

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Diego José Rodrigues Marques

**ANÁLISE ESTRUTURAL E SIMULACIONAL DE UM
PROJETO DE MÁQUINA EM CONFORMIDADE
COM A TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA 4.0**

Taubaté/SP

2020

Diego José Rodrigues Marques

**ANÁLISE ESTRUTURAL E SIMULACIONAL DE UM
PROJETO DE MÁQUINA EM CONFORMIDADE
COM A TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA 4.0**

Monografia apresentada para obtenção do Título de Especialista pelo Curso de Pós-graduação em Projeto Mecânico do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Roque Antônio de Moura

Taubaté/SP

2020

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

M357a Marques, Diego José Rodrigues
Análise estrutural e simulacional de um projeto de máquina em conformidade com a tecnologia da indústria 4.0 / Diego José Rodrigues Marques. -- 2020.
50 f. : il.

Monografia (especialização) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Roque Antônio de Moura, Departamento de Pesquisa e Pós-graduação.

1. Projeto de máquina. 2. Análise estrutural. 3. Análise estrutural.
I. Pós-Graduação em Projetos Mecânicos. II. Título.

CDD – 621.815

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

Diego José Rodrigues Marques

**ANÁLISE ESTRUTURAL E SIMULACIONAL DE UM
PROJETO DE MÁQUINA EM CONFORMIDADE
COM A TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA 4.0**

Monografia apresentada para obtenção do Título de Especialista pelo Curso de Pós-graduação em Projetos Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Roque Antônio de Moura

Data: _____

Resultado: _____

Universidade de Taubaté

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roque Antônio de Moura

Assinatura _____

Prof. Me. Milton Koiti Akiyama

Assinatura _____

AGRADECIMENTOS

A Deus, aos meus pais Assis e Dulce, a minha esposa Suellen e meus filhos Clara e Francisco, porto seguro para onde corria sempre que a vida exigisse.

A todos os amigos do curso e familiares que me apoiaram, mais precisamente nesse ano de caminhada.

A todos os professores e profissionais que me auxiliaram ao longo desta especialização, em especial o Professor Me. Milton Koiti Akiyama por disponibilizar toda a sua experiência através do seu conhecimento acadêmico e profissional que contribuiu muito para meu crescimento profissional.

Ao meu orientador, Professor Dr. Roque A. Moura pelo auxílio e ajuda durante toda a etapa do curso, principalmente pelo direcionamento e paciência durante o desenvolvimento desse trabalho.

“Se pude enxergar mais longe foi porque me apoiei em ombros de gigantes”.

Albert Einstein.

RESUMO

Soluções com alta qualidade, desempenho e baixo custo operacional são primordiais para o sucesso de um projeto, haja vista que a filosofia fabril atual é produzir mais com menos. Nesse contexto, a simulação computacional como pilar da indústria 4.0 cresceu muito nos últimos anos, impulsionado pelo massivo uso e grande conhecimento sobre essa tecnologia. Tal crescimento cumulativo trouxe um consenso de que a simulação em um projeto de máquina é a chave para aumentar a competitividade e a conduzir o projeto a um patamar de grande relevância no processo de fabricação e construção de máquinas, promovendo transformações nos negócios e mudanças tecnológicas. O objetivo desse trabalho é desenvolver um projeto virtual de uma máquina de controle de buchas e testar a viabilidade técnica quanto a sua confiabilidade e sanidade estrutural, minimizando falhas por ruptura ou deformação de seus componentes. O método conta com análise estrutural pelo método dos elementos finitos, simulações computacionais, pesquisas literárias e construção de um protótipo para testes experimentais. O resultado foi um aumento da confiabilidade e robustez da máquina, reduzindo a probabilidade de falha dos componentes estruturais e gerando um melhor desempenho e segurança da máquina, bem como a redução dos custos de fabricação promovida e detectados previamente pela análise simulacional. Conclui-se pela essencialidade do projeto virtualmente concebido, analisado e validado para agilidade, competitividade e excelência dos projetos de máquinas.

Palavras-chave: Projeto de máquina, análise estrutural, simulação.

ABSTRACT

High quality solutions, performance and operational low cost are fundamental do the project success, since the manufacturing philosophy is to produce more with less. According to this context, the computational simulation as the 4.0 industry principles, increased a lot in the past years, motivated by the massive use and great knowledge about this technology. Such aggregate development brought over an agreement that the simulation in a machine project is the key to increase the competitiveness and to lead the project to a great importance level in the process of manufacture and building machinery, encouraging changes in business and technological developments. The purpose of this paper is to develop a virtual project in a controller bearing machines and test the technical viability about its reliability and structural sanity, reducing the breakdown failures or its components distortion. The method relies on a structural analysis through the Finite Elements, computer simulations, academic researches and building of a prototype to experimental tests. The reliability and strength enhancement of the machine were the results which reduced the failure probability of structural components producing a better performance and machine security, just as the reduction of manufacturing costs which are previously promoted and detected through the analysis of the simulation. In conclusion through the essentiality of the virtually conceived project, analyzed and verified to flexibility, competitiveness and excellence in the machinery designs.

Key-Words: Machinery projects, structural analysis, simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pilares da indústria 4.0.....	19
Figura 2: Metodologia e formulação de projetos.....	22
Figura 3: Fator de segurança para materiais dúcteis.....	24
Figura 4: Tipos de análise.....	26
Figura 5: Representação de malha de elementos finitos.....	29
Figura 6: Tipos de elementos finitos.....	29
Figura 7: Gráfico Tensão x Deformação de material dúctil.....	31
Figura 8: Exemplo de carregamentos e restrições.....	33
Figura 9: Projeto e fabricação da MCB 4.0.....	36
Figura 10: Componentes da MCB 4.0.....	36
Figura 11: Esquema do funcionamento da MCB 4.0.	37
Figura 12: Otimização do projeto para análise.	38
Figura 13: Geração da malha de elementos finitos.....	39
Figura 14: Propriedade mecânica do material ABNT 1020 inserida no Ansys.....	40
Figura 15: Condições de contato e restrições.....	41
Figura 16: Cargas aplicadas e solicitações da MCB 4.0.....	42
Figura 17: Resultado da tensão encontrada na estrutura da MCB 4.0.....	44
Figura 18: Resultado da tensão encontrado no suporte da estrutura.....	45
Figura 19: Resultado da tensão encontrado no bloco superior da estrutura.....	46
Figura 20: Resultado do deslocamento encontrado na estrutura da MCB 4.0.....	47
Figura 21: Resultado do deslocamento encontrado no suporte da estrutura.....	48
Figura 22: Resultado do deslocamento encontrado no bloco superior.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas principais do aço 1020.....	40
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MCB 4.0 – Máquina de Controle Diametral de Buchas 4.0

MEF – Método dos Elementos Finitos

CAE – Engenharia assistida por computador

CAD – Desenho auxiliado por computador

FS – Fator de Segurança

I4.0 – Indústria 4.0

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Problema de Pesquisa	14
1.2 Objetivo.....	15
1.3 Hipóteses.....	15
1.4 Justificativa.....	15
1.5 Metodologia de Pesquisa.....	16
1.6 Estrutura do Trabalho.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Indústria 4.0	18
2.1.1 <i>Pilares da Indústria 4.0</i>	19
2.1.2 <i>Pilar de Simulação</i>	19
2.2 Projeto de Máquinas.....	20
2.2.1 <i>Normas e Segurança nos Projetos</i>	22
2.3 Análise Estrutural	25
2.3.1 <i>Tipos de Análises</i>	25
2.3.2 <i>Análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF)</i>	26
2.3.3 <i>Malha de Elementos</i>	28
2.3.4 <i>Propriedades Mecânicas do Material</i>	30
2.3.5 <i>Condições de Contorno</i>	32
2.3.6 <i>Etapas da Análise Estrutural</i>	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

Com o advento da Indústria 4.0 (I4.0), a modelagem, análise e simulação computacional, representam uma ferramenta de vanguarda para as indústrias.

Investir em simulação computacional para realização de análises estruturais é uma ótima estratégia para alavancar o desenvolvimento da empresa de forma ágil e otimizada, buscando melhores resultados associado a produtos com alta performance.

Diante deste cenário, altamente competitivo, nos dias de hoje o mercado vem buscando a cada dia, mais soluções com alta qualidade, agilidade, desempenho e baixo custo operacional, e para atender tal demanda, as empresas vêm trabalhando na aplicação de novas tecnologias em diversos setores produtivos, principalmente nas áreas onde é possível usar a engenharia como prevenção, ora por simulação e ora por análise estrutural em máquinas, compreendendo um protocolo de vital importância competitiva.

A indústria automotiva nas últimas décadas vem analisando estruturalmente por simulação, seus projetos de máquinas em conformidade com a tecnologia da indústria 4.0, impulsionando um significativo desenvolvimento na qualidade de medição dos elementos que compõem, por exemplo, todos os motores a combustão principalmente os da indústria de veículos.

O crescimento exige a necessidade de equipamentos, dispositivos e leitores precisos e de fácil acesso, ou seja, há um avanço nos sistemas de medições, principalmente na metrologia de componentes, como por exemplo, o controle das buchas que trabalham sobre pressão (MOURA et. al., 2019).

O presente trabalho gerou melhorias em uma empresa multinacional do setor automotivo, e que se mantém entre os maiores fornecedores de componentes automotivos, como por exemplo a fabricação de anéis pistão, biela, eixo de comando, camisa, virabrequim, arruelas de encosto e buchas.

1.1 Problema de Pesquisa

Atualmente o projeto de construção mecânica de máquina na sua maioria não contempla análises estruturais em seus componentes. Neste contexto, faltam realizar simulações para identificar e corrigir falhas de projeto

nos estágios iniciais do desenvolvimento, antes da fabricação, evitando gastos em correções no produto.

1.2 Objetivo

Viabilizar tecnicamente o projeto de construção mecânica da máquina de controle diametral de buchas automotivas MCB 4.0 através da análise estática estrutural e simulação computacional pelo método dos elementos finitos (MEF), garantindo a sanidade, viabilidade e funcionalidade do conjunto estrutural, como por exemplo minimizar falhas por ruptura ou deformação.

Foram estabelecidos os objetivos específicos:

- Decisões preliminares da análise estrutural;
- Modelamento digital dos componentes;
- Avaliação do pós-processamento e propostas de soluções virtuais.

1.3 Hipóteses

H1 – Desenvolver análise estrutural para atender o critério de deformação linear, considerando a manutenção da rigidez inicial e propriedade de forma geométrica do material, durante a aplicação da força sobre a estrutura.

H2 – Desenvolver análise estrutural para atender critério de deformação não linear, considerando que a rigidez do modelo não é constante e muda durante o processo de deformação.

1.4 Justificativa

A medição diametral de buchas sob pressão é uma característica significativa e de qualidade para motores à combustão. Infelizmente devido à diversidade de materiais e processos de embutimento, muitos dos problemas de qualidade metrologia e funcionalidade têm a ver com o descontrole de parâmetros os quais as buchas são submetidas durante o processo de montagem.

Devido ao material das buchas, aço carbono, e liga de cobre, durante o processo de união metálica é inerente ao processo à primeira ocorrência de deformação e onde é essencial o controle diametral. Aliado ao controle

diametral está também à baixa produtividade e dificuldades comparativas dos instrumentos de medição.

A proposta do trabalho é avaliar a robustez do dispositivo e simular as cargas e solicitações aplicadas na máquina de controle diametral de buchas. O uso da tecnologia de simulação garante a resistência mecânica adequada para que o dispositivo suporte aos esforços e alcance o melhor desempenho e assertividade nos controles e medições.

1.5 Metodologia de Pesquisa

A metodologia aplicada nesta monografia é um trabalho com concepção, desenvolvimento, implantação e operacionalização através de experimentação e análises estruturais aplicada no projeto de construção mecânica de uma máquina de controle diametral de buchas.

A pesquisa foi desenvolvida na elaboração de pesquisas e artigos sobre os temas referentes aos métodos de análise estrutural e simulação de um projeto de construção de máquinas. Seus resultados serão obtidos através da simulação e comprovada pela execução prática do projeto desenvolvido, e por este motivo, a natureza desta pesquisa é classificada como aplicada.

O objetivo é exploratório, pois visa proporcionar maior familiaridade com o universo das simulações e análise estrutural, visando torná-lo base para construção de estudos e novas hipóteses.

A pesquisa exploratória tem como objetivo principal desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores.

Como a determinação dos resultados são dependentes da análise do pesquisador, a classificação da abordagem desta pesquisa é qualitativa.

1.6 Estrutura do Trabalho

A fim de atender ao objetivo supracitado, esta monografia foi dividida em cinco seções, estruturada da seguinte forma:

No capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução ao tema, bem como sua justificativa, definição do objetivo e metodologia aplicada.

O segundo capítulo exhibe os principais conceitos da Indústria 4.0 com foco no pilar de simulação. Apresenta também a metodologia e normas de

segurança relacionadas a projetos de máquinas e por fim conceitos e fundamentos da análise estrutural, passando pelas etapas do método dos elementos finitos, sua utilização e aplicação em áreas diversas.

No capítulo 3 é descrito os materiais e métodos utilizados no trabalho, detalhando as etapas do desenvolvimento da análise estrutural na MCB 4.0.

No capítulo 4 é apresentado os resultados e discussões da análise. Nessa etapa obtemos as respostas em formato de imagens e curvas de contornos com as distribuições de tensões e deslocamento do modelo.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho, que foram baseados nas análises e interpretação dos resultados do pós-processamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas as definições e fundamentos da Indústria 4.0 com ênfase em simulação, metodologia de projetos e por fim serão apresentados os conceitos principais e as etapas da análise estrutural.

2.1 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 é como se popularizou a quarta revolução industrial. Praticamente nenhuma nova tecnologia foi criada nesta revolução, no entanto a junção de tecnologias já consolidadas no mercado e o aprimoramento de outras tem permitido a integração de sistemas de produção como nunca antes foi feito, isso tem permitido o acompanhamento e gerenciamento de processos e até mesmo de corporações inteiras na tela do celular, em alguns casos, a tecnologia elimina a necessidade de tomada de algumas decisões otimizando o tempo dos gestores (RUßMANN et al., 2015).

Segundo Oliveira (2016), Indústria 4.0 é um conceito de indústria proposto recentemente e que engloba as principais inovações tecnológicas dos campos de automação, controle e tecnologia da informação, aplicadas aos processos de manufatura e engenharia.

Segundo Lu (2017), a I4.0 representa a aplicação de conceitos dos sistemas e tecnologias que visam a construção de fábricas inteligentes, nas quais a dependência dos seres humanos diante o comando das máquinas seja cada vez menor.

Para Santos (2017), a indústria 4.0 está associada a tecnologias digitais que detêm grande relevância no processo de fabricação, mas que não as limitam em suas respectivas utilizações. Dentre essas tecnologias é possível citar a simulação, big data e *internet* das coisas.

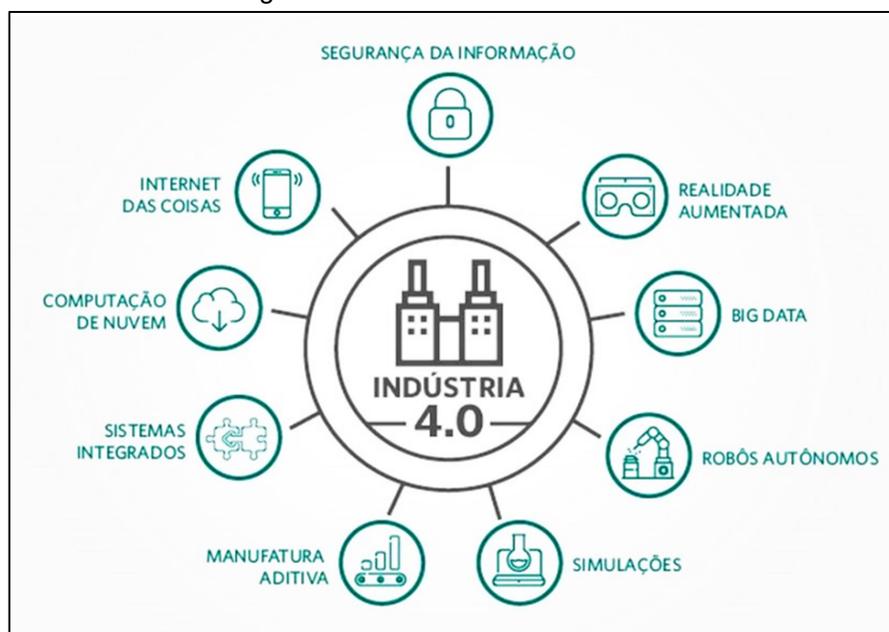
Segundo Oliveira (2016), as tecnologias associadas a nova revolução industrial são fundamentais para os processos de digitalização das empresas, no qual estas se tornam responsáveis pelo desenvolvimento das atividades organizacionais.

2.1.1 Pilares da Indústria 4.0

Segundo Oliveira (2016), os principais pilares da Indústria 4.0 são associadas a tecnologias inovadoras focada na melhoria contínua, produtividade e eficiência no contexto da indústria inteligente, são eles: Análise de dados, robótica, integração de sistemas, internet das coisas (IOT), ciber segurança, computação em nuvem, manufatura aditiva, realidade aumentada e simulação, que é o foco desse trabalho.

A Figura 1 representa os principais pilares da quarta revolução industrial.

Figura 1: Pilares da indústria 4.0



Fonte: LWT Sistemas, 2018

2.1.2 Pilar de Simulação

Na Indústria 4.0, a simulação computacional é utilizada amplamente na indústria para análise de dados, aproximando o mundo físico e virtual, garantindo qualidade, eficiência e o aperfeiçoamento dos projetos e em configurações de máquinas para testar o protótipo virtual antes de qualquer mudança real, gerando melhor performance, otimização de recursos e mais economia (ESSS et. al., 2016).

A simulação auxilia no desenvolvimento de um projeto e traz resultados gráficos para o desenvolvimento de processos e produtos, permitindo a identificação visual da geometria e dos resultados, facilitando assim a

interpretação e entendimento do modelo. Outra vantagem da simulação é a redução de custos de tempo na elaboração de um projeto e a facilidade na detecção de erros, aumentando assim a confiabilidade e qualidade dos produtos (ESSS et. al., 2016).

No contexto da industrialização 4.0 o pilar da simulação permite analisar em tempo real os dados físicos de um processo em uma ambiente virtual, resultando num aperfeiçoamento das configurações das máquinas e equipamentos, gerando recursos otimizados e uma maior performance econômica (ESSS et. al., 2016).

Segundo Firmino (2016), a simulação CAE tem a finalidade de auxiliar o engenheiro nas decisões das etapas do desenvolvimento de projeto, no dimensionamento e a validação de projetos, permitindo a redução do custo e tempo necessário no processo de desenvolvimento do projeto, pois a análise computacional é realizada de forma rápida.

O uso da tecnologia CAE em simulações dá agilidade nos projetos e permitem que grande parte dos protótipos e ensaios experimentais sejam substituídos por simulações virtuais. Ainda auxilia o profissional da engenharia a realizar um número muito maior de testes em curto tempo e reduz os gastos com os projetos. O resultado final é o aumento da competitividade e produtividade para as empresas (FIRMINO, 2016).

Em resumo, a otimização, melhoria e simulação do produto antes da sua fabricação contribue na redução dos custos de material, á manufatura e final e a probabilidade de falha dos componentes, pois uma eventual falha pode ser percebida antes de sua execução, evitando desperdícios de custos fixos e danos a reputação da marca (FIRMINO, 2016).

2.2 Projeto de Máquinas

De acordo com Niemann (2002), verifica-se que a maioria das dificuldades e erros de projetos mecânicos ou de máquinas, origina-se por uma exposição falha dos seus objetivos e por uma formulação incompleta dos problemas. Nesse viés, a metodologia para o projeto deve consistir na definição do problema, levantamento de dados, elaboração de hipóteses para o projeto, decisões preliminares do projeto, croquis, modelos matemáticos,

viabilidade do projeto, protótipo, validação e aprovação, documentar fases e resultados (NORTON, 2013).

Segundo Norton (2013), o movimento e a força é muito importante na conversão de uma forma de energia em outra, pois as máquinas desenvolvem forças e criam movimentos. Ainda segundo Norton (2013) é de responsabilidade do projetista de máquinas calcular e definir essas forças e movimentos de modo a alcançar as formas, dimensões e os materiais necessários para cada componente que compõe uma máquina. Esta é a essência do projeto de máquinas.

Segundo Norton (2013), é essencial conhecer o desempenho e função de cada componente de um projeto, suas propriedades mecânicas e a aplicação deste item no contexto do projeto.

O objetivo final do projeto de máquinas é dar forma e dimensionar os elementos de máquinas escolhendo os processos de fabricação e materiais adequados, de modo que a máquina projetada exerça sua função sem falhar. Isso permite que o projetista seja capaz de definir e prever as condições e o modo de falha de cada peça, possibilitando então, projetá-lo de forma a prevenir uma possível falha. Isso exige uma análise e simulação do componente em questão. Uma vez que os esforços são identificados é possível otimizar os modelos para um melhor desempenho na máquina (NORTON, 2013).

A metodologia de projetos é essencialmente um exercício de criatividade aplicada. Servem para ajudar a organizar a enfrentar o “problema não estruturado”, isto é, casos em que a definição do problema é vaga e para os quais muitas soluções possíveis existem (NORTON, 2013).

Uma versão de uma metodologia de projetos é mostrada na Figura 2, que relaciona as etapas e formulação de projeto.

Figura 2: Metodologia e formulação de projetos.



Fonte: Adaptado de Norton, 2013.

Segundo Norton (2013), a forma mais adequada de resolver o problema não estruturado começa pela Identificação da necessidade, que consiste em uma apresentação vaga do problema que geralmente é descrita pelo solicitante do projeto. No desenvolvimento da pesquisa de suporte as informações são compreendidas e o problema mapeado. Baseado em dados e informações coletadas define os objetivos, que servirá como base no detalhamento e especificações de tarefas que limitam o alcance do projeto. Nesta etapa é incluído o escopo técnico, planos de ação e o cronograma detalhado das tarefas do projeto.

A definição do conceito do projeto é realizado junto a equipe envolvida. O estágio detalhado é descrito pela modelagem dos componentes/peças e montagem do conjunto da máquina ou ferramental. Nessa etapa também é realizada a análise e as simulações computacionais no projeto virtual. Por fim, o estágio da documentação onde os desenhos são detalhados e oficializados no sistema (NORTON, 2013).

2.2.1 Normas e Segurança nos Projetos

Em um projeto de máquinas é necessário observar as normas e regulamentos de segurança. Nesta monografia foram observadas as seguintes normas NRs vigentes:

NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade: O projeto foi baseado na NR-10 e suas obrigações, estabelecendo os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade nos equipamentos desse projeto.

NR12 - Máquinas e Equipamentos: O projeto atende a obrigatoriedade da NR-12, estabelecendo os requisitos, princípios fundamentais e medidas de proteção para garantir a saúde e a integridade física dos trabalhadores e estabelece requisitos mínimos para a prevenção de acidentes e doenças do trabalho nas fases de projeto e de utilização de máquinas e equipamentos de todos os tipos, e ainda à sua fabricação, importação, comercialização, exposição e cessão a qualquer título, em todas as atividades econômicas, sem prejuízo da observância do disposto nas demais Normas Regulamentadoras – NR aprovadas pela Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978, nas normas técnicas oficiais e, na ausência ou omissão destas, nas normas internacionais aplicáveis.

Segundo Shigley (2011), o aço pode conter imperfeições ou particularidades oriundas de seu processo de fabricação que interfiram em suas propriedades mecânicas e sanidade estrutural, como a presença de inclusões ou tensões internas. Nesse contexto o projeto de máquina deve ser elaborado levando em consideração a segurança e integridade dos seus componentes. Um fator que deve ser levado em consideração durante o desenvolvimento de um projeto é o coeficiente de segurança.

Segundo Ilda e Buarque (2016), o coeficiente de segurança é usado no dimensionamento dos elementos de construção para equilibrar a qualidade de construção, e pode ser definida pela escolha do coeficiente de segurança que é feita com base no memorial de cálculos do projetista.

De acordo com Norton (2013), fator de segurança é aplicado conforme analisado o material, frequência de carregamento e exigência da máquina, que a sujeita a falha por fadiga, local de uso, posto de trabalho.

Ainda segundo Norton (2013), é sempre necessário calcular um ou mais coeficientes de segurança para estimar a probabilidade de falha. Pode haver

normas de projetos, de legislatura ou aceitos de forma geral, que também devem ser adotados.

A forma de expressão de um coeficiente de segurança pode geralmente ser escolhida com base no tipo de esforço exercido sobre a peça. Aumentar o coeficiente de segurança para resolver uma incerteza de projeto pode trazer consequências indesejáveis como aumento de custo, de peso com adição de esforços em outras áreas que podem inviabilizar o projeto (NORTON, 2013).

Quando projetos de algum equipamento ou mesmo instalação está sujeita a forças da natureza ou mesmo ao uso de diferentes pessoas em diferentes ambientes, isto leva ao projetista ter bom senso na escolha do fator de segurança do projeto.

Os coeficientes de segurança representam uma medida razoável da incerteza no projeto. Equipamentos, máquinas e estruturas que se ao falharem possam causar grandes perdas materiais ou colocar em risco a integridade de pessoas, geralmente, recebem coeficientes (ou fatores) de segurança mais elevado (NORTON, 2013).

A Figura 3 sugere um critério para estabelecer coeficientes de segurança para matérias dúcteis.

Figura 3: Fator de segurança para materiais dúcteis.

Fatores utilizados para determinar um coeficiente de segurança para materiais dúcteis		
Informações	Qualidade as informações	Fator
Dados disponíveis a partir de testes	Material utilizado foi testado	1,3
	Dados representativos de testes do material estão disponíveis	2,0
	Dados razoavelmente representativos de testes disponíveis	3,0
	Dados insuficientes representativos de testes estão disponíveis	5,0 +
Condições Ambientais Conhecidas	São idênticas as condições dos testes realizados	1,3
	Igual a de ambiente de laboratório	2,0
	Ambiente moderadamente desafiador	3,0
	Ambiente extremamente desafiador	5,0 +
Modelos Analíticos para forças e tensões	Modelos foram testados em experimentos	1,3
	Modelos testados apresentam precisamente o Sistema	2,0
	Modelos aproximados	3,0
	Modelos são aproximações grosseiras	5,0+

Fonte: Adaptado de Norton, 2013.

De posse do coeficiente (fator) de segurança da Figura 3 pode-se calcular a tensão admissível para materiais dúcteis que será apresentada nos próximos capítulos.

2.3 Análise Estrutural

A análise estrutural consiste em obter uma resposta das condições de contorno aplicadas a uma estrutura e avaliar o comportamento aos esforços e deslocamentos aplicado. A análise estrutural é utilizada em varias áreas como estruturas metálicas, componentes mecânicos, ferramentais, peças de máquinas, área naval e aviação (AZEVEDO, 2014).

Os tipos mais comuns de análise estrutural são: análise estática, dinâmica, modal, harmônica entre outras. A presente monografia se restringe na analise estrutural estática aplicando o método dos elementos finitos MEF.

A análise estrutural estática não leva em consideração os efeitos de inércia e amortecimento considerando os efeitos do carregamento estático ignorando as cargas que variam com o tempo. (SORIANO, 2003).

Ainda segundo Soriano (2003), a análise estática determina as tensões e deslocamentos que não influenciam nos efeitos de amortecimento e inércia e que as respostas são aplicadas lentamente em relação ao tempo. Os principais tipos de carregamentos aplicados na análise estática são as forças inerciais estáticas, forças e pressões aplicadas externamente e deslocamentos diferentes de zero.

2.3.1 Tipos de Análises

Segundo Assan (2003), quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como a análise é formulada e aplicada depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Os principais tipos de análise estão relacionados com as fases que antecede a análise de uma estrutura.

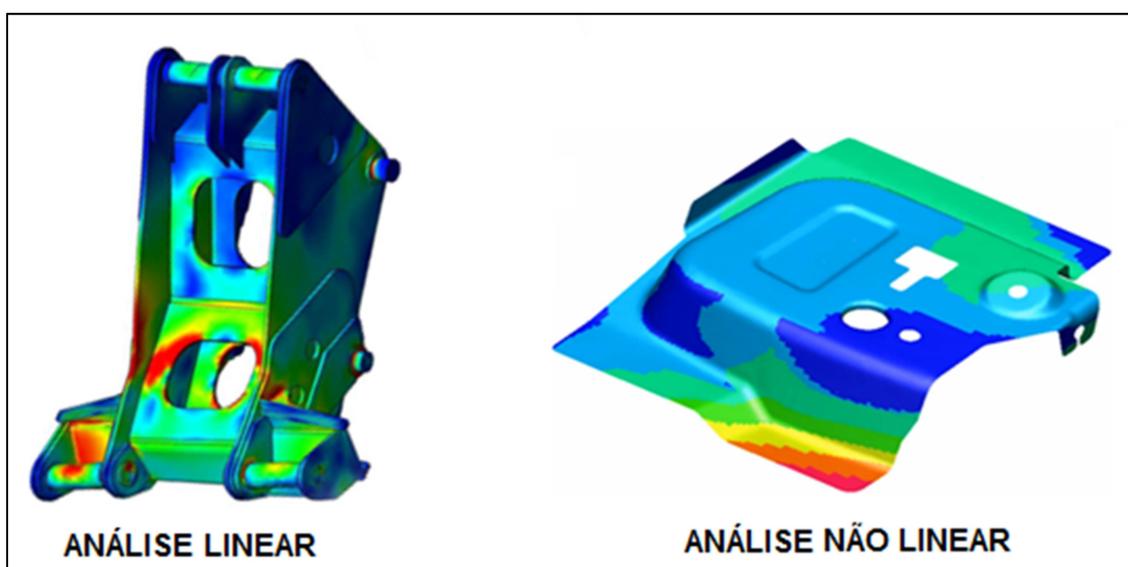
As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática, em outras palavras, quando a deformação sob uma carga e a

alteração de rigidez for pequena, e não houver uma mudança na propriedade de forma durante o processo, a análise é linear e o modelo retém sua rigidez inicial (ASSAN, 2003).

Segundo Azevedo (2014), na análise não linear a rigidez do modelo não é constante e muda durante o processo de deformação. À medida que a solicitação é maior a rigidez é atualizada e a geometria da estrutura se modifica na distribuição dos esforços e das tensões. Se esta hipótese for considerada, a análise é designada não linear geométrica.

A Figura 4 apresenta aplicações da análise linear e não linear.

Figura 4: Tipos de análise.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Neste trabalho serão considerados os problemas em que se supõem válida a hipótese de ser uma análise estática linear, quer de geometria, quer material.

2.3.2 *Análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF)*

O conceito da análise estrutural pelo método dos elementos finitos (MEF) é largamente usado atualmente. É um método simples, porem os cálculos são complexos (ALMEIDA, 2014).

Conforme Mirlisenna (2016), o MEF tornou-se relativamente fácil de usar, devido à disponibilidade de softwares comerciais de análise, muitos dos quais têm interface com diversos softwares de modelagem de desenho CAD – desenho auxiliado por computador. Os engenheiros que ingressarem no mercado de trabalho do século XXI terão maior probabilidade de encontrar modeladores sólidos CAD e a análise pelo MEF sendo utilizados nas suas empresas para o projeto de produtos e máquinas.

A utilização de softwares comerciais torna muito fácil obter resultados de análises pelo MEF, mas é necessário que o usuário compreenda como utilizar esta ferramenta de forma adequada, de modo que os resultados não reproduzam erros. É bastante recomendado que os estudantes de projetos de máquinas façam um curso sobre a teoria e a aplicação do MEF (ALVES FILHO, 2007).

O Método dos elementos finitos é um método utilizado para resolver equações diferenciais aproximadas. A ideia fundamental desse método é o fato de utilizar-se de funções de forma para descrever um espaço de solução aproximada para cada equação. Em linhas gerais, pode-se definir o MEF como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados (ALVES FILHO, 2007).

O MEF é muito utilizado no contexto de análise estrutural, embora possa também ser empregado em diversas áreas como: mecânica dos fluidos, análises de transferência de calor, eletromagnetismo e outras (ALMEIDA, 2014).

A ideia principal do Método dos Elementos Finitos consiste em se dividir o domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometria simples em uma quantidade finita conectados por nós, originando a malha. Este processo é chamado de Discretização, e dessa divisão da geometria em elementos surgiu o termo análise pelo método de elementos finitos (ALVES FILHO, 2007).

Ainda segundo Alves Filho (2007), no método dos elementos finitos os elementos são representados por um elemento de mola que apresenta uma

rigidez e dimensão determinada, que contribuem para formação das matriz global do modelo.

2.3.3 *Malha de Elementos*

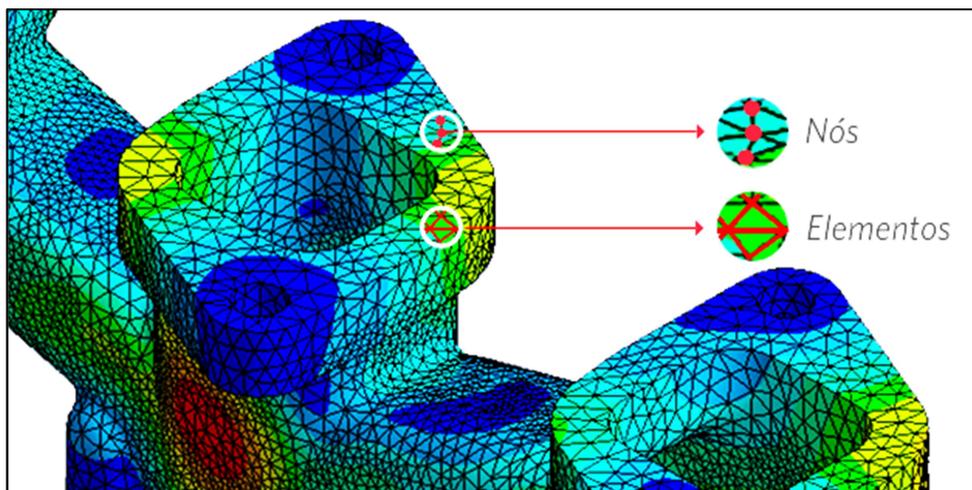
Malha é a discretização de um modelo contínuo formado por um conjunto de elementos conectados em nós, que possuem grau de liberdade. O resultado é uma representação aproximada do modelo, dependendo do nível de refinamento da Malha. O programa então calcula os deslocamentos e as tensões em cada nó (FAGAN, 1992).

Segundo Mirlisenna (2016), a malha compreende a subdivisão dos objetos sejam peças ou conjuntos de peças em pequenas partes denominados elementos e dos respectivos nós interligando-os. Após a discretização tornam-se conhecidas as quantidades e tipos de elementos e nós. Os nós estarão sempre localizados nas extremidades das arestas e eventualmente sobre as arestas ou faces do elemento, dependendo do seu grau polinomial.

Ainda segundo Mirlisenna (2016), é usado um artifício de refinamento em determinadas regiões do modelo para aumentar a qualidade e precisão da malha. Estas regiões são críticas, pois há uma concentração de tensões nas áreas de maior solicitação. Desta forma a Malha de elementos terá maior eficácia e um resultado aproximado das condições reais do modelo.

A Figura 5 apresenta uma representação de uma malha de elementos finitos.

Figura 5: Representação de malha de elementos finitos.

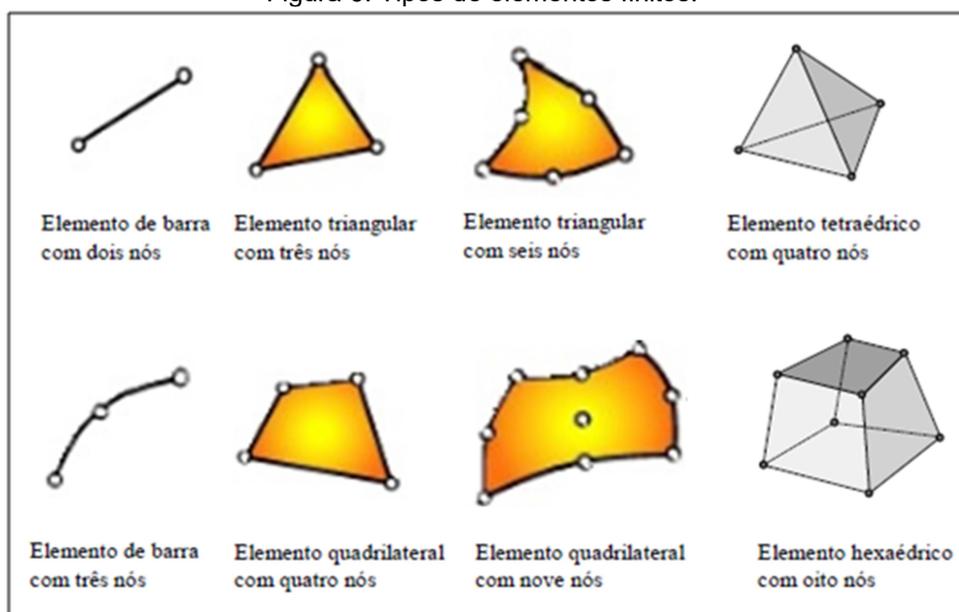


Fonte: Adaptado de Mirlisenna, 2016.

A discretização do modelo contínuo é realizada pelo programa de elementos finitos que calcula a equação matricial de cada elemento e com os vetores e matriz de rigidez encontra-se o deslocamento e as tensões nos pontos nodais (NORTON, 2013).

Ainda segundo Norton (2013), diversos tipos de elementos finitos já foram desenvolvidos. Estes apresentam formas geométricas diversas em função do tipo e da dimensão do problema (se uni, bi, ou tridimensional). A Figura 6 apresenta a geometria de vários tipos de elementos finitos.

Figura 6: Tipos de elementos finitos.



Fonte: Souza, 2003.

Segundo Fagan (1992), A precisão da malha depende da quantidade de nós e elementos, e do tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Um dos aspectos mais importantes do MEF diz respeito a sua convergência. Embora trata-se de um método aproximado, pode-se demonstrar que em uma malha consistente, a medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e conseqüentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para a solução exata do problema.

Quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos serão os resultados da análise (FAGAN, 1992).

Uma maneira de reduzir a quantidade de nós da malha e conseqüentemente o tempo necessário de processamento é a preparação do modelo para análise. A esta preparação do modelo que incluem o seu exame crítico do componente ou conjunto e a avaliação das características da peça (NETO, 2014).

2.3.4 *Propriedades Mecânicas do Material*

As propriedades do material definem as características estruturais de cada componente para uma simulação. E cada simulação pode ter um conjunto diferente de materiais para qualquer componente. As propriedades mais importantes na análise estrutural são o módulo de Young (módulo de elasticidade), o coeficiente de Poisson e os limites elásticos e de resistência do material como os limites ruptura e de escoamento (MARTHA, 1999).

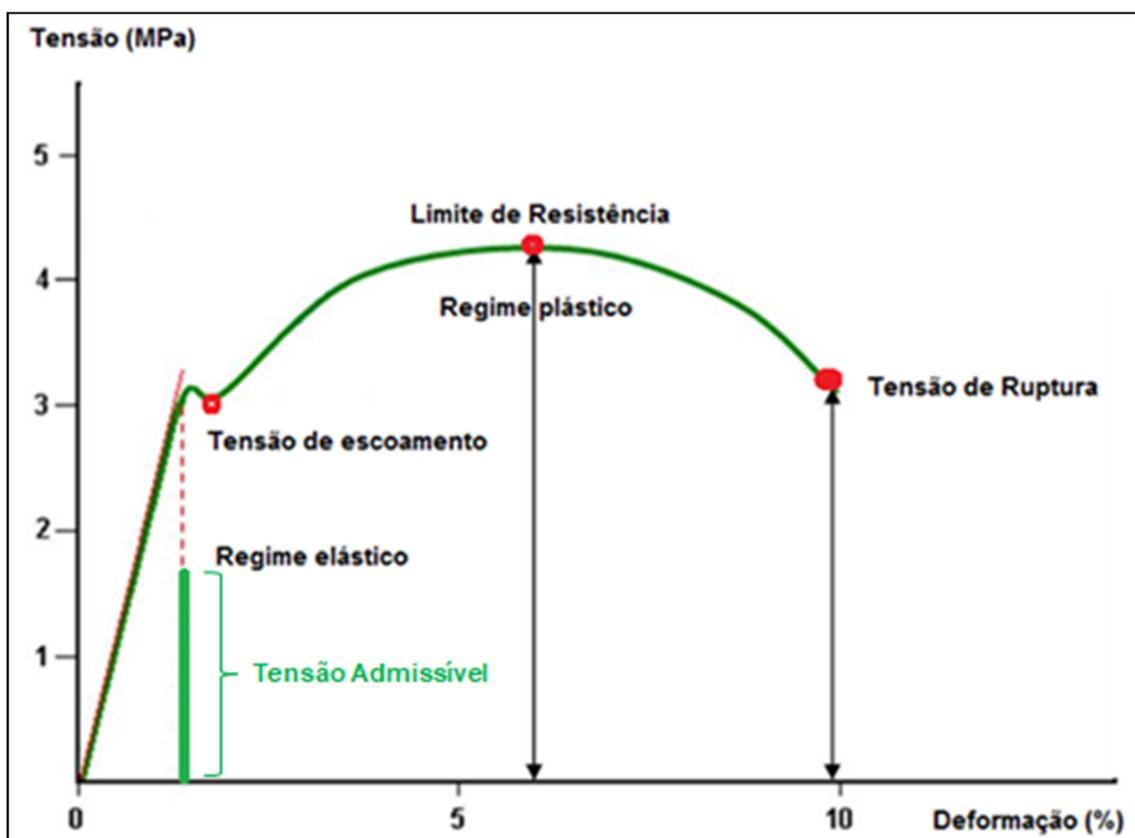
Segundo Neto (2014), a tensão pode ser definida como a força interna atuante em um corpo que é deformado. Essas forças internas são forças de reação contra as forças externas aplicadas no corpo.

Quando uma força age sobre um corpo produz nesse uma tensão que pode ser de tração, compressão, cisalhamento, flexão ou torção. Essas tensões causam uma deformação na região solicitada. Se a tensão é pequena, o corpo volta a seu estado normal assim que a força é cessada. A essa propriedade chamamos de elasticidade. Porém, se a tensão for muito grande, causa uma deformação permanente, isto é, o corpo fica permanentemente deformado após cessada a força. Se a tensão for ainda maior, poderá causar a

ruptura do corpo. A maior tensão que um corpo pode suportar é definida como sendo o limite de resistência ou tensão de ruptura (HIBBELER,2004).

O comportamento de um material submetido às tensões progressivas pode ser representado pelo gráfico de tensão x deformação da Figura 7.

Figura 7: Gráfico tensão x deformação de um ensaio de tração material dúctil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Segundo Hibbeler (2004), na mecânica dos sólidos onde os modelos a serem calculados deverão suportar as cargas com segurança, sem provocar deformações permanentes o analista deve considerar uma tensão menor do que a de escoamento. A esta tensão chamamos de tensão admissível que pode ser definida pela tensão de ruptura do material sobre o fator de segurança, discutido no capítulo anterior.

O valor adotado de coeficiente ou fator de segurança dúctil ou frágil torna-se o fator de segurança do projeto. Depois de realizada a análise no *software* comparam-se os fatores de segurança da análise e do projeto, se o fator da análise for maior que o fator do projeto significa que as tensões na

peça serão menores que as tensões admissíveis e portanto, o projeto estará aprovado quanto a este aspecto analisado. Entretanto, se o fator da análise for menor que o do projeto, deve ser reprovado (HIBBELER,2004).

Na reprovação do projeto deve realizar uma análise crítica das variáveis que influenciam nos resultados, tais como, materiais, geometria, apoios, carregamentos, processos de fabricação e outros. Para escolher as alterações necessárias que levem á aprovação do projeto adequadamente (NETO,2014).

Segundo Azevedo (2014), a deformação é ocasionado pela mudança de geometria de um corpo após cessado a carga externa aplicada. A deformação é uma medida adimensional e pode se definida pela mudança da geometria de um determinado corpo após a aplicação de uma força externa.

O deslocamento por sua vez é a medida expressa por milímetros que representa o quanto um ponto se movimentou após a aplicação de uma força. É um parâmetro muito usado para comparar o resultado da simulação com a condição real do sistema sob analise (AZEVEDO, 2014).

O estudo de análise de tensões, deformações e deslocamentos são de vital importância nas áreas da engenharia, tais como engenharia mecânica, naval, aeronáutica, aeroespacial, onde são necessários análises das estruturas e peças mecânicas de máquinas, automóveis, caminhões, navios, aviões, espaçonaves entre outras (HIBBELER,2004).

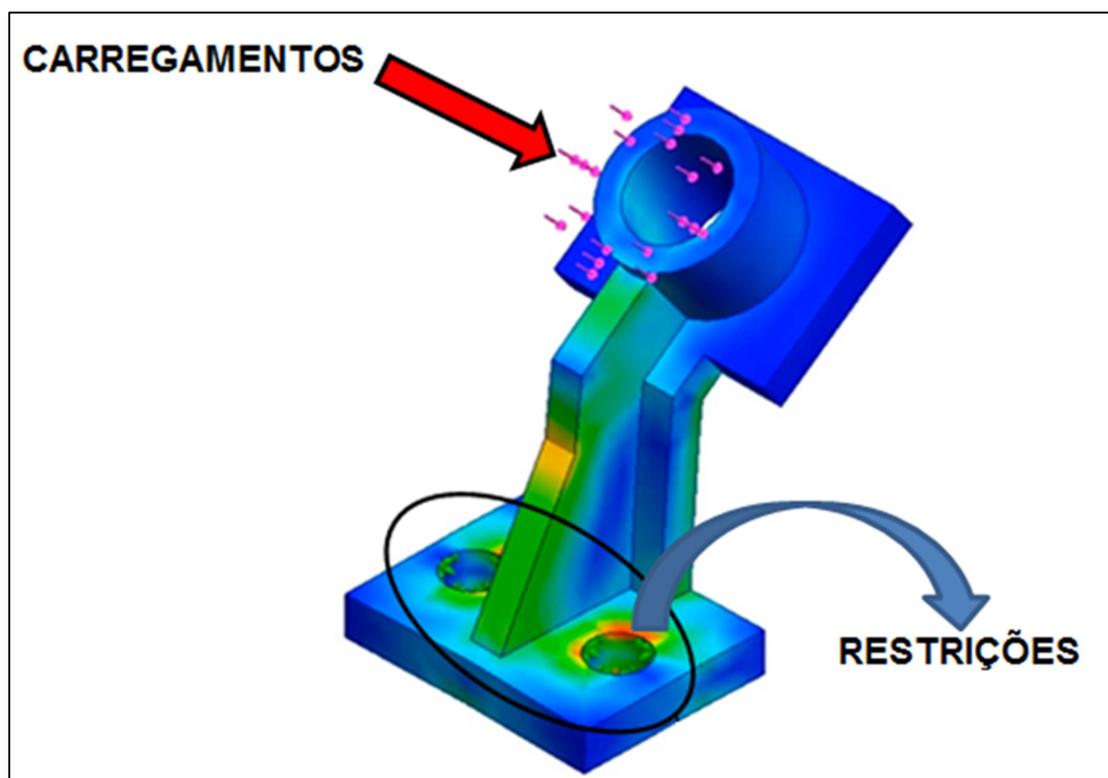
2.3.5 *Condições de Contorno*

Segundo Soriano (2003), para as análises estruturais é necessário acrescentar os dados e hipóteses reais de simulação, esses dados são chamados de condições de contorno e são representados pelas restrições, apoios e carregamentos do modelo.

As restrições definem como a estrutura se relaciona com o meio ambiente. São geralmente chamados de engastamentos. Já os carregamentos são as solicitações as quais a estrutura está submetida, em outras palavras as forças nodais, pressões, momentos, carga térmica entre outras (SORIANO, 2003).

Na Figura 8 podem-se observar as restrições, as região de apoio da peça e as cargas aplicadas.

Figura 8: Exemplo de carregamentos e restrições.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.3.6 Etapas da Análise Estrutural

A análise pelo método de elementos finitos se divide em três etapas distintas são elas: o pré-processamento, processamento (ou análise propriamente dito) e pós-processamento.

No pré-processamento se deve definir: a geometria, tipo de análise, malha, propriedades dos materiais e condições de contorno. São todas as definições estabelecidas antes da simulação que determinam o que será analisado e em que condição será feita a análise. Na análise estrutural com MEF, o pré-processamento inclui a definição da geometria das peças, os materiais, a malha e as condições de contorno (AZEVEDO, 2014).

É nesta etapa que é executado o *solver* do programa, que realiza todas as operações de cálculo para solução do problema discretizado. No processamento deve-se configurar o tipo de análise desejada utilizando equações lineares ou não lineares, e outras configurações para obter os deslocamentos nodais. O tempo de processamento da análise varia de acordo

a complexidade do modelo, tipo de análise e qualidade da malha (ASSAN, 1999).

Segundo Azevedo (2014), no pós-processamento obtemos as respostas em formato de curvas de contornos com as distribuições de tensões, deformação, deslocamento, fator de segurança, entre outros.

Baseado nos resultados nos resultados apresentados no pós-processamento é realizado as análises e a interpretação dos resultados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As necessidades para avaliação estrutural da MCB 4.0 é fundamentado pelo fato do projeto não contemplar análises estruturais em seus componentes, podendo ocorrer deformações permanentes ou falhas durante a operação da máquina. Por esse motivo, são necessárias simulações virtuais para identificar e corrigir falhas no projeto ainda nos estágios iniciais do desenvolvimento, antes da fabricação.

Nas decisões preliminares da análise pelo método dos elementos finitos da MCB 4.0 foi considerada como hipótese a área de atuação como linear estática, pois se espera que a geometria da estrutura retorne ao seu estado original quando removido o carregamento, apresentando um comportamento proporcional e abaixo da tensão de escoamento. Também, os carregamentos e restrições são constantes e os esforços não poderão resultar em separação ou rompimento de corpos.

Os resultados esperados na análise são os efeitos físicos de tensão e deslocamento da estrutura a fim de validar a viabilidade e funcionalidade do conjunto estrutural e minimizar o risco de falhas.

O método do procedimento técnico utilizado nesta pesquisa foi a experimentação e análises estruturais aplicada no projeto virtual de construção mecânica de uma máquina de controle de buchas MCB 4.0.

Segundo Fachin (2004), a experimentação diz respeito à identificação de variáveis que são manipuladas de maneira pré-estabelecida e seus efeitos suficientemente controlados pelo pesquisador para observação do estudo.

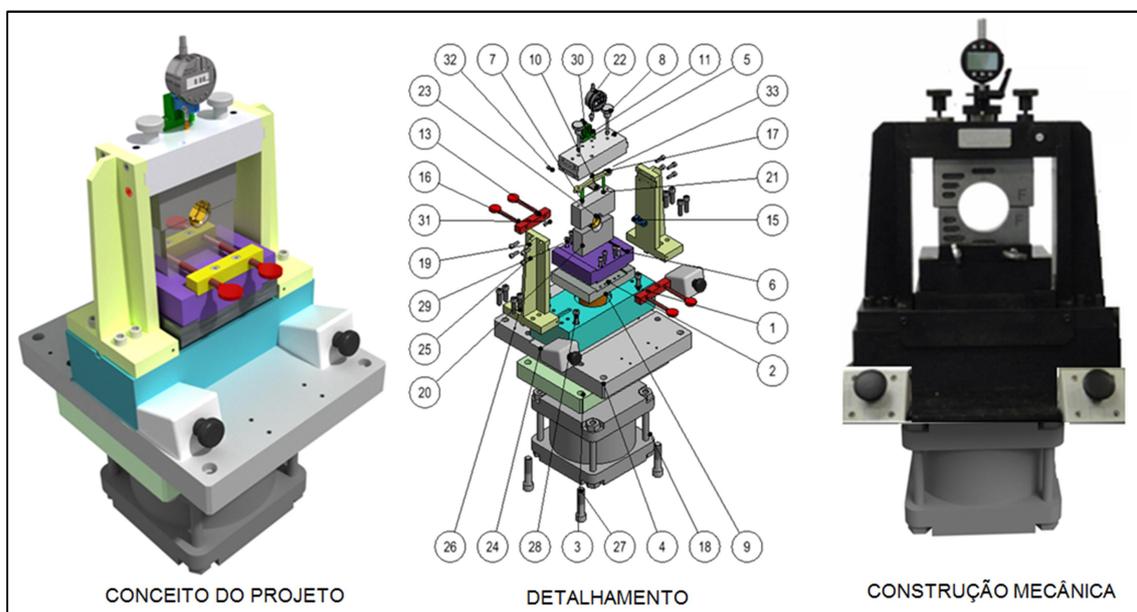
Então para o objetivo de validar se a simulação e análise estrutural da construção da MCB 4.0 é tecnicamente viável, julgou-se extremamente importante à realização de experimentos, pois auxilia na construção de conhecimento específico em aspectos desconhecidos.

No desenvolvimento do *design* do projeto da MCB 4.0 foi dimensionado um conceito que atendesse a necessidade de controle de diâmetro externo de buchas automotivas.

Nesse contexto, o projeto da MCB 4.0 é de extrema importância, pois realiza a medição de diâmetro da bucha sob carga e garante a interferência de montagem entre o diâmetro externo da bucha e o diâmetro interno do alojamento do motor, dessa forma dispensa qualquer dispositivo para

comparação exceto quando a norma ABNT 17025 assim o exigir. A Figura 9 apresenta a imagem do projeto da máquina desenvolvida e fabricada.

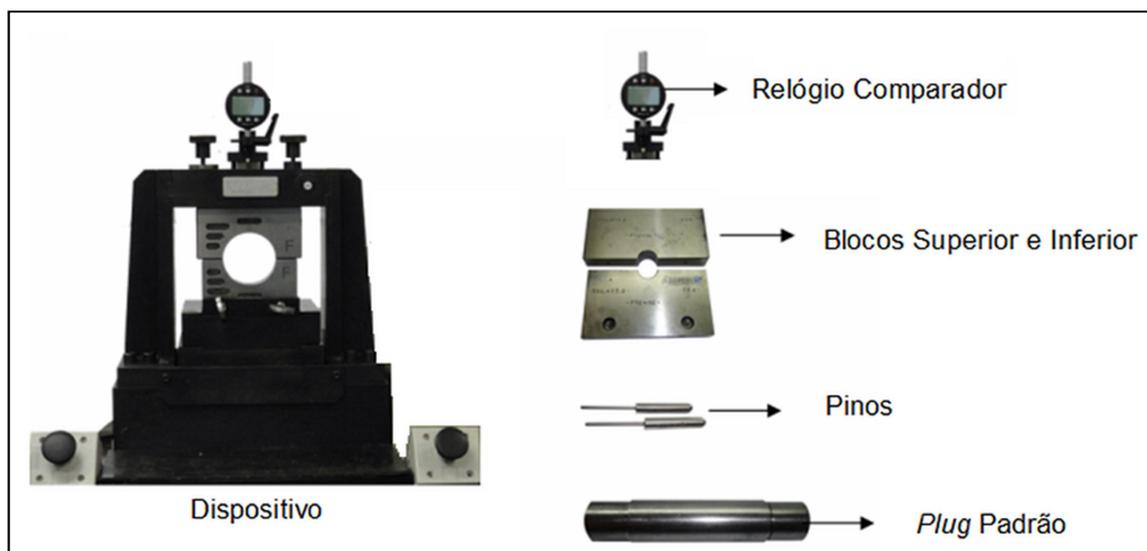
Figura 9: Projeto e fabricação da MCB 4.0.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A máquina é constituída por relógio comparador, blocos superior e inferior, pinos e plug padrão conforme mostra a Figura 10.

Figura 10: Componentes da MCB 4.0.

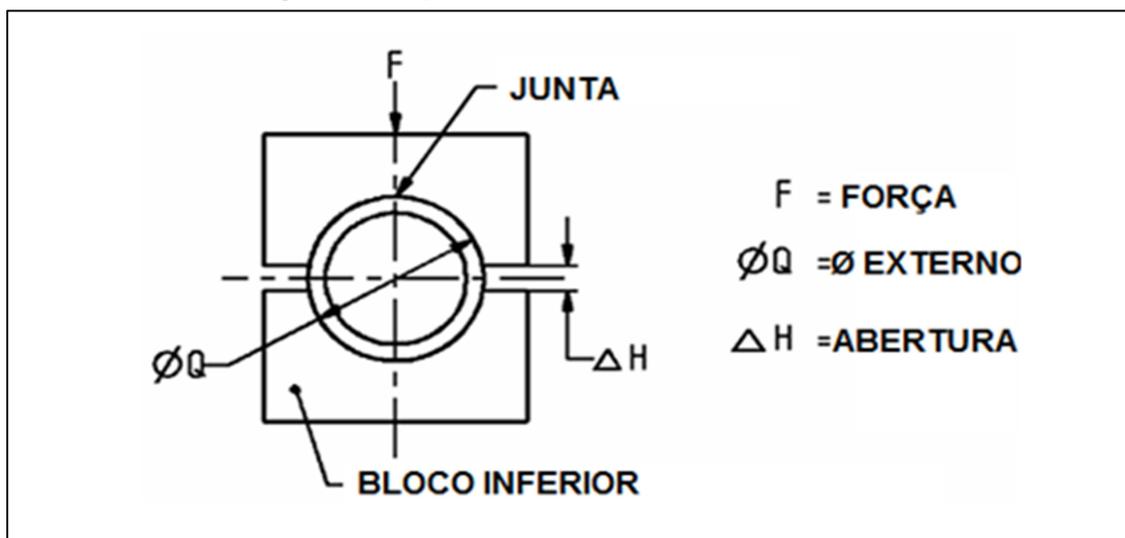


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O conceito de projeto consiste em colocar a bucha em compressão entre dois blocos sob uma carga predeterminada (F) produzida por um acionamento do cilindro pneumático de acordo com aplicação do produto, explícita no desenho do produto. A máquina deve ser acionada pelo comando bi manual que se encontra ao lado do dispositivo.

A Figura 11 apresenta um esquema de funcionamento da MCB 4.0, com as forças e folgas atuantes no processo.

Figura 11: Esquema do funcionamento da MCB 4.0.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As leituras de ajuste são tomadas a partir de um *Plug* Padrão rígido com diâmetro o máximo ($\varnothing Q$). Os valores circunferenciais são convertidos para variações lineares (ΔH) por um fator de $\pi/2$, o que representa a especificação da bucha dada pelo cliente.

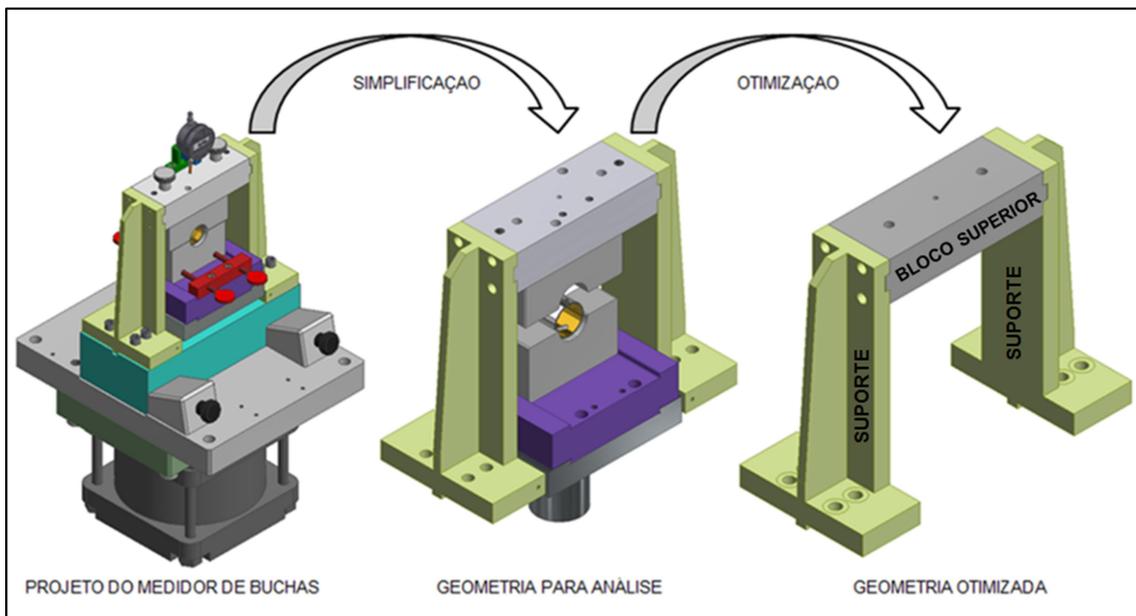
A força atuante na estrutura da máquina é resultante de um cilindro pneumático utilizado no projeto. O atuador é um modelo especial do fornecedor *Norgren* e trabalha com uma força máxima de avanço de 29500N. A função do cilindro é realizar uma pressão no diâmetro externo da bucha posicionada nos blocos inferiores e superiores de modo a reproduzir a correta interferência reproduzindo assim a montagem da bucha no motor.

No desenvolvimento da análise estrutural o foco do estudo serão os componentes de maior solicitação mecânica da MCB 4.0 que são os suportes laterais e o bloco superior, elementos esses que podem comprometer a

sanidade do conjunto estrutural. Nesse contexto foi simplificado o modelo e otimizado a geometria para análise.

A Figura 12 apresenta as etapas modelagem, simplificação e otimização do projeto da MCB 4.0 a fim otimizar o processo da análise.

Figura 12: Otimização do projeto para análise.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dentro do *software* de elementos finitos, a geometria otimizada contínua é discretizada em uma malha de elementos finitos. O resultado da discretização é uma representação aproximada do modelo. O programa então calcula os deslocamentos e as tensões em cada nó. Para uma solução de maior precisão e acurácia é utilizado um refinamento nas regiões de maior incidência de solicitações e propícias a falhas mecânicas.

A Figura 13 apresenta a imagem do modelo com a malha e as regiões de refinamento.

Figura 13: Geração da malha de elementos finitos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observa-se que nos apoios dos suportes da máquina foi realizado um refinamento de malha.

O material especificado no projeto dos suportes laterais e bloco superior é o ABNT 1020. Para viabilizar a sanidade do material foi especificado as propriedades mecânicas associadas ao aço 1020.

A Figura 14 apresenta a imagem das propriedades mecânicas do aço 1020 estrutural disponível no programa de elementos finitos.

Figura 14: Propriedade mecânica do material ABNT 1020 inseridas no Ansys.

<input type="checkbox"/> Young's Modulus	2,e+005 MPa	
<input type="checkbox"/> Poisson's Ratio	0,3	
<input type="checkbox"/> Density	7,85e-006 kg/m³	
<input type="checkbox"/> Thermal Expansion	1,2e-005 1/°C	
<input type="checkbox"/> Alternating Stress		
<input type="checkbox"/> Strain-Life Parameters		
<input type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	250, MPa	
<input type="checkbox"/> Compressive Yield Strength	250, MPa	
<input type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	460, MPa	
<input type="checkbox"/> Compressive Ultimate Strength	0, MPa	

Fonte: Programa Ansys.

Para os resultados dessa monografia, serão considerados os valores de tensão de escoamento, tensão de ruptura, tensão admissível e módulo de elasticidade na análise estática linear da estrutura da máquina. Para a determinação da tensão admissível do material foi levado em consideração um fator de segurança de 3, pois a carga é intermitente e o ambiente é desafiador.

Na tabela 1 é descrito os valores das propriedades mecânicas principais do aço 1020.

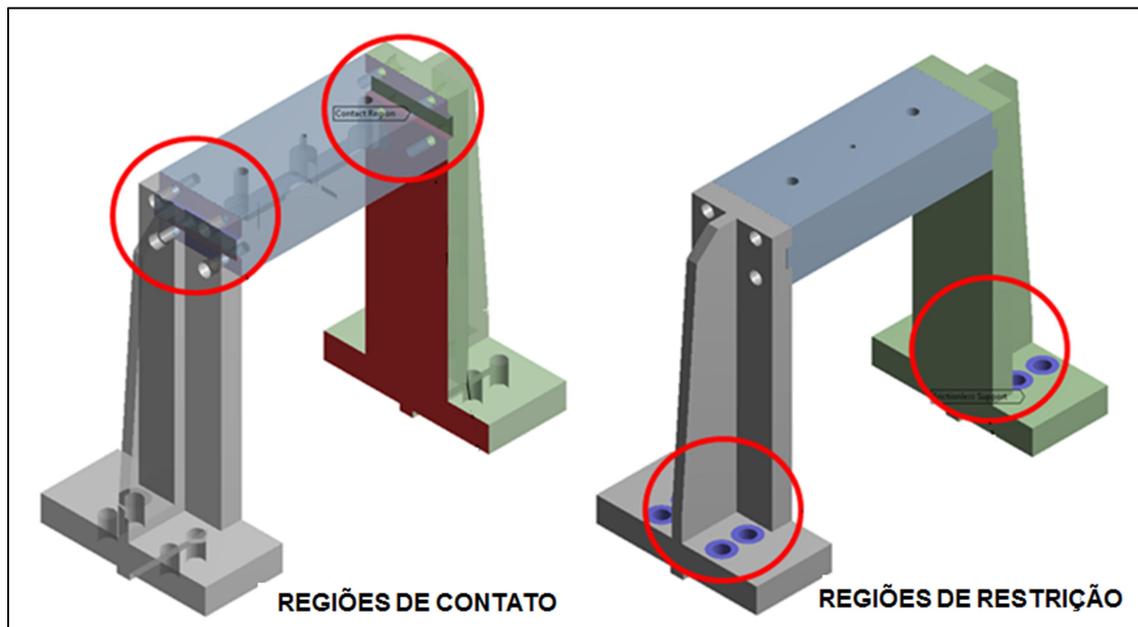
Tabela 1: Propriedades mecânicas principais do aço 1020.

Propriedades Mecânicas	Material ABNT 1020
Módulo de Elasticidade (GPa)	207
Tensão de Escoamento (MPa)	250
Tensão de Ruptura (MPa)	460
Tensão Admissível (MPa)	153
Fator de Segurança (Adimensional)	3

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A estrutura foi engastada nas regiões dos furos, onde representam as fixações reais dos parafusos na mesa da máquina. As regiões de contato foram definidas levando em consideração a montagem fixa do bloco superior com os suportes laterais da estrutura da máquina. A Figura 15 mostra as regiões de engastamentos e contatos do modelo.

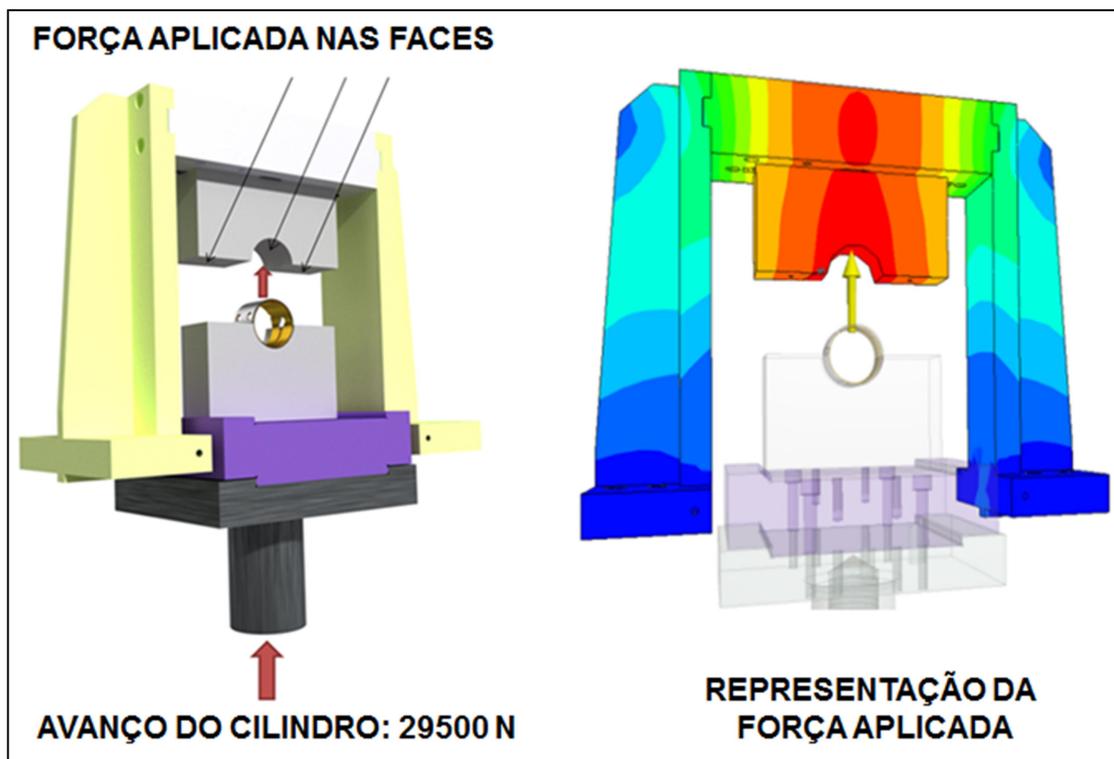
Figura 15: Condições de contato e restrições.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os carregamentos e solicitações aplicados na estrutura são provenientes da força de avanço do cilindro pneumático de 29500N as quais a estrutura está submetida. As cargas são aplicadas nas regiões das faces inferiores do bloco, conforme é mostrado na Figura 16.

Figura 16: Cargas aplicadas e solicitações da MCB 4.0.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No processamento e simulação da análise foi configurado no *software* de elementos finitos o tipo de análise desejada. No caso desse trabalho foram utilizadas como hipóteses equações lineares estáticas para obter os deslocamentos nodais. As equações foram processadas pelo *software* onde foram realizadas todas as operações de cálculo para a solução do problema. Nessa etapa não há interação com o usuário.

Os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho foram o programa *Autodesk Inventor* para modelagem e detalhamento dos desenhos. Para a simulação e análise estrutural do projeto de máquina do controlador de buchas foi utilizado o programa de análise pelo método dos elementos finitos *Ansys*. Os programas da *Ansys*, empresa responsável por desenvolver softwares de simulação para engenharia, apresentam soluções para diferentes aplicações (dinâmica dos fluidos computacional, mecânica estrutural, eletromagnetismo, simulação multifísica, entre outros). Para esse trabalho a ferramenta é utilizada no estudo das tensões, deformações e deslocamentos dos modelos estruturais do projeto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico será apresentado os resultados em formato de curvas de contorno com as distribuições de tensão e deslocamento da estrutura da MCB 4.0. Também será apresentada a avaliação das respostas fornecidas pelo *software* obtido pela simulação e comprovada pela experimentação da máquina fabricada.

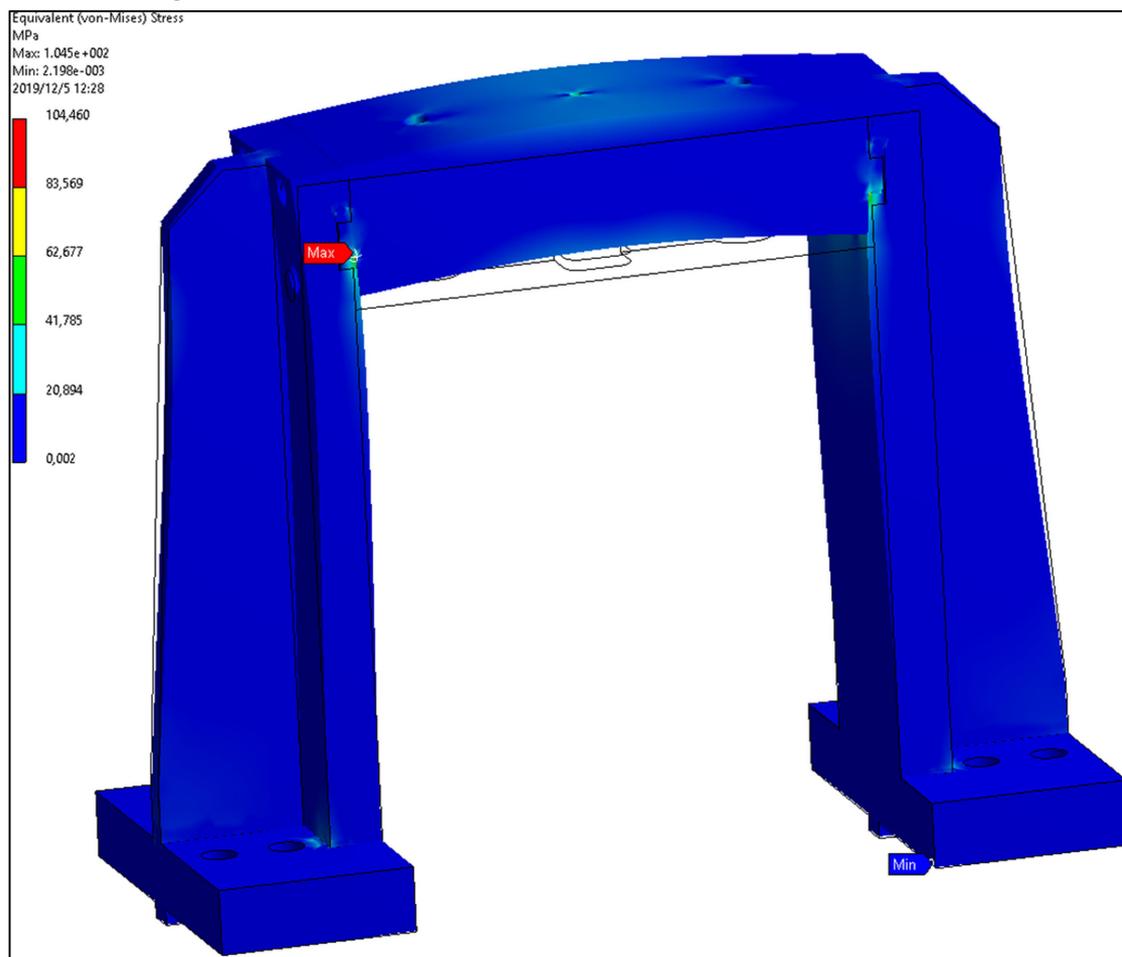
Ao avaliar os resultados obtidos por meio da análise simulacional da máquina, que norteou este trabalho, foi possível identificar comportamentos similares e aproximados do modelo real da máquina durante a aplicação das condições de contorno.

Os resultados das análises processada pelo programa de elementos finitos apresentam-se em uma linha graduada de cores, onde cada cor corresponde a uma tensão ou deslocamento diferente ocorridos na estrutura, sendo que a cor vermelha indica a região de maior sollicitação mecânica e de maior atenção.

A tensão equivalente no conjunto estrutural obtida da simulação representa as forças internas atuante na estrutura que é deformada. Essas forças internas são a reação contra as forças externas aplicadas no corpo.

As Figuras 17, 18 e 19 apresentam as respostas das tensões estáticas em MPa de reação produzida pela ação da carga de 29500 N aplicada à estrutura da máquina.

Figura 17: Resultado da tensão encontrada na estrutura da MCB 4.0.

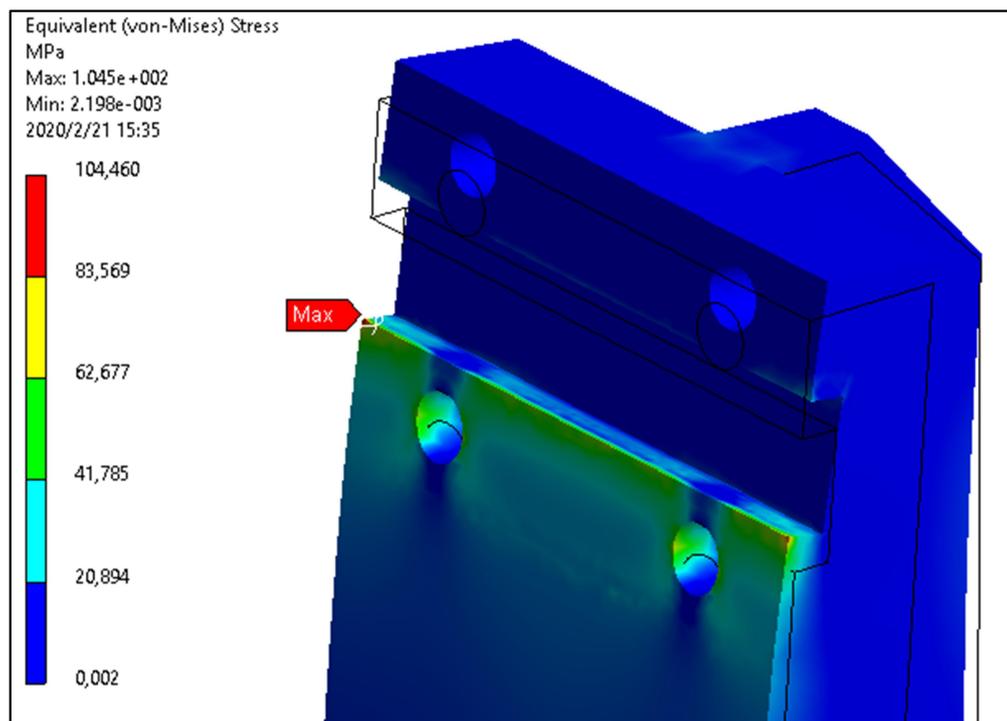


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na imagem do conjunto estrutural da MCB 4.0 pode-se observar que apenas num pequeno ponto (região em vermelho) como indicado, apresenta uma tensão mais significativa e de atenção, devido à carga estar concentrada sobre esta região. Porém predomina em toda estrutura baixas tensões (região em azul), o que indica robustez e segurança no conjunto montado.

As imagens das figuras 18 e 19 apresentam os resultados da tensão nos componentes do suporte e bloco superior da estrutura.

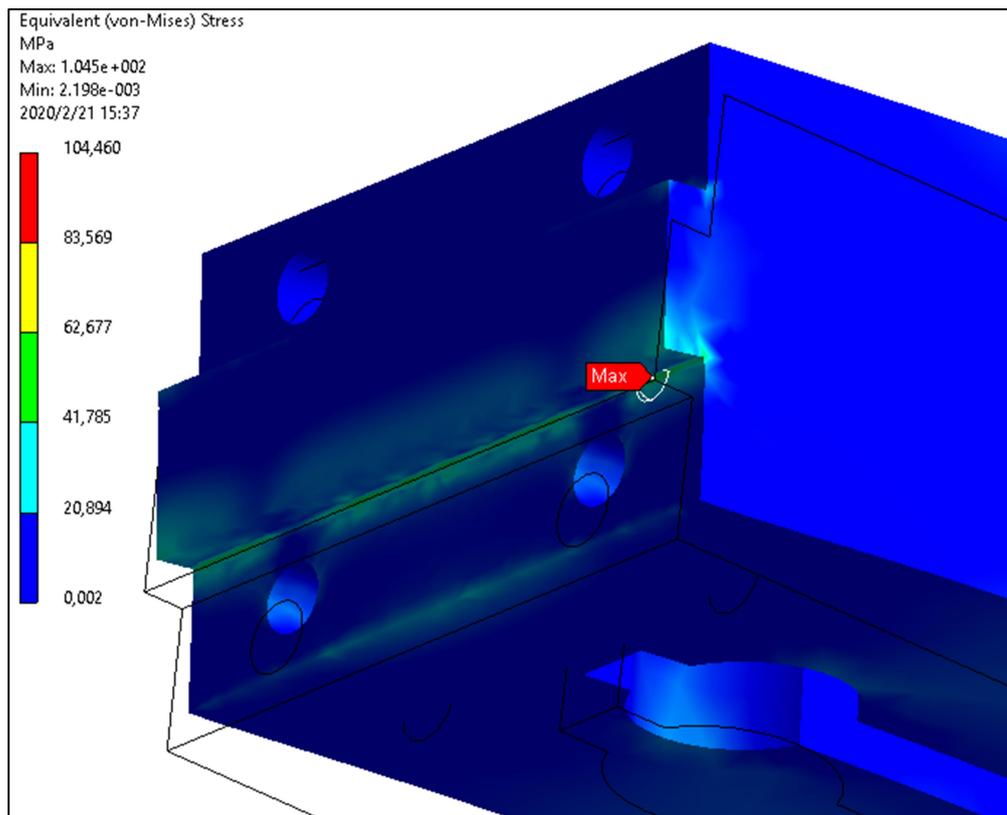
Figura 18: Resultado da tensão encontrado no suporte da estrutura.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nota-se que na Figura 18 do suporte, a região inferior de apoio apresenta uma resposta maior de tensão interna (cores esverdeadas) e um ponto de concentração de tensões (cores avermelhadas), causada pela reação das forças de montagem do componente do bloco de apoio, que também apresenta esse comportamento, como é mostrado na Figura 19.

Figura 19: Resultado da tensão encontrado no bloco superior da estrutura.



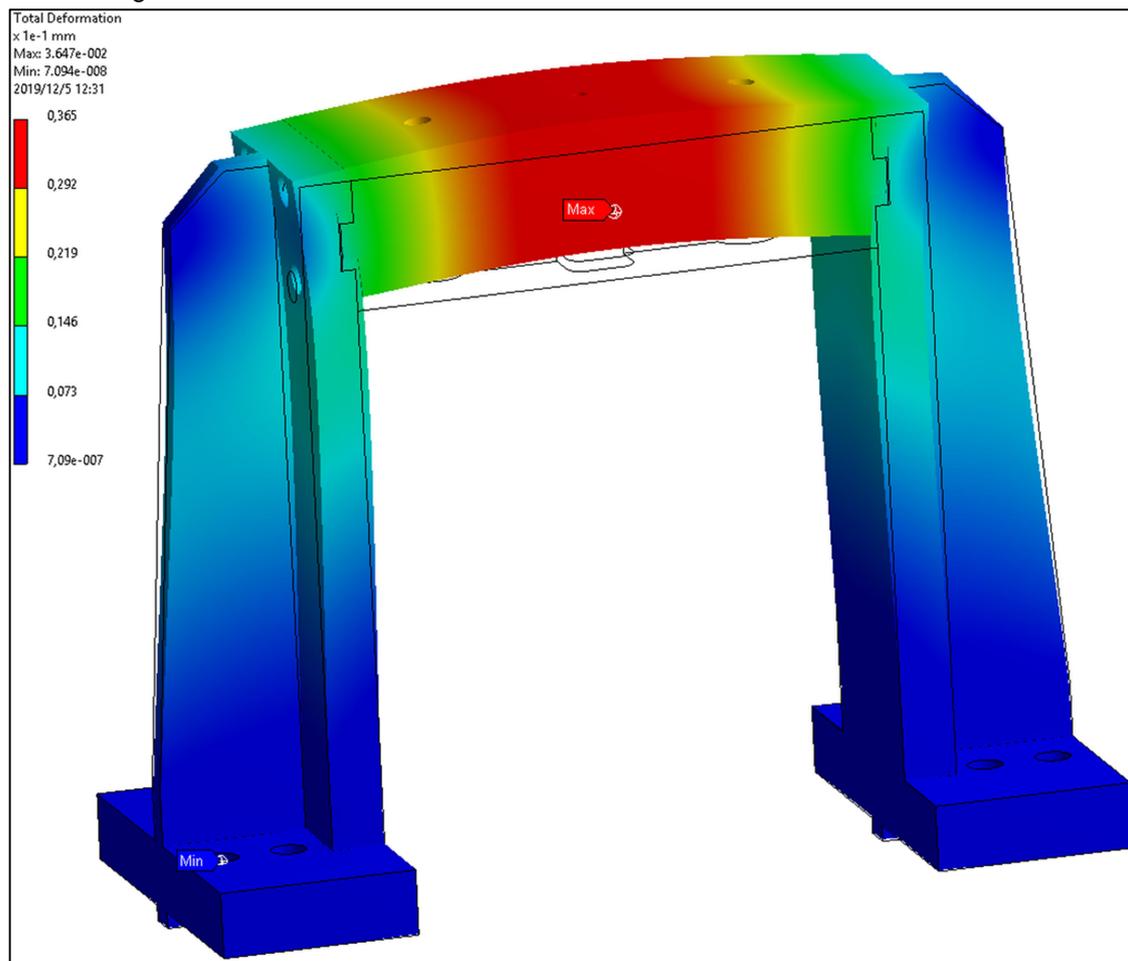
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na análise dos resultados das imagens, é possível notar claramente a distribuição de tensões em torno dos suportes laterais e bloco superior da máquina.

Observa-se que a região de cores avermelhadas é encontrada um pico de tensão de 104,46 Mpa que é abaixo da tensão admissível determinada para o aço ABNT 1020, que é de 153 Mpa. Esse resultado é fisicamente compatível com os testes experimentais da máquina, e reflete a realidade física.

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam as respostas dos deslocamentos estáticos em milímetros da reação produzida pela ação da carga de 29500 N aplicada à estrutura da máquina.

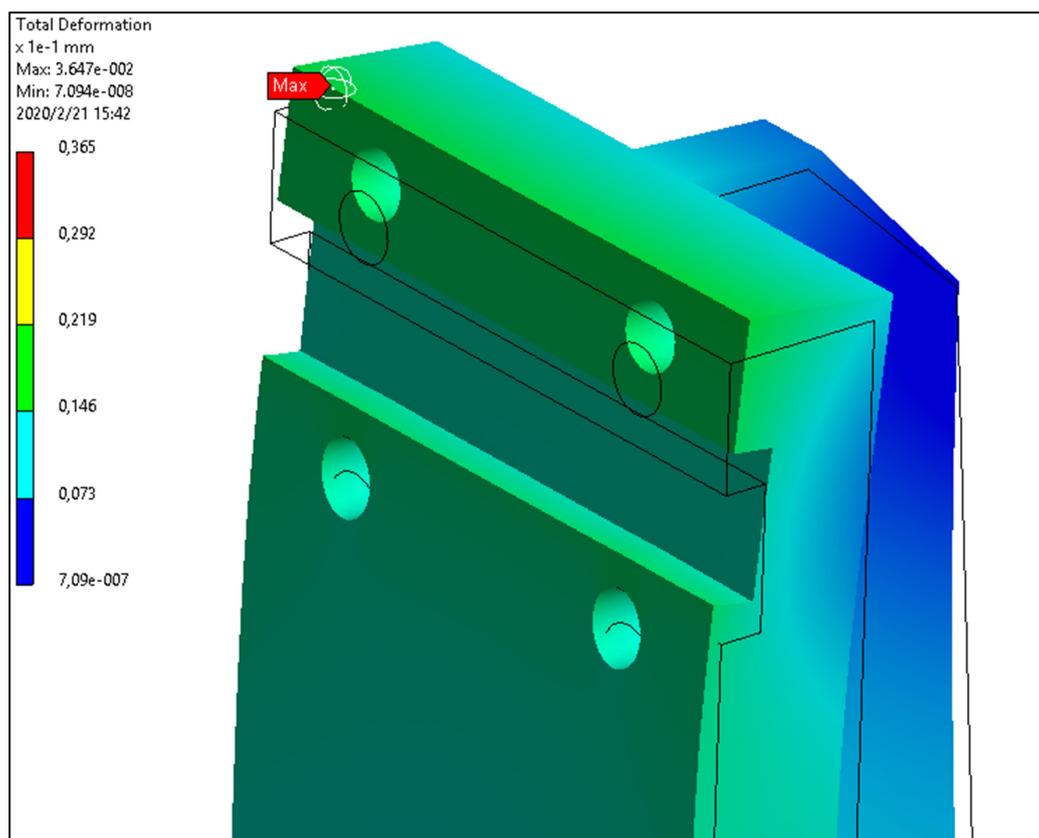
Figura 20: Resultado do deslocamento encontrado na estrutura da MCB 4.0.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na imagem do conjunto estrutural da MCB 4.0 pode-se observar que a região em vermelho apresenta um deslocamento, devido à carga estar concentrada sobre esta região. A imagem da figura 20 apresentam os resultados da tensão nos componentes do suporte e bloco superior da estrutura.

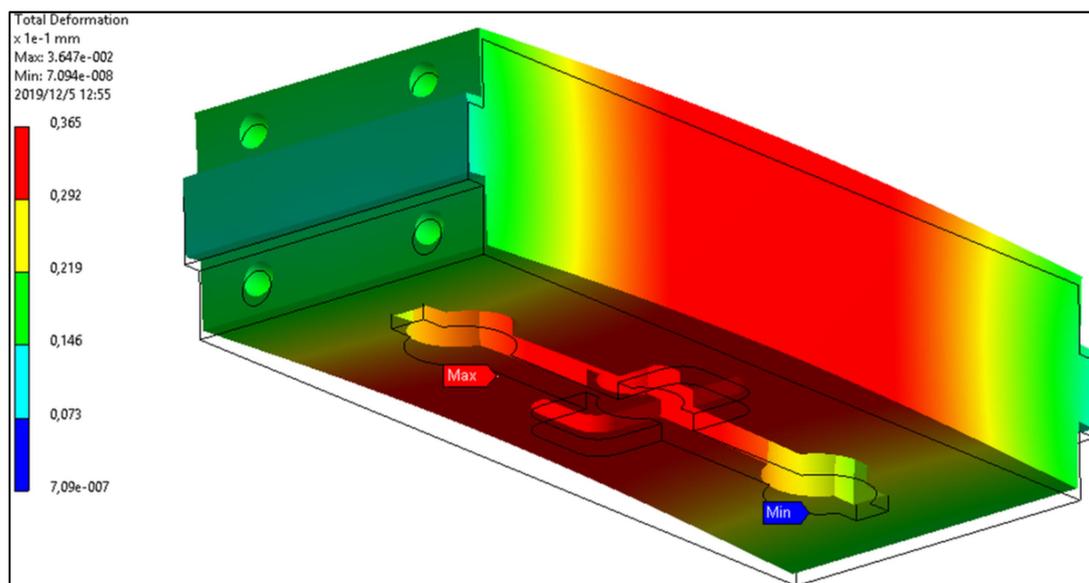
Figura 21: Resultado do deslocamento encontrado no suporte da estrutura.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nota-se que na Figura 21 do suporte, a região superior de apoio apresenta um maior deslocamento em milímetros (cores esverdeadas) causado pela reação das forças de montagem do componente do bloco de apoio, que também apresenta esse comportamento, como é mostrado na Figura 22.

Figura 22: Resultado do deslocamento encontrado no bloco da estrutura.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nas imagens pode-se notar claramente um deslocamento de maior magnitude da região central do bloco superior da Figura 22 que apresenta cores avermelhadas e requer maior atenção.

Observa-se que a região de maior deslocamento encontrado é de 0.0365 milímetros, valor esse que é insignificante em comparação com as dimensões da estrutura de máquina.

Esse resultado é fisicamente compatível com os testes experimentais da máquina, e reflete a realidade física reproduzida.

Baseado nos experimentos deste trabalho e avaliando os resultados das análises apresentadas, pode-se chegar a algumas definições referentes as hipóteses apresentadas da à viabilidade técnica do projeto de construção mecânica da MCB 4.0, tais como:

Segundo análise, a propriedade de tensão encontrada é significativamente menor que a tensão admissível, conseqüentemente, após cessada a força a estrutura volta a seu estado inicial, permanecendo na zona elástica linear.

O deslocamento de 0.0365 milímetros não é suficiente para uma deformação permanente na estrutura, portanto a rigidez e sua geometria inicial se mantem, atendendo assim o critério da análise linear apresentada na primeira hipótese.

5. CONCLUSÃO

O objetivo inicial deste trabalho foi concluído com sucesso, visto que o desenvolvimento e as análises simulacionais do projeto de construção da MCB 4.0 cumpriram fielmente os requisitos estruturais esperados nos testes e análises pelo MEF, viabilizando tecnicamente o projeto de construção mecânica da máquina e garantindo a sanidade e segurança do conjunto estrutural.

O resultado foi um aumento da confiabilidade e robustez da máquina, reduzindo a probabilidade de falha dos componentes estruturais e gerando um melhor desempenho e segurança da máquina. Com o uso da simulação também foi possível uma redução de custos de tempo na elaboração do projeto, pois a falha é detectada antes da sua fabricação, contribuindo na redução dos custos de material e manufatura dos componentes.

Conclui-se que esta monografia traz uma contribuição para a disseminação da aplicação de técnicas para criar, desenvolver e simular projetos de máquinas com auxílio de ambientes virtuais auxiliados por análises computacionais, para agilidade e solução de problemas nas áreas de engenharia, através de um correto e validado projeto mecânico simulacional como este, ou seja, de uma máquina de controle de buchas projetada e construída a luz da nova tecnologia da indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. R. M. **Método dos elementos finitos**. Faculdade Federal de Goiás. Goiânia/Go, 2014.
- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos A Base da Tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica LTDA, 2007.
- ASSAN, Aloisio Ernesto. **Método de Elementos Finitos: Primeiros Passos**. São Paulo: Editora da Unicamp, 2003.
- AZEVEDO, Domingos Flávio de Oliveira. **Análise estrutural com Ansys Workbench: Static Structural**. Mogi das Cruzes, 2014.
- ESSS. **Descubra como a simulação computacional pode ajudar o seu negócio a crescer**. 08 de Julho de 2016, 15:30 . Disponível em: <https://www.esss.co/blog/descubra-como-a-simulacao-computacional-pode-ajudar-o-seu-negocio-a-crescer/>.
- FACHIN, O. **Fundamentos de Metodologia Científica**. Ed Saraiva. 2004.
- FAGAN, M. J. **Finite Element Analysis – Theory and Practice**. USA, 1992.
- FERNEDA, Rodrigo. **Adoção de tecnologias da indústria 4.0 por firmas do agronegócio**. Rio Grande do Sul, 2018.
- FIRMINO, S. Mudando o papel da simulação computacional nas empresas. 06 de dezembro de 2016, 10:41. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/mudando-o-papel-da-simulacao-computacional-nas-empresas/>.
- FREITAS, M. M B. C.; SOUZA, G. P. L. **Logística 4.0: conceitos e aplicabilidade uma pesquisa ação em uma empresa de tecnologia para o mercado automobilístico**. Caderno PAIC, v. 17, n. 1, p. 111-117, 2016.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- IIDA I. ; BUARQUE L. **Ergonomia Projeto e Produção**. São Paulo: Blucher, 2016.
- JAMES, R. F., & JAMES, M. L. **Teaching career and technical skills in a “mini” business world**. *Business Education Forum*, 59(2), 39-41, 2004.
- LU, Y. **Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues**. *Journal of Industrial Information Integration*, 2017.
- MARTHA, L. F. **Análise de Estruturas: conceitos e Método Básicos**. Ed. Elsevier, 2010. RAO, S. S., **The finite element method in engineering**. 3 ed, USA: Butterworth-Heinemann, 1999.

MIRLISENNA G. Método dos Elementos Finitos: o que é? ESSS. 22 de janeiro de 2016, 15:23 . Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>, 2016.

MOURA, R. A.; JESUS, N. M. R.; SOUZA, R. S. **Antropometria e ergonomia como ferramentas de vanguarda produtivas nas indústrias do futuro.** Revista SODEBRÁS. Volume nº 14. Edição nº 157. Janeiro, 2019.

NETO, Alfredo Gay. **Geração de Malhas de Elementos Finitos.** São Paulo (Apostila do Curso de Pós-Graduação em Simulação Computacional da ESSS), 2014.

NIEMAM, G. **Elementos Máquinas. Volume I e 2.** Ed. Edgar Blucher, 2002.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas.** Bookman Editora, 2013.

OESTERREICH, T. D.; TEUTEBERG, F. **Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry.** Computers in Industry, 2016.

OLIVEIRA, T. F.; SIMÕES, W.L. **A indústria 4.0 e a produção no contexto dos estudantes da engenharia.** Simpósio de Engenharia de Produção, 2016.

RÜßMANN, Michael et al. Industry 4.0: **The future of productivity and growth in manufacturing industries.** Boston Consulting Group, v. 9, n. 1, p. 54-89, 2015.

SANTOS, R. P. **Indústria 4.0 e logística 4.0: evolução tecnológica.** 6a Jornada Científica e Tecnológica da FATEC de Botucatu. São Paulo, 2017.

SHIGLEY, M. **Projeto de Engenharia Mecânica.** 7º Edição. Reimpressão 2011.

SOUZA, M. R. O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor. Belém, Maio, 2003.

STONE, P., et al., **"Artificial Intelligence and Life in 2030."** One Hundred Year Study on Artificial Intelligence: Report of the 2015-2016 Study Panel, Stanford University, Stanford, CA, September 2016. Disponível em: <http://ai100.stanford.edu/2016-report>.

SORIANO, Humberto Lima. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.