

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

LUCAS DE CARVALHO MACIEL

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO PERFIL DA SEÇÃO
TRANSVERSAL DO SUPORTE PARA ELEVAÇÃO DA UNIDADE
CONDENSADORA DE AR CONDICIONADO TIPO SPLIT**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2020

LUCAS DE CARVALHO MACIEL

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO PERFIL DA SEÇÃO
TRANSVERSAL DO SUPORTE PARA ELEVAÇÃO DA UNIDADE
CONDENSADORA DE AR CONDICIONADO TIPO SPLIT**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Tecnólogo em
Manutenção Industrial, do câmpus de
Guarapuava, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Luan José
Franchini Ferreira

GUARAPUAVA

2020



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de TMI
Tecnologia em Manutenção Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO PERFIL DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO SUPORTE PARA ELEVAÇÃO DA UNIDADE CONDENSADORA DE AR CONDICIONADO TIPO SPLIT por

LUCAS DE CARVALHO MACIEL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 22 de outubro de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Msc. Luan José Franchini
Prof. Orientador

Prof. Dr. Álamo da Silva Batista
Membro titular

Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva
Membro titular

Dr. Marcelo Rafael Cosetin

Coordenador do Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

MACIEL, Lucas. Otimização estrutural do perfil da seção transversal do suporte para elevação da unidade condensadora de ar condicionado tipo split. 2020. 82 f Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2020.

Um ar condicionado do modelo Split é dividido em duas partes, a interna chamada de unidade evaporadora e a externa chamada de unidade condensadora. Normalmente os aparelhos de ar condicionado são instalados em locais altos e de difícil acesso, sendo necessário o uso de um sistema para a elevação da unidade condensadora até o local de sua instalação. O sistema de elevação em questão, é, em algumas vezes ainda desconhecido de alguns trabalhadores da área, e em outras vezes fabricada por instaladores do segmento em oficinas informais e sem cálculos de dimensionamento estrutural para que se possa evitar a falha estática por uma eventual sobrecarga aplicada ao sistema, o que pode ocasionar a queda súbita do equipamento de ar condicionado, expondo os trabalhadores a riscos de graves acidentes. Tendo visto isso, o presente trabalho visa calcular as cargas da estrutura, as tensões atuantes na estrutura através do método das seções, fazer a simulação com softwares 2D e 3D para comparar com os resultados obtidos, combinar os resultados com um material de dimensões e características mecânicas compatíveis com o exigido, e se chegar a um perfil da seção transversal em um ponto que resista a carga e não sofra falha, para que se possa facilitar seu transporte vertical e garantir segurança no serviço.

Palavras-chave: Análise estrutural. Otimização estrutural. Máquinas de elevação.

ABSTRACT

MACIEL, Lucas. Structural optimization of the cross-section profile support for lifting the split-type air conditioning condenser unit. 2020. 82 f. Course Conclusion Paper (Industrial Maintenance Technology) - Federal University of Technology – Parana. Guarapuava, 2020.

An air conditioner of the Split model can be divided into two parts, the internal called the evaporator unit and the external called the condenser unit. Air conditioning units were normally installed in high places and are difficult to access, requiring the use of a system to lift the condensing unit to the place of its installation. The lifting system in question is, at many times, still unknown to some workers in the area, and at other times manufactured by installers of the segment in informal workshops and without structural dimensioning calculations in order to avoid static failure due to possible overload. Applied to the system, which can cause the sudden fall of the air conditioning equipment, exposing workers to risks of serious accidents. The present work have aims to calculate the loads of the structure, the tensions acting on the structure through the section method, to do the simulation with 2D and 3D software to compare with the results obtained, to combine the results with a material of dimensions and characteristics mechanics compatible with the requirements, and a cross section profile is reached at a point that resists the load and does not suffer failure, so that it can facilitate its vertical transport and guarantee safety in the service.

Keywords: Structural analysis. Structural optimization. Lifting machines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ar condicionado janelheiro	11
Figura 2 - Ar condicionado Split	12
Figura 3 - Instalador com ar condicionado	13
Figura 4 - Içador de ar condicionado	14
Figura 5- Sistema de forças atuantes sobre um corpo	20
Figura 6 - Esforço Cortante.	21
Figura 7 - Diagrama de esforço cortante.	22
Figura 8 - Convenção de sinal para momento fletor.....	23
Figura 9 - Diagrama de momento fletor interno.....	24
Figura 10 - Tensão de flexão.....	26
Figura 11 – Flambagem de uma coluna ideal	27
Figura 12 – Comprimento efetivo e valor de K para diferentes condições de apoio.	28
Figura 13 – Tensão máxima em uma coluna com carga excêntrica	29
Figura 14 - Gráfico de tensão x deformação.	31
Figura 15 - Linhas de Lüder em tira de aço doce.	32
Figura 17 - Comparativo ente critérios de falha de Von Mises e Tresca.	33
Figura 18 - Otimização estrutural por dimensionamento.	35
Figura 19 - Otimização estrutural de forma.	36
Figura 20 - Otimização estrutural de topologia.....	36
Figura 21 - Partes da ferramenta de elevação de ar condicionado.	42
Figura 22 - Identificação da barra de reforço.....	43
Figura 23 - Esforços atuantes na estrutura.	45
Figura 24 - Seções na determinação dos esforços internos.	46
Figura 25 - Esforços na estrutura seccionada	47
Figura 26-Esforços na estrutura seccionada.....	48
Figura 27 - Diagrama de esforço normal ao longo da estrutura	50
Figura 28 - Diagrama de esforço cortante ao longo da estrutura.	50
Figura 29 - Diagrama de Momento Fletor.	51

Figura 30 - Área do tubo.	52
Figura 31 - Representação gráfica do problema de otimização.	67
Figura 32 - Detalhes da geração da malha utilizada na simulação.	69
Figura 33 - Malha utilizada na simulação.	70
Figura 34 - Detalhes da malha utiliz.	70
Figura 35 - Comparativo Diagrama de esforço normal 2D Frame Analysis e simulação de esforço axial Ansys Academic.	71
Figura 36 - Comparativo Diagrama de esforço cortante 2D Frame Analysis e simulação de esforço cortante Ansys Academic.	72
Figura 37 - Comparativo Diagrama de momento fletor 2D Frame Analysis e simulação de momento fletor Ansys Academic.	72
Figura 38 - Máxima tensão combinada.	73
Figura 39 - Mínima tensão combinada.	74
Fonte: Criado com Ansys Academic.	74
Figura 40 - Tensão direta.	74
Figura 41 - Máxima Tensão de flexão.	75
Figura 42 - Deslocamento da estrutura.	76
Figura 43 - Características físicas da estrutura Inicial.	77
Figura 44 - Características físicas da estrutura otimizada.	77

SUMÁRIO

1.	<u>INTRODUÇÃO</u>	11
1.1	OBJETIVO	15
1.1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	15
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2.	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	17
2.1	MÁQUINAS DE ELEVAÇÃO	17
2.2	GUINDASTES E GIRAFAS	17
2.3	ANÁLISE ESTÁTICA DA ESTRUTURA	18
2.4	TENSÕES AXIAIS	20
2.5	ESFORÇO CORTANTE	21
2.6	MOMENTO FLETOR	22
2.7	TENSÃO DE CISALHAMENTO	24
2.8	TENSÃO DE FLEXÃO	25
2.9	FLAMBAGEM	27
2.10	FALHA ESTÁTICA	30
2.11	OTIMIZAÇÃO	34
2.12	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	37
2.12.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	37
2.12.2	DADOS E COLETA DE INFORMAÇÕES	38
2.12.3	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROBLEMA	38
2.12.4	DEFINIÇÃO DO CRITÉRIO À SER OTIMIZADO	38
2.12.5	DEFINIÇÃO DAS RESTRIÇÕES	38
2.13	FORMA PADRÃO DE UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	39

2.14	MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO GRÁFICA	40
3	<u>DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA.....</u>	42
3.1	MODELAGEM DO PROBLEMA	42
3.2	DEFINIÇÃO DAS CARGAS ATUANTES NA ESTRUTURA	44
3.3	SELEÇÃO DO MATERIAL.....	45
3.4	CÁLCULO DE ESFORÇOS ATUANTES NA ESTRUTURA.....	46
3.5	DIAGRAMA DE ESFORÇOS INTERNOS.....	49
3.6	ANÁLISE DE TENSÃO ATUANTE NA ESTRUTURA.....	51
3.6.1	ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM TUBO RETANGULAR	52
3.6.2	MOMENTO DA INÉRCIA.....	53
3.6.3	PRIMEIRO MOMENTO DE ÁREA	54
3.6.4	TENSÕES MÁXIMAS	54
3.7	VERIFICAÇÃO DA FALHA ESTÁTICA	55
3.8	VERIFICAÇÃO DA FLAMBAGEM NA COLUNA DA ESTRUTURA	57
3.9	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	58
3.9.1	FUNÇÃO OBJETIVO	58
3.9.2	RESTRIÇÕES	59
3.9.3	FORMA PADRÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	61
4	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</u>	63
4.1.1	DEFINIÇÃO DAS COORDENADAS.....	63
4.1.2	REPRESENTAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE DESIGUALDADE	64
4.1.3	IDENTIFICAÇÃO DA REGIÃO VIÁVEL PARA UMA DESIGUALDADE	66
4.1.4	IDENTIFICAÇÃO DA REGIÃO VIÁVEL	66
4.1.5	REPRESENTAÇÃO CURVAS DA FUNÇÃO OBJETIVO	66
4.1.6	IDENTIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO ÓTIMA	67
4.3	VERIFICAÇÃO DE FALHA PELO CISALHAMENTO NO PONTO ÓTIMO.	68
4.4	VERIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO ÓTIMA UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS.....	69
4.4.1	ESFORÇOS INTERNOS	71

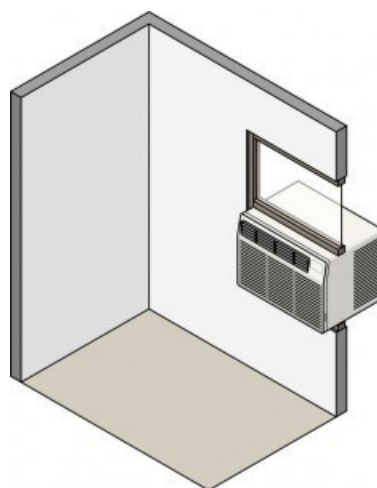
4.4.2	MÁXIMA E MÍNIMA TENSÃO COMBINADA	73
4.4.3	TENSÃO DIRETA.....	74
4.4.4	MÁXIMA TENSÃO DE FLEXÃO	75
4.4.5	DESLOCAMENTO	75
4.4.6	COMPARATIVO DA REDUÇÃO DE MASSA DA ESTRUTURA	76
5	<u>CONCLUSÃO</u>	<u>79</u>
	<u>REFERÊNCIAS.....</u>	<u>81</u>
	<u>ANEXO</u>	<u>83</u>

1. INTRODUÇÃO

Devido as mudanças climáticas e a fatores como aumento e queda brusca da temperatura média no Brasil e no mundo, aliado ao desenvolvimento tecnológico constante, o ar condicionado que já foi considerado um item de luxo ou supérfluo em muitos lugares, hoje é um item essencial e as vezes de necessidade básica em algumas cidades que possuem uma grande variação da temperatura média anual, não se podendo descansar ou trabalhar sem o auxílio deste equipamento. Com isso o aumento na procura por profissionais para a instalação de ar condicionado tem crescido muito nos últimos tempos, fazendo com que esses profissionais tenham que se adaptar ao mercado e trabalhar cada vez mais de forma eficiente e rápida para atender a demanda.

Os antigos aparelhos de ar condicionado conhecidos como “janeleiros”, eram uma única peça e dispensavam a instalação de um suporte exclusivo de condensador. Este equipamento ficou assim conhecido pelo fato de que eles só podiam ser usados em ambientes com janela onde se pudesse colocar sua parte posterior ao lado de fora da edificação para escoar a água oriunda da condensação do ar, como pode se observar na Figura 1.

Figura 1 - Ar condicionado janeleiro

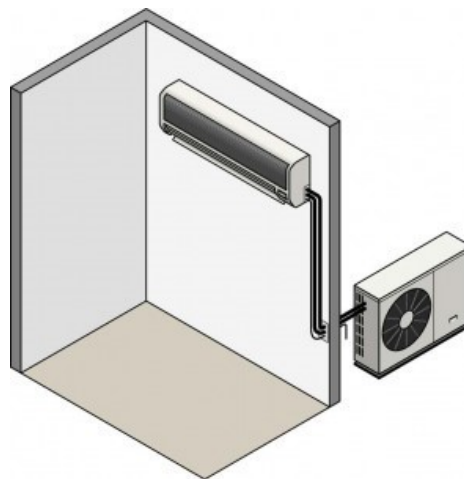


Fonte: Hometips (2019).

Com o passar do tempo e a necessidade de se adequar as exigências de normas técnicas, como a NBR 15575, e ao apelo estético dos projetos

arquitetônicos das novas edificações, foi necessário um modelo de equipamento para condicionamento de ar que atendesse todo tipo de ambiente, mesmo que este não dispusesse de uma janela para o ambiente externo. Assim, foi desenvolvido o condicionador de ar tipo *SPLIT*, que do inglês se traduz *separado*, que é exatamente o que aconteceu com o antigo modelo como se pode observar na Figura 2. Separou-se o evaporador do condensador e a interligação entre os dois sistemas deu origem a profissão do Instalador de Ar condicionado *split*.

Figura 2 - Ar condicionado Split



Fonte: Hometips (2019).

Um dos pontos importantes da instalação de um ar condicionado *split* é a instalação da unidade condensadora, pois na maioria das vezes sua alocação se dá em locais altos e de difícil acesso sendo necessário o uso de algum equipamento para a elevação da unidade condensadora até o local de sua instalação.

Na grande maioria dos casos os instaladores ignoram completamente a NORMA REGULADORA 35 (2016, ITEM 35.4.2) que diz que é obrigatório se possível evitar o trabalho em altura, que pela mesma norma, é considerado trabalho em altura todo aquele executado acima de 2,00 metros do nível inferior (2016, ITEM 35.1.2) e, assim, como pode ser observado no exemplo da figura 3, acabam colocando o equipamento nas costas e sobem se equilibrando escada a cima, arriscando derrubar o equipamento, já que este não está devidamente

ancorado a um ponto fixo confiável, sofrer uma doença do trabalho pelo esforço exagerado e não adequado ergonomicamente, de carregar um equipamento de no mínimo 35kg nos ombros enquanto se arriscam na subida da escada íngreme, ou o que é pior, sofrer um acidente de trabalho que pode de imediato causar sérios danos a integridade do trabalhador.

Figura 3 - Instalador com ar condicionado



Fonte: o próprio Autor.

Uma saída para essa prática é o uso de andaimes. Os andaimes, segundo RAMOS FILHO (2012), são construções auxiliares provisórias, normalmente construídas em metal, encaixadas entre si para que o trabalhador possa executar um determinado serviço em um local alto. Porém, são estruturas pesadas, de difícil transporte pelo seu tamanho, e a montagem e desmontagem demanda um tempo e recurso humano e financeiro do qual os instaladores de equipamentos de ar condicionado não dispõem normalmente.

Diante desta situação, alguns instaladores de ar condicionado, pensando em agilizar o trabalho e eliminar o uso de andaimes, desenvolveram

um tipo de girafa portátil que faz a elevação do condicionador de ar de forma prática e rápida.

Consiste em uma estrutura tipo L invertido que possui uma manivela com catraca e um sistema de redução que possibilita o operador do mesmo fazer o içamento do equipamento de ar condicionado sem o esforço de ter que levantar o peso total do equipamento. A ferramenta, como se pode observar na Figura 4 possui uma barra horizontal que possibilita sua fixação sobre o próprio suporte em que será instalado o ar condicionado e quando não está em uso pode ser desmontado para facilitar seu armazenamento.

Figura 4 - Içador de ar condicionado



Fonte: o próprio autor.

Porém, essa ferramenta desenvolvida pelos instaladores é fabricada em oficinas informais e quando são encontradas no mercado não trazem consigo informações de suas características mecânicas, de resistência a falha estática ou ao limite de carga que podem suportar, o que acaba expondo os trabalhadores a riscos de graves acidentes.

E é pensando nesta falta de informação sobre esta ferramenta que este trabalho se desenvolve, para possibilitar que este seja fabricado com características que ofereçam segurança ao seu usuário.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a otimização estrutural do perfil da seção transversal da ferramenta de elevação da unidade condensadora de ar condicionado, através da pesquisa das principais literaturas científicas sobre o assunto, para facilitar assim seu manuseio e transporte e proporcionar ao instalador que for usa-la mais segurança e confiabilidade.

1.1.2 Objetivo Específico

- *Diminuir a massa da estrutura* através da redução das dimensões do perfil do tubo da mesma. Sabendo a que esforços e tensões a estrutura está exposta pode-se calcular com precisão qual o menor perfil possível para se fabricar a ferramenta com segurança.
- Calcular um *coeficiente de segurança* para que o usuário da estrutura saiba qual a carga máxima a que pode ser exposta a estrutura.
- *Simular* os resultados encontrados em softwares disponíveis para comprovar a confiabilidade dos resultados encontrados.
- Desenvolver uma *solução gráfica* para através da representação das restrições do problema de otimização.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com a crescente demanda por instalações de ar condicionado, a procura por ferramentas que o façam de forma prática e segura, é cada vez maior por profissionais da área. Mesmo assim, a oferta da ferramenta em questão no mercado ainda é escassa e, quando existe, as informações sobre testes de

resistência são inexistentes, informando apenas os limites de resistência a tração do cabo de aço utilizado no guincho manual, não havendo informações de quanto realmente suporta a estrutura do içador, o que abre um nicho para a fabricação de projetos que venham atender de forma séria e com embasamento teórico a necessidade do mercado atual.

Sabendo qual é a tensão admissível do material da estrutura e qual é a influência das forças atuantes sobre ela, pode-se chegar a um limite de resistência seguro para esta suportar a carga sobre ela aplicada, com o mínimo de material possível para sua fabricação, tornando a mesma mais ergonômica e ágil para o trabalho. Outro fator muito importante é a segurança. Com as simulações em softwares e cálculos pode-se assegurar com um devido fator de segurança a carga máxima que será aplicada a ferramenta. Também pode-se reduzir o custo final, otimizando o material aplicado na produção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será apresentado uma breve revisão bibliográfica sobre os sistemas de elevação de cargas, em seguida será abordado a análise estática de estruturas, os esforços atuantes e as respectivas tensões desenvolvidas por cada um desses esforços, também será apresentada uma discussão sobre as falhas por flambagem e por escoamento. E por fim, os conceitos de otimização e otimização estrutural são apresentados.

2.1 MÁQUINAS DE ELEVAÇÃO

Com o desenvolvimento da ciência e a necessidade de realizar trabalhos cada vez maiores, ao longo dos anos o homem vem desenvolvendo máquinas para substituir o trabalho manual em todos os setores e áreas de trabalho conforme Noth (2001). No transporte vertical não foi diferente. Ainda mais se tratando de uma atividade de alto risco como são todas as que envolvem trabalhos em altura.

Esses equipamentos são desenvolvidos de acordo com a necessidade de cada tipo de serviço a ser executado, carga a ser transportada, material de fabricação entre outros aspectos.

Dentre as várias opções de transportadores verticais existentes atualmente, pode-se citar os mais utilizados para as mais diversas aplicações. São eles os guinchos, podendo estes ser manuais, hidráulicos, movimentados por um motor elétrico, as talhas, também podendo ser encontradas nas mais diversas formas tais como de polias, de engrenagem, elétricas e os guindastes, sendo estes normalmente utilizados para grandes cargas na indústria, como no caso das pontes rolantes, na construção civil, como é o caso das guias, nos terminais de embarque e desembarque portuários entre muitas outras aplicações.

2.2 GUINDASTES E GIRAFAS

Os guindastes, segundo Pieve (2017), são máquinas usadas para mover ou elevar grandes carga de um ponto para outro, usando princípios da física e motores ou engrenagens para ganhar vantagens mecânicas e movimentar cargas que uma pessoa não poderia mover.

Ainda segundo Pieve (2017) os guindastes hoje usados em indústrias e portos foram desenvolvidos pelos gregos na *Idade Antiga* e eram movidos por força animal ou pelo próprio homem, e antes da revolução industrial estes guindastes chegaram a ser construídos totalmente em madeira ou com sua base sobre torres de pedra para aumentar a estabilidade.

Para o correto dimensionamento e estudo das forças atuantes sobre os guindastes, na Europa se estabeleceram através da norma EN-13001-2 de segurança do guindaste, de 2009, os princípios gerais, requisitos de projeto e especificações para evitar riscos mecânicos em projetos e auxiliar na fiscalização de tais requisitos.

Segundo a EN-13001-2 (2009) os principais riscos do uso ou dimensionamento indevido dos guindastes está relacionado a sua inclinação ou de suas partes, excesso de força que possa causar a sua flambagem ou abaulamento, excesso de temperatura na sua estrutura e ultrapassar seus limites de deformação.

Ainda de acordo com a EN-13001-2(2009) as cargas que atuam em um guindastes podem ser categorizadas como regulares, quando a massa do guindaste é exposta aos efeito do içamento e da gravidade, como ocasionais, quando o mesmo é submetido a forças externas como vento, neve e variações de temperatura, e ainda uma terceira categoria, que é a de cargas excepcional, que pode ser causada por falha de componentes mecânicos, movimentação do solo e outros eventos que como o próprio nome sugere, não são comuns no dia-a-dia da operação com os equipamentos.

2.3 ANÁLISE ESTÁTICA DA ESTRUTURA

Com os avanços tecnológicos e aumento da velocidade com que as informações são transmitidas, os gráficos, diagramas, tabelas, etc., se

apresentam como uma ferramenta indispensável para a transmissão de uma grande quantidade de dados de modo resumido e rápido segundo Albuquerque (2010).

Para que se possa compreender melhor uma serie de dados ou números que tem relação entre si, normalmente utilizam-se estes recursos. Eles auxiliam na interpretação e melhor compreensão de uma informação numérica, transformando ela em uma informação visual mais ampla.

Na engenharia não é diferente, por meio dos diagramas de esforço interno é obtido as cargas máximas que a estrutura deve suportar.

A construção destes gráficos está baseada numa sequência pré-determinada. Dentro deste sequenciamento está incluído o corte da seção para que se possa fazer a análise estrutura.

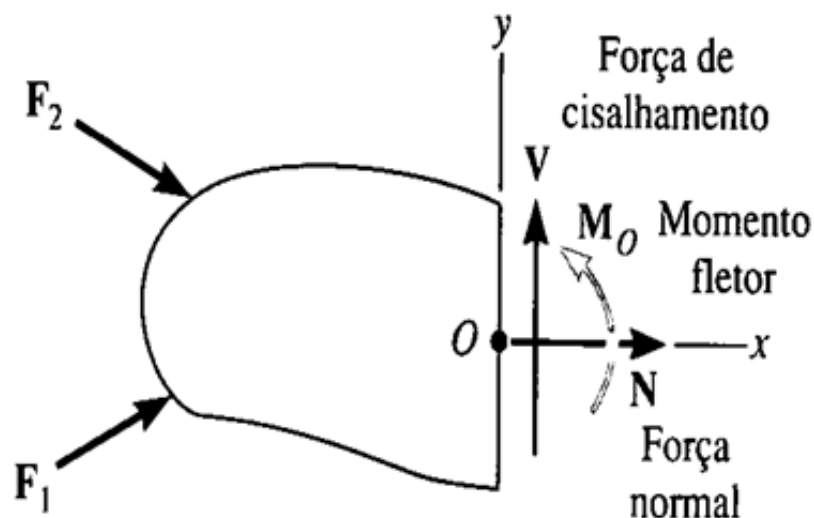
Este modelo de análise é conhecido como método das seções. Pode-se separar o procedimento de análise nos seguintes passos:

- 1- Identificar as reações de apoio utilizando as equações de equilíbrio do elemento analisado;
- 2- Definir os cortes após a interpretação;
- 3- Desenhar os cortes no diagrama de corpo livre para melhor interpretação;
- 4- Resolver a equação de equilíbrio para cada corte desenhado no diagrama.

Para cada corte deve ser considerado 3 reações no elemento analisado, se este se tratar de um elemento estrutural plano, uma força na direção x, que será a força interna normal (N), uma força na direção y, que é a força interna cortante (V) e a terceira será na direção z, que é perpendicular ao plano x y, que é o momento fletor (M_0), para que desta forma se possa garantir o equilíbrio estático em duas dimensões do elemento analisado.

Os elementos estruturais suportam todos os esforços internos mostrados na figura 5. Para a análise estrutural os conhecimentos dos valores máximos desses esforços internos são essenciais, pois esses esforços internos desenvolvem tensões normais ($\sigma = \textit{sigma}$) e de cisalhamento ($\tau = \textit{tau}$) que não podem ultrapassar o limite de resistência do material.

Figura 5- Sistema de forças atuantes sobre um corpo.



Fonte: Hibbeler (2010).

Os esforços internos N , V e M , variam ao longo da estrutura conforme o carregamento varia, assim é fundamental avaliar o comportamento de variação de cada um desses esforços.

2.4 TENSÕES AXIAIS

As forças axiais são aquelas que submetem um corpo ao esforço de compressão ou tração ao longo do seu eixo longitudinal.

A lei de Hooke, diz que a tensão (σ) no material é igual ao módulo de elasticidade (E) multiplicado pela sua deformação (ϵ), pode ser aplicada estrutura quando o material da mesma tem tensão e deformação relativamente proporcionais entre si, para que possa obter a deformação elástica da estrutura submetida a carga axial.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1).$$

A tensão (σ) na estrutura também pode ser determinada através da força axial interna (N) exercida sobre ela, dividida pela área da seção transversal (A) da mesma. Desta forma obtém-se:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2).$$

Porém, para que se possa dimensionar a estrutura considerando a resistência, é necessário primeiramente determinar a força cortante e o momento fletor da mesma, temas estes que serão abordados nas seções que seguem.

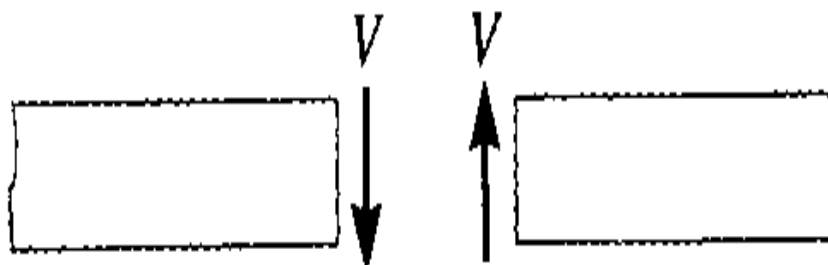
2.5 ESFORÇO CORTANTE

As forças determinadas como cortantes se dão devido as cargas transversais que agem perpendicularmente ao comprimento da estrutura a qual será analisada.

Para determinar o esforço cortante máximo utiliza-se o diagrama de esforço cortante. Alguns pontos importantes para que se possa construir o diagrama de esforço cortante, estão enumerados a seguir:

1. Por convenção, usa-se a letra V para se representar o esforço cortante;
2. O valor máximo de V é encontrado através do diagrama de esforço cortante;
3. Será utilizado neste trabalho, a convenção de sinais comum na engenharia e definida segundo Hibbeler (2010), que diz que, para carga distribuída o sentido de cima para baixo é positivo, e a força cortante provoca rotação no sentido horário da estrutura analisada conforme mostrado na figura 6

Figura 6 - Esforço Cortante.

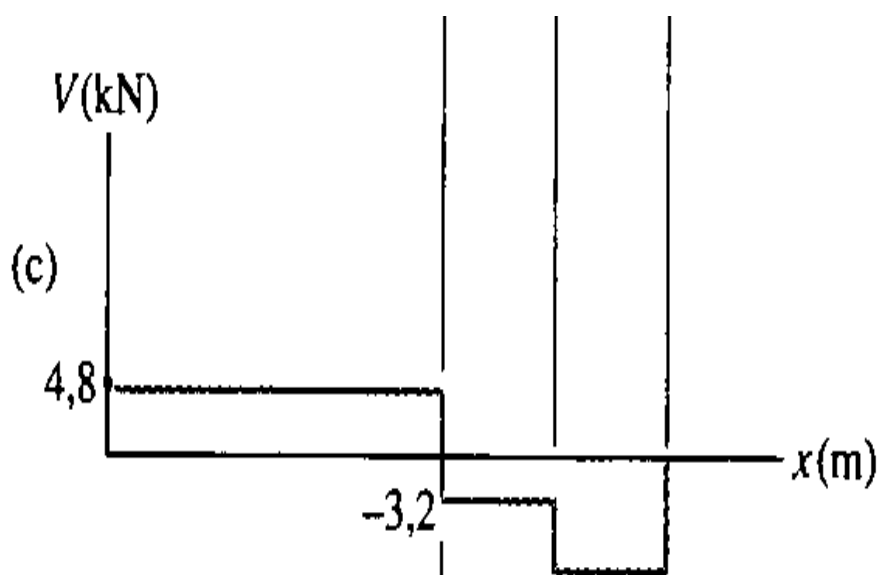


Fonte: Hibbeler (2010).

Para a construção do diagrama utiliza-se os seguintes passos:

- Desenhar o diagrama de corpo livre da estrutura a ser analisada conforme figura 6. Como exemplo será usado uma viga por ser um elemento comum na bibliografia.
- Determinar as reações de apoio e identificar as forças que atuam sobre a estrutura.
- Traçar o diagrama de esforço cortante com os valores obtidos em cada seção em que ocorre a variação do carregamento.

Figura 7 - Diagrama de esforço cortante.



Fonte: Hibbeler (2010).

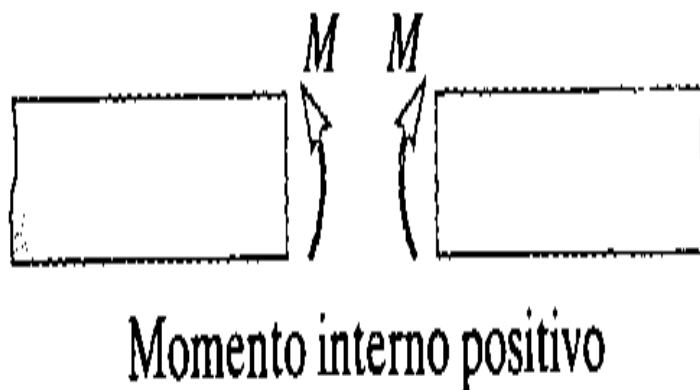
Na figura 7 é possível observar um exemplo de diagrama de esforço cortante obtido pela aplicação dos passos a b e c descritos anteriormente na sessão 2.5.

2.6 MOMENTO FLETOR

O conhecimento deste assunto é indispensável para que se possa dimensionar corretamente uma viga ou estrutura semelhante, pois fazendo estes cálculos se pode dizer onde a incidência desse esforço alcança seu ponto máximo podendo reforçar a estrutura ou redimensioná-la para que não ocorra falhas no projeto.

Quando a seção transversal da estrutura sofre momento em torno dos seus eixos y e z , se diz que esse momento é o momento fletor. Para o momento fletor é muito importante definir o sinal da carga em positiva ou negativa para que se possa efetuar o cálculo dos momentos internos agindo sobre a estrutura. Se a carga distribuída atua de cima para baixo no elemento, se a força cortante causa a rotação no sentido horário e o momento interno causa a compressão, então pela convenção o sinal é positivo.

Figura 8 - Convenção de sinal para momento fletor.



Fonte: Hibbeler (2010).

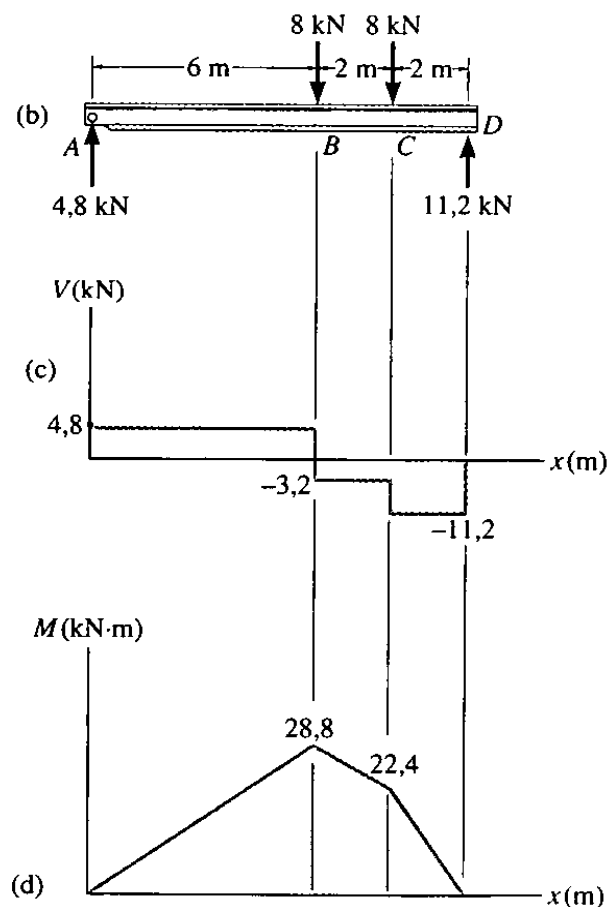
Para que se efetue este cálculo, e construção do diagrama de momento fletor, utiliza-se os mesmos passos 1 e 2 da seção 2.5 (esforço cortante) deste trabalho. Analisando os esforços que atuam em um ponto, analisa-se os esforços ao longo da estrutura para definir o momento do ponto pré-definido.

Após esta etapa, se constrói o diagrama de momentos fletor interno e de momento máximo isolando um trecho da viga para analisar separadamente. Desta forma obtém-se uma equação para se encontrar os valores em cada ponto da estrutura.

A figura 9 (d) exemplifica um diagrama de momento fletor interno para uma viga bi-apoada submetida aos carregamentos mostrados na figura 9 (b).

Pode-se identificar as cargas atuantes e as distância dos seus respectivos ponto de aplicação em relação à extremidade esquerda. Na figura 9 (c), o diagrama de esforço cortante é representado.

Figura 9 - Diagrama de momento fletor interno.



Fonte: Hibbeler (2010).

Na próximas seções será apresentado como a força cortante e o momento fletor relacionam-se com a tensão de cisalhamento (τ) e tensões normal (σ) respectivamente.

2.7 TENSÃO DE CISALHAMENTO

As vigas são elementos que suportam forças no sentido perpendicular ao eixo longitudinal ao que estão dispostas.

A tensão de cisalhamento transversal resulta no cisalhamento \mathbf{V} quando atua sobre a estrutura, segundo Hibbeler (2010). Devido a propriedade complementar de cisalhamento, também agiram tensões de cisalhamento longitudinais. Para que se possa desenvolver uma fórmula para as tensões de cisalhamento, deverá ser usado a relação entre momento fletor e força de cisalhamento, e a equação da flexão.

Desta forma, tem-se para construção de uma fórmula para a tensão de cisalhamento, a partir da simplificação da fórmula da flexão e da equação de equilíbrio das forças horizontais, o seguinte equacionamento:

$$Q = \int_{A'} y \, dA = \bar{y}' A' \quad (3).$$

A partir deste equacionamento, chegar-se-á ao resultado final para fórmula de tensão cisalhante a seguir, que será atribuída ao cálculo do projeto em questão.

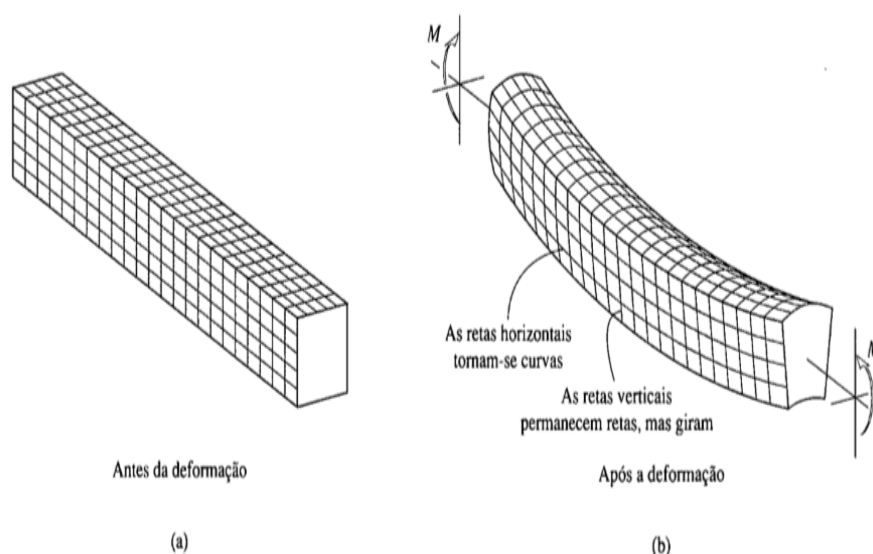
$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (4).$$

Para melhor interpretação da fórmula usa-se para τ tensão de cisalhamento no elemento em um ponto localizado a distância y' da linha neutra. Considera-se esta tensão constante por toda a largura t da seção transversal; V é a força de cisalhamento interna resultante na seção determinada pelas equações de equilíbrio e/ou método das seções; Q é o momento estático da área A' em relação a linha neutra; I é o momento de inércia da área inteira, calculada em torno da linha neutra; e t é a largura da área da seção transversal no ponto onde τ deve ser determinada.

As tensões de Cisalhamento e de Flexão máximas em vigas não podem ultrapassar o limite de resistência do material para que não ocorra a falha estática da estrutura.

2.8 TENSÃO DE FLEXÃO

A tensão de flexão pode ser descrita e entendida, segundo Hibbeler (2010), ao se observar a figura 10, onde simula-se (parte b da figura) uma viga de um material deformável sofrendo uma força de tração na sua fase inferior, e uma força de compressão na sua fase superior, devido a uma força de momento aplicada em suas extremidades que faz com que o corpo em questão venha a fletir.

Figura 10 - Tensão de flexão.

Fonte: Hibbeler (2010).

Ao longo do centro do elemento há uma linha que não sofre ação nem da força de tração, nem da força de compressão. Éssa linha é chamada de linha neutra, e é uma divisão entre estas duas fases da reação sofrina na viga.

Ainda segundo descrito por Hibbeler (2010), para se determinar a tensão de flexão, são necessarios alguns passo descritos a seguir:

- 1- Conhecer o momento interno em um determinado ponto da estrutura, o qual será representado na formula pela letra “M”.
- 2- Conhecer o momento de inercia da área da seção transversal, que será representado na formula pela letra “I”.
- 3- Ditar uma distância perpendicular e afastado ao eixo neutro onde deseja-se conhecer a tensão de flexão, que será representado na formula pela letra “c”.

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (5).$$

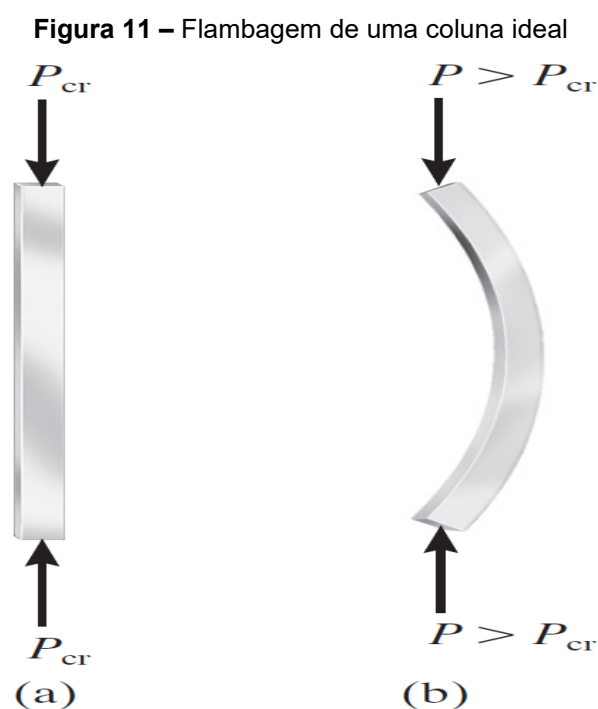
Então é possível conhecer a tensão máxima de flexão através da equação 5, que é o resultado da divisão do valor encontrado para momento de inércia, pela multiplicação do valor do momento interno pela distância.

2.9 FLAMBAGEM

A falha em elementos estruturais pode estar relacionada a instabilidade elástica. A estabilidade é caracterizada pela habilidade de uma estrutura de suportar uma determinada carga sem apresentar uma variação brusca em sua geometria.

Em elementos compridos e esbeltos, que possuem o comprimento bem maior que a maior dimensão da seção transversal, tais como colunas submetidas à forças axiais de compressão, uma deflexão lateral súbita ocorre quando um certo nível de carga é atingido, a esse deslocamento lateral súbito é denominado de flambagem. Em uma coluna ideal, a carga axial em que a flambagem ocorre e chamada de carga crítica P_{cr} , (Hibbeler, 2010).

A figura 11 ilustra o que acontece com uma coluna ideal quando a carga crítica é atingida.



Fonte: Hibbeler (2010).

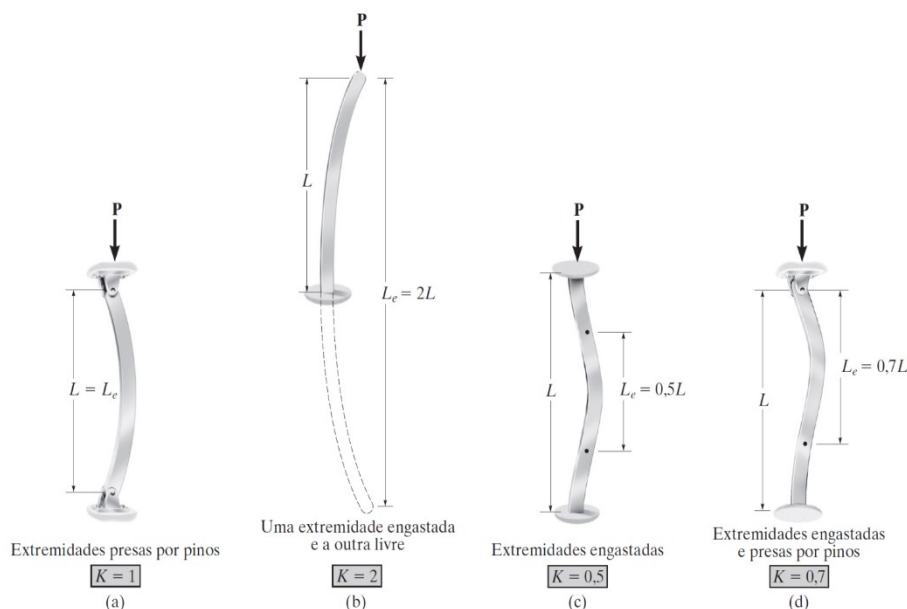
Observa-se que a coluna idealmente reta conforme mostrado na figura 11 (a), curva-se lateralmente de forma súbita, como mostrado na figura 11 (b).

Segundo Hibbeler (2010), a carga crítica de uma coluna ideal depende do seu comprimento (L), do momento de inércia (I) da sua seção transversal, do módulo de elasticidade (E) do qual a coluna é feita e também de uma constante (K) que depende da condição de apoio da coluna. Matematicamente essa relação é expressa por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (6).$$

O produto KL é denominado de comprimento efetivo (L_e), a figura 12 apresenta o valor de cada K para as condições de apoio comumente encontradas nas aplicações reais.

Figura 12 – Comprimento efetivo e valor de K para diferentes condições de apoio.



Fonte: Hibbeler (2010).

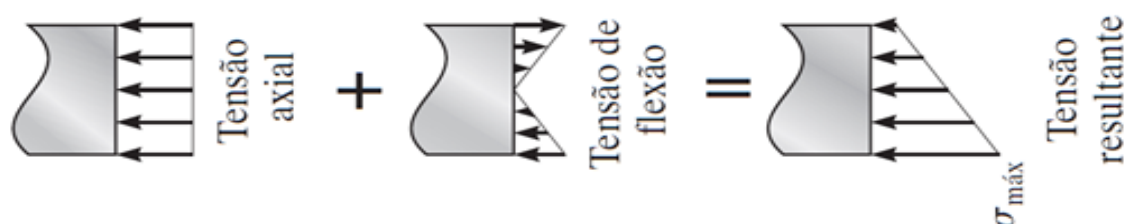
Essa equação, é aplicável apenas a colunas ideais, foi deduzida partindo em que a carga é aplicada na localização do centroide da seção transversal da coluna e que a coluna é perfeitamente reta. Essas condições não condizem com a maior parte das aplicações reais, as colunas fabricadas nunca são perfeitamente retas e não se conhece o ponto de aplicação da carga com precisão. Na realidade, as colunas não sofrem flambagem repentinamente, elas começam a sofrer flexão logo após a carga ser aplicada (Hibbeler, 2010).

Ainda segundo Hibbeler (2010), a aplicação da carga ficará limitada a uma deflexão específica da coluna ou não permitir que a tensão máxima da coluna ultrapasse um certo valor de tensão admissível.

Assim, para colunas reais foi desenvolvida uma expressão que leva em conta a presença de uma distância entre o ponto de aplicação da carga e o centroide da seção, denominado de excentricidade (e). Essa consideração resulta em uma expressão é conhecida como fórmula da secante. Sua dedução em detalhes pode ser encontrada em Hibbeler (2010), entre outras literaturas específicas da área.

Neste trabalho, será utilizado a expressão da tensão máxima ao incorporar a excentricidade (e) na aplicação da carga axial, como a carga é aplicada distante do centroide, além da força axial será desenvolvido também um momento fletor, como mostrado na figura 13 a seguir.

Figura 13 – Tensão máxima em uma coluna com carga excêntrica



Fonte: Hibbeler (2010).

A expressão da tensão máxima é matematicamente expressa por:

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{e c}{r^2} \sec \left(\frac{L_e}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right] \quad (7)$$

onde, r é o raio de giração da seção, c é a distância entre o eixo neutro da seção e a fibra externa onde ocorre a tensão de compressão e L_e é o comprimento efetivo da coluna, que depende da constante K que depende da condição de apoio da coluna definida anteriormente.

A equação (7) indica que a tensão cresce de forma não linear com a carga, de forma que um pequeno aumento da carga pode provocar um grande

aumento de tensão, dependo das características geométricas e da excentricidade dessa uma coluna. Segundo *Budynas e Nisbett (2016)* se a excentricidade for muito elevada e a coluna for longa, isso faz com que a tensão de flexão cresça rapidamente, sendo recomendada o uso da equação da tensão máxima como critério de falha por flambagem.

Conhecendo as características construtivas da coluna e as propriedades do material que ela é fabricada, pode-se determinar o valor da carga axial admissível P_{adm} , para que a tensão de compressão máxima nas fibras internas da coluna, não ultrapasse a tensão de escoamento σ_{esc} do material. Assim, igualando a equação (7) à σ_{esc} e isolando a carga admissível para a flambagem excêntrica, é obtém-se:

$$P_{adm} = \frac{\sigma_{esc} A}{1 + \frac{e c}{r^2} \sec\left(\frac{L_e}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}}\right)} \quad (8)$$

com o cuidado de aplicar o coeficiente de segurança na carga e não à tensão, devido ao comportamento não linear da equação, o coeficiente de segurança para a carga de flabagem é igual à:

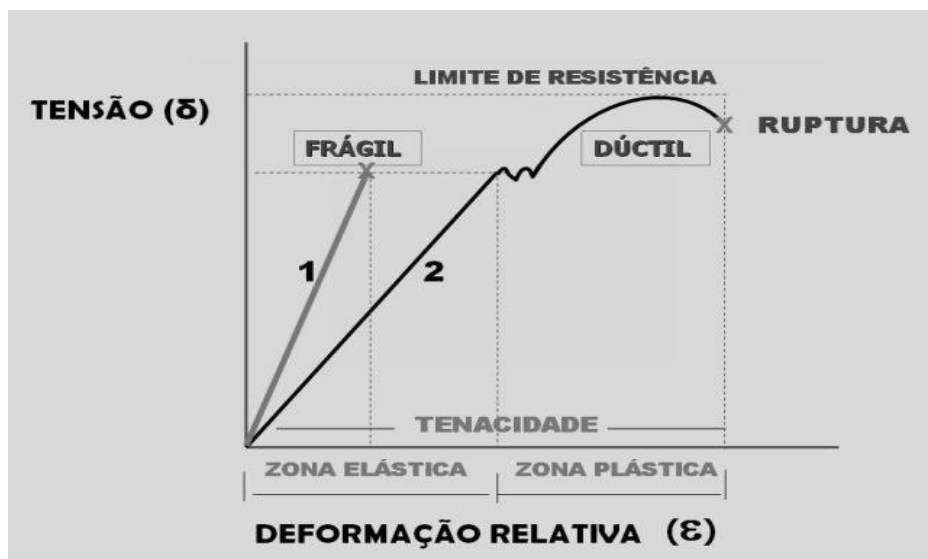
$$n_F = \frac{P_{adm}}{P} \quad (9)$$

segundo *Budynas e Nisbett (2016)*, devido a excentricidade a carga axial P , sempre será menor que a carga crítica P_{cr} .

2.10 FALHA ESTÁTICA

Cada material possui uma característica própria de resistir a um estado de tensão. Quando um material perde ou muda uma de suas propriedades mecânicas de forma em que ele ficará incapaz de realizar o trabalho para o qual ele foi projetado, pode-se dizer que este material sofreu uma falha, que é melhor definido como o ponto em que o material ultrapassou seu limite de escoamento.

Figura 14 - Gráfico de tensão x deformação.



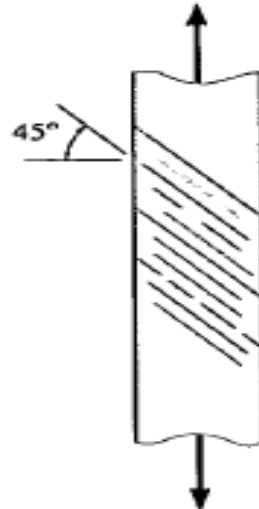
Fonte: Researchgate (2019).

Os materiais podem ser classificados, conforme Pinto (2013), em dúcteis e frágeis, sendo os dúcteis aqueles que são capazes de suportar uma grande deformação antes de sua ruptura, e os frágeis os que com pouca energia já tendem a falha, sem apresentar uma deformação considerável. Este comportamento é observado na figura 14.

Nos materiais considerados dúcteis, segundo a classificação anterior, a falha ou escoamento está relacionado as tensões de cisalhamento internas exercidas no material da estrutura analisada segundo Hibbeler (2010).

Quando o escoamento se torna crítico, o deslizamento dos planos cristalinos começa a aparecer na superfície do material em forma de linha inclinadas 45° em relação ao eixo longitudinal formando as linhas Lüder, que pode ser observada na figura 15 a seguir.

Figura 15 - Linhas de Lüder em tira de aço doce.



Fonte: Hibbeler (2010).

O plano principal de cisalhamento, onde a tensão de cisalhamento é máxima, coincide com estas linhas. Esta teoria, conhecida como critério de falha de Tresca comprova que o cisalhamento máximo é responsável pela falha da estrutura através da seguinte equação.

$$\tau_{max} = \tau_{esc} = \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2} = \frac{\sigma_{esc}}{2} \quad (10).$$

Este critério de falha define uma região na forma de um hexágono e prevê que pontos dentro dele estão livre de falha, porém, pontos fora dele indicam a falha pelo escoamento.

A figura 16 ilustra esta região citada nos parágrafos anteriores sobre o critério de falha de Tresca

Pela teoria de falha estática de Von-Mises, a falha ocorrerá no momento que a tensão equivalente de Von-Mises (σ') for igual à tensão de escoamento (σ_{esc}). Assim, pode-se definir um coeficiente de segurança pela teoria de falha estática de Von-Mises da seguinte forma:

$$n_{VM} = \frac{\sigma_{esc}}{\sigma'} \quad (12)$$

a falha estática pela teoria de Von-Mises é indicada por $n_{VM} = 1$, enquanto qualquer valor acima de um estará em segurança.

A escolha adequada do valor do coeficiente de segurança não é uma tarefa fácil, de acordo com Ugural (2009) os seguintes valores para o coeficiente de segurança podem ser tomados como um guia para problemas de falha estática:

- $1,25 \leq n \leq 2$ - recomendado para materiais bem conhecidos e confiáveis, sob condições controladas e submetidos a cargas e tensões que podem ser determinadas com certo nível de certeza. Recomendado quando minimizar o peso é importante.
- $2 \leq n \leq 3$ - recomendado para materiais médios utilizado em ambientes comuns e submetidos a cargas e tensões que podem ser determinadas.
- $3 \leq n \leq 4$ recomendado para materiais médios utilizados em ambientes incertos ou submetidos a tensões incertas.

2.11 OTIMIZAÇÃO

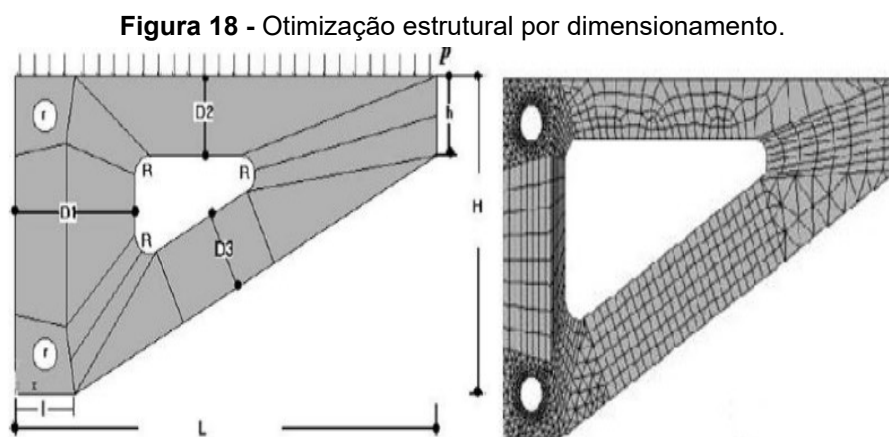
Uma estrutura pode ser definida como qualquer arranjo de materiais que se destina a sustentar cargas. O principal objetivo da otimização estrutural é encontrar o ponto ideal para que um arranjo de materiais possa sustentar uma carga pré-determinada.

Para que se possa encontrar tal ponto é necessário determinar algumas restrições pelas quais a estrutura se torne ideal para o trabalho ao qual será submetida, não ultrapassando limites mínimos e máximos, criando uma zona onde o projeto possa ser viável. E uma função objetivo que deve influenciar direta

ou indiretamente nas variáveis de projeto, como por exemplo: menor peso e maior resistência mecânica.

Dentro da região viável, deve-se buscar o melhor valor da função objetivo que satisfazem os requisitos de projeto, definindo o ponto ótimo para a o projeto. A otimização estrutural pode ser de três formas principais, conforme Rafael H.L e Leandro F.M (2003).

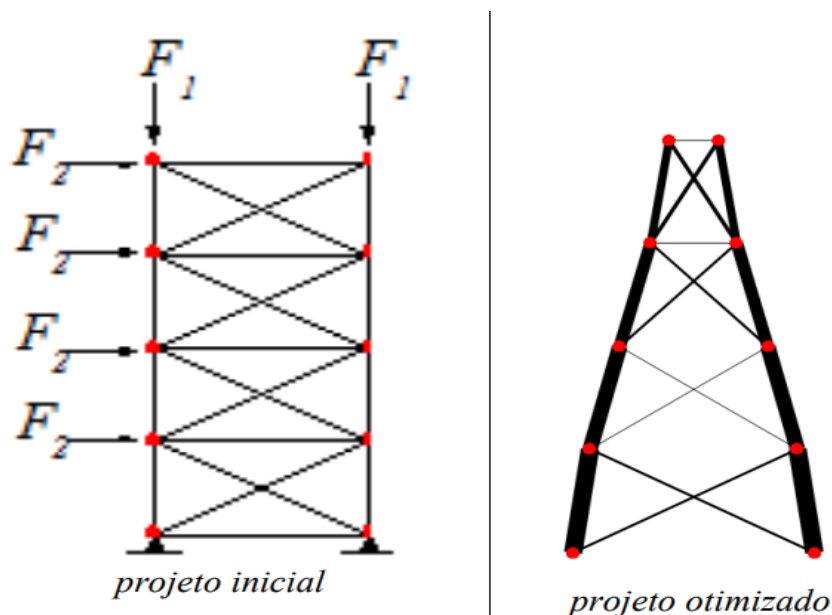
A primeira categoria de otimização estrutural é a de *dimensionamento*, que é quando a variável de projeto x é algum tipo de dimensão estrutural, isto é, áreas de seção transversal de elementos de treliça ou as variações de diâmetros de um eixo conforme ilustrado na figura 15.



Fonte: UFSC- Rafael H.L., Leandro F.M (2003).

O segundo tipo de otimização estrutural, ainda segundo Rafael H.L. e Leandro F.M (2003), é a de *forma*. Neste caso a variável de projeto x representa a forma ou contorno de alguma parte do limite do domínio estrutural. Um corpo sólido, cujo estado de tensão é descrito por um conjunto de equações diferenciais parciais. A otimização consiste em escolher o domínio de integração para as equações diferenciais de forma ideal.

Figura 19 - Otimização estrutural de forma.

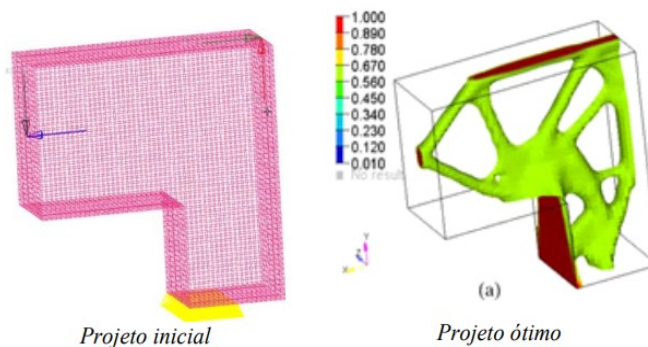


Fonte: UFSC- Rafael H.L., Leandro F.M (2003).

Na figura 19 pode ser observado que a estrutura inicial possuía um formato, e no processo de otimização ela acabou ganhando uma nova forma.

O terceiro tipo de otimização estrutural citada no trabalho é a de *Topologia*.

Figura 20 - Otimização estrutural de topologia.



Fonte: UFSC- Rafael H.L., Leandro F.M (2003).

Esta é a forma mais geral de otimização estrutural. Em um caso discreto, como por exemplo, para uma treliça, é conseguido tomando as áreas da seção transversal dos membros de uma treliça, por exemplo, como variáveis de projeto e, em seguida, permitindo que essas variáveis obtenham o valor zero, isto é, as barras são removidas da treliça como no exemplo da figura 20. Desta forma, a conectividade dos nós é variável, então podemos dizer que a topologia da treliça

muda. A otimização topológica tem mais a ver com a distribuição de material, criação de furos ou reforços, criação ou eliminação de elementos, na estrutura.

Pode-se colocar uma série de medidas sobre o desempenho estrutural, como: peso, rigidez, carga crítica, tensão, deslocamento e geometria.

O problema de otimização estrutural é formulado escolhendo um desses dados como função objetivo, que deve ser maximizada ou minimizada usando algumas das outras medidas como restrições.

Para o trabalho em questão, será usado a forma de otimização estrutural por dimensionamento, tendo como um dos principais objetivos minimizar o volume estrutura de elevação da unidade condensadora, tratando as dimensões da seção transversal de cada elemento como uma variável de projeto. Neste caso as dimensões da seção transversal podem ser reduzidas até que a estrutura suporte uma determinada carga com um limite de segurança aceitável.

2.12 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

A formulação dos problemas de otimização é um dos principais pontos que influenciam a solução do sistema. Segundo Arora (2005), a correta formulação de um problema de otimização é essencial para obter soluções ótimas, pois a solução é tão boa quanto a formulação do problema.

Arora (2005), define um procedimento que pode ser aplicado em qualquer problema de otimização, esse procedimento é constituído de cinco etapas, que serão descritas a seguir.

2.12.1 Definição do problema

Consiste em uma descrição qualificada do problema, em que são descritos os objetivos e os requisitos de desempenho a serem alcançados com a otimização. Segundo Arora (2005), ao fim dessa etapa a seguinte pergunta devem estar respondidas: está claro o objetivo que se deseja alcançar?

2.12.2 Dados e coleta de informações

Nessa etapa em que são descritas as hipóteses, simplificações e definidos os parâmetros que são conhecidos do problema, como por exemplo, as propriedades dos materiais que são utilizados em uma estrutura.

2.12.3 Definição das variáveis de problema

Nessa etapa que são identificadas as variáveis que descrevem o sistema, estas são denominadas de variáveis de projeto. Esse conjunto de variáveis, devem ser independentes uma da outra se possível, estas são livres para obter qualquer valor e influenciam diretamente no sistema a ser otimizado. Em otimização estrutural geralmente essas variáveis são as dimensões da estrutura ou de partes dela.

2.12.4 Definição do critério à ser otimizado

Para avaliar o sistema é necessário definir um critério que define se aquela solução é boa ou não. Esse critério deve ser quantitativo e geralmente uma função escalar, sendo que esse valor é obtido quando um conjunto de valores para as variáveis de projeto é especificado.

Em otimização esse critério é denominado de função objetivo ou simplesmente objetivo, é o valor dessa função que se deseja otimizar. Sendo a solução ótima os valores das variáveis de projeto que obtém o melhor valor possível para essa função objetivo.

Geralmente em problemas estruturais a função é massa, peso ou rigidez da estrutura.

2.12.5 Definição das restrições

Nessa etapa em que se define quais são as restrições do sistema, que podem ser relacionados a fabricação, desempenho, financeiro entre muitas outras. Em problemas estruturais essas restrições podem ser: a não existência de falha ou ruptura sobre cargas estáticas, a operação de um equipamento em frequências diferentes as frequências naturais do sistema, etc.

As restrições devem ser dependentes das variáveis de projeto. Essas restrições podem ser de igualdade (=) ou desigualde (\leq ou \geq). Uma análise cuidadosa dos requisitos do problema deve ser realizada para determinar o tipo de restrição para cada problema, se será de igualdade ou desigualdade, pois esta definição influência no número de soluções possíveis para o problema. As soluções que satisfazem todas as restrições são denominadas se soluções viáveis, e o conjunto de todas as soluções viáveis definem o que é denominado de espaço viável de solução.

2.13 FORMA PADRÃO DE UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Segundo Arora (2005), todo problema de otimização deve possuir uma função objetivo e muitos dos problemas devem satisfazer certas restrições que podem ser de igualdade e/ou de desigualdade. Desta forma, é possível representar a maior parte dos problemas de otimização através de uma forma que é denominada de forma padrão do problema de otimização.

A forma padrão de um problema de otimização é definida como:

Encontrar um vetor das variáveis de projeto $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ que minimize a função objetivo.

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (13).$$

Sujeita as p restrições de igualdade

$$h_j(x) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad j = 1 \text{ até } p \quad (14).$$

E as restrições de desigualdade

$$g_i(x) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad i = 1 \text{ até } m \quad (15).$$

Muitos métodos de otimização no seu desenvolvimento consideram que o problema esteja colocado na forma padrão para poder executar as etapas de

otimização. Essa formulação também é exigida na utilização de softwares de otimização para que este solucione o problema. No presente trabalho, será utilizado essa forma para descrever o problema de otimização estrutural da ferramenta de elevação de unidades de ar condicionado tipo Split.

2.14 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO GRÁFICA

Como já citado anteriormente, é necessário traçar a função objetivo para que se possa fazer a otimização do projeto, e para a otimização gráfica, estes valores são facilmente interpretados na forma de gráficos com apenas duas variáveis.

De acordo com Arora (2005) procedimento de solução gráfica é constituído de seis passos:

- 1) Definição do sistema de coordenadas: O primeiro passo no processo de solução é definir uma origem para o sistema de coordenadas $x - y$ e definir a escala ao longo dos eixos. O intervalo da escala a ser utilizado vai depender dos valores dos contornos das restrições.
- 2) Representação das restrições de desigualdade: Para representar a restrição graficamente, primeiro precisa-se traçar o limite da restrição, ou seja, traçar os pontos que satisfazem a restrição. Para traçar essa função é necessário dois pontos que satisfaçam a equação. A linha entre os dois pontos representa o limite da região viável para a restrição de desigualdade. Os pontos de um lado desta linha irão violar a restrição, enquanto os do outro lado o satisfazem.
- 3) Identificação da região viável para uma desigualdade: A próxima tarefa é determinar qual lado do limite de restrição em questão é viável para a restrição em que um ponto é selecionado de cada lado da reta para avaliar a restrição e identificar qual lado da reta satisfaz as necessidades da otimização. A região viável para a restrição de igualdade é muito menor do que a mesma restrição escrita como uma desigualdade.

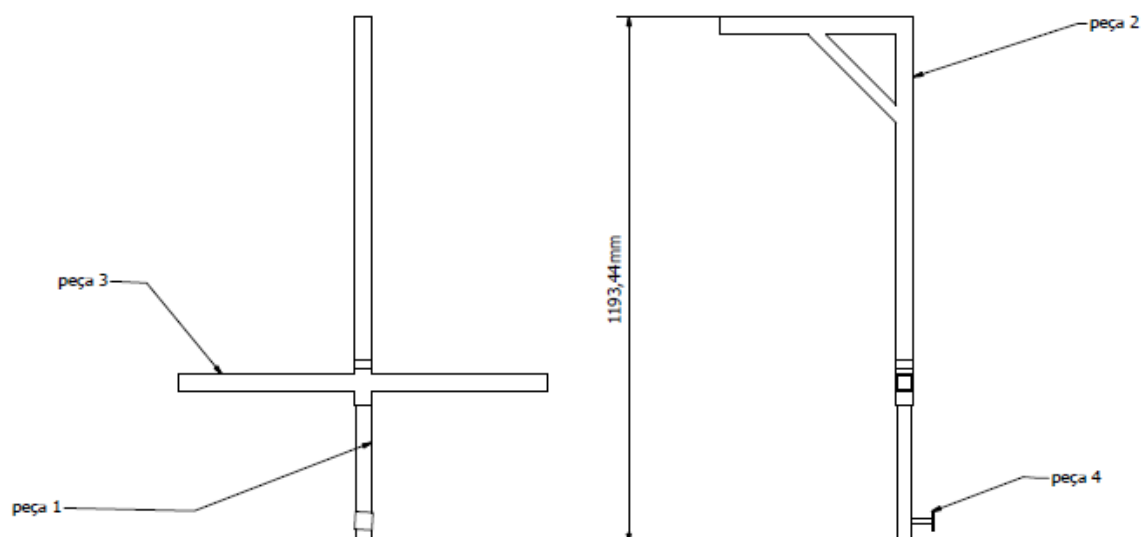
- 4) Identificação da região viável: A interseção de regiões viáveis para todas as restrições fornece a região viável para o problema. Qualquer ponto nesta região ou em seu limite fornece uma solução viável para o problema.
- 5) Representação das curvas da função objetivo: Traçar a função objetivo no gráfico e localizar seus pontos ótimos através do contorno dos pontos indicados como viáveis no gráfico. Um contorno é uma curva no gráfico que conecta todos os pontos com o mesmo valor de função objetivo.
- 6) Identificação da solução ótima: Para localizar um ponto ótimo para a função objetivo, precisa-se de pelo menos dois contornos que passam pela região viável. Pode-se então observar tendências para os valores da função objetivo em diferentes pontos viáveis para localizar o melhor ponto de solução.

3 DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA

3.1 MODELAGEM DO PROBLEMA

Para este trabalho será considerado uma estrutura em aço carbono 1020, de seção retangular vazada, com espessura de parede igual à 3 mm. A ferramenta de elevação de condicionador de ar por inteira é formada de 3 partes principais como descritas na figura 21.

Figura 21 - Partes da ferramenta de elevação de ar condicionado.



Fonte: o próprio autor.

A peça 1 é uma barra que desliza por dentro da peça 2 para que possa haver uma regulagem de altura. Visto que o condicionador de ar sempre será instalado em uma parede. Esta peça também faz o apoio da estrutura contra a parede, para que a ferramenta não possa se movimentar para a frente com a carga que lhe será imposta.

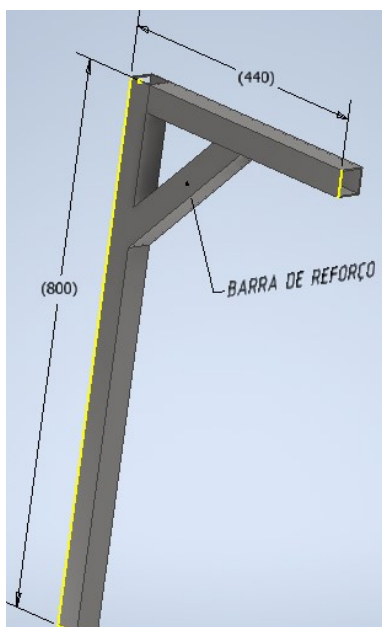
A peça 2 por sua vez é a estrutura que será responsável por suportar a carga do condicionador de ar. Nela é fixado a catraca com cabo de aço que faz o içamento. A junção de sua parte horizontal com a vertical é feita por meio de solda, e ela possui uma barra de reforço entre estas seções.

A peça 3 é uma barra disposta horizontalmente, parafusada na estrutura, com a função de apoiar a ferramenta sobre o suporte do condicionador de ar onde será instalado, para fazer o içamento do mesmo. Esta parte evita que a estrutura se desloque para os lados, finalizando assim a fixação da ferramenta, uma vez que a peça 1 evita que a estrutura se mova para frente, a peça 3 evita que se mova para ambos os lados e a parede e a carga imposta não permitem que a estrutura se mova para trás.

Esta montagem da ferramenta também pode ser observada na figura 4.

A parte superior (horizontal) da estrutura possui um comprimento de 440 mm e um comprimento na parte inferior (vertical) de 800 mm. Será desconsiderado a barra de reforço para a otimização das dimensões da seção transversal da estrutura, que se encontra em um ângulo de 45° , como pode ser visto no desenho criado com o software Autodesk Inventor na Figura 22, tendo visto que sem esta parte o esforço na estrutura é maior ainda.

Figura 22 - Identificação da barra de reforço.



Fonte: o próprio autor.

Os detalhes e dimensões da ferramenta de elevação de ar condicionado, podem ser visualizados no anexo I, além das figuras 4, 18 e 19 dispostas ao longo do texto.

3.2 DEFINIÇÃO DAS CARGAS ATUANTES NA ESTRUTURA

O trabalho em questão trata de uma estrutura desenvolvida para a elevação de unidade condensadora de ar condicionado conforme mostrado anteriormente na figura 4.

Como medida de prevenção, será utilizado um fator de segurança para falha estática adequado para prevenir uma sobre carga devido a uma parada súbita do movimento de elevação, ou até mesmo um pequeno momento de queda livre do equipamento içado, em um instante que o cabo de aço fica com uma volta sobreposta a outra e se desenrola abruptamente. Outro fator que justifica o fator de segurança que será adotado é o fato de que a estrutura analisada possui uma solda, a qual não será inclusa nos testes e resistência mecânica deste trabalho.

Ao analisar as cargas atuantes sobre o sistema de elevação da unidade condensadora, será considerado que a velocidade de içamento, é relativamente baixa, de modo que se pode considerar que a estrutura está submetida a uma carga quase estática, podendo desprezar os efeitos dinâmicos.

Portanto, a única carga atuante no sistema é o próprio peso da unidade condensadora, que pode ser obtida por:

$$W = M_{split} \cdot g \quad (16),$$

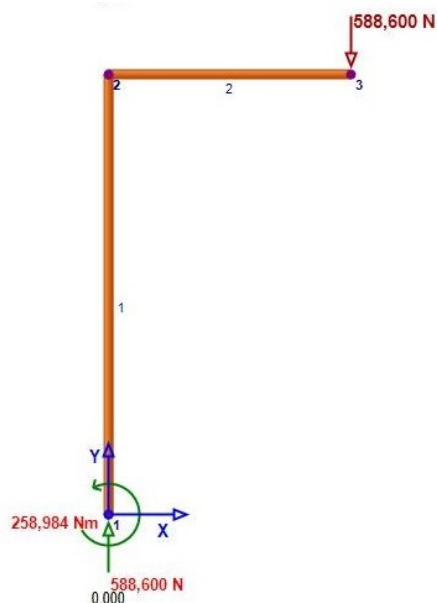
$$W = 60 \cdot 9,81 \quad (17),$$

$$W = 588,6 \text{ N} \quad (18).$$

A estrutura do sistema de elevação é montada fixando-a por meio de fixadores parafusados sobre o suporte da unidade condensadora do ar condicionado que está fixado à parede da construção em que o mesmo será instalado.

A fixação da estrutura também já foi explicada com mais detalhes na seção anterior.

Pode-se considerar que a estrutura está completamente fixada a parede, de modo que três reações devem atuar para impedir qualquer movimento.

Figura 23 - Esforços atuantes na estrutura.

Fonte: o próprio autor.

Ao presente trabalho, será considerado a situação ideal em que a unidade condensadora está perfeitamente alinhada com a vertical, desconsiderando a possibilidade da carga pendular, devido ao vento ou a outro fator externo.

Nesse caso como mostrado na figura 23, criado com 2D Frame Analysis, a componente da reação que atua na direção horizontal será nula.

3.3 SELEÇÃO DO MATERIAL

Foi selecionado como material o aço carbono 1020, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço 1020.

AÇO CARBONO SAE 1020		
	σ_{tr}	420
Tensões de Resistência (MPa)	σ_{cr}	420
	τ_r	320
Tensão de Escoamento na tração (MPa)	σ_{esc}	193
Alongamento (%)	ϵ	26
Massa específica (g/cm ³)	ρ	7,86

Fonte: Gerdau (2003).

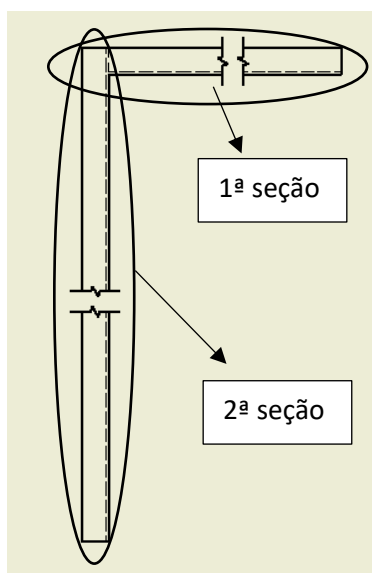
Este material foi escolhido devido a ser um material facilmente encontrado no mercado e não possuir valores elevados. Também é um dos materiais mais usados para execução de projetos como o apresentado no trabalho por possuir boas características mecânicas.

3.4 CÁLCULO DE ESFORÇOS ATUANTES NA ESTRUTURA

Os esforços internos que agem na estrutura de elevação, podem ser conhecidos por meio do método das seções. Na estrutura em análise, é necessário realizar duas seções para poder definir todos valores dos esforços internos desenvolvidos na mesma. A Figura 24, criada com o software Autodesk Inventor mostra essas duas seções que serão utilizadas.

Refere-se como primeira seção hipotética como sendo a seção realizada no elemento horizontal da estrutura analisada e como segunda seção a seção realizada no elemento vertical.

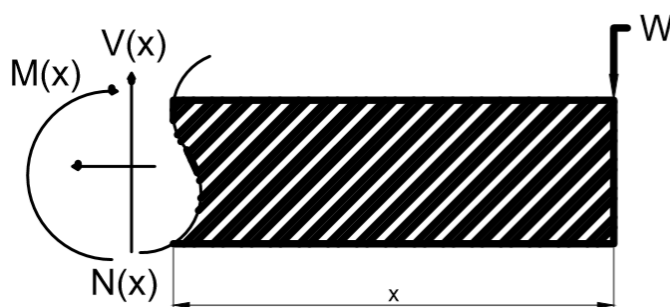
Figura 24 - Seções na determinação dos esforços internos.



Fonte: o próprio autor.

Isolando a parte a ser analisada, e fazendo o diagrama de corpo livre incluído a carga externa W e os esforços internos $N(x)$, $V(x)$ e $M(x)$, que mantém a estrutura em equilíbrio, tem-se a Figura 25 apresentada a seguir.

Figura 25 - Esforços na estrutura seccionada.



Fonte: o próprio autor.

Analisado o diagrama de corpo livre mostrado na figura 25, e aplicando as equações de equilíbrio de somatório de forças em y (vertical/cisalhamento) em que x (distância de um ponto a outro da parte da estrutura analisada) está entre 0 e 0,44 m. Obtém-se:

1ª Seção: $0 \leq x \leq 0,44$ m

$$\sum F_y = 0 \uparrow^+ \quad (19),$$

$$-V(x) - W = 0 \quad (20),$$

$$V(x) = -W \quad (21).$$

Então:

$$V(x) = -588,6 \text{ N} \quad (22).$$

Para a mesma parte da estrutura, pode-se obter o momento fletor $M(x)$, utilizando a equação da somatória de momento em relação ao eixo z , em relação ao ponto O' , definido pela posição x em relação a extremidade direita.

Assim:

$$\sum M, O' = 0 \uparrow^+ \quad (23),$$

$$-W(a - x') - M(x') = 0 \quad (24),$$

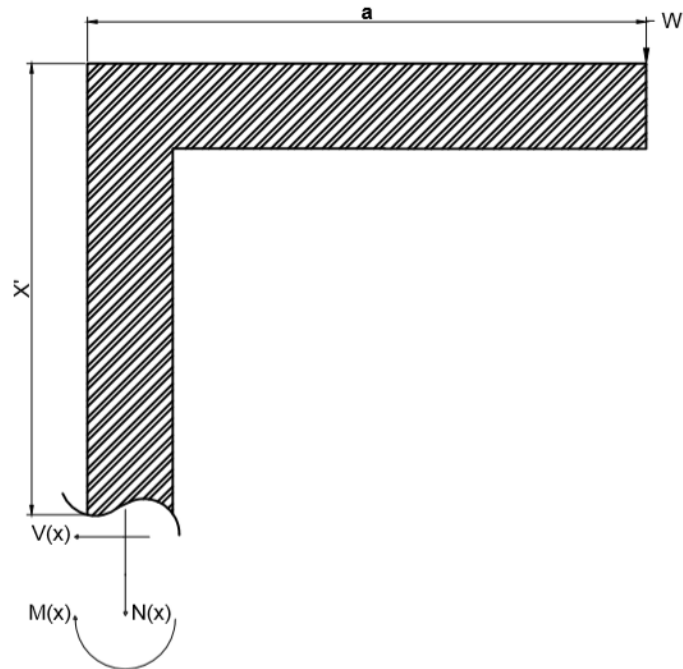
$$M(x') = -W(a - x') \quad (25),$$

$$M(x') = 588,6 (x' - 0,44) \text{ N} \cdot \text{m} \quad (26).$$

Em seguida, é analisada a segunda seção hipotética feito na parte vertical da estrutura analisada. Para esta seção, será utilizado um sistema de

coordenadas x' (na direção vertical), conforme mostrado no diagrama de corpo livre apresentado na Figura 26 a seguir:

Figura 26-Esforços na estrutura seccionada.



Fonte: o próprio autor.

A segunda seção está localizada por x' entre 0 e 0,8 m. Aplicando as equações de equilíbrio na direção de x' obtém-se:

2ª Seção $0 \leq x' \leq 0,8$ m

$$\sum F_{x'} = 0 \uparrow^+ \quad (27),$$

$$-W - N(x') = 0 \quad (28),$$

$$N(x') = -W \quad (29),$$

Então:

$$N(x') = -588,6 \text{ N} \quad (30).$$

Aplicando a equação de equilíbrio na direção y' , como não tem-se forças atuantes nessa direção, obtém-se:

$$\sum F_{y''} = 0 \uparrow^+ \quad (31),$$

$$V(x'') = 0 \text{ N} \quad (32),$$

aplicando a equação de equilíbrio de momento entorno do ponto o'' , a somatória de momento resulta em:

$$\sum M, o'' = 0 \quad \text{(33),}$$

$$-W \cdot 0,44 - M(x'') = 0 \quad \text{(34),}$$

$$M(x'') = -0,44 \cdot W \quad \text{(35).}$$

Então:

$$M(0,4) = -0,44 * 588,6 \quad \text{(36),}$$

$$M(0,4) = -0,44 * 588,6 \quad \text{(37),}$$

$$M(0,4) = -258,98 \text{ N} \quad \text{(38),}$$

$$M = -258,98 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{(39).}$$

Com isso, obtém-se o valor indicado na equação 34 para o momento fletor na segunda seção.

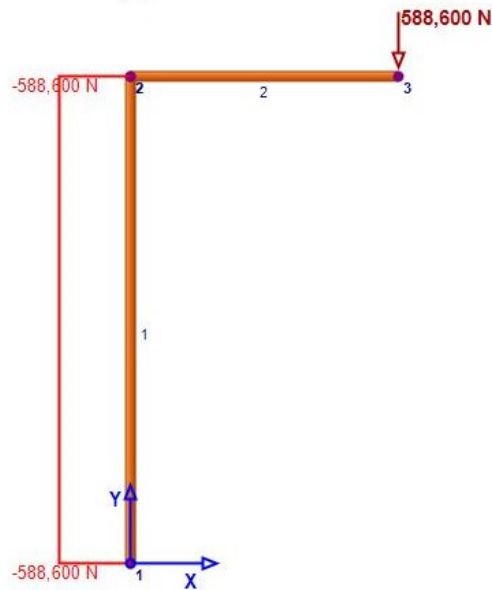
3.5 DIAGRAMA DE ESFORÇOS INTERNOS

Os diagramas de esforços internos, são a representação gráfica da maneira que cada um dos esforços varia ao longo da estrutura. A análise dos diagramas é uma etapa fundamental, sendo necessária para definir em que ponto da estrutura estão atuando os maiores esforços caracterizando o ponto crítico da estrutura.

Nas Figuras 27, 28 e 29, são apresentados respectivamente os diagramas de esforços: normal $N(x)$, cortante $V(x)$ e momento fletor $M(x)$.

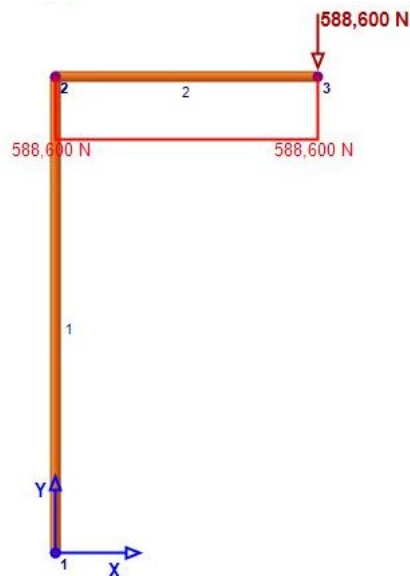
Na figura 27, é observado no diagrama de esforço normal criado com o software 2D Frame Analysis, o esforço normal nulo na primeira seção e constante na segunda apresentando um valor de -588,60 N.

Figura 27 – Diagrama de esforço normal ao longo da estrutura.



Fonte: criado com 2D Frame Analysis.

Figura 28 - Diagrama de esforço cortante ao longo da estrutura.



Fonte: criado com 2D Frame Analysis.

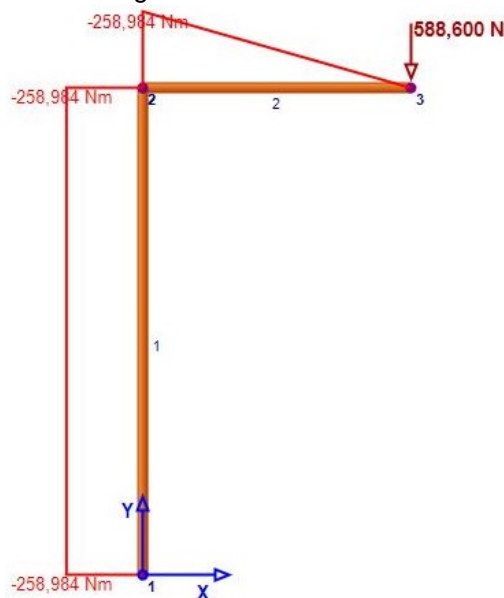
Na figura 28, é observado no diagrama de esforço cortante criado com o mesmo software, que este esforço é nulo na segunda seção e constante na primeira, apresentando um valor de 588,6 N.

Analisando diagrama de Momento Fletor, na figura 29, pode-se concluir que este esforço é constante na segunda seção, e varia de forma linear tendo o seu máximo no fim da primeira seção, ou seja, no ponto em que ocorre a mudança de direção. Portanto:

$$V_{\max} = -588,6 \text{ N} \quad (40),$$

$$M_{\max} = -258,98 \text{ N.m} \quad (41).$$

Figura 29 – Diagrama de Momento Fletor.



Fonte: criado com 2D Frame Analysis.

Assim, na primeira seção os valores máximos dos esforços estão localizados na coordenada $x = 0,44 \text{ m}$, que é o local onde se unem as duas seções, e como pode ser observado na figura 29, o valor máximo do esforço de momento fletor (M) está localizado a $0,44 \text{ m}$ da posição da carga, e o esforço de cisalhamento (V) é constante por toda a primeira seção.

3.6 ANÁLISE DE TENSÃO ATUANTE NA ESTRUTURA

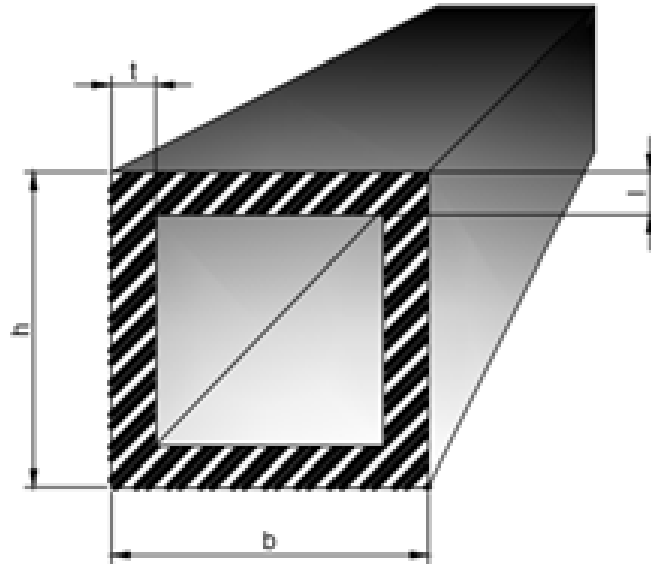
Após a definição dos valores máximos dos esforços e da localização em que elas ocorrem, pode-se determinar quais são as tensões atuantes e qual a intensidade máxima que essa estrutura será submetida.

Na primeira seção, temos dois tipos de tensão atuantes. Uma tensão normal associada ao momento fletor atuante nessa seção, e uma tensão de cisalhamento associada a força cortante.

Na segunda seção, ambos os esforços não nulos, o esforço normal e o momento fletor produzem componentes de tensão normal que se superpõem.

Tanto a tensão normal e de cisalhamento dependem diretamente das propriedades geométricas da seção, como a área (A), do momento de inércia (I) e do primeiro momento de área (Q).

Figura 30 – Área do tubo.



Fonte: criado com Autodesk.

Para que se possa realizar o cálculo das tensões, deve-se primeiro determinar a área da seção transversal. Foi escolhido utilizar um perfil tubular retangular de parede fina, por ter alta rigidez e baixo peso. A Figura 30 mostra os parâmetros característico desse tipo de perfil.

3.6.1 Área da seção transversal de um tubo retangular

Como mostrado na Figura 30, a área da seção transversal é obtida pela área total do retângulo formado pelas dimensões externas e subtraindo a área vazada formada pelas dimensões internas, desta forma a área da seção desse perfil em função dos parâmetros característico é dada por:

$$A = b \cdot h - [h - 2t] \cdot [b - 2t] \quad (3942),$$

$$A = b \cdot h - [bh - 2th - 2tb + 4t^2] \quad (4043),$$

$$A = b \cdot h - [6h - 2t[h + 6] + 4t^2] \quad (4144),$$

$$A = 2t [h + b] - 4t^2 \quad (425).$$

A espessura dos tubos é padronizada comercialmente variando apenas a largura é a altura do perfil, sendo os tubos de espessura $t = 3 \text{ mm}$ comumente disponíveis no comércio local. Assim, a área de seção transversal será dado por:

$$A = 2 * 0,003 (h + b) - 4 * 0,003^2 \quad (46),$$

$$A = 6 \cdot 10^{-3} (h + b) - 3,6 \cdot 10^{-5} \quad (47).$$

3.6.2 Momento da Inércia

O momento de inércia é obtido calculando-se o momento de inércia da seção retangular formada pelas dimensões externas menos o momento de inércia da seção vazada, definida pelas dimensões internas.

Assim, o momento de inércia em relação ao eixo z , eixo horizontal da seção transversal, obtém-se:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b-2t).(h-2t)^3}{12} \quad (48).$$

Substituindo o valor da espessura $t = 3 \text{ mm}$, obtém-se:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b-0,006).(h-0,006)^3}{12} \quad (49).$$

O momento de inércia em relação ao eixo y , eixo vertical da seção transversal, obtém-se:

$$I_y = \frac{hb^3}{12} - \frac{(h-2t).(b-2t)^3}{12} \quad (50).$$

Substituindo o valor da espessura $t = 3 \text{ mm}$, obtém-se:

$$I_y = \frac{hb^3}{12} - \frac{(h-0,006).(b-0,006)^3}{12} \quad (51).$$

3.6.3 Primeiro momento de área

O primeiro momento de área em relação ao eixo z (Q_z), pode ser obtido pelo produto da área da seção transversal (A) e a coordenada do centroide (\bar{y}) da área superior a linha central, da seguinte forma:

$$Q_z = A * \bar{y} \quad (52),$$

$$1. Q_z = 2 * \left[t \cdot \left(\frac{h}{2} - t \right) \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{2} - t \right) + b \cdot t \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right) \quad (4853),$$

$$2. Q_z = t \cdot \left(\frac{h}{2} - t \right)^2 + \frac{b \cdot t}{2} \cdot (h - t) \quad (4954).$$

Substituindo o valor da espessura, obtém-se:

$$Q_z = 0,003 \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,003 \right]^2 + \frac{b \cdot 0,003}{2} \cdot (h - 0,003) \quad (5055).$$

3.6.4 Tensões máximas

Pela análise do diagrama de esforços internos, observa-se que os maiores esforços ocorrem na segunda seção, que corresponde ao elemento vertical da estrutura. Esse elemento possui duas regiões críticas na sua seção transversal. A primeira região é a superfície inferior localizada na coordenada $y = c = -h/2$. Nessa região a tensão normal pelo esforço axial e a tensão de flexão são ambas compressivas somando-se para produzirem um nível de tensão normal máximo dado por:

$$\sigma_{xx}^{sup} = \frac{N_{max}}{A} - \frac{M_{max} c}{I_z} \quad (5156),$$

Substituindo os valores de N_{max} , M_{max} e as expressões para área A e o momento de inércia I , definidas anteriormente, obtém-se a seguinte expressão para σ_{xx}^{max} dada por:

$$\sigma_{xx}^{sup} = \frac{-588,6}{6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}} - \frac{(-258,98) \left(-\frac{h}{2} \right)}{\frac{bh^3}{12} - \frac{(b-0,006) \cdot (h-0,006)^3}{12}} \quad (57),$$

Nessa região a tensão de cisalhamento $\tau_{xy}^{sup} = 0$, uma vez que a superfície é livre de tensão.

Na linha central ou eixo neutro, age sobre a seção uma tensão compressiva provocada pela força axial, expressa por:

$$\sigma_{xx}^{cent} = \frac{-588,6}{6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}} \quad (538),$$

Observa-se que essa tensão normal compressiva é menor que a tensão normal máxima. No entanto, sobre a linha central age a uma tensão de cisalhamento que é máxima, definida por:

$$\tau_{xy}^{cent} = \frac{VQ_z}{I_z \cdot t} = - \frac{-588,6 \cdot \left(0,003 \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,003 \right]^2 + \frac{b \cdot 0,003}{2} \cdot (h - 0,003) \right)}{\left(\frac{bh^3}{12} - \frac{(b-0,006) \cdot (h-0,006)^3}{12} \right) \cdot (0,006)} \quad (549).$$

3.7 VERIFICAÇÃO DA FALHA ESTÁTICA

Para garantir que o peso da unidade condensadora possa ser suportado com segurança, é preciso evitar a falha estática da estrutura de suporte.

O material selecionado foi o aço carbono 1020, sendo este um material que possui comportamento dúctil, a teoria de falha estática da máxima energia de distorção também conhecida por teoria de falha estática de Von Mises, que é a teoria mais empregada para prever a falha estática de materiais dúcteis.

Como discutido na seção anterior, na seção crítica existe duas regiões com níveis de tensão que podem ocasionar a falha estática. Desta forma será explorado o coeficiente de segurança pelo critério de falha estática de Von Mises nessas duas regiões.

Na região da superfície inferior o coeficiente de segurança para o critério de falha estática, é obtido por:

$$\sigma_{VM}^{sup} \leq \frac{\sigma_{esc}}{n} \quad (5560).$$

A tensão de Von Mises na superfície inferior é dada por:

$$\sigma_{VM}^{sup} = \sqrt{(\sigma_{xx}^{sup})^2 + 3 (\tau_{xy}^{sup})^2} \quad (5661),$$

$$\sigma_{VM}^{sup} = \sqrt{(\sigma_{xx}^{sup})^2 + 3 (0)^2} = \sigma_{xx}^{sup} \quad (5762),$$

substituindo o resultado da equação (57)60 na equação (55)8, obtém-se:

$$\sigma_{xx}^{sup} \leq \frac{\sigma_{esc}}{n} \quad (63).$$

Substituindo a equação (52)5 na equação (58)61 obtém-se a equação do coeficiente de segurança para a região superfície inferior, dada pela seguinte expressão:

$$\frac{-588,6}{6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}} - \frac{(-258,98) \left(-\frac{h}{2}\right)}{\frac{bh^3}{12} - \frac{(b-0,006) \cdot (h-0,006)^3}{12}} \leq \frac{\sigma_{esc}}{n} \quad (64).$$

Na região central ou eixo neutro, o coeficiente de segurança para o critério de falha estática, é obtido por:

$$\sigma_{VM}^{cent} \leq \frac{\sigma_{esc}}{n} \quad (65).$$

A tensão de Von Mises na região central é dada por:

$$\sigma_{VM}^{cent} = \sqrt{(\sigma_{xx}^{cent})^2 + 3 (\tau_{xy}^{cent})^2} \quad (66),$$

aplicando o quadrado em ambos os lados da expressão (61)64, em seguida substituindo a equação (60)61, obtém-se:

$$(\sigma_{xx}^{cent})^2 + 3 (\tau_{xy}^{cent})^2 \leq \frac{\sigma_{esc}^2}{n^2} \quad (67),$$

substituindo as equações (53)6 e (54)7 na equação (62)65 obtém-se a equação da teoria de falha de Von Mises para a região central, dada pela seguinte expressão:

$$\left(\frac{-588,6}{6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}} \right)^2 + 3 \left(\frac{-588,6 \cdot \left(0,003 \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,003 \right]^2 + \frac{b \cdot 0,003}{2} \cdot (h-0,003) \right)}{\left(\frac{bh^3}{12} - \frac{(b-0,006) \cdot (h-0,006)^3}{12} \right) \cdot (0,006)} \right)^2 \leq \frac{\sigma_{esc}^2}{n^2} \quad (68).$$

essa equação representa restrição de falha estática por Von-Mises e de ser satisfeita para que a falha não aconteça.

3.8

deve-se garantir que a aplicada P_{adm} seja admissível. Assim, utilizando a relação desenvolvida na expressão (9) e assumindo um coeficiente de segurança para flambagem n_F , obtém-se:

$$n_F \geq \frac{P_{adm}}{P} \quad (69).$$

substituindo P_{adm} pela expressão (8), obtém a equação que representa a restrição para que a flambagem não aconteça: $n_F \geq$

$$\frac{\sigma_{esc} A}{P \left[1 + \frac{e c}{r^2} \sec \left(\frac{L_e}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right]} \quad (70).$$

Rearranjando a equação para que a desigualdade seja do tipo menor igual, obtém-se:

$$\frac{\sigma_{esc} A}{P \left[1 + \frac{e c}{r^2} \sec \left(\frac{L_e}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right]} - n_F \leq 0 \quad (71).$$

A equação anterior deve ser atendida para que a carga compressiva P não provoque colapso por flambagem da estrutura.

Na equação (71) a área da seção transversal é definida pela equação (47). O módulo de elasticidade para aço 1020 é igual a $E = 200 \text{ GPa}$ que é o valor médio encontrado para os aços de baixo carbono. A excentricidade (e) é a distância de aplicação da carga W até o centroide da seção do elemento vertical, que corresponde ao comprimento do braço horizontal **0,44 m**, como mostrado na figura 21. O comprimento efetivo $L_e = K L$, considerando que o elemento vertical da estrutura de suporte está fixo na sua base e livre da outra extremidade, conforme definido a figura 12, $K = 2$, o comprimento do elemento vertical é igual à $L = 0,8$, como mostrado na figura 21. A distância $c = h/2$ e o menor raio de giração da seção ocorre em relação ao eixo y , de modo que $r_y = I_y/A$. Assim substituindo todas esses parâmetros na equação (71) obtém-se:

$$\frac{193 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}}{588,6 \left[1 + \frac{0,44 h}{2 \left[\frac{hb^3 - (h-2t)(b-2t)^3}{12 (6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5})} \right]} \right]^{2 \sec} \left(\frac{0,8}{\left[\frac{hb^3 - (h-2t)(b-2t)^3}{12 (6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5})} \right]} \sqrt{\frac{588,6}{200 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}}} \right)} - n_F \leq 0 \quad (72)$$

3.9 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

No presente trabalho, a otimização estrutural será utilizada para determinar as dimensões da seção transversal do perfil, ou seja, a altura (h) e a largura (b) com objetivo para a redução de massa da estrutura. Isto é possível quando se conhece a densidade do material da estrutura, a carga a ser suportada, e combina essas informações com o dimensionamento adequado das medidas até um ponto que haja um coeficiente de segurança que satisfaça a necessidade do projeto, garantindo que a estrutura seja segura para suportar uma carga pré-determinada sem o risco do rompimento da mesma.

Também é necessário conhecer as regiões onde as tensões têm seus níveis críticos sobre a estrutura, o que é possível com os diagramas e posteriormente aplicado, juntamente com as medidas da área e momento de inercia, onde se aplica a teoria de falha estática da máxima energia de distorção também conhecida por teoria de falha estática de Von Mises.

3.9.1 Função objetivo

Tem-se como função objetivo a *redução de massa* da estrutura até um ponto seguro que ela possa suportar a carga a ela imposta.

A expressão para se chegar a massa da estrutura é representada pela seguinte equação:

$$M_{est} = \rho_{aço} \cdot A \cdot L = \rho_{aço} \cdot L \cdot 2t[h + b] - 4t^2 \quad (643),$$

substituindo a massa específica do aço $\rho_{aço} = 7860 \text{ kg/m}^3$, o comprimento da estrutura que é igual a $L = 0,44 + 0,8 = 1,24 \text{ m}$, e a espessura de parede do

perfil definida anteriormente sendo igual a $t = 3 \text{ mm}$. Resultando na seguinte equação:

$$M_{est} = \rho_{aço} \cdot A \cdot L = 7860 * 1,24 * 2 * [h + b] - 4(0,003)^2 \quad (6574),$$

$$M_{est} = \rho_{aço} \cdot A \cdot L = 1,9493 \cdot 10^4 * [h + b] - 3,6 \cdot 10^{-5} \quad (6675).$$

3.9.2 Restrições

Para que possa executar o trabalho ao qual foi proposto, a estrutura deve suportar o peso do ar condicionado, que é de 60 kg, que resulta em um esforço normal de 588,6 N, conseqüentemente, deve resistir a um momento fletor de 235,4 N. m no seu ponto crítico.

Esses esforços produzem o nível de tensão normal, na região superior da seção, crítica definido pela expressão (527) e o nível de tensão de cisalhamento nessa mesma região é igual a zero.

Para que a estrutura suporte o peso do ar condicionado de forma satisfatório e com segurança, a falha estática deve ser evitada. A teoria de falha de Von Mises, foi aplicada para os níveis de tensão na região superior obtendo a expressão (5968).

Será substituindo o valor da tensão de escoamento em compressão

$\sigma_{esc} = -193 \text{ MPa}$, definida na Tabela 1, e utilizando um coeficiente de segurança para falha estática igual $n = 2,5$. Esse valor foi definido devido a consideração de que pode haver uma carga súbita devido ao travamento do sistema de elevação, provocando uma parada súbita da unidade condensadora.

Assim, obtém-se a equação de restrição de tensão da parte superior do perfil dada por:

$$\frac{-588,6}{6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}} - \frac{(-258,98) \left(-\frac{h}{2}\right)}{\frac{bh^3}{12} - \frac{(b-0,006) \cdot (h-0,006)^3}{12}} + \frac{193 \cdot 10^6}{2,5} \leq 0 \quad (76).$$

As tensões produzidas na região central da seção, para esse tipo de estrutura são menores que as tensões produzidas na região superior. Desta

forma considerou-se a tensão da região superior como a restrição de tensão mais influente para a solução do problema.

Porém, é necessário após obter as dimensões ótimas verificar qual será o coeficiente de segurança para o cisalhamento utilizando estas dimensões encontradas de forma a garantir que a falha por cisalhamento não irá acontecer na região central também.

Para validade dessa consideração deve-se ter o cuidado de atender ao requisito dimensional definido como limite aceitável da teoria do cisalhamento transversal para seções retangulares sólidas conforme definido por Craig Jr (2003) através da equação:

$$b \leq \frac{h}{2} \quad (77).$$

Porém, como nosso perfil é tubular e não sólido, utilizaremos um valor um pouco inferior a ao indicado, utilizando:

$$b \leq \frac{h}{2,5} \quad \text{ou} \quad 2,5 b - h \leq 0 \quad (78).$$

A largura b e a altura h do perfil possuem restrições dimensionais. A primeira restrição dimensional é que não pode existir área de seção transversal nula. Desta forma para que a área não seja nula tanto a largura b e a altura h devem atender as seguintes equações:

$$h \geq 2 t \quad \text{ou} \quad 2 t - h \leq 0 \quad (79),$$

$$b \geq 2 t \quad \text{ou} \quad 2 t - b \leq 0 \quad (71) \quad (80).$$

substituindo o valor da espessura de parede do perfil definida anteriormente sendo igual a $t = 3 \text{ mm}$ tem-se a seguinte equação:

$$2 * 0,003 - h \leq 0 \quad (81),$$

$$2 * 0,003 - b \leq 0 \quad (82).$$

A outra restrição dimensional para a largura b e a altura h , é o limite superior que essas dimensões pode ter, por questões de limitações das dimensões dos perfis comercializados, optou-se por limitar a largura b e a altura h em 150 mm. Essas, restrições são definidas pelas seguintes equações:

$$h \leq 0,15 \quad \text{ou} \quad h - 0,15 \leq 0 \quad (83),$$

$$b \leq 0,15 \quad \text{ou} \quad b - 0,15 \leq 0 \quad (84).$$

Por fim, para evitar o colapso por flambagem, a equação (71) deve ser satisfeita. Substituindo o valor da tensão de escoamento $\sigma_{esc} = -193 \text{ MPa}$, definida na Tabela 1, a carga compressiva P é igual ao valor da carga de compressão aplicada W e admitindo que o coeficiente de segurança para flambagem deve ser maior ou igual à 1,25, que é o valor mínimo recomendado para projetos otimizados, conforme explicado na seção 2.10, obtém-se a seguinte equação para a restrição de flambagem:

$$\frac{193 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}}{588,6 \left[1 + \frac{0,44 h}{2 \cdot \left[\frac{hb^3 - (h-2t) \cdot (b-2t)^3}{12 (6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5})} \right]} \right]^{2 \cdot sec} \left(\frac{0,8}{\left[\frac{hb^3 - (h-2t) \cdot (b-2t)^3}{12 (6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5})} \right]} \sqrt{\frac{588,6}{200 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}}} \right)} - n_F \leq 0 \quad (85)$$

Todas as restrições envolvidas neste problema de otimização estrutural do perfil da seção transversal são do tipo de desigualdade, como pode ser observado pelas equações anteriores.

3.9.3 Forma padrão do problema de otimização.

Após as definições das variáveis de projeto, da função objetivo e das restrições, pode-se definir a forma padrão do problema de otimização estrutural do perfil do suporte de elevação.

A forma padrão é dada pela seguinte forma:

Encontrar um vetor das variáveis de projeto $x = (b, h)$ que minimize a função objetivo.

$$f(x) = M_{est} = 1,9493 \cdot 10^4 * [h + b] - 3,6 \cdot 10^{-5} \quad (86),$$

sujeita as restrições de desigualdades:

$$g_1(x) = \frac{-588,6}{6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}} - \frac{(-258,98) \cdot (-h/2)}{\frac{bh^3}{12} \cdot \frac{(b-0,006) \cdot (h-0,006)^3}{12}} + \frac{193 \cdot 10^6}{2,5} \leq 0 \quad (7787),$$

$$g_2(x) = 2,5 b - h \leq 0 \quad (88),$$

$$g_3(x) = 0,006 - h \leq 0 \quad (89),$$

$$g_4(x) = 0,006 - b \leq 0 \quad (90),$$

$$g_5(x) = h - 0,15 \leq 0 \quad (91),$$

$$g_6(x) = b - 0,15 \leq 0 \quad (92).$$

$$g_7(x) = \frac{193 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}}{588,6 \left[1 + \frac{0,44 h}{2 \left[\frac{hb^3 - (h-2t)(b-2t)^3}{12 (6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5})} \right]^2} \operatorname{sec} \left(\frac{0,8}{\left[\frac{hb^3 - (h-2t)(b-2t)^3}{12 (6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5})} \right]} \sqrt{\frac{588,6}{200 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-3} (h+b) - 3,6 \cdot 10^{-5}}} \right)} \right]} - n_F \leq 0 \quad (93).$$

Após o problema estar em sua forma padrão pode-se utilizar diferentes métodos de otimização para solucionar o problema e encontrar a solução ótima.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas próximas seções deste capítulo, a solução é obtida utilizando a otimização gráfica. O processo de otimização gráfica foi realizado com o auxílio do software Free MATLAB Trial. Após a determinação das dimensões ótimas, foi realizada uma verificação utilizando o software ANSYS Academic para analisar as tensões, permitindo assegurar que as dimensões obtidas para estrutura simplificada possam ser empregadas na fabricação da estrutura real do sistema de elevação.

4.1 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO GRÁFICA

O objetivo dessa otimização estrutural é redução da massa, como definido anteriormente, dessa forma deseja-se obter os valores de largura b e da altura h que satisfazem todas as restrições e possuem a menor massa possível.

Como o problema apresenta apenas duas variáveis de projeto, o método de otimização gráfica pode ser empregado por ser um método fácil de obter a solução. O processo de otimização foi realizado com o auxílio do Free MATLAB Trial.

Para que se obter a solução ótima pelo método gráfico, foi seguido um procedimento que será descrito nas seções a seguir.

4.1.1 Definição das coordenadas

Como trata-se de um método de solução gráfica, é necessário um plano cartesiano, onde se represente no eixo horizontal a variável x , que no trabalho em questão trata da medida da largura (b) do perfil do tubo retangular, e no eixo vertical a variável y , para representar a altura (h) do perfil do tubo usado no projeto em questão.

Deve-se escolher um intervalo na escala que compreenda os valores mínimos e máximos apresentados pelos contornos das restrições citadas nas equações 899091, 92, 81, 82, que demonstram respectivamente os limites inferiores e superiores para altura (h) e largura (b). Sendo o valor mínimo de 0,006 mm e o valor máximo de 150 mm para ambos as dimensões.

Tendo visto isso, tem-se a definição das coordenadas para se iniciar a representação gráfica do processo de otimização.

4.1.2 Representação das restrições de desigualdade

Para tornar possível a representação gráfica, foram identificados valores que satisfaziam a equação como uma igualdade, que podem ser observados na Tabela 2. Para tal, foi considerado o maior valor admissível da restrição da Equação 7888, que é 0 (zero).

Partindo do maior para o menor valor possível para b , que representa a largura do tubo a ser utilizado, obtém-se os valores de h através da equação $2,5 b - h = 0$. Essa equação é a equação de restrição da tensão de cisalhamento.

Também deve ser respeitado a restrição de medidas máximas e mínimas do perfil de comercialização do tubo anteriormente definidos na seção das restrições (3.8.2).

Pode-se verificar através da Tabela 2, criada com Microsoft Excel, que os valores viáveis para as restrições estão compreendidos na parte verde da tabela por serem valores que respeitam a restrição solicitada (≤ 0), enquanto os valores da parte vermelha não atendem tal solicitação por apresentarem valor ≥ 0 para a restrição em questão. Ainda pode-se observar na parte azul da tabela 2 os valores que representa o limite da restrição, onde o resultado encontrado é admissível, que é 0 (zero).

Tabela 2- Restrição de igualdade

PONTO	$h(y)$	$b(x)$	$2,5*b-h$	REGIÃO
1	0,15	0,003	-0,143	viável
	0,15	0,06	0	restrição
	0,15	0,061	0,003	inviável
2	0,101	0,039	-0,004	viável
	0,101	0,0405	0	restrição
	0,101	0,041	0,002	inviável
3	0,056	0,021	-0,004	viável
	0,056	0,0225	0	restrição
	0,056	0,023	0,001	inviável
4	0,015	0,005	-0,003	viável
	0,015	0,006	0	restrição
	0,015	0,007	0,003	inviável

Fonte: o próprio autor

O perfil possui restrições dimensionais, que diz que a área de seção transversal não pode ser nula. Desta forma, as variáveis devem atender as equações 7991 e 8092 que dizem que a altura (h) e a largura (b) do perfil tubular deve ser maior ou igual ao dobro da espessura do mesmo. Graficamente a restrição de igualdade dessas duas restrições são representadas pela reta horizontal $h = 0,006 \text{ mm}$ e pela reta vertical $b = 0,006 \text{ mm}$.

Em termos práticos, os valores da altura (h) e a largura (b) que pode ser atribuída também é limitada, em virtude dos tamanhos padrões ao qual os perfis são produzidos comercialmente. Essas limitações são descritas pelas equações 8189 e 8290 e são representadas graficamente pelas retas horizontal $h = 0,015 \text{ mm}$ e pela reta vertical $b = 0,015 \text{ mm}$.

A restrição que previne a falha estática é dada pela equação 7787, a igualdade dessa restrição é representada graficamente por uma linha curva. Essa restrição é identificada como restrição de tensão.

A restrição que representa a prevenção da falha por flambagem é dada pela equação 93, a igualdade dessa restrição é representada graficamente por uma linha curva. Essa restrição é identificada como restrição de flambagem.

4.1.3 Identificação da região viável para uma desigualdade

Esta região é facilmente identificada quando se observa a Tabela 2 e vê-se os pontos que satisfazem a restrição. Assim, os valores para b menor que 0,006 e h menor que 0,015 não satisfazem a restrição pois apresentam valores para a equação 83 ($2,5 b - h \leq 0$) maior que zero, ou não respeitam o limite de comercialização do tubo.

4.1.4 Identificação da região viável

A região viável é identificada pelos pontos que satisfazem todas as restrições, ou seja, deve-se levar em consideração além das restrições de dimensionais, a restrição de cisalhamento e a restrição de tensão.

A região viável é delimitada pelas intersecções dos contornos das restrições quando estas possuem o valor igual à zero. Essa interseção é identificada no gráfico como região viável, é nessa região que se encontra o ponto ótimo para o problema. Esse ponto ótimo é encontrado pela inspeção gráfica observando comportamento da função objetivo.

4.1.5 Representação curvas da função objetivo

A função objetivo é o peso final da estrutura, que deve ser o mínimo possível. Para que se possa localizar o ponto ótimo, será traçado no gráfico as curvas de nível que representam todos os pontos que possuem o mesmo valor da função objetivo.

A função objetivo é definida pela equação 7681, que é a equação de uma reta. Assim, as representações das curvas de nível no gráfico serão retas com diferentes valores. Para facilitar a visualização, cada curva de nível possui uma cor que é definida através da interpolação do valor dentro da escala de cor definida.

4.1.6 Identificação da solução ótima

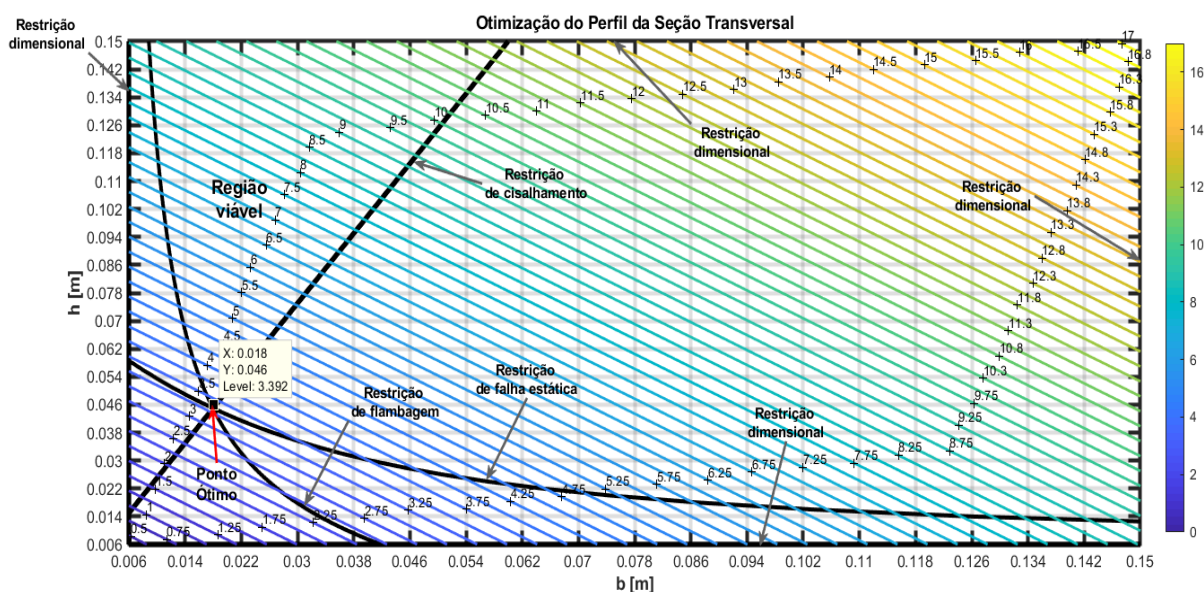
Para que se possa observar tendências para os valores da função objetivo em diferentes pontos viáveis e localizar o melhor ponto de solução, é necessário que existam dois contornos que passem pela região viável para encontrar um ponto ótimo da função objetivo.

Estes valores são encontrados no gráfico da solução no momento em que as coordenadas b e h cruzam a linha de restrição do cisalhamento, a curva de restrição de tensão e a curva de restrição de flambagem, indicando o ponto ótimo da solução, onde tem-se o menor peso e garante-se que a estrutura não irá falhar, atendendo a limitação dimensional para que a hipótese da tensão de cisalhamento seja válida.

4.2 SOLUÇÃO GRÁFICA

Aplicando as etapas descritas anteriormente para o obter a solução ótima, o resultado é o gráfico apresentado na figura 29 a seguir:

Figura 31 – Representação gráfica do problema de otimização.



Pela análise da figura 31, observa-se que a solução ótima é definida pelo encontro entre a restrição de falha por tensão - denominada de restrição de tensão, pela restrição de falha por flambagem - restrição de flambagem e pela a restrição de validade da hipótese da equação de cisalhamento, - denominada de restrição de cisalhamento. O ponto ótimo está assinalado no gráfico como o ponto que possui o valor largura $b = 0,018 m$ e altura $h = 0,046 m$ do perfil tubular da seção. Essa combinação de valores de largura e altura alcança uma massa igual à $M_{est} = 3,34kg$.

4.3 VERIFICAÇÃO DE FALHA PELO CISALHAMENTO NO PONTO ÓTIMO

Conforme definido na seção 3.8.2, é necessário após obter as dimensões ótimas verificar qual será o coeficiente de segurança para o cisalhamento utilizando estas dimensões encontradas de forma a garantir que a falha por cisalhamento não irá acontecer na região central.

Substituindo os valores ótimo da largura $b = 0,018 m$ e altura $h = 0,045 m$ na equação do coeficiente de segurança na região central dada pela equação 62, e os valores da tensão de escoamento igual à $\sigma_{esc} = 193 MPa$, obtém-se:

$$\left(\frac{-588,6}{6 \cdot 10^{-3} (0,018 + 0,046) - 3,6 \cdot 10^{-5}} \right)^2 + 3 \left(\frac{-588,6 \cdot \left(0,003 \cdot \left[\frac{0,046}{2} - 0,003 \right]^2 + \frac{0,018 \cdot 0,003}{2} \cdot (0,046 - 0,003) \right)}{\left(\frac{0,018 (0,046)^3}{12} - \frac{(0,018 - 0,006) \cdot (0,046 - 0,006)^3}{12} \right) \cdot (0,006)} \right)^2 \leq \frac{(193 \cdot 10^6)^2}{n^2} \quad (94).$$

Trabalhando com a igualdade da equação anterior e isolando o coeficiente de segurança n , obtém-se:

$$(-2,97273 \cdot 10^6)^2 + 3 \left(\frac{-1,33892 \cdot 10^{-3}}{4,642211 \cdot 10^{-10}} \right)^2 = \frac{(193 \cdot 10^6)^2}{n^2} \quad (95),$$

$$n^2 = \frac{(193 \cdot 10^6)^2}{(-2,97273 \cdot 10^6)^2 + 3(-1,44215 \cdot 10^6)^2} \quad (96),$$

$$n = \sqrt{\frac{(193 \cdot 10^6)^2}{(-2,97273 \cdot 10^6)^2 + 3(-2,884291 \cdot 10^6)^2}} = 46,686 \quad (97).$$

Dessa forma fica comprovado que a estrutura não irá falhar na região central também.

4.4 VERIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO ÓTIMA UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS

Uma vez obtida as dimensões ótimas através das equações analíticas da resistência dos materiais, que fazem hipóteses simplificadoras, trazendo divergências com a realidade, será certificado que essas diferenças encontradas não irão provocar alterações significativas utilizado o software ANSYS Academic, módulo Workbench, selecionando a opção de análise static estrutural.

Para a realização da simulação, o modelo em CAD foi importado para o software, em seguida a malha (*mesh do inglês*), foi gerada com as configurações padrão, apenas definindo na opção *Element size* o tamanho do elemento igual a 0,5 mm. A figura 32 mostra os detalhes da malha utilizado na simulação.

Figura 32 – Detalhes da geração da malha utilizada na simulação.

Details of "Mesh" ⌵	
[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	5,e-004 m
[+] Sizing	
[+] Quality	
[+] Inflation	
[+] Advanced	
[-] Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	4961
<input type="checkbox"/> Elements	2480

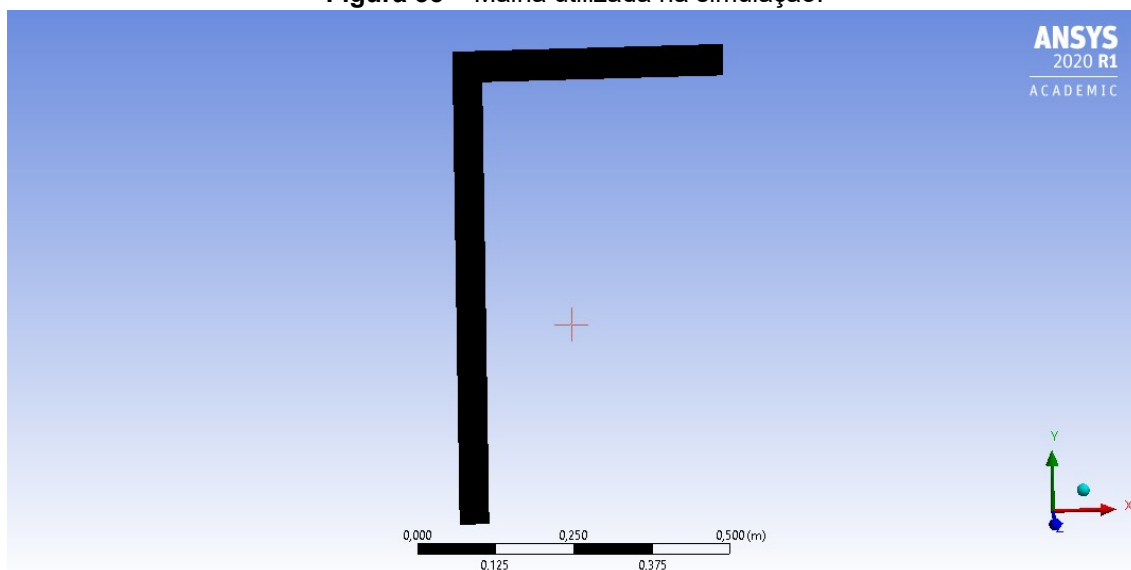
Fonte: Criado com ANSYS Academic.

A malha gerada pode ser visualizada de forma geral na simulação do software Ansys Academic na figura 33.

Como mostrado na figura anterior (32), a malha possui 4961 nós e 2480 elementos, o que representa um número muito bom para a geração da malha, e

impacta diretamente em uma maior precisão da simulação gerada com o software citado

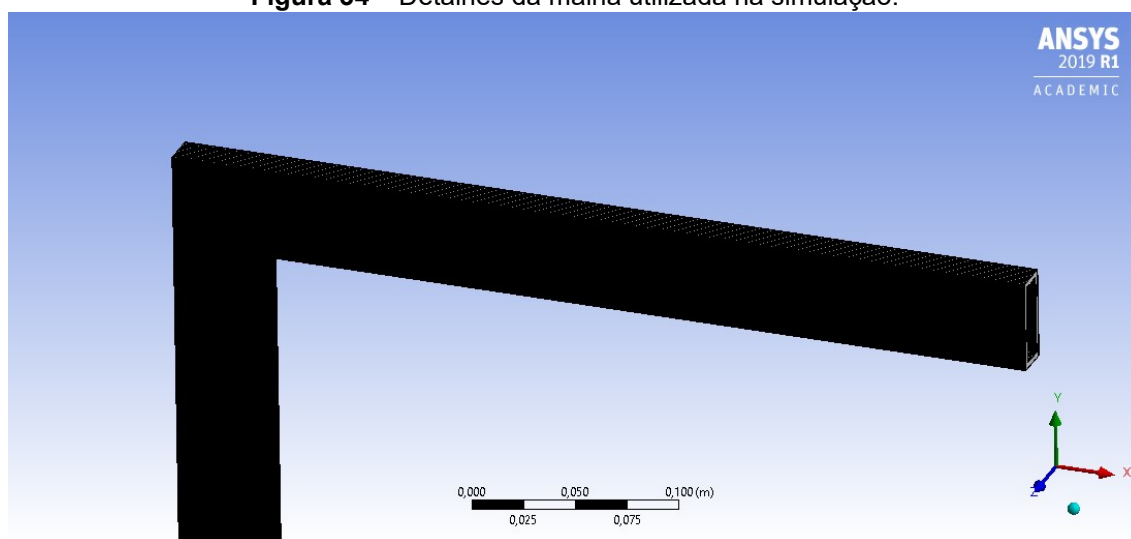
Figura 33 – Malha utilizada na simulação.



Fonte: criado com Ansys Academic.

Nota-se, que a densidade de elementos na estrutura é alta de modo que não é possível visualizar os elementos de forma distinta. Em uma visão aproximada da malha, na figura 34, é possível obter uma melhor visualização da malha e dos elementos que constituem a mesma.

Figura 34 – Detalhes da malha utilizada na simulação.



Fonte: criado com Ansys Academic.

Através do uso do software pode-se obter várias previsões do trabalho em questão, que podem ser observadas nas próximas seções que deixam bem claro os resultados encontrados através da teoria aplicada.

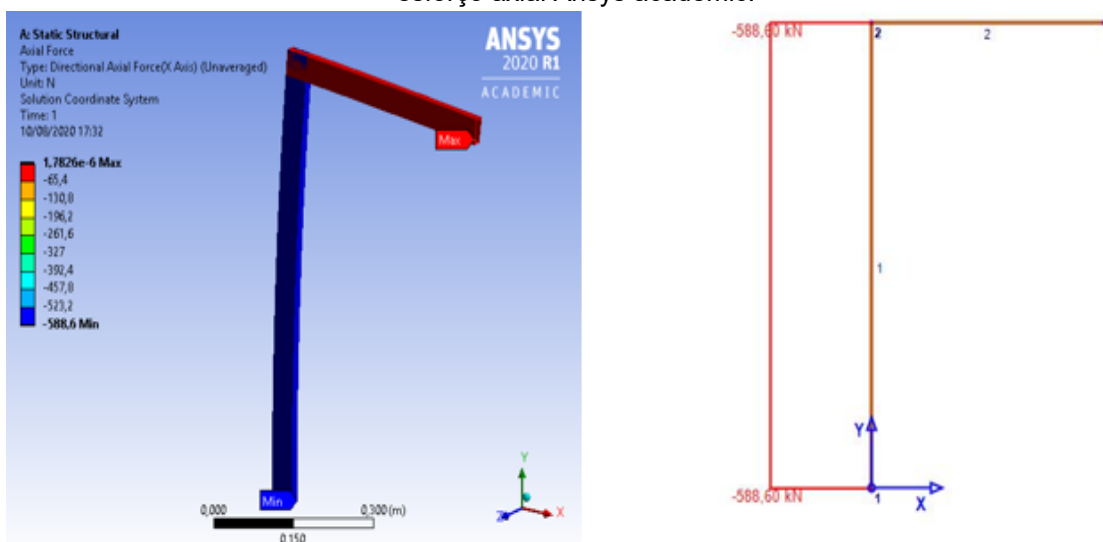
4.4.1 Esforços internos

Em uma breve comparação entre os gráficos obtidos com o software 2D Frame Analysis, que gerou os diagramas de esforços internos, em relação às simulações geradas com o software Ansys, pode-se observar que os resultados se replicam em ambos, comprovando a veracidade dos cálculos anteriores.

Pode-se observar na figura 35 que o carregamento provoca sobre o elemento uma força normal nula na primeira seção, que representa o elemento horizontal, e uma força constante na segunda seção, que representa o elemento vertical da estrutura analisada.

Esta constância entre as simulações pode ser observada na forma de uma linha reta vertical na simulação do software 2d Frame Analysis, e na uniformidade da cor azul na simulação do software Ansys.

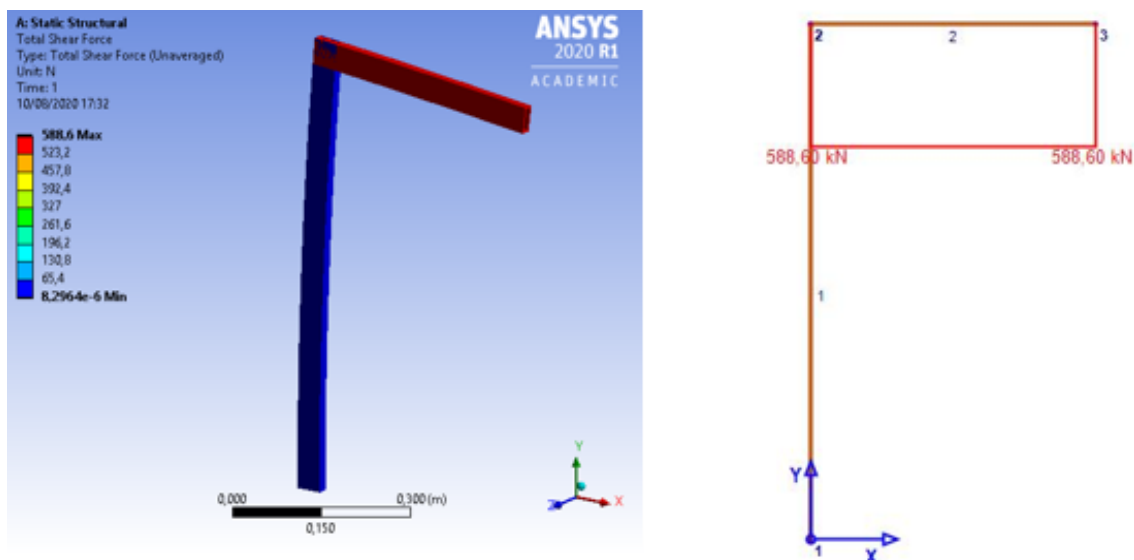
Figura 35 - Comparativo Diagrama de esforço normal 2D Frame Analysis e simulação de esforço axial Ansys academic.



Fonte: Criado com 2D Frame Analysis e Ansys academic.

De forma análoga, pode-se observar na comparação entre as simulações dos softwares referidos nas imagens da figura 36, que ao longo do elemento horizontal (primeira seção) o esforço cortante é constante e no elemento vertical (segunda seção) o mesmo esforço é nulo.

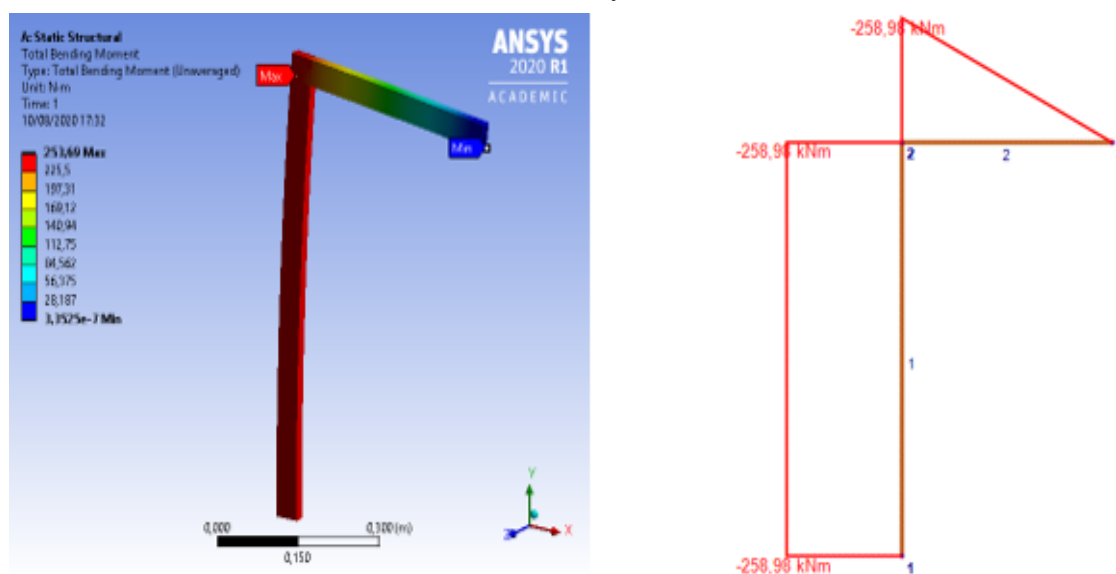
Figura 36 - Comparativo Diagrama de esforço cortante 2D Frame Analysis e simulação de esforço cortante Ansys academic.



Fonte: criado com 2D Frame Analysis/ Ansys Academic

Por fim, para o momento fletor, pode-se observar através da figura 37, que na primeira seção (elemento horizontal), o momento fletor varia de forma linear ao longo da estrutura, tendo o seu ponto máximo no fim da primeira seção que é onde se encontram as duas seções, como indicado em ambas as simulações. Já para o elemento vertical o momento fletor não varia, se apresentando de forma constante ao longo da estrutura.

Figura 37- Comparativo Diagrama de momento fletor 2D Frame Analysis e simulação de momento fletor Ansys academic.



Fonte: criado com 2D Frame Analysis/ Ansys Academic.

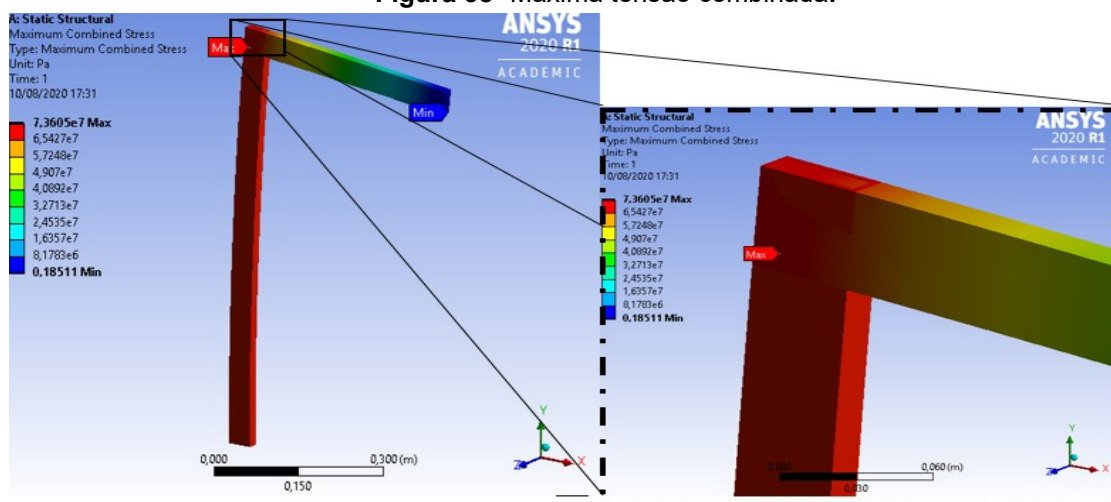
4.4.2 Máxima e mínima tensão combinada

Neste ponto pode-se observar o ponto onde ocorre a máxima tensão combinada, que é o resultado de todas as tensões aplicadas sobre a estrutura.

Como já era esperado devido aos cálculos das seções 3.5 e 3.6 onde são observados os diagramas de esforços e a tensão máxima atuante na parte superior da estrutura, os maiores valores para tal esforços ocorrem na segunda seção.

Esta seção que corresponde ao elemento vertical da estrutura, apresenta um valor de $73,605 \text{ MPa}$ para tensão máxima combinada no ponto em destaque na figura 38, na simulação do software Ansys Academic.

Figura 38- Máxima tensão combinada.

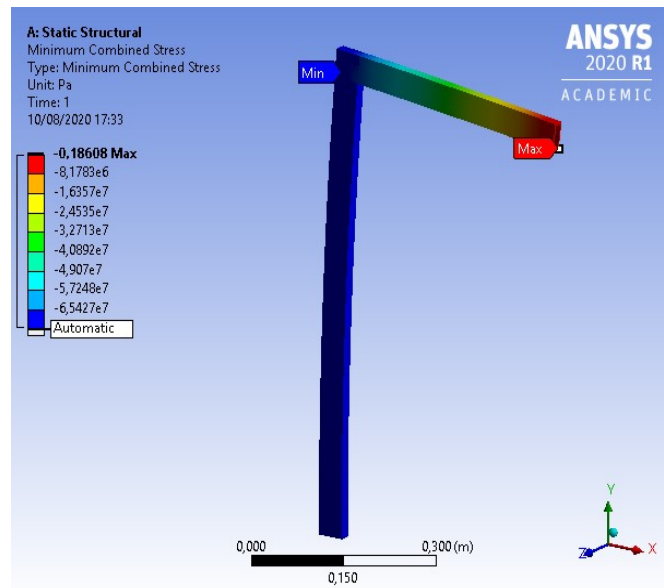


Fonte: Criado com Ansys Academic.

Na figura 39, que apresenta a simulação do software Ansys Academic para mínima tensão combinada, pode-se observar que o maior valor em módulo desta tensão - que corresponde ao valor da tensão na superfície superior do perfil -, também ocorre na seção vertical da estrutura.

Este comportamento já era esperado devido aos cálculos das seções 3.5 e 3.6 e também que seu valor seria ligeiramente inferior pois na superfície superior à tensão normal provocada pelo esforço axial tem sentido opostos à tensão normal provocada pelo momento fletor.

Figura 397- Mínima tensão combinada.

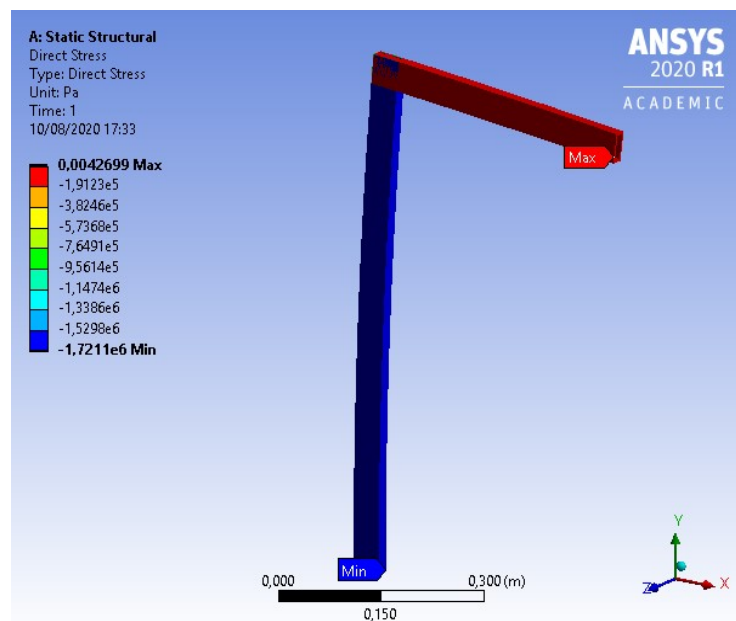


Fonte: Criado com Ansys Academic.

4.4.3 Tensão direta

O carregamento aplicado sobre a estrutura cria uma força axial constante no elemento vertical, desenvolvendo uma tensão compressiva máxima igual a $-1,72 \text{ MPa}$.

Figura 40- Tensão direta.



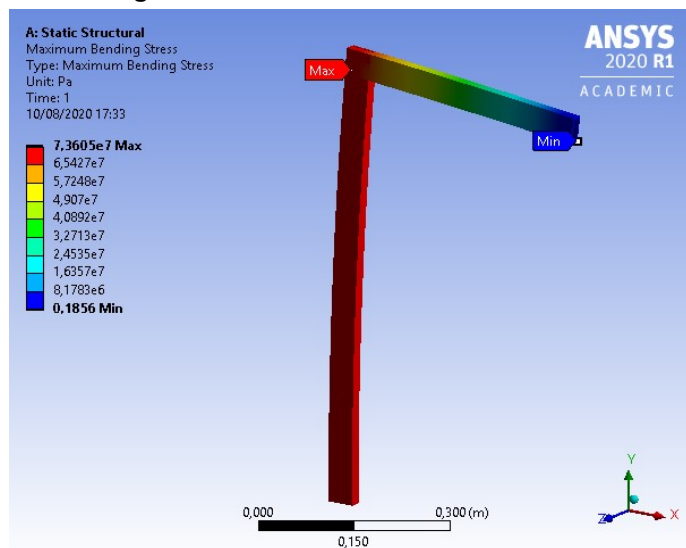
Fonte: Criado com Ansys Academic.

Isso que já era esperado uma vez que a força axial máxima ocorre no elemento vertical da estrutura, este comportamento pode ser observado na figura 40.

4.4.4 Máxima tensão de flexão

A máxima tensão de flexão ocorre na segunda seção, que corresponde ao elemento vertical da estrutura, na sua fase de ligação com o elemento horizontal, da mesma forma que ocorre com a máxima tensão combinada.

Figura 41- Máxima Tensão de flexão.



Fonte: Criado com Ansys Academic.

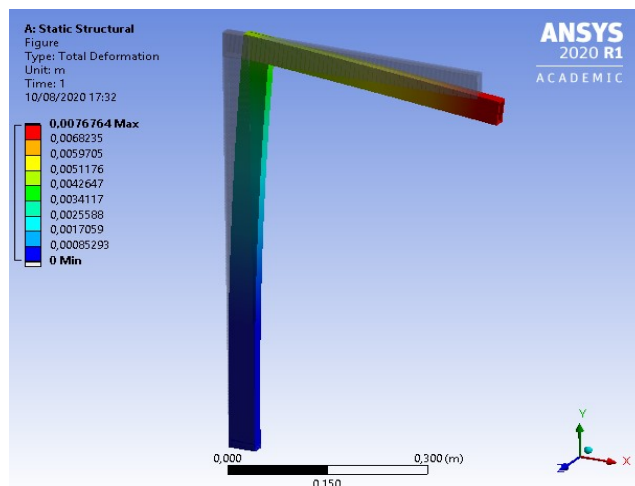
Na simulação do software é apresentando um valor de $73,605 \text{ MPa}$ como pode ser visto na figura 41.

4.4.5 Deslocamento

Com a nova configuração da estrutura, que foi definida no item 4.8 com a solução gráfica apresentada pelo software que *Free MATLAB Trial*, o deslocamento máximo foi encontrado na seção horizontal no ponto de aplicação da carga, como já era esperado.

O valor encontrado na simulação do software Ansys Academic foi 0,0076764 m ou aproximadamente 7,68 mm como pode ser observado na figura 42.

Figura 42 - deslocamento da estrutura.



Fonte: Criado com Ansys Academic.

Este valor se mostra aceitável para o problema em questão pois não terá influência no trabalho que o elemento deverá executar no içamento do ar condicionado.

4.4.6 Comparativo da redução de massa da estrutura

Foi atingido uma massa final de 3,34 kg segundo os cálculos do software Free MATLAB Trial com as alterações feitas com os cálculos do trabalho.

Para uma simulação com as duas estruturas, a inicial e a otimizada, pelo software Autodesk Inventor, obteve-se os resultados apresentados na tabela 3 criada com o software Microsoft Excel apresentada a seguir.

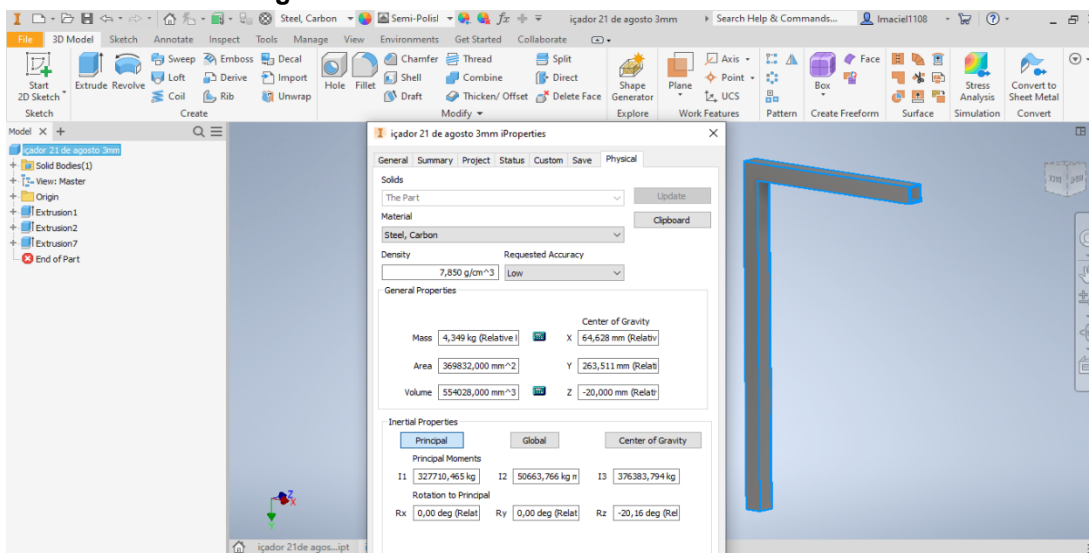
Tabela 3 – Comparação de massa e porcentagem entre estrutura original e otimizada.

	MASSA(kg)	%
Original	4,349	100%
Otimizado	3,392	77,25%
Redução	0,989	22,75%

Fonte: o próprio autor.

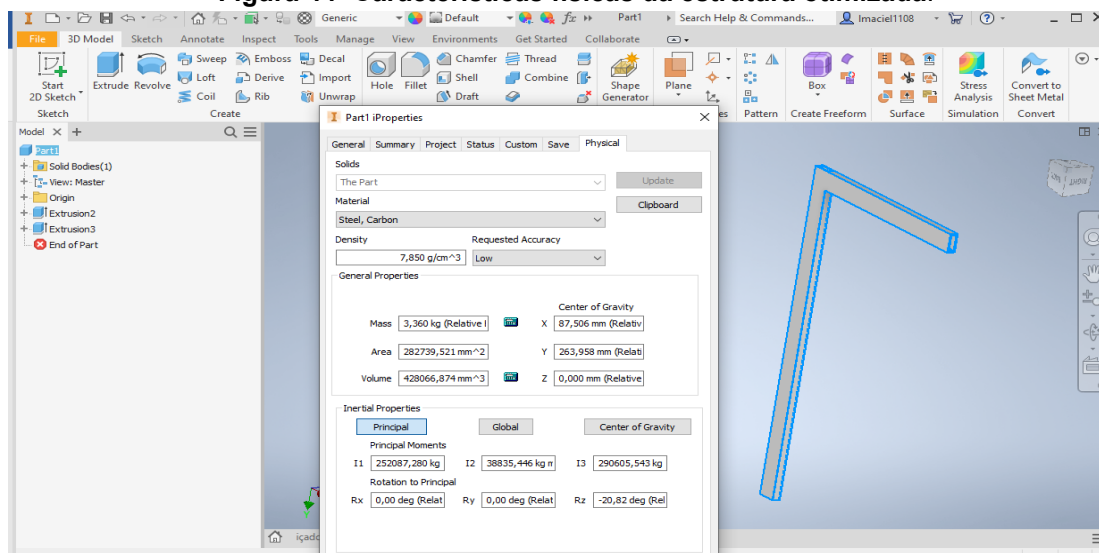
Em uma breve comparação entre as estruturas, a inicial (figura 43) e a otimizada (figura 44), ambas criadas com o software Autodesk Inventor, pode ser observado que houve uma redução de massa de 22,75%, como apresentado na tabela 3.

Figura 43 1- Características físicas da estrutura Inicial.



Fonte: Criado com Autodesk Inventor.

Figura 44- Características físicas da estrutura otimizada.



Fonte: Criado com Autodesk Inventor.

Nestas simulações foram respeitadas as características de dimensões, densidade e material da peça original.

Isso se faz necessário para que se pudesse chegar o mais próximo possível da massa da ferramenta real.

Pode ser observado na figura 18 que na estrutura inicial havia uma barra transversal de apoio, supondo que a mesma não suportaria a carga aplicada.

Para este trabalho foi considerado um pior caso em que a barra de apoio foi eliminada. Na situação real a inclusão da barra de apoio com as dimensões ótimas obtidas neste trabalho, irá contribuir para um aumento de rigidez da estrutura provocando uma redução do deslocamento no ponto de aplicação da carga.

Sua presença altera a distribuição de esforços internos e o que deve reduzir também o valor da tensão máxima tornando o perfil ainda mais seguro a sobrecarga devido à queda livre do ar condicionado que pode ocorrer devido a problemas com o mecanismo de elevação do içador.

5 CONCLUSÃO

Devido a facilidade que é proporcionada pelos atuais softwares de simulação como os empregados neste trabalho, fica muito fácil e evidente a compreensão e visualização dos resultados.

Para este trabalho pode-se concluir que foi obtido sucesso no alcance do principal objetivo ou da função objetivo, que como foi explanada no tópico 3.8.1, onde se tratava da redução da massa da estrutura através da variação das medidas de altura e largura dos tubos da mesma, de forma que ela suportasse a carga do ar condicionado e ainda tivesse um coeficiente de segurança de 2,5.

Estes resultados podem ser observados no capítulo anterior, no subitem 4.4.6 onde mostra que a estrutura obteve uma redução de peso de mais de 22%.

Esta redução de massa da estrutura implica na melhoria das condições ergonômicas do trabalho do instalador de ar condicionado, uma vez que é necessário trabalhar com este tipo de ferramenta em locais altos e de difícil movimentação, onde muitas das vezes o trabalhador já tem uma carga atrelada ao seu corpo de outras ferramentas e equipamentos de proteção individuais (EPIs) como cinto, capacete e cordas necessárias para a instalação, etc. Desta forma cada pequena redução de peso é muito benéfica para o usuário do içador.

Estes resultados mostram o quanto se desperdiça material quando se faz uma estrutura sem cálculos e simulações adequadas, apenas utilizando-se de achismo e experiências práticas pessoais do montador ou soldador que se propõem a este tipo de aventura. No caso apresentado, a estrutura está superdimensionada, porém se estivesse subdimensionada poderia causar acidentes que poriam em risco a vida do trabalhador e terceiros que eventualmente estivessem próximos do local.

Também pode-se citar como benefício deste trabalho a redução de custo para a fabricação da ferramenta, uma vez que o perfil diminuiu consideravelmente, implicando na redução de material para a sua fabricação.

Pode-se considerar para trabalhos futuros a continuação da pesquisa em questão com a consideração da barra de reforço que foi desconsiderada conforme foi mencionado anteriormente no item 3.1.

Também há um outro nicho de pesquisa na hipótese de se calcular o desgaste por fadiga do equipamento, fazendo um levantamento de quanto tempo a estrutura pode ser considerada segura para o exercício de sua função, ou seja, calcular a sua vida útil.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Milka Rossana Guerra Cavalcanti de **Como adultos e crianças compreendem a escala representada em gráficos**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco
- ARORA, Jasbir Singh. **Introduction to optimum design**. Elsevier, Mc Graw-Hill 2004.
- AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE. EN 13001 – 2: Crane Safety – General Design – Part. 2: Load Effects. Viena, 2009. Disponível em: <<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/dbd33260-a2ea-4e0a-87a0b42e2304ce35/en-13001-2-2011>> Acesso em: 05 de junho de 2019.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 35 – Trabalho em Altura**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2016b.
- BUDYNAS, R.G.; NISBETT, K. J. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10a ed. São Paulo, SP: AMGH, 2016.
- CRAIG JR, Roy R. **Mecânica dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. Pearson Educación, 2010.
- LOPEZ, Rafael Holdorf .; MIGUEL, Leandro Fadel M.; **Introdução a otimização estrutural**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.
- NÖTH, Winfried. **Máquinas semióticas**. Galáxia. Revista do Programa de Pós-Graduação em Comunicação e Semiótica. ISSN 1982-2553, n. 1, 2001.
- PANTOJA, MARCOS OLIVEIRA. Norma Regulamentadora (Nr) 35: Trabalho em Altura na Limpeza de Fachadas. **European Academic Research Journal**, v. 8, n. 2, 2020.
- PIEVE, Clóvis dos Santos da; SANTOS, Michel dos. **Máquinas de Elevação e Transporte “Guindaste”**. 2017.
- PINTO, Sérgio Daniel Moreira. **Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis**. 2013. Tese de Doutorado.

RAMOS FILHO, José de Miranda. **Andaimes: tecnologia europeia**. 1. ed. Florianópolis: Insular, 2012.

<>

UGURAL, A. C. **Mecânica dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 638 p. ISBN 9788521616870.

TÉCNICAS, Normas; NO BRASIL, Impresso. **ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas**. 1999.

ANEXO

Anexo I: Dimensões da ferramenta de elevação de ar condicionado

