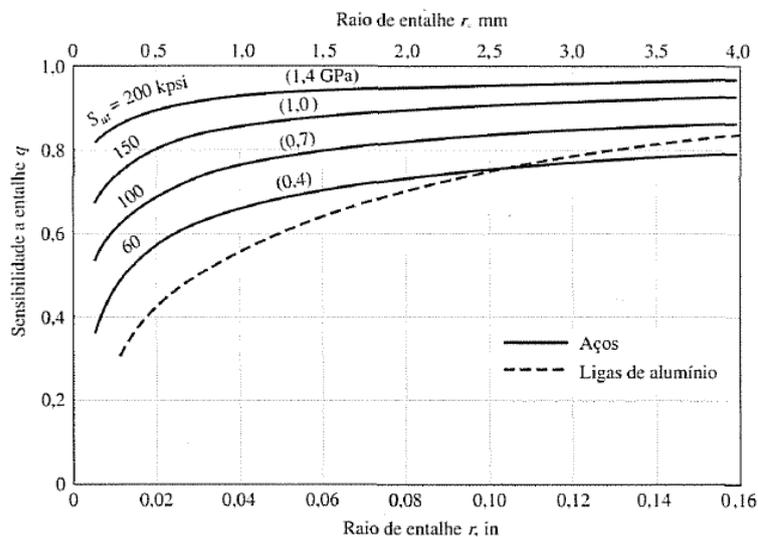


Figura 31 - Diagrama do fator de sensibilidade.

FONTE: Shigley, 2005

Ele deve ser encontrado para ser possível calcular a concentração de tensão em fadiga, como será mostrado nos próximos tópicos.

Para este trabalho foi usado um fator de sensibilidade $q=0,9$.

5.3 Fator de concentração de tensão (K_t)

Para encontrar este fator, foi necessário consultar outro gráfico abaixo (Figura 32), nesta é necessário saber o diâmetro da base e da ponta da manga do eixo, assim, fazendo as divisões mostradas na tabela, é possível encontrar o valor de K_t .

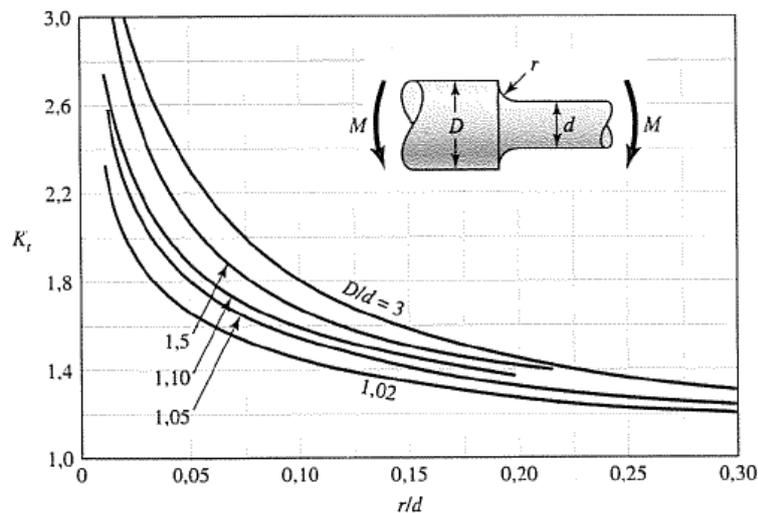


Figura 32 - Diagrama do fator de concentração de tensão.

FONTE: Shigley, 2005

Este fator, junto com o q são as variáveis necessárias para o cálculo do fator de concentração em fadiga. Com o valor de r/d deste trabalho foi possível encontrar um fator de concentração de tensão de 1,55.

5.4 Fator de concentração de tensão em fadiga (K_f)

Este é um fator de concentração de tensão menor que o encontrado no tópico acima, isso “devido a uma reduzida sensibilidade a entalhes” (Shigley, 2005) e ele é encontrado pela equação:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (1)$$

Usando os valores encontrados acima, foi possível encontrar um fator de concentração de tensão em fadiga de 1,49.

5.5 Tensão média e tensão alternada (σ_m e σ_a)

Estas tensões são as que caracterizam as tensões flutuantes. A partir da F_{max} e da F_{min} aplicadas na determinada peça, encontra-se as tensões máxima e mínima, e assim as duas tensões que dão nome ao tópico. Portanto, com a F_{max} e F_{min} calcula-se a F_m (força média) e a F_a (força alternada), como mostrado nas equações (2) e (3).

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad (2)$$

$$F_a = \left| \frac{F_{max} - F_{min}}{2} \right| \quad (3)$$

Com estas forças pode-se encontrar o momento médio (M_m) e alternado (M_a) aplicado no teste, isso multiplicando F_m e F_a pelos seus respectivos braços de alavancas. Encontrado os momentos e como só ocorreu flexão no teste, pode-se calcular as tensões médias e alternadas, usando as equações (4) e (5).

$$\sigma_{m0} = \frac{32 \cdot M_m}{\pi \cdot d^3} \quad (4)$$

$$\sigma_{a0} = \frac{32 \cdot M_a}{\pi \cdot d^3} \quad (5)$$

Onde: d: diâmetro da ponta da manga de eixo.

Porém, a tensão alternada ainda deve ser corrigida pelo fator de concentração de tensão a fadiga, fator observado no tópico 1.4, portanto se deve multiplicar a tensão alternada por K_f e manter a mesma tensão média. Como visto nas equações (6) e (7).

$$\sigma_m = \sigma_{m0} \quad (6)$$

$$\sigma_a = \sigma_{a0} \cdot K_f \quad (7)$$

Esses resultados devem ser usados para calcular a fsf , porém ainda é necessário encontrar o limite de resistência da ponta da manga do eixo.

5.6 Limite de resistência (S'e)

Encontra-se o limite de resistência através do limite de resistência a tração, segundo Shigley (2005 apud Mischke, 1987, p.113-122) Mischke concluiu, devido a uma grande amostra de dados reais, que o limite de resistência é relacionado a resistência a tração, como mostrado abaixo:

Tabela 2 - Valores de S'e

FONTE: Shigley, 2005

Sut	S'e
≤ 212 kpsi (1460MPa)	0,504.Sut kpsi ou MPa
>212 kpsi	107 kpsi
>1460 Mpa	740 Mpa

O valor encontrado pela Tabela 2 ainda não é o valor final do limite de resistência, existem vários fatores modificadores do mesmo, para chegar ao resultado real do limite é necessário calcular cada um desses fatores, eles são seis no total e serão explicados no decorrer do próximo tópico. Após o cálculo de todos os fatores, multiplicam-se cada um ao limite de resistência encontrado anteriormente, só então é definido o limite real.

Como o limite de resistência a tração (S_{ut}) é 1158 MPa e é menor que 1460MPa, o valor encontrado para o limite de resistência foi 583,6 Mpa.

5.7 Fatores modificadores

Segundo Shigley (2005 apud Marin, Joseph, 1962, p.224) Marin foi um estudioso que analisou e quantificou os efeitos que podem fazer o limite de resistência variar devido à condição de tamanho, superfície, temperatura, carregamento e efeitos variados. Assim ele escreveu a equação:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e \quad (8)$$

Onde os fatores modificadores são:

5.7.1 Fator de superfície (k_a)

Este fator depende do limite de resistência a tração da determinada peça e varia de acordo com a qualidade do acabamento superficial da mesma. Ele segue a equação (9), esta que depende dos valores encontrados na Tabela 3.

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b \quad (9)$$

Tabela 3 - Parâmetros para fator de modificação superficial.

FONTE: Shigley, 2005

Acabamento Superficial	Fator "a" para Sut, Mpa	Expoente "b"
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Como a ponta da manga de eixo é retificada, para poder acomodar o cubo unitizado os valores de “a” e “b” para o cálculo do fator são 1,58 e -0,085 respectivamente, aplicando estes valores na formula citada acima será encontrado uma valor para o fator de superfície (ka) de 0,870.

5.7.2 Fator de tamanho (kb)

Este depende do diâmetro da peça que está sendo estudada no projeto, para peças que estão sofrendo flexão e torção, elas seguem os valores citados na Tabela 4.

Tabela 4 - Equações para calcular o fator de tamanho.

FONTE: Shigley, 2005

D	kb
$0,11 \leq d \leq 2 \text{ in}$	$(d/0,3)^{-0,107} = 0,879d^{-0,107}$
$2 < d < 10 \text{ in}$	$0,91d^{-0,157}$
$2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$	$(d/7,62)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107}$
$51 < d < 254 \text{ mm}$	$1,51d^{-0,157}$

Porém, quando a determinada peça está sofrendo apenas flexão pura, ou seja, quando ela não está rodando, é necessário calcular um diâmetro equivalente (d_e) e então calcular novamente o kb de acordo com a Tabela 4, este diâmetro equivalente para barras circulares não rotativas é calculada segundo a equação (10).

$$d_e = 0,370 \cdot d \quad (10)$$

Como neste trabalho ocorreu flexão pura no teste, foi necessário calcular o diâmetro equivalente, o valor encontrado foi de 25,9 mm. Com este resultado foi possível escolher a equação na tabela 4 e encontrar um valor de fator de tamanho (kb) de 0,875.

5.7.3 Fator de carregamento (kc)

Ele varia em carregamento de flexão, de torção e axial. Abaixo seguem os respectivos valores para cada carregamento:

Tabela 5 - Valores para o fator de carregamento.

FONTE: Shigley, 2005

Carregamento	kc
Flexão	1
Axial	0,85
Torção	0,59

Como no trabalho temos flexão, o valor do fator de carregamento (kc) é 1.

5.7.4 Fator de temperatura (kd)

Como a variação de temperatura pode, também, afetar diretamente na vida em fadiga da peça, abaixo seguem os valores determinados para os fatores:

5.7.5 Fator de confiabilidade (ke)

O fator de confiabilidade depende de estudos estatísticos onde se leva em conta o espalhamento dos dados. Para efetuar os cálculos foi usada a confiabilidade de 90%.

Tabela 6 - Valores para o fator de confiabilidade.

FONTE: Shigley, 2005

Confiabilidade, %	Fator de Confiabilidade k_e
50	1
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659
99,9999	0,62

Logo, o fator de confiabilidade (k_e) deste trabalho é 0,897.

5.7.6 Fator de efeitos diversos (k_f)

Este fator serve para mostrar que não são apenas estes que foram citados acima os fatores que podem aumentar ou diminuir um limite de resistência, como exemplo podemos citar uma peça que por algum motivo esteja sofrendo mais compressão que tração, isso irá fazer com que seja menos provável que ela sofra falhas por fadiga. Outros casos que podem afetar são:

- Corrosão;
- Chapeamento eletrolítico;
- Pulverização de metal.

No caso deste projeto, não foi abordado nenhuma fator de efeito diverso.

5.8 Fator de segurança de fadiga

Existem vários critérios para o cálculo do fator de segurança de fadiga, como pode ser visto na Figura 33, neste trabalho foi usado o critério de Goodman modificado por ser uma linha reta e mais fácil de ser calculado.

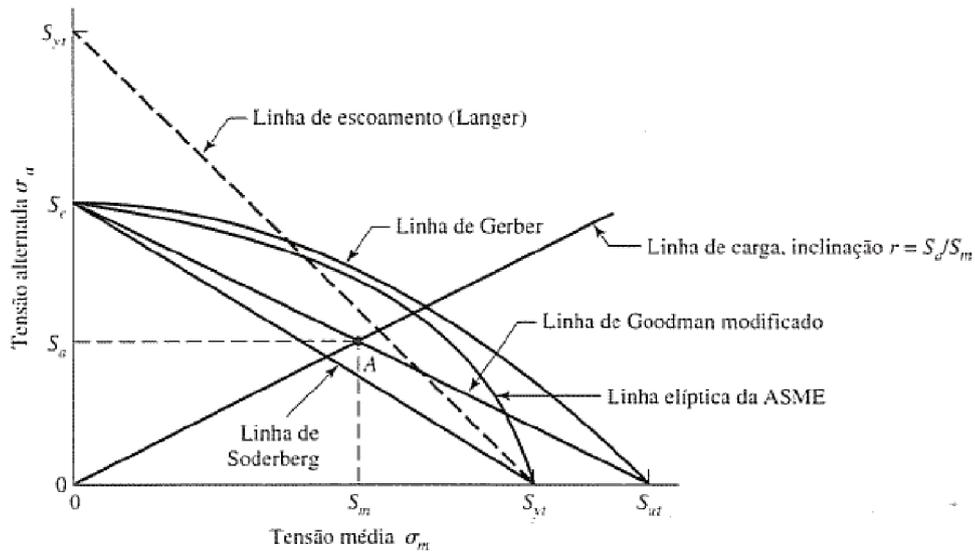


Figura 33 - Diagrama dos critérios para falha por fadiga.

FONTE: Shigley, 2005

Assim, a equação (11) é usada para calcular o fsf.

$$fsf = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (11)$$

Ao encontrar este resultado, para que seja vida infinita o valor do fsf deve ser maior que um, caso não seja, pode-se concluir que a peça calculada não possui vida infinita.

6 RESULTADOS E CÁLCULOS

Os resultados encontrados foram satisfatórios, já que foi possível observar que a manga de eixo para um cubo unitizado possui vida infinita. Para ajudar nos cálculos foi desenvolvida uma planilha em Excel, esta simplificou o projeto e ajudou a encontrar parâmetros que afetam diretamente na vida da manga. Os resultados encontrados podem ser encontrados nas tabelas abaixo:

Tabela 7 – Resultados encontrados.

FONTE: Próprio autor.

Resultados para o teste Vertical	
Fmax	53,0 kN
Fmin	17,7 kN
Fa	17,7 kN
Fm	35,4 kN
Ma	662 kN·mm
Mm	1325 kN·mm
σ_a	29,4 Mpa
σ_m	58,8 Mpa
fsf	8,03

Resultados para o teste Lateral	
Fmax	22 kN
Fmin	-4,8 kN
Fa	13,4 kN
Fm	8,6 kN
Ma	6807 kN·mm
Mm	4369 kN·mm
σ_a	302,2 Mpa
σ_m	194 Mpa
fsf	1,07

6.1 Variando os fatores modificadores

Alguns fatores modificadores podem ser variados com o intuito de verificar as possíveis consequências dessa modificação, com isso foi verificado as variações do fator de superfície e de temperatura.

6.1.1 Variando os fator modificador de superfície.

Como esta peça é, geralmente, fornecida para a indústria de veículos comerciais por um fabricante de eixos, é de extrema importância averiguar a qualidade do acabamento superficial da ponta da manga de eixo, caso seja mudado o valor deste fator, sua vida poderá passar a ser finita. Realizando novamente os cálculos e usando um valor de fator de superfície para usinado (Tabela 2), pode-se chegar a um novo valor de fsf .

$$a = 4,51 \text{ (usinado)}$$

$$b = -0,265 \text{ (usinado)}$$

Usando novamente a equação (9), encontra-se o valor:

$$k_a = 4,51 \cdot 1158^{-0,265}$$

$$k_a = 0,695$$

Com este novo valor, calcula-se novamente o valor do limite de resistência, usando a equação (8) e mudando somente o fator de superfície:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

$$S_e = 0,695 \cdot 0,875 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,897 \cdot 1 \cdot 583,6$$

$$S_e = 318,5 \text{ MPa}$$

Com este resultado, calculam-se novamente os valores para ambos os testes (lateral e vertical), como no teste vertical o valor encontrado foi alto, mesmo que varie, dificilmente irá baixar para menor que um, porém, para o teste lateral o valor encontrado foi próximo de um, portanto é necessário calcular novamente.

$$fsf = \frac{1}{\frac{302,2}{318,5} + \frac{193,9}{1158}}$$

$$fsf = 0,89$$

Como o valor é menor que um, a manga de eixo passou a ter vida finita.

6.1.2 Variando os fator modificador de confiabilidade.

Supondo que nos dados estáticos foi averiguado uma confiabilidade de 99%, o valor do fator modificador de confiabilidade passa a ser 0,814. Com isso é necessário calcular novamente a vida em fadiga da peça.

Primeiramente calculamos a equação (8) novamente, segue abaixo:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

$$S_e = 0,870 \cdot 0,875 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,814 \cdot 1 \cdot 583,6$$

$$S_e = 361,6 \text{ MPa}$$

Com isso calculamos novamente o fsf, usando como base o teste de carga lateral:

$$fsf = \frac{1}{\frac{302,2}{361,6} + \frac{193,9}{1158}}$$

$$fsf = 1,00$$

Com isso podemos confirmar que mesmo aumentando o fator modificador de confiabilidade, o valor encontrado ainda irá garantir que a peça tem vida infinita.

6.1.3 Variando os fator modificador de confiabilidade e de superfície juntos.

Supondo, agora, que ambos os fatores modificadores serão variados juntos, ou seja, $k_a=0,695$ e $k_e=0,814$. Segue abaixo os cálculos:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

$$S_e = 0,695 \cdot 0,875 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,814 \cdot 1 \cdot 583,6$$

$$S_e = 288,9 \text{ MPa}$$

Calculando o fsf, teremos.

$$fsf = \frac{1}{\frac{302,2}{288,9} + \frac{193,9}{1158}}$$

$$fsf = 0,82$$

A peça se torna vida finita, ainda mais crítica que variando somente a usinagem.

7 CONCLUSÃO

Pode-se concluir através da comparação entre os dois modelos de cubo de roda, que os ganhos através do uso do cubo unitizado são grandes, principalmente com relação a sua manutenção, que é praticamente zero e vida do mesmo. Além disso, devido aos cálculos apresentados, é possível afirmar que a atualização de veículos comerciais que usem cubos de roda convencionais é possível já que se pode atualizar sua ponta de eixo sem afetar estruturalmente o mesmo, mantendo uma vida em fadiga infinita e não alterando a região de interface com as outras peças. E finalizando, foi variado dois fatores modificadores e ambos juntos, mostrado que a usinagem da ponta do eixo é um importante fator a ser monitorado, já que sua variação pode levar a ponta de eixo a falhar durante a vida do veículo, já o fator de confiabilidade, mesmo variando 9% ainda se manteve em vida infinita, *border line* por ser 1 cravado, porém ainda vida infinita. E finalizando foi alterada ambos os fatores modificadores juntos e pode-se ver que a peça ficou ainda mais crítica, com um fsf= 0,82.

Como um próximo paço para este trabalho, pode-se aprofundar mais com relação as variações do fator modificador de efeitos diversos, pois nele a corrosão também se aplica e como esta peça é usinada e permanece estocada por algum tempo, a corrosão é algo muito

factível de ocorrer, portanto realizar um estudo com relação a ela iria adicionar mais conteúdo para o presente trabalho.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**, Utah – USA, 1999.

SHIGLEY, JOSEPH E.; MISCHKE, CHARLES R.; BUDYNAS, RICHARD G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

NORTON, R.L., **Projeto de Máquinas – Uma Abordagem Integrada**. 2.ed. Massachusetts: Bookman, 2004.

DIETER, GEORGE E. **Metalurgia Mecânica**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

Rába Automotive Holding Plc. **Technologies-Forge**. RABA. Disponível em:

<http://www.raba.hu/axle/forge.html>

Acesso em: 14 de julho de 2018 às 10:30 AM (GMT).

Meritor. **Manual de Manutenção – Eixo Dianteiro (não trativo)**. Edição outubro. São Paulo: s.n., 2011.

BERTO, L. F. **Modelagem dinâmica de sistema automotivo: Estudo de caso via testes de performance e falhas do Baja SAE**. Universidade Federal de Santa Catarina- Florianópolis – SC, 2015

American Bearing Manufacturers Association. **What Are Bearings?**. ABMA. Disponível em: http://www.americanbearings.org/?page=what_are_bearings. Acesso em: 18 de julho de 2018 às 08:00 PM (GMT).

SKF. **Catálogo Geral SKF**.

BARBOSA, J.P. **Elementos de vedação**. Disponível em:

ftp://ftp.sm.ifes.edu.br/professores/JoaoPaulo/Elementos%20de%20Maquinas%20I/Aula_06%20-%20Elementos%20de%20Veda%E7%E3o.pdf. Acesso em 18 de julho de 2018 às 10:10 PM (GMT).

GUESSER, W.L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1º ed. Editora Blucher, São Paulo, 2009.

SKF. **Hub units equipped with tapered roller bearings.** SKF, Disponível em:
www.skf.com/.../6698-EN---SKF-Hub-units-equipped-with-tapered-roller-bearings.pdf.
Acesso em 19 de julho de 2018 às 09:30 PM (GMT)

DANA. **Comercial vehicles,** Disponível em:
<http://www.dana.com/commercial-vehicles/products/driveline/steer-axles/nds41-nds56-nds80>
Acesso em 11 de agosto de 2018 às 07:30 AM (GMT)

DANA. **Comercial vehicles,** Disponível em:
<http://www.dana.com/commercial-vehicles/products/driveline/steer-axles/e1002-e1202>
Acesso em 30 de julho de 2018 às 09:30 PM (GMT)

BHARAT FORGE. **Automotive Business,** Disponível em:
<http://bharatforge.com/businesses/automotive>
Acesso em 19 de julho de 2018 às 08:30 PM (GMT)

LASCO. **Machines for solid metal forming – Die Forging Hammers** Disponível em:
https://www.lasco.de/umformtechnik/media/archive2/technische_informationen/Hydraulische_Schmiedehammer_2012_E.pdf
Acesso em 12 de julho de 2018 às 10:30 PM (GMT)

Carlao Trucks. **Geometria do eixo dianteiro,** Disponível em:
<http://carlaotrucks.blogspot.com/2010/12/eixo-dianteiro.html>
Acesso em: 14 de julho de 2018 às 07:30 AM (GMT).

SCHAEFFLER. **Medidas - Rolamentos,** Disponível em:
https://medias.schaeffler.com/medias/pt!hp.ec.br.pr/K-SERIES*KHM212049-HM212011;bpRjjIG8TeFh&
Acesso em: 13 de julho de 2018 às 09:30 AM (GMT).

MASTER. **Freios pneumáticos,** Disponível em:
<https://www.freiosmaster.com/pt/categoria/7/>
Acesso em: 11 de agosto de 2018 às 08:40 AM (GMT).

Cardans Tencar. **A tecnologia em cardans**, Disponível em:

<http://www.cardanstencar.com.br/eixo-dianteiro/>

Acesso em: 23 de agosto de 2018 às 21:50 PM (GMT).

Durametal. **Tambores de freio, discos de freio e cubos de roda**, Disponível em:

http://www.durametal.com.br/categoria_de_produto/cubo-de-roda/

Acesso em: 23 de agosto de 2018 às 21:55 PM (GMT).

Frum. **Cubos de roda**, Disponível em:

<http://frum.com.br/produtos-sistema-de-freios/cubos-de-roda/>

Acesso em: 23 de agosto de 2018 às 22:10 PM (GMT).

Trucks.nl. **MAN TGX 18.440**, Disponível em:

<https://www.trucksnl.com/pt/secondhand-man-tgx-18440-4442678-vd>

Acesso em: 23 de agosto de 2018 às 22:36 PM (GMT).