

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

KYOSUKE SIQUEIRA SAITO

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA SOBRE O USO DE LIGAS DE ALUMÍNIO NA  
FABRICAÇÃO DE EIXOS TRASEIROS TRATIVOS PARA APLICAÇÃO EM  
VEÍCULOS COMERCIAIS

São Paulo

2012

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

KYOSUKE SIQUEIRA SAITO

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA SOBRE O USO DE LIGAS DE ALUMÍNIO NA  
FABRICAÇÃO DE EIXOS TRASEIROS TRATIVOS PARA APLICAÇÃO EM  
VEÍCULOS COMERCIAIS

Dissertação de mestrado apresentado ao programa de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Materiais.

ORIENTADOR: PROF. DR. JAN VATAVUK

São Paulo  
2012

S132e

Saito, Kyosuke Siqueira

Estudo de viabilidade técnica sobre o uso de ligas de alumínio na fabricação de eixos traseiros de veículos comerciais. / Kyosuke Siqueira Saito – São Paulo, 2013.

82 f.: il.; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, 2013.

Orientador: Prof. Dr. Jan Vatauvuk

Bibliografia: p. 82

1. Veículos comerciais. 2. Sistema de propulsão. 3. Eixo traseiro. 4. Alumínio. 5. Análise por elementos finitos. 6. Redução de massa. I. Título.

CDD 620.11

KYOSUKE SIQUEIRA SAITO

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA SOBRE O USO DE LIGAS DE ALUMÍNIO NA  
FABRICAÇÃO DE EIXOS TRASEIROS TRATIVOS PARA APLICAÇÃO EM  
VEÍCULOS COMERCIAIS

Dissertação de mestrado apresentado ao programa de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Jan Vatauvuk

Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Dr. Antonio Augusto Couto

Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Dr. Nelson Batista de Lima

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Dedico este trabalho à minha esposa pela sempre presente motivação e alegria.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Jan Vatauk pela constante orientação e entusiasmo ao longo da realização deste trabalho. Aos professores e funcionários do curso de mestrado em engenharia de materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

"A razão pela qual a maioria das pessoas não reconhece uma oportunidade quando ela aparece é porque, frequentemente, ela vem vestida num macacão e se parece com trabalho"

Thomas Edison

## RESUMO

O desenvolvimento de novos veículos comerciais tem como um de seus objetivos principais o aumento da eficiência energética operacional ou redução do consumo de combustível. A redução da massa dos veículos é uma das estratégias mais diretas para o alcance deste objetivo. Os eixos de veículos tradicionalmente têm sua estrutura feita de materiais ferrosos devido à sua alta resistência e baixo custo. Materiais alternativos de mais baixa densidade e alta resistência são pesquisados e desenvolvidos continuamente. Dentre esses materiais, o alumínio, comparado com materiais ferrosos tem-se mostrado uma alternativa interessante para a substituição de ligas ferrosas para algumas aplicações. O alumínio possui uma densidade muito inferior a dos ferrosos abrindo a possibilidade de ganhos significativos de massa. Neste estudo foi feita uma avaliação através da comparação entre ligas de alumínio e materiais ferrosos em diferentes condições de carregamento e apresentado os ganhos da substituição em cada condição de carregamento. Foi avaliada a possibilidade de substituir materiais ferrosos por ligas de alumínio na estrutura de eixos traseiros de veículos comerciais através de uma análise por elementos finitos como uma etapa da validação de um novo produto. Os resultados do estudo mostram que é possível usar o alumínio na estrutura de eixos de veículos comerciais com redução de massa variando de 1,1% a 61,0% sem perda de características estruturais.

Palavras-chaves: veículos comerciais, sistema de propulsão, eixo traseiro, alumínio, análise por elementos finitos, redução de massa.



## **ABSTRACT**

The development of new commercial vehicles have as one of its major goals increase the operational energetic efficiency or fuel consumption decrease. The vehicle's mass reduction is one of the most direct ways to achieve this goal. The vehicle's axles usually have its structure made of ferrous materials due to its high strength and low cost. Alternative materials with lower density and higher strength are continuously researched and developed. Among these materials the aluminum compared with ferrous materials appears as an interesting alternative to replace ferrous alloys in some applications. The aluminum have its density significantly smaller than ferrous materials opening possibilities to significant mass reductions. In this study were performed an evaluation through the comparison of aluminum alloys and ferrous materials on different load conditions and were presented the replacement gains for each load situation. It was evaluated possibility to replace ferrous materials with aluminum alloys on commercial vehicles rear axle structures through finite element analysis as a step on a new product validation. The study results show that is possible to use the aluminum in commercial vehicle axles with mass reduction ranging from 1,1% to 61,0% without loss of structural properties.

Key-words: commercial vehicles, powertrain, rear axles, aluminum, finite elements analysis, mass reduction.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	14
1.3 JUSTIFICATIVA .....	14
1.4 METODOLOGIA .....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
2.1 ANÁLISE PELO MÉTODO ANALÍTICO E POR ELEMENTOS FINITOS .....	18
2.2 VEÍCULOS COMERCIAIS E EIXOS TRATIVOS .....	23
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS .....	30
2.4 LIGAS DE ALUMÍNIO PARA FUNDIÇÃO .....	36
3. CRITÉRIOS DE PROJETO, CÁLCULOS ANALÍTICOS E RESULTADOS.....	41
3.1 CARREGAMENTO AXIAL .....	44
3.2 CARREGAMENTO TORSIONAL .....	51
3.3 CARREGAMENTO EM FLEXÃO .....	60
3.4 RESULTADOS .....	69
4. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS E RESULTADOS .....	70
4.1 CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO VERTICAL .....	73
4.2 CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO HORIZONTAL (FRENAGEM) .....	75
5. DISCUSSÃO .....	79
6. CONCLUSÃO .....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS

R<sub>m</sub> – Limite de Resistência

R<sub>y</sub> – Limite de Escoamento

R<sub>fadiga</sub> – Limite de Resistência à Fadiga

E – Módulo de Elasticidade (Young Modulus)

G – Módulo de Cisalhamento (Shear Modulus)

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

F – Força

T – Torque

M – Momento Fletor

$\rho$  – Densidade

$\sigma$  – Tensão

$\epsilon$  – Deformação Linear

$\gamma$  – Deformação Angular

$\emptyset$  – Deformação Angular no Plano

I – Momento de Inércia

J – Momento Polar de Inércia

Al – Alumínio

B – Boro

Fe – Ferro

Ti – Titânio

Cr – Cromo

Cu – Cobre

Si – Silício

P – Fósforo

Pb – Chumbo

Mn – Manganês

Mg – Magnésio

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Número de veículo e a população mundial .....	14
Figura 2 - Plano de Redução de CO2 na Europa .....	15
Figura 3 - Malha de um componente e malha do mesmo componente refinada .....	17
Figura 4 - Visualização Gráfica de uma Análise por Elementos Finitos .....	20
Figura 5 - Exemplo de uma montagem mecânica com uma malha .....	21
Figura 6 - Exemplo de um modelo em superfície e a sua malha .....	23
Figura 7 - Exemplo de um modelo em sólidos e a sua malha .....	23
Figura 8 - Relações entre as características de um veículo .....	24
Figura 9 - Configurações de Veículos Comerciais por Eixos .....	26
Figura 10 - "Powertrain" de um veículo utilitário leve 4x4 .....	27
Figura 11 - Esquema de um conjunto de "Power Train" .....	27
Figura 12 - Veículo Comercial Leve - Aplicação Urbana .....	28
Figura 13 - Veículo Comercial Pesado - Cavalos Mecânicos de 2 eixos .....	28
Figura 14 - Veículo Comercial Pesado - Cavalos Mecânicos de 3 eixos .....	28
Figura 15 - Eixo Traseiro Trativo Simples Meritor MS-14X para Veículo Comercial .....	29
Figura 16 - Eixo Traseiro em Tandem Meritor MT-610 para Veículo Comercial Pesado .....	29
Figura 17 - Curva de fadiga - Aço 1045 e Alumínio 2014-T6 .....	34
Figura 18 - Curva de fadiga de ligas de alumínio .....	34
Figura 19 - Curva de Fadiga do Alumínio 6061-T6 .....	35
Figura 20 - Curva de fadiga - Ligas de Alumínio 7075 e 7475 .....	35
Figura 21 - Forças externas e as reações sobre um corpo .....	44
Figura 22 - Carregamento Axial .....	45
Figura 23 - Carregamentos Axiais Trativo e Compressivo .....	45
Figura 24 - Tensão no carregamento Axial .....	45
Figura 25 - Carregamento Torsional .....	51
Figura 26 - Carregamento Torsional .....	51
Figura 27 - Carregamento Torsional .....	52
Figura 28 - Carregamento Torsional .....	52
Figura 29 - Viga submetida a flexão .....	61
Figura 30 - Viga submetida a flexão .....	61
Figura 31 - Distribuição de tensões em uma viga submetida a flexão .....	62
Figura 32 - Viga submetida a flexão .....	63

Figura 33 - Eixo traseiro para veículos comerciais MS-17X da Meritor do Brasil Ltda. ..	70
Figura 34 - Modelo 3D da carcaça em ferro fundido para simulação por FEA .....	70
Figura 35 - Vista em corte do modelo 3D do eixo trativo traseiro usado no FEA .....	71
Figura 36 - Esquema das Condições de Contorno .....	72
Figura 37 - Malha gerada no ANSYS para o modelo do eixo em ferro fundido .....	73
Figura 38 - Esquema das condições de contorno de carregamento vertical .....	73
Figura 39 - Condições de contorno aplicadas no carregamento vertical no ANSYS .....	74
Figura 40 - Resultado da análise em tensões máximas principais - Áreas Críticas 1 e 2 ...	75
Figura 41 - Esquema das condições de contorno de carregamento horizontal .....	75
Figura 42 - Condições de contorno aplicadas no carregamento horizontal no ANSYS .....	76
Figura 43 - Resultado da análise em tensões máximas principais .....	77
Figura 44 – Resultados de redução de massa consolidados .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de materiais metálicos .....	31
Tabela 2 – Sistema de Classificação de Ligas de Alumínio para Fundição .....	38
Tabela 3 – Características e Aplicações das Ligas de Alumínio Utilizadas em Fundição .	39
Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos materiais selecionados .....	42
Tabela 5 – Composição Química em peso (%) do Alumínio AA 356-T6 .....	42
Tabela 6 – Composição Química em peso (%) do Alumínio AA 6061-T6 .....	43
Tabela 7 – Composição Química em peso (%) do Ferro Fundido EN-GJS-350-22 .....	43
Tabela 8 – Composição Química em peso (%) do aço AISI 1020 .....	43
Tabela 9 – Comparação entre o alumínio 356-T6 e o ferro fundido EN-GJS-350-22 .....	69
Tabela 10 – Comparação entre o alumínio 6061-T6 e o aço 1020 .....	69
Tabela 11 – Informações sobre os modelos usados nas simulações .....	71
Tabela 12 – Resultados das análises por FEM na condição de carregamento vertical .....	77
Tabela 13 – Resultados das análises por FEM no carregamento horizontal - frenagem .....	77
Tabela 14 – Resultados consolidados dos cálculos analíticos e simulações por FEA .....	78

## 1 INTRODUÇÃO

Na busca por produtos cada vez mais eficientes energeticamente os fabricantes de veículos vêm buscando novas tecnologias e alternativas aos materiais tradicionais. Como estratégia para reduzir os custos de fabricação e aumentar a sua competitividade frente a concorrentes globais essa busca está em evidência. Em diversos países as leis de restrição às emissões gasosas estão continuamente tornando-se mais rigorosas devido às questões ambientais e econômicas associadas. Para atender as normas de emissões gasosas e reduzir o consumo de combustível a indústria automotiva vem dedicando um grande esforço em desenvolver novas tecnologias para tornar os veículos mais limpos, leves e econômicos.

Os materiais mais comumente usados na fabricação da estrutura de eixos de veículos comerciais são os materiais ferrosos, aço e ferro fundido nodular. A redução de massa de diversos sistemas através de técnicas de otimização através de técnicas de otimização é uma prática comum nas empresas. A otimização é feita e validada através da modelagem tridimensional em computadores, simulação por elementos finitos de carregamentos estáticos, dinâmicos e de fadiga, testes laboratoriais e de campo.

Como resultado desses processos de otimização a massa dos veículos tem caído significativamente. Para alcançar maiores reduções de massa tem-se mostrado comum a substituição de materiais ferrosos por materiais como o alumínio, polímeros e compósitos especialmente em elementos não estruturais. Em veículos de passeio o uso do alumínio em elementos mecânicos é comumente encontrado em motores, caixas de transmissão, elementos de suspensão entre outros.

No segmento de veículos comerciais o alumínio atualmente não é normalmente usado no sistema de propulsão ou estruturalmente. Porém, assim como ocorreu nos veículos de passeio a participação do alumínio nos veículos comerciais tem potencial para uma participação significativa entre os elementos estruturais e de propulsão. Este estudo avalia a possibilidade de usar ligas de alumínio como material estrutural para a fabricação de eixos trativos de veículos comerciais e seus impactos técnicos em termos de massa, dimensões e resistência mecânica.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

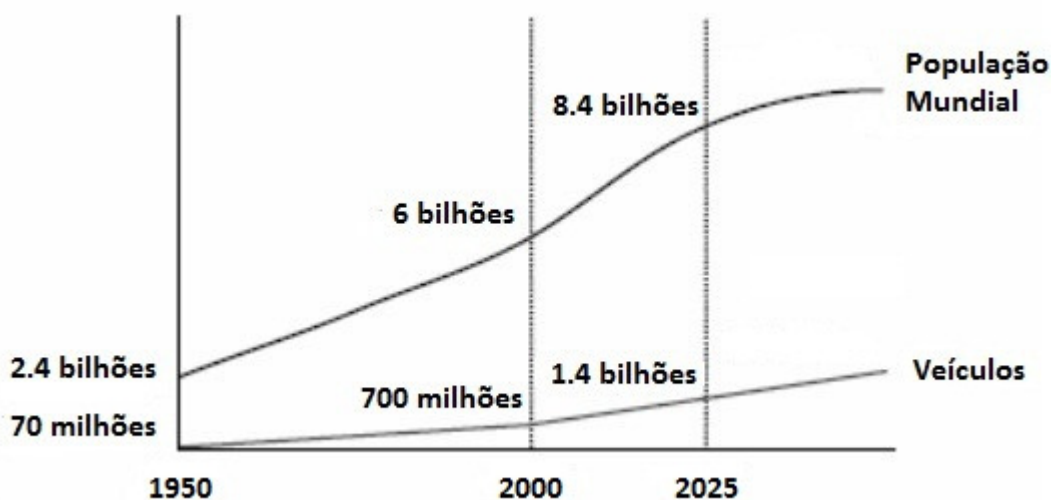
O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica do uso de ligas de alumínio em elementos estruturais de eixos traseiros trativos de veículos comerciais.

## 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Estudar comparativamente o comportamento mecânico de eixos traseiros trativos analiticamente por meio de cálculos de tensões e deformações de perfis simplificados e através do método de elementos finitos modelos de eixos idealizados em aço e alumínio comparando seus desempenhos sob critérios de validação de produto.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

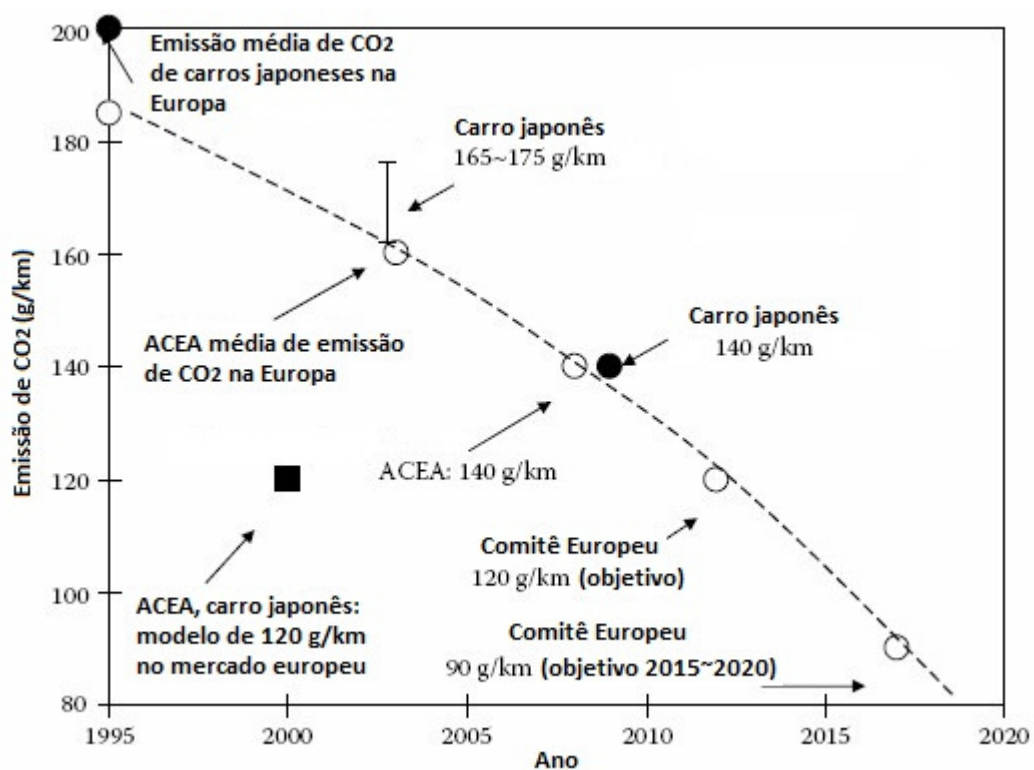
A proteção do meio ambiente incluindo a conservação dos recursos naturais são assuntos críticos atualmente. Observa-se uma tendência de que a frota de veículos mundial chegue a 1.4 bilhões em 2025 quando a população mundial deverá alcançar 8,4 bilhões de habitantes, conforme indicado na **Figura 1**. Esse levantamento mostra que o aumento da população tende a diminuir seu crescimento nas próximas décadas enquanto que frota de veículos mundial tenderá a aumentar nas próximas décadas. Com isto, os impactos econômicos e ambientais decorrentes ao aumento proporcional no consumo de petróleo serão agravados [1].



**Figura 1** - Número de veículo e a população mundial [1]



Diversos países adotaram medidas legais para limitar os níveis de emissões de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) dos motores dos veículos. O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é apontado como o principal responsável pelo aquecimento global. Os níveis de emissões estão tornando-se gradativa e significativamente mais severos atendendo às metas do Protocolo de Kyoto e as metas adotadas localmente pelos países. Novas leis em implantação nos Estados Unidos no governo do presidente Barak Obama anunciados no segundo semestre de 2012 criarão novos limites exigindo a redução no consumo de combustível de novos veículos. A **Figura 2** mostra o planejamento de redução de emissões de CO<sub>2</sub> na Europa [2]. Essas novas leis exigirão o aumento na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para tornar os veículos mais eficientes energeticamente. Entre as diversas iniciativas esta a redução da massa dos veículos através da aplicação de materiais mais leves.



**Figura 2** - Plano de Redução de CO<sub>2</sub> na Europa [2]

Em elementos mecânicos estruturais a substituição de materiais tradicionais como o ferro fundido e o aço por materiais não-ferrosos como o alumínio, titânio, polímeros e materiais compósitos tem se provado gradativamente uma alternativa viável técnica e economicamente. Comparados aos materiais usualmente usados na fabricação de eixos para veículos comerciais o uso do alumínio tem diversos potenciais de melhoria a serem estudados.

Do ponto de vista do produto existem potenciais como a redução da massa total dos veículos, aumento da carga útil transportável, redução do consumo de combustível e aumento do desempenho dinâmico do veículo. Do ponto de vista do processo de fabricação são esperados uma maior velocidade ou produtividade no processo de usinagem, menores gastos com ferramentas de corte, operações de montagem mais rápida e seguras. Do ponto de vista de logística também são esperados menores gastos diretos (combustível e pneus) e indiretos (veículos de potência menor, menor número de pneus, manutenção etc) por peça transportada com a redução de massa dos componentes do trem de força de veículos.

A vantagem da menor massa de conjuntos mecânicos construídos com ligas de alumínio comparados aos materiais ferrosos deve-se a significativa diferença de densidades desses materiais. Os aços e os ferros fundidos têm a densidade aproximada de 7,8 e 7,2 g/cm<sup>3</sup> respectivamente enquanto as ligas de alumínio têm a densidade aproximada de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, representando uma razão aproximada de 3:1. Por outro lado, a resistência mecânica das ligas de alumínio é menor do que a resistência dos materiais ferrosos, tradicionalmente em uma proporção inversa.

Usualmente no estudo de substituição de materiais comparam-se as razões entre as massas e os limites de resistência mecânica. Com essa forma de comparação entre o alumínio e os materiais ferrosos essa análise usualmente tem um resultado negativo. Este estudo propõe a comparação dos materiais baseado na forma de carregamento específico ao qual o elemento mecânico estará submetido como uma forma de avaliar mais profundamente a substituição de materiais como a proposta. O alumínio como material puro possui baixa resistência mecânica assim como ocorrem nos outros metais não podendo ser usado em aplicações estruturais. Alumínios ligados possuem resistências mecânicas que variam de 45 MPa em para os alumínios fornecidos em chapas como o 1199-O a aproximadamente 700 MPa nos perfis de alumínio extrudado como o 7055-T77. Adicionalmente, as ligas de alumínio de alta resistência estão continuamente sendo aplicados em novos desenvolvimentos de produtos e tornado-os comuns na indústria automotiva gradualmente com menores custos.

Este estudo pode mostrar-se relevante técnica e comercialmente especialmente interessante para o Brasil como possuidor da terceira maior reserva mundial de bauxita e ser um dos maiores exportadores e produtores mundiais do alumínio primário. Para as empresas fabricantes de sistemas e montadoras o pioneirismo sobre o investimento em novas tecnologias pode representar uma grande vantagem competitiva em um cenário onde a competição e as restrições ambientais tornam-se significativamente mais exigentes.

## 1.4 METODOLOGIA

Este estudo compara o comportamento mecânico de elementos simples pelo método analítico através dos cálculos de tensões e deformações de elementos mecânicos simples submetidos a esforços de tração, torção e flexão usando o ferro e alumínio fundido como materiais. Usando os materiais ferrosos como referência por comparação foram observadas as variações dimensionais e de massa necessárias aos elementos mecânicos para resistir aos mesmos carregamentos para terem o mesmo desempenho. Como desempenho foram considerados os deslocamentos linear e angular, resistência ao escoamento e resistência à fadiga.

Em uma segunda etapa será modelado em CAD um eixo traseiro trativo simplificado para análise por elementos finitos comparando os mesmos materiais estudados na primeira etapa. O estudo será baseado na análise do comportamento mecânico do eixo submetido às condições de carregamento e desempenho simuladas para a validação do produto no mercado automotivo.

Serão apresentados resultados das análises dos comportamentos mecânicos de perfis simples e de eixos modelos de eixos, considerando como seus materiais um ferro fundido nodular e uma liga de alumínio para fins de comparação. Os comportamentos mecânicos dos eixos serão obtidos experimentalmente através de simulação pelo método dos elementos finitos e cálculos analíticos de tensões sobre perfis simplificados. Para as análises foram modelados em 3D, através de CAD, eixos simplificados e similares a um produto real para uso nas simulações.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ANÁLISE PELO MÉTODO ANALÍTICO E POR ELEMENTOS FINITOS

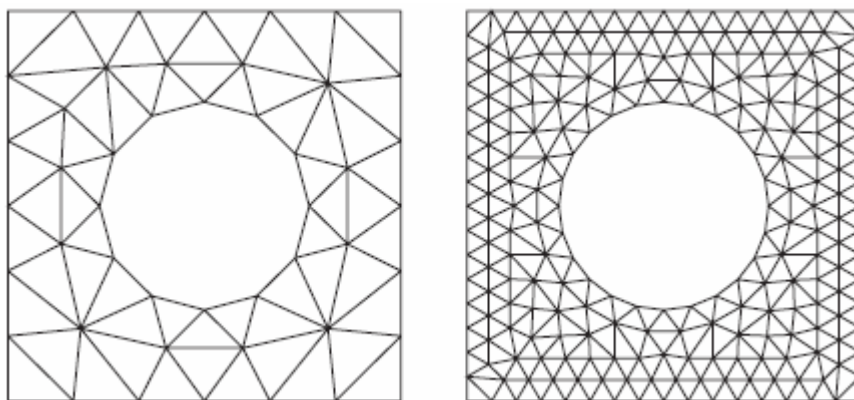
O desenvolvimento do método dos elementos finitos começou na década de 1940 e desenvolveu-se no campo da engenharia estrutural para a indústria aeronáutica nas décadas seguintes. As empresas aeronáuticas Boeing, Bell e Rolls Royce foram as principais envolvidas e os primeiros trabalhos com o método foram publicados em 1956 por M.J.Turner, R.W.Clough, H.C.Martin e L.J.Topp [3]. Atualmente o método é usado vastamente em diversos outros campos da engenharia, matemática e física. Devido ao rápido e grande desenvolvimento dos computadores, o método dos elementos finitos gradualmente tornou-se uma das ferramentas mais usadas para a solução de problemas complexos de engenharia. Comumente as análises de problemas feitas através do método dos elementos finitos são chamadas de FEA (Finite Element Analysis) ou análises por FEM (Finite Element Method). A FEA é uma integração de diversas disciplinas como mecânica, física, ciência dos materiais, métodos computacionais, tecnologia da informação entre outros.

Na solução de problemas de engenharia é usual a abordagem pelos métodos analíticos ou por métodos numéricos. A complexidade do problema, recursos e tempo disponível são alguns dos fatores que determinam a escolha do método a ser usado. O método analítico pode ser considerado como o método tradicional na prática da engenharia. Nesse método busca-se a análise de componentes complexos através da aplicação de hipóteses simplificadores e modelos de geometrias simples previamente analisados e testados cujo comportamento é bem conhecido e amplamente testado. Porém esse método não é sempre adequado a problemas de grande complexidade podendo levar a resultados muito imprecisos. A imprecisão dos resultados aliado à hipóteses simplificadores criam a necessidade de uso de fatores multiplicadores ou fatores de segurança no dimensionamento dos elementos mecânicos com o intuito de compensar as incertezas e simplificações usadas com o objetivo de garantir a segurança dos projetos. Porém, ao buscar a segurança o seu uso tem a tendência de levar ao super dimensionamento de peças e equipamentos aumentando proporcionalmente seus custos.

A busca por maior competitividade nas empresas em diversos segmentos associada a novas ferramentas computacionais a disposição de engenheiros e cientistas, entres eles o método de simulação estrutural por FEA tem possibilitado otimização de projetos reduzindo crescentemente os fatores multiplicadores e conseqüentemente os casos de super dimensionamento. Nesta última década a análise por elementos finitos tornou-se um método

plenamente difundido nos meios acadêmicos e na indústria para aplicações em simulações estruturais, térmicas, de mecânica dos fluidos. Para a engenharia o FEA tem sido usado na avaliação de elementos estruturais complexos com base nas propriedades mecânicas dos materiais envolvidos para determinar a distribuição de tensões e deformações quando submetidas a carregamentos estáticos ou dinâmicos. O uso desse método tem trazido diversos benefícios à indústria como redução no tempo de desenvolvimento, uso de fatores multiplicadores menores, redução de massa e custo de peças e equipamentos, análise e correção e falhas entre outros.

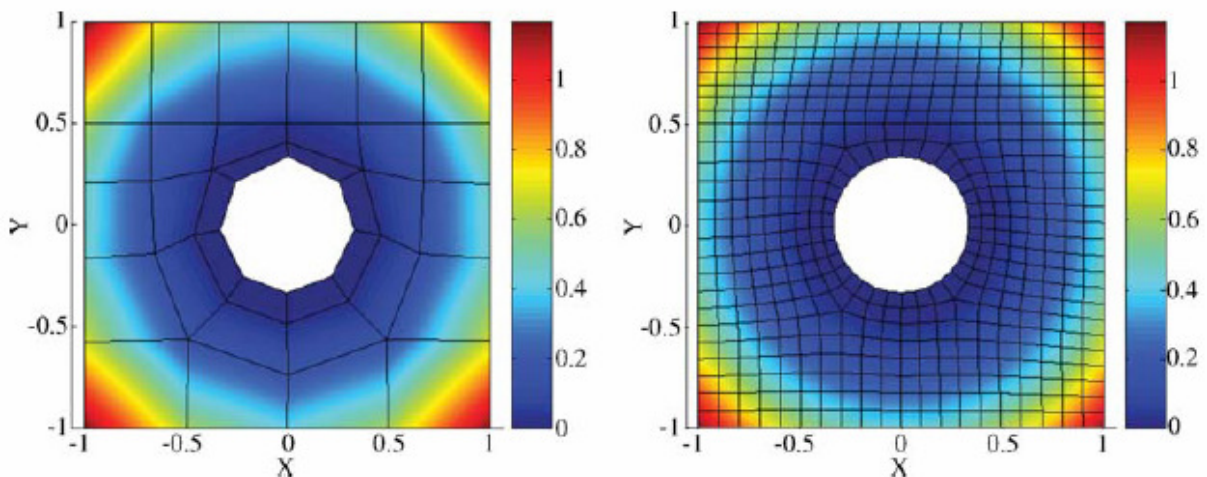
Diversos fenômenos físicos e de engenharia podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais onde dependendo da complexidade tornam-se inviáveis de serem resolvidos por métodos analíticos. A abordagem numérica feita pelo FEA permite a solução de equações diferenciais de forma aproximada. A análise estática por FEA (sem variação no tempo) pode ser dividida em etapas ou em um processo que é essencialmente o mesmo para diversas aplicações. A idéia básica do FEA consiste em dividir um corpo em diversos elementos menores e conectá-los por nós. O conjunto desses elementos menores conectados por nós é conhecido como malha e o processo é conhecido como geração de malha. Como um exemplo, as malhas de uma placa com um furo no centro estão representadas na **Figura 3**. A primeira a esquerda mostra uma malha com baixo número de elementos e nós; a segunda a esquerda mostra uma malha para o mesmo objeto com um número maior de elementos e nós. A criação de uma malha com maior densidade de elementos e nós é definida como malha refinada. O refinamento de malha é usado para obter resultados com maior precisão em uma determinada região de maior interesse [4].



**Figura 3** - Malha de um componente e malha do mesmo componente refinada [4]

Para problemas lineares a solução de uma simulação por FEA envolve a solução de um sistema de equações lineares sobre o qual o número de valores desconhecidos é igual ao número de nós, representando tensões, temperaturas, velocidades, deslocamentos ou outra grandeza. Para obter resultados razoavelmente precisos, milhares de nós normalmente são necessários. Os programas de FEA calculam as grandezas físicas de interesse em todos os nós da malha em diversos intervalos de tempo dentro um intervalo pré-estabelecido.

Os resultados são obtidos são normalmente apresentados na forma gráficos ou visualizações computacionais conforme mostrado no exemplo da **Figura 4**. Nessas visualizações os resultados das grandezas físicas calculadas são apresentadas sobre as peças como escalas de cores para melhor visualização. No caso de análises estruturais as grandezas apresentadas nos nós são as tensões e deslocamentos, no caso de análises térmicas as temperaturas (como no caso da **Figura 4**) entre muitas outras possibilidades.



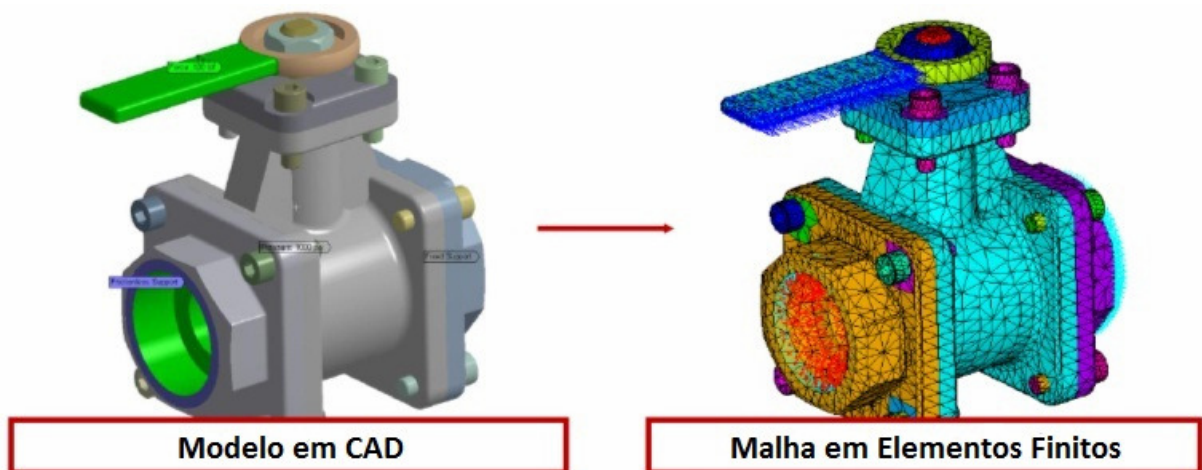
**Figura 4** - Visualização Gráfica de uma Análise por Elementos Finitos [4]

O uso do método de elementos finitos usualmente consiste da realização de quatro etapas principais, conforme descrito a seguir [5]:

- Decisões preliminares
  - qual tipo de análise usar (estática, modal, térmica etc)
  - realizar o modelo sobre uma peça ou montagem
  - quais tipos de elementos usar (superfícies, sólidos)
- Pre-Processamento
  - A partir de um modelo em CAD prepara-lo para a análise por FEA
  - Definição de materiais e designação das propriedades dos materiais dos elementos a serem analisados.

- Criação da malha do modelo preparado para análise.
- Criar as condições de contorno com os carregamentos e a designação dos graus de liberdade dos elementos individuais.
- Solução
- Pós-processamento
  - Revisar os resultados - observação dos resultados de interesse como deformações e tensões
  - Verificar a validade dos resultados obtidos
  - Preparação da visualização dos resultados

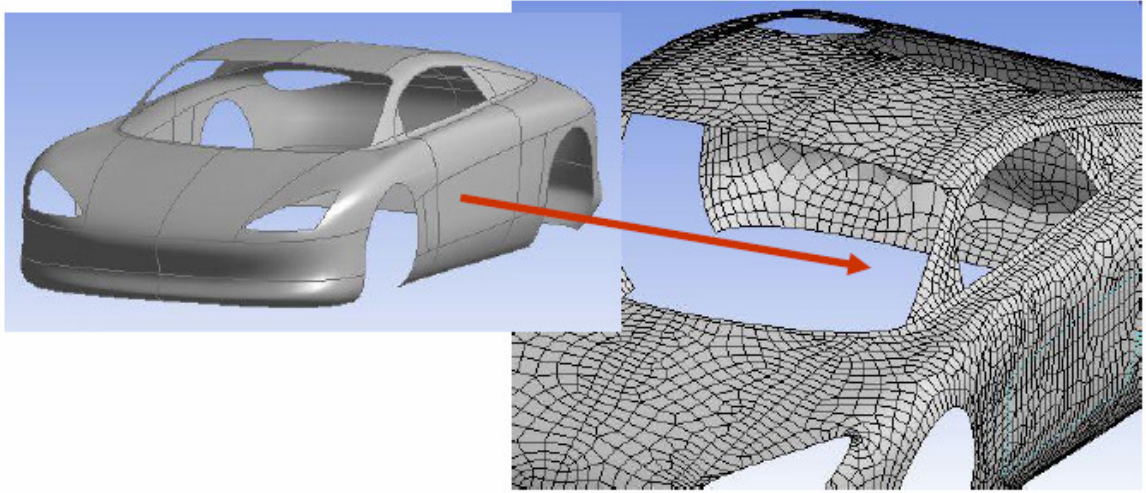
A preparação do modelo de CAD para o seu uso na análise por FEA e a geração da malha estão exemplificados nas imagens das **Figura 5, 6 e 7 [5]**. As figuras mostram imagens de modelos tridimensionais de uma válvula, uma carroceria automotiva e uma estrutura civil feita de perfis metálicos seguida de suas respectivas malhas com elementos sólidos, em casca e linhas respectivamente.



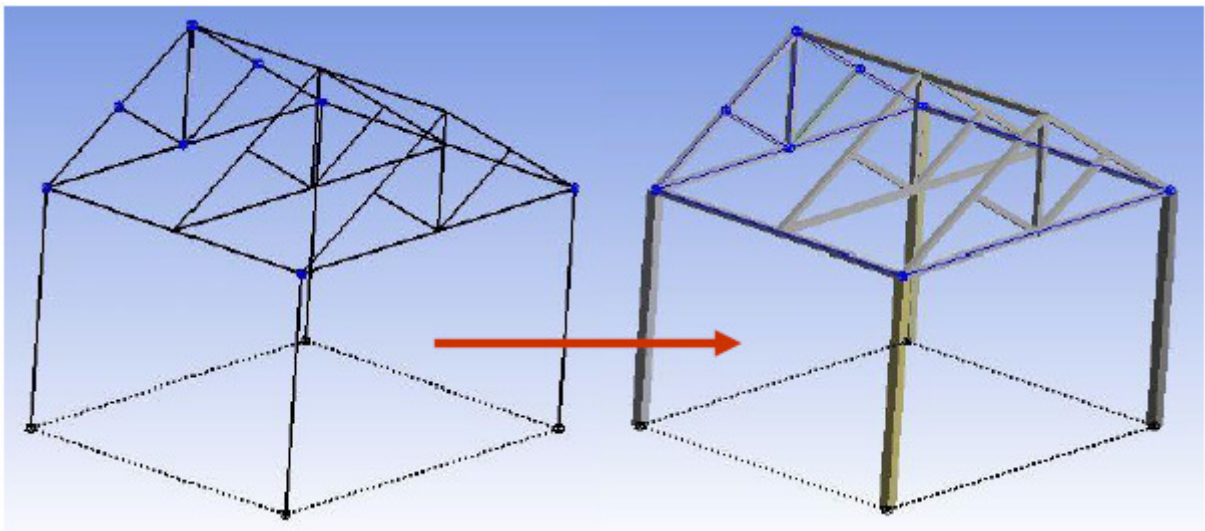
**Figura 5** - Visualização Gráfica de um modelo em CAD e sua uma malha. Exemplo de uma montagem mecânica com uma malha em elementos sólidos [5]

A escolha do tipo de elemento a ser usado depende de diversos aspectos como o tamanho do modelo, complexidade da simulação, capacidade computacional disponível (processadores e memória), tempo disponível, precisão esperada, experiência e histórico de

simulações e dados de testes reais em campo ou em laboratório que correlacionem e validem os modelos usados.



**Figura 6** - Visualização Gráfica de um modelo em CAD e sua malha . Exemplo de um modelo em superfície e a sua malha em elementos do tipo casca [5]



**Figura 7** - Visualização Gráfica de um modelo em CAD e sua malha . Exemplo de um modelo em sólidos e a sua malha em elementos do tipo linhas ou barras e pontos [5]



## 2.2 VEÍCULOS COMERCIAIS E OS EIXOS TRATIVOS

O veículo comercial é a designação dada ao veículo usado para transportar cargas ou passageiros como parte de uma atividade empresarial. Para fins legais e dependendo das legislações dos países aonde são fabricados e comercializados a definição muda de acordo com o número de passageiros, carga transportada, disposição dos tanques de combustível, identificação da empresa proprietária do veículo, propriedade e outros fatores.

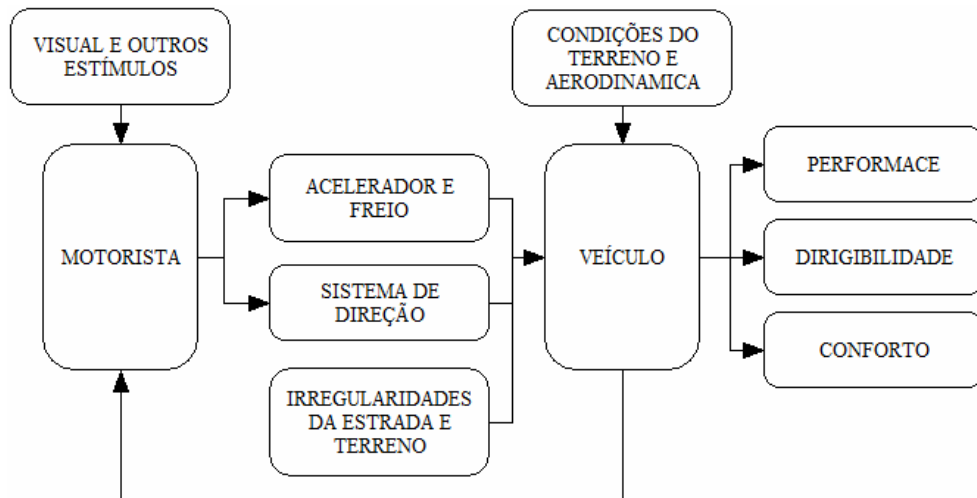
Veículos comerciais são classificados de acordo com o seu peso bruto ou GVWR (Gross Vehicle Weight Rating). O Departamento de Transportes dos Estados Unidos classifica os veículos comerciais em oito categorias de acordo com o GVWR, como segue:

- Classe 1- GVWR de 0 a 2,722 kg
- Classe 2- GVWR de 2,722 to 4,536 kg
- Classe 3- GVWR de 4,536 to 6,350 kg
- Classe 4- GVWR de 6,351 to 7,257 kg
- Classe 5- GVWR de 7,258 to 8,845 kg
- Classe 6- GVWR de 8,846 to 11,793 kg
- Classe 7- GVWR de 11,794 to 14,969 kg
- Classe 8- GVWR acima de 14,969 kg

Os veículo comerciais também são classificados de acordo com a sua configuração classificados como:

- Truck
- Semi truck
- Van
- Coach
- Ônibus
- Taxicab
- Trailers
- Caminhão Baú ou Box Truck

As características de um veículo podem ser divididas em três aspectos: performance, dirigibilidade e conforto. A performance refere-se a habilidade do veículo acelerar, transportar carga, ultrapassar obstáculos, desacelerar e resistir a esses esforços sem falhas. A dirigibilidade refere-se a resposta do veículo aos comandos do condutor e manter um movimento estável on estiver deslocando-se. O conforto refere-se aos efeitos do veículo sobre os ocupantes e carga sendo transportados como vibração e ruído devido às variações do terreno [6]. Essas relações estão esquematizadas no fluxograma da **Figura 8**.



**Figura 8** – Relações entre as características de um veículo

A razão entre a potência do motor de um veículo e a massa do veículo é o fator determinante para a capacidade de aceleração. Adequando a Primeira Lei de Newton ao contexto de um veículo e isolando a aceleração, vemos que a aceleração de um veículo é diretamente proporcional a força do seu conjunto de força (powertrain) e inversamente proporcional a massa do veículo. Em velocidades baixas e moderadas os efeitos das forças resistivas podem ser desconsideradas [7].

A força trativa é a força entre os pneus e o solo responsável pelo movimento do veículo, é fornecido pelo conjunto motor e transmissão. O sistema de propulsão também conhecido como "powertrain", termo em inglês comumente usado na indústria automotiva, designa todos o conjunto responsável pelo movimento dos veículos sendo constituído pelo motor, transmissão e eixos de transmissão dianteiro e/ou traseiros. O sistema de propulsão envolve o conjunto de equipamentos responsáveis pela geração de energia, controle e movimento dos veículos. O sistema de propulsão tem os seguintes objetivos para um veículo [8]:

- Converter torque e velocidade do motor para o movimento do veículo
- Controlar a direção e o sentido do movimento do veículo
- Permitir diferentes velocidades angulares entre as rodas do veículo em curvas
- Maximizar a eficiência energética com menor consumo de combustível







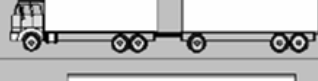






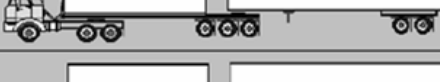

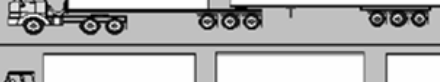










Os veículos comerciais tem diversas configurações com relação aos conjuntos de eixos, quantidade e tipos de pneus conforme mostrado na **Figura 9**. A principal configuração refere-se a sua condição de tração ou não, número de conjuntos trativos, o raio e número de pneus. Essas características definirão a adequação do veículo a sua aplicação envolvendo capacidade de carga, dirigibilidade, consumo de combustível, desgaste de pneus entre outros.

Essas características de tração são tão importantes que também definem o veículo em sua designação ou nomenclatura. Usualmente os veículos são designados pelo número de eixos que possuem versus o número de eixos trativos. Como um exemplo, um veículo 4x4 indica no primeiro algarismo que possui 4 pneus (dois eixos) e o segundo algarismo indica que todos os pneus têm tração, ou seja, no eixo dianteiro e traseiro. As configurações usualmente usadas em veículos comerciais são 4x2, 6x2, 6x4 e 6x6. Em veículos comerciais o eixo ou eixos traseiros são usualmente trativos, diferente do que ocorre em veículos de passeio atuais.

Os eixos dos veículos comerciais usualmente usam o de ferro fundido, aço fundido ou chapas de aço. Os eixos feitos de chapas de aço são fabricados a partir da conformação de chapas planas conformados mecanicamente, unidas e montados através de uniões soldadas. Os eixos fabricados com aço ou ferro fundido normalmente são fabricados em blocos únicos, usinados nas regiões de interface com outros componentes e unidos a seus conjuntos através de uniões aparafusadas.

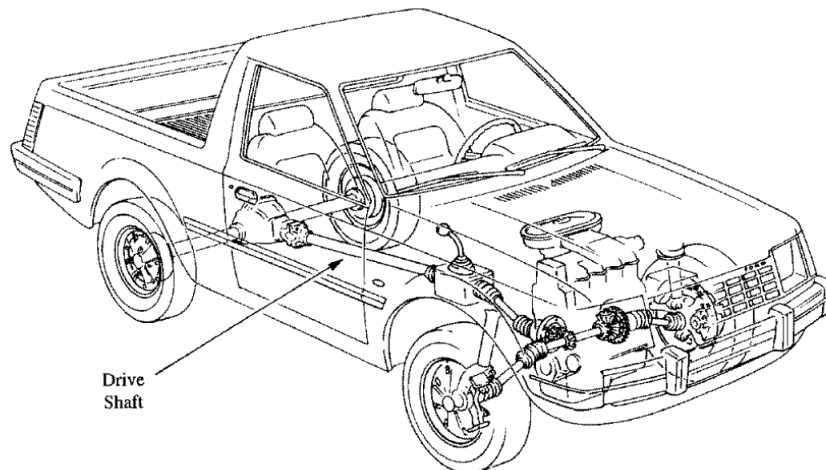
O eixo trativo de veículos comerciais é um dos conjuntos principais do sistema de propulsão tendo uma dupla função: dinâmica e estrutural. Sua função estrutural é a de suportar as cargas dos veículos através do sistema suspensão, esforços de aceleração, frenagem e curvas assim como as reações dinâmicas sobre o veículo do terreno. A função dinâmica transmite o torque produzido pelo motor e transmissão para os pneus e o solo, responsável pelo movimento de aceleração, frenagem (freio motor) e compensação das velocidades entre os pneus em curvas através do conjunto diferencial.

Existem diversas configurações de veículos comerciais correlacionadas às suas aplicações, motorização, pneus, capacidades de carga, legislação específica de cada país, tipo de terreno e costumes locais entre outras características. No Brasil, as configurações de veículos comerciais são legisladas pelo Ministério dos Transportes através do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e pelo CONTRAM. Os limites de carga, dimensões máximas dos veículos e configurações estão especificados pelo CONTRAN [9] e pelo Código de Trânsito Brasileiro [10].

Configuração	Eixos	Configuração	Eixos
	2		4
	3		5
	5		5
	6		6
	3		7
	4		7
	4		8
	5		9
	5		9
	5		5
	5		6
	5		7
	6		9

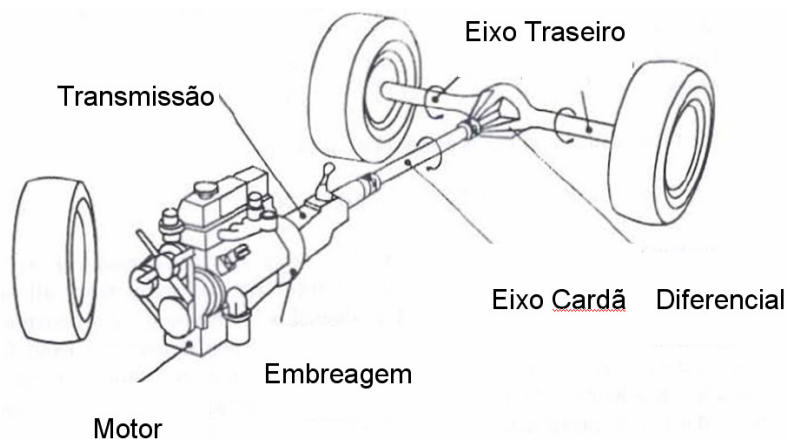
**Figura 9** - Configurações de Veículos Comerciais por Eixos [9]

A **Figura 10** mostra um veículo utilitário leve com tração 4x4, ou seja, nos eixos dianteiro e traseiro. Nos veículos comerciais de 2 eixos usualmente o eixo traseiro é trativo conforme mostrado na **Figura 11**. Usualmente o eixo dianteiro é exclusivamente direcional, exceto nos veículos de aplicação fora de estrada para uso militar, em mineração ou uso florestal onde há tração também no eixo dianteiro.



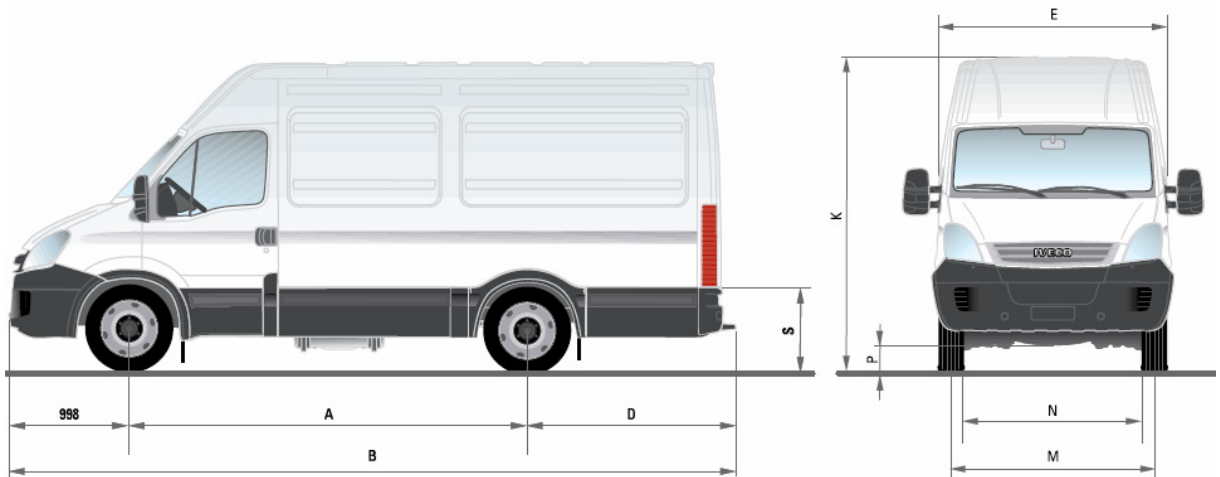
**Figura 10** - "Powertrain" de um veículo utilitário leve 4x4

A configuração do "powertrain" com o eixo traseiro com a função de tração do veículo foi a configuração mais comum entre os veículos de passeio até a década de 70. Em veículos de passeio a tração atualmente é feita no eixo dianteiro por diversos motivos, entre eles a dinâmica veicular e a segurança associada. Devido a grande robustez, simplicidade e menor custo a configuração de "powertrain" com o eixo traseiro trativo é a configuração mais usual entre os veículos utilitários, comerciais leves e comerciais pesados.

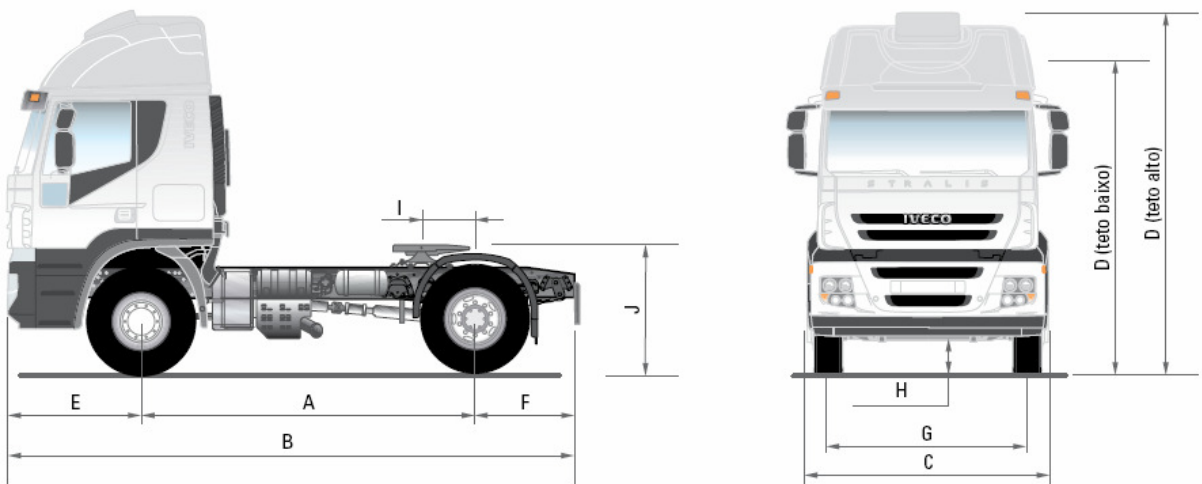


**Figura 11** - Esquema de um conjunto de "Power Train" comum em veículos comerciais

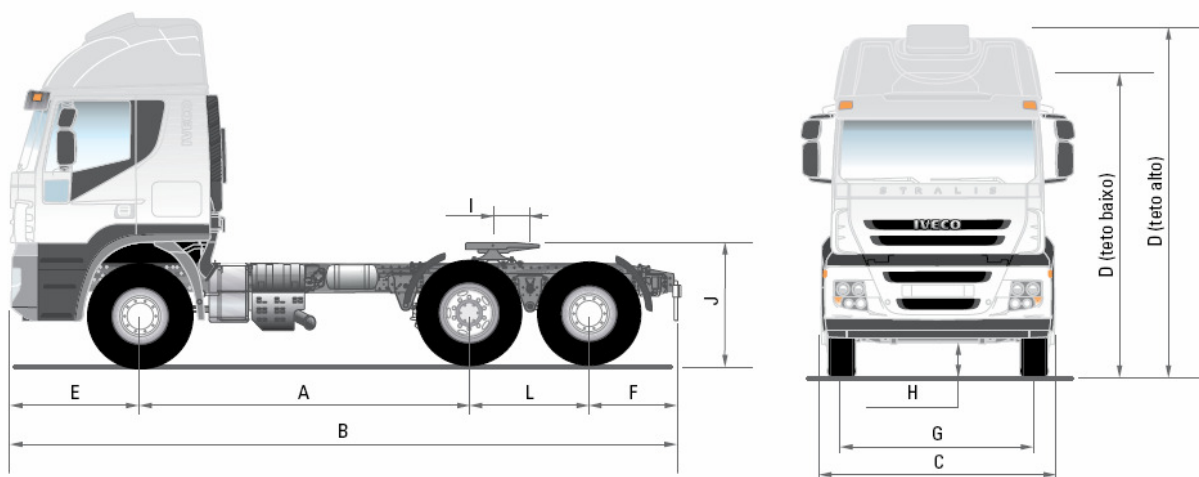
Nos veículos comerciais de 3 ou mais eixos, usualmente o 2o. ou o 2o e 3o eixos são trativos (**Figuras 12, 13 e 14**). Os demais eixos não têm ligação com o sistema de tração ou "powertrain" do veículo. Existem ainda algumas configurações onde o 3o. eixo pode ser erguido para condições de uso onde o veículo está descarregado, com a objetivo de poupar os pneus.



**Figura 12** - Veículo Comercial Leve - Aplicação Urbana (Iveco Daily)

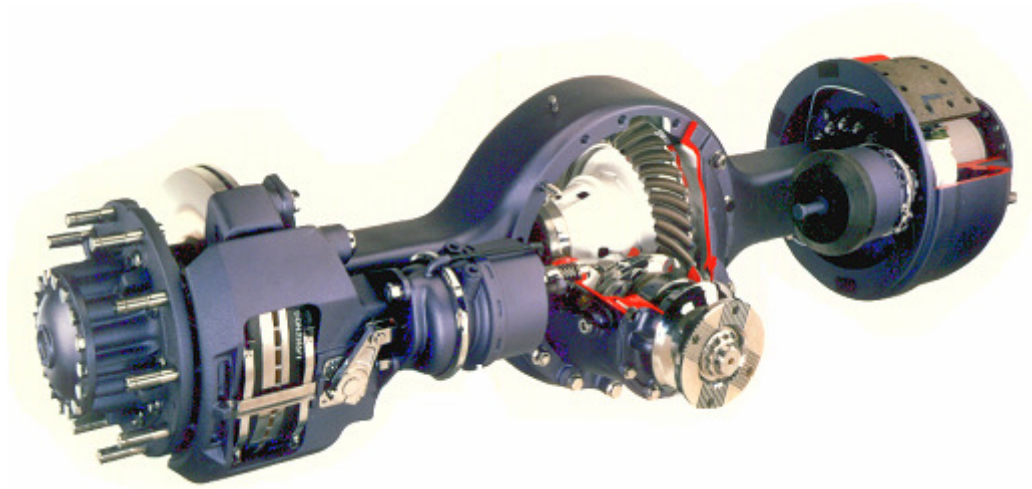


**Figura 13** - Veículo Comercial Pesado de 1 eixos - Aplicação Estradeira (Iveco Stralis)

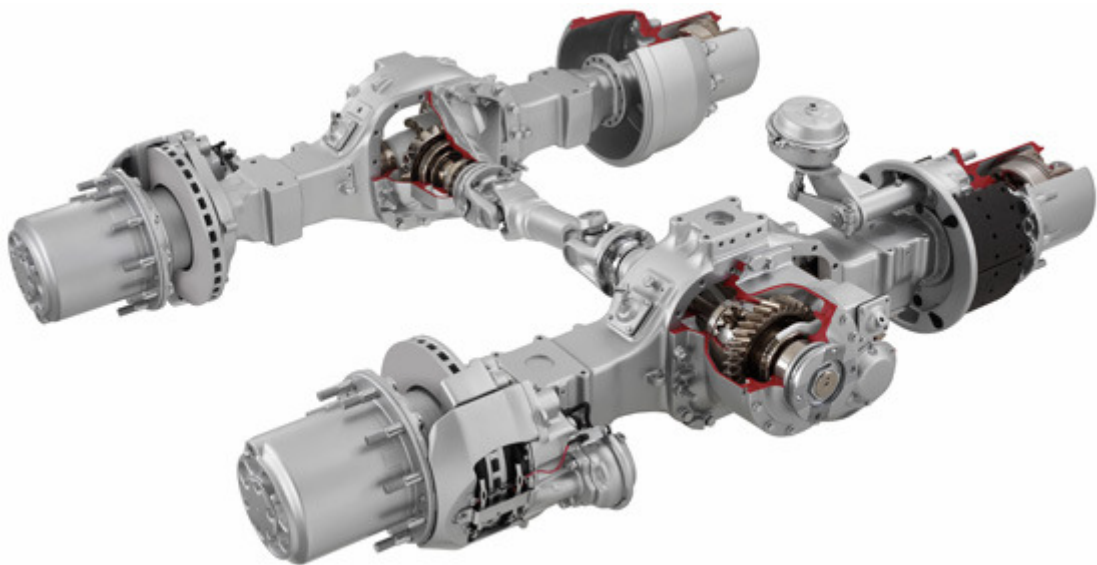


**Figura 14** - Veículo Comercial Pesado de 2 eixos - Aplicação Estradeira (Iveco Stralis)

Para atender a essas diferentes configurações e necessidades de aplicação dos veículos comerciais diversas configurações e tecnologias de eixos estão disponíveis e atualmente em produção. As **Figuras 15** e **16** mostram dois exemplos de eixos trativos para veículos comerciais.



**Figura 15** - Eixo Traseiro Trativo Simples Meritor MS-14X para Veículo Comercial (Meritor do Brasil Sistemas Automotivos Ltda.)



**Figura 16** - Eixo Traseiro em Tandem Meritor MT-610 para Veículo Comercial Pesado de 2 Eixos Trativos (Meritor do Brasil Sistemas Automotivos Ltda.)

## 2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS

Para avaliar a aplicabilidade do alumínio como material alternativo ao aço e ferro fundido em elementos estruturais de eixos de veículos comerciais este estudo fará a análise de critérios de projeto importantes ao dimensionamento de eixos: 1) não deformar-se elasticamente exageradamente quando carregados; 2) não apresentar deformação plástica; e 3) resistir à fadiga, ou seja, resistir a um número significativo de carregamentos cíclicos sem falhas.

Esses critérios são comumente usados na indústria automotiva nos planos de validação de novos produtos, modificações e controle de qualidade. As empresas automotivas usualmente possuem critérios de aprovação, procedimentos de testes e requisitos de qualidade que asseguram que os produtos testados além de atingirem uma vida mínima estimada não representarão risco aos usuários dos veículos, passageiros e pedestres. Para assegurar que esses critérios serão atingidos as empresas projetam os componentes dimensionando-os para essas condições, realizam simulações numéricas e testes em laboratórios com peças já condição de fabricação. Ainda, para atender a esses critérios, usualmente aplica-se aos componentes ou conjuntos mecânicos, cargas estáticas e dinâmicas multiplicadas por um fator de segurança.

O critério de não haver deformação plástica exige que quando os produtos sejam submetidos as maiores cargas de projeto e aplicação dos veículos estes não se deformarão permanentemente ou plasticamente, mantendo as dimensões e funcionalidade.

O critério de resistir à fadiga exige que os produtos resistam a carregamentos cíclicos de baixa ou moderada intensidade, baixa ou alta frequência, por um período de tempo comparável à vida do veículo ou tenham vida infinita, dependendo da natureza do componente e sua relevância para a segurança dos passageiros e pedestres. Esse critério visa comprovar que o componente ou conjunto não apresentará trincas ou terá uma falha quando submetido aos carregamentos cíclicos criados pelo veículo (motor, transmissão e passageiros) e oriundos da via (estradas, obstáculos e irregularidades das pistas).

A fadiga é um processo de falha mecânica resultante da aplicação de tensões cíclicas. As tensões podem ser uma combinação de estados de tração e compressão [11]. Os resultados dos testes de fadiga são sensíveis a diversas características da peça, como acabamento superficial, distribuição de precipitados no material, geometria (concentradores de tensão) entre outros.



Os aços e aços inoxidáveis apresentam uma tensão conhecida como limite de fadiga ( $R_f$ ), indicando que componentes submetidos a tensões cíclicas abaixo desse limite não causarão falha por fadiga. Os testes de fadiga para determinar o limite de fadiga são feitos até a ordem de  $10^6$  ciclos.

Os alumínio não mostram a mesma estabilidade característica aos materiais ferrosos quando submetidos a carregamentos cíclicos. Porém, é possível especificar um limite de resistência à fadiga, considerando um número de ciclos maior nos testes, usualmente na ordem de  $10^8$  ciclos.

Na **Tabela 1** estão relacionadas as propriedades mecânicas de diversas ligas de materiais ferrosos para fundição (aços ferros fundidos e aço inox), alumínio para fundição e como perfis extrudados, algumas ligas de titânio. A tabela mostra diversos materiais comumente encontrados e usados em aplicações automotivas ou industriais e servem com base de comparação para estes materiais. Como para este estudo serão comparados os materiais ferrosos aos alumínio para fundição e fornecidos na forma de perfis extrudados, chapas ou tarugos estão relacionados nesta tabela os materiais e as propriedades mecânicas usadas nos cálculos analíticos e simulações por FEA usados neste estudo.

Na tabela estão relacionadas as propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio, ferro fundido, aço e titânio com os limites de resistência ( $R_u$ ), limite de escoamento ( $R_y$ ), limite de fadiga ( $R_f$ ), densidade ( $\rho$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ) e o coeficiente do Poisson ( $\nu$ ). Para o levantamento dessas informações foram consultadas fontes como o ASM Handbook [12] [13], MatWeb [14], Key to Metals [15] e British Stainless Steel Association [10].

Para avaliar o alumínio como substituto estrutural de metais estruturais será feito um estudo teórico sobre um perfil simplificado submetido a carregamentos de tração uniaxial, torção e flexão. Considerando um material homogêneo usado em uma barra de comprimento "L" e área de seção "A" submetido a uma força "F" alinhada com o eixo longitudinal da peça. O material deformará de forma elástica até o limite de escoamento (região indicada entre os pontos 3 e 4). Até esse ponto, se a aplicação da força for interrompida o material retornará a sua dimensão inicial. A partir do limite de escoamento a deformação do corpo torna-se permanente. (Referência). A medida que a força aumenta a tensão " $\sigma$ " e a deformação " $\epsilon$ " aumenta proporcionalmente, ponderada pela propriedade do material, o módulo de elasticidade "E" [16].

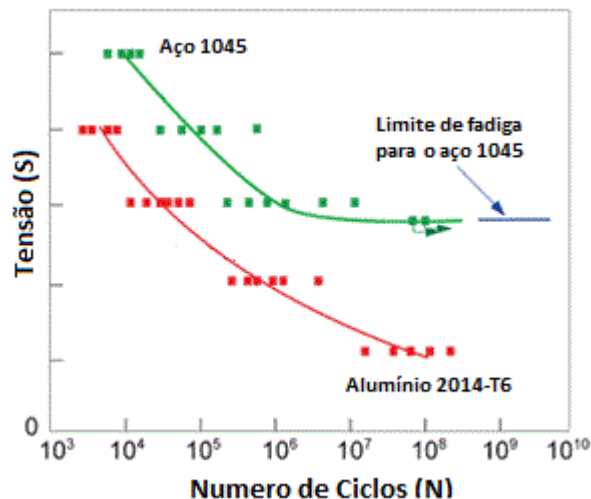
**Tabela 1** - Propriedades mecânicas de materiais metálicos

<b>Material</b>	<b>Ru (MPa)</b>	<b>Ry (MPa)</b>	<b>Rfadiga (MPa)</b>	<b>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>E (GPa)</b>	<b>Coef. Poison</b>
Alumínio 1060 H16	110	105	45	2,7	69	0,33
Alumínio 2014 O	185	95	83	2,7	69	0,33
Alumínio 2014 T6	462	415	125	2,7	69	0,33
Alumínio 3003 H14	150	145	60	2,73	69	0,33
Alumínio 5086 O	260	115	145	2,7	69	0,33
Alumínio 5086-H343	325	255	160	2,7	69	0,33
Alumínio 6061 T6	310	276	96,5	2,7	69	0,33
Alumínio 7075 T6	572	503	160	2,81	72	0,33
Alumínio 7079 T6	490	428	160	2,81	71	0,33
Alumínio 201 T7	469	414	95	2,8	71	0,33
Alumínio 242 T571	221	207	75	2,79	71	0,33
Alumínio 319 T6	250	164	75	2,79	74	0,33
Alumínio 356 T6	262	186	90	2,68	72	0,33
Alumínio 390 T6	296	265	115	2,72	81	0,33
Alumínio 535 F	240	125	70	2,63	71	0,33
Alumínio 712 F	235	170	179	2,8	71	0,33
Fofo DIN EN-GJS-350-22	350	220	114	7,1	169	0,28
Fofo DIN EN-GJS-400-15	400	250	241	7,1	172	0,28
Fofo DIN EN-GJS-500-7	500	320	134	7,1	169	0,28
Fofo DIN EN-GJS-600-3	600	370	149	7,2	174	0,28
Aço SAE 1010 Rol. Quente	320	180	104	7,86	203	0,28
Aço SAE 1020 Rol. Frio	420	350	130	7,87	205	0,29
Aço SAE 1045 Rol. Frio	630	530	203	7,85	205	0,29
Aço SAE 4340 Norm.	1110	710	446	7,85	206	0,29
Aço Inox AISI 301	515	205	241	7,9	200	0,28
Aço Inox AISI 303	515	205	234	7,9	200	0,28
Aço Inox AISI 316	620	310	269	7,96	200	0,28
Aço Inox AISI 347	515	205	269	7,9	200	0,28
Titânio DIN Ti6Al4V	920	870	-	4,43	110	0,34
Titânio DIN Ti6AlSn2Zr4Mo2Si	920	860	-	4,55	114	0,32

Para fins de estudo serão comparados o alumínio ao aço com três critérios de projeto: 1) deslocamentos iguais, 2) aplicação de força máxima (limite de escoamento), e 3) limite de fadiga. Esses três critérios serão aplicados em 3 situações de carregamentos: a) carregamento axial, b) carregamento torsional e c) carregamento em flexão.

A fadiga é um fenômeno que depende da variação de tensão aplicada a um corpo. Observa-se em um corpo submetido a um carregamento repetido frequentemente, mesmo abaixo do limite de escoamento do material, pode causar a sua ruptura. Na **Figura 17** está o ensaio de fadiga na forma de uma curva S-N, ou curva de tensão pelo número de ciclos, de uma liga de aço e alumínio. No gráfico S-N são plotados os pontos nos quais os materiais rompem por fadiga após submetidos a uma tensão uniaxial ciclicamente [17].

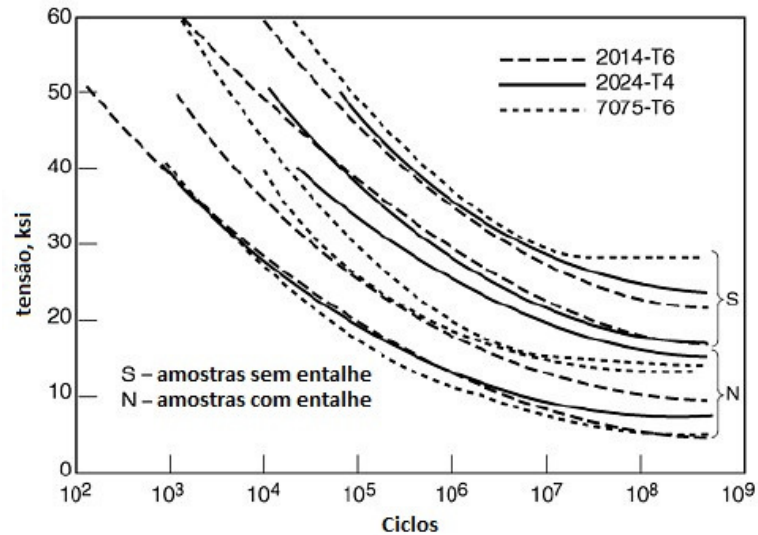
Em alguns materiais a curva S-N aproxima-se da horizontal após um determinado número de ciclos. Ensaio de fadiga em materiais metálicos ferrosos mostram que a tensão máxima para o qual o material não falha por fadiga após um número significativo de ciclos, na ordem de  $10^6$  ciclos, equivale usualmente a metade do seu limite de resistência ( $R_u$ ). Esse comportamento não é observado no alumínio como pode ser visto na curva S-N dos aço 1045 e do alumínio 2014. Porém, ensaios de fadiga de ligas de alumínio com carregamentos repetidos na ordem de  $10^8$  ciclos ou mais tem mostrado-se um critério usual de projeto [13].



**Figura 17** - Curva de fadiga - Aço 1045 e Alumínio 2014-T6

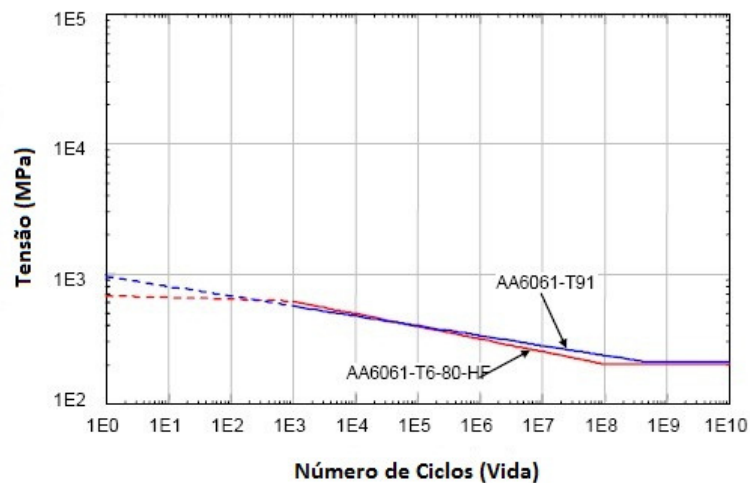
Os limites de fadiga ( $R_{fadiga}$ ) de diversas ligas de alumínio estão apresentadas na **Tabela 1**, caracterizadas em ensaios com  $10^8$  ciclos. Diversos fatores afetam a vida de componentes submetidos a ensaios de fadiga, como a composição química, inclusões, rugosidade superficial, geometria, concentradores de tensão, temperatura, entre outros.

Na **Figura 18** estão está o gráfico S-N de 3 ligas de alumínio com duas condições de rugosidade (Smooth ou liso) e de concentração de tensão (Notched ou com ressalto). Observe as menores limites de fadiga dos materiais com concentradores de tensão para os três materiais demonstrados. As diferentes ligas de alumínio não apresentam comportamentos relativo à fadiga similares, sendo necessário a caracterização através de ensaios para aplicação em projetos.



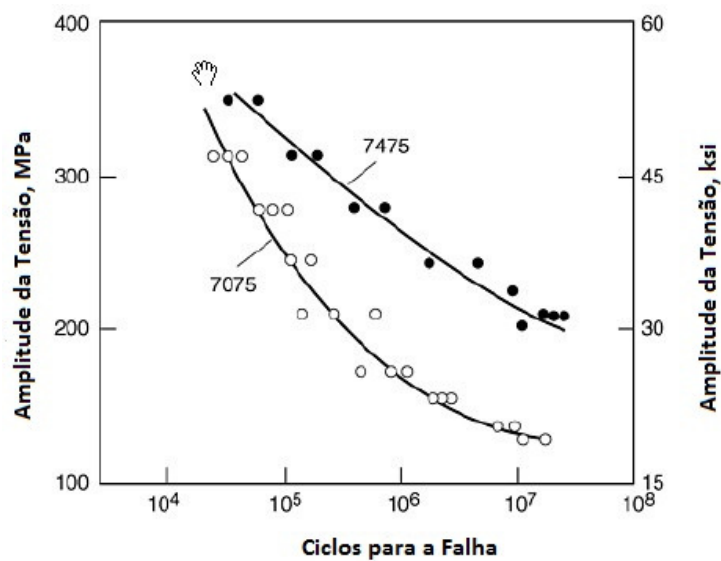
**Figura 18** - Curva de fadiga de ligas de alumínio [13]

A **Figura 19** mostra a curva de fadiga do alumínio 6061-T6 e 6061-T91 em carregamento alternado [18]. Nessa curva é possível observa a tendência de estabilização da tensão pelo número de ciclos a partir de  $10^8$  ciclos.



**Figura 19** - Curva de Fadiga do Alumínio 6061-T6 [18]

A falha por fadiga iniciada pela nucleação de trincas ao redor de inclusões tem uma influência significativa nas ligas de alumínio. A análise da microestrutura das ligas de alumínio mostra que é comum encontrar grandes inclusões. Essas inclusões podem concentrar tensões durante das deformações cíclicas dos ensaios de fadiga, levando a nucleação de trincas prematuras. Esse efeito detrimental pode ser reduzido com a variação da concentração dos elementos da liga. Esse efeito é ilustrado na curva S-N mostrada na **figura 20** onde é mostrado uma significativa melhoria na vida da liga 7075 obtida através da redução do ferro e silício, liga 7475 [13].



**Figura 20** - Curva de fadiga - Ligas de Alumínio 7075 e 7475 [13]

## 2.4 LIGAS DE ALUMÍNIO PARA FUNDIÇÃO

Fundição é o processo de fabricação de peças metálicas a partir de seu estado líquido. Após a fusão, o metal é vazado em moldes para obter componentes de geometria complexa próxima sua geometria final de projeto, de forma a evitar o desperdício de material e reduzir o tempo de usinagem posterior, consequentemente o custo final da peça. O processo de fundição é o mais antigo processo de fabricação conhecido e ainda hoje o processo mais usado devido ao seu baixo custo relativo e alta flexibilidade.

Durante o processo de fabricação ocorre o fenômeno da solidificação do metal onde o metal líquido muda para a fase sólida. De forma simplificada o processo de solidificação pode ser dividido em duas etapas, nucleação e crescimento.

As ligas de alumínio para fundição são classificadas de acordo com as suas propriedades mecânicas para o projeto mecânico, obtidas pelas combinações precisa dos

elementos químicos da liga, método de fundição e tratamento térmico. Adicionalmente, variações nas propriedades mecânicas podem acontecer devido a diferenças entre fundições e impurezas no material. A **Tabela 2** mostra o sistema de classificação das ligas de alumínio para fundição.

**Tabela 2** - Sistema de Classificação de Ligas de Alumínio para Fundição

<b>Série</b>	<b>Liga de Alumínio</b>
<b>1XX.X</b>	99.0% de alumínio mínimo
<b>2XX.X</b>	Alumínio e cobre
<b>3XX.X</b>	Al + Si-Mg ou Si-Mg-Cu
<b>4XX.X</b>	Alumínio + Silício
<b>5XX.X</b>	Alumínio + Magnésio
<b>7XX.X</b>	Alumínio + Zinco
<b>8XX.X</b>	Alumínio + Titânio

Mudanças nas propriedades mecânicas das ligas de alumínio são obtidas variando a composição química do material. A adição ou remoção de elementos de liga afeta diretamente as propriedades mecânicas do material podendo causar melhorias em alguns aspectos em detrimento de outros. Como exemplo, o aumento dos limites de escoamento e resistência podem ocasionar uma redução na capacidade de alongação e aumento na dureza.

O processo de tratamento térmico conforme usado nos aços não é aplicável às ligas de alumínio e não tem nenhuma ligação, sendo usado o termo "tratamento térmico" para indicar o pós-processamento das ligas de alumínio. As ligas de alumínio são classificadas em "tratáveis termicamente", que respondem ao tratamento de solução, e "não-tratáveis termicamente", cujas propriedades são melhoradas apenas com o trabalho a frio [19]. Os principais tipos de tratamento térmico são:

- Homogenização
- Solubilização / Envelhecimento
- Recozimento Pleno
- Recozimento Parcial
- Estabilização

Uma breve descrição dos processos de tratamento térmico das ligas de alumínio segue-se:

- Homogenização é realizado em temperaturas ao redor de 500°C dependendo da liga e tem a função de remover ou reduzir as segregações, produzir estruturas estáveis e controlar certas características metalúrgicas, como propriedades mecânicas, tamanho de grão, estampabilidade entre outras.
- Solubilização ou envelhecimento proporcionam maior resistência mecânica às ligas. É realizado com o aquecimento uniforme até cerca de 500°C, dependendo da liga, o que provoca a dissolução dos elementos de liga na solução sólida. Segue-se um resfriamento rápido, geralmente em água, para prevenir a precipitação dos elementos de liga. Como esta condição é instável gradualmente os elementos precipitam-se em forma muito fina alcançando o máximo de endurecimento (envelhecimento). Algumas ligas requerem um reaquecimento por algumas horas a cerca de 175°C.
- Recozimento pleno é o processo feito com o objetivo de obter a plasticidade máxima do metal (têmpera O), obtida com a recristalização total. O metal é aquecido a 350°C onde ocorre o rearranjo da configuração cristalina para uma forma não deformada.
- Recozimento parcial é o processo de recristalização parcial usado para obter alongamentos superiores ao conseguido com o recozimento pleno. É realizado em temperaturas entre 200°C e 280°C, dependendo da redução usada na laminação a frio.
- Estabilização é usado nas ligas da série 5000. Após alguns dias em temperatura ambiente observa-se uma perda das propriedades mecânicas do metal deformado a frio. Para evitar esse efeito, o material é aquecido a 150°C para acelerar a recuperação (temperas H3X). Com isso, alivia-se a tensão residual aumentando a resistência a corrosão.

Peças fundidas podem ser "tratadas termicamente" para melhorar suas propriedades mecânicas. Porém, há limitações como no caso das peças fundidas pelo processo "die casting" onde o metal fundido é forçado sob pressão para o molde. As peças produzidas por "die casting" não podem ser solubilizadas por terem uma estrutura interna porosa com inclusões de gás que poderia explodir a altas temperaturas. Algumas ligas como a 443.0 por não possuírem ou terem baixas concentrações de cobre, zinco e magnésio não respondem ao tratamento térmico com o aumento das propriedades mecânicas.

As diferentes combinações de ligas e tratamentos permitem uma grande variedade de aplicações adequadas as mais diversas situações baseadas nas condições de operação ao qual a peça será submetida. As têmperas são classificadas conforme e NBR 6835

e de acordo com os processos que são submetidos, especificados por sufixos associados ao nome da liga, F - Conforme fabricada, O - Recozida, H - Encruada, W - Solubilizada e T - Tratada termicamente.

Como exemplo, o tratamento T5 é feito a temperaturas baixas com a finalidade de eliminar variações dimensionais, melhorar a usinabilidade e aliviar tensões. O tratamento T6 resulta nas mais altas resistências a ruptura e escoamento. O tratamento T7 aumenta grandemente a resistência mecânica com aumento da razão de alongamento do material.

Os requisitos de aplicação das peças e as condições do processo de fabricação subsequente têm grande importância na escolha da liga e seu processo de fabricação. Em termos de viabilidade econômica a escolha da liga e processo tem uma grande influência nos custos do ferramental de fundição e da peça produzida. Como exemplos, peças fundidas em molde de areia normalmente têm baixo custo de ferramental e elevado custo por peça produzida; peças fundidas em molde permanente têm o custo de ferramental elevado com baixo custo por peça produzida; peças fundidas sob pressão (die casting) têm o maior custo de ferramental e o menor custo de produção. Em todos os processos o custo de produção usualmente cai com o aumento da quantidade produzida.

A ANSI (American National Standards Institute), SAE (Society of Automotive Engineers), AA (Aluminum Association) e a ASTM (American Society of Testing and Material) adotam uma designação para as ligas de alumínio com três dígitos, conforme a ANSI H35.1. Nesse sistema, os elementos de liga principais e certas combinações de elementos são indicados pelo números usados na codificação do material.

Nesse sistema os dígitos indicam a forma do produto. O dígito 0 indica os limites químicos aplicados a liga fundida. O dígito 1 indica os limites químicos usados para a fabricação do lingote usado na fundição. O dígito 2 indica os limites químicos usados para a fabricação do lingote usado na fundição com tolerâncias diferentes e/ou mais restritas. É comum designar as peças das ligas XXX.1 como produtos secundários feitos de material reciclado e peças feitas com as ligas XXX.2 feitos de material primário. A **Tabela 3** apresenta diversas liga, características e aplicação de ligas de alumínio para fundição.



**Tabela 3** - Características e Aplicações das Ligas de Alumínio Utilizadas em Fundição

Liga	Características	Aplicações
150.0	Alumínio comercialmente puro com excelente resistência à corrosão e boa condutividade elétrica (57% IACS), não tratável termicamente. Fundição em molde permanente, areia e sob pressão.	Acessórios utilizados nas indústrias químicas e de alimentação, rotores, condutores elétricos e equipamentos industriais.
242.0	Excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e muito boa usinabilidade. Baixa resistência à corrosão. Fundição em molde permanente e areia.	Pistões e cabeçotes para aviões, motores a diesel e de motocicletas.
295.0	Média resistência, boa usinabilidade. Baixa resistência à corrosão. Fundição em areia.	Elementos estruturais de máquinas, equipamentos e aviação, cárter, rodas de ônibus e de aviões.
319.0	Resistência mecânica moderada e boas características de fundição e usinagem. Fundição em molde permanente e em areia.	Uso geral, além de revestimentos e caixas de equipamentos elétricos.
355.0	Média resistência mecânica, excelente fluidez, boa usinabilidade após tratamento térmico, boa estanqueidade sob pressão. Fundição em molde permanente e areia.	Peças complexas ou sob tensão, cabeçote de cilindros, corpo de válvulas, camisa de água, união para mangueiras, acessórios para indústria de máquinas e na construção civil.
C355.0	Similar a 355.0, mas com maior resistência mecânica, excelente característica de alimentação (ideal para peças fundidas espessas). Fundição em molde permanente e areia.	Peças estruturais sob tensão, componentes de aviação e de mísseis, acessórios de máquinas e equipamentos, construção civil, fachadas e embarcações.
356.0	Média resistência mecânica, excelente fluidez e estanqueidade sob pressão, boa resistência à corrosão e usinabilidade. Fundição em molde permanente e areia.	Peças fundidas com seções finas, cilindros, válvulas, cabeçotes, blocos de motores, ferramentas pneumáticas e componentes arquiteturais anodizados na cor cinza.
357.0	Elevada resistência mecânica, excelente fluidez e resistência à corrosão. Fundição em molde permanente e areia.	Peças sob tensão que exigem relação de peso com elevadas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, tais como, componentes de aviação e de mísseis.
350.0	Excelente estanqueidade sob pressão, resistência à corrosão e muito boa usinabilidade. Fundição sob pressão.	Recipientes e componentes de iluminação, peças externas de motores e utensílios domésticos.
380.0	Bom acabamento superficial, muito boa usinabilidade, podendo ser anodizada. Fundição sob pressão.	Peças de utensílios domésticos em geral.
A380.0	Elevada resistência mecânica tanto em	Peças para utensílios domésticos em

	locais com temperatura ambiente como elevadas, muito boa fluidez, boa estanqueidade sob pressão, usinabilidade e resistência à corrosão. Fundição sob pressão.	geral, indústrias elétrica e automotiva.
413.0	Excelente estanqueidade sob pressão e resistência à corrosão, baixa usinabilidade. Fundição sob pressão.	Caixas de medidores de energia elétrica, peças externas de motores e peças fundidas com seções finas que requerem boa resistência à corrosão.
443.0	Baixa resistência mecânica, muito boa fluidez, excelente estanqueidade sob pressão e resistência à corrosão. Fundição em molde permanente, areia e sob pressão.	Peças fundidas com seções finas, utensílios domésticos, moldes para artefatos de borracha e componentes arquiteturais anodizados na cor cinza.
518.0	Excelente usinabilidade e resistência à corrosão, alta ductilidade, baixa fluidez e excelentes propriedades de acabamento superficial. Fundição sob pressão.	Aplicações marítimas, acessórios ornamentais de máquinas e equipamentos.
520.0	Excelente resistência mecânica, inclusive sob cargas de impacto, boas condições de anodização e de polimento, baixa fluidez, excelente usinabilidade e resistência à corrosão, mas suscetível à corrosão sob tensão em temperaturas acima de 120°C. Fundição em areia.	Peças submetidas a elevadas tensões na engenharia de aviação, marítima e de transporte.
712.0	Boas propriedades mecânicas, envelhece naturalmente, se retempera após soldagem, excelente usinabilidade e boa resistência à corrosão. Fundição em areia.	Peças fundidas para conjuntos de brasagem.

Fonte: ABAL - Associação Brasileira do Alumínio [19]

### 3. CRITÉRIOS DE PROJETO, CÁLCULOS ANALÍTICOS E RESULTADOS

Para avaliar a aplicabilidade das ligas de alumínio como material alternativo aos materiais ferrosos em elementos estruturais de eixos de veículos comerciais este estudo fará a análise de critérios de projeto importantes ao dimensionamento de eixos: 1) não deformar exageradamente quando carregados; 2) não deformar plasticamente; e 3) resistir à fadiga, ou seja, resistir a um número significativo de carregamentos cíclicos sem falhas. Nestas condições será levantada a deformação, tensão máxima ao escoamento e tensão máxima à fadiga dos materiais ferrosos como referências e é avaliada qual a variação dimensional necessária aos elementos em ligas de alumínio para terem o mesmo comportamento nessas situações.

O estudo compara o comportamento mecânico de elementos simples por meio de cálculos de tensões e deformações ou método analítico, usando materiais ferrosos como base e alumínios como propostas. Através dessas comparações foram observadas as variações dimensionais do material ferroso e calculada a variação dimensional necessárias aos elementos de alumínio para resistir aos mesmos carregamentos usados no ferro fundido, também apresentando a variação de massa.

Foram comparadas ligas de alumínio e materiais ferrosos em três situações de carregamentos: 1) carregamento axial, 2) carregamento em torção e 3) carregamento em flexão. Em cada carregamento foram considerados três critérios de projeto:

a) Critério dos deslocamentos iguais - analisa qual deve ser a variação dimensional em uma peça de alumínio para que tenha uma deformação ( $\delta$ ) igual ao deslocamento de uma peça de ferro fundido quando submetido ao mesmo carregamento;

b) Critério do limite de escoamento - analisa qual deve ser a variação dimensional em uma peça de alumínio para que resista a mesma força no limite de escoamento ( $R_y$ ) da peça de ferro fundido;

c) Critério do limite de fadiga - analisa qual deve ser a variação dimensional em uma peça de alumínio para que esta resista a mesma força no limite da tensão de fadiga ( $R_f$ ) de uma peça de ferro fundido.

Em todas as condições de carregamento foram considerados os materiais como homogêneos, isotópicos, dentro de seus regimes elásticos e sem considerar a ocorrência de impactos. As análises dimensionais foram feitas em função do raio ou altura de perfis simétricos. Como resultado foram calculados a variação área da seção ( $\Delta A$ ) conforme

indicado na equação (2), e a variação da massa ( $\Delta m$ ) conforme indicado pela equação (1), com o objetivo de quantificar as variações decorrentes da substituição do material.

$$\rho := \frac{m}{A \cdot L} \quad \rightarrow \quad \frac{m_{\text{aluminio}}}{m_{\text{fofo}}} := \frac{\rho_{\text{aluminio}} \cdot A_{\text{aluminio}} \cdot L}{\rho_{\text{fofo}} \cdot A_{\text{fofo}} \cdot L} \quad \rightarrow \quad \Delta_m := \frac{m_{\text{aluminio}}}{m_{\text{fofo}}} \quad (1)$$

$$\rightarrow \quad \Delta_A := \frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{fofo}}} \quad (2)$$

Para a análise serão comparados dois materiais para fundição e dois materiais fornecidos na forma de chapas ou perfis laminados ou extrudados. Os materiais para fundição selecionados são o alumínio AA 356-T6 e o ferro fundido EN-GJS-350-22. Os materiais fornecidos na forma de perfis são o alumínio AA 6061-T6 e o aço AISI 1020. Foram escolhidos estes materiais para este estudo por: (a) serem facilmente encontrados e usados em diversas aplicações, (b) possuírem características mecânicas normais dentro de suas categorias (não possuem as mais altas resistências) e (c) os materiais para fundição não exigem processos especiais de fabricação. Foi evitada a escolha de ligas com as mais elevadas resistências mecânicas, apesar de existentes e disponíveis, com o objetivo de avaliar imparcialmente a viabilidade da troca dos materiais ferrosos pelo alumínio. A **Tabela 4** mostra as características mecânicas dos materiais selecionados para o estudo.

**Tabela 4** – Propriedades mecânicas dos materiais selecionados para o estudo comparativo

Material	Ru (MPa)	Ry (MPa)	Rf (MPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$
Alumínio AA 356-T6	262	186	90	2,68	72	0,33
Alumínio AA 6061-T6	310	276	96,5	2,7	69	0,33
Fofo DIN EN-GJS-350-22	350	220	114	7,1	169	0,28
Aço AISI 1020	420	350	130	7,87	205	0,29

As composições químicas em peso (%) máximo dos materiais selecionados para o estudo estão apresentadas nas **Tabelas 5, 6, 7 e 8**.

**Tabela 5** – Composição Química em peso (%) do Alumínio AA 356-T6 (5)

	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
Alumínio Fundido 356-T6	0.25	0.60	0.45	0.35	7.50	0.25	0.35

**Tabela 6** – Composição Química em peso (%) do Alumínio AA 6061-T6

	Zn	Ti	Si	Mn	Mg	Fe	Cu	Cr
Alumínio AA 6061-T6	0.25	0.15	0.80	0.15	1.2	0.7	0.40	0.35

**Tabela 7** – Composição Química em peso (%) do Ferro Fundido EN-GJS-350-22

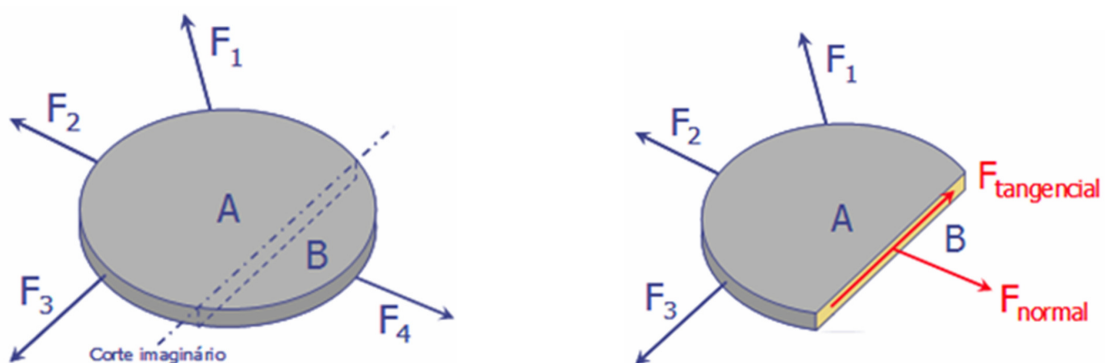
	C	Si	Mn	S	Cr	Cu
Fofo DIN EN-GJS-350-22	3.8	3.0	0.6	0.015	0.10	1.0

**Tabela 8** – Composição Química em peso (%) do aço AISI 1020

	C	Mn	P	S	Si	Cu	B	Pb
Aço AISI 1020	0.23	0.60	0.04	0.05	0.10	0.20	0.003	0.35

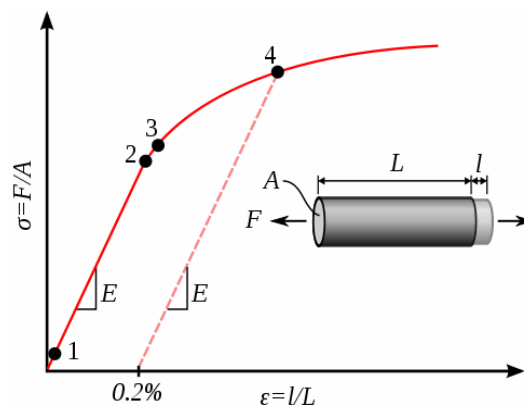
### 3.1 CARREGAMENTO AXIAL

Um corpo submetido a ação de diversas forças externas e impedido de movimentar-se reagirá a ação dessas forças buscando o equilíbrio. Se um corte imaginário for feito nesse corpo, seriam observados na seção cortada duas componentes de forças mantenedoras desse equilíbrio, uma força normal a seção e outra tangencial, **Figura 21** [20].

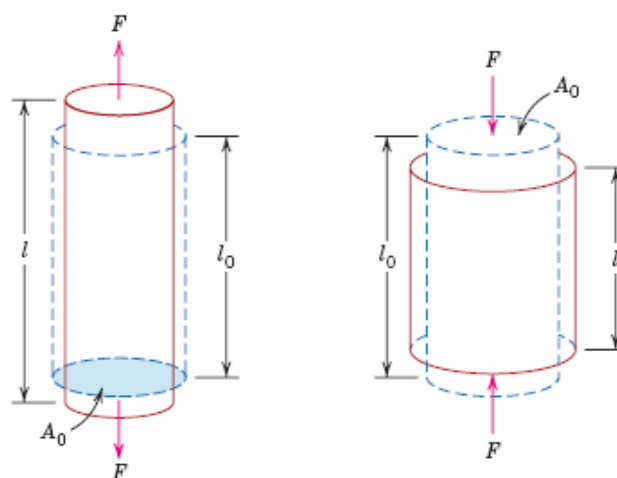
**Figura 21** - Forças externas e as reações sobre um corpo [20]

Forças e alongamentos são linearmente relacionadas como em uma mola, enquanto que tensões e deformações específicas são linearmente relacionadas no corpo de prova de um ensaio de tração, obedecendo a Lei de Hooke [17] [20]. Baseado em um ensaio de carregamento axial como o mostrado na figura, os materiais metálicos reagem como molas até o limite de escoamento e são caracterizados pelas tensões observadas. A tensão indicada no ponto 4 caracteriza o limite de escoamento ( $R_y$ ). A tensão máxima observada no ensaio, caracteriza o limite de resistência do material ( $R_u$ ).

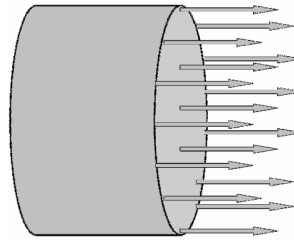
O carregamento axial da força sobre esse elemento provoca um estado de tensões e deformações cujo comportamento é descrito pela equação (1). A deformação sobre o corpo devido a força  $F$  ocorre nos 3 sentidos porém com predominância do deslocamento na mesma direção da força. Observa-se, um aumento no comprimento do corpo indicado pela variável delta ( $\delta$ ). Em um corpo submetido a uma força externa ( $F$ ), a tensão ( $\sigma$ ) é uma razão da força aplicada sobre a área da seção do corpo ( $A$ ) perpendicular à aplicação da força  $F$ , conforme indicado na equação (3) e nas **Figuras 22, 23 e 24**.



**Figura 22** - Carregamento Axial



**Figura 23** - Carregamentos Axiais Tensivo e Compressivo



$$F := \int_{\text{seção\_transversal}} \sigma \, dA \quad \rightarrow \quad F := \int_{\text{area}} \sigma \, dA \quad \rightarrow \quad F := \sigma \cdot A \quad \rightarrow \quad \sigma := \frac{F}{A} \quad (3)$$

**Figura 24** - Tensão no carregamento Axial

### Critério 1 - Deslocamentos iguais

As equações (4), (5) e (6) correlacionam a força aplicada às características do corpo e material (área, comprimento, módulo de elasticidade, massa e densidade) [21]. A comparação entre a peça de ferro fundido e alumínio considera que os dois corpos são de materiais homogêneos e isotópicos submetidos a uma força axial uniaxial de mesma intensidade. Com o critério de mesmo deslocamento, é considerado que as peças de aço e alumínio deverão ter a mesma variação de comprimento dentro do regime elástico.

$$\sigma := E \cdot \varepsilon \quad \rightarrow \quad \varepsilon := \frac{\sigma}{E} \quad \rightarrow \quad \varepsilon := \frac{F}{A \cdot E} \quad (4)$$

$$\varepsilon := \frac{\delta}{L} \quad \rightarrow \quad \frac{\delta}{L} := \frac{F}{A \cdot E} \quad \rightarrow \quad \delta := \frac{F \cdot L}{A \cdot E} \quad (5)$$

$$\rho := \frac{m}{V} \quad \rightarrow \quad m := \rho \cdot V \quad \rightarrow \quad m := \rho \cdot A \cdot L \quad (6)$$

Para fins de comparação entre o material ferroso e o alumínio, considere dois corpos de materiais homogêneos, de comprimentos (L) iguais, submetidos a uma força axial (F) de mesma intensidade. A análise sobre a área necessária para o corpo de alumínio ter o mesmo deslocamento linear do corpo de material ferroso é indicado pela equação (7).

$$\begin{aligned} \delta_{\text{fofo}} := \delta_{\text{aluminio}} &\rightarrow \frac{F}{E_{\text{aço}}} \cdot \frac{L}{A_{\text{fofo}}} := \frac{F}{E_{\text{aluminio}}} \cdot \frac{L}{A_{\text{aluminio}}} \\ &\rightarrow \frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{fofo}}} := \frac{E_{\text{fofo}}}{E_{\text{aluminio}}} \end{aligned} \quad (7)$$

Considerando as propriedades dos materiais para fundição, ferro fundido EN-GJS-350-22 e o alumínio para fundição AA 356-T6, as comparações mostram que o corpo de alumínio para ter o mesmo deslocamento que uma peça de ferro fundido deve ter uma área inicial equivalente a 234,7% a área da peça de aço. Com isso, a variação de massa da peça de alumínio será equivalente a 88,6% a massa da peça de aço.

$$\begin{array}{l}
 \text{Dados} \\
 E_{\text{fofo}} := 169\text{GPa} \quad E_{\text{aluminio}} := 72\text{GPa} \\
 \rho_{\text{fofo}} := 7.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad \rho_{\text{aluminio}} := 2.68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \\
 \\
 A_{\text{aluminio}} := A_{\text{fofo}} \cdot \frac{E_{\text{fofo}}}{E_{\text{aluminio}}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{fofo}}} = 2.347} \\
 \\
 m_{\text{aluminio}} := m_{\text{fofo}} \cdot \frac{\rho_{\text{aluminio}} \cdot A_{\text{aluminio}} \cdot L}{\rho_{\text{fofo}} \cdot A_{\text{fofo}} \cdot L} \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{m_{\text{aluminio}}}{m_{\text{fofo}}} = 0.886}
 \end{array}$$

Considerando as propriedades dos materiais conformados (aço SAE 1020 e alumínio AA 6061-T6) as comparações mostram que o corpo de alumínio para ter o mesmo deslocamento que uma peça de ferro fundido deve ter uma área inicial equivalente a 285,7% a área da peça de aço. Com isso, a variação de massa da peça de alumínio será equivalente a 98,9% a massa da peça de aço.

$$\begin{array}{l}
 \text{Dados} \\
 E_{\text{aço1020}} := 200\text{GPa} \quad E_{\text{al6061}} := 70\text{GPa} \\
 \rho_{\text{aço1020}} := 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad \rho_{\text{al6061}} := 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \\
 \\
 A_{\text{al6061}} := A_{\text{aço1020}} \cdot \frac{E_{\text{aço1020}}}{E_{\text{al6061}}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{A_{\text{al6061}}}{A_{\text{aço1020}}} = 2.857} \\
 \\
 m_{\text{al6061}} := m_{\text{aço1020}} \cdot \frac{\rho_{\text{al6061}} \cdot A_{\text{al6061}} \cdot L}{\rho_{\text{aço1020}} \cdot A_{\text{aço1020}} \cdot L} \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{m_{\text{al6061}}}{m_{\text{aço1020}}} = 0.989}
 \end{array}$$



### Critério 2 - Limite de Escoamento

Um segundo critério de comparação pode ser usado considerando-se o limite de escoamento dos materiais. Assumindo o mesmo corpo de teste do critério de comparação por deslocamentos, será calculada a máxima força que pode ser aplicada a um corpo de aço de área de seção transversal conhecida para que este não apresente deformação plástica. Com isso, será feito o cálculo da área mínima necessária a uma peça de alumínio resistir a mesma força máxima da peça de aço. A comparação das massas dos corpos de aço e alumínio, avaliando a variação de massa que a peça de alumínio deverá ter para resistir a mesma força da peça de aço, na força do limite de escoamento do aço.

$$F_{\max} := R_y \cdot A$$

$$\rightarrow F_{\max_{\text{aço}}} := F_{\max_{\text{alumínio}}}$$

$$\rightarrow R_{y_{\text{aço}}} \cdot A_{\text{aço}} := R_{y_{\text{alumínio}}} \cdot A_{\text{alumínio}}$$

$$\rightarrow \boxed{\frac{A_{\text{alumínio}}}{A_{\text{aço}}} := \frac{R_{y_{\text{aço}}}}{R_{y_{\text{alumínio}}}}} \quad (8)$$

Considerando as propriedades dos materiais para fundição, ferro fundido EN-GJS-350-22 e o alumínio para fundição AA 356-T6, as comparações mostram que o corpo de alumínio para resistir a mesma força que uma peça de ferro fundido no seu limite de escoamento deverá ter uma área inicial equivalente a 118,3% a área da peça de ferro fundido, com uma massa equivalente a 44,6%.

Dados	$\rho_{\text{fofo}} := 7.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$R_{y_{\text{fofo}}} := 220\text{MPa}$
	$\rho_{\text{alumínio}} := 2.68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$R_{y_{\text{alumínio}}} := 186\text{MPa}$

$$\rightarrow A_{\text{alumínio}} := A_{\text{fofo}} \cdot \frac{R_{y_{\text{fofo}}}}{R_{y_{\text{alumínio}}}} \quad \rightarrow \boxed{\frac{A_{\text{alumínio}}}{A_{\text{fofo}}} = 1.183}$$

$$\rightarrow m_{\text{alumínio}} := m_{\text{fofo}} \cdot \frac{\rho_{\text{alumínio}} \cdot A_{\text{alumínio}}}{\rho_{\text{fofo}} \cdot A_{\text{fofo}}} \quad \rightarrow \boxed{\frac{m_{\text{alumínio}}}{m_{\text{fofo}}} = 0.446}$$

Considerando os limites de escoamento ( $R_y$ ) do aço SAE 1020 e do alumínio AA 6061-T6, para uma peça de alumínio resistir a mesma força máxima que uma peça de aço no limite do escoamento a peça de alumínio deverá ter uma área inicial 26,8% maior do que a peça de aço com uma massa equivalente a 43,9%.

$$\begin{array}{l} \text{Dados} \\ \rho_{\text{aço1020}} := 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad R_{y_{\text{aço1020}}} := 350\text{MPa} \\ \rho_{\text{al6061}} := 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad R_{y_{\text{al6061}}} := 276\text{MPa} \end{array}$$

$$\rightarrow A_{\text{al6061}} := A_{\text{aço1020}} \cdot \frac{R_{y_{\text{aço1020}}}}{R_{y_{\text{al6061}}}} \quad \rightarrow \boxed{\frac{A_{\text{al6061}}}{A_{\text{aço1020}}} = 1.268}$$

$$\rightarrow m_{\text{al6061}} := m_{\text{aço1020}} \cdot \frac{\rho_{\text{al6061}} \cdot A_{\text{al6061}}}{\rho_{\text{aço1020}} \cdot A_{\text{aço1020}}} \quad \rightarrow \boxed{\frac{m_{\text{al6061}}}{m_{\text{aço1020}}} = 0.439}$$

### Critério 3 - Limite de Fadiga

Para fins de comparação entre o aço ou ferro fundido e o alumínio no limite de fadiga foi calculada a força máxima que pode ser aplicada a um perfil no material ferroso no seu limite de fadiga. O a força no limite de fadiga é a força máxima que pode ser aplicada a um corpo em carregamento cíclico na qual mesmo após um número significativamente alto de repetições, na ordem de  $10^6$  ciclos, o corpo não falhará. Para a mesma força máxima para vida infinita do ferro fundido ou aço foi calculada a variação na área que uma peça de alumínio precisará ter estar no limite de fadiga do alumínio, representada pela equação (9).

$$\begin{array}{l} F_{\text{max}_{\text{fadiga}}} := R_f \cdot A \\ \rightarrow F_{\text{max}_{\text{fadiga\_aço}}} := F_{\text{max}_{\text{fadiga\_aluminio}}} \\ \rightarrow R_{\text{fadiga\_aço}} \cdot A_{\text{aço}} := R_{\text{fadiga\_aluminio}} \cdot A_{\text{aluminio}} \\ \rightarrow \boxed{\frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{aço}}} := \frac{R_{f\_aço}}{R_{f\_aluminio}}} \end{array} \quad (9)$$

Considerando as propriedades dos materiais para fundição, ferro fundido EN-GJS-350-22 e o alumínio para fundição AA 356-T6, o resultado obtido mostra que em um ensaio de fadiga com duas peças similares sob o mesmo carregamento, para que a amostra de alumínio tenha uma vida na ordem de  $10^8$  ciclos, similar a amostra de aço, a peça de alumínio precisará ter uma área equivalente a 126,7% a área da peça de aço, apresentando uma massa equivalente a 47,8%.

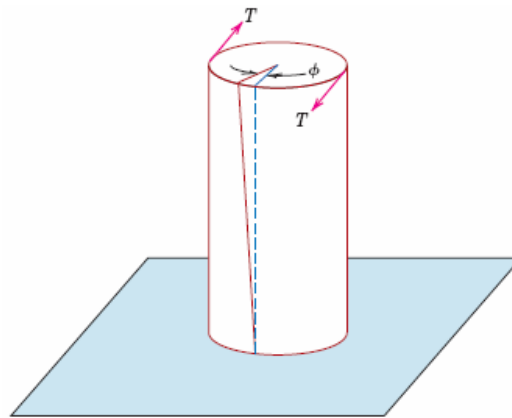
Dados	$\rho_{\text{fofo}} := 7.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$R_{f_{\text{fofo}}} := 114\text{MPa}$	
	$\rho_{\text{aluminio}} := 2.68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$R_{f_{\text{aluminio}}} := 90\text{MPa}$	
→	$A_{\text{aluminio}} := A_{\text{fofo}} \frac{R_{f_{\text{fofo}}}}{R_{f_{\text{aluminio}}}}$	→	$\frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{fofo}}} = 1.267$
→	$m_{\text{aluminio}} := m_{\text{fofo}} \frac{\rho_{\text{aluminio}} \cdot A_{\text{aluminio}}}{\rho_{\text{fofo}} \cdot A_{\text{fofo}}}$	→	$\frac{m_{\text{aluminio}}}{m_{\text{fofo}}} = 0.478$

Considerando os limites de fadiga ( $R_f$ ) do aço SAE 1020 e do alumínio AA 6061-T6, para uma peça de alumínio resistir a mesma força máxima que uma peça de aço no limite do fadiga a peça de alumínio deverá ter uma área inicial 34,7% maior do que a peça de aço com uma massa equivalente a 46,6%.

Dados	$\rho_{\text{aço1020}} := 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$R_{f_{\text{aço1020}}} := 130\text{MPa}$	
	$\rho_{\text{al6061}} := 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$R_{f_{\text{al6061}}} := 96.5\text{MPa}$	
→	$A_{\text{al6061}} := A_{\text{aço1020}} \frac{R_{f_{\text{aço1020}}}}{R_{f_{\text{al6061}}}}$	→	$\frac{A_{\text{al6061}}}{A_{\text{aço1020}}} = 1.347$
→	$m_{\text{al6061}} := m_{\text{aço1020}} \frac{\rho_{\text{al6061}} \cdot A_{\text{al6061}}}{\rho_{\text{aço1020}} \cdot A_{\text{aço1020}}}$	→	$\frac{m_{\text{al6061}}}{m_{\text{aço1020}}} = 0.466$

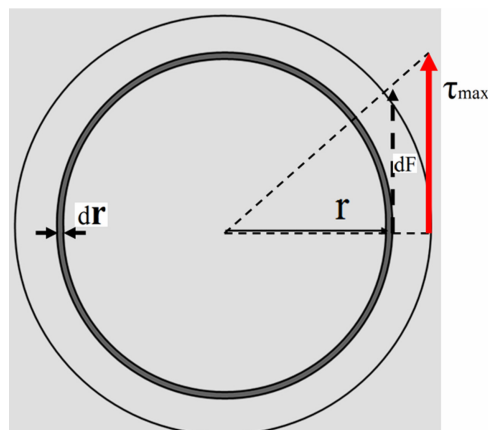
### 3.2 CARREGAMENTO TORSIONAL

Quando um corpo sólido é submetido a um combinado de forças, onde os vetores dessas forças não passa pelo seu eixo central, observa-se um carregamento torsional, momento ou torque (**Figura 25**). Esse momento provoca uma deformação angular no corpo, proporcional a força aplicada e ao módulo de elasticidade do corpo. Observa-se que na aplicação de um momento todas as seções transversais do corpo permanecem planas e indeformadas [22]. Embora diversas seções transversas do eixo girem com diferentes ângulos, cada seção circular gira como um disco rígido (**Figura 26**). Essa propriedade permite determinar a distribuição de deformação específica de cisalhamento em um eixo circular submetido a um momento torção ou torque "T" e verificar que este varia linearmente com a distância ao centro do eixo [23].



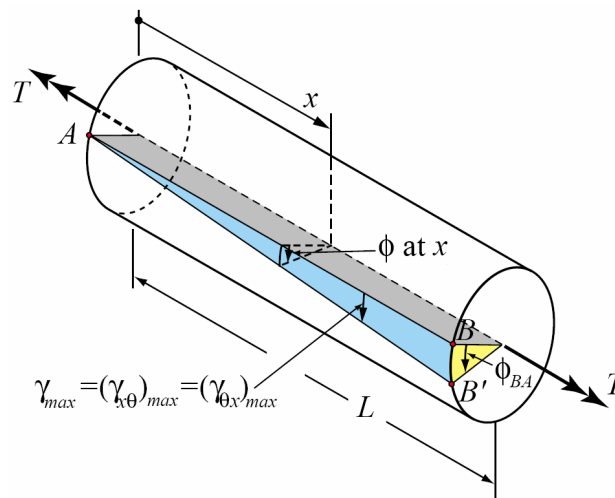
**Figura 25** - Carregamento Torsional

Considerando que as deformações no corpo acontecem no regime elástico, abaixo do limite de escoamento, usando a Lei de Hooke para tensão e deformação pode-se determinar as deformações e a distribuição das tensões de cisalhamento no eixo circular.



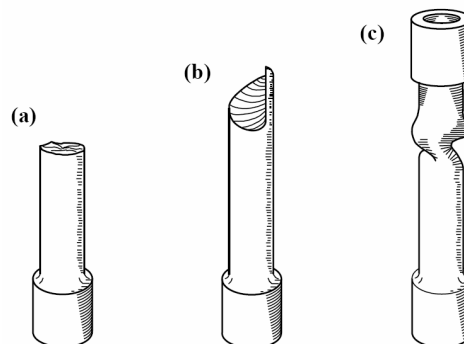
**Figura 26** - Carregamento Torsional

Em uma seção em corte transversal ao eixo de um corpo sólido submetido a um momento, observa-se que a partir do centro do eixo para o ponto mais externo ao corpo o torque cresce proporcionalmente a essa distância "r". Considerando a distância do eixo ao ponto mais externo do corpo como "R", o comportamento do momento pode ser descrito pelas equações (8), (9) e (10), onde "T" é o torque ou momento, "dF" a força, "τ" a força de cisalhamento, "dA" a área circular até o ponto "r", "τ" o ângulo de torção do eixo ou o ângulo entre as retas AB e AB' do cilindro, e "Φ" o ângulo da torção do eixo na posição L ou o ângulo entre OB e OB', conforme a **Figura 27**.



**Figura 27** - Carregamento Torsional

Dependendo da natureza do material com relação a sua ductilidade, se um corpo de prova for submetido a um carregamento torsional podem-se observar resultados distintos. A **Figura 28** mostra os resultados de ensaios de torção em corpos de prova de materiais dúteis (a), rígidos (b) e o resultado de um ensaio de flambagem de um tubo.



**Figura 28** - Carregamento Torsional

Para fins de estudo serão comparados o alumínio ao aço com três critérios de projeto: 1) deslocamentos iguais, 2) aplicação de força máxima (limite de escoamento), e 3) limite de fadiga. O estudo considerará o uso de um material homogêneo e isotrópico, dentro do regime elástico e sem a ocorrência de impacto.

### Critério 1 - Deslocamentos iguais

Para a torção circular serão considerados tensões abaixo do limite de escoamento e pequenas deformações. Com isso, os deslocamentos são tais que a deformação angular varia linearmente a partir do centro do eixo. As equações (10), (11), (12), (13) e (14) correlacionam o torque aplicado às características do corpo e material como área, comprimento, módulo de elasticidade, massa e densidade. Para este estudo foi considerado como elemento para a análise um cilindro sólido [21].

$$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (10)$$

$$J := \frac{\pi}{2} \cdot R^4 \quad (11)$$

$$\gamma := \frac{r \cdot \phi}{L} \quad \rightarrow \quad \gamma_{\max} := \frac{R \cdot \phi}{L} \quad (12)$$

$$\gamma_{\max} := \frac{\tau_{\max}}{G} \quad \rightarrow \quad \gamma_{\max} := \frac{T \cdot R}{J \cdot G} \quad (13)$$

$$\phi := \frac{T \cdot L}{J \cdot G} \quad \rightarrow \quad \phi := \frac{2 \cdot T \cdot L}{\pi \cdot G \cdot R^4} \quad (14)$$

Para fins de comparação entre os materiais ferrosos e o alumínio foi considerado que os corpos possuem materiais homogêneos, isotrópicos, de área da seção iguais, mesmo comprimento e submetidos a um torque de mesma intensidade. A análise verifica o raio necessário para o corpo de alumínio ter o mesmo deslocamento angular observado no corpo de material ferroso.

Igualando-se os deslocamentos angulares dos corpos de alumínio e de material ferroso com a equação (14). Obtem-se as razões do raio pela coeficiente de cisalhamento, conforme indicado na equação (15). A partir da equação (15), elevando ambos os membros da equação ao quadrado e multiplicando-os por  $\pi$ , obtém-se a razão das áreas pelo coeficiente de cisalhamento, conforme indicado pela equação (16).

$$\phi_{\text{aço}} := \phi_{\text{aluminio}}$$

$$\rightarrow \frac{2 \cdot T \cdot L}{G_{\text{aluminio}} \cdot \pi \cdot R_{\text{aluminio}}^4} := \frac{2 \cdot T \cdot L}{G_{\text{aço}} \cdot \pi \cdot R_{\text{aço}}^4}$$

$$\rightarrow \boxed{\frac{R_{\text{aluminio}}}{R_{\text{aço}}} := \left( \frac{G_{\text{aço}}}{G_{\text{aluminio}}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad (15)$$

$$\rightarrow \boxed{\frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{aço}}} := \left( \frac{G_{\text{aço}}}{G_{\text{aluminio}}} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

Equiparando a deformação angular da peça usando o ferro fundido EN-GJS-350-22 com uma peça similar de alumínio AA 356-T6 observa-se que a peça de alumínio precisaria ter um raio 23,7% maior e uma área 52,9% maior do que a peça de ferro fundido para apresentar a mesma deformação angular quando submetida ao mesmo torque. A avaliação da massa da peça de alumínio indica uma proporção de 56,9% com relação a peça de ferro fundido, ou seja, uma redução de massa de 43,1%.

Dados	$G_{\text{aluminio}} := 26.3 \text{ GPa}$	$\rho_{\text{aluminio}} := 2.68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
	$G_{\text{fofo}} := 61.5 \text{ GPa}$	$\rho_{\text{fofo}} := 7.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

$$R_{\text{aluminio}} := R_{\text{aço}} \left( \frac{G_{\text{fofo}}}{G_{\text{aluminio}}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{R_{\text{aluminio}}}{R_{\text{aço}}} = 1.237}$$

$$A_{\text{aluminio}} := A_{\text{aço}} \left( \frac{G_{\text{fofo}}}{G_{\text{aluminio}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{aço}}} = 1.529}$$

$$m_{\text{aluminio}} := m_{\text{aço}} \cdot \frac{\rho_{\text{aluminio}}}{\rho_{\text{fofo}}} \cdot \left( \frac{R_{\text{aluminio}}}{R_{\text{aço}}} \right)^2 \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{m_{\text{aluminio}}}{m_{\text{aço}}} = 0.577}$$

Equiparando a deformação angular da peça usado o aço AISI 1020 com uma peça similar de alumínio AA 6061-T6 observa-se que a peça de alumínio precisaria ter um raio 29,4% maior e uma área 67,6% maior do que a peça de aço para apresentar a mesma deformação angular quando submetida ao mesmo torque.

Dados	$G_{\text{al6061}} := 27.6\text{GPa}$	$G_{\text{aço1020}} := 77.5\text{GPa}$
	$\rho_{\text{al6061}} := 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$\rho_{\text{aço1020}} := 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
	$R_{\text{al6061}} := R_{\text{aço1020}} \left( \frac{G_{\text{aço1020}}}{G_{\text{al6061}}} \right)^{\frac{1}{4}}$	$\rightarrow \boxed{\frac{R_{\text{al6061}}}{R_{\text{aço1020}}} = 1.294}$
	$A_{\text{al6061}} := A_{\text{aço1020}} \left( \frac{G_{\text{aço1020}}}{G_{\text{al6061}}} \right)^{\frac{1}{2}}$	$\rightarrow \boxed{\frac{A_{\text{al6061}}}{A_{\text{aço1020}}} = 1.676}$
	$m_{\text{al6061}} := m_{\text{aço1020}} \cdot \frac{\rho_{\text{al6061}}}{\rho_{\text{aço1020}}} \cdot \left( \frac{R_{\text{al6061}}}{R_{\text{aço1020}}} \right)^2$	$\rightarrow \boxed{\frac{m_{\text{al6061}}}{m_{\text{aço1020}}} = 0.58}$

A avaliação da massa da peça de alumínio indica uma proporção de 58,0% com relação a peça de aço, ou seja, uma redução de massa de 42%.



### Critério 2 - Limite de Escoamento

As equações (17), (18), (19) e (20) correlacionam o torque aplicado às características do corpo e material considerando a área, comprimento, módulo de elasticidade, massa, momento polar de inércia e densidade [21]. Para fins de comparação entre os materiais ferrosos e o alumínio foi considerado que os corpos possuem materiais homogêneos, isotópicos, de área da seção iguais, mesmo comprimento e submetidos a um torque de mesma intensidade. A análise verifica o raio necessário para o corpo de alumínio resistir ao mesmo torque aplicado no limite de escoamento da peça de ferro fundido ou aço, equação (20).

$$\tau := G \cdot \gamma \quad (17)$$

$$G \cdot \gamma := \frac{r}{c} \cdot G \cdot \gamma_{\max} \quad \rightarrow \quad \tau := \frac{r}{R} \cdot \tau_{\max} \quad (18)$$

$$T := \int_0^R r \, dF \quad (19)$$

$$T := \int_0^R r \cdot \tau \, dA \quad \rightarrow \quad T := \int_0^R r \cdot \left( \frac{r}{R} \cdot \tau_{\max} \right) dA \quad \rightarrow \quad T := \frac{\tau_{\max}}{R} \cdot \int_0^R r^2 \, dA$$

$$J := \frac{1}{2} \pi \cdot R^4 \quad \rightarrow \quad \tau_{\max} := \frac{T \cdot R}{J} \quad \rightarrow \quad \tau_{\max} := \frac{T \cdot R \cdot 2}{\pi \cdot R^4} \quad \rightarrow \quad \tau_{\max} := \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot R^3}$$

$$T_{\max} := \frac{\tau_{\text{adm}} \cdot \pi \cdot R^3}{2} \quad (20)$$

Multiplicando-se ambos os membros da equação pelo Módulo de Cisalhamento "G" e substituindo gama na equação (17) obtém-se a tensão cisalhante (18). A soma dos momentos das forças elementares aplicadas em qualquer seção transversal de uma barra circular é igual à intensidade "T" do aplicada a mesma, obtida pelas equações (19). A partir da tensão de escoamento ao cisalhamento "τ<sub>adm</sub>" torna-se possível especificar qual o torque máximo "T<sub>max</sub>" pode ser aplicado a um corpo sem haver deformação plástica, equação (20).

Para avaliar a relação entre o aço e o alumínio na torção e no limite do escoamento, iguala-se os valores de torque máximo dos corpos cilíndrico do material ferroso com o de alumínio. A partir dessa equiparação isola-se a razão entre os raio do corpo de alumínio e de aço ou ferro fundido. Com isso, obtém-se a variação no raio para o corpo de alumínio resistir ao mesmo torque no limite de escoamento, equação (21). A partir da razão entre os raios calcula-se a razão entre as áreas pela equação (22) e a variação de massa.

$$T_{\max\_aço} := T_{\max\_aluminio}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \frac{\tau_{adm\_aluminio} \cdot \pi \cdot R_{aluminio}^3}{2} &:= \frac{\tau_{adm\_aço} \cdot \pi \cdot R_{aço}^3}{2} \\ \rightarrow \frac{R_{aluminio}}{R_{aço}} &:= \left( \frac{\tau_{adm\_aço}}{\tau_{adm\_aluminio}} \right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\rightarrow \frac{A_{aluminio}}{A_{aço}} := \left( \frac{\tau_{adm\_aço}}{\tau_{adm\_aluminio}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (22)$$

Para a análise foi considerado o alumínio 356-T6 e o ferro fundido EN-GJS-350-22. A partir das tensões de escoamento foram calculados os limites de escoamento ao cisalhamento do dois materiais [22]. A análise mostra que o corpo de alumínio precisará ter um raio 5,82% maior do que o de aço para resistir ao mesmo torque máximo e a área da seção 11,8% maior, uma massa equivalente de 41,6% a do corpo de ferro fundido.

Dados	$R_{y\_aluminio} := 186 \text{ MPa}$	$\rho_{aluminio} := 2.68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
	$R_{y\_fofo} := 220 \text{ MPa}$	$\rho_{fofo} := 7.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
$\rightarrow$	$\tau_{adm\_aluminio} := R_{y\_aluminio} \cdot 0.577$	$\rightarrow \tau_{adm\_aluminio} = 107.3 \text{ MPa}$
$\rightarrow$	$\tau_{adm\_fofo} := R_{y\_fofo} \cdot 0.577$	$\rightarrow \tau_{adm\_fofo} = 126.9 \text{ MPa}$
$\rightarrow$	$R_{aluminio} := R_{fofo} \cdot \left( \frac{\tau_{adm\_fofo}}{\tau_{adm\_aluminio}} \right)^{\frac{1}{3}}$	$\rightarrow \boxed{\frac{R_{aluminio}}{R_{fofo}} = 1.058}$
$\rightarrow$	$A_{aluminio} := \left( \frac{\tau_{adm\_fofo}}{\tau_{adm\_aluminio}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot A_{fofo}$	$\rightarrow \boxed{\frac{A_{aluminio}}{A_{fofo}} = 1.118}$
$\rightarrow$	$m_{aluminio} := \frac{\rho_{aluminio}}{\rho_{fofo}} \cdot \left( \frac{R_{aluminio}}{R_{fofo}} \right)^2 \cdot m_{fofo}$	$\rightarrow \boxed{\frac{m_{aluminio}}{m_{fofo}} = 0.422}$

A mesma análise feita considerando o aço AISI 1020 e o alumínio 6061-T6 mostra que o corpo de alumínio precisará ter um raio 5,82% maior do que o de aço para resistir ao mesmo torque máximo e a área da seção 11,8% maior, representando uma massa equivalente de 41,6% a massa do corpo de ferro fundido (redução de 48,4%).

Dados	$R_{y_{al6061}} := 276 \text{ MPa}$	$\rho_{al6061} := 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
	$R_{y_{aço1020}} := 350 \text{ MPa}$	$\rho_{aço1020} := 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
	$\rightarrow \tau_{adm\_al6061} := R_{y_{al6061}} \cdot 0.577$	$\rightarrow \tau_{adm\_al6061} = 159.3 \text{ MPa}$
	$\rightarrow \tau_{adm\_aço} := R_{y_{aço1020}} \cdot 0.577$	$\rightarrow \tau_{adm\_aço} = 201.9 \text{ MPa}$
	$\rightarrow R_{al6061} := R_{aço1020} \cdot \left( \frac{\tau_{adm\_aço}}{\tau_{adm\_al6061}} \right)^{\frac{1}{3}}$	$\rightarrow \boxed{\frac{R_{al6061}}{R_{aço1020}} = 1.082}$
	$\rightarrow A_{al6061} := \left( \frac{\tau_{adm\_aço}}{\tau_{adm\_al6061}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot A_{aço1020}$	$\rightarrow \boxed{\frac{A_{al6061}}{A_{aço1020}} = 1.172}$
	$\rightarrow m_{al6061} := \frac{\rho_{al6061}}{\rho_{aço1020}} \cdot \left( \frac{R_{al6061}}{R_{aço1020}} \right)^2 \cdot m_{aço1020}$	$\rightarrow \boxed{\frac{m_{al6061}}{m_{aço1020}} = 0.406}$

### Critério 3 - Limite de Fadiga

Para a análise pelo critério de fadiga foram considerados a comparação entre o ferro fundido EN-GJS-350-22 e o alumínio AA 356-T6, e entre o aço AISI 1020 e o alumínio 6061-T6. Foi usado o critério de dimensionamento pela curva S-N dos materiais. Para os materiais ferrosos foram usados os limites de fadiga ( $R_f$ ) para  $10^6$  ciclos para os materiais ferrosos e para os alumínios foram usados os limites de fadiga para  $10^8$  ciclos. Esses números de ciclos serão considerados como vida "infinita" para os materiais analisados.

Como referência, foi calculado o torque máximo equivalente no limite de vida infinita das peças em ferro fundido e aço, mesmo torque foi aplicado nas peças de alumínio. Para compensar a perda de vida, a área das peças de alumínio foi aumentada até alcançarem as tensões de vida infinita consideradas para esses materiais.

A comparação entre os materiais para fundição mostra que para que a amostra de alumínio tenha uma vida na ordem de  $10^8$  ciclos esta precisará ter um raio 8,2% maior do que o da peça de aço, ou seja, uma área 17,1% maior. Com isso, a massa da peça de alumínio será equivalente a 44,2% a peça de ferro fundido (redução de massa de 55,8%).

Dados	$R_{f_{\text{aluminio}}} := 90\text{MPa}$ $R_{f_{\text{fofo}}} := 114\text{MPa}$	$\rho_{\text{aluminio}} := 2.68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ $\rho_{\text{fofo}} := 7.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
	$\rightarrow \tau_{f_{\text{aluminio}}} := R_{f_{\text{aluminio}}} \cdot 0.577$	$\rightarrow \tau_{f_{\text{aluminio}}} = 51.9\text{MPa}$
	$\rightarrow \tau_{f_{\text{fofo}}} := R_{f_{\text{fofo}}} \cdot 0.577$	$\rightarrow \tau_{f_{\text{fofo}}} = 65.8\text{MPa}$
	$\rightarrow R_{\text{aluminio}} := R_{\text{fofo}} \cdot \left( \frac{\tau_{f_{\text{fofo}}}}{\tau_{f_{\text{aluminio}}}} \right)^{\frac{1}{3}}$	$\rightarrow \boxed{\frac{R_{\text{aluminio}}}{R_{\text{fofo}}} = 1.082}$
	$\rightarrow A_{\text{aluminio}} := \left( \frac{\tau_{f_{\text{fofo}}}}{\tau_{f_{\text{aluminio}}}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot A_{\text{fofo}}$	$\rightarrow \boxed{\frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{fofo}}} = 1.171}$
	$\rightarrow m_{\text{aluminio}} := \frac{\rho_{\text{aluminio}}}{\rho_{\text{fofo}}} \cdot \left( \frac{R_{\text{aluminio}}}{R_{\text{fofo}}} \right)^2 \cdot m_{\text{fofo}}$	$\rightarrow \boxed{\frac{m_{\text{aluminio}}}{m_{\text{fofo}}} = 0.442}$

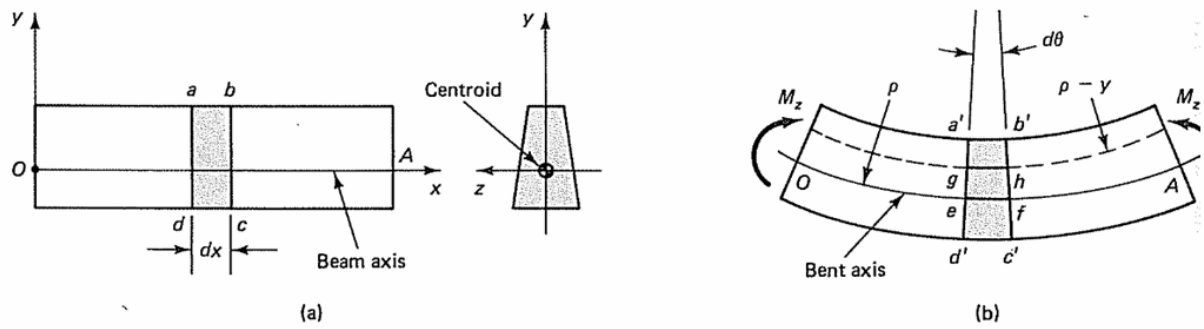
Estendendo a análise para o aço AISI 1020 e o alumínio AA 6061-T6 os cálculos para a mesma situação indica que a peça de alumínio terá um raio 8,2% maior, área 17,2% maior. Com isso, a massa da peça de alumínio será equivalente a 40,6% a do aço (redução de massa de 59,4%).

Dados	$R_{f_{al6061}} := 276 \text{ MPa}$	$\rho_{al6061} := 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
	$R_{f_{aço1020}} := 350 \text{ MPa}$	$\rho_{aço1020} := 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
→	$\tau_{f_{al6061}} := R_{f_{al6061}} \cdot 0.577$	→ $\tau_{f_{al6061}} = 159.3 \text{ MPa}$
→	$\tau_{f_{aço}} := R_{f_{aço1020}} \cdot 0.577$	→ $\tau_{f_{aço}} = 201.9 \text{ MPa}$
→	$R_{al6061} := R_{aço1020} \cdot \left( \frac{\tau_{f_{aço}}}{\tau_{f_{al6061}}} \right)^{\frac{1}{3}}$	→ $\frac{R_{al6061}}{R_{aço1020}} = 1.082$
→	$A_{al6061} := \left( \frac{\tau_{f_{aço}}}{\tau_{f_{al6061}}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot A_{aço1020}$	→ $\frac{A_{al6061}}{A_{aço1020}} = 1.172$
→	$m_{al6061} := \frac{\rho_{al6061}}{\rho_{aço1020}} \cdot \left( \frac{R_{al6061}}{R_{aço1020}} \right)^2 \cdot m_{aço1020}$	→ $\frac{m_{al6061}}{m_{aço1020}} = 0.406$

### 3.3 CARREGAMENTO EM FLEXÃO

Considerando-se uma viga, o sistema de forças que pode existir em uma de suas seções pode consistir de uma força axial, uma força cortante e um momento fletor. Para este estudo será considerada uma viga na condição de flexão, ou seja, quando a viga está em equilíbrio sob a ação exclusiva de um momento.

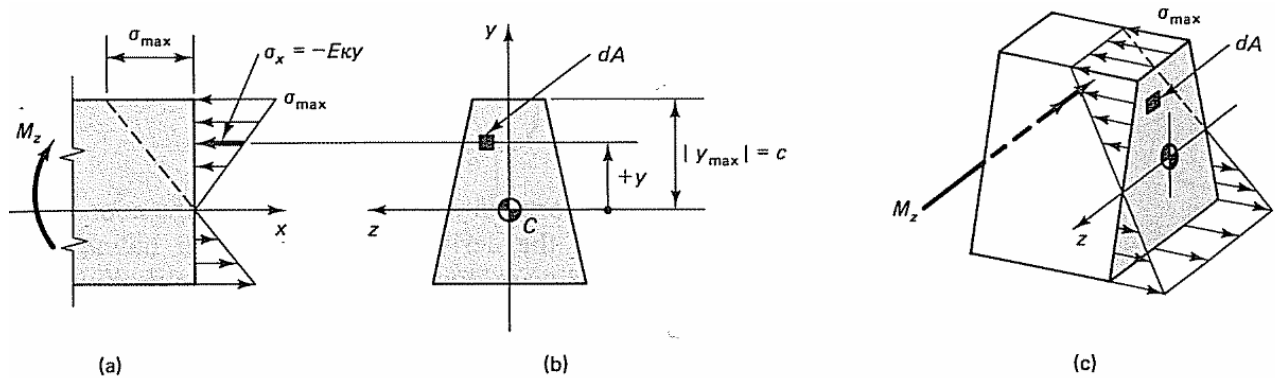
Para este estudo será considerada uma viga prismática horizontal cuja seção tem um eixo vertical de simetria. O eixo vertical de simetria passa pelo centróide de todas as seções coincidente com o eixo da viga. A **Figura 29** (a) mostra uma vista lateral desses planos, formando uma grade retangular. Quando a viga é submetida a momentos de flexão positivos "M" em suas extremidades como na **Figura 29** (b), a viga flexiona, os planos perpendiculares ao eixo da viga giram, os planos horizontais curvam-se e linhas como a AD e BC permanecem retas. Quando uma é submetida à flexão as seções planas desta, tomadas normalmente ao seu eixo, permanecem planas [22].



**Figura 29** - Viga submetida a flexão

Em uma viga submetida à flexão, as deformações em suas fibras variam linearmente com suas respectivas distâncias à sua superfície neutra. O carregamento em flexão descrito pode ser observado na **figura 30**. As deformações variam linearmente à superfície neutra e estão associadas com as tensões que atuam normalmente à seção da viga. Aplicando-se a Lei de Hooke ao material obtemos " $\sigma_x$ ", a única tensão não nula, conforme a equação (23). A constante " $k$ " pode ser relacionada com o momento fletor aplicado e as propriedades da seção transversal da viga.

$$\sigma_x = E \epsilon_x = -E \kappa y \quad (23)$$



**Figura 30** - Viga submetida a flexão

As equações (24) e (25) descrevem as equações de equilíbrio da viga para o momento e força na seção da viga na posição  $x$ . A equação (26) indica o momento de inércia da seção transversal em relação a um eixo que passa por sua centróide. As equações (27), (28) e (29) mostram o desenvolvimento do momento " $M$ " aplicado sobre a viga. A equação (30) indica a tensão máxima na flexão elástica de vigas [22] [24].

$$\sum F_x := 0 \quad \rightarrow \quad \int_A \sigma_x dA := 0 \quad (24)$$

$$\sum M_x := 0 \quad \rightarrow \quad \int_A \sigma_x dA \cdot y + M := 0 \quad (25)$$

$$I := \int_A y^2 dA \quad \rightarrow \quad \int_A B \cdot y da := B \cdot \int_A y dA = 0 \quad \rightarrow \quad \int_A y dA := y_{\text{neutro}} \cdot A \quad (26)$$

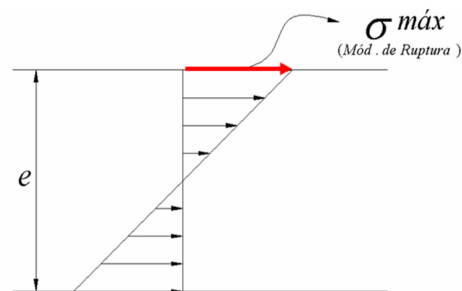
$$M := -B \cdot \int_A y^2 dA \quad \rightarrow \quad M := -B \cdot I \quad (27)$$

$$\sigma_x := -E \cdot k \cdot y \quad \rightarrow \quad \sigma_x := B \cdot y \quad (28)$$

$$\sigma_x := \frac{M \cdot y}{I} \quad (29)$$

$$\sigma_{\text{max}} := \frac{M \cdot c}{I} \quad (30)$$

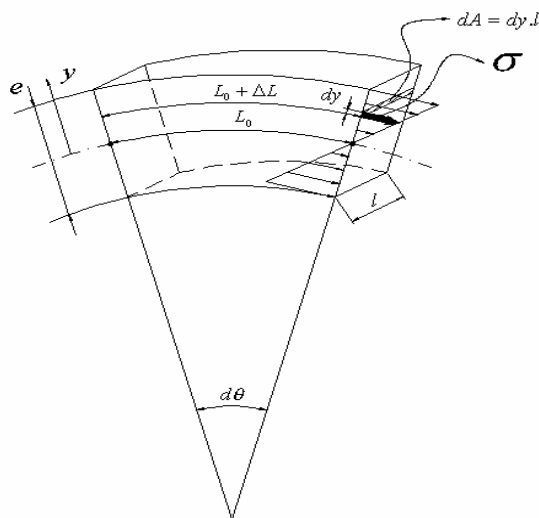
Observa-se que a tensão máxima " $\sigma_{\text{max}}$ " ocorre na posição mais externa a superfície neutra da viga ou " $y_{\text{max}}$ ". A viga em flexão estará sujeita a tensões de compressão e tração ao longo da superfície neutra, onde ocorre a transição entre os regimes de compressão e tração, conforme mostrado na **Figura 31**. Na figura a parte superior, acima da superfície neutra (onde ocorre a mudança do sentido das tensões) observa-se um carregamento em tração e a parte inferior a compressão.



**Figura 31** - Distribuição de tensões em uma viga submetida a flexão

A viga submetida a um momento apresentará uma deformação formando um arco de raio "R" como mostrado na **Figura 32**. Consideramos "R" como a distância do centro de giro da viga sob flexão até a interseção com o plano neutro, "Lo" o comprimento entre dois

pontos arbitrários na viga antes da flexão na linha neutra, “ $y$ ” a distância da linha neutra ao ponto mais externo da viga, “ $d\theta$ ” o ângulo entre os dois pontos hipotéticos na linha neutra após a aplicação da flexão, “ $dy$ ” a distância entre a linha neutra ao centróide da viga e “ $\Delta L$ ” a variação no comprimento da viga devido a flexão. Os deslocamentos em uma viga submetida a flexão estão determinadas nas equações (31) e (32). As deformações específicas da viga nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  são dadas respectivamente pelas equações (34), (35) e (36). A equação (34) define que a deformação normal longitudinal específica “ $\epsilon_x$ ” varia linearmente com a distância “ $y$ ” da superfície neutra [21].



**Figura 32** - Viga submetida a flexão

A deformação da viga provocada pelo momento fletor “ $M$ ” pode ser medida pela curvatura da superfície neutra. A curvatura é definida como o inverso do raio da curvatura “ $R$ ”, “ $c$ ” como a distância do centróide da viga ao topo da viga, e pode ser obtida resolvendo-se a equação (37) para  $1/R$  obtemos a equação (38) que determina a curvatura “ $R$ ” provocada pelo momento “ $M$ ”.

Para este estudo foi considerado uma viga de seção reta retangular de seção constante, base “ $b$ ” e altura “ $h$ ”, sendo seu momento polar de inércia calculado pela equação (39). Substituindo-se (39) em (38) obtemos o raio de curvatura para a viga de seção retangular, equação (40). Para comparar os materiais, igualamos os raios de flexão das vigas para obter as razões de altura e área, dadas pelas equações (41) e (42) respectivamente.



$$L_0 := R \cdot d\theta \quad (31)$$

$$L_0 + \Delta L := (R + y) \cdot d\theta \quad (32)$$

$$\Delta L := (R + y) \cdot d\theta - R \cdot d\theta \quad \rightarrow \quad \Delta L := y \cdot d\theta \quad (33)$$

$$\varepsilon_x := \frac{\Delta L}{L_0} \quad \rightarrow \quad \varepsilon_x := \frac{y \cdot d\theta}{R \cdot d\theta} \quad \rightarrow \quad \varepsilon_x := \frac{y}{R} \quad (34)$$

$$\varepsilon_y := -v \cdot \varepsilon_x \quad \rightarrow \quad \varepsilon_y := \frac{v \cdot y}{R} \quad (35)$$

$$\varepsilon_z := -v \cdot \varepsilon_x \quad \rightarrow \quad \varepsilon_z := \frac{v \cdot y}{R} \quad (36)$$

$$\varepsilon_m := \frac{c}{R} \quad (37)$$

$$\frac{1}{R} := \frac{\varepsilon_m}{c} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R} := \frac{\sigma_m}{E \cdot c} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R} := \frac{1}{E \cdot c} \cdot \frac{M \cdot c}{I} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R} := \frac{M}{E \cdot I} \quad (38)$$

Para fins de estudo serão comparados o alumínio ao aço com três critérios de projeto: 1) raios de curvatura iguais, 2) aplicação de momento máximo (limite de escoamento), e 3) limite de fadiga. O estudo considerará o uso de um material homogêneo e isotrópico, dentro do regime elástico e sem a ocorrência de impacto.

$$I \text{ de uma seção retangular} \quad I := \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (39)$$

$$\rightarrow \quad \frac{1}{R} := \frac{M}{E \cdot I} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R} := \frac{M \cdot 12}{E \cdot b \cdot h^3} \quad (40)$$

Considerando :  $R_{\text{aço}} := R_{\text{alumínio}}$

$$\rightarrow \quad \frac{M \cdot 12}{E_{\text{aço}} \cdot b \cdot h_{\text{aço}}^3} := \frac{M \cdot 12}{E_{\text{alumínio}} \cdot b \cdot h_{\text{alumínio}}^3}$$

$$\rightarrow \quad \frac{h_{\text{alumínio}}}{h_{\text{aço}}} := \left( \frac{E_{\text{aço}}}{E_{\text{alumínio}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (41)$$

$$\rightarrow \quad \frac{A_{\text{alumínio}}}{A_{\text{aço}}} := \frac{E_{\text{aço}} \cdot h_{\text{aço}}^2}{E_{\text{alumínio}} \cdot h_{\text{alumínio}}^2} \quad (42)$$

### Critério 1 – Raios de Curvatura Iguais

Para a flexão serão considerados tensões abaixo do limite de escoamento e pequenas deformações. Com isso, os deslocamentos são tais que a deformação angular varia linearmente a partir do centro do eixo. O momento polar de inércia considerado é de uma seção circular para uma viga retangular. Para o estudo, será considerado constante a largura da base “b” da viga e será avaliada a diferença na altura “h” da viga para comparar os materiais aço e alumínio sob o efeito da flexão de forma à viga apresentar o mesmo raio de curvatura.

A análise mostra que duas vigas de perfis retangulares feitas de alumínio AA 356-T6 e ferro fundido EN-GJS-350-22 de mesma base “b” e submetidas a um mesmo momento fletor “M” para terem o mesmo raio de curvatura exigirá que a viga de alumínio tenha uma altura “h” 32,9% maior do que a viga de ferro fundido, representando um igual aumento na área. A massa da viga de alumínio equivalerá com isso a 50,2% a massa da viga de ferro (redução de massa de 49,8%).

$$E_{\text{fofo}} := 169\text{GPa}$$

$$E_{\text{aluminio}} := 72\text{GPa}$$

$$\rho_{\text{fofo}} := 7.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{\text{aluminio}} := 2.68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rightarrow h_{\text{aluminio}} := \left( \frac{E_{\text{fofo}}}{E_{\text{aluminio}}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot h_{\text{fofo}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{h_{\text{aluminio}}}{h_{\text{fofo}}} = 1.329}$$

$$\rightarrow A_{\text{aluminio}} := A_{\text{fofo}} \cdot \frac{E_{\text{fofo}}}{E_{\text{aluminio}}} \cdot \left( \frac{h_{\text{fofo}}}{h_{\text{aluminio}}} \right)^2 \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{fofo}}} = 1.329}$$

$$\rightarrow m_{\text{aluminio}} := m_{\text{fofo}} \cdot \frac{\rho_{\text{aluminio}} \cdot h_{\text{aluminio}}}{\rho_{\text{fofo}} \cdot h_{\text{fofo}}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{m_{\text{aluminio}}}{m_{\text{fofo}}} = 0.502}$$

A mesa análise agora feita com o alumínio AA 6061-T6 e o aço AISI 1020 mostra que para terem o mesmo raio de curvatura a viga de alumínio deverá ter uma altura “h” 41,9% maior do que a viga de aço, representando um igual aumento na área. A massa da viga de alumínio equivalerá a 49,1% a massa da viga de aço (redução de massa de 50,9%).

$$E_{\text{aço1020}} := 200\text{GPa} \quad E_{\text{al6061}} := 70\text{GPa}$$

$$\rho_{\text{aço1020}} := 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad \rho_{\text{al6061}} := 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rightarrow h_{\text{al6061}} := \left( \frac{E_{\text{aço1020}}}{E_{\text{al6061}}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot h_{\text{aço1020}} \quad \rightarrow \boxed{\frac{h_{\text{al6061}}}{h_{\text{aço1020}}} = 1.419}$$

$$\rightarrow A_{\text{al6061}} := A_{\text{aço1020}} \cdot \frac{E_{\text{aço1020}}}{E_{\text{al6061}}} \cdot \left( \frac{h_{\text{aço1020}}}{h_{\text{al6061}}} \right)^2 \quad \rightarrow \boxed{\frac{A_{\text{al6061}}}{A_{\text{aço1020}}} = 1.419}$$

$$\rightarrow m_{\text{al6061}} := m_{\text{aço1020}} \cdot \frac{\rho_{\text{al6061}} \cdot h_{\text{al6061}}}{\rho_{\text{aço1020}} \cdot h_{\text{aço1020}}} \quad \rightarrow \boxed{\frac{m_{\text{al6061}}}{m_{\text{aço1020}}} = 0.491}$$

### Critério 2 - Limite de Escoamento

Para a análise com o critério do limite de escoamento foram consideradas as mesmas hipóteses do critério de meso raio de flexão e adicionalmente foi considerado que a superfície neutra da viga está localizada na metade da altura da viga. Com isso, a partir das equações (38) e (39) isolamos o momento máximo que pode ser aplicado à viga dentro do regime elástico.

$$\sigma_{\text{max}} := \frac{M \cdot c}{I} \quad I := \frac{b \cdot h^3}{12} \quad c := \frac{1}{2} h$$

$$\rightarrow \sigma_{\text{max}} := \frac{12M \cdot h}{2 \cdot b \cdot h^3} \quad \rightarrow \sigma_{\text{max}} := \frac{6M}{b \cdot h^2} \quad \rightarrow M := \frac{\sigma_{\text{max}} \cdot b \cdot h^2}{6} \quad (43)$$

$$\rightarrow M_{\text{max\_aço}} := M_{\text{max\_aluminio}}$$

$$\rightarrow \frac{R_{y\text{aço}} \cdot b \cdot h_{\text{aço}}^2}{6} := \frac{R_{y\text{aluminio}} \cdot b \cdot h_{\text{aluminio}}^2}{6}$$

$$\rightarrow \frac{h_{\text{aluminio}}}{h_{\text{aço}}} := \left( \frac{R_{y\text{aço}}}{R_{y\text{aluminio}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (44)$$

$$\rightarrow \frac{A_{\text{aluminio}}}{A_{\text{aço}}} := \frac{R_{y\text{aço}} \cdot h_{\text{aço}}}{R_{y\text{aluminio}} \cdot h_{\text{aluminio}}} \quad (45)$$

Equiparando o momento máximo que as vigas de aço e alumínio devem suportar, isola-se a razão entre as alturas das vigas de alumínio e aço ( $h_{\text{alumínio}}/h_{\text{aço}}$ ). Com isso, isolamos a razão entre as alturas das vigas conforme a equação (44) e área pela equação (45). Ambos os materiais serão analisados no regime elástico, ou seja, as tensões máximas “Mmax” estarão nos limites de escoamento dos materiais.

	$R_{y_{\text{alumínio}}} := 186\text{MPa}$	$\rho_{\text{alumínio}} := 2.68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	
Dados	$R_{y_{\text{fofo}}} := 220\text{MPa}$	$\rho_{\text{fofo}} := 7.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	
→	$h_{\text{alumínio}} := \left( \frac{R_{y_{\text{fofo}}}}{R_{y_{\text{alumínio}}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot h_{\text{fofo}}$	→	$\frac{h_{\text{alumínio}}}{h_{\text{fofo}}} = 1.088$
→	$A_{\text{alumínio}} := A_{\text{fofo}} \cdot \frac{R_{y_{\text{fofo}}} \cdot h_{\text{fofo}}}{R_{y_{\text{alumínio}}} \cdot h_{\text{alumínio}}}$	→	$\frac{A_{\text{alumínio}}}{A_{\text{fofo}}} = 1.088$
→	$m_{\text{alumínio}} := m_{\text{fofo}} \cdot \frac{\rho_{\text{alumínio}} \cdot h_{\text{alumínio}}}{\rho_{\text{fofo}} \cdot h_{\text{fofo}}}$	→	$\frac{m_{\text{alumínio}}}{m_{\text{fofo}}} = 0.411$

Na comparação do alumínio AA 356-T6 com o ferro fundido EN-GJS-350-22 a razão encontrada indica que a viga de alumínio precisará ter uma altura e área 8,8% maior do que a de ferro fundido para suportar o mesmo momento fletor no seu limite de escoamento e uma massa equivalente de 41,1% (redução de massa de 58,9%).

	$R_{y_{\text{al6061}}} := 276\text{MPa}$	$\rho_{\text{al6061}} := 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	
Dados	$R_{y_{\text{aço1020}}} := 350\text{MPa}$	$\rho_{\text{aço1020}} := 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	
→	$h_{\text{al6061}} := \left( \frac{R_{y_{\text{aço1020}}}}{R_{y_{\text{al6061}}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot h_{\text{aço1020}}$	→	$\frac{h_{\text{al6061}}}{h_{\text{aço1020}}} = 1.126$
→	$A_{\text{al6061}} := A_{\text{aço1020}} \cdot \frac{R_{y_{\text{aço1020}}} \cdot h_{\text{aço1020}}}{R_{y_{\text{al6061}}} \cdot h_{\text{al6061}}}$	→	$\frac{A_{\text{al6061}}}{A_{\text{aço1020}}} = 1.126$
→	$m_{\text{al6061}} := m_{\text{aço1020}} \cdot \frac{\rho_{\text{al6061}} \cdot h_{\text{al6061}}}{\rho_{\text{aço1020}} \cdot h_{\text{aço1020}}}$	→	$\frac{m_{\text{al6061}}}{m_{\text{aço1020}}} = 0.39$

A mesma comparação feita com o alumínio AA 6061-T6 com o aço AISI 1020 indica que a viga de alumínio precisará ter uma altura e área 12,6% maior do que a de aço para suportar o mesmo momento fletor no seu limite de escoamento e uma massa equivalente de 39% (redução de massa de 61%).

### Critério 3 - Limite de Fadiga

Para a comparação entre o aço e o alumínio no limite de fadiga foram usados os mesmos critérios e materiais para o critério do limite de escoamento. As equações (44) e (45) foram modificadas para usar os limites de fadiga “Rf” no lugar dos limites de escoamento “Ry”.

A comparação do alumínio AA 356-T6 com o ferro fundido EN-GJS-350-22 a razão encontrada indica que a viga de alumínio precisará ter uma altura e área 12,5% maior do que a de ferro fundido para suportar o mesmo momento fletor no seu limite de fadiga e uma massa equivalente de 42,5% (redução de massa de 57,5%).

	$R_{f_{aluminio}} := 90\text{MPa}$	$\rho_{aluminio} := 2.68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	
Dados	$R_{f_{fofo}} := 114\text{MPa}$	$\rho_{fofo} := 7.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	
→	$h_{aluminio} := \left( \frac{R_{f_{fofo}}}{R_{f_{aluminio}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot h_{fofo}$	→	$\frac{h_{aluminio}}{h_{fofo}} = 1.125$
→	$A_{aluminio} := A_{fofo} \cdot \frac{R_{f_{fofo}} \cdot h_{fofo}}{R_{f_{aluminio}} \cdot h_{aluminio}}$	→	$\frac{A_{aluminio}}{A_{fofo}} = 1.125$
→	$m_{aluminio} := m_{fofo} \cdot \frac{\rho_{aluminio} \cdot h_{aluminio}}{\rho_{fofo} \cdot h_{fofo}}$	→	$\frac{m_{aluminio}}{m_{fofo}} = 0.425$

A mesma comparação feita com o alumínio AA 6061-T6 com o aço AISI 1020 indica que a viga de alumínio precisará ter uma altura 16,1% maior do que a de aço para suportar o mesmo momento fletor no seu limite de escoamento, com uma área 16,1% maior e uma massa equivalente de 40,2% a massa da peça de aço (redução de massa de 59,8%).

Dados

$$R_{f_{al6061}} := 96.5 \text{ MPa} \quad \rho_{al6061} := 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$R_{f_{aço1020}} := 130 \text{ MPa} \quad \rho_{aço1020} := 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rightarrow h_{al6061} := \left( \frac{R_{f_{aço1020}}}{R_{f_{al6061}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot h_{aço1020} \quad \rightarrow \boxed{\frac{h_{al6061}}{h_{aço1020}} = 1.161}$$

$$\rightarrow A_{al6061} := A_{aço1020} \cdot \frac{R_{f_{aço1020}} \cdot h_{aço1020}}{R_{f_{al6061}} \cdot h_{al6061}} \quad \rightarrow \boxed{\frac{A_{al6061}}{A_{aço1020}} = 1.161}$$

$$\rightarrow m_{al6061} := m_{aço1020} \cdot \frac{\rho_{al6061} \cdot h_{al6061}}{\rho_{aço1020} \cdot h_{aço1020}} \quad \rightarrow \boxed{\frac{m_{al6061}}{m_{aço1020}} = 0.402}$$

### 3.4 RESULTADOS

Os resultados das comparações feitas por cálculo analítico entre os perfis simétricos usando o alumínio para fundição AA 356-T6 e o ferro fundido EN-GJS-350-22 nas condições de carregamento axial, em torção e flexão estão apresentadas na **Tabela 10** com as variações de área e massa obtidas. Os resultados das comparações com os mesmos critérios e condições usando o alumínio AA 6061-T6 e o aço SAE 1020 estão apresentadas na **Tabela 11**, conforme os cálculos apresentados.

**Tabela 9** – Comparação entre o alumínio AA 356-T6 e o ferro fundido EN-GJS-350-22

	Deslocamento		Limite de Escoamento		Limite de Fadiga	
	$\Delta area$	$\Delta massa$	$\Delta area$	$\Delta massa$	$\Delta area$	$\Delta massa$
<b>Carregamento Axial</b>	2,347	0,886	1,183	0,446	1,267	0,478
<b>Carregamento Torcional</b>	1,529	0,577	1,118	0,422	1,171	0,442
<b>Carregamento em Flexão</b>	1,329	0,502	1,088	0,411	1,125	0,425

**Tabela 10** – Comparação entre o alumínio AA 6061-T6 e o aço SAE 1020

	Deslocamento		Limite de Escoamento		Limite de Fadiga	
	$\Delta area$	$\Delta massa$	$\Delta area$	$\Delta massa$	$\Delta area$	$\Delta massa$
<b>Carregamento Axial</b>	2,857	0,989	1,268	0,439	1,347	0,466
<b>Carregamento Torcional</b>	1,676	0,580	1,172	0,406	1,172	0,406
<b>Carregamento em Flexão</b>	1,419	0,491	1,126	0,390	1,161	0,402

#### 4. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS E RESULTADOS

Existem diversas configurações, tipos de construção, materiais, sistemas de freio e suspensão e acessórios usados em eixos traseiros trativos para veículos comerciais dependendo das condições de uso ou aplicação as quais o veículo trabalhará. A **Figura 33** mostra um eixo traseiro de tração simples onde pode-se observar nas seções em corte os sistemas de freios, diferencial e o par de engrenagens coroa e pinhão.



**Figura 33** - Eixo traseiro para veículos comerciais MS-17X da Meritor do Brasil Ltda.

Para a análise por FEA de aplicabilidade de ligas de alumínio na fabricação de um eixo traseiro de veículo comercial foi criado um modelo virtual em 3D da estrutura de um eixo simplificado para uso neste estudo, conforme apresentado na **Figura 34**. O modelo foi feito no software de CAD Pro/Engineer Wildfire 4.0. As dimensões usadas no modelo são compatíveis com as de aplicações em produtos similares atualmente em uso no mercado automotivo na faixa de carga de 10 toneladas sobre o eixo (GAWR).



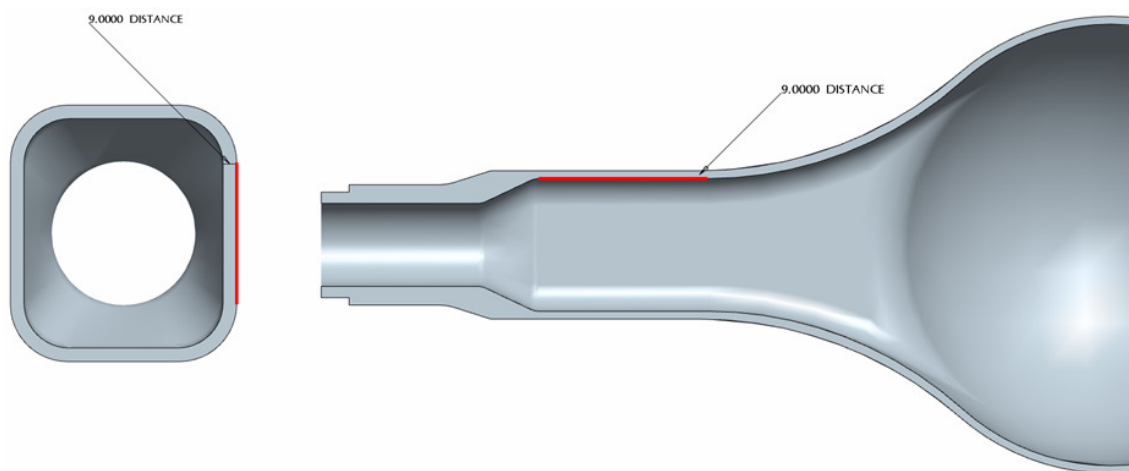
**Figura 34** - Modelo 3D da carcaça em ferro fundido para simulação por FEA

Ao longo de todo o comprimento da estrutura foram mantidas as mesmas dimensões externas, 150 x 170 mm para base e altura. Para obter as diferentes espessuras

foram variados as dimensões internas da base, altura e o diâmetro interno na região do diferencial. Como referência para a análise comparativa foi feita uma simulação em um modelo de ferro fundido com espessura de 9 mm. A partir dessa referência foram realizadas simulações em modelos de alumínio com as espessuras iniciando em 9 mm (mesma dimensão da referência), com incrementos de 3 mm. A **Tabela 11** mostra a designação dada aos modelos dos eixos, os materiais usados, espessura do eixo, dimensões da seção do eixo (“box section”) e a massa dos modelos virtuais de eixos usados nas análises por FEA. A **Figura 35** mostra a vista em corte do modelo 3D usado na simulações indicando a seção do “box section” e as posições onde foram controlados a espessura do eixo.

**Tabela 11** – Informações sobre os modelos usados nas simulações

Modelo	Material	Densidade	Massa	Espessura	Box Section	
					Interno	Externo
Fofo 1	EN-GJS-350-22	7.1 g/cm <sup>3</sup>	96.0 kg	9 mm	132 x 152 mm	150 x 170 mm
Alum 1	356-T6	2.68 g/cm <sup>3</sup>	36.2 kg	9 mm	132 x 152 mm	150 x 170 mm
Alum 2	356-T6	2.68 g/cm <sup>3</sup>	43.8 kg	12 mm	126 x 146 mm	150 x 170 mm
Alum 3	356-T6	2.68 g/cm <sup>3</sup>	49.9 kg	15 mm	120 x 140 mm	150 x 170 mm
Alum 4	356-T6	2.68 g/cm <sup>3</sup>	57.1 kg	18 mm	114 x 136 mm	150 x 170 mm
Alum 5	356-T6	2.68 g/cm <sup>3</sup>	64.1 kg	21 mm	108 x 108 mm	150 x 170 mm
Alum 6	356-T6	2.68 g/cm <sup>3</sup>	70.9 kg	24 mm	102 x 122 mm	150 x 170 mm



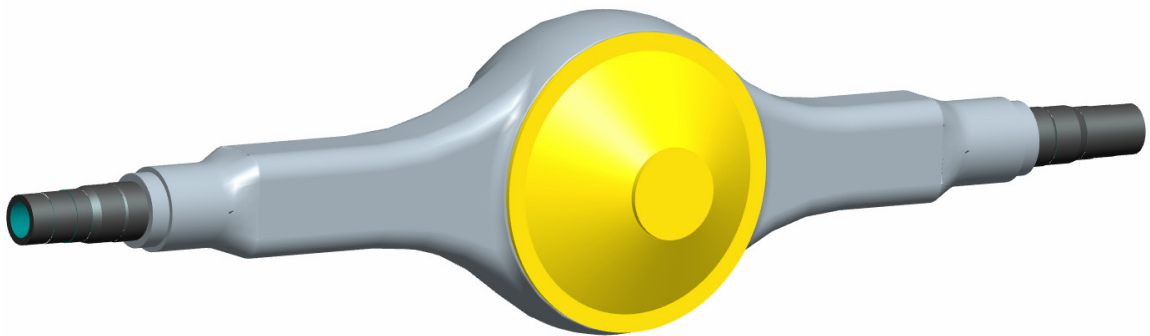
**Figura 35** - Vista em corte do modelo 3D do eixo trativo traseiro usado no FEA

Para as simulações foram escolhidos como materiais para os eixos o alumínio AA 356-T6 e o ferro fundido EN-GJS-350-22. Devido a geometria e forma construtiva do eixo em estudo é necessária a escolha de materiais para fundição. Para as análises por FEA foram designados os mesmos materiais usados nos cálculos analíticos apresentados.



As propriedades mecânicas designadas para o eixo com alumínio AA 356-T6 ou ferro fundido DIN EN-GJS-350-22 foram as mesmas usadas nos cálculos analíticos apresentações na seção 4 e conforme os dados apresentados na **Tabela 4**. Nos modelos das extremidades e da caixa do diferencial foram designados as propriedades mecânicas do aço estrutural, módulo de Young de 200 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

Para a simulação por FEA foram modelados os componentes que completam a montagem do eixo e têm função estrutural e necessários à preparação das condições de contorno da simulação. Não foram considerados os elementos internos como o conjunto do diferencial, semi-eixos, par coroa e pinhão ou outros. O conjunto montado usado na simulação está apresentado na **Figura 36**. Nas extremidades foram modeladas as pontas de eixo, componentes em aço onde são montados os rolamentos e os cubos de roda (cor preta). Na frente do eixo foi modelado uma caixa do diferencial simplificada (cor amarela). Nesse conjunto usualmente são montados o par de engrenagens coroa e pinhão, o conjunto do diferencial e quando aplicável o sistema pneumático de bloqueio do diferencial. No modelo da caixa do diferencial foram usadas as mesmas propriedades de material do eixo em análise. Em todas as simulações e configurações foram usados os mesmos modelos da caixa do diferencial e extremidades, montadas nas mesmas posições.



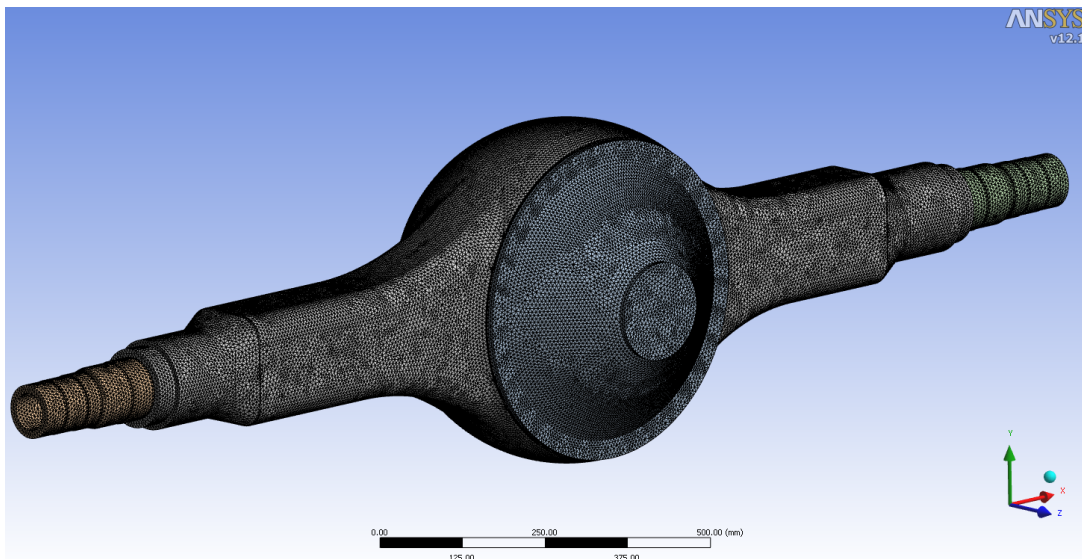
**Figura 36** - Esquema das Condições de Contorno

A montagem das extremidades no eixo usualmente é feita através de uma montagem com interferência e a caixa do diferencial é comumente montada através de uma união aparafusada. Nas simulações por FEA foi considerado um contato conhecido como "bonded" onde não há movimento relativo entre os nós dos elementos das extremidades e do eixo. A mesma abordagem foi usada entre a caixa do diferencial e o eixo.

Os carregamentos considerados para o estudo são da condição estática da massa sobre o eixo (GAWR). Um fator multiplicador de projeto é usualmente aplicado sobre

a carga estática para estimar a carga dinâmica [24]. Esse fator de segurança é específico para as diversas cargas atuantes sobre o veículo e é determinada a partir de medições em campo, normas de engenharia das empresas responsáveis pelos sistemas automotivos e pelas montadoras. Para fins deste estudo não será considerado o uso desses fatores multiplicadores devido à sua confidencialidade uma vez que trata-se de uma informação crítica de desenvolvimento. Por outro lado, por tratar-se de uma análise comparativa entre os materiais, o não uso do fator multiplicador não terá um impacto significativo nos resultados.

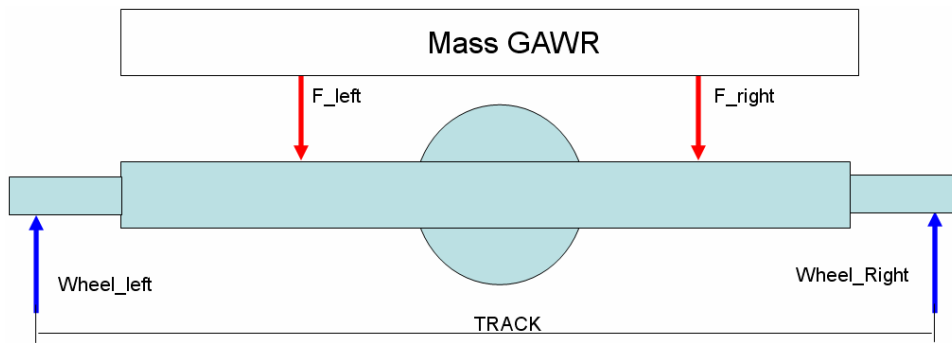
A geração da malha para a simulação foi feita com o ANSYS versão 12.1. A malha gerada foi feita com elementos tetraédricos limitados a 6mm entre os nós em todos os componentes usados no conjunto do eixo, somando aproximadamente 1,5 milhões de elementos em todo o modelo. A malha resultante está apresentada na **Figura 37**.



**Figura 37** - Malha gerada no ANSYS para o modelo do eixo em ferro fundido

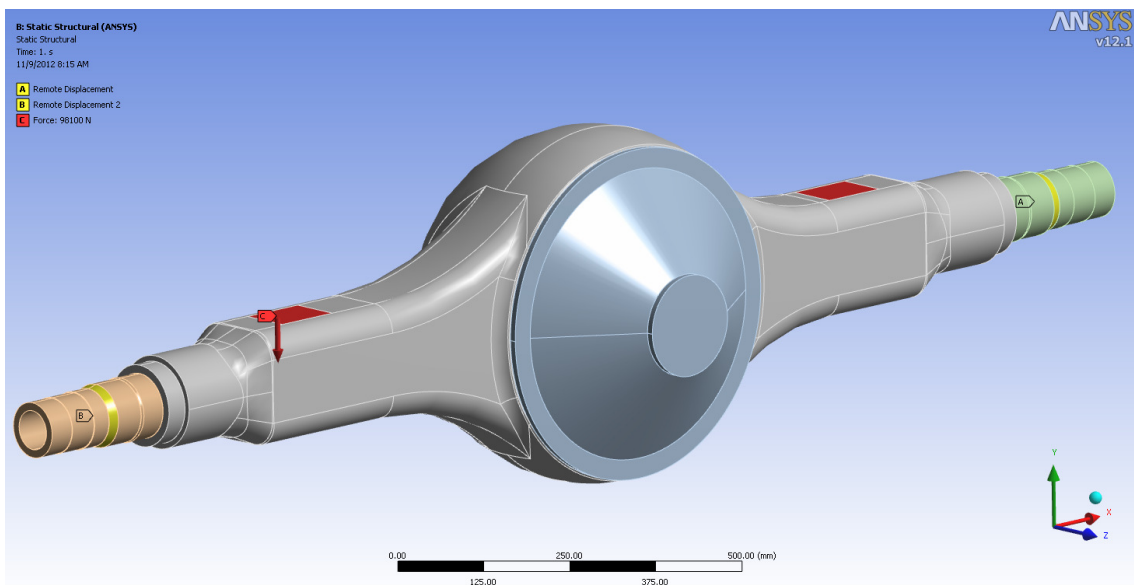
## 5.1 CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO VERTICAL

Para as condições de contorno do carregamento vertical para a simulação por FEA foi considerada uma massa bruta sobre o eixo (GAWR) de 10 toneladas, bitola ou distância entre as linhas de aplicação de carga sobre as rodas de 1880mm indicado no diagrama de corpo livre do eixo, **Figura 38**.



**Figura 38** - Esquema das condições de contorno de carregamento vertical

O peso devido à massa está distribuído em duas áreas iguais equidistantes ao centro do eixo aproximadamente no local onde estão os feixes de mola dos veículos. Na imagem estão representadas como "F\_left" e "F\_right" os vetores de força devido ao peso sobre o eixo (GAWR) e como "Wheel\_left" e "Wheel\_right" os vetores dos pontos de apoio do eixo onde o eixo está restringido, **Figura 39**. Esses pontos estão posicionados aproximadamente na região onde os cubos de roda e pneus estão apoiados e por onde passa-se uma linha imaginária de carga máxima de transferência da massa para o solo.

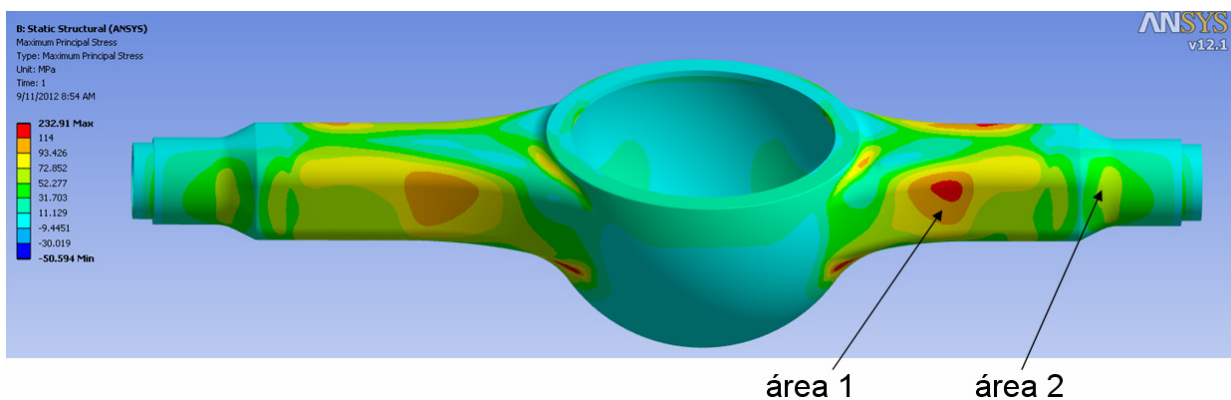


**Figura 39** - Condições de contorno aplicadas no carregamento vertical no ANSYS

Foram simulados diversos modelos com o mesmo carregamento e diferentes espessuras com dois objetivos: a) tensões abaixo do limite de fadiga do alumínio; e b) deslocamento vertical igual ao modelo em ferro fundido. Nas simulações procurou-se

encontrar resultados no modelo em alumínio com o mesmo comportamento do modelo em ferro fundido como substituto.

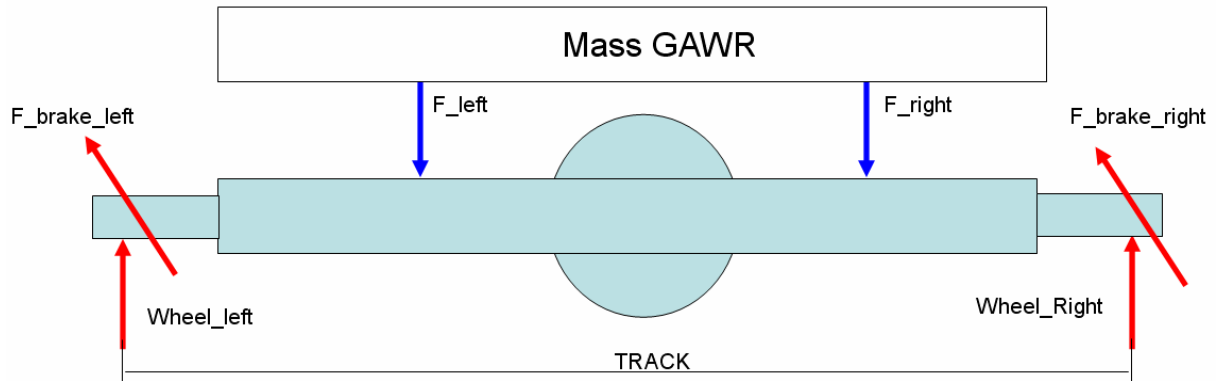
As tensões resultantes da simulação foram observadas pela formulação de Máximas Principais em todos os modelos. Os resultados da simulação indicam duas áreas de tensões críticas, a primeira área na parte de baixo da carcaça próxima ao raio maior e a segunda próxima à extremidade, identificadas como áreas críticas 1 e 2 na **Figura 40**. Na imagem os componentes foram ocultados para a visualização exclusiva do eixo. Para a análise também foi observado o deslocamento máximo no eixo vertical, identificado como "vertical displacement".



**Figura 40** - Resultado da análise em tensões máximas principais - Áreas Críticas 1 e 2

## 5.2 CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO HORIZONTAL (FRENAGEM)

Para as condições de contorno do carregamento vertical para a simulação por FEA foi considerada a mesma massa bruta sobre o eixo (GAWR) de 10 toneladas usada na simulação do carregamento vertical. Para o carregamento horizontal foi considerada condição de frenagem do veículo. Foi também considerada a mesma bitola ou distância entre as linhas de aplicação de carga sobre as rodas de 1880mm indicado no diagrama de corpo livre do eixo, **Figura 41**.

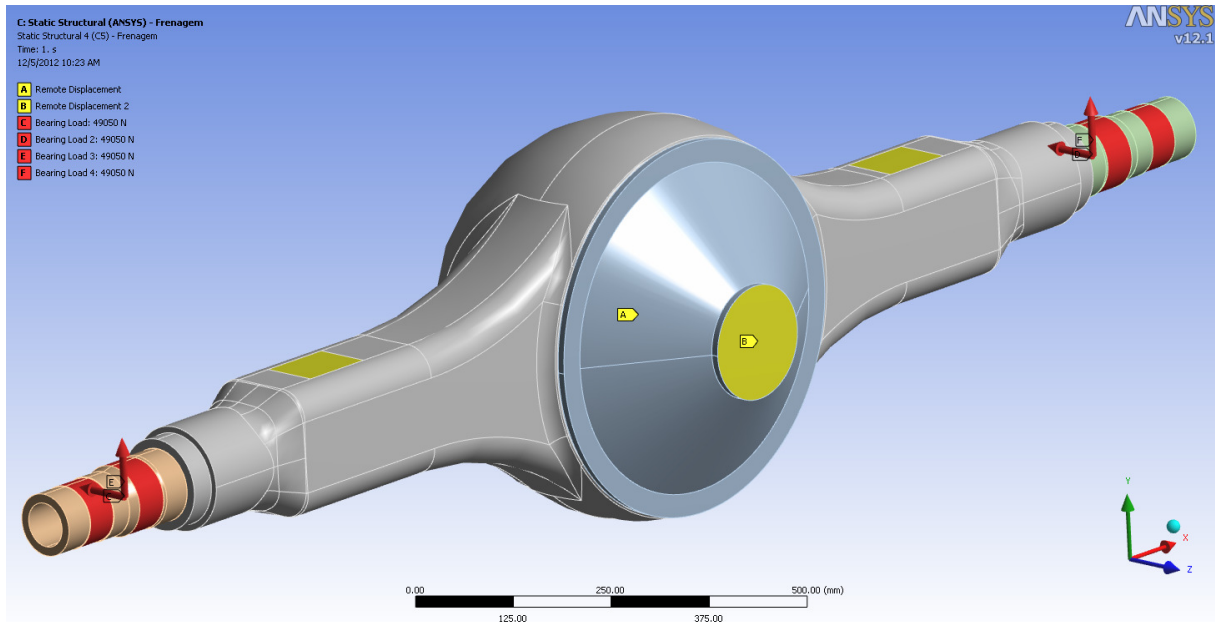


**Figura 41** - Esquema das condições de contorno de carregamento horizontal

As condições de contorno são similares às da simulação do carregamento vertical. Porém, foram adicionados os vetores de força devido à reação de frenagem nas rodas representadas como "F\_brake\_left" e "F\_brake\_right". Os movimentos foram restringidos nas regiões dos apoios de mola e as cargas verticais de reação devido a massa sobre o eixo foram aplicadas nas áreas dos apoios dos rolamentos dos cubos de roda.

Na frenagem o veículo tenderá a permanecer em movimento devido a sua inércia e o conjunto de freios estará criando um sistema de forças que de forma macro ao veículo fará com que apareça uma forma de reação entre os pneus e o piso, na forma de uma força de atrito. Essa força de atrito tem seu valor máximo atingido no limite do atrito estático entre os pneus e o piso, ou seja, o limite antes do início da derrapagem dos pneus. O conjunto de freios dos veículos é usualmente projetado para proporcionar uma capacidade de frenagem muitas vezes superior ao limite de derrapagem dos pneus por motivos de segurança. Para fins do estudo sobre as forças atuando sobre os eixos dos veículos é comum usar a abordagem do limite de derrapagem dos pneus.

Na desaceleração máxima do veículo, considerado o limite de escorregamento ou derrapagem dos pneus sobre o asfalto em uma pista plana, o coeficiente de atrito entre os pneus e o asfalto varia entre 0,6 e 0,8. Usando-se esses fatores de atrito estático, a desaceleração máxima teórica para o veículo (considerando que todos os eixos comparam-se igualmente) seria de 0,8g. Para fins de simplificação do modelo foi considerado uma desaceleração máxima de 1g. As condições de contorno para a simulação do carregamento horizontal estão representadas na **Figura 42**.

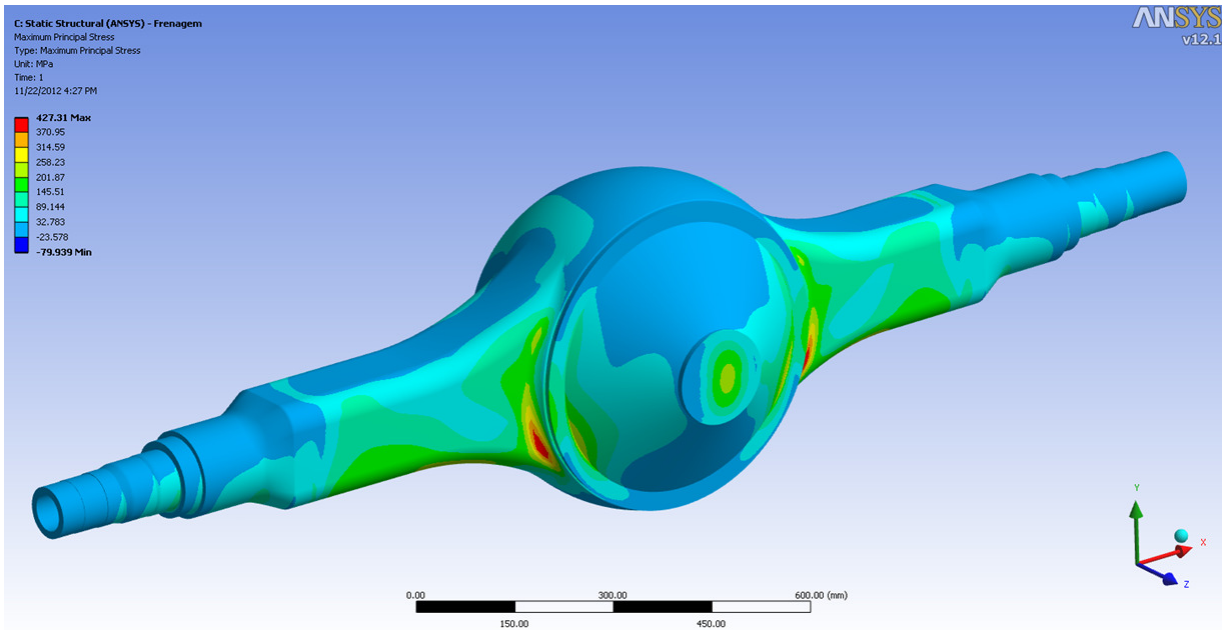


**Figura 42** - Condições de contorno aplicadas no carregamento horizontal de frenagem

As restrições de deslocamento foram colocadas nas regiões dos apoios de mola e na caixa do diferencial. Nos apoios de mola o deslocamento vertical (eixo y) e as rotações nas direções vertical e longitudinal foram restringidos; na caixa do diferencial foi feita a restrição horizontal nas duas direções, longitudinal e lateral ao veículo.

Assim como na simulação do carregamento vertical foram simulados diversos modelos com o mesmo carregamento e diferentes espessuras com dois objetivos: a) tensões abaixo do limite de fadiga do alumínio; e b) deslocamento vertical igual ao modelo em ferro fundido. Nas simulações procurou-se encontrar resultados no modelo em alumínio com o mesmo comportamento do modelo em ferro fundido como substituto.

As tensões resultantes da simulação foram observadas pela formulação de Máximas Principais em todos os modelos. Os resultados da simulação indicam duas áreas de tensões críticas próximas ao raio maior na região de transição da caixa do diferencial para as "pernas" do eixo, identificadas na **Figura 43**. Na imagem os componentes foram ocultados para a visualização exclusiva do eixo. Para a análise também foi observado o deslocamento máximo na direção horizontal longitudinal ao veículo, identificado como "horizontal displacement".



**Figura 43** - Resultado da análise em tensões máximas principais

Os resultados das análises por elementos finitos dos modelos de eixo em ferro e alumínio fundido na condição de carregamento vertical com os valores de deslocamento vertical e tensão nas áreas críticas estão apresentadas nas **Tabelas 12 e 13**.

**Tabela 12** – Resultados das análises por FEM no carregamento vertical

Modelo	Material	Massa	Espessura	Vertical Displacement	Tension Critical Area 1	Tension Critical Area 2
Fofo 1	EN-GJS-350-22	96.0 kg	9 mm	-1.83 mm	119 MPa	70 MPa
Alum 1	356-T6	36.2 kg	9 mm	-4.09 mm	120 MPa	64 MPa
Alum 2	356-T6	43.8 kg	12 mm	-2.99 mm	86 MPa	58 MPa
Alum 3	356-T6	49.9 kg	15 mm	-2.61 mm	74 MPa	56 MPa
Alum 4	356-T6	57.1 kg	18 mm	-2.25 mm	62 MPa	54 MPa
Alum 5	356-T6	64.1 kg	21 mm	-2.01 mm	54 MPa	53 MPa
Alum 6	356-T6	70.9 kg	24 mm	-1.85 mm	50 MPa	51 MPa

**Tabela 13** – Resultados das análises por FEM no carregamento horizontal - frenagem

Modelo	Material	Massa	Espessura	Horizontal Displacement	Tension Critical Area
Fofo 1	EN-GJS-350-22	96.0 kg	9 mm	-4.9 mm	427 MPa
Alum 1	356-T6	36.2 kg	9 mm	-10.9 mm	429 MPa
Alum 2	356-T6	43.8 kg	12 mm	-8.4 mm	267 MPa
Alum 3	356-T6	49.9 kg	15 mm	-7.4 mm	212 MPa
Alum 4	356-T6	57.1 kg	18 mm	-6.4 mm	166 MPa
Alum 5	356-T6	64.1 kg	21 mm	-5.7 mm	137 MPa
Alum 6	356-T6	70.9 kg	24 mm	-5.3 mm	121 MPa
Alum 7	356-T6	77.6 kg	27 mm	-4.9 mm	110 MPa

## 5. DISCUSSÃO

Na primeira parte do estudo foram comparadas ligas de alumínio e de materiais ferrosos em perfis simples submetida a carregamentos uniaxial, torsional e em flexão através de critérios de projeto mesma deformação, limite de escoamento e de fadiga. Na segunda parte do estudo foram comparados uma liga de alumínio para fundição e um ferro fundido em um modelo virtual de eixo traseiro de veículo comercial submetido a condições de carregamento vertical e horizontal através dos critérios de mesmo deslocamento e tensão. Os resultados obtidos em todos os estudos estão apresentados na **Tabela 14**. Na tabela estão apresentados os materiais, carregamentos, critérios de projetos e como resultados as variações de massa, área ou espessura e a redução de massa observada com o uso das ligas de alumínio em comparação com os materiais ferrosos.

**Tabela 14** – Resultados consolidados dos cálculos analíticos e simulações por FEA

#	Materiais - Carregamento - Critério de Projeto	$\Delta$ massa	Redução de massa	$\Delta$ area $\Delta$ despes.
A	AA 6061-T6 x SAE 1020 - Flexão - Escoamento	0,390	61,0%	1,126
B	AA 6061-T6 x SAE 1020 - Flexão - Fadiga	0,402	59,8%	1,161
C	AA 6061-T6 x SAE 1020 - Torsional - Escoamento	0,406	59,4%	1,172
D	AA 6061-T6 x SAE 1020 - Torsional - Fadiga	0,406	59,4%	1,172
E	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Flexão - Escoamento	0,411	58,9%	1,088
F	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Torsional - Escoamento	0,422	57,8%	1,118
G	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Flexão - Fadiga	0,425	57,5%	1,125
H	AA 6061-T6 x SAE 1020 - Axial - Escoamento	0,439	56,1%	1,268
I	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Torsional - Fadiga	0,442	55,8%	1,171
J	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Axial - Escoamento	0,446	55,4%	1,183
K	AA 6061-T6 x SAE 1020 - Axial - Fadiga	0,466	53,4%	1,347
L	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Axial - Fadiga	0,478	52,2%	1,267
M	AA 6061-T6 x SAE 1020 - Flexão - Deslocamento	0,491	50,9%	1,419
N	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Flexão - Deslocamento	0,502	49,8%	1,329
O	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Torsional - Deslocamento	0,577	42,3%	1,529
P	AA 6061-T6 x SAE 1020 - Torsional - Deslocamento	0,580	42,0%	1,676
Q	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Eixo CAD - Carga Vertical	0,738	26,2%	2,667
R	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Eixo CAD - Carga Horizontal	0,808	19,2%	3,000
S	AA 356-T6 x EN-GJS-350-22 - Axial - Deslocamento	0,886	11,4%	2,347
T	AA 6061-T6 x SAE 1020 - Axial - Deslocamento	0,989	1,1%	2,857

Os resultados indicam que há um potencial significativo de redução de massa com o uso de ligas de alumínio que pode alcançar 61% sem prejuízo ao comportamento mecânico de componentes ou conjuntos mecânicos dependendo das condições de carregamento a das condição de aplicação envolvidas.



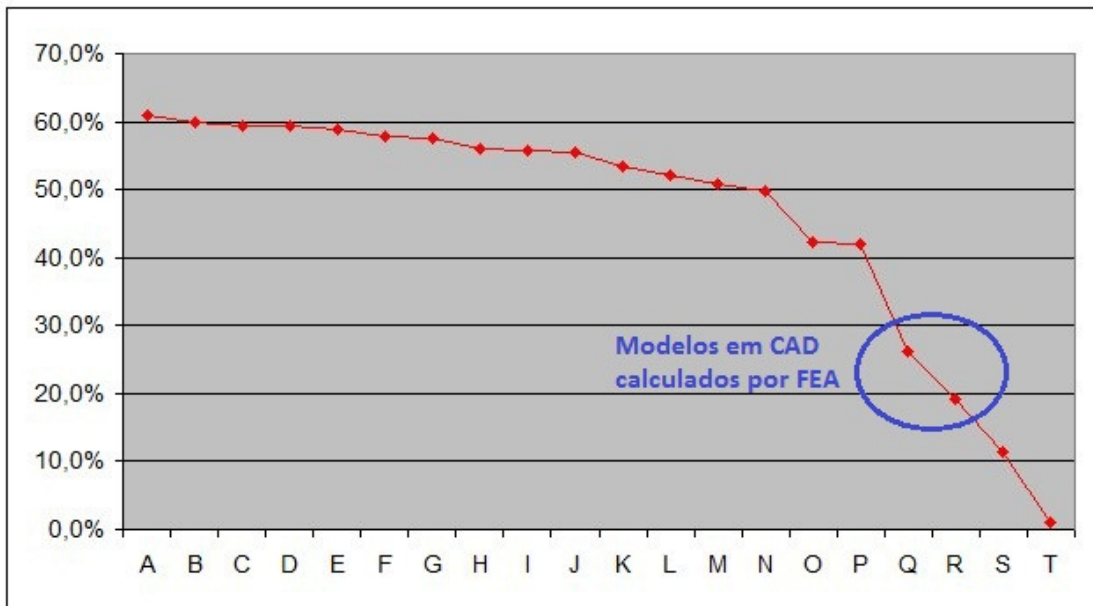
Foram consideradas na Tabela 14 como resultados consolidados apenas as simulações por FEA que alcançaram os critérios de projeto impostos de mesmo deslocamento e tensões inferiores ao modelo de referência, as quais estão apresentados como os itens Q e R. Os resultados obtidos mostram que na condição de carregamento vertical, o eixo de alumínio para ter o mesmo comportamento mecânico do eixo em ferro fundido precisará ter um aumento em sua espessura de 2,6 vezes e no carregamento horizontal um aumento de espessura de 3 vezes. Apesar desse aumento dimensional em ambos os casos foram observados reduções de massa de 19,2% e 26,2% nas situações de carregamento horizontal e vertical respectivamente. Estes resultados são coerentes com os resultados obtidos nos cálculos analíticos feitos na primeira parte do estudo.

Nos materiais ferrosos os nódulos de grafita característicos dos ferros fundidos nodulares podem ser considerados na prática como entalhes metalúrgicos, que podem facilmente nuclear trincas de fadiga, o que reduz sua resposta quando se pensa em fadiga de alto ciclo, onde se admite que as ligas ferrosas apresentam um limite de resistência a fadiga bem definido. As ligas não ferrosas não apresentam limite de resistência a fadiga definido o que as colocaria em desvantagem em fadiga de elevado número de ciclos, ao serem comparadas com ligas ferrosas. Este raciocínio não se aplica no presente caso, visto a elevada quantidade de entalhes metalúrgicos nos ferros fundidos nodulares. Mesmo assim no presente trabalho a comparação levou em conta tensões para  $10^6$  ciclos de fadiga no caso do ferro fundido e carregamento para  $10^8$  ciclos para a liga de alumínio.

Estas considerações conservadoras favorecem as características do ferro fundido em detrimento às características das ligas de alumínio. Porém, é conhecido que os ferros fundidos possuem nódulos de grafita dispersos e irregularidades como bolhas, contaminantes, porosidades e outras características que serão responsáveis pelo aparecimento de trincas e conseqüente falha do componente por fadiga. Os defeitos de peças construídas por meio de fundição usualmente são controladas por critérios de sanidade definidos entre a empresa de fundição e seu cliente. Mesmo com um controle de sanidade rigoroso é esperado que as peças fabricadas pelo processo de fundição tenham uma vida em fadiga inferior as peças fabricadas com materiais extrudados ou laminados.

Os resultados de redução de massa obtidos em todos os estudos estão apresentados na **Figura 44**. Os resultados das simulações por FEA dos eixos comerciais virtuais nas duas condições estudadas estão entre os mais baixos resultados em termos de redução de massa observados, conforme ressaltado na Figura 44 os itens Q e R. Não foi

buscado neste trabalho o melhor design para o eixo tendo sido mantido como objetivo principal o estudo sobre os materiais.



**Figura 44** – Resultados de redução de massa consolidados

Como esperado, estes resultados indicam que os eixos estudados estão submetidos a condições de tensão diferentes ao longo de seu comprimento devido a sua geometria e carregamentos complexos. O design de um novo eixo adaptado ao uso de ligas de alumínio pode conseguir melhores resultados de massa buscando as mesmas condições de carregamento de flexão e torção, conforme mostrado nos itens A à D, evitando-se as condições de carregamento uniaxial onde foram observados os maiores deslocamentos lineares.

O estudo cuidadoso das condições ambientais de aplicação do componente mecânico deve ser conduzido com a devida profundidade. Como exemplo, a construção de cascos de iates e veleiros em ligas de alumínio tem-se mostrado uma alternativa com inúmeras vantagens para as condições ambientais da aplicação naval frente a outros materiais [25]. Este estudo foi feito usando-se um eixo de veículo comercial e as possibilidades de aplicação do alumínio como material estrutural pode estender-se a diversas áreas como a civil, naval, aeroespacial, ferroviária, médica, bioengenharia entre outras.

## 6. CONCLUSÃO

O estudo pelo método analítico mostrou na comparação entre os materiais ferrosos e o alumínio ganhos em termos de redução de massa no uso do alumínio sem perda das características de projeto como deformação, resistência ao escoamento e resistência à fadiga. As reduções de massa observadas variaram de 1,1% a 61,0%.

O estudo feito pelo método dos elementos finitos em um modelo virtual de eixo traseiro de veículos comercial, comparando a liga de alumínio para fundição AA 356-T6 ao ferro fundido DIN EN-GJS-350-22 mostrou um ganho em termos de redução de massa de 26,2% e 19,2% atendendo aos critérios de projeto propostos nas condições de carregamento vertical e horizontal respectivamente.

O estudo indica que há potencial na substituição de materiais ferrosos pelas ligas de alumínio nos eixos de veículos comerciais e outros elementos estruturais com significativa redução de massa. A redução de massa alcançada neste estudo pode ser maximizada com técnicas de otimização de projeto combinadas ao levantamento e uso das condições de cargas mais próximas as que o eixo estará submetido em sua aplicação real.

Como uma possível continuidade a este estudo sugere-se o desenvolvimento de um projeto de estrutura para uma aplicação automotiva real, simulações por FEA com as condições de carga das aplicações, prototipagem de eixos em escala real para ensaios de fadiga em laboratórios e testes em campo em veículos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CANTOR, B.; Automotive Engineering Lightweight, Functional and Novel Materials, Taylor Y Francis Group, 2008, p.20, p.26
2. MINATO, K., Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, 54–9, 2000, 11.
3. TURNER, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C., Topp, L.J., Stiffness and deflection analysis of complex structures. J. Aeronaut. Sci., 1956, 23, 805–23.
4. FISH, J.; Belytschko, A First Course in Finite Elements, Ed. John Wiley & Sons, 2007
5. ANSYS, Workbench Introduction, 1<sup>st</sup> edition, Inventory No.002593, 2009, p.2-14, p.3-7
6. WONG, J.Y. Theory of Ground Vehicles, 3<sup>rd</sup> edition, Jon Wiley & Sons, 2001, p.2
7. GILLESPIE, T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics, 1<sup>st</sup> edition, SAE, 1992, p.22
8. LEITMAN, S., Build Your Own Electric Vehicle, 2nd Edition, McGrawHill, 2009, p.113
9. CONTRAN - CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – Res. nº 12/98, 184/05 e 62/98
10. Código de Trânsito Brasileiro - artigos 99 e 100
11. <http://www.bssa.org.uk> – British Stainless Steel Association (BSSA), 2012
12. ASM Handbook, Vol.2: Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 2007
13. ASM Handbook, Fatigue and Fracture, Volume 19, ASM, 1996, p.2012, p.2043, p.2044
14. <http://www.matweb.com>, MatWeb Automation Creations Inc., 2012
15. KEY TO METALS, Key to Metals Database, Key to Metals AG, 2012
16. CALLISTER, W. D.; Ciência e Engenharia dos Materiais, 7<sup>a</sup> edição, John Wiley & Sons, 2007, p.137
17. SHAMES, I.H., Introdução à Mecânica dos Sólidos, Prentice Hall, 1983, p.71, p.76
18. RAHMAN, M.M.; Fatigue Behavior of 6000 Series Aluminum Alloys on Cylinder Block of a Free Piston Linear Engine Using Total Life Approach
19. [http://www.abal.org.br/aluminio/ligas\\_fundicao.asp](http://www.abal.org.br/aluminio/ligas_fundicao.asp), ABAL, 2012
20. VATAVUK, J; Apostila do Curso de Análise de Falhas e Prevenção, 2012, p.11, 13, 20
21. BEER, P.F., Mecânica dos Materiais, 5<sup>a</sup> Edição, McGrawHill, 2011, p.81, p.153, p.235
22. POPOV, E.P., Introdução à Mecânica dos Sólidos, Ed.Edgard Blucher, 1982, p.137, p.171
23. BEER, P.F., Resistência dos Materiais, 4a.Edição, McGrawHill, 2006, p.125
24. MALEN, D.E., Fundamentals of Automobile Body Structure Design, Ed. SAE International, 2011, p.24, p.40
25. STUMP, T.; VATAVUK, J., A Construção Naval em Liga de Alumínio, 2000, Revista Mackenzie de Engenharia Ano 1 Número 1, São Paulo, ISSN 1518-7470