



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Coordenação acadêmica do curso de Engenharia Mecânica

Engenharia Mecânica

CAMILLA FRANCIELLE FERNANDES DA SILVA

**APLICAÇÃO DA ENGENHARIA VIRTUAL COMO ALTERNATIVA PARA ANÁLISE
ESTRUTURAL DE FADIGA NO SETOR AUTOMOBILÍSTICO: UM ESTUDO DE
CASO**

Recife

2023

CAMILLA FRANCIELLE FERNANDES DA SILVA

**APLICAÇÃO DA ENGENHARIA VIRTUAL COMO ALTERNATIVA PARA ANÁLISE
ESTRUTURAL DE FADIGA NO SETOR AUTOMOBILÍSTICO: UM ESTUDO DE
CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à Coordenação de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa

Recife

2023

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Danielle Castro da Silva CRB4/1457

S586a
2024

Silva, Camilla Francielle Fernandes da

Aplicação da engenharia virtual como alternativa para análise estrutural de fadiga no setor automobilístico: um estudo de caso. / Camilla Francielle Fernandes da Silva. --- Recife: o autor, 2024.
58f. il. Color.

Trabalho de Conclusão (Curso Superior Tecnológico em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

Inclui Referências.

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

1. Engenharia virtual. 2. Setor automobilístico. 3. Análise estrutural. 4. Elementos finitos. 5. Fadiga. I. Título. II. Costa, José Ângelo Peixoto da (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1

**APLICAÇÃO DA ENGENHARIA VIRTUAL COMO ALTERNATIVA PARA ANÁLISE
ESTRUTURAL DE FADIGA NO SETOR AUTOMOBILÍSTICO: UM ESTUDO DE
CASO**

Trabalho aprovado. Recife, 10/01/2024.

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa
Professor Orientador

Prof.^a Dr. Andrea Gonçalves de Souza
Avaliador Interno

Msc. Vagner Abramchuk
Avaliador Externo

Recife

2023

Ao meu avô Manoel (in memoriam) cuja vontade de aprender algo novo nunca
cessou.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar sabedoria, inteligência e saúde para completar mais essa tarefa.

Aos meus pais Roselia e Pedro e às minhas irmãs, Steffane e Natasha, pelo apoio, paciência e por me darem condições para a dedicação integral aos estudos durante a graduação.

Ao meu companheiro Netto, por ser meu par dentro e fora da faculdade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa pela compreensão e por embarcar nessa atividade.

Aos meus colegas de graduação, por todo incentivo, amizade e companheirismo durante e após o curso.

Ao IFPE pelas oportunidades e por todo o conhecimento adquirido ao longo da minha jornada acadêmica.

À presente banca nessa defesa.

A todos que indiretamente ou diretamente me ajudaram na minha jornada.

"Uma mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original" -

Albert Einstein

RESUMO

A economia de tempo, recursos financeiros e a sustentabilidade, estão entre os principais desafios encontrados no desenvolvimento de um produto. Indústrias automotivas, por exemplo, necessitam constantemente aprimorar os projetos de motores, diante da demanda pela redução dos níveis de consumo sem perder o rendimento. Nesse contexto, simulações numéricas têm exercido papel fundamental, pois ao utilizar modelos computacionais, é possível realizar simulações em um ambiente controlado, sem a necessidade de construir protótipos físicos, os quais, posteriormente, seriam descartados. Isso agiliza o processo de desenvolvimento de novos produtos e permite a identificação de possíveis problemas estruturais de forma mais rápida e eficiente. O presente trabalho analisou a durabilidade de um suporte do alternador & compressor sujeito a fadiga. Por meio da aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF), foram realizadas simulações para avaliar como a estrutura do suporte se comporta sob diferentes condições de carga. Para tanto, utilizou-se os softwares HyperMesh® e HyperView® da empresa Altair para o pré-processamento e pós-processamento, respectivamente e o software FEMFAT® da empresa Magna para o processamento. Dentre as condições de hubload e aceleração investigadas para o suporte, todas apresentaram resultados dentro do target estabelecido. No ciclo de fadiga Hubload, o resultado do coeficiente de segurança foi de 2,33, enquanto nos casos de aceleração, foram registrados valores de 1,44, 1,67 e 1,45, para os eixos x, y e z, respectivamente. Diante da capacidade de simular a durabilidade do suporte quantas vezes forem necessárias, permitindo a realização de projetos mais confiáveis e de maior flexibilidade para adaptar-se às mudanças, o potencial do método de elementos finitos como ferramenta aplicada para cálculo de fadiga demonstra ser uma alternativa propícia.

Palavras-chave: elementos finitos; análise estrutural; fadiga; engenharia virtual; setor automobilístico

ABSTRACT

The economy of time, financial resources, and sustainability are among the main challenges encountered in product development. Automotive industries, for example, constantly need to improve engine designs in response to the demand for reducing consumption levels without sacrificing performance. In this context, numerical simulations have played a fundamental role because by using computational models, it is possible to conduct simulations in a controlled environment without the need to build physical prototypes, which would later be discarded. This speeds up the process of developing new products and allows for the identification of possible structural problems more quickly and efficiently. The present work analyzed the durability of an alternator & compressor bracket subject to fatigue. By applying the Finite Element Method (FEM), simulations were performed to evaluate how the bracket structure behaves under different loading conditions. To do this, the HyperMesh® and HyperView® software from Altair were used for pre-processing and post-processing, respectively, and the FEMFAT® software from Magna was used for processing. Among the hubload and acceleration conditions investigated for the bracket, all presented results within the established target. In the Hubload fatigue cycle, the safety coefficient result was 2.33, while in the acceleration cases, values of 1.44, 1.67, and 1.45 were recorded for the x, y, and z axes, respectively. Given the ability to simulate the durability of the bracket as many times as necessary, allowing for the development of more reliable projects and greater flexibility to adapt to changes, the potential of the finite element method as an applied tool for fatigue calculation demonstrates to be a suitable alternative.

Keywords: finite elements; structural analysis; fatigue; virtual engineering; automotive industry

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Motor de combustão interna quatro cilindros	18
Figura 2- Ciclo do motor 4 Tempos- Ignição por centelha	20
Figura 3- Alternador fixado no suporte	21
Figura 4- Compressor fixado no suporte	22
Figura 5- Suporte do alternador & compressor	22
Figura 6- Fluxo para análise por elementos finitos	25
Figura 7- Malha de elementos finitos	27
Figura 8- Representação da malha de um modelo com diferentes quantidades de elementos	28
Figura 9- Tipos de elementos finitos	29
Figura 10- Representação de resultados	30
Figura 11- Iniciação e propagação de trinca	33
Figura 12- Fadiga uniaxial e multiaxial	34
Figura 13 - Aparência de ruptura de um metal por FBC	35
Figura 14- Aparência de ruptura de um metal por FAC	36
Figura 15- Curva S-N do material a partir de ensaios de fadiga	36
Figura 16- Curva S-N obtida através da aplicação dos fatores modificadores	39
Figura 17- Fases e ferramentas para o desenvolvimento da análise	40
Figura 18- Modelo representativo do motor	41
Figura 19- Geometria CAD suporte do alternador & compressor	42
Figura 20- Propriedades do Alumínio A380	43
Figura 21- Parâmetros para confecção da malha	44
Figura 22- Parâmetros de qualidade da malha	44
Figura 23- Interação entre componentes através de contatos	45
Figura 24- Superfícies de contato	45
Figura 25- Componentes ligados ao suporte	46
Figura 26- Curva S-N do Alumínio A380	48
Figura 27- Diagrama de Haigh para o Alumínio A380	48
Figura 28- Etapas do pós-processamento	49
Figura 29- Malha obtida no HyperMesh	50
Figura 30- Coeficiente de segurança para o ciclo de Hubload	51
Figura 31- Coeficiente de segurança para a aceleração em X	52
Figura 32- Coeficiente de segurança para a aceleração em Y	52
Figura 33- Coeficiente de segurança em Z	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Comparação entre o método experimental e simulações numéricas	23
Tabela 2- Especificidades da sugestão	41
Tabela 3- Carregamentos máximos e mínimos	47
Tabela 4- Configurações da malha	50

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

C_C – Fator modificador de corrosão

C_D – Fator modificador de tamanho

C_L – Fator modificador de carregamento

C_M – Fator modificador de tensão média

C_R – Fator modificador de confiabilidade

C_{RO} – Fator modificador de rugosidade

C_{ST} – Fator modificador de tratamento superficial

C_T – Fator modificador de carregamento

ECS –Engineering Center Stever

f – Função

FA – Fluido Ativo

FAC– Fadiga Alto Ciclo

FBC– Fadiga Baixo Ciclo

FEAD– Front End Accessory Drive

FEM – Finite Element Method

FEMFAT® – Finite Element Method Fatigue

HPC – High-Performance Computing

IFPE – Instituto Federal de Pernambuco

MCI – Motor de Combustão Interna

MEF – Método dos Elementos Finitos

N – Número de ciclos

PMI – Porto Morto Inferior

PMS – Porto Morto Superior

s_f – Tensão de Fadiga

σ_a – Amplitude de Tensão

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão Máxima

$\sigma_{m\acute{i}n}$ – Tensão Mínima

σ_a – Amplitude de Tensão

σ_m – Tensão média

σ_r – Variação de Tensão

SOP – Standard Operating Procedures

V– Volume

V.A – Válvula de Admissão

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	16
1.2 Objetivo Geral	17
1.3 Objetivos Específicos	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Motor a combustão interna (MCI)	18
2.1.1 Funcionamento do MCI	19
2.1.2 Componentes relacionados ao motor	20
2.1.2.1 Alternador	21
2.1.2.2 Compressor	21
2.1.2.3 Suporte do Alternador & Compressor	22
2.2 Computer Aided Engineering – CAE	23
2.3 Método dos elementos finitos (MEF)	24
2.3.1 Definições	24
2.3.2 Simulação através do MEF	25
2.3.2.1 Análise preliminar	26
2.3.2.2 Pré-processamento	26
2.3.2.2.1 Malha	26
2.3.2.2.2 Condições de contorno	29
2.3.2.3 Processamento	30
2.3.2.4 Pós- processamento	30
2.3.2.5 Software HyperWorks®	31
2.4 Critérios de falha	31
2.4.1 Critérios dependentes do tempo	32
2.4.1.1 Fadiga	32
2.4.1.1.1 Software FEMFAT® para cálculo de fadiga	38
3 METODOLOGIA	40
3.1. Definição do problema	40
3.2 Pré-processamento	41
3.2.1 Análise preliminar	41
3.2.2 Importação e tratamento da geometria	42
3.2.3 Definição do material	42
3.2.4 Geração da malha	43

3.2.5 Contatos	44
3.2.6 Condições de contorno e carregamento	45
3.3 Processamento	47
3.4 Pós- processamento	47
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	50
4.1 Convergência da malha	50
4.2 Critério de fadiga	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.1 Trabalhos futuros	54
REFERENCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O mercado automotivo, conhecido por sua alta competitividade, demanda uma diferenciação constante dos produtos, abrangendo elementos como o design inovador do motor, tecnologia avançada e recursos de segurança, fatores primordiais para atrair consumidores. Para atender essa exigência de mercado, torna-se imprescindível a busca por avanços significativos em cada componente, pois em motores que se deseja mais potência e melhor desempenho, por exemplo, há a necessidade de desenvolver componentes mais leves e, ao mesmo tempo, mais resistentes, favorecendo assim, um menor consumo de combustível.

Nesse contexto, uma área fundamental no desenvolvimento de motores é a avaliação e validação dos componentes mecânicos, uma vez que a determinação da vida útil desses elementos é indispensável para garantir sua adequada funcionalidade.

Neto (2010) destaca que a validação do processo de desenvolvimento envolve a realização de uma variedade de testes, seja em laboratório ou em pista, com o propósito de verificar se as peças integrantes do motor atendem aos requisitos de projeto, às especificações de engenharia e às normas governamentais.

A fase de validação demanda a produção de peças protótipo e dispositivos consumindo tempo considerável e exigindo um alto investimento. Para a validação de um sistema, subsistema, ou peça é muitas vezes necessário até a construção de motores completos (Neto, 2010: p.18).

Considerando a perspectiva de Neto (2010), sobre a importância de realizar testes para validar novos produtos no mercado, o qual demanda um significativo consumo de tempo e investimento, têm-se mostrado como uma tendência em diversos setores na indústria a aplicação de ferramentas computacionais. Essas ferramentas possibilitam por meio do método de elementos finitos, a realização de simulações numéricas que representem de maneira fiel os problemas reais enfrentados na engenharia, viabilizando a avaliação dos efeitos de distintos parâmetros, como alterações na geometria, redução de peso da estrutura e no tipo de material, sem a necessidade da construção de protótipos para testes.

O processo de verificação da durabilidade virtual, ou estimativa de vida do produto, é feito por meio de três estágios:

- 1- Determinação dos carregamentos atuantes;
- 2- Cálculo estrutural (verificação de tensão e deformação atuantes)
- 3- Estimativa de vida em Fadiga

A etapa de determinação dos carregamentos atuantes é frequentemente, considerada a mais complexa para a determinação da durabilidade, pois envolve a consideração de diversas variantes, como condições de operações, ciclos de cargas variáveis e interações complexas.

1.1 Motivação

A grande maioria das falhas e/ou desgastes de componentes mecânicos que se encontram em serviços ocorrem devido à fadiga do material (Garcia,2000), impactando diretamente a segurança e a confiabilidade dos motores. Conseqüentemente, as indústrias realizam ensaios de durabilidade desses elementos no ambiente para o qual foram projetados. No entanto, esses ensaios em geral têm custo elevado e podem demandar um longo tempo para serem realizados.

Ao considerar um defeito de fabricação de uma peça em altos níveis de produção, o impacto econômico e logístico de falhas na durabilidade do produto torna-se ainda mais expressivo. Essa conjuntura destaca a necessidade de aprimorar as práticas de análise estrutural na fase de desenvolvimento, buscando soluções inovadoras e eficazes.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo desta monografia é utilizar a Engenharia Auxiliada por Computador (CAE), para avaliar a durabilidade de um suporte do alternador & compressor sujeito a esforços de fadiga.

1.3 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar análise estática por meio do MEF utilizando condições de contorno que possam representar os esforços submetidos ao suporte do alternador/compressor;
- Realizar análise de fadiga usando métodos computacionais;
- Avaliar os resultados obtidos e a aplicação da Engenharia Virtual como alternativa para o cálculo de Fadiga;

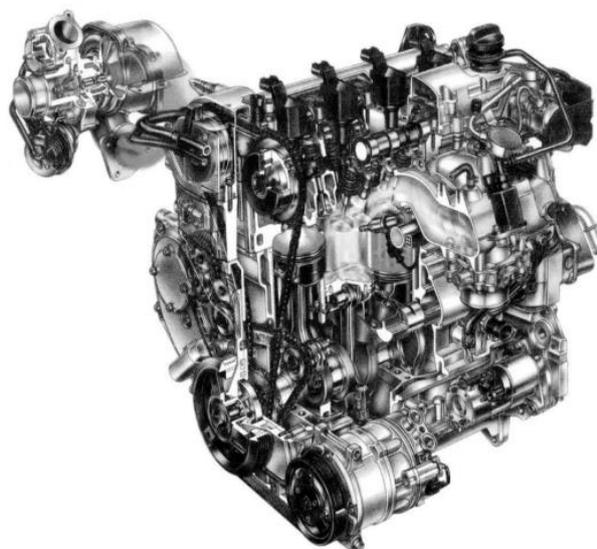
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda conceitos fundamentais que sustentam e orientam a presente pesquisa, oferecendo uma visão das teorias, modelos e estudos relacionados ao tema em discussão.

2.1 Motor a combustão interna (MCI)

O Motor a combustão interna, é uma máquina térmica que possibilita transformar calor em trabalho (BRUNETTI, 2018), através da queima de um combustível (TILLMANN, 2013). No caso de um MCI a energia química do combustível é convertida em energia térmica por meio de combustão ou oxidação com ar no interior do motor, mais precisamente pode-se dizer que a mistura ar-combustível e os produtos da combustão, que formam o fluido ativo (FA), estão em contato direto com os componentes mecânicos que fazem a conversão em trabalho (HEYWOOD, 2018). Na Figura 1, é exemplificado um motor de combustão interna.

Figura 1- Motor de combustão interna quatro cilindros



Fonte: HEYWOOD, 2018

Segundo Heywood (2018), existem diversos tipos de MCI, sendo algumas dessas classificações:

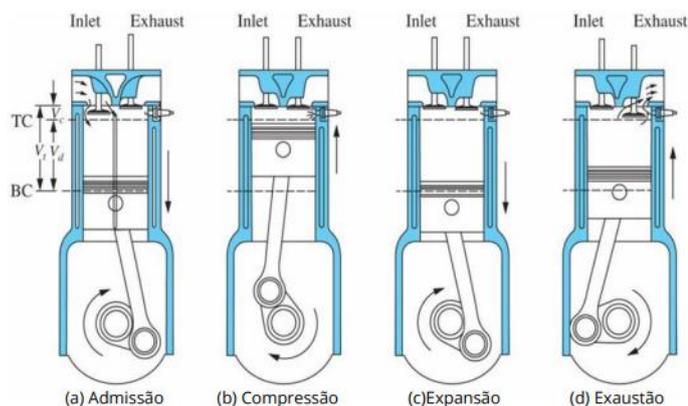
- Aplicação: Automóveis, ônibus, locomotiva, geração de energia;
- Projeto do motor: Distribuição dos cilindros e pistões;
- Ciclo de trabalho: 4 tempos e 2 tempos;
- Combustível: Gasolina, gás natural, hidrogênio, etanol, diesel, entre outros;
- Método de ignição: Ignição por centelha ou Ignição por compressão;
- Controle de cooling: Resfriamento a água, ar, convecção;
- Método de controle de carga: Variando o fluxo de combustível e ar juntos para que a mistura composta permaneça essencialmente inalterada;
- Projeto e localização da válvula ou porta: Ciclo de quatro tempos- Válvulas suspensas, válvulas inferiores (ou L-head), com duas, três ou quatro válvulas por cilindro e controle de válvula fixa ou variável, válvulas rotativas. Ciclo de dois tempos: portas com limpeza cruzada, portas eliminadas por loop, eliminado por fluxo

Todas essas distinções são importantes e demonstram a variedade de motores disponíveis.

2.1.1 Funcionamento do MCI

Boa parte dos motores operam no ciclo de quatro tempos, em que o pistão percorre quatro cursos para completar o seu ciclo. Dessa forma, o funcionamento permite a obtenção de trabalho positivo a cada duas voltas do virabrequim (HEYWOOD, 2018). Na Figura 2, está representado um ciclo, sendo seus tempos conhecidos como admissão, compressão, expansão e exaustão.

Figura 2- Ciclo do motor 4 Tempos- Ignição por centelha



Fonte: Adaptado de (HEYWOOD, 2018)

- Admissão: Durante o deslocamento do pistão do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI), a válvula de admissão (V.A) permanece aberta. Esse movimento resulta na sucção da mistura ar/combustível para o interior do cilindro.
- Compressão: Fecha-se a válvula de admissão e a mistura confinada no cilindro é comprimida pelo pistão que se desloca do PMI ao PMS. Antes do final da compressão ocorre a faísca e a ignição da mistura.
- Expansão: A pressão exercida pelos gases resultantes da combustão da mistura, sobre o pistão, induz o seu movimento descendente para o PMI. Esse é o tempo em que ocorre o trabalho positivo do motor. (HEYWOOD,2018)
- Exaustão: Com a válvula de escapamento aberta, o pistão desloca-se do PMI ao PMS, "empurrando" os gases queimados para fora do cilindro, para reiniciar o ciclo pelo tempo de admissão. (BRUNETTI, 2018)

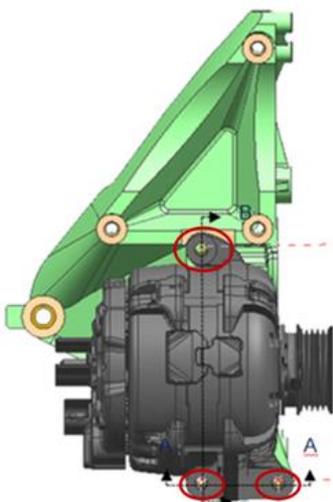
2.1.2 Componentes relacionados ao motor

Nesta seção, o foco é direcionado às características e responsabilidades específicas do alternador, compressor e do suporte que abriga ambos em um MCI, visando aprimorar a compreensão deste trabalho.

2.1.2.1 Alternador

O alternador automotivo desempenha uma função essencial no sistema elétrico de um veículo, sendo responsável por gerar energia elétrica através da conversão da energia mecânica derivada do movimento rotativo do motor. A energia gerada pelo alternador é direcionada para alimentar os dispositivos elétricos do veículo, incluindo faróis, rádio, sistema de ignição, sistemas de controle e, principalmente, para recarregar a bateria. Na Figura 3, encontra-se o alternador fixado no suporte.

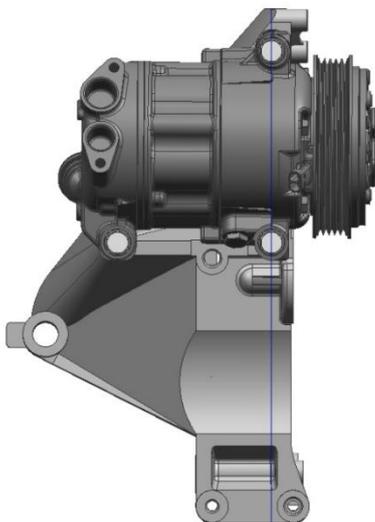
Figura 3- Alternador fixado no suporte



Fonte: Autor,2023

2.1.2.2 Compressor

O compressor é um componente do sistema de ar-condicionado de veículos e é responsável pela compressão e bombeamento do fluido refrigerante em forma de vapor por todo o sistema. Existem diversos modelos de compressores incluindo alternativos, parafuso, centrífugo e de palhetas. Dentre essas opções, o modelo alternativo é amplamente utilizado tanto na indústria quanto em sistemas de ar-condicionado automotivo. O funcionamento deste tipo de compressor envolve um êmbolo movendo-se alternadamente dentro de um cilindro, com válvulas de aspiração e descarga dispostas de maneira estratégica para facilitar a compressão (STOECKER; JONES, 1985). Na Figura 4, é possível visualizar o compressor fixado no suporte.

Figura 4- Compressor fixado no suporte

Fonte: Autor, 2023

2.1.2.3 Suporte do Alternador & Compressor

O suporte que acomoda tanto o alternador quanto o compressor em um motor a combustão (Figura 5) desempenha uma contribuição fundamental na estabilidade e integridade do sistema elétrico e de ar-condicionado do veículo. Geralmente, é instalado de maneira robusta no bloco do motor para suportar as vibrações e cargas dinâmicas associadas ao funcionamento do motor. A fixação sólida ao alternador e ao compressor assegura o alinhamento preciso com as demais partes, garantindo, assim, uma operação eficiente e confiável.

Figura 5- Suporte do alternador & compressor

Fonte: Acervo da Empresa, 2023

2.2 Computer Aided Engineering – CAE

Como ferramenta de auxílio ao desenvolvimento de produtos, e desdobramentos que tangenciam os processos, a tecnologia Computer Aided Design (CAD) surgiu na década de 70, e serviu como base para a plataforma Computer Aided Engineering (CAE). Inicialmente, sua utilização limitou-se devido a custos elevados, falta de especialistas e poucos fabricantes. Somente entre as décadas de 80 e 90 difundiram-se de forma mais abrangente com a popularização de computadores, pela competição baseada no dilema confiabilidade x custo, e pela adoção dessas ferramentas em diferentes setores industriais (FIALHO, 2008).

Um sistema CAE, ou Engenharia Assistida por Computador, é a aplicação de uma série de ferramentas computacionais, como o método de elementos finitos, para simular, validar e otimizar o desempenho de componentes e conjuntos em processos de engenharia. Em resumo, uma ferramenta CAE possui a capacidade de analisar a robustez e o funcionamento sob diversas condições.

Essa tecnologia possibilita uma variedade de análises, como estruturais, térmicas, dinâmicas e de fluidos, proporcionando uma grande quantidade de cálculos em tempo reduzido, o que revolucionou a maneira como os projetistas avaliam o comportamento de seus produtos. Abaixo, na Tabela 1, podemos visualizar as principais diferenças entre o método experimental e o método computacional (simulação numérica).

Tabela 1-Comparação entre o método experimental e simulações numéricas

Método Experimental	Simulações Numéricas
Um experimento por vez	Quantos experimentos forem necessários
Número de pontos e instantes limitados	Alta resolução no espaço e no tempo
Para modelos em escala de laboratório	O modelo de escoamento real
Variedade de problemas limitada as condições do experimentador	Qualquer problema real e independente da complexidade da geometria
Fontes de erro: medidas e distúrbios externos	Fontes de erro: modelagem, discretização, iterações

Fonte: ESSS Website.

2.3 Método dos elementos finitos (MEF)

2.3.1 Definições

Em seu livro, Zienkiewicz e Taylor (2000) apresentam o Método dos Elementos Finitos (MEF) como um procedimento geral de discretização de problemas contínuos representados por expressões matemáticas. Discretizar consiste na divisão do domínio em elementos, que são os pequenos domínios do problema a serem solucionados, e esses elementos são conectados por nós que permitem uma transmissão coerente das forças e deslocamentos ocorrendo na estrutura sob carregamento (DHATT; LEFRANÃ; TOUZOT, 2012).

De acordo com Azevedo (2003), o MEF demanda uma equação integral para um domínio complexo (volume V), que pode ser substituída pela soma de integrais em subdomínios com geometrias mais simples (volume V_i). O autor sugere que se for possível resolver as equações desses subdomínios V_i , os quais representam individualmente um elemento finito, então a soma de suas soluções constitui a solução para o domínio complexo V . Em outras palavras, a solução analítica, originalmente difícil ou impossível de ser obtida, pode ser aproximada pela soma das respostas de cada elemento (GINESTRA; CERETTI; FIORENTINO, 2016). A equação (1) exemplifica essa técnica:

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (1)$$

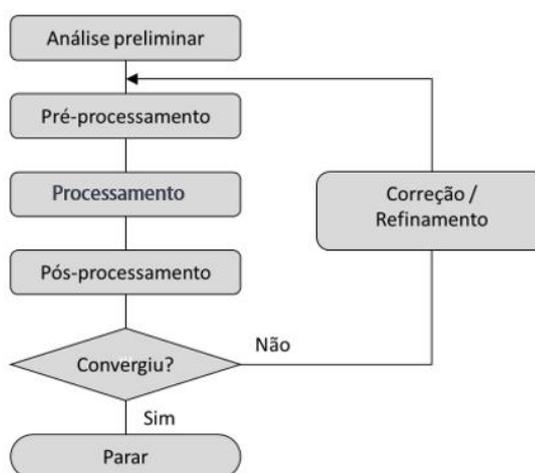
Segundo Silva et al. (2001), a estratégia de dividir o domínio de estudo em subdomínios menores oferece uma solução para a dificuldade relacionada à seleção de funções de interpolação que descrevam o comportamento das variáveis do problema em toda a extensão do domínio. Essas funções devem atender não apenas às condições de contorno, mas também representar de forma precisa a geometria e o comportamento do material envolvido no contexto.

2.3.2 Simulação através do MEF

O Método dos Elementos Finitos é amplamente empregado na engenharia, sendo incomum encontrar um projeto que não demande algum tipo de análise por elementos finitos. A expectativa é de que a utilização desse método continue a crescer, conforme observado nas últimas décadas. A aplicação do processo de análise em projetos auxilia na identificação de novas soluções e pode ser empregada para aprimorar e otimizar tanto o desempenho quanto os custos envolvidos (BATHE, 2014).

Kim e Sankar (2009) definem o procedimento de análise por elementos finitos em quatro etapas: análise preliminar, pré-processamento, processamento e pós-processamento. O esquema na Figura 6 detalha as fases da FEA.

Figura 6- Fluxo para análise por elementos finitos



Fonte: Adaptado de (KIM e SANKAR, 2009)

O esquema ressalta ainda o ciclo de retroalimentação quando as discrepâncias na solução não são adequadas, demandando refinamento do modelo e repetição do processo até a convergência da solução. Os detalhamentos das etapas serão apresentados nos tópicos subjacentes.

2.3.2.1 Análise preliminar

A análise preliminar antes de conduzir uma simulação é essencial para garantir resultados precisos e relevantes. Essa etapa inicial permite uma compreensão mais aprofundada do cenário a ser simulado, como o modelo matemático, e outras características que devem ser definidas antes de realizar a solução numérica.

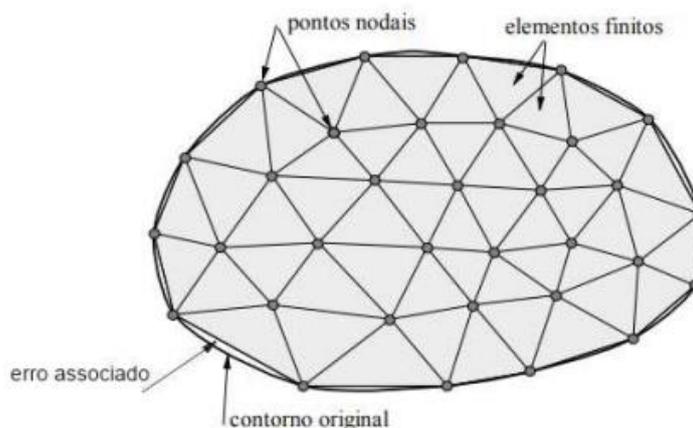
2.3.2.2 Pré-processamento

Nesse estágio ocorre a preparação do modelo para a análise por elementos finitos, utilizando um modelamento CAD. São definidos parâmetros como materiais e propriedades, malha, condições de contorno e distribui-se a aplicação de cargas (esforços a que os componentes serão submetidos). A seguir serão explicados alguns desses parâmetros.

2.3.2.2.1 Malha

A malha de cálculo (Figura 7) é indispensável no método de elementos finitos, pois é através dela que se realiza a discretização do modelo. É nos nós de cada elemento que as equações governantes do sistema são resolvidas.

Sob o ponto de vista de Souza (2003), o importante da malha é a convergência, pois, em uma malha consistente, à medida que o tamanho dos elementos se aproxima de zero e, conseqüentemente, o número de nós ao infinito, a solução do MEF converge a solução exata do problema.

Figura 7- Malha de elementos finitos

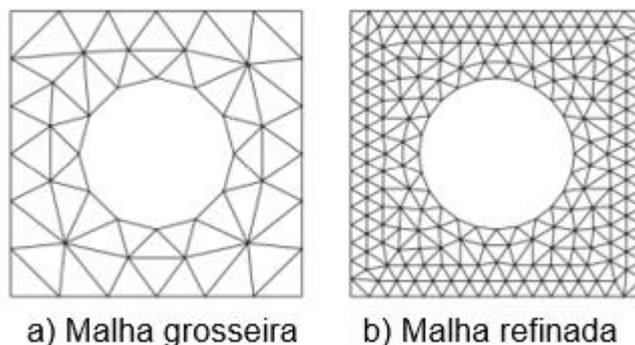
Fonte: adaptado de Souza,2003

Apesar das diversas opções disponíveis durante a discretização, conforme indicado por Kurowski (2004), os três principais fatores que exercem influência são:

- Tamanho do elemento

O dimensionamento do elemento, é geralmente, definido como o diâmetro da menor circunferência que pode ser circunscrita no elemento (Vasconcelos, 2018). A seleção adequada do tamanho do elemento é de extrema importância para qualquer análise, pois exerce influência direta na obtenção de resultados acurados. (DHATT; LEFRANÃ; TOUZOT, 2012). Elementos excessivamente grandes podem resultar em uma representação imprecisa da geometria e do comportamento da estrutura. Por outro lado, elementos muito pequenos levam a um demasiado custo computacional, sem aprimoramento considerável na qualidade dos resultados (YANG, 2017). Portanto, é necessário buscar um equilíbrio, optando por tamanhos que capturem adequadamente as características importantes da estrutura. Na figura 8, é apresentado um exemplo de malha grosseira e refinada.

Figura 8- Representação da malha de um modelo com diferentes quantidades de elementos



Fonte: Fish e Belytschko (2007).

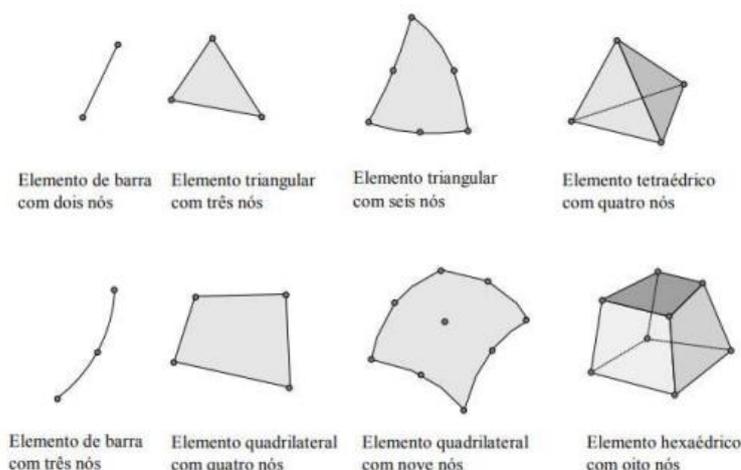
- Ordem do elemento

Diz respeito à quantidade de pontos nodais presentes em um elemento, exercendo influência na precisão da solução. Pode ser categorizado como de ordem baixa, média ou alta, variando conforme o número de nós. A escolha dos elementos é orientada pela geometria e pelas particularidades do problema em análise.

- Tipos de elementos

Diversos tipos de elementos podem ser empregados para resolver o mesmo problema, cada um adaptado a diferentes tipos de geometria e comportamento estrutural. Entre os tipos clássicos de elementos destacam-se: elementos sólidos, elementos de membrana e casca e elemento de viga. A Figura 9 apresenta a geometria de diversos tipos de elementos finitos.

Figura 9- Tipos de elementos finitos



Fonte: Souza (2003)

Os elementos sólidos, em geral, são a melhor maneira de modelar objetos com formato 3D (Bathe,2014). Entretanto, o número de elementos requeridos para um determinado modelo aumenta rapidamente.

2.3.2.2 Condições de contorno

As condições de contorno e carregamento simulam a física do sistema de interesse, acrescentando restrições e interações que representam os efeitos da vizinhança sobre o modelo, sem as quais a solução não pode ser obtida (SIMSCALE,2017). Existem diferentes tipos de condições de contorno, incluindo:

- Restrições de deslocamento: Limitam os movimentos dos nós em determinadas direções, representando apoios fixos ou articulações.
- Cargas aplicadas: Representam as forças externas ou momentos que atuam sobre a estrutura. Podem incluir cargas concentradas, distribuídas ou momentos aplicados em locais específicos.
- Condições térmicas: Modelam variações de temperatura ao longo da estrutura, afetando as propriedades dos materiais.

2.3.2.3 Processamento

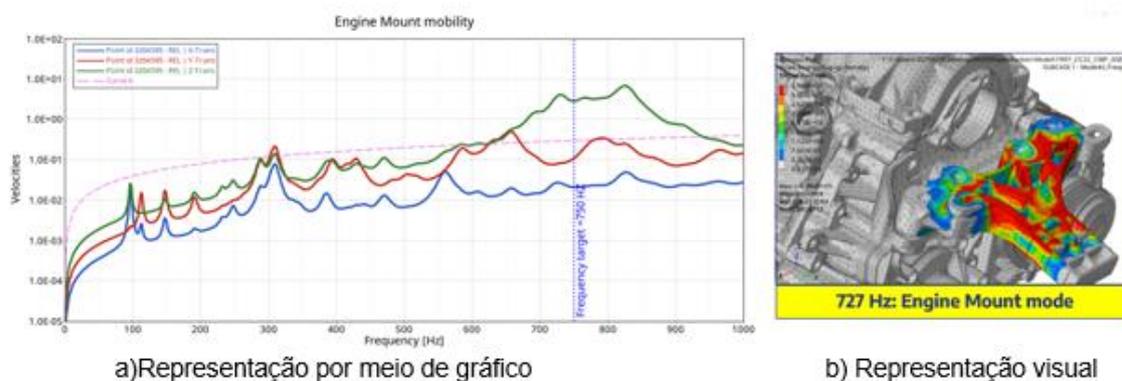
Nesta etapa dá-se a aplicação de um Solver Numérico (Dassault Systèmes, 2011), que tem por objetivo efetuar os cálculos dos deslocamentos nodais (Fialho, 2008 (a)). Após a resolução da matriz global de equações, são gerados dois tipos de soluções: soluções primárias e soluções derivadas ou secundárias. Por exemplo, em análises estruturais, a solução nodal obtida refere-se aos deslocamentos dos nós, enquanto as soluções derivadas incluem deformações e tensões (Vasconcelos,2018).

2.3.2.4 Pós- processamento

Os resultados numéricos da análise, são revisados e interpretados. O foco está na extração de informações que auxiliem nas decisões e na compreensão do comportamento do sistema modelado.

A etapa de pós-processamento, oferece diversas ferramentas e técnicas para visualizar os resultados de maneira eficaz. Gráficos, tabelas e representações visuais são frequentemente empregados para apresentar dados como deslocamentos, tensões, deformações, temperaturas, entre outros parâmetros relevantes ao estudo. A Figura 10 demonstra algumas das técnicas mencionadas.

Figura 10- Representação de resultados



2.3.2.5 Software HyperWorks®

A implementação do método de elementos finitos envolve uma variedade de softwares especializados, destacando-se o HyperWorks® como uma alternativa para análise e otimização de projetos em diversas áreas da engenharia. No conjunto de ferramentas do HyperWorks®, podem ser aplicados o HyperMesh® e o HyperView®. O HyperMesh®, comumente empregado no pré-processamento, é compatível com vários solvers de análise, incluindo o Abaqus. Ao empregar esse solver, os usuários têm acesso a uma solução completa que não apenas permite a configuração detalhada dos parâmetros de análise, mas também a execução eficiente de simulações complexas. Por sua vez, o HyperView® atua como ferramenta de pós-processamento, facilitando a visualização e interpretação dos resultados por meio de gráficos, animações e ferramentas de relatório, promovendo uma compreensão mais clara dos dados de simulação.

2.4 Critérios de falha

A crescente necessidade por melhor desempenho e qualidade, associada à busca por eficiência econômica e ambiental tem destacado a relevância dos sistemas de detecção, diagnóstico e correção de falhas nos processos industriais (Sartori et. al, 2012). De maneira geral, a falha de componentes se caracteriza pela nucleação e propagação de trincas até alcançar um tamanho crítico, a partir do qual a propagação ocorre de maneira instável e incontrolável (Fonseca,2003).

Durante o desenvolvimento de um componente, o projetista deveria ter acesso a resultados de inúmeros ensaios de resistência do material escolhido. No entanto, devido à escassez desses dados e geralmente custosos, teorias foram desenvolvidas para representar o comportamento de falhas, utilizando informações de ensaios mais simples e gerais, como o ensaio de tração (SHIGLEY, et al. 2005).

Além das características mecânicas, as falhas do componente estrutural são influenciadas por critérios como, tipo de carregamento, tempos de vida, condições ambientais, cuidados com manutenção, entre outros. Sendo possível fazer a distinção

entre critérios independentes do tempo e aqueles dependentes do tempo. (ROSA, 2002). Contudo, este trabalho abordará apenas os critérios dependentes do tempo.

2.4.1 Critérios dependentes do tempo

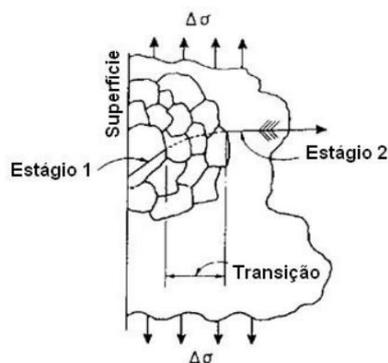
O desgaste e envelhecimento do material de um componente são influenciados pelo tempo de uso, levando a uma gradual perda de propriedades e comprometendo sua funcionalidade ao longo do tempo. Dentre os modos de falha dependentes do tempo, destacam-se fadiga, corrosão, corrosão sob tensão, fluência, desgaste e deformação plástica progressiva, conforme mencionado por (ROSA, 2002). Este trabalho se concentrará especificamente nos critérios de falha associados à fadiga.

2.4.1.1 Fadiga

A fadiga é um fenômeno caracterizado por mudanças progressivas, localizadas e permanentes na estrutura de um material. Esse processo surge quando o material é submetido a condições que provocam variações nas tensões e deformações em um ou mais pontos do material, podendo resultar em trincas ou fraturas completas após um número significativo de ciclos de carregamento.

A falha por fadiga tipicamente começa na superfície do componente com uma trinca microscópica que é sensível a cada instante de carga aplicada. Inicialmente, a trinca se desenvolve aproximadamente a 45° da superfície, progredindo para o estágio 2, onde cresce perpendicularmente à superfície, conforme é ilustrado na Figura 11.

Figura 11-Iniciação e propagação de trinca



Fonte: Marim,2009

Em termos de segurança, falhas por fadiga têm sido responsáveis por acidentes catastróficos em setores como automotivos, aeronáutico e metal mecânico. Do ponto de vista econômico, (Dowling, 2004) destaca que os custos decorrentes de falhas por fadiga, juntamente com os investimentos em prevenção, são significativos. Um dimensionamento preciso durante o desenvolvimento de produtos e estruturas em relação à fadiga pode reduzir consideravelmente esses custos. Análogo a isso, uma classe de projetos referenciados no português como *projeto contra falha por fadiga*, segue o princípio de que uma estrutura deve ser projetada e construída de tal forma que falhas por fadiga não venham a ocorrer durante seu tempo de vida para qual foi projetado (SCHIJVE, 2009).

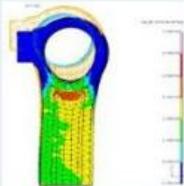
Os critérios para falha por fadiga podem ser associados a três abordagens principais de projeto: método fundamentado em tensões, método baseado em deformações e o método centrado na mecânica da fratura linear elástica (ROSA, 2002). Este trabalho se concentrará especificamente nas metodologias básicas baseadas em tensões.

a) Fadiga uniaxial e multiaxial

Para compreender os critérios de falha em um projeto contra fadiga, é essencial entender o comportamento dos carregamentos aplicados ao componente. Em várias aplicações de engenharia, os componentes enfrentam esforços combinados de tração e flexão. A fadiga uniaxial ocorre quando um componente é submetido a tensões ou cargas em uma única direção principal, enquanto a fadiga multiaxial envolve situações

em que o componente enfrenta múltiplas direções de tensão simultaneamente ou ao longo do tempo. Ambas as condições desempenham um papel importante na análise de falhas por fadiga, sendo essencial compreender seus efeitos para garantir o design robusto e a segurança de componentes estruturais em diferentes aplicações industriais. A Figura 12 apresenta exemplos que destacam as diferenças entre ambas as condições.

Figura 12- Fadiga uniaxial e multiaxial

<p>Fadiga Uniaxial:</p> 	<p>Exemplos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Eixo com história de torque em apenas um canal; - Biela manivela. 	<p>Tipo de cargas a importar:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tensão máxima e mínima; - Tensão média e amplitude; - Espectro de carga.
<p>Fadiga Multiaxial:</p> 	<p>Exemplos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Veículo submetido a um sinal aleatório de pista. 	<p>Tipo de cargas a importar:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sequência de resultados de tensão.

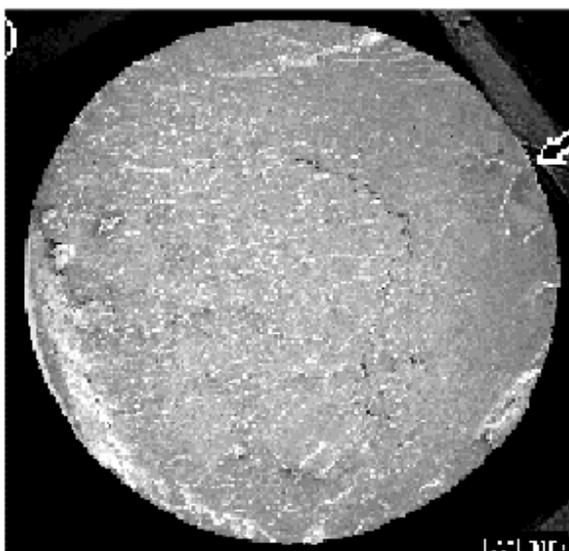
Fonte: adaptado manual FEMFAT®

b) Fadiga de baixo e alto ciclo

Colim (2006) afirma que a falha por fadiga resulta da aplicação e remoção contínua de um carregamento, podendo ocorrer com um elevado ou reduzido número de ciclos. Quando o número de carregamentos necessários para causar o dano por fadiga é inferior a 10^3 ciclos, ela é denominada de baixo ciclo. A Fadiga de Baixo Ciclo (FBC) ocorre devido a tensões cíclicas na fase plástica do material, com baixa frequência e alta amplitude, sendo assim chamada de Fadiga Controlada por Deformações Cíclicas. Os comportamentos de uma falha por FBC e uma falha por tensão estática são muito semelhantes, assim como as aparências das trincas originadas por esses mecanismos (Madayag,1969). Em motores, por exemplo, quando um componente está sujeito a fadiga de baixo ciclo, geralmente os carregamentos associados são térmicos. A secção de ruptura de um material por FBC

apresenta grande rugosidade (Figura 13) devido às deformações plásticas localizadas.

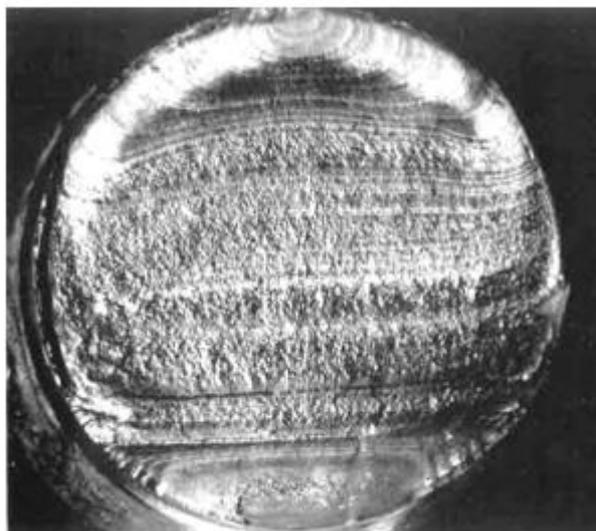
Figura 13 - Aparência de ruptura de um metal por FBC



Fonte: Silva, 2014

Já quando o número de ciclos ultrapassa essa faixa, é denominado como alto ciclo. A Fadiga de Alto Ciclo (FAC) surge de tensões cíclicas da fase elástica do material (inferiores ao limite de escoamento), com alta frequência e baixa amplitude. Na secção de ruptura de trincas por esse tipo de fadiga, é comum observar o aparecimento de “marcas de praia” (Figura 14), embora isso dependa das características específicas do material.

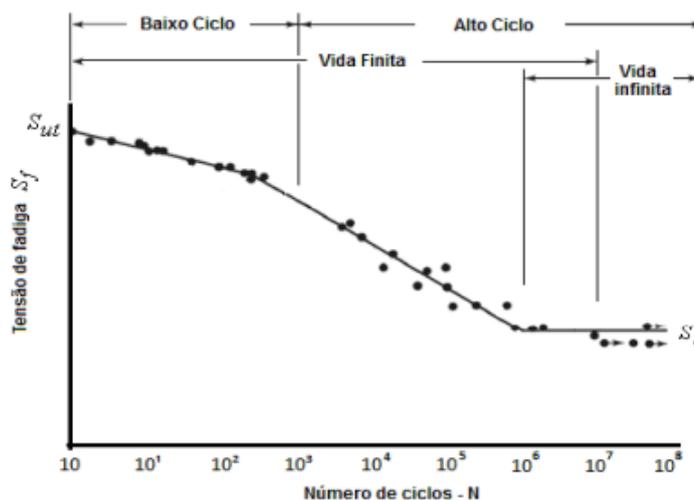
Figura 14- Aparência de ruptura de um metal por FAC



Fonte: Silva, 2014

Para analisar a fadiga, é empregado o método da curva S-N do material, também conhecida como curva de Wöhler, que estabelece a relação entre o número de ciclos até a falha do material e a amplitude do carregamento aplicado sobre ele.

Figura 15- Curva S-N do material a partir de ensaios de fadiga



Fonte: Shigley et al. (2005)

A coordenada vertical do gráfico na Figura 15 é referida como tensão de fadiga S_f , enquanto a coordenada horizontal representa o número de ciclos N

correspondente à tensão. Ao observar o diagrama S-N, nota-se que a curva se torna praticamente horizontal próximo a 10^6 ciclos. A tensão nesse ponto é conhecida como tensão de resistência à fadiga, ou limite de fadiga (Shigley et al., 2005). A vida total de um componente sujeito a cargas cíclicas é determinada pela combinação do número de ciclos necessários para a iniciação da trinca e o que corresponde à sua propagação até a falha final.

Qualquer carga sujeita a variações ao longo do tempo tem o potencial de causar fadiga. Esses tipos de carregamentos são comumente classificados em duas categorias: amplitude constante, onde a carga permanece inalterada durante a vida útil do componente, e amplitude variável, caracterizada por variações na carga ao longo do tempo.

Na condição de amplitude constante, a variação de tensão, representada por σ_r , é calculada como a diferença entre a tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}x}$, e a tensão mínima, $\sigma_{m\acute{i}n}$. A média dessas duas tensões é denominada tensão média, σ_m , enquanto a metade da variação da tensão é identificada como amplitude da tensão, σ_a . Essas definições podem ser expressas matematicamente por meio das seguintes equações:

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

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (3)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_m + \sigma_a \quad (5)$$

$$\sigma_{m\acute{i}n} = \sigma_m - \sigma_a \quad (6)$$

No entanto, na maioria das aplicações práticas de fadiga, as cargas aplicadas oscilam, e a amplitude dessas variações podem ser significativas. Isso resulta na fadiga de amplitude variável, a qual geralmente é mais complexa de ser analisada. Uma das melhores maneiras para avaliar esse tipo de estudo é utilizar conceitos como o Método de Contagem de Ciclos de Miner e o Método de Contagem de Ciclos de Rainflow. Esses métodos ajudam a converter a série temporal de cargas ou tensões

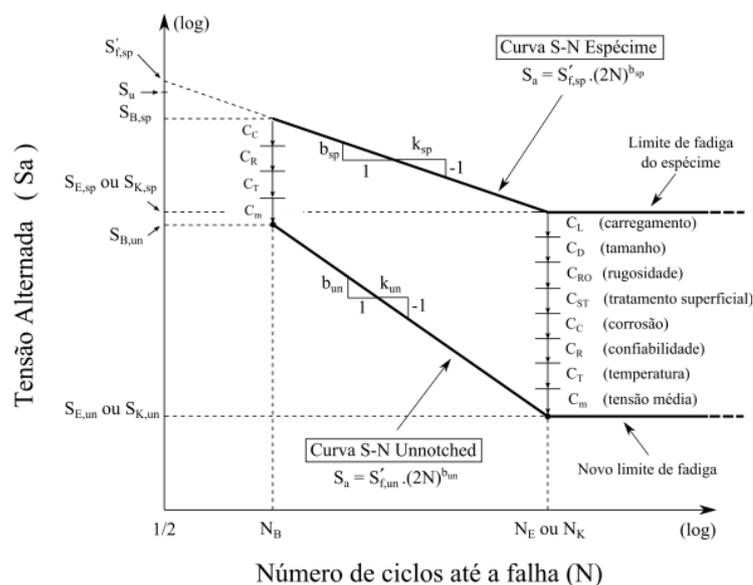
variáveis em um número equivalente de ciclos de carga constante, facilitando assim a análise de fadiga.

2.4.1.1.1 Software FEMFAT® para cálculo de fadiga

O FEMFAT® desenvolvido pelo Engineering Center Steyer (ECS), é um software avançado de análise de fadiga baseado em elementos finitos, projetado para avaliar e prever a vida útil de componentes mecânicos sob cargas cíclicas. A maioria dos algoritmos utilizados no FEMFAT é derivada de métodos desenvolvidos internamente no Engineering Center Steyer. Com uma interface intuitiva e ferramentas avançadas é possível simplificar definição de parâmetros e interpretação de resultados, tornando-se uma escolha valiosa para engenheiros envolvidos na análise e otimização de projetos sujeitos a fadiga, especialmente nas indústrias automotiva, aeroespacial e de máquinas. Além disso, o FEMFAT® é modular, apresentando uma diversidade de módulos especializados para atender às distintas demandas de análise de fadiga em componentes mecânicos.

O módulo FEMFAT Basic viabiliza análises utilizando o Método Tensão-Vida (S-N), fundamentado na análise de fadiga uniaxial com base em tensão, conforme descrito anteriormente. Essa abordagem possibilita a previsão da vida útil em fadiga, do dano ou do fator de segurança em relação ao limite de fadiga. O software emprega uma metodologia semelhante à apresentada na figura 16 para obter a Curva S-N Local, com ajustes na translação e inclinação. A metodologia do FEMFAT para o cálculo da Curva S-N Local é baseada em pesquisas de Hück et al. (1981), Eichlseder (2000b) e Eichlseder (2000a), conforme detalhado em Magna Powertrain (2011). O software também realiza o cálculo do diagrama de Haigh, apresentando algumas nuances, especialmente quando o material analisado é semi-frágil ou frágil.

Figura 16- Curva S-N obtida através da aplicação dos fatores modificadores



Fonte: Takahashi, 2014

Onde,

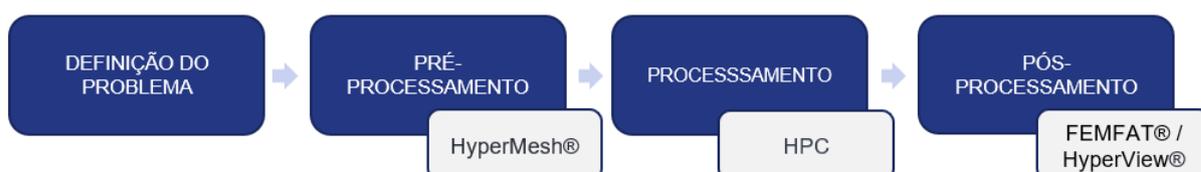
- C_L : Fator modificador de carregamento
- C_D : Fator modificador de tamanho
- C_{RO} : Fator modificador de rugosidade
- C_{ST} : Fator modificador de tratamento superficial
- C_C : Fator modificador de corrosão
- C_R : Fator modificador de confiabilidade
- C_T : Fator modificador de temperatura
- C_m : Fator modificador de tensão média

Nesta seção foi explorado exclusivamente o módulo basic, uma vez que foi o utilizado no presente trabalho. No entanto, informações adicionais sobre os outros módulos principais do FEMFAT® podem ser consultados em Magna Powertrain (2011).

3 METODOLOGIA

A qualidade da metodologia adotada desempenha um papel fundamental na eficácia de qualquer pesquisa ou projeto. Nesse contexto, esta investigação busca abordar de maneira sistemática a avaliação numérica da fadiga em um suporte do alternador e compressor aplicado na indústria automotiva. O processo foi fragmentado em distintas etapas e utilizou diversas ferramentas computacionais, englobando desde a definição do problema até o pós-processamento. Os passos delineados e as ferramentas utilizadas neste documento estão representados na Figura 17 e serão detalhadamente explorados nas seções subsequentes.

Figura 17- Fases e ferramentas para o desenvolvimento da análise



Fonte: Autor,2023

3.1. Definição do problema

A constante atualização de componentes no setor automobilístico desempenha uma importante função na redução de custos e na extensão da vida útil. A evolução acelerada das tecnologias automotivas exige a integração de novos sistemas e materiais, não apenas para manter a competitividade, mas também para promover eficiência e sustentabilidade. Neste contexto, a empresa está continuamente incentivando seus colaboradores para buscar inovações e empregar as melhores práticas na resolução de problemas.

O estudo teve início a partir da sugestão para redução de massa do componente. Após a concepção da ideia, tornou-se necessário revisitar as etapas realizadas na versão anterior do suporte, com o objetivo de validar a viabilidade da proposta sem comprometer a durabilidade do componente. As especificidades da sugestão estão descritas na tabela 2.

Tabela 2- Especificidades da sugestão

Proposta de redução	
Massa anterior (kg)	2,3997
Massa proposta (kg)	2,3427
Redução da massa (kg)	0,057
Percentual reduzido (%)	2,4

Fonte:Autor,2023

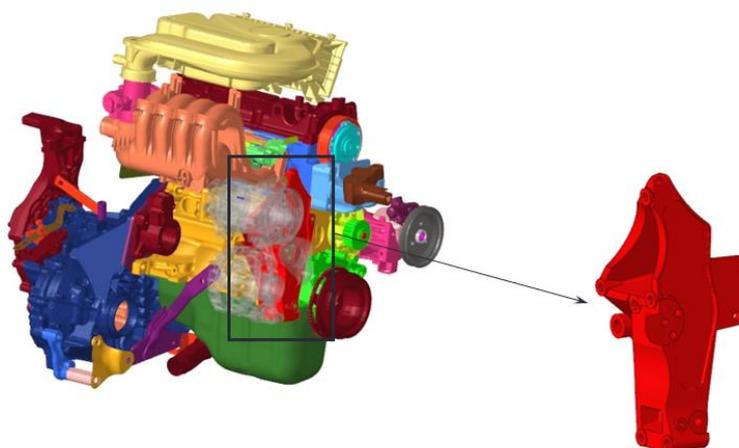
3.2 Pré-processamento

3.2.1 Análise preliminar

Neste projeto, partimos do pressuposto de que o componente já está em fase de produção e será submetido a uma atualização, sendo implementado no mesmo motor. Isso implica apenas na substituição da geometria no modelo numérico. Além disso, devido às variações temporais nas cargas da polia, serão realizados múltiplos ciclos, razão pela qual se conduzirá um estudo de fadiga.

Em cenários nos quais não existem trabalhos similares, é essencial recorrer ao SOP (*standard operating procedures*) como um guia para conduzir a análise, garantindo a consistência e eficácia do processo de simulação. A atualização da geometria foi executada por meio do software HyperMesh®. A seguir, na Figura 18 é possível observar o modelo representativo do motor com a nova geometria do suporte.

Figura 18- Modelo representativo do motor

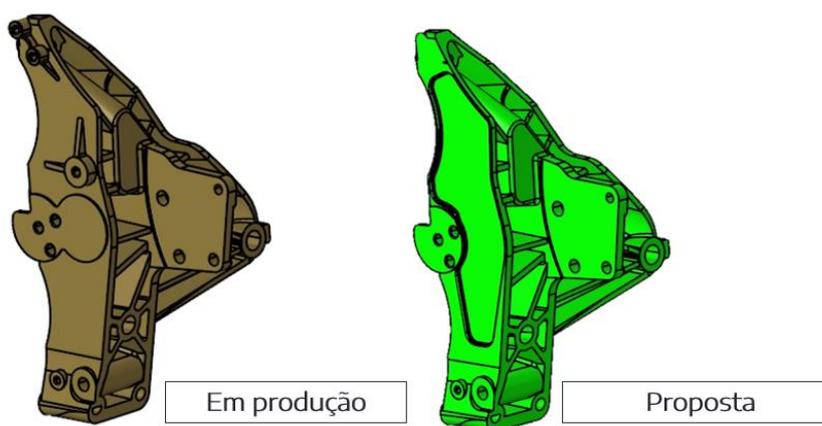


Fonte: Autor, 2023

3.2.2 Importação e tratamento da geometria

O design do suporte que é objeto de estudo neste trabalho foi desenvolvido pela equipe de CAD, empregando o software NX CAD Siemens. Uma ferramenta que se destaca na indústria automotiva, por possuir recursos específicos para o setor. É importante ressaltar que embora tenha sido proposta uma redução de massa entre as diferentes geometrias, observaram-se poucas modificações nos próprios designs (Figura 19).

Figura 19- Geometria CAD suporte do alternador & compressor



Fonte: Autor,2023

A partir da modelagem, efetuou-se a importação para o software HyperMesh, utilizando o solver Abaqus e prosseguindo com o pré-processamento. É comum que, ao importar uma geometria o arquivo apresente algumas imperfeições e falhas, devido ao compartilhamento entre diferentes softwares. Nesse sentido, foram realizados reparos na geometria, que incluíram a união de faces e a correção de ângulos excessivamente agudos.

3.2.3 Definição do material

Optou-se pelo uso do alumínio A380 para este componente, devido à sua característica como uma liga de alta resistência e baixa densidade, tornando-o ideal para aplicações que demandam leveza sem comprometer a durabilidade, como em carcaças de motores, suportes e partes do sistema de transmissão. Além disso, a

escolha desse material oferece uma vantagem significativa na redução do peso dos motores, contribuindo para melhor eficiência de combustível e desempenho geral. As principais propriedades mecânicas do alumínio A380 estão detalhadas na Figura 20.

Figura 20- Propriedades do Alumínio A380

Aluminum A380 (MS.50125)

T [°C]	E [MPa]	Poisson's Ratio	CLTE [mm/mm°C]	Density [kg/dm ³]	UTS [MPa]	Rp0.2 [MPa]	A [%]	σfat Alt./Tension [MPa]	Stress Ratio [R]
20	72600	0.33	2.16E-05	2.67	196	118	1.5	57	-1
150	70382	0.33	2.19E-05	2.67	194	114	1.5	35	-1

Fonte: Autor,2023

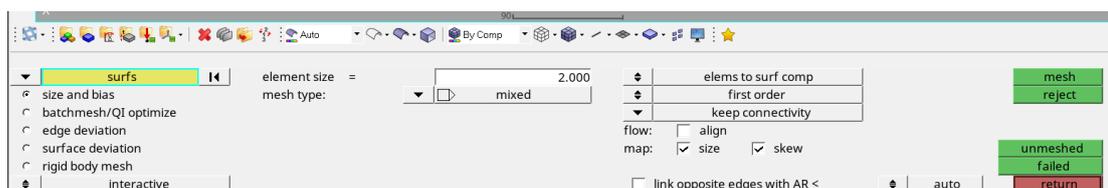
3.2.4 Geração da malha

Para a geometria em questão, inicialmente, optou-se por uma malha de elementos finitos triangulares formando uma “casca oca”. Essa etapa inicial possibilita a verificação e correção da qualidade da malha antes da implementação da malha 3D, composta por elementos finitos tetraédricos. O tamanho da malha escolhido foi de 2 mm, justificado pelos seguintes motivos:

- A malha é suficientemente fina para capturar detalhes importantes da geometria e do comportamento do sistema, garantindo uma precisão adequada nos resultados;
- Esse tamanho de malha favorece uma convergência mais rápida em comparação com malhas mais grossas, assegurando que os resultados se estabilizem eficientemente;

É relevante destacar que o dimensionamento da malha varia de acordo com o tipo de simulação e deve estar em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela empresa. Na Figura 21 são apresentados os parâmetros utilizados para a criação da malha.

Figura 21-Parâmetros para confecção da malha



Fonte: Autor,2023

Após a geração da malha 3D de segunda ordem, é necessário realizar a validação da qualidade da malha do componente. Este procedimento envolve a análise de diversos parâmetros que indicam a adequação e a eficácia da malha em representar fielmente a geometria e as características físicas do modelo. Entre esses parâmetros, pode-se citar o jacobiano, cujo valor mínimo recomendado é 0.7. Esse parâmetro é utilizado para avaliar as distorções ou deformações locais na malha durante o processo de discretização. Em outras palavras, ele fornece informações sobre a relação entre as coordenadas de um elemento na malha e as coordenadas originais do domínio físico. Podem ser visualizados outros parâmetros utilizados e seus respectivos valores na Figura 22.

Figura 22- Parâmetros de qualidade da malha

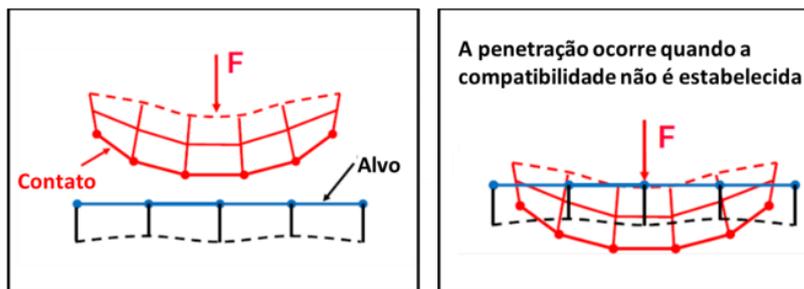
1-d	length	<	7.500	tria faces:	min angle	<	15.000
2-d	length	>	20.000		max angle	>	155.000
3-d	jacobian	<	0.700	quad faces:	min angle	<	45.000
time	equia skew	>	0.900		max angle	>	135.000
user	vol skew	>	0.950		neighbor size ratio	<	0.100
group	vol AR	>	5.000				

Fonte: Autor,2023

3.2.5 Contatos

As interações no software MEF são representadas pelos contatos, os quais descrevem a maneira como os componentes interagem entre superfícies de diferentes corpos, simulando de forma realista as relações físicas entre esses componentes, prevenindo a sobreposição ou penetração indevida entre as partes do modelo durante a análise (Figura 23).

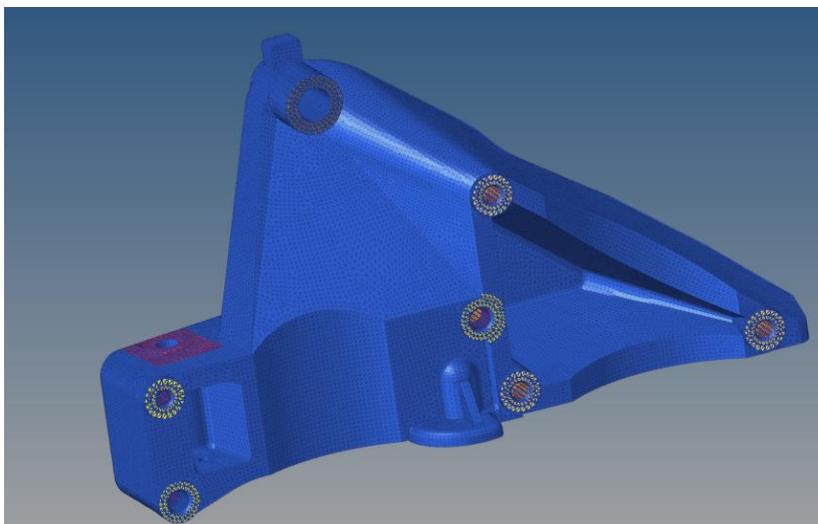
Figura 23- Interação entre componentes através de contatos



Fonte: Adaptado de (ANSYS®, 2017)

As interfaces de contato no modelo em estudo estão ilustradas na Figura 24, indicando as interações entre a peça e o ponto de fixação, neste caso, parafuso. Adotou-se o modelo de contato friccional com um coeficiente de atrito médio de 0,15, conforme estabelecido por procedimento interno para aceitação nas simulações entre as superfícies metálicas.

Figura 24- Superfícies de contato



Fonte: Autor, 2023

3.2.6 Condições de contorno e carregamento

Assim como a malha de cálculo, as condições de contorno desempenham uma função fundamental na condução da simulação, representando restrições para a

solução do modelo matemático, cuja definição é de responsabilidade do usuário. É de suma importância garantir que essas condições sejam especificadas corretamente, uma vez que condições de contorno inadequadas têm o potencial de introduzir erros nos resultados da simulação.

No presente estudo, considerou-se que o suporte está integrado a um sistema FEAD (Front End Accessory Drive), ou "Sistema de Acionamento de Acessórios do Motor" em português. Esse sistema é geralmente composto por polias, correias, tensores e outros componentes, cuja função é transmitir energia do motor para vários acessórios, como o alternador, o compressor do ar-condicionado e a bomba de água.

Ademais, realizou-se um levantamento das possíveis cargas às quais a componente está sujeita, constatando a presença de carregamentos externos, devido à presença de polia, resultando em cargas denominadas Hubload. Além disso, existem componentes associados a esse dispositivo, como o compressor e o alternador, que possuem uma massa considerável. Portanto, torna-se necessário realizar uma análise de aceleração, uma vez que a massa oscilante pode gerar efeitos significativos, é válido ressaltar que para todos os casos, foi considerado valores máximos e mínimos. Na figura 25, é possível visualizar os elementos aos quais o suporte está conectado. Na tabela 3, encontram-se os valores correspondentes aos casos de carregamento.

Figura 25- Componentes ligados ao suporte

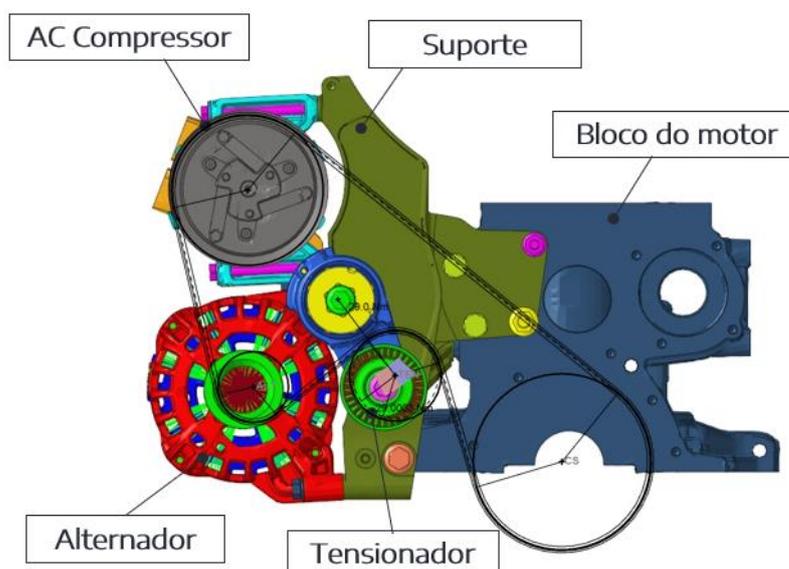


Tabela 3- Carregamentos máximos e mínimos

Pulley		
	Acessórios ligados (100%)	Acessórios desligados
Tensionador [N]	845	906
Auxiliar [N]	1854	1422
Alternador [N]	1550	1174
Compressor [N]	2710	1925

Máximo carregamento	Minímo carregamento
---------------------	---------------------

Fonte: Autor, 2023

3.3 Processamento

Após a etapa de definição da geometria, tipo do material, geração da malha de cálculo e definição das condições de contorno do sistema, inicia-se a fase de processamento da simulação. Como mencionado anteriormente, nesse estágio, o computador assume a responsabilidade pela resolução das equações governantes do sistema, utilizando todas as informações fornecidas pelo usuário.

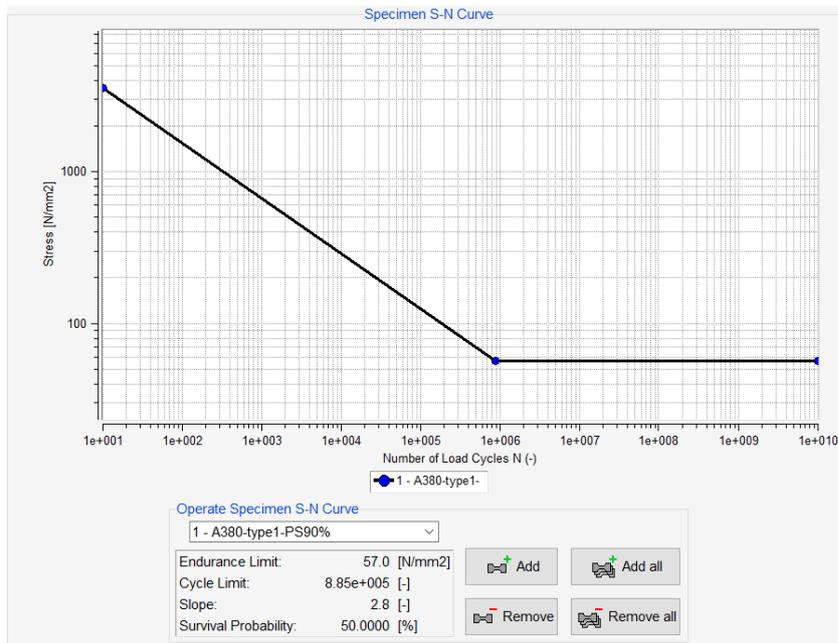
Dado o caráter mais robusto do modelo, este foi submetido, junto com as considerações mencionadas, ao HPC (High-Performance Computing). A partir desse processo, obtivemos as tensões associadas aos cenários de carga hubload e aceleração.

3.4 Pós- processamento

Os resultados de tensão contidos no arquivo de resposta (.ODB), foram inseridos como inputs, no software FEMFAT® para produção dos dados necessários à avaliação de fadiga. Especificamente, empregou-se o módulo FEMFAT® - Basic, um módulo para análise de componentes submetidos a carregamento uniaxial com base em tensão. Além dos dados das tensões de cada caso, foram incluídas informações sobre o comportamento do material, conforme detalhado na Figura 20. A

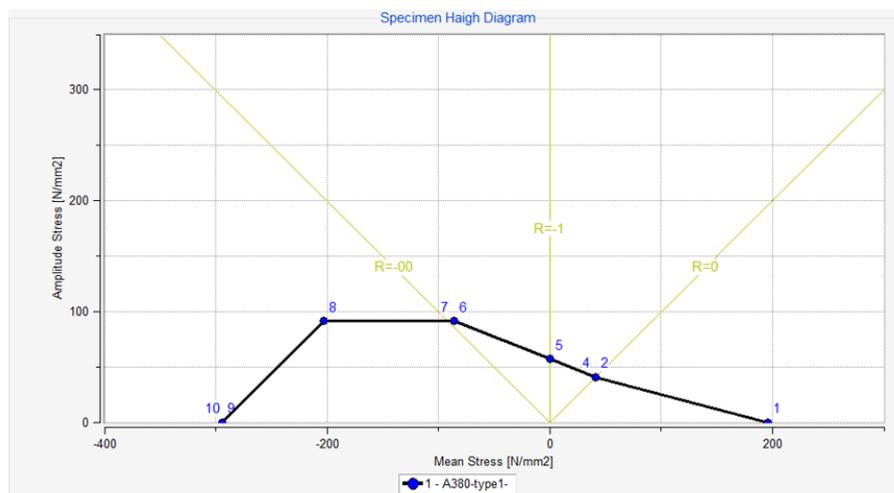
partir dessas propriedades mecânicas, o FEMFAT® gera os diagramas S-N do material (Figura 26) e de Haigh (Figura 27).

Figura 26- Curva S-N do Alumínio A380



Fonte: Autor,2023

Figura 27- Diagrama de Haigh para o Alumínio A380

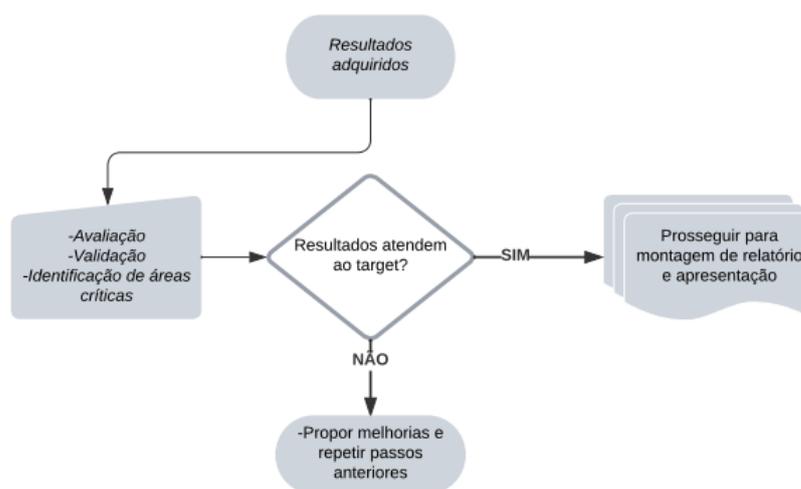


Fonte: Autor,2023

Com base nos resultados adquiridos durante o cálculo computacional, tornou-se viável avaliar a resposta do sistema às condições estabelecidas e identificar áreas críticas utilizando o software Hyperview®. Adicionalmente, foi possível validar a precisão do modelo em relação às condições do mundo real. Para alcançar esse

último objetivo, realizou-se uma comparação com modelos já existentes e normas internas da empresa. Os resultados deste estudo atendiam aos objetivos estabelecidos. Contudo, em ocasiões divergentes, o engenheiro precisa fazer alterações na geometria, como a modificação de materiais ou do design da peça, seguido de um novo processamento. Na figura 28, é possível visualizar um fluxograma que resume as etapas mencionadas.

Figura 28- Etapas do pós-processamento



Fonte: Autor,2023

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

O objetivo deste capítulo é apresentar após a solução do problema, o comportamento do suporte submetido aos diferentes tipos de carregamentos mencionados. Serão apresentadas as respostas do coeficiente de segurança à fadiga.

4.1 Convergência da malha

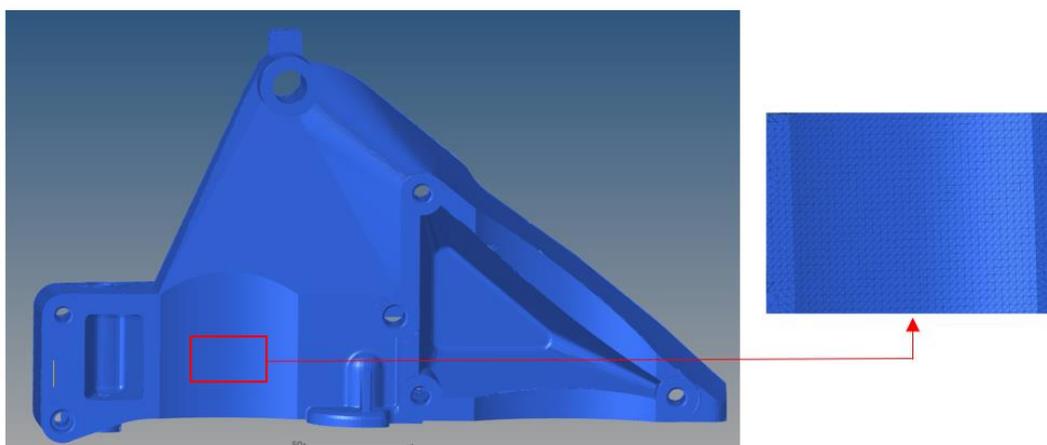
Conforme a teoria apresentada na seção 2.3.2.2.1, a convergência é um aspecto importante no contexto da discretização. A Tabela 4 apresenta a quantidade de elementos e nós obtidos por meio do processo de convergência da malha para a geometria em consideração. A partir deste conjunto de dados, torna-se viável avaliar a sensibilidade da malha. A malha gerada pode ser visualizada na Figura 29.

Tabela 4- Configurações da malha

Elementos	Nós
1.066.663	177.897

Fonte: Autor,2023

Figura 29- Malha obtida no HyperMesh



Fonte: Autor,2023

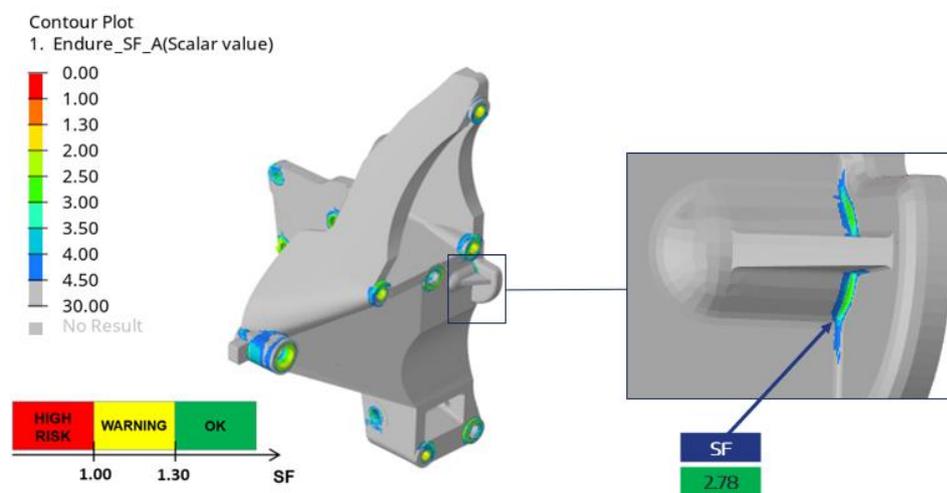
4.2 Critério de fadiga

A partir dos diferentes cenários de carga, foram determinados os coeficientes de segurança à fadiga para o suporte. Em todas as análises, a legenda permaneceu constante, e a escala de cores foi definida até 4,50, sendo as regiões acima desse valor representadas em tons de cinza. Os critérios adotados para os alvos são os seguintes:

- Abaixo de 1: Alto risco
- Entre 1 e 1,3: Atenção
- Acima de 1.3: Ok

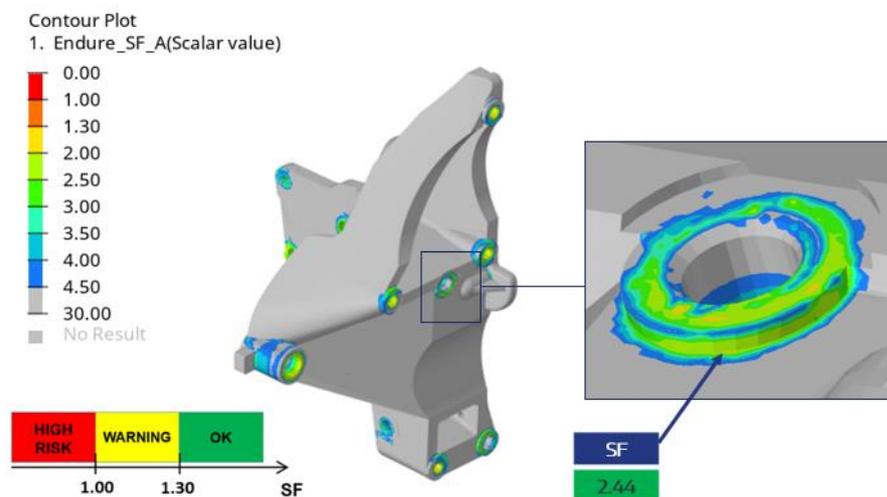
Em cada caso, realizou-se uma verificação detalhada de todas as regiões para obter o valor mais significativo, destacando-os nas figuras subjacentes.

Figura 30- Coeficiente de segurança para o ciclo de Hubload

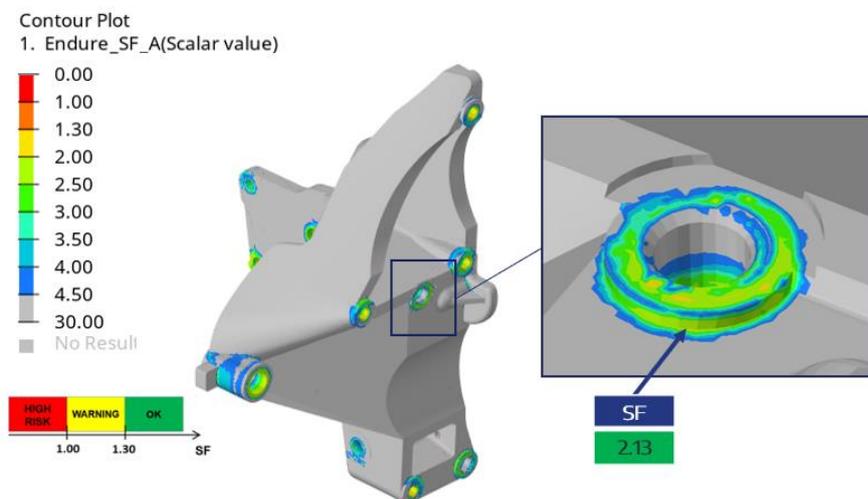


Fonte: Autor, 2023

Na Figura 30 é apresentado o coeficiente de segurança para o ciclo de Hubload. Entre as regiões analisadas, a área com filete apresenta o menor resultado, mas ainda assim, dentro do target, alcançando 2,78. Esse valor pode ser explicado devido aos filetes poderem atuar como concentradores de tensão, ou seja, eles tendem a aumentar localmente a magnitude das tensões.

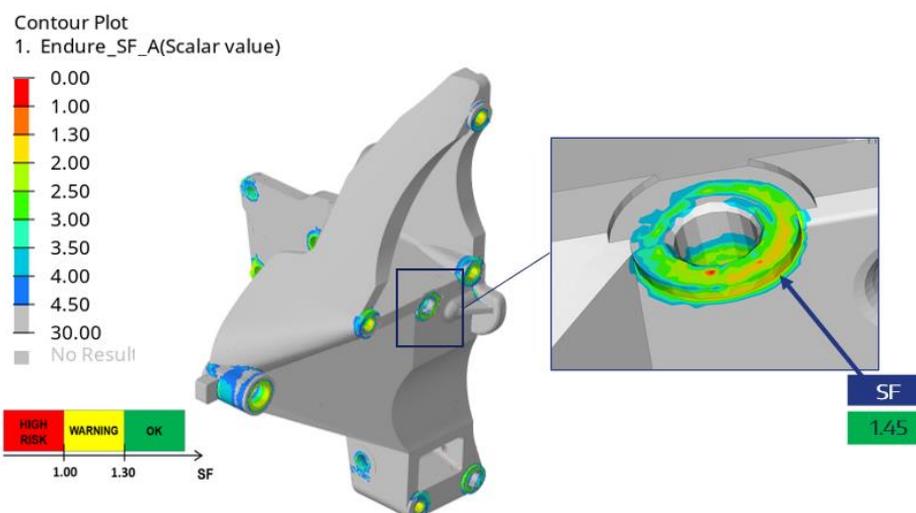
Figura 31- Coeficiente de segurança para a aceleração em X

Fonte: Autor, 2023

Figura 32- Coeficiente de segurança para a aceleração em Y

Fonte: Autor, 2023

Nos casos de aceleração nas direções em x e y (conforme representado nas Figuras 31 e 32), os coeficientes de segurança são, respectivamente, de 2,44 e 2,13, indicando que os resultados foram considerados satisfatórios.

Figura 33- Coeficiente de segurança em Z

Fonte: Autor, 2023

No caso da aceleração na direção Z (Figura 33), é relevante salientar o ponto em vermelho. Nessas situações, por ser uma região de contato, é necessário um modelo mais detalhado para uma avaliação adequada. A recomendação é observar outra área que esteja pelo menos a duas camadas de elementos de distância da região em vermelho.

Com base nesses aspectos, o coeficiente de segurança encontrado foi de 1,45, indicando proximidade com a faixa de atenção, mas ainda dentro do target estabelecido. Essa observação pode ser explicada pelo fato de o motor ser mais suscetível a movimentos na direção Z em comparação com outras direções.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentado teve como objetivo demonstrar que a adoção de ferramentas tecnológicas de simulação computacional, como a plataforma CAE, pode desempenhar um papel significativo no cálculo de fadiga durante o processo de desenvolvimento ou atualização de produtos.

A utilização dessa ferramenta, através da técnica do método por elementos finitos, tem contribuído para reduzir estrategicamente as discrepâncias entre o modelo virtual e o real. Isso demonstra que soluções aproximadas evitam a necessidade de criar protótipos, resultando em uma redução do tempo e dos recursos energéticos associados aos testes tradicionais, além de proporcionar uma compreensão mais abrangente e precisa do comportamento estrutural em cenários de fadiga. Dessa forma, a engenharia auxiliada por computador consolida-se não só como uma alternativa viável para acelerar o processo de desenvolvimento, mas também aprimorar a segurança e durabilidade dos componentes estruturais.

Ao empregar os recursos do MEF, neste trabalho, foi possível validar a atualização do componente, utilizando uma quantidade menor de massa, e, conseqüentemente, obtendo um custo de construção inferior ao modelo anterior. Ademais, observou-se que todos os coeficientes de segurança à fadiga atenderam ao target estabelecido, indicando a possibilidade de implementar melhorias. Assim, este estudo, ao mencionar tais benefícios busca incentivar a adoção mais ampla dessa tecnologia na indústria.

5.1 Trabalhos futuros

O estudo aprofundado das técnicas de avaliação de vida em fadiga, tanto de forma analítica quanto numérica e experimental, oferece um amplo campo para descobertas adicionais e conclusões mais robustas. Diante desse cenário, apresentam-se possíveis direções para trabalhos futuros relacionados ao tema deste trabalho:

- Explorar métodos avançados de otimização;
- Realizar uma pesquisa para examinar o impacto da variação de materiais no suporte;
- Conduzir um estudo para avaliar os efeitos da redução adicional da massa do suporte;
- Avaliar as repercussões ambientais decorrentes da implementação da engenharia virtual no processo de análise estrutural;

REFERENCIAS

ALVES FILHO, Avelino. Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE. São Paulo: Editora Érica, 2013.

American Society for Testing and Materials. E 1823 – 96; Standard Terminology – Relating to Fatigue and Fracture Testing. Filadélfia, 1996.

BATHE, K.-J. Finite element procedures. 2. ed. Watertown: K. J. Bathhe, 2014.

ANSYS®. Mechanical, Release 17.2, Help System, Mechanical User's Guide, ANSYS, Inc. , 2017.

Azevedo, A.F.M. Método dos elementos finitos. Faculdade de Engenharia do Porto. 1ª edição. Portugal. 2003.

BARCHI, Fernando Felipe. ANÁLISE DE CAUSA RAIZ EM ALTERNADOR VEICULAR. 2018. Número total de 33 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018

BOSCH. Alternadores, Motores de Partida e Principais Componentes: 2015 - 2016. Disponível em:
http://br.boschautomotive.com/media/parts/download_2/motores_eletricos/Cat_Linha_Eletrica_RM_2015-2016_LowRes.pdf Acesso em 19 nov. 2023.

BRUNETTI, Franco. Motores de Combustão Interna. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 554 p. Vol 1

CARVALHO, Paulo H. de. Utilização do Software HyperWorks em Simulação Numérica e Otimização na Área de Mecânica Estrutural. 2016. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

Colim, G.M. Fadiga dos materiais. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Maio 2006

DASSAULT SYSTÈMES SOLIDWORKS CORPORATION. Training Solidworks Simulation 2011. Concord, Massachusetts, EUA. 2011.

DHATT, G.; LEFRANÇ, E.; TOUZOT, G. Finite element method. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

Dowling, N. E. (2004). Mean stress effects in stress-life and strain-life fatigue. SAE Technical Paper, (2004-01-2227).

Eichlseder, W. (2000a). Fatigue analysis by local stress concept based on finite element results. Computers & Structures, 80(27-30), 2109-2113.

Eichlseder, W. (2000b). Synthetic S/N Curves. In Topping, B. H. V. (Ed.), Computational Techniques for Materials, Composites and Composite Structures, (pp. 161-164)., Edin-burgh, UK. Civil-Comp Press. doi: 10.4203/ccp.67.3.1.

ESSS. “Aplicações de ‘crashworthiness’ utilizando o LS-DYNA.” ESSS. 2009. Acesso em 23 de Fev, de 2023.

FARIA, Marcos Antônio Lopes de. O processo de desenvolvimento de novos produtos na indústria automobilística como diferencial competitivo da empresa, possibilitando a adequação do produto ao mercado e criando valor para os clientes e acionistas: Estudo de caso na Fiat automóveis S. A. 2003. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FIALHO. A.B. (a)Cosmos: Plataforma CAE do solidworks 2008. São Paulo. Érica. 1ª edição. 2008.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. A First Course in. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2007.

Fonseca Jr., T. M. I. Métodos de previsão da curva deformação-vida em fadiga para ligas de alumínio AA6261-T6 e AA6351-T6. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2003, Dissertação de Mestrado.

Garcia, A.; Spim, J. A.; Dos Santos, C. A. Ensaios dos Materiais. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000.

GINESTRA, P. S.; CERETTI, E.; FIORENTINO, A. Potential of modeling and simulations of bioengineered devices: endoprostheses, prostheses and orthoses. Journal of Engineering in Medicine, p. 1–32, 2016.

Heywood, John B., 2018, “INTERNAL COMBUSTION ENGINES FUNDAMENTALS”, McGraw-Hill series in mechanical engineering

Hück, M., Thrainer, L., & Schütz, W. (1981). Berechnung von wöhlerlinien für bauteile aus stahl, stahlguss und grauguss-synthetische wöhlerlinien. Technical report, Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Bericht Nr. ABF 11 (2. überarbeitete Fassung), Düsseldorf.

KIM, N.-H.; SANKAR, V. Introduction to finite element analysis and design. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

KUROWSKI, P. M. Finite element analysis for design engineers. 1. ed. Warrendale: SAE International, 2004.

Madayag, A. F. Metal Fatigue: Theory and Design. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1969.

Magna Powertrain (2011). Femfat seminar notes. Technical report, Magna Powertrain Engineering Center Steyr GmbH.

MARIM, Michelle. **UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA CÁLCULO DE DURABILIDADE DE COMPONENTES MECÂNICOS**. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-04012010-135734/publico/Dissertacao.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

NETO, F. B. Edgard, Testes de fadiga de rodas veiculares – Proposta de estabelecimento, para os testes em laboratório, dos carregamentos que simulem os ocorridos no teste de durabilidade estrutural de veículo m pista. São Paulo, 2010

RODRIGUES, Keniler Gabriel. Motores de combustão interna: Princípios de funcionamento. 2021. 29. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Pitágoras, Poços de Caldas, 2021.

ROSA, E. Análise de resistência mecânica: mecânica da fratura e fadiga. Florianópolis: UFSC, 2002.

Roque, A., & Ferrão, P. (2012). An Overview of Computer-Aided Engineering in Maritime Industry. In M. Pawłowski (Ed.), Computer-Aided Engineering (pp. 229-244). InTech. doi: 10.5772/29590

Sartori, Isabel, Amaro, Carolina, Júnior, Mauricio, Embiruçu, Marcelo. Detecção, diagnóstico e correção de falhas: Uma proposição consistente de definição e terminologias, 2012.

SCHIJVE, J. Fatigue of structure and materials. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2009.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Projeto de engenharia mecânica. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SIEMENS. computer-aided-engineering. Disponível em:
<<https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt-our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>> Acesso em 15 nov.2023

SILVA, G. S. S.; SOEIRO, F. J. C. P.; TRIGUEIRO, G. S.; ROBERTO, M. A. R. Análise Estrutura de Chassis de Veículos Pesados com Base no Emprego do Programa ANSYS. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE, 2001, Salvador

SIMSCALE. **What are boundary conditions?** Disponível em:
<<https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-are-boundary-conditions/.html>>. Acesso em 15 dez.2023

SOUZA. R. M. O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Universidade Federal do Pará. Belém, 2003.

STOECKER, W. F.; JONES J. W. Refrigeração e ar condicionado. Editora McGraw-Hill Ltda. São Paulo, 1985

TAKAHASHI, Bruno Ximenes. **Metodologia Moderna para Análise de Fadiga Baseada em Elementos Finitos de Componentes Sujeitos a Fadiga Uni e Multiaxial**. 2014. 374 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-19032015-173219/publico/Dissertacao_Bruno_Ximenes.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

TILLMANN, C. A. DA C. Motores de Combustão Interna e seus Sistemas. Pelotas: [s.n.]2013.

VASCONCELOS, Waldério dos Anjos. **METODOLOGIA DE ANÁLISE TERMO-ESTRUTURAL DE BLOCO DE MOTORES APÓS ADIÇÃO DO SISTEMA DE SOBREALIMENTAÇÃO**. 2018. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29637>. Acesso em: 15 dez. 2023.

YANG, K.-H. Basic Finite Element Method as Applied to Injury Biomechanics. [s.l.] Academic Press, 2017.

ZIENKIEWIEZ, O. C.; TAYLOR, R. L. The finite element method. 5. ed. Oxford: Butterworh-Heinemann, v. I, 2000