

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA - UFJF
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCO AURÉLIO MARTINS PIAZZE

**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE UMA BARRA DE
CARGA APÓS FALHA UTILIZANDO MÉTODO POR ELEMENTOS
FINITOS**

JUIZ DE FORA
2014

MARCO AURÉLIO MARTINS PIAZZE

**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE UMA BARRA DE
CARGA APÓS FALHA UTILIZANDO MÉTODO POR ELEMENTOS
FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Rogério de Almeida Vieira

JUIZ DE FORA

MARCO AURÉLIO MARTINS PIAZZE

**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE UMA BARRA DE
CARGA APÓS FALHA UTILIZANDO MÉTODO POR ELEMENTOS
FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 21/11/2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr., Rogério de Almeida Vieira
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr., Moisés Luiz Lagares Júnior
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr., Marcos Martins Borges
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma doaram um pouco de si para que a conclusão deste trabalho se tornasse possível:

À Deus, por acreditar que nossa existência pressupõe outra infinitamente superior e por fazer que o impossível tornasse possível em minha vida.

Ao meu professor orientador, Dr. Rogério de Almeida Vieira, pelo auxílio, disponibilidade de tempo e material.

A minha esposa Jussara, por acrescentar razão e beleza aos meus dias, exemplo, amizade e carinho.

Aos meus pais, irmãos e amigos, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

RESUMO

O presente trabalho objetiva compreender e analisar a falha de uma barra de carga, também conhecida como viga de carga, aplicada a uma indústria siderúrgica durante operação, utilizando método analítico, através de cálculos de resistência dos materiais, e métodos numéricos, através da análise de elementos finitos aplicado a um *software* comercial. Para isso tornam-se necessários conhecimentos de origem e classificação dos materiais, tipos de falhas, origem e definições de método de elementos finitos e conceitos de estruturas e vigas. Visto que o papel da engenharia está relacionado com realização de projetos seguros, com baixo custo, otimização e seleção adequada de materiais, o estudo torna-se fundamental a fim de evitar e prevenir falhas através do refinamento da aplicação e fundamentação matemática da simulação computacional aplicada, visto que o maior número de falhas existentes na indústria está relacionado com falhas em movimentação e elevação de carga. Análise por Elementos Finitos é um método extremamente confiável, quando aplicado corretamente e tem sido utilizado cada vez mais pelos profissionais responsáveis por projetos mecânicos e estruturais devido a complexidade de vários projetos, sendo inviáveis realizar cálculos analíticos.

Palavras-chave: Barra de Carga, Elementos Finitos e Falha.

ABSTRACT

This work aims to understand and analyze the failure of a Below Hook Lifters, applied to a steel industry during operation, using analytical method through calculations of strength of materials, and numerical methods, by analyzing finite elements applied to a commercial software. For this purpose, knowledge of source and classification of materials, types of failures, origin and definitions of finite elements and concepts of structure and beams are necessary. Since the role of engineering is related to the accomplishment of low cost safe projects, optimization and proper selection of materials, the study becomes crucial in order to avoid and prevent failure through the application refinement and the mathematical foundation of applied computer simulation as the largest number of failures in the industry is associated with failures while moving and lifting load. Finite Element Analysis is a very reliable method, when applied correctly and it has been increasingly used by professionals responsible for mechanical and structural projects due to the complexity of multiple projects, being unfeasible to perform analytical calculations.

Keywords: Below Hook Lifters, Finite Elements, Failures

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- a) Fratura dúctil; b) Fratura frágil.....	17
Figura 2 - Fratura por fadiga.....	17
Figura 3 - Geometria cargas e malhas de elementos finitos.....	24
Figura 4 - Tipos de Elementos.....	25
Figura 5 - Análise de um rotor de uma turbina.....	26
Figura 6 - Perfis de vigas utilizadas.....	28
Figura 7 - Aplicação da barra de carga do estudo.....	30
Figura 8 - Conjunto de detalhes do projeto.....	31
Figura 9 - Vista lateral da falha na barra de carga.....	32
Figura 10 - Vista frontal da falha na barra de carga.....	32
Figura 11 - Vista da seção da falha.....	33
Figura 12 - Resultados de Metalografia.....	34
Figura 13 - Resultados encontrados na simulação do projetista.....	34
Figura 14 - Tensão de Von Misses.....	35
Figura 15 - Tensão Principal.....	35
Figura 16 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 1045 laminado à quente.....	38
Figura 17 - Propriedades do Aço AISI 1045 inseridas no <i>SolidWorks</i>	39
Figura 18 - Simulação 3-D da barra de carga.....	40
Figura 19 - Tensão (Von Misses).....	42
Figura 20 - Região mais solicitada.....	42
Figura 21 - Deslocamento.....	43
Figura 22 - Deformação.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicações, propriedades e exemplos representativos.....	15
Tabela 2 - Propriedades mecânicas de Aços-carbono.....	19
Tabela 3 - Classes de utilização.....	36
Tabela 4 - Estado de carga.....	36
Tabela 5 - Classificação da estrutura dos equipamentos (ou elementos da estrutura) em grupo.....	37
Tabela 6 - Valores do coeficiente de majoração para equipamentos industriais.....	37
Tabela 7 - Valores do coeficiente dinâmico.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

MEF – Método dos Elementos Finitos

FEA – Análise por Elementos Finitos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASME – American Society of Mechanical Engineers

CAD – *Computer-aided design*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

3-D – Três Dimensões

- Coeficiente de majoração aplicável ao cálculo das estruturas

- Solicitação devido ao peso próprio

- Solicitação devido à carga de serviço

- Fator de Segurança

- Carga de Trabalho

φ – Coeficiente Dinâmico

- Tensão Admissível

- Tensão de Escoamento

- Tensão Solicitada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
1.2 JUSTIFICATIVA	11
1.3 ESCOPO DO TRABALHO	12
1.4 OBJETIVOS	12
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 MATERIAIS	14
2.1.1 Classificação.....	14
2.1.2 Falhas.....	16
2.1.3 Materiais das Estruturas Metálicas	18
2.2 MÉTODOS DE ANÁLISE	19
2.2.1 Análise Matemática	19
2.2.2 Protótipo em Laboratório.....	20
2.2.3 Simulação Computacional.....	20
2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	21
2.3.1 Origem.....	21
2.3.2 Definições e Aplicações	22
2.3.3 Considerações sobre o <i>software</i> a ser utilizado	25
2.4 ESTRUTURAS METÁLICAS, VIGAS E BARRAS DE CARGA	26
2.4.1 Histórico	26
2.4.2 Vigas.....	27
2.4.3 Barras de Carga	28
3 METODOLOGIA.....	30
3.1 FALHA APRESENTADA.....	30

3.2 CÁLCULOS ANALÍTICOS, CONFORME NORMA NBR 8400.....	36
3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA UTILIZANDO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ATRAVÉS DO <i>SOLIDWORKS</i>	39
3.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 RESULTADOS ALCANÇADOS.....	41
4.1.1 – Resultados do Método Analítico	41
4.1.2 – Resultados da Simulação.....	41
4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	43
5 CONCLUSÕES.....	45
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	47
ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE.....	49
ANEXO 2 - PROJETO	50
ANEXO 3 – MEMORIAL DE CÁLCULO ANALÍTICO CONFORME NORMA NBR8400.....	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os dispositivos de elevação de carga estão cada vez mais presentes nos processos industriais, sendo fundamental que engenheiros realizem projetos cada vez mais leves, econômicos, e com alta confiabilidade em busca de segurança operacional, visto que inúmeros acidentes ocorrem neste segmento.

Para atender esta necessidade, estudos têm sido realizados com o objetivo de melhorar as técnicas para elaboração e análise de projeto, consistindo em métodos analíticos (resoluções através de cálculos matemáticos baseados em resistência dos materiais), métodos empíricos (ensaios em laboratórios de modelos experimentais) e métodos numéricos (aproximações matemáticas utilizando métodos de interpolação com auxílio computacional).

Um dos métodos numéricos mais utilizados pela engenharia é o método dos elementos finitos, que resolve equações diferenciais, que se aplicam a vários problemas desta área, sendo que é de fácil utilização, devido ao auxílio de computadores que utilizam *softwares* comerciais.

Simulações computacionais através de um *software* específico de elementos finitos ou que possui pacote de simulação podem ser realizadas em um projeto desenhado em CAD 3-D para determinação de respostas como tensão, deslocamento, temperatura, etc...

O presente trabalho aborda sobre a falha de uma barra de carga aplicada a indústria siderúrgica, visando a análise e verificação do projeto com o auxílio de método analítico, com base em resistência dos materiais, e método dos elementos finitos, utilizando um *software* comercial para simulação computacional.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo o Anuário Brasileiro de Proteção 2013, no subgrupo da CBO (Classificação Brasileira de Ocupação), os trabalhadores dos setores de Serviços e de Funções Transversais (operadores de robôs, de veículos operados e controlados remotamente, condutores de equipamento de elevação e movimentação de cargas, entre outros) continuam sendo os profissionais que registram a maior acidentalidade no País.

Partir de problemas simples e práticos geram conhecimentos profundos para problemas mais complexos. Entender e estudar metodologias de análises e verificações de projetos é extremamente importante para futuras pesquisas acadêmicas e industriais, como por exemplo, o método dos elementos finitos que é uma ferramenta nova e precisa ser mais estudada.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

A abordagem do assunto proposto será feita sobre as barras de carga, ou vigas de carga, utilizadas para elevação de carga com aplicação em indústria siderúrgica utilizada para elevação de feixes de barras de aço. Por questão de sigilo esta será denominada como Empresa X.

Embora exista uma aplicação específica, a metodologia pode ser aplicada a qualquer barra de carga ou estrutura utilizada para elevação de cargas em qualquer aplicação industrial.

1.4 OBJETIVOS

O presente estudo tem por objetivo realizar a verificação do projeto de uma barra de carga, utilizada por uma empresa do ramo de siderurgia, por meio da simulação por elementos finitos utilizando *softwares* comerciais, devido a ocorrência de uma ruptura na seção transversal ocorrida durante a utilização comparando com o método analítico utilizando a norma NBR8400.

Apesar da falha não gerar danos pessoais será estudada para que o problema não ocorra novamente observando possíveis erros de projeto, fabricação e utilização.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. No primeiro compreende a estrutura da análise que será realizada. No segundo capítulo destaca-se a Fundamentação Teórica do assunto a ser abordado. Este capítulo tão importante discorre sobre o histórico, utilização, classificação, e tipos de falhas de materiais, além dos utilizados em estruturas. Em seguida o capítulo apresentou os métodos de análise de projetos tais como: método analítico, método empírico e simulação numérica, enfatizando o método dos

elementos finitos e considerando o *software* a ser utilizado. Além disso, o capítulo trata sobre a origem das estruturas, e descreve conceitos importantes sobre vigas e barras de cargas, aplicações e normas aplicadas.

No terceiro capítulo é apresentada a falha com todas as informações pertinentes tais como: projeto, aplicação, tipo de falha, informações de operadores, resultados numéricos do projetista. Também apresenta-se a metodologia de análise, sendo utilizado o cálculo com base na norma NBR 8400 e o de simulação pelo *SolidWorks Simulation*.

No quarto capítulo revelam-se os resultados obtidos nos métodos e discussões pertinentes. Por fim, o quinto capítulo estabelece a conclusão da análise e verificação realizada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS

Van Vlack (1984) afirma que todo engenheiro independentemente da especialidade (mecânico, civil, eletricitista, etc...) está vitalmente interessado nos materiais que lhe são disponíveis. Quer seu produto seja uma ponte, um computador, um veículo espacial, ou um automóvel deve ter um profundo conhecimento das propriedades características e do comportamento dos materiais que serão utilizados na aplicação do projeto.

Schackelford (2008) destaca a importância por vivermos em um mundo de posse de materiais que definem, em grande parte, nossos relacionamentos sociais e nosso padrão econômico. Portanto, as posses materiais de nossos ancestrais provavelmente eram suas armas e ferramentas e, na verdade, a denominação mais popular dada à antiga civilização humana baseada no material a partir do qual essas armas e ferramentas eram feitas.

Shackelford (2008) ainda menciona que na **Idade da Pedra** nossos ancestrais lascavam pedras para a caça. Já na **Idade do Bronze** representou a base da metalurgia no qual as ligas de cobre foram descobertas para produzir ferramentas e armas superiores. Porém na **Idade do Ferro** as ligas de ferro substituíram largamente o bronze na fabricação de ferramentas e armas da Europa. Ainda destaca que, embora os arqueólogos não se refiram a uma “Idade Cerâmica”, a presença de vasos domésticos feitos de barros queimados ofereceu uma das melhores descrições das culturas humanas por milhares de anos. A cultura moderna da segunda metade do século XX, que às vezes é denominada “plástico”, poderia também ser identificada como “idade do silício”, dado o impacto penetrante da eletrônica moderna, em grande parte baseada na tecnologia do silício.

Para Callister (2008) o desenvolvimento de muitas tecnologias que tornam nossa existência tão confortável tem estado intimamente associado com a acessibilidade de materiais adequados e um avanço na compreensão de um tipo de material é frequentemente precursor da progressão escalonada de uma tecnologia.

2.1.1 Classificação

Os materiais têm sido convenientemente agrupados em três classificações básicas: metais, cerâmicos e polímeros. Esse esquema está baseado principalmente na composição

química e na estrutura atômica, e a maioria dos materiais se encaixa em um ou outro grupamento distinto, embora existam alguns materiais intermediários, sendo que adicionalmente, existem outros três outros grupos de materiais importantes na engenharia – compósitos, semicondutores e biomateriais (CALLISTER, 2008).

Contudo Askeland (2008) apresenta um modelo baseado em cinco categorias, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Aplicações, propriedades e exemplos representativos.

	Exemplos de Aplicações	Propriedades
Metais e Ligas		
Cobre	Fios elétricos	Alta condutividade elétrica, boa conformabilidade
Ferro fundido cinzento	Blocos de motores para automóveis	Fundibilidade, usinabilidade, amortecimento de vibrações
Aços Liga	Ferramentas, chassis de automóveis	Endurecibilidade por tratamento térmico
Cerâmicas e Vidros		
Si OCaO	Vidros para janelas	Transparência óptica, isolamento térmico
MgOSi	Refratários	Isolamento térmico, refratariedade, inércia química
Titanato de bário	Capacitores para microeletrônica	Grande capacidade de armazenamento de cargas elétricas
Sílica	Fibras ópticas para tecnologia da informação	Índice de refração adequado, baixas perdas ópticas
Polímeros		
Poliétileno	Embalagem para alimentos	Facilidade de ser moldado para produzir filmes finos, flexibilidade e hermetismo
Epóxi	Encapsulamento de circuitos integrados	Isolante elétrico e resistência à umidade
Fenólicos	Adesivos para união de camadas de compensado	Resistência mecânica e à umidade
Semicondutores		
Silício	Transistores e circuitos integrados	Resposta elétrica específica
GaAs	Sistemas opto-eletrônicos	Conversão de sinais elétricos em luz, lasers, diodo laser, etc.
Compósitos		
Epóxi reforçado com carbono	Componentes para aviação	Elevada razão resistência-peso
Liga de cobalto reformada com carbeto de tungstênio	Ferramentas de corte de carbeto para usinagem	Elevada dureza conjugada com boa resistência a choques
Aço revestido com titânio	Vasos de reatores	Baixo custo e associação de alta resistência do aço com a elevada resistência à corrosão do titânio

Fonte: ASKELAND, 2008

Pode-se evidenciar que cada um desses grupos apresentam estruturas, aplicações e propriedades distintas que ilustram a gama de propriedades que os engenheiros podem selecionar. Como os materiais metálicos são amplamente usados em aplicações estruturais, suas propriedades são de grande interesse prático (ASKELAND, 2008).

2.1.2 Falhas

“Hoje em dia, compreende-se muito mais sobre vários mecanismos de falha do que em algumas décadas atrás, em grande parte devido a testes e técnicas de medições aperfeiçoados.” (NORTON, 2013. p.243).

“A falha de materiais de engenharia é quase sempre um evento indesejável por vários motivos: vidas humanas que são colocadas em perigo, perdas econômicas, e a interferência na disponibilidade de produtos ou serviços. Embora as causas da falha e comportamento de materiais possam ser conhecidos, a prevenção de falhas é uma condição difícil de ser garantida. As causas usuais são a seleção e o processamento dos materiais de uma maneira não apropriada, e o projeto inadequado do componente ou sua má utilização. É uma das responsabilidades do engenheiro antecipar e planejar considerando possíveis falhas e, no caso de uma falha de fato ocorrer, avaliar a sua causa e então tomar as medidas de prevenção apropriadas para futuros incidentes.” (CALLISTER, 2008, p.130).

Falha pode significar que uma peça tenha se separado em dois ou mais pedaços; tenha se tornado permanentemente distorcida, arruinando assim a sua geometria; tenha tido a sua confiabilidade depreciada ou sua função comprometida, qualquer que seja a razão. Um projetista falando de falha pode se referir a qualquer uma destas possibilidades. (BUDYNAS, 2011).

Norton (2013) complementa a definição afirmando que, uma peça pode falhar se suas deformações e distorções forem grandes o suficiente para que não funcione da maneira a qual foi projetada e também pela ruptura ou separação. Apesar de ambas as condições serem falhas, os mecanismos que causam são diferentes, pois materiais dúcteis deformam significativamente até romper, mas materiais frágeis rompem sem mudanças na forma.

Para materiais na engenharia são possíveis dois modos de fratura por cargas estáticas: dúctil e frágil, sendo que qualquer processo de fratura envolve duas etapas, a formação e a propagação de trincas. (CALLISTER, 2008).

A fratura dúctil, conforme Figura 1 a), é caracterizada por uma extensa deformação plástica na vizinhança de uma trinca que está avançando. O processo prossegue de maneira relativamente lenta à medida que o comprimento de trinca se estende. Por outro lado a fratura

frágil, conforme Figura 1 b), as trincas podem sem espalhar de maneira extremamente rápida com o acompanhamento de muito pouca deformação (CALLISTER, 2008).



Figura 1- a) Fratura dúctil; b) Fratura frágil

Fonte: CALLISTER, 2008

Outra forma é a fadiga (Figura 2), que é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes. Sob essas circunstâncias é possível a ocorrência de uma tensão consideravelmente ao limite de resistência a tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática (CALLISTER, 2008).



Figura 2 - Fratura por fadiga

Fonte: ASM Handbook, 2002

Esse fenômeno foi observado pela primeira vez por volta de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar após um pequeno período de serviço. Rankine

publicou um artigo em 1843 dizendo que o material havia “cristalizado” e se tornado frágil devido às tensões flutuantes. Mais tarde houveram outros estudiosos que aprofundaram-se neste tipo de falha como o Engenheiro alemão August Woler e Poncelet. (NORTON, 2013).

As características de uma falha por fadiga possui três estágios: Estágio I é a iniciação de uma ou mais microtrincas. Estágio II progride de microtrincas para macrotrincas, formando superfícies de fraturas tal qual platôs paralelos separados por sulcos paralelos denominados por marcas de praia. Estágio III ocorre no ciclo de tensão final quando o material remanescente não consegue suportar as cargas, resultando em uma fratura rápida e repentina. (BUDYNAS, 2011).

As falhas por fadiga constituem um custo significativo para a economia, estimado em 1982 para os EUA por volta de U\$ 100 bilhões, além da possibilidade de envolver vidas humanas, como por exemplo o avião a jato comercial de passageiros, o inglês *Comet*, que despedaçou em 1954 devido a falhas por fadiga em sua fuselagem, como consequência dos ciclos de pressurização e depressurização da cabine. (NORTON, 2013).

2.1.3 Materiais das Estruturas Metálicas

Shackelford (2008, p.3) destaca a importância dos metais dizendo:

“Se existe um material típico associado a mente do público com a prática de engenharia moderna é o aço estrutural. Esse material de construção versátil tem diversas propriedades que consideramos metálicas. Primeiro ele é forte e por ser prontamente moldado em formas práticas. Segundo sua deformabilidade extensa e permanente ou ductibilidade, é uma propriedade que permite pequenas quantidades de deformação para cargas repentinas e severas. Terceiro, uma superfície de aço recentemente cortada tem um brilho metálico característico.”

O material mais utilizado para estruturas metálicas é o aço, que é uma liga de ferro-carbono em que o teor deste varia desde 0,008% até 2,11%. Os aços para estruturas são requeridas propriedades de boa ductibilidade, homogeneidade e soldabilidade, além de grande elevação entre a tensão resistente e a de escoamento. A resistência à corrosão é também importante só sendo, entretanto, alcançada com pequenas adições de cobre. Para atender a esses requisitos, utilizam-se aços-carbono e os aços em baixo teor de liga ou microligados, ambos com baixos e médios teores de carbono (PFEIL, 2009).

“O aumento do teor de carbono eleva a resistência do aço, porém diminui a sua ductibilidade (capacidade de se deformar) o que conduz a problemas na soldagem. Em

estruturas usuais de aço, utilizam-se aços com baixo teor de carbono, que podem ser soldados sem precauções especiais.” (PFEIL, 2009, p.10).

“Os principais tipos de aço-carbono usados em estruturas, segundo os padrões da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e das normas europeias EN, são os apresentados na Tabela 2.” (PFEIL, 2009, p.10).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas de Aços-carbono

Especificação	Teor de carbono %	Limite de Escoamento f_y (MPa)	Resistência ruptura f_u (MPa)
ABNT MR250	baixo	250	400
ASTM A7		240	370 – 500
ASTM A36	0,25 – 0,29	250 (36ksi)	400 – 500
ASTMA307 (parafuso)	baixo	-	415
ASTMA325 (parafuso)	médio	635 (min)	825 (min)
EM S235	Baixo	235	360

Fonte: PFEIL, 2009

2.2 MÉTODOS DE ANÁLISE

Budynas (2011) propõe três tipos de métodos para avaliação e análise: Análise Matemática, Protótipo em Laboratório e Simulação Computacional.

Soriano (2003, p.1) reafirma essa informação dizendo: “Em estudo do comportamento de sistemas físicos são utilizados modelos físicos (usualmente em escala reduzida, de laboratório) e/ou modelos matemáticos.”

2.2.1 Análise Matemática

Os componentes mecânicos na forma de barras simples, vigas etc. podem ser analisados de forma relativamente fácil utilizando métodos básicos de mecânica que fornecem soluções analíticas. (BUDYNAS, 2011, p.960).

Tanto a análise quanto a otimização exigem que sejam construídos modelos abstratos que possibilitarão o emprego de alguma forma de análise, sendo denominados modelos matemáticos, com o objetivo de encontrar uma resposta mais adequada ao resultado real. (BUDYNAS, 2011).

“Esses modelos geralmente incluem um modelo do carregamento que consiste em diagramas de corpo livre que apresentam todas as forças, momentos e torques atuando sobre o elemento de máquina ou sistema e as equações apropriadas para seus cálculos. Os modelos de estado de tensão e deflexão esperados nos locais previstos da falha são, então definidos com as equações de tensão e deflexão apropriadas.

A análise do projeto é então feita utilizando estes modelos e a segurança ou falha do projeto é determinada. Os resultados são avaliados em combinação com as propriedades dos materiais de engenharia escolhidos; toma-se a decisão de prosseguir com o projeto ou iterar para encontrar uma solução melhor retornando a uma etapa anterior do processo.” (NORTON, 2013, p.9)

Um dos métodos analíticos é destacados por PFEIL (2008 p.36), chamado de método das tensões admissíveis:

“O dimensionamento utilizando tensões admissíveis se originou do desenvolvimento da Resistência dos Materiais em regime elástico. Neste método, o dimensionamento é considerado satisfatório quando a máxima tensão solicitante σ em cada seção é inferior a uma tensão resistente reduzida por um coeficiente de segurança Y .”

Já Pinheiro (2005) destaca o método dos estados limites, que estende-se a ruptura mecânica do elemento estrutural ou seu deslocamento excessivo, que tornem a estrutura impréstável. No método dos estados limites, tem-se a inclusão dos estados elástico e plástico na formação de mecanismos nas peças estruturais.

2.2.2 Protótipo em Laboratório

Protótipo consiste na construção do modelo objeto em escala reduzida. Trata-se de um método para avaliação e prova final do projeto, provando se o mesmo atende as necessidades, possui uma boa confiabilidade, viabilidade econômica, facilidade ou dificuldade de manutenção e ajustes e responsabilidades. (BUDYNAS, 2011).

2.2.3 Simulação Computacional

Componentes reais são mais complexos para aproximações de soluções analíticas, experimentação ou métodos numéricos. Assim utilizam-se programas (CAD) que permitem o desenvolvimento de desenhos tridimensionais (3-D), possibilitando realização de cálculos rápidos e precisos de propriedades de massa, centro de gravidade e momentos de inércia das massas. Alguns pacotes de programas realizam tarefas de análise de engenharia e/ou

simulações específicas que são capazes de realizar análise de tensão, deflexão, vibração e até mesmo transferência de calor. (BUDYNAS, 2011). Um dos mais utilizados é de Elementos Finitos. (SORIANO, 2003).

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

2.3.1 Origem

O Método de Elementos Finitos (MEF) surgiu em 1955 como evolução da análise matricial de modelos reticulados (concebida no início da década de 1930 na indústria aeronáutica) com a disponibilidade de computadores. Os primeiros elementos foram concebidos por engenheiros aeronáuticos para análise de distribuição de tensões em chapas de asas de avião, assim o computador digital e a engenharia aeronáutica são responsáveis pela origem do método de elementos finitos, sendo Argyris e Kesley, Turner, Clough, Martin e Topp os pioneiros. (SORIANO, 2003).

Em 1962 Gallagher e Padlog (1963) arbitraram pioneiramente campos de deslocamentos em vigas e placas, na concepção de elementos finitos, para considerar efeito de não linearidade e determinar cargas críticas. (SORIANO, 2003).

E. Wilson desenvolveu um dos primeiros programas em elementos finitos que foi amplamente utilizado. A rápida popularidade deve-se a ao fato do programa ser de livre acesso (gratuito), o que era muito comum no início dos anos 60, pois o valor comercial não era conhecido na época, mas o programa era limitado à análise de tensões bidimensionais. No entanto, o programa foi usado por acadêmicos de pesquisa e laboratórios industriais, e foi um instrumento que comprovou a força e a versatilidade dos elementos finitos a muitos usuários. (FISH, 2007).

Em 1965, a NASA iniciou um projeto conhecido como NASTRAN, liderado por Dick MacNeal que incluiu análise de estruturas mais complexas. Na mesma época John Swanson desenvolveu um programa para a Westinghouse Electric Corp. para análise de reatores nucleares. Em 1969 ele deixou a empresa e lançou o programa ANSYS no mercado que tinha a capacidade de resolver problemas lineares e não lineares e foi amplamente adotada pelas companhias. (FISH, 2007).

O ABAQUS foi desenvolvido por uma companhia chamada HKS, que foi fundada em 1978. O programa foi amplamente usado por pesquisadores, porque HKS introduziu portas que permitiam o desenvolvimento de novos modelos e elementos. (FISH, 2007).

Atualmente existem opções de programas um banco de dados de elementos finitos com interface com o banco de dados CAD, mas em ambientes diferentes. Portanto sistema de elementos finitos contém tradutores, que geram malhas de elementos finitos a partir do banco de dados CAD. (FISH, 2007). A análise que usa o MEF é chamada de Análise por Elementos Finitos (FEA). (*SolidWorks*,2013).

“O FEA tornou-se relativamente fácil de usar, devido à disponibilidade de *softwares* comerciais de análise de muitos dos quais têm interface com diversos *softwares* de modelagem com desenho (CAD). Os engenheiros que ingressarem no mercado de trabalho do século XXI terão maior probabilidade de encontrar modeladores sólidos (CAD) e a análise feita pelo FEA sendo utilizados nas suas empresas para o projeto de produtos e máquinas.” (NORTON, 2013, p.481).

O método dos elementos finitos está cada vez mais popular, sendo que nos Estados Unidos é gasto mais de US\$ 1 bilhão por ano em programas de computador sobre MEF ou FEA. Além disso, registra-se mais de 400 livros sobre o assunto em vários idiomas e em uma pesquisa em 2006 para a frase “elementos finitos”, usando o programa Google, encontrou mais de 14 milhões de páginas de resultados. (SORIANO, 2003).

2.3.2 Definições e Aplicações

“Há uma enormidade de aplicações para FEA como análises estática e dinâmica, linear e não linear, de tensão e deflexão; vibrações livres e forçadas; transferência de calor; instabilidade elástica (flambagem); acústica, eletrostática e magnética.” (BUDYNAS, 2011, p.960).

A grande maioria dos engenheiros especializados nos segmentos de sistemas para movimentação de cargas utiliza o método de elementos finitos para os cálculos, permitindo que os esforços nas estruturas sejam analisados a cada ponto, permitindo projetos mais leves e econômicos. (Fonte: http://www.twn-eng.com/projetos.php?projeto=barra_manut).

O método dos elementos finitos (MEF) é um dos métodos numéricos para resolver equações diferenciais que descrevem muitos problemas de engenharia, sendo uma ferramenta muito poderosa. O principal motivo deve-se a utilização de programas computacionais

versáteis que podem resolver problemas práticos e, em um futuro próximo pode se tornar o método preferido das engenharias e ciências aplicadas. (KIM, 2011).

O conceito da análise por elementos finitos (FEA) é muito simples, mas os cálculos que o acompanham são muito complexos, sendo que a utilização de *software* comerciais torna muito fácil obter resultados de análises pelo FEA, mas se o usuário não compreender de forma adequada os resultados existe uma grande possibilidade de ocorrência de resultados equivocados. Assim, torna-se importante que o profissional que ingressa na área de projetos mecânicos deve se especializar para na teoria e aplicação do método. (NORTON 2013).

“O método de elementos finitos (MEF) é uma aproximação numérica com a qual essas equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de modo aproximado. Do ponto de vista da engenharia, o MEF é um método para resolver problemas de engenharia, tais como análise de tensões, transferência de calor, escoamento de fluidos e eletromagnetismo, por simulações de computador” (FISH, 2007, p.1).

A análise de elementos finitos tem por finalidade determinar a resposta (deslocamentos e tensões) de uma determinada estrutura, no caso de análise de problemas de mecânica, para um determinado conjunto de cargas e condições de contorno. É um procedimento de análise no qual a estrutura – sua geometria, propriedades do material, condições de contorno e cargas – é bem definida e o objetivo é determinar sua resposta. (KIM, 2011).

O MEF divide o modelo em muitas partes pequenas de forma simples, denominados elementos, substituindo um problema complexo por muitos problemas simples que podem ser resolvidos simultaneamente. (*SolidWorks*, 2013).

Os elementos compartilham pontos em comum, chamados de nós, e o processo de divisão dos modelos em pequenas partes é chamado de geração da malha. A resposta em um ponto qualquer de um elemento é interpolada a partir da resposta dos nós do elemento. Cada nó é completamente descrito por vários parâmetros, dependendo do tipo de análise e do elemento usado. Em análises estruturais a resposta de um nó é descrita por três translações e três rotações, sendo chamadas de graus de liberdade (*SolidWorks*,2013).

Para explicar a base de aproximação do MEF, Fish (2007) apresenta uma placa com um furo, como mostrado na Figura 3 sobre a qual deseja-se encontrar por exemplo a distribuição de temperatura. O corpo é dividido em elementos conectados por nós e se obtém uma solução aproximada através de uma malha.

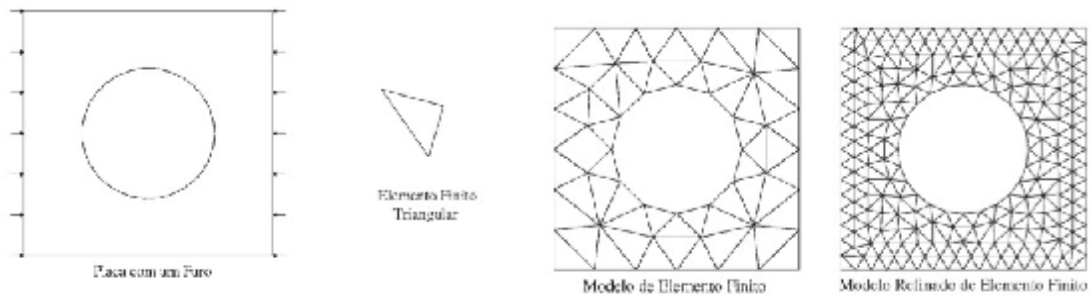


Figura 3 - Geometria cargas e malhas de elementos finitos

Fonte: FISH, 2007

“Os resultados são apresentados geralmente como visualizações computacionais, tais como gráficos de contorno, embora os resultados sejam frequentemente produzidos em monitores.” (FISH, 2007, p.2).

Kim (2011) resumidamente divide o Método dos Elementos Finitos em cinco passos:

- ü Pré-processamento: geração de malha dos elementos;
- ü Formulação do elemento: desenvolvimento de equações que descrevam o comportamento de um elemento;
- ü Montagem (*assembly*): obtenção de um sistema de equações para o domínio global a partir dos elementos que compõem;
- ü Resolução do sistema de equações;
- ü Pós-processamento: determinação de grandezas de interesse (como tensões, deformações) e visualização da resposta.

A descrição do comportamento é feita, geralmente, através de equações diferenciais parciais para o problema - forma forte – e da respectiva forma fraca. Para obter o sistema de equações do sistema global é preciso combinar as equações que governam os elementos individuais, sendo que tais equações são expressas em forma matricial (KIM, 2011).

Para solução da equação utiliza-se aproximações por uma série de funções polinomiais simples em cada elemento para todo o domínio do problema. Assim quando forem utilizados mais elementos mais a solução aproximada convergirá para a solução exata. (KIM, 2011).

Diversos tipos de elementos podem ser usados, conforme Figura 4, dependendo do domínio que necessita ser discretizado e do grau dos polinômios usados para aproximar a solução.




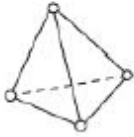
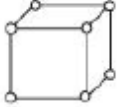
Elemento	Nome
	Elemento linear 1D
	Elemento triangular 2D
	Elemento retangular 2D
	Elemento tetraédrico 3D
	Elemento hexaédrico 3D

Figura 4 - Tipos de Elementos

Fonte: KIM, 2011

2.3.3 Considerações sobre o *software* a ser utilizado

O *SolidWorks* é um programa CAD (*Computer-aided design*) 3-D (Três Dimensões), ou seja, uma ferramenta de projeto que utiliza modelagem paramétrica de sólidos, baseada nas características e propriedades de cada elemento e ação, sendo possível alterá-las em qualquer altura do processo de simulação. (*SolidWorks*, 2013).

O *SolidWorks Simulation* é um módulo para simulações do *software SolidWorks*, que utiliza a técnica de elementos finitos, oferecendo estudos estáticos, frequência, dinâmicos, flambagem, térmicos, projetos, não lineares, queda e fadiga. Este programa estabelece equações que controlam o comportamento de cada elemento tendo em conta as interações com os outros elementos, além de relacionar as incógnitas e cria sistema de equações com base nesses parâmetros. (*SolidWorks*, 2013).

É possível neste programa determinar o tipo de elemento para realização da simulação e refinar a malha gerada, que pode ser executado facilmente selecionando a opção de malha fina ou grossa. (*SolidWorks*, 2013).

O *SolidWorks* apresenta como resultado a Tensão de Von Mises, que é um escalar positivo que descreve o estado de tensão, sendo que os materiais falham quando a tensão de Von Mises ultrapassa um determinado valor. (*SolidWorks*, 2013).

A Figura 5 mostra um exemplo de análise de um rotor de uma turbina de um turbocompressor de motor diesel executada no *SolidWorks*.

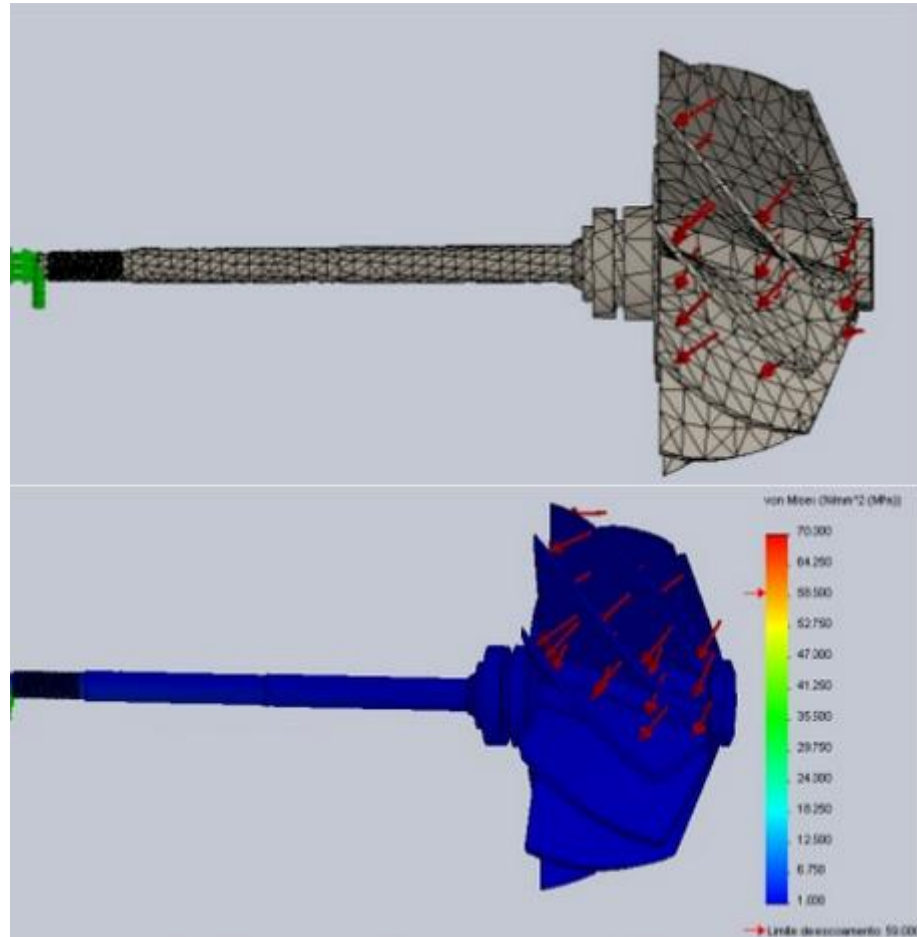


Figura 5 - Análise de um rotor de uma turbina

Fonte: <<http://pt.slideshare.net/RafaelLial/elementos-finitos-anlise-do-rotor-de-uma-turbina>>

2.4 ESTRUTURAS METÁLICAS, VIGAS E BARRAS DE CARGA

2.4.1 Histórico

“O primeiro material siderúrgico empregado na construção foi o ferro fundido. Entre 1780 e 1820 construíram-se pontes em arcos ou treliçadas, com elementos em ferro fundido trabalhando em compressão.” (PFEIL, 2009, P.2).

O ferro forjado foi utilizado em fins do século XVIII, mas o aço rapidamente substituiu devido a produção em larga escala diminuindo o custo de produção. Os aços de baixo carbono foram utilizados até meados o século XX, mas à partir de 1950 aços de maiores

resistência foram empregados em escala. As modernas estruturas de grande porte utilizam aços de diversas categorias. (PFEIL, 2009)

Para Pinheiro (2005), as estruturas metálicas, têm indicadores de sua utilização a partir de 1750 e no Brasil o início de sua fabricação foi no ano de 1812, sendo que o grande avanço de perfis de larga escala ocorreu com a implantação das grandes siderúrgicas, como por exemplo, a CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, que teve seu início de operação em 1946.

Carnasciali (1974) já afirmava, a muitos anos atrás, que o desenvolvimento industrial está conduzindo as necessidades do aço nacional a uma cifra situada de 6.000.000 de toneladas anuais, sendo que o emprego das estruturas metálicas é encarado por um prisma de grande viabilidade de sua execução, como da reversão mais rápida do capital empatado, com grande redução de tempo obtida na montagem.

Pinheiro (2005) indica como vantagens da utilização do aço estrutural: fabricação das estruturas com precisão milimétrica, garantia das dimensões e propriedades dos materiais, material resistente a vibrações e a choques, possibilidade de execução de obras mais rápidas e limpas, possibilidade de montagem e desmontagem em locais diferentes, alta resistência estrutural, e reaproveitamento de materiais em estoque. Carnasciali (1974) complementa relatando que existe possibilidade de vencer grandes vãos com o peso próprio reduzido, nos grandes edifícios comerciais realiza o máximo aproveitamento em termos de área útil e a grande rapidez de montagem.

Como desvantagem é possível citar: a limitação de execução em fábrica, necessidade de tratamento superficial das peças contra oxidação, necessidade de mão-de-obra e equipamentos para sua fabricação e montagem, e limitação de fornecimento de perfis estruturais. (PINHEIRO, 2005).

2.4.2 Vigas

Convencionou-se chamar de viga a uma peça estrutural que resiste principalmente a esforços de flexão. (CANASCIALLI 1974).

Vigas são elementos estruturais projetados para suportar cargas aplicadas perpendicularmente a seus eixos longitudinais. Se forem projetadas com base na resistência, deverão resistir as tensões de cisalhamento e flexões admissíveis. Ainda, considera-se que a

tensão de flexão máxima na viga é muito maior do que as tensões localizadas provocadas pela aplicação de cargas na superfície da viga. (HIBBELER, 2010).

Quando são combinados vários perfis laminados, unindo-se com rebites ou solda elétrica, de maneira a formar um perfil composto, obtêm-se o que se chama de viga de alma cheia, ou seja, o elemento vertical (alma) é formado por uma chapa, que por sua vez é unida a elementos que formam a mesa superior e inferior. (CANASCIALLI 1974).

A função da alma é resistir principalmente à força cortante vertical e as mesas resistem à quase a sua totalidade ao momento fletor. O elemento de ligação entre a alma e as mesas deve resistir à força cortante horizontal. A alma é um elemento fraco para compressão por ser esbelta e delgada. (CANASCIALLI 1974).

A Figura 6 mostra os perfis mais utilizados para vigas. Os perfis (a), (c), (d) são laminados, porém no Brasil utilizam-se os perfis I e H até 152 mm. (PFEIL, 2009).

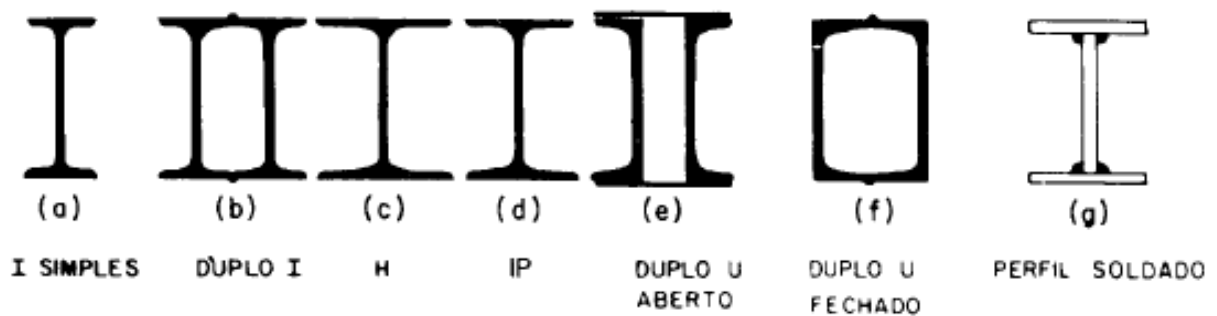


Figura 6 - Perfis de vigas utilizadas

Fonte: PFEIL, 2009

2.4.3 Barras de Carga

Barras de carga, também conhecidas como vigas de carga, são dispositivos mecânicos com o objetivo de elevação de diversos tipos de carga, de acordo com a necessidade, sendo possível também a utilização de diversos tipos de lingas de correntes, possuindo várias aplicações em todos os segmentos da indústria. (Fonte: <http://www.barradecarga.com.br/hotsite_barradecarga>).

Estes dispositivos são acessórios de máquinas de levantamento e transporte (ponte rolantes, guias, guindastes, etc...) para movimentação vertical e horizontal de cargas (equipamentos, materiais, componentes, etc...), além de ser aplicação para curta distância. (Fonte: http://www.twn-eng.com/projetos.php?projeto=barra_manut).

O Catálogo de Dispositivos da TWN, empresa brasileira especializada em fabricação de dispositivos e equipamentos de elevação e movimentação de carga, orienta os usuários do dispositivo a fim de evitar falhas ou acidentes operacionais, conforme abaixo:

- Û Barras de Carga são projetadas para movimentar cargas em equilíbrio, portanto, deve-se dar atenção especial ao tipo de carga a ser movimentada e verificar sempre se o centro de gravidade da carga está centralizada e se o dispositivo é adequado ao tipo de aplicação;
- Û Não se deve dar trancos na ponte a fim de posicionar a carga ou qualquer outra necessidade que se pretenda;
- Û Barra de carga são dimensionadas para suportar cargas em um único sentido (eixo z), portanto, deve-se evitar esforços em outros sentidos, como arraste nos sentidos lateral e longitudinal.

Existem normas brasileiras e internacionais relacionadas as barras de carga, sendo que as recomendadas são: NBR 8400, EN13155 e ASME B30.20. (Fonte: http://www.twn-eng.com/projetos.php?projeto=barra_manut).

A norma NBR 8400 – Cálculo de Equipamentos para levantamento e movimentação de cargas da ABNT (Associação Brasileira de Normas e Técnicas), cujo objetivo é definir as diretrizes básicas para o cálculo das partes estruturais e componentes mecânicos dos equipamentos de levantamento e movimentação de carga, independente do grau de complexidade ou do tipo de serviço do equipamento. (NBR8400,1984).

A norma EN1355 – *Cranes – Safety – Non-fixed load lifiting attachments* é de origem inglesa cujo o escopo concentra-se em especificar requisitos de segurança para acompanhamento de cargas de implementos não fixos para guindastes, guinchos e dispositivos manipuladores de cargas controladas manualmente.(EN 1355, 2009).

A norma B.30.20-2010 – *Below-the-Hook Lifting Devices* é Americana, elaborada por Engenheiros Mecânicos, que contém aplicações para construção, instalação, operação, teste, manutenção, e utilização de guindastes e outros dispositivos de elevação e pretende prevenir danos pessoais ou materiais, direcionamento para fabricantes e guiar a regulamentação de desenvolvimento e homologação através de procedimentos de segurança adequados. (ASME, 2010).

3 METODOLOGIA

3.1 FALHA APRESENTADA

Ocorreu uma falha em uma barra de carga, caracterizada pela ruptura na seção transversal, durante sua utilização em uma indústria siderúrgica que por questão de sigilo esta será denominada como Empresa X, causando parada da produção. Apesar da falha não ter gerado danos pessoais esta será estudada para que o problema não ocorra novamente observando possíveis erros de projeto, fabricação e utilização.

A aplicação deste projeto de barra de carga é para elevação e transporte de feixes de aço através de uma ponte rolante, conforme Figura 7. As quatro lingas de corrente na parte inferior da viga servem para amarrar na carga e os olhais superiores são utilizados para elevação pela ponte rolante.



Figura 7 - Aplicação da barra de carga do estudo

Os operários haviam alertado, um ano antes de ocorrer a falha, uma ocorrência de uma pequena flexão visual na estrutura, levando a realização de cálculos por especialistas, que por questão de sigilo não serão divulgados, para uma análise estrutural, mas segundo indicações o projeto atendia perfeitamente as especificações. Neste mesmo contexto foi verificado que a empresa contratada para fabricação não realizou o procedimento de alívio de tensões de solda das chapas.

O projeto a ser estudado consiste em quatro chapas de aço AISI 1045, trefilados à quente, soldadas formando uma seção transversal quadrada conhecida como viga caixão. O conjunto de detalhes, ou seja, o desenho técnico do projeto encontra-se no Anexo 2, com todos os detalhamentos de materiais, cotas e representação de soldas. A Figura 8 mostra os detalhes da barra de carga projetada para compressão do estudo a ser realizado.

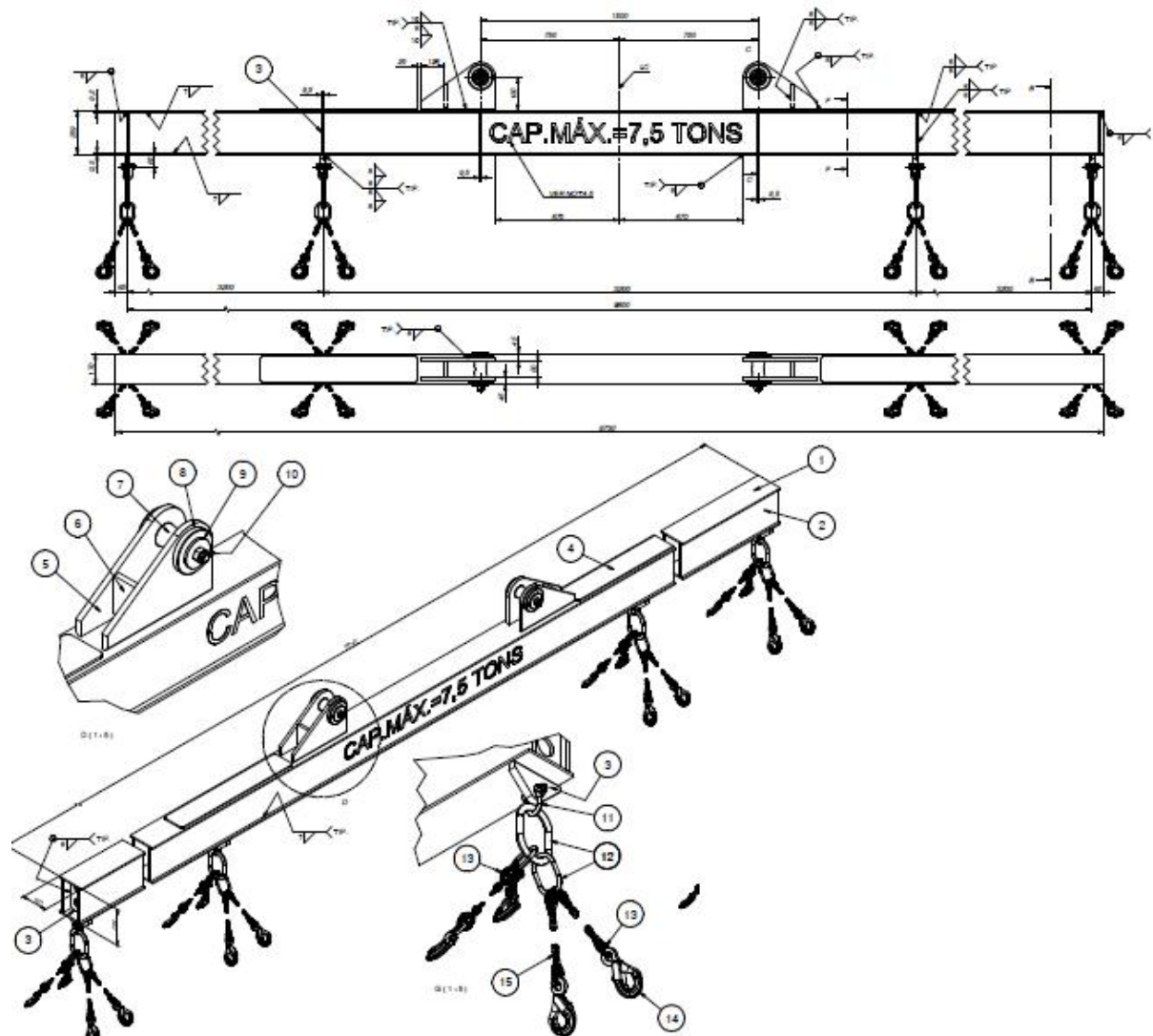


Figura 8 - Conjunto de detalhes do projeto

A fratura localiza-se precisamente ao longo da seção transversal, na alma inferior e superior, no meio do vão após o olhal da barra de carga, conforme Figura 9 e Figura 10.



Figura 9 - Vista lateral da falha na barra de carga



Figura 10 - Vista frontal da falha na barra de carga

Com uma análise mais focada na fratura torna-se evidente a presença de marcas de praia na seção da viga próxima a região de solda evidenciando uma falha por fadiga, conforme Figura 11.

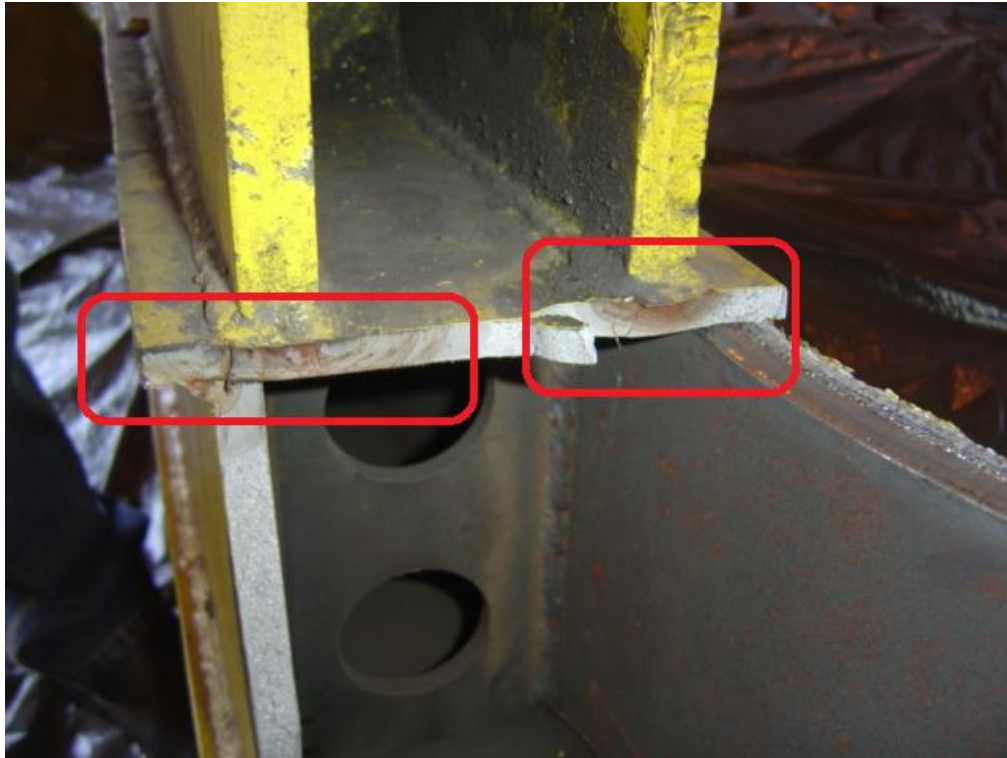


Figura 11 - Vista da seção da falha

Retiraram-se duas amostras, ou corpos de prova, próximas da região da fratura e foi enviado para o laboratório de metalografia para verificação do tipo falha ocorrida, realizando análise micrográfica com auxílio do microscópio ótico (50 a 1000x), análise com ataque, e outros testes.

Confirmou-se a presença de fissura através da aplicação do líquido penetrante e presença de trinca na região da solda. A Figura 11 mostra o resultado microográfico evidenciando presença de fissura na região da solda, sendo que, a seção longitudinal da chapa ampliada permite a compreensão da falha por fadiga.

A conclusão do laboratório foi que a causa da quebra está relacionada a trinca existente na região de solda devido a ocorrência de fadiga em um ponto onde foi observado existência de concentração de tensão associado a presença de material frágil na região da solda.



Figura 12 - Resultados de Metalografia

A Figura 13 apresenta os resultados encontrados pelo projetista, sendo que eles encontram-se acima dos limites adequados de aprovação, pois estão acima do limite de escoamento, mas as maiores tensões localizam-se em pontos específicos da viga, conforme Figura 14 e Figura 15. Assim o projetista contratado adicionou um “reforço”, ou seja, uma chapa nas regiões mais solicitadas, para aumento da área, a fim de aumentar a resistência.

Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	94006300 mm ³	
Mass	737,949 kg	
Von Mises Stress	0,149061 MPa	354,036 MPa
1st Principal Stress	-34,6508 MPa	434,265 MPa
3rd Principal Stress	-202,717 MPa	80,683 MPa
Displacement	0,00605598 mm	31,6568 mm
Safety Factor	0,875617 ul	15 ul

Figura 13 - Resultados encontrados na simulação do projetista

☐ Von Mises Stress

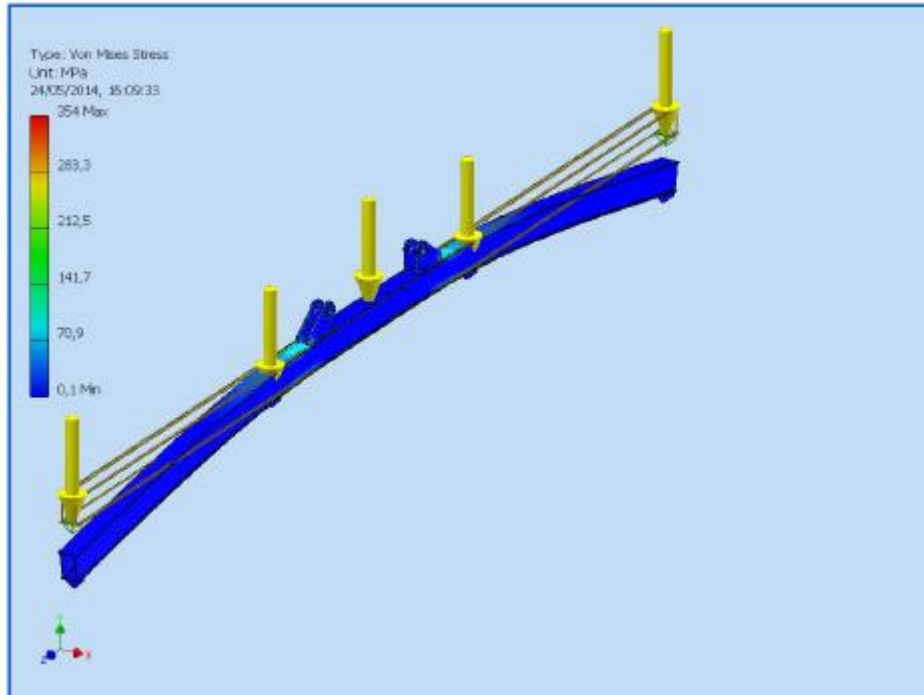


Figura 14 - Tensão de Von Misses

☐ 1st Principal Stress

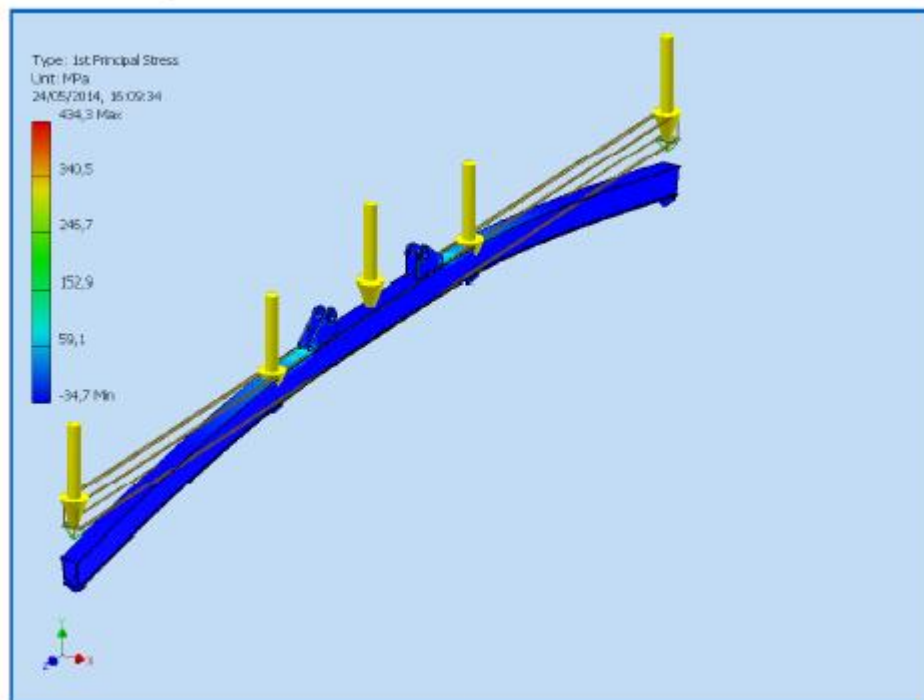


Figura 15 - Tensão Principal

3.2 CÁLCULOS ANALÍTICOS, CONFORME NORMA NBR 8400

Primeiramente foi definido a classe do dispositivo através da Tabela 3 como classe de utilização B e o estado de solitação através da Tabela 4 como estado de solitação 2.

Tabela 3 - Classes de utilização

Classe de utilização	Frequência de utilização do movimento de levantamento	Número convencional de ciclos de levantamento
A	Utilização ocasional não regular, seguida de longos períodos de repouso	6,3 x 10
B	Utilização regular em serviço intermitente	2,0 x 10
C	Utilização regular em serviço intenso	6,3 x 10
D	Utilização em serviço intenso severo, efetuado, por exemplo, em mais de um turno	2,0 x 10

Fonte: Norma NBR8400, 1984

Tabela 4 - Estado de carga

Estado de Carga	Definição	Fração mínima da carga máxima
0 (muito leve)	Equipamentos levantando excepcionalmente a carga nominal e comumente cargas reduzidas	P = 0
1 (leve)	Equipamentos raramente levantam a carga nominal e comumente cargas de ordem de 1/3 da carga nominal	P = 1/3
2 (médio)	Equipamentos que frequentemente levantam carga nominal e comumente cargas compreendidas entre 1/3 e 2/3 da carga nominal	P = 2/3
3 (pesado)	Equipamentos regularmente carregados com a carga nominal	P = 1

Fonte: Norma NBR8400, 1984

Com base nas estimativas anteriores e em número de ciclos, através da Tabela 5, chega-se a conclusão que o grupo adequado é o número 5.

Tabela 5 - Classificação da estrutura dos equipamentos (ou elementos da estrutura) em grupo

Estado de cargas (ou estado de tensões para um elemento)	Classe de utilização e número convencional de ciclos de levantamento (ou de tensões para um elemento)			
	A 6,3 x	B 2,0 x	C 6,3 x	D 2,0 x
0 (muito leve) P = 0	1	2	3	4
1 (leve) P = 1/3	2	3	4	5
2 (médio) P = 2/3	3	4	5	6
3 (pesado) P = 1	4	5	6	6

Fonte: Norma NBR8400, 1984

Assim puderam-se levantar os coeficientes de majoração da carga, sendo que através da Tabela 6 temos o coeficiente de majoração do momento fletor e através da Tabela 7 temos o coeficiente dinâmico. Logo: $M_x = 1,12$, $= 846,51 \text{ kgf}$, $\phi = 1,15$.

Utilizou-se a fórmula (1) para cálculo do carregamento e a fórmula (2) para cálculo da carga de trabalho, sendo que o menor valor foi escolhido.

$$= + \quad (1)$$

$$= \quad (2)$$

Tabela 6 - Valores do coeficiente de majoração para equipamentos industriais

Grupos	1	2	3	4	5	6
	1	1	1	1,06	1,12	1,20

Fonte: Norma NBR8400, 1984

Tabela 7 - Valores do coeficiente dinâmico

Equipamento	Coeficiente dinâmico ϕ	Faixa de velocidade de elevação de carga (m/s)
Pontes ou pórticos rolantes	1,15	$0 < \leq 0,25$
	$1 + 0,6$	$0,25 < < 1$
	1,60	≥ 1
Guindastes com lanças	1,15	$0 < \leq 0,5$
	$1 + 0,3$	$0,5 < < 1$
	1,3	≥ 1

Fonte: Norma NBR8400, 1984

Em seguida foi calculado pela metodologia de resistência dos materiais as cargas, reações de apoio, peso próprio, momento em todos os intervalos das seções (para determinação do momento máximo), momento de inércia, módulo de resistência à flexão e finalmente a tensão solicitada.

A tensão admissível foi calculada pela fórmula (3) e comparada com a tensão solicitante. Conforme visto anteriormente, a tensão solicitada deve ser menor que a tensão admissível.

$$= \frac{\quad}{\quad} \quad (3)$$

O valor da tensão de escoamento para o aço AISI 1045 laminado à quente foi retirado do site Matweb, conforme Figura 16.

Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	163	163
Hardness, Knoop	184	184
Hardness, Rockwell B	84	84
Hardness, Vickers	170	170
Tensile Strength, Ultimate	565 MPa	81900 psi
Tensile Strength, Yield	310 MPa	45000 psi
Elongation at Break	16 %	16 %
Reduction of Area	40 %	40 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi
Poissons Ratio	0.29	0.29
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi

Figura 16 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 1045 laminado à quente

3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA UTILIZANDO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ATRAVÉS DO *SOLIDWORKS*

Escolheu-se o *software SolidWorks* para simulação devido a disponibilidade do produto no Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, além da fácil utilização do programa.

Realizou-se a modelagem em 3-D da barra de carga como etapa inicial do trabalho e desprezou-se as linhas de correntes existentes, pois as mesmas não interferiram na falha do material. Não considerou-se as ligações por soldas, devido a limitação do *software* em realizar o desenho e análise.

Os passos de simulações foram realizados no pacote *Simulation* do *SolidWorks*, criando um estudo novo e escolhido o elemento 3-D por considerar concentradores de tensão, com objetivo de trazer um resultado mais apurado e que garanta uma maior convergência dos dados e simulação estática.

O primeiro passo consistiu em associar o material de acordo com a Figura 17, que neste caso é o Aço AISI 1045 laminado à quente, que precisou ser inserido manualmente, com propriedades mecânicas do site Matweb (Figura 16), pois o *software* não possui as especificações deste material.

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	1.999999959e+011	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/A
Módulo de cisalhamento	8e+010	N/m ²
Massa específica	7850	kg/m ³
Resistência à tração	565000000	N/m ²
Resistência à compressão em X		N/m ²
Limite de escoamento	310000000	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica em X		/K
Condutividade térmica	51.9	W/(m·K)
Calor específico	486	J/(kg·K)

Figura 17 - Propriedades do Aço AISI 1045 inseridas no *SolidWorks*

Em seguida especificou-se as ligações, ou seja, determinaram-se as faces fixas que não contém deslocamento. Depois foi aplicado o carregamento, determinando as forças atuantes na peça, sendo que são as mesmas encontradas no método analítico com o objetivo de encontrar valores similares para realização das devidas comparações.

Selecionou-se a malha média, pois no *software* é possível selecionar malha grossa, média fina. Ao realizar a simulação as equações de análise foram calculadas diretamente pelo programa.

Finalmente os resultados foram gerados, sendo eles: Tensão por Von Mises, Deslocamento e Deformação.

A Figura 18 apresenta a aplicação das cargas na simulação realizada na barra de carga.

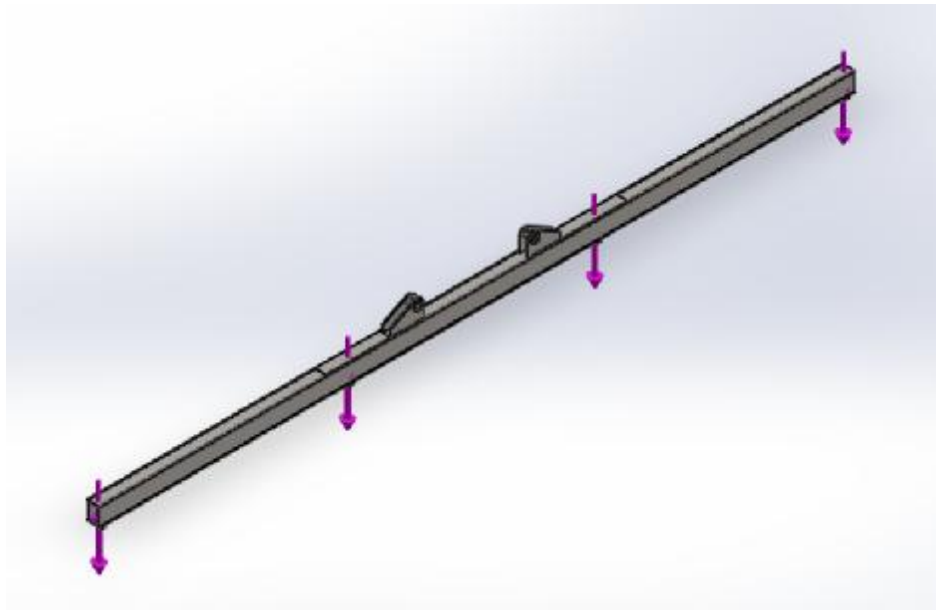


Figura 18 - Simulação 3-D da barra de carga

3.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados tanto do método analítico quanto da simulação foram comparados com a tensão admissível, sendo que a tensão solicitada deverá ser menor que a tensão admissível, ou seja:

$$\sigma < \sigma_{admissível} \quad (4)$$

Especificamente na simulação numérica foi possível analisar os concentradores de tensão, deformação e deslocamento, sendo estes imprescindíveis para análise de qualquer projeto.

Além disso, comparou-se qualitativamente os resultados obtidos entre os métodos com o objetivo de evidenciar a qualidade da metodologia aplicada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS ALCANÇADOS

4.1.1 – Resultados do Método Analítico

Todo o memorial de cálculo encontra-se disponível no Anexo3 para verificação da metodologia aplicada.

Os resultados encontrados foram:

$$= 2.210,58 \text{ —}$$

$$= 2.106,66 \text{ —}$$

4.1.2 – Resultados da Simulação

Foi encontrado o valor da tensão máxima de Von Mises na barra de carga de 349,66 MPa, estando localizada nas regiões antes e depois de cada olhal, ou seja, nas extremidades dos olhais, sendo possível visualizar através da cor vermelha do gráfico que é apresentado pela Figura 19.

Ainda na Figura 19 verifica-se que no centro da barra de carga o valor aproximado foi de 210 MPa e as regiões mais solicitadas encontram-se bem distribuídas antes do olhal, ou seja, entre a extremidade da viga até o início olhal, conforme Figura 20, sendo possível visualizar na cor verde do gráfico.

Uma das informações fundamentais também obtidas na mesma figura é que a tensão máxima ultrapassou o limite de escoamento do material, sendo que este é apresentado pela seta vermelha na legenda de Tensões.

Resultados complementares são apresentados pela Figura 21, mostrando o resultado de deslocamento, e pela a Figura 22, mostrando os valores de deformação. Estes valores não ultrapassaram os limites, mas verifica-se as regiões mais solicitadas, sendo que no caso do deslocamento encontra-se nas extremidades da viga e da deformação encontra-se na região central

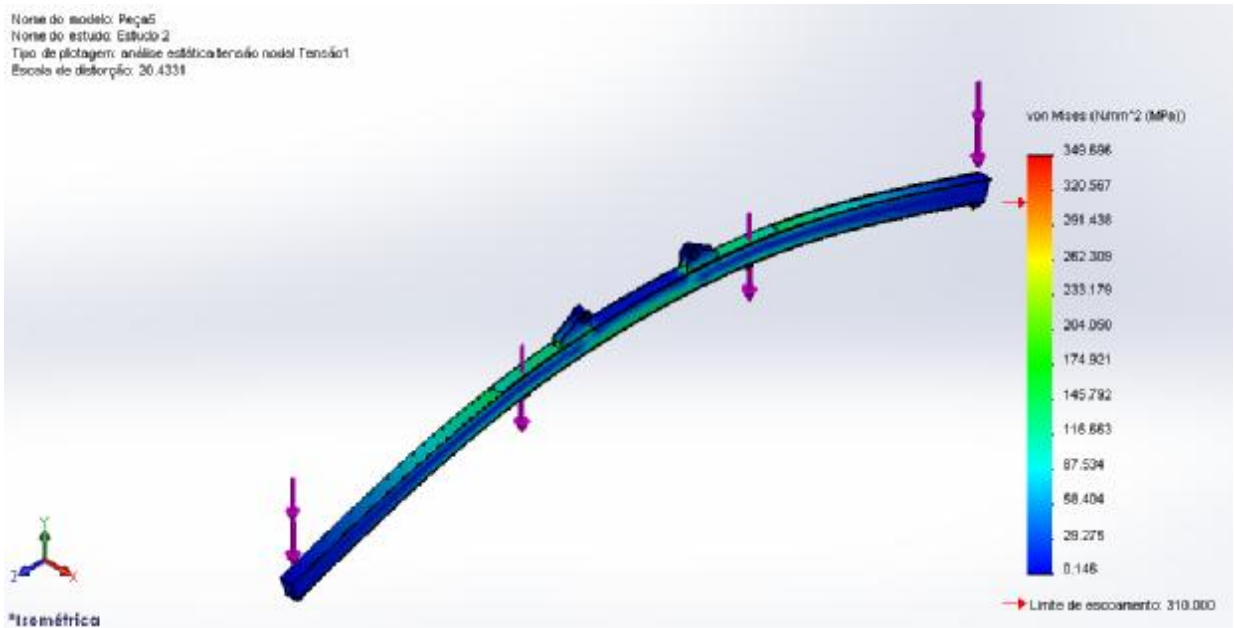


Figura 19 - Tensão (Von Misses)

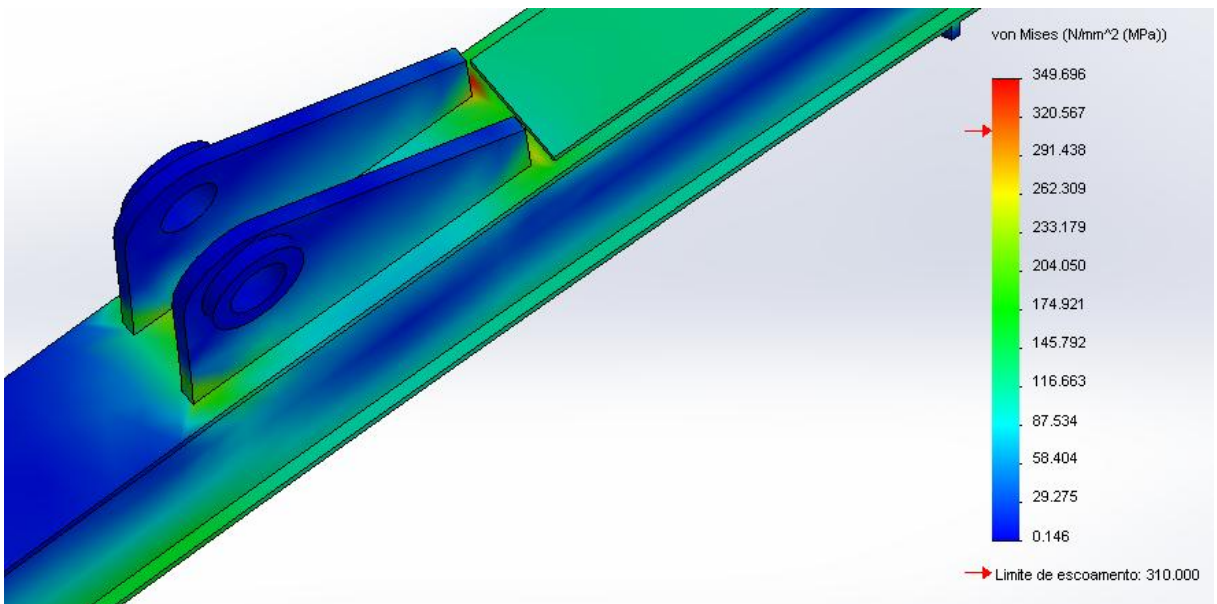


Figura 20 - Região mais solicitada

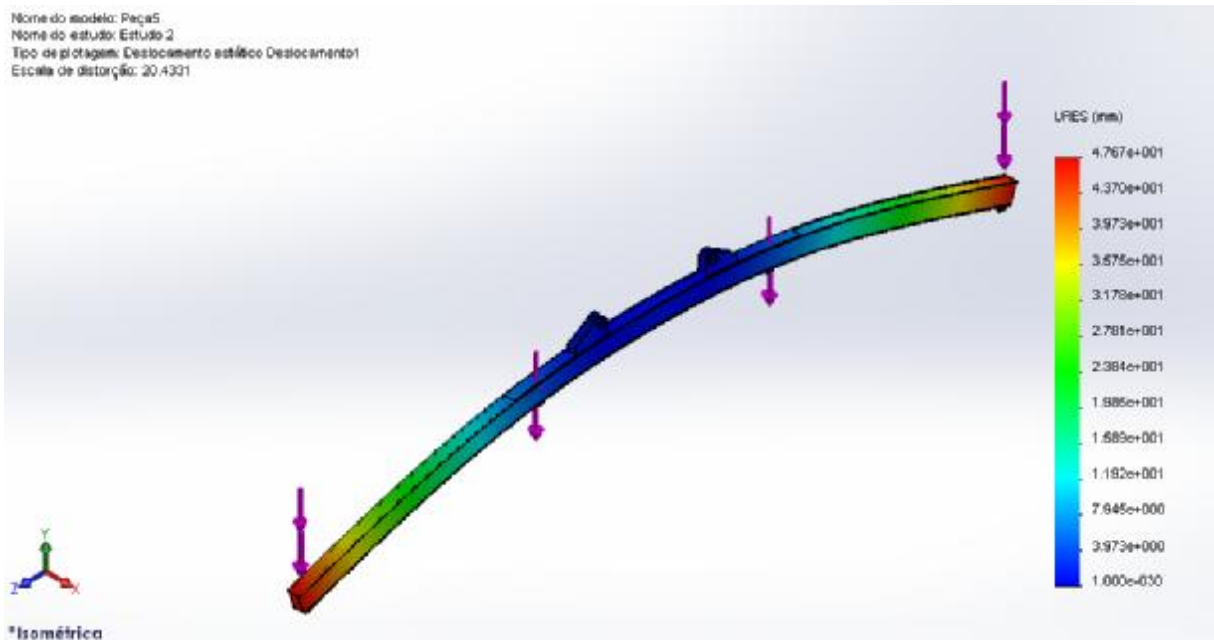


Figura 21 - Deslocamento

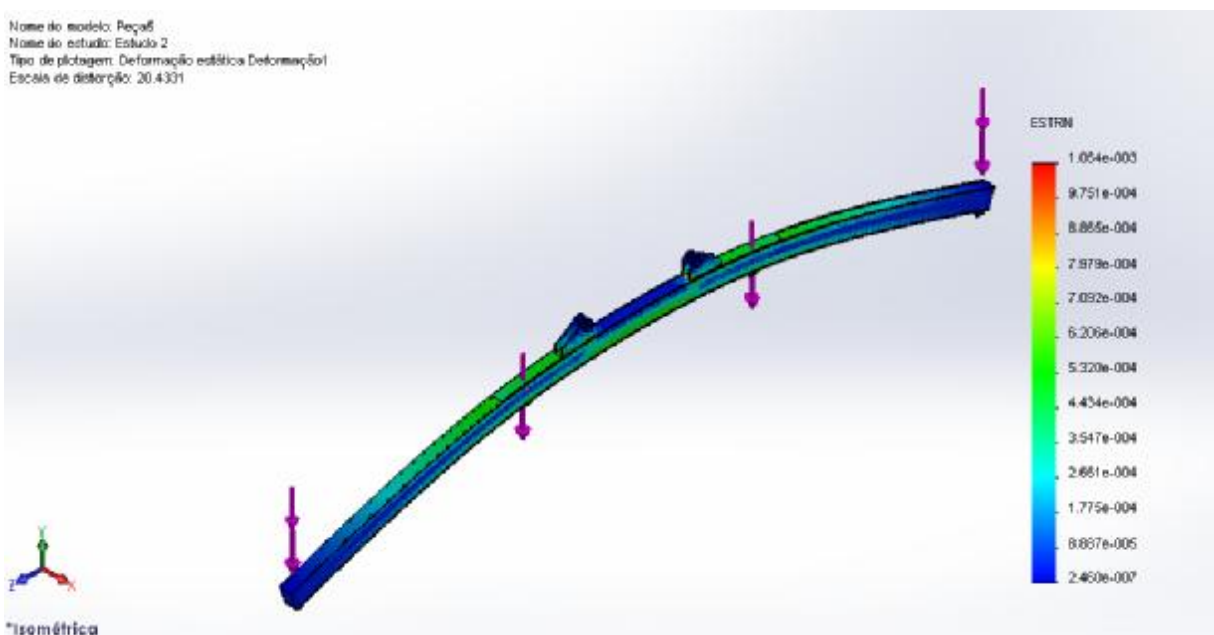


Figura 22 - Deformação

4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em ambos os métodos os resultados não atenderam aos requisitos mínimos de resistência dos materiais, ou seja, $\sigma > \sigma_{lim}$, logo o projeto não satisfaz aos critérios de resistência dos materiais.

A ocorrência da fratura na região específica faz todo o sentido, pois pelo método analítico as maiores tensões deram-se na região central da viga e pela simulação a região concentrou-se nas extremidades do olhal.

Além disso, a tensão no meio do vão da viga encontrada no *SolidWorks* é muito aproximada a tensão encontrada no método analítico, comprovando a qualidade de ambos os métodos para este problema de cálculo simples, mas valores mais altos foram encontrados em pontos específicos pela simulação. Estes valores divergentes devem-se aos concentradores de tensão, que não são analisados no método analítico, assim como elementos adicionais na barra de carga como os olhais e “reforços”.

Os olhais tornaram-se fundamentais na análise pelo *SolidWorks Simulation*, pois além deles serem os pontos de apoio da viga, absorvendo todas as tensões da carga, eles concentraram as maiores tensões nas análises. Um dos possíveis fatores para isso deve-se ao *design* dos olhais, pois eles não possuem raio de concordância em suas extremidades, principalmente na região do centro da viga onde observamos uma maior linearidade.

5 CONCLUSÕES

Análise por Elementos Finitos, através de simulação em *softwares* comerciais, é um método extremamente confiável, quando aplicado corretamente e tem sido utilizado cada vez mais pelos profissionais responsáveis por projetos mecânicos e estruturais devido a complexidade de vários projetos, sendo inviáveis realizar cálculos analíticos.

Pelos resultados encontrados através dos métodos abordados pode-se verificar que o projeto não atendia as especificações desejadas, tanto em relação a critérios de resistência, quanto a conceitos básicos.

Vários fatores contribuíram para a falha da barra de carga: As tensões admissíveis apresentaram resultados menores que as tensões solicitadas. O material utilizado no projeto não era o mais adequado, pois conforme visto anteriormente recomenda-se a utilização de aços de baixo carbono, o que leva a uma fratura do material sem a ocorrência de escoamento antes da falha, além de dificuldades em processo de soldagem.

Além disso, a qualidade da solda realizada contribuiu consideravelmente, pois sem realização de alívios de tensão, procedimento em que a peça é aquecida após a soldagem, a trinca formou-se na região soldada, se propagando através das solicitações até a ruptura final, gerando uma fratura por fadiga.

Não foi estudado o impacto da utilização ou operação do dispositivo, pois a falha era inevitável, mas devem ser observados, conforme orientações estabelecidas na fundamentação teórica.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos mais profundos devem ser realizados em torno do MEF em três segmentos diferentes: análises e pesquisas matemáticas, criação de *softwares* e aplicações dos usuários em *softwares* comerciais e programados pelo próprio usuário.

Análises e pesquisas matemáticas são fundamentais para a compreensão da metodologia, comprovação das equações utilizadas e criações de novas equações para que as aproximações estejam mais próximas dos valores reais.

Estudos dos *softwares* são importantes para entender o método de elementos finitos, comparação entre os *softwares* e principalmente aplicações em casos que necessitam de condições de contorno específicas.

Por fim, aplicações práticas utilizando FEA são fundamentais para o desenvolvimento da Engenharia Mecânica e estudo de uma tecnologia tão nova torna-se crucial para os futuros engenheiros.

REFERÊNCIAS

KIM, N., SANKAR, B. V. **Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC 2011.

FISH, Jacob and BELYTSCHKO, Ted. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, LTC, 2007.

AZEVEDO Álvaro F. M. **Método dos Elementos Finitos**, 1ª Edição, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Portugal 2003.

SORIANO, L. Humberto. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. 1ª Edição. São Paulo, Ed. Edusp. 2003.

SHACKELDFORD, James F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo, Pearson Prentice-Hall, Inc., 6a. Ed. 2008'.

CALLISTER, Jr., W.D. **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução**, 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2008.

ASKELAND, Donald R, Phulé, P.P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**, 1ª Edição, Ed. Cengage Learning, 2008.

VAN VLACK, Larence H. **Princípio de ciências e tecnologia dos materiais**. 4º Edição, Rio de Janeiro, Campus, 1984.

PFEIL W, PFEIL M. **Estruturas de Aço: dimensionamento prático**. 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC 2009.

PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca Bragança, **Estruturas Metálicas: Cálculos Detalhes, Exercícios e Projetos**. 2ª Edição. Editora Blucher. 2005

CARNASCIALI, C. Carlos. **Estruturas Metálicas na Prática**. 1ª Edição. São Paulo. McGraw-Hill do Brasil, 1974

AGHAYERE, Abi;VIGIL Jason. *Structural Steel Design*. 1ª Edition. Columbus, Ohio. Pearson 2009.

BUDYNAS, R. G. **Elementos de Máquinas de Shigley**, 8.Ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

NORTON, R.L. **Projetos de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**, 4º Edição, Ed. Bookman. 2013

_____. **NBR8400**: Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas. Rio de Janeiro 1984.

_____. **NBR8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro 2008.

_____. **ASME B30.20-2010**: Below-the-Hook Lifting Devices. New York 2010.

_____. **EN1355**: Cranes – Safty – Nom-fixed load lifting attachments. London 2009.

Ajuda do *SolidWorks*. Disponível em: <http://help.solidworks.com/2013/portuguese-brazilian/SolidWorks/SWHelp_List.html?id=ee628cdcc155446badeef99f7976cc3c#Pg0> Acesso em 22/06/2014

Barra de Carga. Disponível em: <http://www.barradecarga.com.br/hotsite_barradecarga/> Acesso em 17/06/2014

Projeto de Barra de Carga. Disponível em: <http://www.twn-eng.com/projetos.php?projeto=barra_manut>. Acesso em 22/06/2014

Revista Proteção. Disponível em: <http://www.protecao.com.br/materias/anuario_brasileiro_de_p_r_o_t_e_c_a_o_2013/brasil/J9y4Jj>. Acesso em 17/06/2014

Análise do rotor de uma turbina. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/RafaelLial/elementos-finitos-anlise-do-rotor-de-uma-turbina>> Acesso em: 22/06/2014

PALMA Cristiano Diogo. **Metodologia de simulação por elementos finitos de polias para transportadores de correia de grandes capacidades**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2009.

Propriedades do Aço AISI 1045. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4b0553daf9c245e684f2199a48179d89&ckck=1>> Acesso em 31/10/2014

ASM HANDBOOK, Vol. 11: **Failure Analysis and Prevention**, ASM International The Materials Information Company, 2002

ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, ____ de _____ de 20____.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

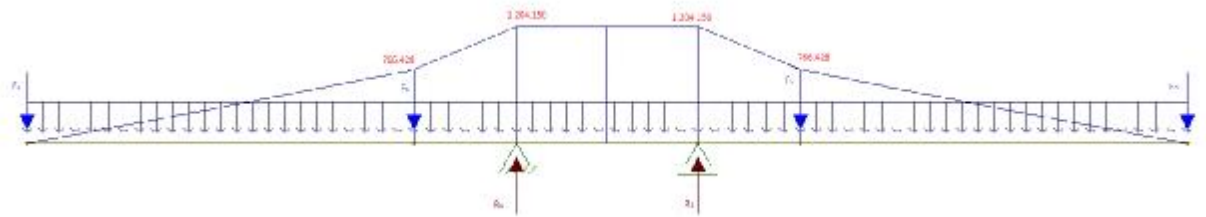
CPF

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.

ANEXO 3 – MEMORIAL DE CÁLCULO ANALÍTICO CONFORME NORMA NBR8400

1 – Análise Gráfica das Cargas e Momento Fletor



2 – Carga

Feixe: 7500 kgf x 12000 mm

Carregamento: = (+ .)

Sendo que: $M_x = 1,12$, $\phi = 846,51$ Kgf, $\phi = 1,15$, temos:

$$\begin{aligned} &= 1,12 (846,51 + 1,15 \times 7500) \\ &= 10.608 \end{aligned}$$

3 – Carga de Trabalho

$$\begin{aligned} &= . . \\ &= 1,12 \times 1,15 \times 7500 \\ &= 9.660 \end{aligned}$$

4 – Distribuição do Carregamento

$$\begin{aligned} \frac{9660}{12000} &= 8,05 \text{ —} \\ &= 280 \times 8,05 = 2.254 \\ &= 320 \times 8,05 = 2.576 \end{aligned}$$

5 – Reação nos apoios

$$= \frac{9660 + 846,51}{2} = 5.253,25$$

Peso Próprio: $\frac{1}{2} = 0,8818$

6 – Cálculo do Momento Fletor

6.1 – Seção : $0 < x < 320$

$$= 0 \rightarrow \dots + \dots \cdot \frac{1}{2} + \dots = 0$$

$$= -2.254 - 0,8818 \frac{\dots}{2}$$

$$= -766.428 \dots, \dots = 320$$

6.2 – Seção : $320 < x < 405$

$$= 0 \rightarrow \dots + (\dots - 320) + \dots \cdot \frac{1}{2} + \dots = 0$$

$$= -2.254 - 2.576 (\dots - 320) - 0,8818 \frac{\dots}{2}$$

$$= -766.428 \dots, \dots = 320$$

$$= -1.204.148 \dots, \dots = 405$$

6.3 – Seção : $405 < x < 555$

$$= 0 \rightarrow \dots + (\dots - 320) - (\dots - 405) + \dots \cdot \frac{1}{2} + \dots = 0$$

$$= -2.254 - 2.576 (\dots - 320) + 5.253,25 (\dots - 405) - 0,8818 \frac{\dots}{2}$$

$$= -1.204.148 \dots, \dots = 405$$

$$= -1.204.150 \dots, \dots = 555$$

6.4 – Seção : $555 < x < 640$

$$\begin{aligned}
&= 0 \rightarrow \dots + (-320) - (-405) - (-555) + \dots \cdot \frac{1}{2} + \\
&= 0 \\
&= -2.254 - 2.576(-320) + 5.253,25(-405) + 5.253,25(-555) \\
&\quad - 0,8818 \frac{\dots}{2} \\
&= \frac{-1.204.150}{-766.432} \dots, \quad = 555 \\
&\quad \quad \quad \quad \quad \quad = 640
\end{aligned}$$

6.5 – Seção : $640 < x < 960$

$$\begin{aligned}
&= 0 \rightarrow \dots + (-320) - (-405) - (-555) + (-640) \\
&\quad + \dots \cdot \frac{1}{2} + \dots = 0 \\
&= -2.254 - 2.576(-320) + 5.253,25(-405) + 5.253,25(-555) \\
&\quad - 2,576(-640) - 0,8818 \frac{\dots}{2} \\
&= \frac{-766.432}{-13,44} \dots \cong 0 \dots, \quad = 640 \\
&\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = 960
\end{aligned}$$

7 – Propriedades da Seção

PROPRIEDADES GEOMETRICAS DA SEÇÃO	
VIGAS DE SEÇÃO CAIXÃO (simetrica em relação ao eixo y-y)	
DADOS DE ENTRADA	
d =	(cm) 23,95
af =	(cm) 14
bf =	(cm) 17
Tfa =	(cm) 0,95
Tfb =	(cm) 0,95
Tw =	(cm) 1,25
MÓDULO DE RIGIDEZ	
Wx =	(cm ³) 544,72
Wy =	(cm ³) 56,08
PROPRIEDADES DA SEÇÃO	
Alfa =	(cm ²) 16,15
Atfb =	(cm ²) 16,15
Atw (2x)=	(cm ²) 55,1316
Σ A (seção):	(cm ²) 87,4316
C.G.x =	(cm) 11,98
Peso =	(kg/m) 68,72
Perímetro =	(m) 0,8190528
MOMENTO DE INÉRCIA - X	
Ix1 =	(cm ⁴) 2137,54
Ix2 = Ix3 =	(cm ⁴) 2234,30
Ix4 =	(cm ⁴) 2137,54
Ix =	(cm ⁴) 6509,38
MOMENTO DE INÉRCIA - Y	
Iy1 =	(cm ⁴) 388,95
Iy2 = Iy3 =	(cm ⁴) 7,18
Iy4 =	(cm ⁴) 388,95
Iy =	(cm ⁴) 785,07

8 – Tensão Solicitada e Tensão Admissível

$$= \frac{M}{W_x} = \frac{2234,30}{544,72} = 2.210,58 \text{ —}$$

$$= \frac{M}{W_y} = \frac{2234,30}{56,08} = 2.106,66 \text{ —}$$

9 – A análise de ruptura

Como foi encontrado a $\sigma > \sigma_{adm}$ o projeto não atende aos critérios de resistência dos materiais.