

CAIO HENRIQUE DOS SANTOS MIGUEIS

Projeto mecânico de uma cadeira higiênica para pessoas obesas

Caio Henrique dos Santos Migueis

Projeto mecânico de uma cadeira higiênica para pessoas obesas

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio
Martins

Guaratinguetá - SP
2023

M636p	Migueis, Caio Henrique dos Santos Projeto mecânico de uma cadeira higiênica para pessoas obesas / Caio Henrique dos Santos Migueis – Guaratinguetá, 2022. 49 f : il. Bibliografia: f. 49 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins 1. Cadeira - Projetos. 2. Análise de elementos finitos. 3. Sistema musculoesquelético. I. Título. CDU 62.001.63
-------	--

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária CRB-8: 9203

CAIO HENRIQUE DOS SANTOS MIGUEIS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

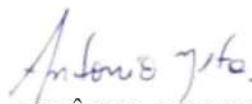


Prof. Dr. CELSO TUNA
Coordenador

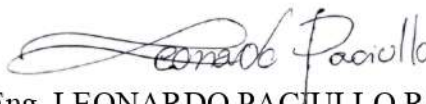
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZZINI
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Me. ANTÔNIO DOS REIS DE FARIA NETO
UNESP-FEG



Eng. LEONARDO PACIULLO RODRIGUES
Membro Externo

DADOS CURRICULARES

CAIO HENRIQUE DOS SANTOS MIGUEIS

NASCIMENTO 17.06.1998 – São Paulo/ SP

FILIAÇÃO Jayme dos Santos Migueis Neto
Odiléa Silva dos Santos Migueis

2016/2023 Graduação em Engenharia Mecânica – Bacharelado
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

AGRADECIMENTOS

primeiramente à Deus, que fez ser possível tudo o que tenho realizado em minha vida e me propiciou de graça o bem mais precioso, a vida.

aos meus pais *Jayme dos Santos Migueis Neto* e *Odiléa Silva dos Santos Migueis*, que sempre me apoiaram, incentivaram e me educaram para eu ser quem sou hoje.

ao meu irmão, *Osvaldo Elias dos Santos Migueis*, que sempre esteve presente para me auxiliar, aconselhar e me ajudar.

aos demais familiares como meus avós, minhas tias e meus tios, que possibilitaram que eu tivesse uma base familiar tranquila e repleta de amor.

aos meus amigos, que mesmo nos momentos difíceis estiveram comigo e que tornaram essa caminhada menos árdua de ser trilhada.

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Elias Tomazini*, pelo apoio dado e por cada aula lecionada durante a graduação.

a todos os professores que sentem prazer em repassar o conhecimento e que além disso são responsáveis por nossa formação para vida.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

O uso de aparatos hospitalares no ambiente de trabalho pode ser visto, entre outras funções, como um facilitador do processo de transporte de pacientes, minimizando a ocorrência das lesões no sistema musculoesquelético - uma das maiores preocupações dos especialistas, por serem uma das mais importantes causas de morbidade. O presente trabalho tem por objetivo realizar o projeto mecânico de uma cadeira higiênica para pessoas obesas, respeitando as dimensões mínimas impostas pela norma ABNT NBR 9050/2004 - "Acessibilidade a Edificações, mobiliários, espaços e equipamentos urbanos", suportando uma carga de até duzentos e cinquenta quilogramas. Após o estabelecimento do projeto mecânico, apresenta-se a modelagem 3D do equipamento e o desenho computacional no software Autodesk Inventor e realiza-se o estudo das tensões por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). No fim é obtido o projeto estrutural de uma cadeira higiênica obedecendo as normas ABNT, com tubo estrutural de 25,4mm diâmetro externo e 19,05mm diâmetro interno, atingindo uma tensão máxima aproximada de 88 MPa – obtendo um CS maior que 3, e um deslocamento máximo de 4mm – o valor esperado era próximo de zero, portanto, realizou uma nova versão com reforço de barras, atingindo o deslocamento máximo de 0,6mm, satisfazendo os requisitos do projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Projeto Mecânico da Cadeira Higiênica. Obeso. Método dos Elementos Finitos (MEF). Lesões no Sistema Musculoesquelético. Análise de tensões.

ABSTRACT

The use of hospital devices in the work environment can be faced, among other functions, as a tool to facilitate the process of patients transportation, minimizing the occurrence of injuries in the musculoskeletal system - one of the biggest concerns of the specialists, once they are one of the most important causes of morbidity. The present work has for objective to accomplish the mechanical project of a hygienic chair for obese people, respecting the minimum dimensions imposed by the norm ABNT NBR 9050/2004 - "Accessibility to buildings, furniture, spaces and urban equipment", supporting a load of up to two hundred and fifty kilograms. After the establishment of the mechanical project, the 3D modeling of the equipment and the computational design in Autodesk Inventor software are presented and it is performed a comparison between the analytical calculations with those obtained through the Finite Element Method (FEM). At the end, the structural project of a hygienic chair obeying ABNT standards is obtained, with a structural tube of 25.4mm external diameter and 19.05mm internal diameter, reaching a maximum stress of approximately 88 MPa - obtaining a safety coefficient greater than 3, and a maximum displacement of 4mm - the expected value was close to zero, so a new version was made with bar reinforcement, reaching the maximum displacement of 0.6mm, satisfying the project requirements.

KEYWORDS: Mechanical design of a Hygienic chair. Obese. Finite Element Method (FEM). Musculoskeletal System Injuries. Tension analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Prevalência de obesidade na população adulta de 20 anos ou mais de idade, por sexo no Brasil no decorrer de anos.	17
Figura 2 - Cuidadora auxiliando à pessoa na utilização de uma cadeira de rodas.	18
Figura 3 - Dimensões para assentos de pessoas obesas segundo a norma ABNT 9050.	20
Figura 4 - Representação de um ensaio de tração.	22
Figura 5 - Gráfico de tensão por deformação de um material dúctil.	23
Figura 6 - Gráfico de tensão por deformação de diferentes tipos de materiais.	23
Figura 7 – Estado tridimensional de tensões.	24
Figura 8 - Representação gráfica do critério de von Mises.	26
Figura 9 - Representação gráfica do critério de Tresca.	27
Figura 10 - Layout inicial do programa Autodesk Inventor.	31
Figura 11 - Lista de materiais já encontrados na biblioteca do Inventor.	31
Figura 12 - Módulo de simulação no Inventor, com ênfase no componente das forças.	32
Figura 13 - Módulo de simulação no Inventor, com ênfase no componente das restrições.	32
Figura 14 - Fluxograma de atividades.	34
Figura 15 - Cadeira higiênica utilizada para simulação, com ênfase nas barras onde as forças serão aplicadas.	36
Figura 16 - Representação lateral das forças.	36
Figura 17 - Representação da barra no software Autodesk Inventor.	37
Figura 18 - Diagrama de Corpo Livre da barra (DCL).	37
Figura 19 - Diagrama de esforço cortante da barra (DEC).	38
Figura 20 - Momento fletor para uma viga bi engastada.	38
Figura 21 - Diagrama de momento fletor da barra (DMF).	38
Figura 22 - Desenho ilustrativo da cadeira higiênica para obesos.	41
Figura 23 - Desenho técnico com as medidas da cadeira higiênica para obesos.	42
Figura 24 - Base estrutural da cadeira higiênica.	42
Figura 25 - Caracterização do material Alumínio 6351-T6 no Inventor com as principais propriedades mecânicas tiradas da Tabela 3.	43
Figura 26 - Forças e restrições aplicadas na estrutura da cadeira para a simulação.	44
Figura 27 - Tensão em mega Pascal (Mpa) na estrutura da cadeira higiênica.	45
Figura 28 - Deslocamento em milímetros (mm) na estrutura da cadeira higiênica.	46
Figura 29 – Estrutura com barra reforçada.	47

Figura 30 - Deslocamento em milímetros (mm) na nova estrutura da cadeira higiênica.47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Benchmark das cadeiras de banho encontradas no mercado brasileiro.....	20
Tabela 2 - Fatores utilizados para determinar um coeficiente de segurança para materiais dúcteis.....	30
Tabela 3- Propriedades mecânicas de materiais comumente encontrados na construção de cadeiras de banhos.....	31
Tabela 4 - Cronograma de atividades.....	38
Tabela 5 - Dimensões da cadeira higiênica realizada no software Inventor.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DCL	Diagrama de Corpo Livre
DEC	Diagrama de Esforço Cortante
DMF	Diagrama de Momento Fletor
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMC	Índice de Massa Corporal
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
WHO	World Health Organization

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	OBESIDADE NO BRASIL	16
2.2	PROBLEMAS ERGONÔMICOS NA ENFERMAGEM	17
2.3	CADEIRAS HIGIÊNICAS	18
2.3.1	Benchmarking de cadeiras higiênicas.....	19
2.4	NORMA ABNT 9050.....	20
2.5	PROJETO COM ANÁLISE DE CARGAS.....	21
2.5.1	Metodologia de projeto	21
2.5.2	Crítérios de falha.....	21
2.5.3	Coeficiente de segurança.....	27
2.5.5	Materiais possíveis para a estrutura e componentes	29
3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	30
3.1	O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NO AUTODESK INVENTOR 2022.....	30
3.1.1	Geração da geometria.....	30
3.1.2	Inserção dos materiais.....	31
3.1.3	Inserção dos carregamentos, restrições e material da geometria.....	32
3.1.4	Criação da malha computacional.....	33
3.1.5	Execução da análise e obtenção dos resultados.....	33
4	METODOLOGIA.....	34
4.1	PRÉ DIMENSIONAMENTO DA CADEIRA HIGIÊNICA	35
4.2	GEOMETRIA NO CAD.....	41

4.3	ESTRUTURA APLICADA NA SIMULAÇÃO	42
4.4	MATERIAL APLICADO NA SIMULAÇÃO	43
4.5	CARGAS APLICADAS NA SIMULAÇÃO	44
4.6	TENSÕES E DESLOCAMENTOS NA ESTRUTURA	45
4.7	DESLOCAMENTOS NA NOVA ESTRUTURA.....	47
5	CONCLUSÃO.....	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A obesidade é uma doença que vem cada vez mais sendo presente no mundo e o Brasil segue essa tendência. Pesquisas mostram que o aumento da enfermidade é notável em todas as faixas etárias - desde crianças, adultos e idosos e classes sociais - dos mais pobres aos mais ricos (IBGE, 2019).

Outro assunto que fica cada vez mais evidente em nosso dia a dia é a importância da ergonomia - otimização das condições de trabalho, para o aumento da produtividade humana (Guérin et al., 1997; Grosjean; Weerdt, 2005). Com o aumento dos trabalhos em casa, as empresas têm investido em dar um suporte ao colaborador, seja disponibilizando cadeiras mais confortáveis, apoios para os pés, entre outros equipamentos que ajudam uma melhor postura durante o serviço, diminuindo assim os riscos de uma incapacidade futura ou morbidade.

Nesse contexto, as lesões do sistema musculoesquelético são as que ganham ênfase por serem uma das mais importantes causas de morbidade e incapacidade em adultos (Parniapour et al. 1990, Yeliu; Callahan, 1995). Um dos grupos mais afetados por essas lesões no sistema musculoesquelético, particularmente as algias vertebrais, é o de trabalhadores da área de enfermagem. Uma das atividades que são responsáveis é o transporte e movimentação de pacientes (WHO, 1985).

Para garantir uma maior segurança à saúde dos profissionais existem diversos equipamentos para auxiliar no deslocamento dos pacientes. Um dos mais frequentes é a cadeira higiênica, similar à uma cadeira de rodas, ela serve para auxiliar o paciente e enfermeiro no momento da higienização daquele.

Após uma análise do mercado nacional de cadeira de rodas, percebeu-se que, dentre as cadeiras analisadas, nenhuma delas respeita as condições impostas pela norma ABNT 9050 - Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos, que cita também as dimensões e condições mínimas para um assento de pessoa obesa.

Portanto, o trabalho aborda uma análise de tensões de uma cadeira higiênica simples que atenda aos requisitos determinados pela norma, fazendo com que as pessoas obesas possam se sentir mais confortáveis e seguras ao utilizar um equipamento deste tipo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A locomoção e higienização de pacientes com debilidade física é de suma importância dentro do ambiente hospitalar. Atualmente no mercado nacional não é comum uma cadeira higiênica que obedeça às dimensões da norma ABNT 9050. Assim, justifica-se o presente trabalho que, ao desenvolver uma cadeira higiênica para obesos, estará contribuindo, principalmente, para a acessibilidade da população obesa e uma maior segurança para os profissionais da área da saúde.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar o projeto mecânico de uma cadeira higiênica para pessoas obesas.

- Realizar o dimensionamento da cadeira higiênica para obesos a partir de especificações de projeto;
- Realizar os cálculos por meio do Método de Elementos Finitos (MEF).
- Desenvolver o desenho computacional do objeto de estudo via Autodesk Inventor;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho possui uma divisão de 5 capítulos. O primeiro capítulo conta com uma introdução ao assunto da monografia, justificativas demonstrando o porquê da execução do mesmo e objetivos a se alcançar. Já no capítulo seguinte são apresentados alguns conceitos e normas, como o que é a obesidade, a norma ABNT 9050 - que dita algumas regras para a fabricação de cadeiras para obesos. No capítulo 3 é mencionado alguns métodos que serão usados para a realização do estudo, como os critérios de falhas e o método FEM. No capítulo 4 apresenta-se a metodologia empregada, alguns cálculos para o pré-dimensionamento do projeto e os resultados das simulações - as tensões e os deslocamentos da estrutura da cadeira higiênica. Por fim apresentam-se algumas conclusões deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 OBESIDADE NO BRASIL

A obesidade é uma doença crônica definida como um acúmulo excessivo de tecido adiposo num nível que compromete a saúde dos indivíduos (WHO, 1997) - assim como distúrbios do aparelho locomotor, dificuldades respiratórias e problemas dermatológicos, além de favorecer o surgimento de enfermidades potencialmente letais como dislipidemias, doenças cardiovasculares, Diabetes Não-Insulino-Dependente (Diabetes Tipo II) e certos tipos de câncer.

No entanto, o grau de excesso de gordura, sua distribuição no corpo e seu impacto na saúde variam entre as pessoas obesas. Atualmente, a obesidade tornou-se um grande problema na sociedade moderna devido ao seu desenvolvimento em diferentes partes do mundo. Os danos causados pela obesidade são significativos. Além dos listados acima, existem danos psicossociais associados a problemas de discriminação de pessoas com essa patologia. Estima-se que os gastos públicos com a enfermidade consumam de 2% a 7% dos orçamentos de saúde nos países desenvolvidos (WHO, 1997).

Ainda que seja uma doença cujas causas não são totalmente compreendidas, há algum consenso na literatura de que a obesidade é provocada pela interação de vários fatores, o que confere à doença sua natureza multifatorial (Stunkard, 2000; Pena e Bacallo, 2000). Operacionalmente, a obesidade é diagnosticada pelo parâmetro estipulado pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 1997) — o IMC (Índice de Massa Corporal) obtido por intermédio do cálculo da relação entre peso corpóreo (kg) e estatura (m)² dos indivíduos. Através deste parâmetro são considerados obesos os indivíduos cujo IMC encontra-se num valor superior ou igual a 30 kg/m².

Nas últimas décadas, a população brasileira experimentou mudanças dramáticas nas condições de vida, saúde e nutrição. Entre as mais significativas, destacam-se os aumentos da obesidade. Estudos nacionais afirmaram que a doença vem avançando em todas as faixas etárias, entretanto afeta de forma diferente pessoas em regiões e classes sociais distintas, as mulheres de baixa renda são as que mais sofrem.

A obesidade também é comum em todas as regiões geográficas, especialmente nas áreas urbanas - tais resultados descrevem a magnitude da obesidade nos países em desenvolvimento

e ressaltam a complexidade do perfil nutricional dessas populações. Todas essas mudanças representam desafios inegáveis para a saúde pública hoje.

Figura 1 - Prevalência de obesidade na população adulta de 20 anos ou mais de idade, por sexo no Brasil no decorrer de anos.



Fonte: IBGE (2019).

2.2 PROBLEMAS ERGONÔMICOS NA ENFERMAGEM

Diversas organizações e pesquisadores mostram-se cada vez mais mobilizados com a questão dos efeitos da ocupação sobre a saúde de trabalhadores, preocupados com temas relativos à saúde do trabalho (WHO, 1985).

Procura-se examinar progressivamente como a ocupação pode ser determinante do desenvolvimento de certas doenças. Nesse contexto, as lesões do sistema musculoesquelético têm atraído a atenção de pesquisadores de todo o mundo por serem uma das mais importantes causas de morbidade e incapacidade em adultos e pelo custo econômico que acarretam (Parniapour et al. 1990, Yeliu; Callahan, 1995).

Sabe-se que esse sistema pode ser comprometido por diversos fatores como os relacionados à elevação e transporte de cargas, condições ambientais do local de trabalho e organização do trabalho. Certas posturas e movimentos que um trabalhador realiza repetidamente ao longo dos anos podem afetar sua musculatura e estruturas ósseas e articulares, principalmente a estrutura de sua coluna e membros, causando em curto prazo dores e no longo prazo danos permanentes e deformidades.

Um dos grupos mais afetados por essas lesões no sistema musculoesquelético, particularmente as algias vertebrais, é o de trabalhadores da área de enfermagem (Parniapour

et al. 1990). Inúmeros outros fatores mais amplos podem contribuir para a ocorrência de dores nas costas, como prática de atividade física, fatores psicológicos, defeitos posturais e congênitos.

Quanto aos fatores de risco relacionados especificamente com as atividades profissionais, os mais citados são o transporte e movimentação de pacientes, movimentos frequentes de flexão e torção da coluna vertebral e, os fatores ergonômicos inadequados de mobiliários e equipamentos utilizados nas atividades cotidianas da enfermagem.

2.3 CADEIRAS HIGIÊNICAS

A cadeira higiênica é um dispositivo frequentemente utilizado no ambiente hospitalar no amparo de pessoas com debilidade física e dificuldade na locomoção, suas duas principais funções são: facilitar a transferência e a higienização do paciente.

A transferência do indivíduo para a cadeira higiênica convencional é realizada de forma similar ao processo feito para uma cadeira de rodas – como pode ser visto na Figura 2, o cuidador deve abraçar o paciente de frente, passando os braços por debaixo dos braços dele, levantando e girando seu corpo até a cadeira.

Figura 2 - Cuidadora auxiliando à pessoa na utilização de uma cadeira de rodas.



Fonte: Revista escola de enfermagem USP (2000).

Vale ressaltar que o uso de uma cadeira higiênica garante:

- maior segurança, tanto para o paciente quanto para o cuidador, visto que os freios da cadeira garantem a estabilidade do equipamento mesmo em ambientes escorregadios como a cabine de chuveiro;
- maior conforto, pois é projetada para dar suporte ao paciente, permitindo que ele se acomode durante o banho e não precise se movimentar muito;
- maior praticidade, sua estrutura simples permite que os cuidadores alcancem facilmente o corpo do usuário;
- diminuição dos esforços no sistema músculo esquelético dos cuidadores, reduzindo o risco de problemas de saúde no ambiente de trabalho.

2.3.1 Benchmarking de cadeiras higiênicas

A quantidade de modelos de cadeiras higiênicas presentes no mercado brasileiro atualmente é bem restrita, os exemplares possuem aspectos semelhantes e usabilidade parecidas. É mostrado na Tabela 1 uma análise de quatro cadeiras levando em consideração o peso, dimensões, capacidade de carga e algumas peculiaridades.

Tabela 1 - Benchmark das cadeiras de banho encontradas no mercado brasileiro.

Ilustração	Fabricante	Modelo	Dimensões LxCxA [cm]	Peso [kg]	Capacidade [kg]
	Dellamed	D60	58 x 42 x 96	10kg	150kg
	Prolife	Flex Obeso	65 x 63 x 82	10kg	130kg
	Jaguaribe	Big	*50 x 42 x 20	9,5kg	130kg
	Carcilife	Cadeira Banho PVC	70 x 50 x 103	18kg	150kg

*Dimensões do assento da cadeira

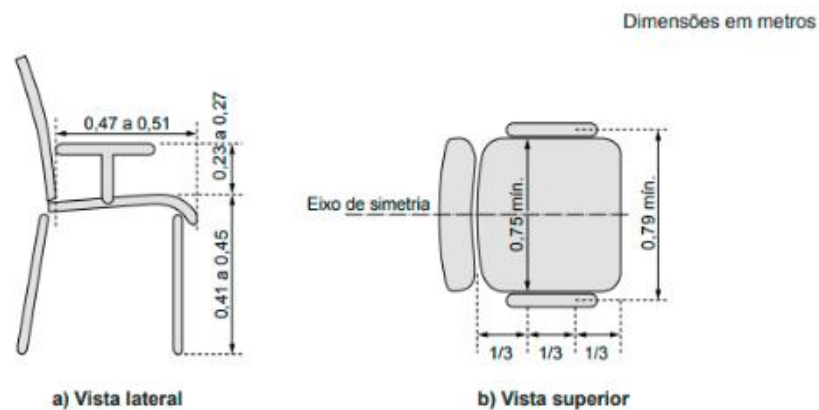
Fonte: Próprio autor.

2.4 NORMA ABNT 9050

A norma ABNT 9050 dita as normas para assentos de pessoas obesas, ou seja, todas as cadeiras que forem destinadas às pessoas dessa categoria devem atender as medidas especificadas pela norma. Segundo a norma ABNT alguns requisitos mínimos que devem ser respeitados são:

- profundidade do assento mínima de 0,47 m, medida entre sua parte frontal e o ponto mais frontal do encosto tomado no eixo de simetria;
- largura do assento mínima de 0,75 m, medida entre as bordas laterais no terço mais próximo do encosto.
- altura do assento mínima de 0,41 m, medida na sua parte mais alta e frontal;
- quando providos de apoios de braços, estes devem ter altura entre 0,23 m e 0,27 m em relação ao assento;
- os assentos devem suportar uma carga de 250 kg.

Figura 3 - Dimensões para assentos de pessoas obesas segundo a norma ABNT 9050.



Fonte: Norma ABNT 9050 (2015).

2.5 PROJETO COM ANÁLISE DE CARGAS

2.5.1 Metodologia de projeto

A metodologia de projetos é essencialmente um exercício de criatividade aplicada (Norton, 2013). Há inúmeras metodologias de projetos para auxiliar a enfrentar o problema não estruturado - casos em que a definição do problema é vaga e para os quais muitas soluções possíveis existem.

Independentemente da metodologia aplicada é notável que existem três principais grandes fases: pré-desenvolvimento, onde ocorre o planejamento estratégico, a identificação da necessidade, uma pesquisa inicial; desenvolvimento, etapa onde acontece realmente o processo, protótipos, testes; e a última etapa de pós desenvolvimento, acompanhamento após o lançamento do projeto.

Importante mencionar que dentro dessas três grandes fases, pode-se ter diversas subfases, dependendo da complexidade do projeto a ser realizado. Outro ponto fundamental é perceber que não se projeta de modo linear, às vezes faz-se necessário voltar para alguma etapa a fim de realizar melhorias.

Teoricamente, poderíamos continuar esta iteração em um dado problema de projeto para sempre, criando continuamente pequenas melhoras, mas chega um momento que se deve declarar o projeto bom o suficiente e executá-lo.

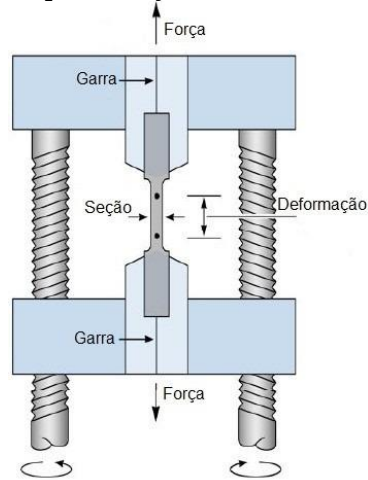
Máquinas que estão em operação há muito tempo e aprimoradas por muitos projetistas atingem um nível de “perfeição”, o que as tornam difíceis de melhorar. Um exemplo é uma bicicleta simples. Embora os inventores continuem tentando melhorar a máquina, o projeto básico permanece praticamente intacto (Norton, 2013).

2.5.2 Critérios de falha

Em estruturas metálicas é comum considerar o escoamento como principal critério de falha em uma estrutura, pois quando esse fenômeno ocorre há uma deformação plástica no material, ou seja, suas características geométricas são alteradas de forma permanente, tal feito pode acarretar numa eventual falha catastrófica chamada ruptura.

Este parâmetro é obtido por ensaios de tração definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na Norma Brasileira (NBR) 6892. Segundo tal norma, durante o ensaio o eixo do corpo de prova deve coincidir com o eixo de aplicação da força, tendo assim somente um estado axial de tensões, conforme visto na Figura 4.

Figura 4 - Representação de um ensaio de tração.

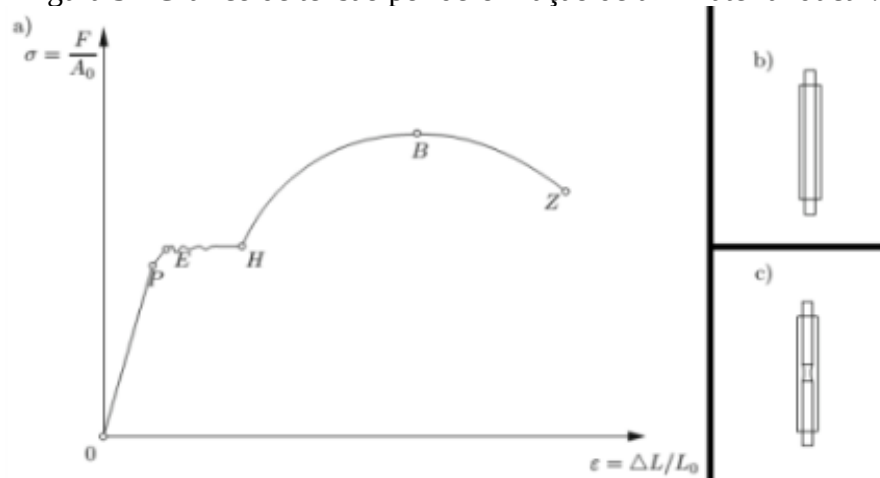


Fonte: BIPODI (2022)

Cada material reagirá de maneira diferente ao ensaio, dependendo de suas propriedades mecânicas. Esse comportamento pode ser classificado, em geral, como um comportamento dúctil - onde há uma deformação antes da ruptura, ou frágil - onde a ruptura ocorre de forma inesperada.

Para uma deformação de um material dúctil - caso das ligas metálicas, que será aplicado na estrutura do projeto, têm-se o comportamento representado no gráfico de tensão por deformação da Figura 5, onde o ponto P, E, H, B e Z representam respectivamente o limite de proporcionalidade, limite elástico ou de ruptura, início do encruamento, resistência máxima e resistência à ruptura.

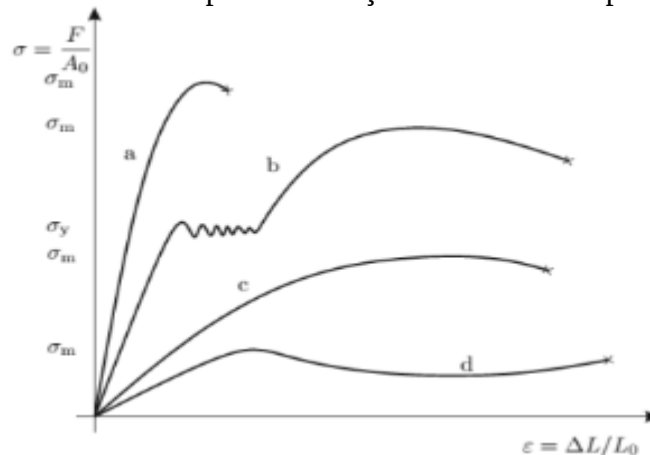
Figura 5 - Gráfico de tensão por deformação de um material dúctil.



Fonte: Altenbach; Kolupaev (2015).

Já a Figura 6 mostra o gráfico tensão e deformação para diferentes tipos de materiais, que possuem comportamentos distintos. É possível observar as curvas a, b, c e d, onde representam respectivamente material quebradiço com comportamento principalmente elástico, material dúctil com endurecimento dominante, material dúctil sem ponto de escoamento significativo, e por fim um material dúctil com amolecimento dominante.

Figura 6 - Gráfico de tensão por deformação de diferentes tipos de materiais.



Fonte: Altenbach; Kolupaev (2015).

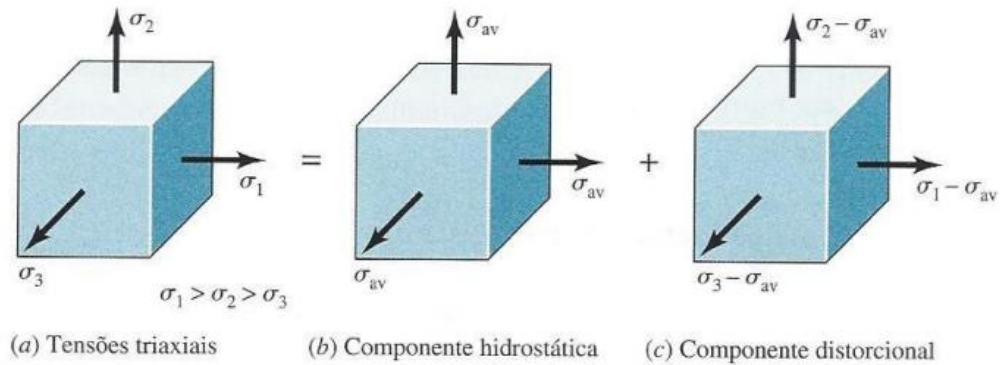
Nos problemas reais de engenharia raramente ocorre um estado uniaxial de tensões, portanto, é necessário o uso de métodos que permitam a comparação entre um estado generalizado de tensões com o limite de escoamento, que é obtido por meio de um ensaio uniaxial de tensões. Atribui-se a esses métodos o nome de critérios de falha. Os critérios de falha mais difundidos e aceitos para materiais com comportamento dúctil são os critérios de von Mises e Tresca.

2.5.2.1 Critérios de Von Mises

O critério de von Mises enuncia que o escoamento de um material dúctil ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume do material for igual ou superior à energia de distorção por unidade de volume do mesmo material quando ele atinge o escoamento em um ensaio de tração Shigley (2006).

A Figura 7 retrata um estado complexo de tensões, sendo as tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 representadas em (a). Já em (b) e (c) pode-se ver a decomposição das tensões nas componentes hidrostáticas (σ_{av}) e distorcional, respectivamente.

Figura 7 – Estado tridimensional de tensões.



Fonte: Budynas; Nisbett (2011).

As equações que seguem têm como referência Budynas e Nisbett (2011), onde citam que a tensão hidrostática (σ_{av}), vista na Figura 8 (b) é a média aritmética das tensões principais, sendo representada pela equação [1].

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad [1]$$

A energia de deformação (u) do estado generalizado de tensões por unidade de volume é dada pelas equações [2] e [3].

$$u = \frac{1}{2} (\varepsilon_1 \sigma_1 + \varepsilon_2 \sigma_2 + \varepsilon_3 \sigma_3) \quad [2]$$

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)] \quad [3]$$

onde têm-se que u é a energia de deformação, ε é a deformação, ν é o coeficiente de Poisson e por fim E é o módulo de elasticidade do material.

Ao substituir as três tensões principais tensões, pelas componentes hidrostáticas na equação [3] obtém-se a energia de deformação necessária para causar uma mudança do volume (u_v), dada pela equação [4].

$$u_v = \frac{\sigma_{av}^2}{E} (1 - 2\nu) \quad [4]$$

Ao levar o quadrado da equação [1] a [4] e subtraindo-se o resultado com a equação [3], depois de algumas manipulações chega-se na equação [5], que representa a energia de distorção do estado tridimensional de tensões.

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad [5]$$

Para o caso de um estado uniaxial de tensões têm-se que $\sigma_1 = S_y$, e as demais tensões principais nulas, reduzindo a equação [5] na equação [6].

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad [6]$$

onde S_y é o limite de escoamento do material.

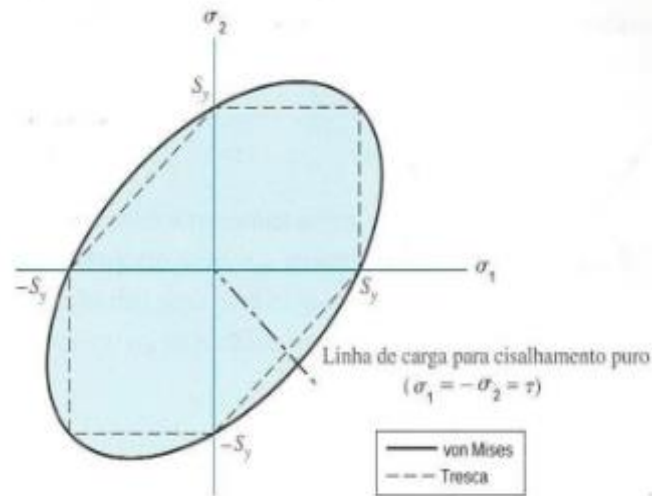
Baseando-se nesse princípio, o critério estabelece uma tensão equivalente, ou uma tensão única, que deve ser comparada com o limite de escoamento do material, onde se a tensão equivalente for maior que o limite de escoamento, o material irá falhar.

Portanto, igualando a equação [5] e [6], têm-se a tensão equivalente de von Mises como:

$$\sigma' = \sqrt{\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]} \quad [7]$$

onde a tensão equivalente de von Mises é representada por σ' , enquanto as tensões triaxiais por $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Figura 8 - Representação gráfica do critério de von Mises.



Fonte: Adaptada de Budynas; Nisbett (2011).

Existe também a representação gráfica do critério de von Mises - vista na Figura 8, uma vez que a representação de um estado plano de tensões principais σ_1 e σ_2 é vista como um ponto coordenado. Considera-se a situação segura, se este ponto estiver dentro da região delimitada pelo critério e pela tensão de escoamento.

2.5.2.2 Critério de Tresca

O critério de Tresca afirma que a falha ocorre quando a tensão de cisalhamento máxima local excede a tensão de cisalhamento máxima do corpo de prova em um ensaio de tração. (Norton, 2013)

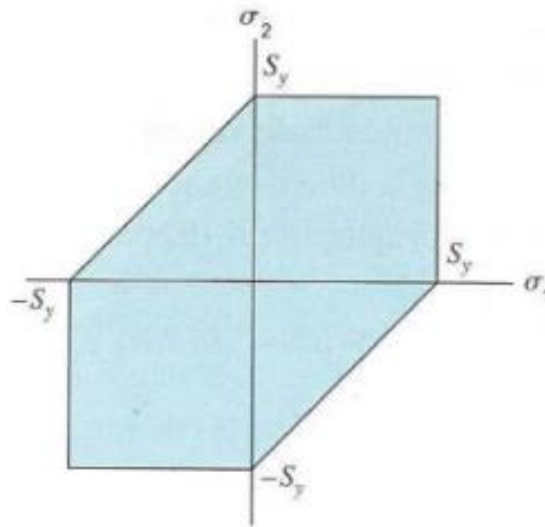
Segundo Norton (2013), a tensão de cisalhamento máxima em ensaio de tração é a metade da tensão de escoamento do material. Nota-se que este critério é um pouco mais conservador do que o de von Mises e está representado na equação [8].

$$\sigma'' = 0,5S_y \quad [8]$$

onde σ'' é a tensão equivalente de Tresca, enquanto S_y é a tensão de cisalhamento no ensaio de tração.

Assim como o critério de von Mises, o de Tresca também pode ser representado graficamente. A Figura 9 mostra o critério de falha de Tresca para um estado plano de tensões.

Figura 9 - Representação gráfica do critério de Tresca.



Fonte: Adaptada de Budynas; Nisbett (2011).

Pode-se dizer que qualquer estado de tensão - representado pelo ponto coordenado, descrito pelas tensões principais σ_1 e σ_2 , dentro da região delimitada pelo critério, está seguro quanto ao escoamento.

2.5.3 Coeficiente de segurança

O coeficiente de segurança, muitas vezes chamado de fator de segurança, é um fator requerido no projeto mecânico para que a operação ocorra de maneira segura. Pode ser expresso de diversas maneiras e é tipicamente a razão entre duas quantidades que possuem as mesmas unidades, como (resistência)/ (tensão atuante), (esforço crítico) / (esforço aplicado), (esforço que quebra a peça)/(esforço esperado em serviço), sendo assim ele sempre é um valor adimensional.

Outra maneira interessante de se referir ao coeficiente de segurança é a incerteza de um projeto ou do próprio projetista. A forma de expressão do coeficiente geralmente é escolhida com base no tipo de esforço exercido sobre a peça. Por exemplo, considere uma treliça que suporte um teto de uma fábrica, desprezando as condições climáticas - dias de chuva, ventanias, queda de neve (para lugares mais frios), podemos dizer que temos um esforço previsível - peso do telhado, ao longo do tempo, portanto, a razão entre a resistência do material da treliça e a tensão causada na mesma devido ao peso do teto pode ser apropriada para o coeficiente de segurança.

O valor de C.S mais baixo de qualquer peça é o mais importante, pois prevê a forma mais provável de falha. Quando seu valor é igual a 1, a tensão na peça é igual à resistência do material (ou a carga aplicada é igual à carga que causa a falha), logo, a falha ocorrerá. Portanto, o C.S deve ser sempre maior que 1.

2.5.3.1 Escolha coeficiente de segurança

A escolha de um coeficiente de segurança é quase sempre uma tarefa confusa para um projetista iniciante. O coeficiente de segurança pode ser pensado como uma medida da incerteza do projetista quanto aos modelos analíticos e teorias de falhas, bem como dados de propriedades do material utilizado, e deve ser escolhido apropriadamente.

A decisão dependerá de diversos fatores, dentre eles pode-se citar a imprecisão do modelo analítico do projeto, da confiança nas informações das propriedades mecânicas do material utilizado, de como esse material é estocado/armazenado, do conhecimento da variação das possíveis condições de cargas em serviço, dentre muitos outros.

Se um modelo não tiver sido tão bem testado ou se as informações das propriedades dos materiais forem menos confiáveis, um C.S maior é recomendável. Entretanto, vale ressaltar que quanto maior o coeficiente de segurança, mais pesado o projeto, acarretando maiores custos e às vezes inviabilizando o mesmo - como é o caso do projeto de aeronaves. Portanto, a escolha do C.S deve ser o suficiente para garantir a segurança do projeto e ao mesmo tempo otimizá-lo.

Há algumas normas que determinam o coeficiente de segurança para determinados projetos e condições, porém a Tabela 2, traz um conjunto de fatores para materiais dúcteis que podem ser escolhidos em cada uma das três categorias listadas com base no julgamento do projetista sobre a qualidade das informações utilizadas. O coeficiente global de segurança é tomado como o maior dos três fatores escolhidos.

Tabela 2 - Fatores utilizados para determinar um coeficiente de segurança para materiais dúcteis.

Informações	Qualidade das informações	Fator
Dados das propriedades dos materiais disponíveis a partir de testes	O material realmente utilizado foi testado	E1 1,3
	Dados representativos de testes do material estão disponíveis	2
	Dados razoavelmente representativos de testes do material estão disponíveis	3
	Dados insuficientemente representativos de testes do material estão disponíveis	5+
		E2
Condições ambientais nos quais será utilizado	São idênticas às condições dos testes de materiais	1,3
	Essencialmente igual ao ambiente de um laboratório comum	2
	Ambiente moderadamente desafiador	3
	Ambiente extremamente desafiador	5+
		E3
Modelos analíticos para forças e tensões	Os modelos foram testados em experimentos	1,3
	Os modelos representam precisamente o sistema	2
	Os modelos representam aproximadamente o sistema	3
	Os modelos são aproximações grosseiras	5+

Fonte: Norton (2013).

2.5.5 Materiais possíveis para a estrutura e componentes

A escolha do material da estrutura é uma etapa crucial do projeto. Faz-se necessário um conhecimento das características de aplicações e especificações do componente, bem como as suas propriedades, no nosso caso, especialmente as mecânicas. Tendo isso em mente, alguns materiais se tornam bons candidatos para a construção da estrutura. Normalmente esses materiais já estão sendo utilizados para a fabricação das cadeiras higiênicas, entre eles pode-se citar os aços, por ter grande disponibilidade e baixo custo. Assim como os aços, as ligas de alumínio também têm grande destaque, por possuírem boas propriedades mecânicas e baixa densidade. E por último o plástico, por ter uma baixa densidade e custo.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de materiais comumente encontrados na construção de cadeiras de banhos.

Material	Densidade [g/cm³]	Poisson	Módulo de Elasticidade [GPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência à Tração [MPa]	Módulo de Cisalhamento [GPa]
Alumínio 6351 -T6	2,71	0,33	69	283	310	26
Alumínio 7050 - T	2,83	0,33	72	469	524	27
Aço 1040	7,9	0,29	200	415	620	80
Aço ASTM A36	7,8	0,26	200	250	400	79
PVC	1,13		5	57	61	

Fonte: Próprio Autor com referência no site Makeitfrom.

3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A maioria dos problemas de engenharia pode ser formulada através dos princípios gerais da Mecânica do Contínuo - ramo da mecânica que trata a matéria como sendo um meio contínuo, sem vazios interiores, desconsiderando sua estrutura molecular.

Esse conceito permite a definição do ponto geométrico - volume igual a zero, por um limite matemático tal como na definição de derivadas no cálculo infinitesimal. Assim, na Mecânica do Contínuo os princípios da física são escritos sob a forma de equações diferenciais, as quais uma solução analítica só é viável para problemas simples.

Para problemas de geometria e condições de contorno complexas adota-se, dentre outros métodos, o dos elementos finitos (MEF, ou FEM do inglês), uma vez que é uma ferramenta numérica com grande capacidade de solução de equações diferenciais parciais e possui uma precisão aceitável.

O MEF é baseado na divisão do continuum em sub-regiões geométricas simples (elementos finitos), que podem ser triângulos, quadriláteros, cubos etc. As subdivisões do contínuo, chamadas de malhas, permitem a resolução parcial de problemas, ou seja, transformar um problema maior em uma série de problemas mais simples.

Segundo Azevedo (2003), entre os aspectos que se deve levar em consideração na fase que antecede uma análise pelo MEF estão: análise dinâmica ou estática; análise linear ou não linear; geometria reticular, laminar ou sólida.

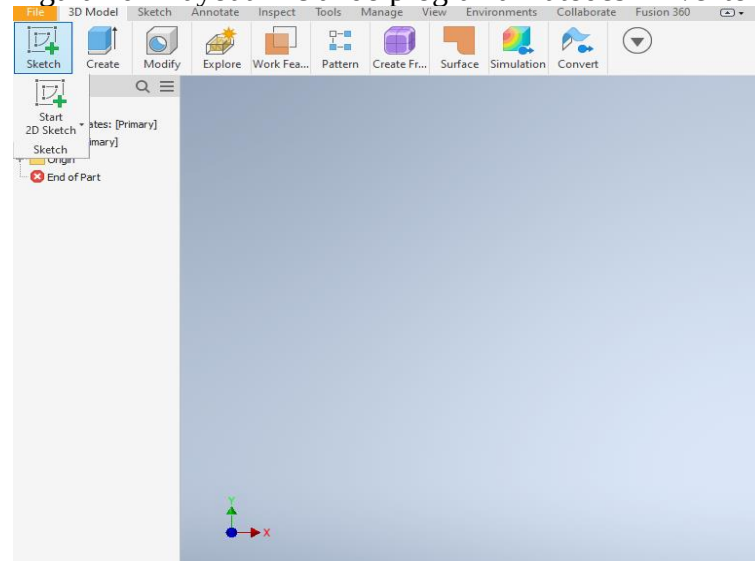
3.1 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NO AUTODESK INVENTOR 2022.

3.1.1 Geração da geometria

A primeira etapa ao realizar uma análise usando o método de elementos finitos no pacote de cálculo é criar a geometria a ser analisada. Em geral, o programa é bastante acessível e de fácil compreensão, mas exige algum esforço por parte do usuário para que os desenhos fiquem o mais próximo possível da realidade.

Na Figura 10 podemos ver uma representação da tela inicial do Inventor e na barra de comando podemos ver algumas funções para a criação de diferentes geometrias - cubo, esfera, entre outras. Após manipulações das formas, cria-se o elemento desejado.

Figura 10 - Layout inicial do programa Autodesk Inventor.



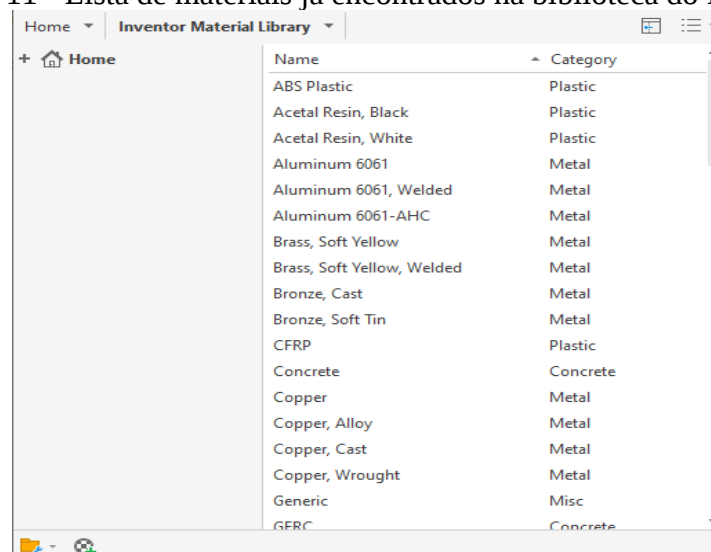
Fonte: Autodesk Inventor (2022).

3.1.2 Inserção dos materiais

Um dos passos importantes na realização de um estudo de tensão é a escolha do material na confecção das peças. O software possui uma biblioteca com os materiais mais comuns - aço inox, alumínio, madeira, vidro, entre outros. Entretanto, caso seu estudo necessite de algum material com uma característica mais singular, há a possibilidade de inseri-lo dentro do programa.

A Figura 11 mostra um dos materiais que podem ser encontrados dentro da biblioteca do programa.

Figura 11 - Lista de materiais já encontrados na biblioteca do Inventor.



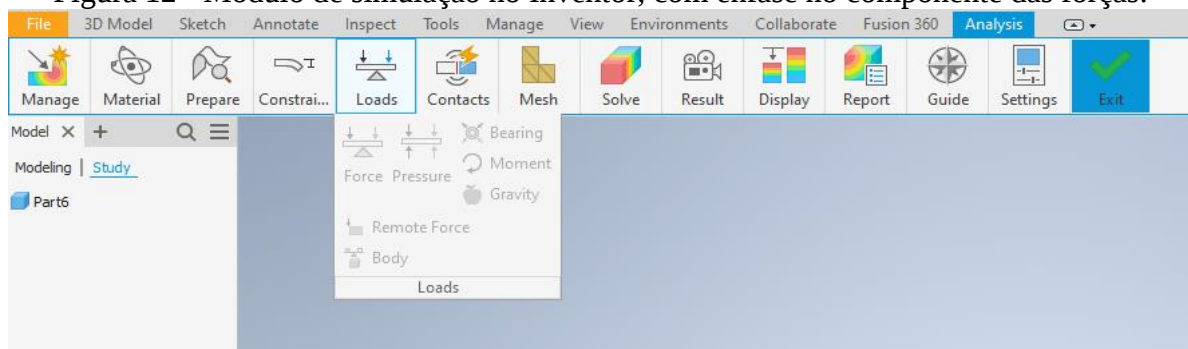
Fonte: Autodesk Inventor (2022).

3.1.3 Inserção dos carregamentos, restrições e material da geometria

O próximo passo na análise é inserir os carregamentos, restrições e materiais. Diferentes modos de carga podem ser selecionados no software, como uma força - carga aplicada em um único ponto; pressão - uma carga distribuída em uma área; momento e até mesmo gravidade.

A Figura 12 mostra uma ênfase dos carregamentos que podem ser aplicados na estrutura que sofrerá a simulação.

Figura 12 - Módulo de simulação no Inventor, com ênfase no componente das forças.



Fonte: Autodesk Inventor (2022).

Semelhante às cargas, ao listar as restrições - que podem ser vistas na Figura 13, pode-se também escolher diferentes opções de acordo com a condição real que a geometria suporta.

Essas restrições podem ser chamadas de “fixas” - Remove todos os graus de liberdade; “pino” o qual impede que as faces se movam ou se deformam em combinações de direções radiais, axiais ou tangenciais, e por último “sem fricção” - Aplicar a uma superfície plana ou cilíndrica. Impede que a superfície se mova ou se deforme na direção perpendicular relativa à superfície.

Figura 13 - Módulo de simulação no Inventor, com ênfase no componente das restrições.



Fonte: Autodesk Inventor (2022).

3.1.4 Criação da malha computacional

Uma das etapas mais importantes na execução da análise computacional é a criação da malha, que nada mais é do que a divisão de um modelo em um número equivalente de elementos finitos, que podem ser de diferentes tipos e dimensões. Esses elementos são formados por nós, que podem ser internos ou externos, ou seja, pertencem ao interior do elemento ou estão localizados na borda do elemento. A criação da malha grade computacional pode ser controlada no feixe para que os elementos possam ser redimensionados.

No programa Autodesk Inventor a malha é gerada como uma sobreposição na geometria do modelo. As contagens de malha, nós e elementos são exibidas no canto da visualização da página. A visibilidade da contagem de nós e elementos é gerenciada com informações da barra de cores se os resultados da simulação também estiverem visíveis (Autodesk Inventor, 2019). Portanto, para resultados visíveis, quando a visibilidade da barra de cores estiver desativada, as contagens de nós e elementos também não estarão visíveis.

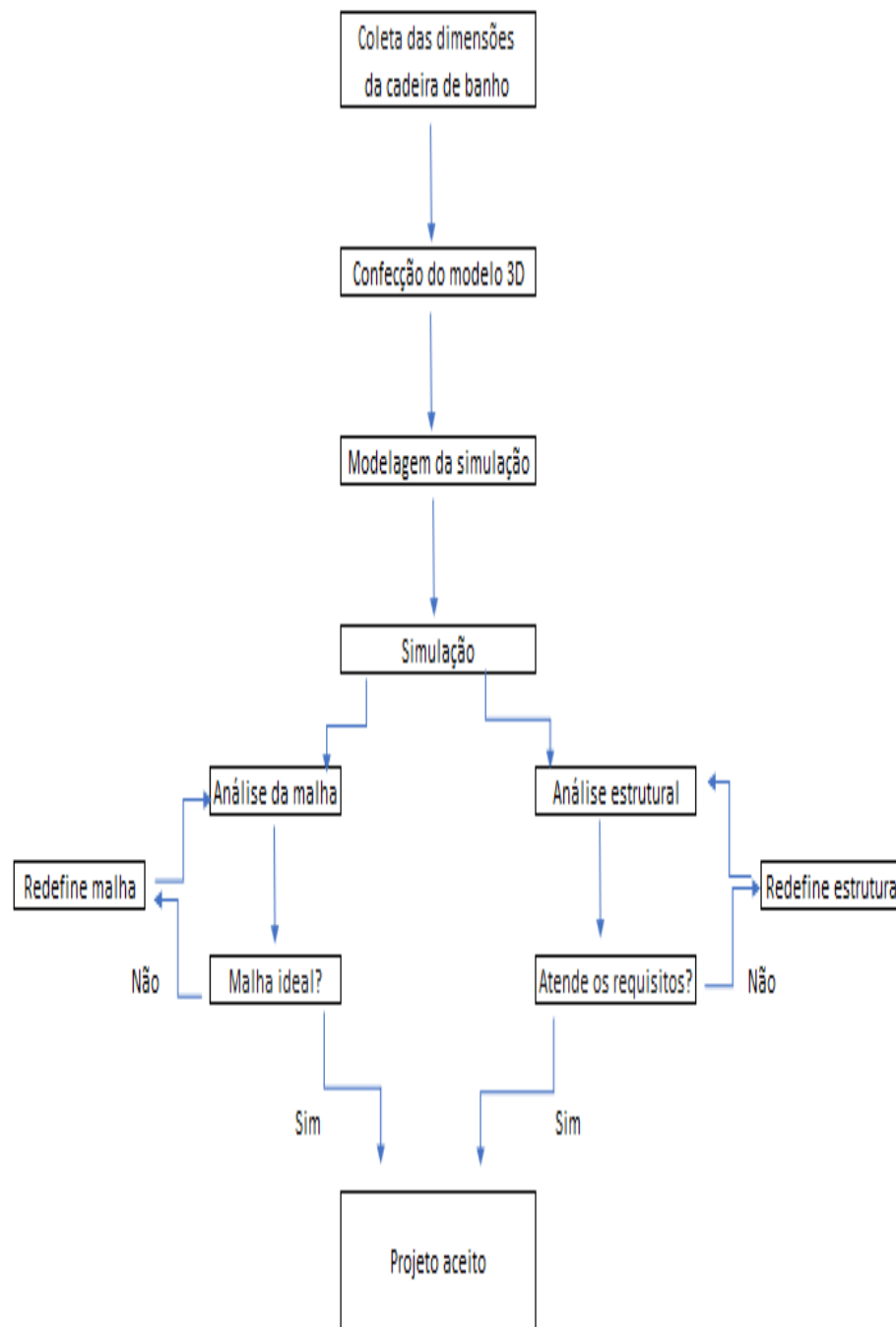
Para a criação da malha pode-se aceitar a malha padrão e continuar a simulação, ajustar as configurações da malha ou usar os controles de malha locais ou usar a exibição de malha para sobrepor uma malha nos resultados da simulação para ver onde as concentrações de tensão são relativas aos elementos da malha. No projeto em questão utilizou-se a malha padrão.

3.1.5 Execução da análise e obtenção dos resultados

O último passo é a execução da análise dentro do pacote computacional. Nesta etapa as equações de tensões, deformações e deslocamentos são resolvidas através do método dos elementos finitos, para posteriormente serem mostrados os resultados das saídas gráficas de tensões, deformações e deslocamento.

Nesta etapa será apresentada a metodologia utilizada para alcançar os objetivos do trabalho. A Figura 14 traz um fluxograma das atividades que foram desenvolvidas.

Figura 14 - Fluxograma de atividades.



Fonte: Próprio autor.

A metodologia utilizada para cada atividade é descrita a seguir:

- revisão bibliográfica: foi realizada uma pesquisa a bibliografia existente, procurando um embasamento teórico para o desenvolvimento das atividades seguintes, bem como um benchmarking das cadeiras higiênicas;
- modelagem 3D: com base na revisão bibliográfica, foi desenvolvida a concepção da estrutura simplificada da cadeira de rodas, atendendo as especificações de norma e uso. Primeiramente foi construído um modelo 3D da estrutura, seguindo as dimensões especificadas pela ABNT NBR 9050, utilizando para isto o software Inventor.
- simulação da estrutura: a partir do modelo 3D da estrutura simplificada, será feita a modelagem e simulação numérica da mesma, para determinar se esta suportará os esforços impostos. A simulação numérica será realizada pelo método dos elementos finitos utilizando o mesmo software.

Por fim, a imagem abaixo traz um cronograma, o qual as atividades realizadas obedeceram.

Tabela 4 - Cronograma de atividades.

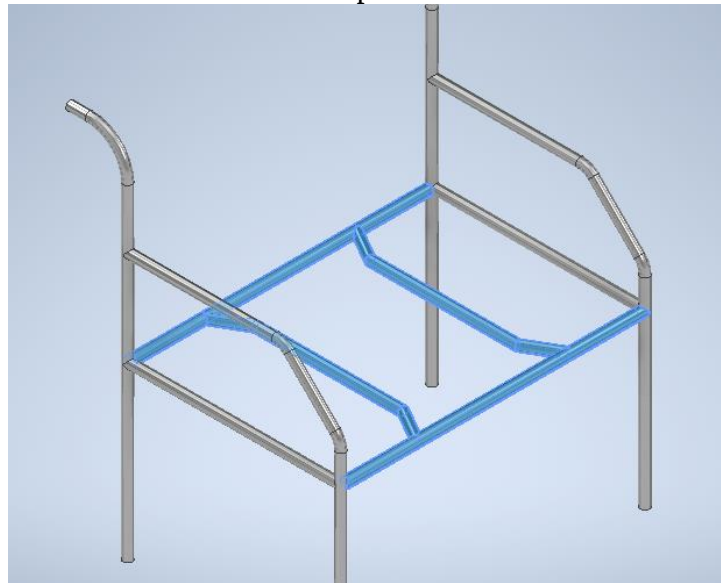
Atividades	Período de desenvolvimento							
	2022							2023
	J u n	J u l	A g o	S e t	O t	N o v	D e z	J a n
Revisão bibliográfica	X	X	X					
Concepção de design, projeto mecânico		X	X	X				
Análise e cálculos			X	X	X	X		
Desenhos e modelagem 3D				X	X	X	X	
Redação do trabalho			X	X	X	X	X	X

Fonte: Próprio autor.

4.1 PRÉ DIMENSIONAMENTO DA CADEIRA HIGIÊNICA

Antes de realizar o esboço da cadeira no software, fez-se uma análise de tensões nos pontos mais críticos da mesma, levando em consideração as barras marcadas em azul na Figura 15, que formam o assento da cadeira. Esse esboço foi realizado uma vez que todas as medidas da cadeira já estavam descritas pela norma ABNT 9050 e só restava encontrar o perfil tubular apropriado para ser utilizado a fim de suportar a carga mínima de 250kg, ou 2500N.

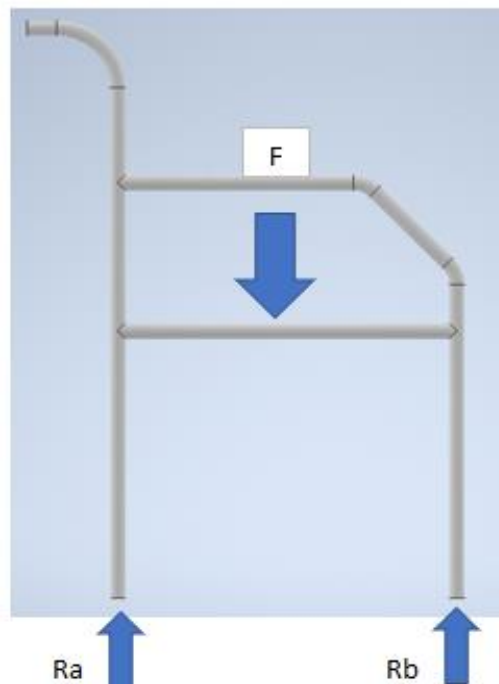
Figura 15 - Cadeira higiênica utilizada para simulação, com ênfase nas barras onde as forças serão aplicadas.



Fonte: Próprio autor.

A carga poderia ser pontual e aplicada no centro da cadeira higiênica, todavia optou-se por uma distribuição nas barras que formam o assento. Pela simetria do problema dividiu-se, então, igualmente a carga por quatro, visto que é o número de barras em que ela é apoiada. Portanto, a força F da Figura 16 equivale a 625 N.

Figura 16 - Representação lateral das forças.



Fonte: Próprio autor.

Sabe-se que o somatório das forças no eixo Y deve ser nulo para uma estrutura estaticamente equilibrada. Utilizando a equação [9], encontram-se os valores de R_a e R_b , que pela simetria, são metade do valor de F .

$$\sum F_y = 0 \quad [9]$$

Analisando cada uma dessas barras separadamente e tratando o peso do paciente sentado como uma força localizada em um único ponto, a análise mecânica é feita e tratada como uma viga bi engastada e o esforço pontual será exercido sobre ela em dois planos: xy e xz. A Figura 17 representa a barra desenhada no software para melhor visualização do problema.

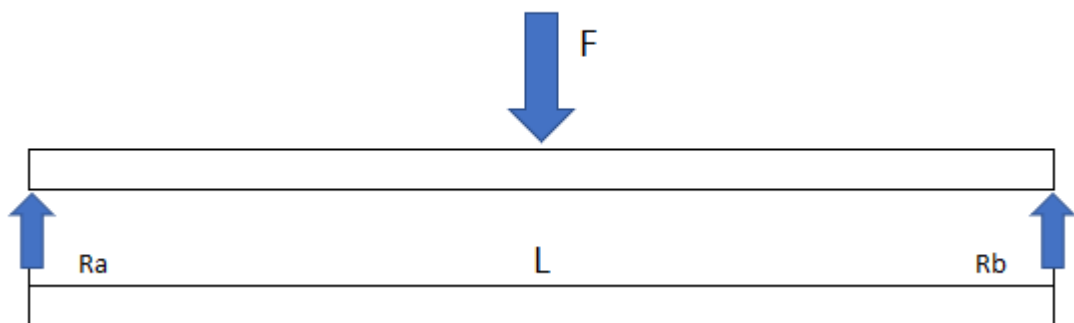
Figura 17 - Representação da barra no software Autodesk Inventor.



Fonte: Próprio autor.

Utilizando a Figura 18 do Diagrama de Corpo Livre da barra, encontra-se o diagrama de esforço cortante (DEC) sobre as vigas e por consequência o esforço cortante máximo na estrutura; Tal diagrama é apresentado na Figura 19.

Figura 18 - Diagrama de Corpo Livre da barra (DCL).



Fonte: Próprio autor.

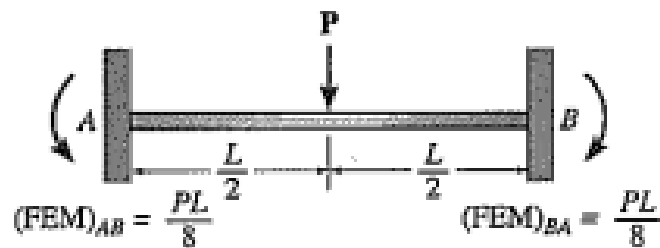
Figura 19 - Diagrama de esforço cortante da barra (DEC).



Fonte: Próprio autor.

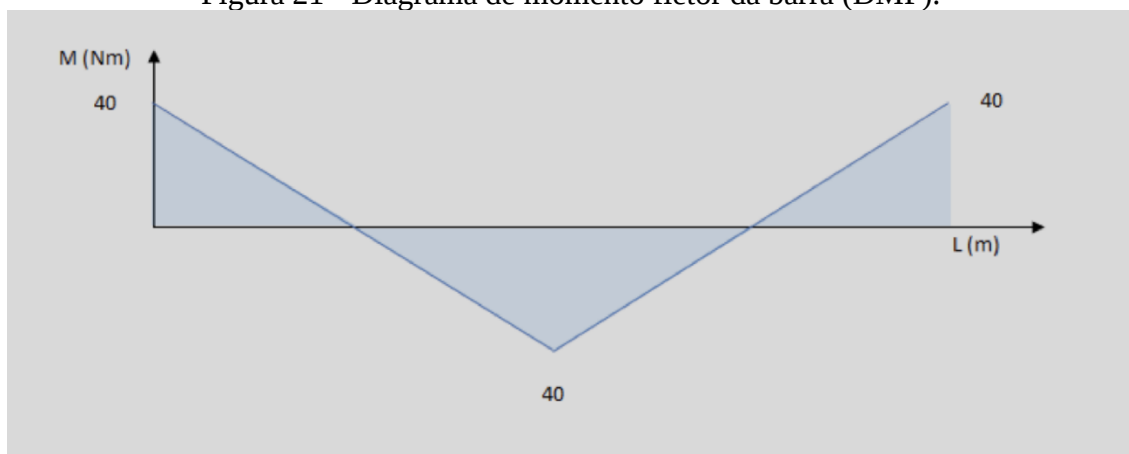
Já o momento fletor máximo pode ser encontrado com base na Figura 20 utilizando a equação [10] e pode-se também obter o diagrama de momento fletor (DMF), visualizado na Figura 21.

Figura 20 - Momento fletor para uma viga bi engastada.



Fonte: Hibbeler (2013).

Figura 21 - Diagrama de momento fletor da barra (DMF).



Fonte: Próprio autor.

$$M = \frac{FL}{8} \quad [10]$$

Obtido os valores máximos do esforço cortante e do momento fletor é possível encontrar as tensões normais e de cisalhamento atuantes na viga por meio das Equações [11] e [12], respectivamente. Vale ressaltar que a parte superior da barra sofre uma tensão de compressão enquanto a parte inferior da barra está sob uma tensão de tração.

$$\sigma = \frac{MD_{ext}}{2I} \quad [11]$$

Onde M é o momento fletor máximo encontrado, D é o diâmetro externo da barra e I é o momento de inércia dado pela Equação [13].

$$\tau = \frac{VQ}{ID} \quad [12]$$

Onde V é o esforço cortante máximo, Q é o momento estático da área A' em relação à linha neutra dado pela Equação [14].

$$I = \frac{\pi}{64}(D_{ext}^4 - d_{int}^4) \quad [13]$$

Onde d é o diâmetro interno do tubo vazado.

$$Q = \underline{y'} \underline{A'} \quad [14]$$

Onde A' é a área da seção transversal do segmento acoplado à viga na junção onde o fluxo de cisalhamento deve ser calculado e y' é a coordenada y do centroide da área A'. Para uma seção transversal circular vazada, a Equação [12] pode ser descrita como na Equação [15].

$$\tau_{max} = 1,33 \frac{V}{A} \left(\frac{R_{ext}^2 + R_{ext}r_{int} + r_{int}^2}{R_{ext}^2 + r_{int}^2} \right) \quad [15]$$

Onde R_{ext} é o raio externo, enquanto r_{int} é o raio interno. Sabe-se também que a tensão

admissível pode ser dada pela Equação [16].

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{escoamento}}{CS} \quad [16]$$

Onde CS é o coeficiente de segurança de projeto e $\sigma_{escoamento}$ é a tensão de escoamento do material - encontrada na Tabela 3.

Após uma detalhada análise percebeu que a tensão máxima normal ocorre no ponto mais externo da barra - quando o diâmetro externo é máximo, porém nesse ponto sabe-se que a tensão de cisalhamento é nula. Por outro lado, a tensão máxima de cisalhamento ocorre no centro da barra, onde pela equação é notável que a tensão normal é igual a zero.

Portanto, para obter os diâmetros da barra e por fim, o seu perfil, utilizou-se somente a tensão máxima normal, pois é sabido que ela é, na maioria dos casos, maior do que a tensão de cisalhamento.

Para encontrar os diâmetros igualou-se as Equações [11] e [16] e depois de algumas manipulações matemáticas, contou com duas incógnitas, o diâmetro externo (Dext) e o interno (dint), como pode ser visto pela Equação [17].

$$\frac{D_{ext}}{(D_{ext}^4 - d_{int}^4)} = \frac{\frac{\pi}{32} \chi \sigma_{escoamento}}{M \times CS} \quad [17]$$

Os demais parâmetros como o valor máximo de momento fletor (M) foi encontrado pela Equação 10, a tensão limite de escoamento ($\sigma_{escoamento}$) é vista na Tabela 3 - para o Alumínio 6351-T6 e por fim o CS adotado igual a 3, levando em consideração a Tabela 2 para uma ocasião de um ambiente moderadamente desafiador

Assumindo o valor de um diâmetro externo é possível encontrar o valor máximo do diâmetro interno para satisfazer as condições impostas. Admitiu-se como diâmetro externo o valor de 25,4mm, ou 1", pois é um perfil tubular facilmente encontrado no mercado.

O diâmetro interno máximo requerido é de 23,4mm, sendo assim uma espessura mínima de 1 mm, entretanto utilizou-se um perfil tubular com as especificações 25, 4mm diâmetro externo X 3,17mm de espessura X 19,05mm diâmetro interno (1" diâmetro externo X 1/8" de espessura X 3/4" diâmetro interno).

Por fim verificou-se a tensão de cisalhamento, utilizando a Equação 15 e encontrou uma tensão de cisalhamento máxima aproximadamente igual a 3 MPa, valor muito baixo e, portanto, não haverá ruptura.

4.2 GEOMETRIA NO CAD

Com atenção ao escopo e dando ênfase aos requisitos listados como mais importantes para o projeto da cadeira de rodas, desenvolveu-se uma concepção da mesma, utilizando para tal o software Autodesk Inventor. Esta concepção pode ser notada na Figura 22, bem como suas dimensões, vistas na Tabela 5 e seu desenho técnico, encontrado na Figura 23.

Tabela 5 - Dimensões da cadeira higiênica realizada no software Inventor.

Cadeira Higiênica	
altura	1070 mm
largura	840 mm
comprimento	1045 mm
largura assento	775 mm
comprimento assento	510 mm
diâmetro da roda	100 mm
peso da estrutura	7 kg
capacidade	250 kg
Tubo Estrutural	
diâmetro externo	25,40 mm
diâmetro interno	19,05mm

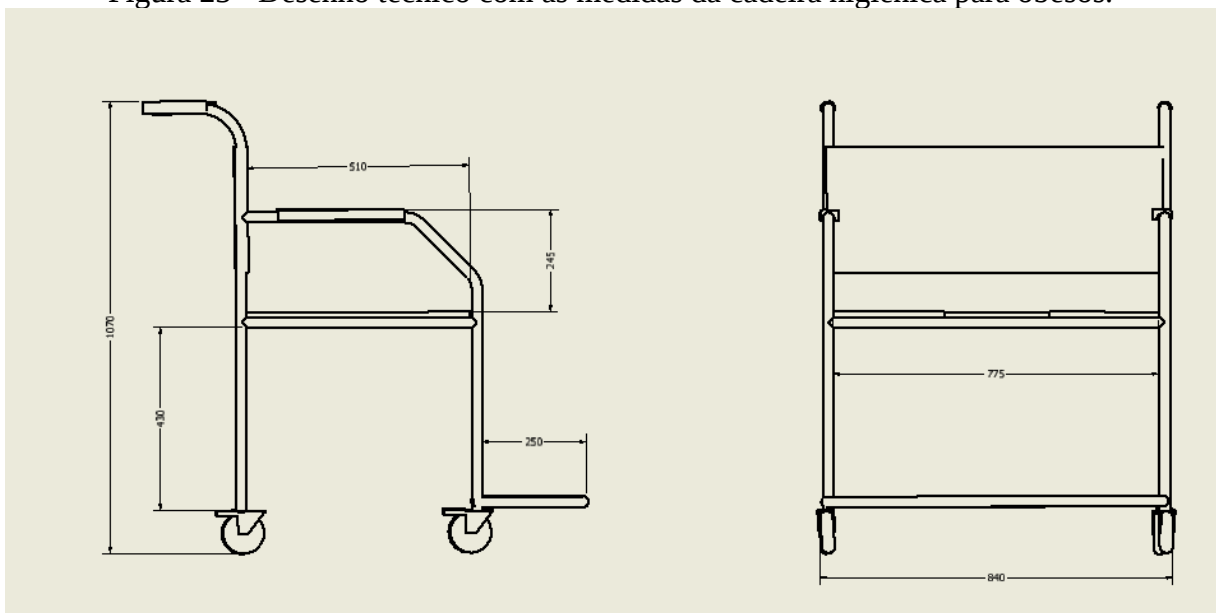
Fonte: Próprio autor.

Figura 22 - Desenho ilustrativo da cadeira higiênica para obesos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 - Desenho técnico com as medidas da cadeira higiênica para obesos.

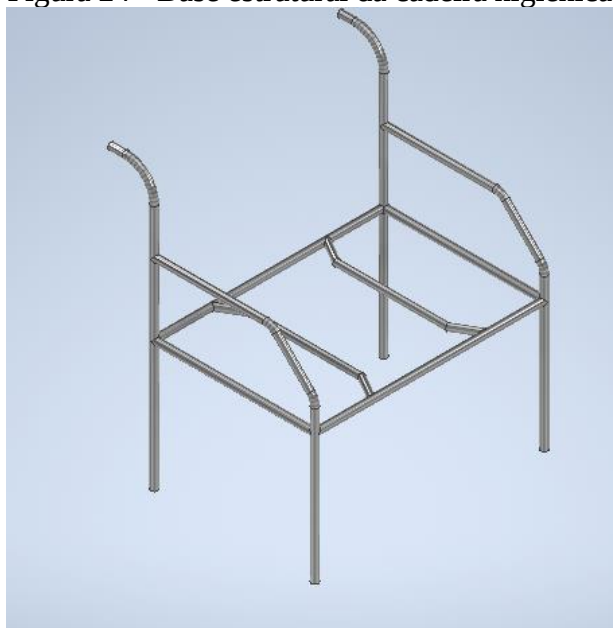


Fonte: Próprio autor.

4.3 ESTRUTURA APLICADA NA SIMULAÇÃO

A fim de facilitar a simulação foi utilizado somente a base estrutural da cadeira, como pode ser visto na Figura 24. Para as simulações, foi utilizado o programa Autodesk Inventor 2022.

Figura 24 - Base estrutural da cadeira higiênica.



Fonte: Próprio autor.

4.4 MATERIAL APLICADO NA SIMULAÇÃO

Dentre os materiais descritos no tópico 2.5.5 descartou-se inicialmente o PVC, uma vez que possui pequena resistência mecânica e para suportar o peso necessário, teria que se usar um diâmetro de tubo com dimensões muito maiores do que o normal, tornando o projeto inviável.

Apesar do aço possuir uma maior resistência aos esforços solicitados e uma boa disponibilidade no mercado, possui também uma densidade maior, fazendo com que a cadeira ficasse mais pesada - cerca de 30kg, o que tornaria o processo difícil para os que a utilizariam.

Portanto, utilizou-se o alumínio 6351-T6, por possuir boa soldabilidade, propriedades mecânicas desejadas e um custo relativo menor se comparado ao alumínio 7050. Como esse material não existia na biblioteca do programa, fez-se necessário sua implementação, como é visto na Figura 25.

Figura 25 - Caracterização do material Alumínio 6351-T6 no Inventor com as principais propriedades mecânicas tiradas da Tabela 3.

The image shows a screenshot of the 'Material Editor: Alumínio 6351 - T6' window in Autodesk Inventor. The 'Physical' tab is selected, and the 'Mechanical' section is expanded. The following properties are defined:

Property	Value
Behavior	Isotropic
Young's Modulus	9,993E+06 psi
Poisson's Ratio	0,33
Shear Modulus	3,771E+06 psi
Density	0,098 pound per cubic inch
Strength	
Yield Strength	4,140E+04 psi
Tensile Strength	4,496E+04 psi

Fonte: Próprio autor.

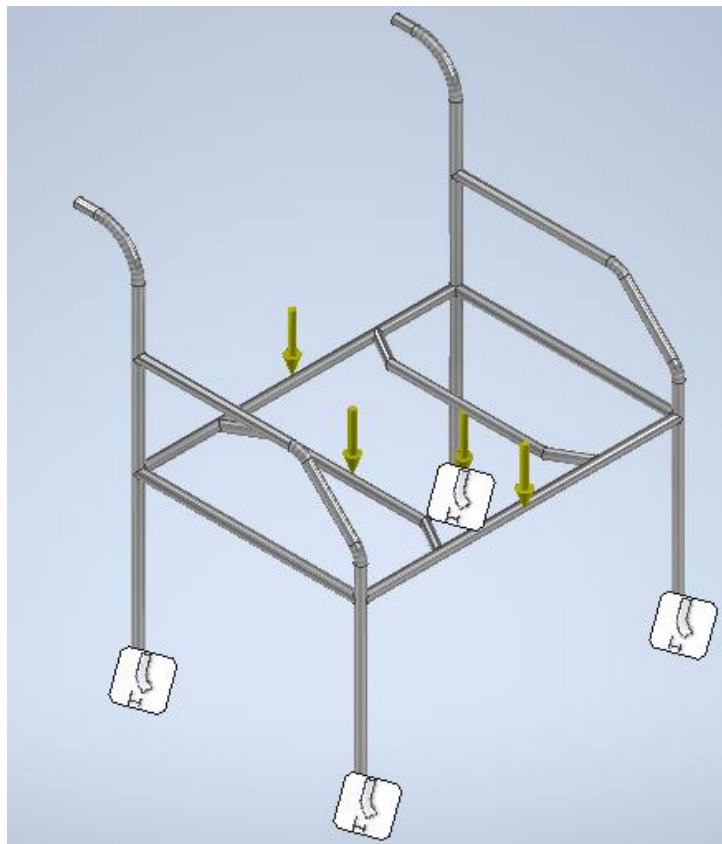
4.5 CARGAS APLICADAS NA SIMULAÇÃO

Para simular o regime estrutural estático da cadeira de banho, ao invés de representar o peso do paciente por uma única força de 250 kg (carga descrita pela norma ABNT 9050) - ou aproximadamente 2500 N no centro do assento da cadeira de banho, foi utilizado 4 cargas de mesma magnitude (625 N) distribuídas nas 4 barras que formam o assento, como foi citado anteriormente. Isso pôde ser feito pela simetria do problema e ajudou a contornar o obstáculo encontrado onde o programa assimila melhor cargas que estejam em contato com alguma face da estrutura.

Além disso, na parte de restrição foram colocados como fixos os 4 pés da cadeira, simulando as rodas travadas durante o uso da cadeira.

Vale ressaltar que também foi adicionado o vetor gravidade atuando na vertical apontando para baixo. Todas essas cargas podem ser vistas na Figura 26.

Figura 26 - Forças e restrições aplicadas na estrutura da cadeira para a simulação.

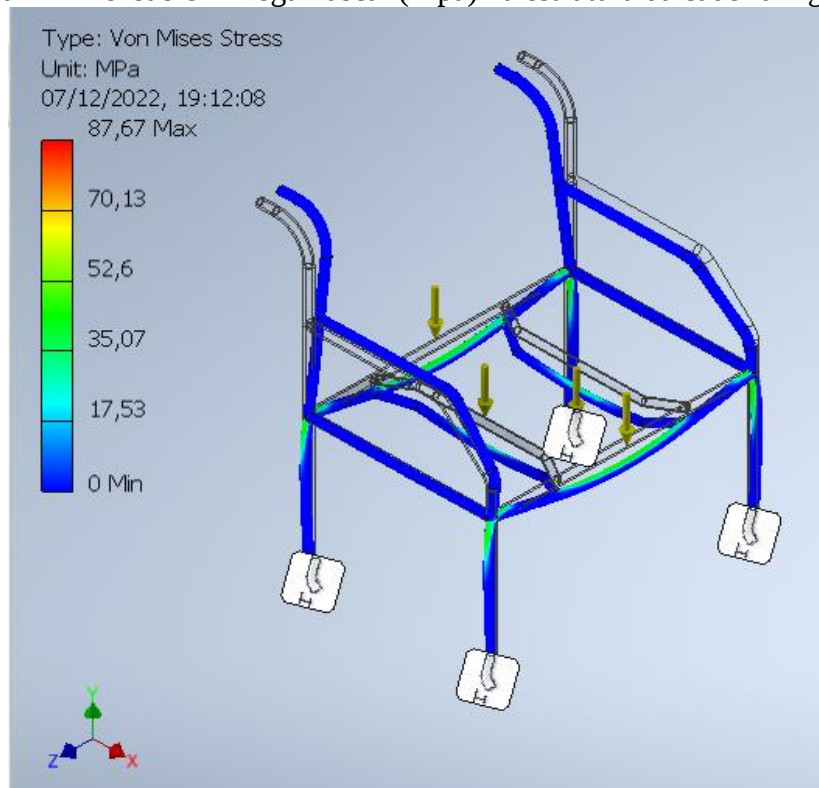


Fonte: Próprio autor.

4.6 TENSÕES E DESLOCAMENTOS NA ESTRUTURA

Os valores das tensões e deslocamento total atuantes da estrutura da cadeira higiênica foram obtidos por uma análise computacional, utilizando o método dos elementos finitos, no software Inventor, e podem ser vistas na Figura 27 e Figura 28, respectivamente. Vale ressaltar que a carga aplicada está distribuída uniformemente pelo suporte do assento, situação em que a pessoa se encontra sentada.

Figura 27 - Tensão em mega Pascal (Mpa) na estrutura da cadeira higiênica.

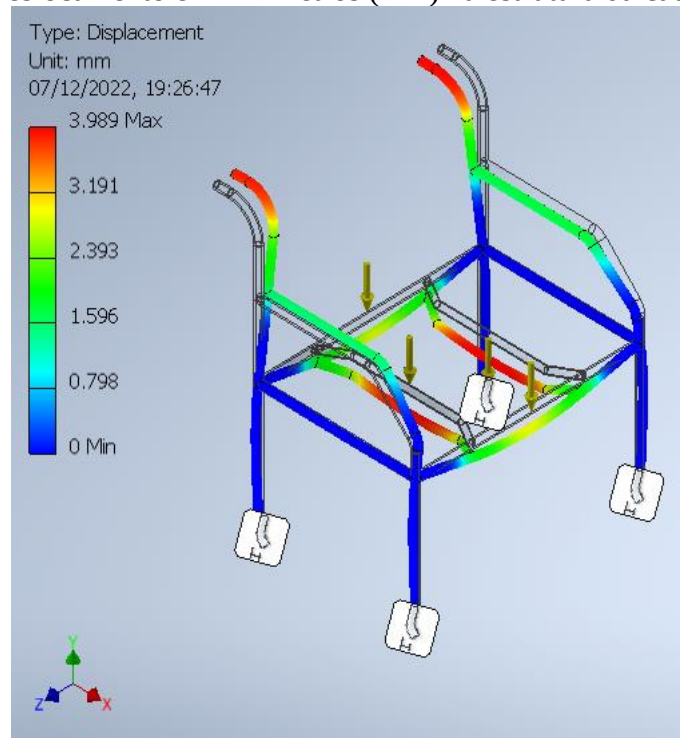


Fonte: Próprio autor.

Da Figura 29 tem-se que a tensão máxima na estrutura é de aproximadamente 88 MPa, no ponto mais crítico como o material de construção da cadeira de rodas (liga de alumínio ABNT 6351-T6) tem um limite de escoamento de 283 MPa, obtém-se um coeficiente de segurança maior que 3 para o escoamento do material atendendo aos requisitos do projeto.

Para garantir a validade dos resultados foram realizados sucessivos refinamentos de malha no ponto crítico (destacado no quadro vermelho), utilizando uma região de influência esférica com centro no furo, até obter a convergência das tensões equivalentes encontradas.

Figura 28 - Deslocamento em milímetros (mm) na estrutura da cadeira higiênica.

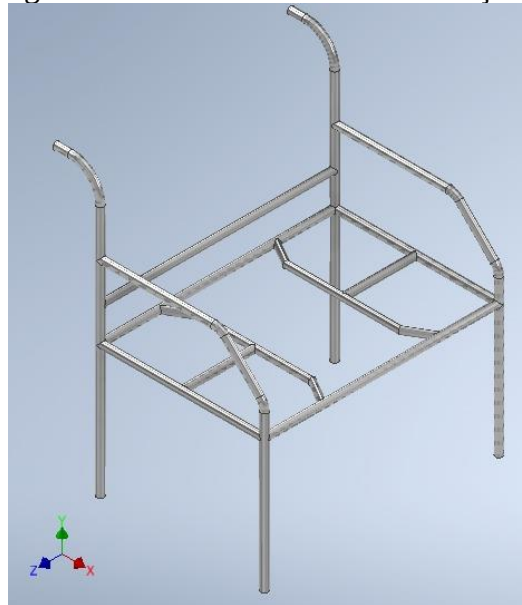


Fonte: Próprio autor.

O deslocamento principal analisado no problema é aquele vertical para baixo - na orientação do eixo Y, e na situação mostrada foi encontrada uma variação de 4 mm, a qual pode ser vista na Figura 28.

Tal deslocamento ficou maior do que esperado – um valor próximo a zero era necessário para atender aos requisitos do projeto, portanto, propôs-se uma nova estrutura com um reforço para o assento e uma barra fixando o encosto da cadeira, evitando sua deflexão e diminuindo o deslocamento máximo da estrutura, a nova versão pode ser vista na Figura 29.

Figura 29 – Estrutura com barra reforçada.

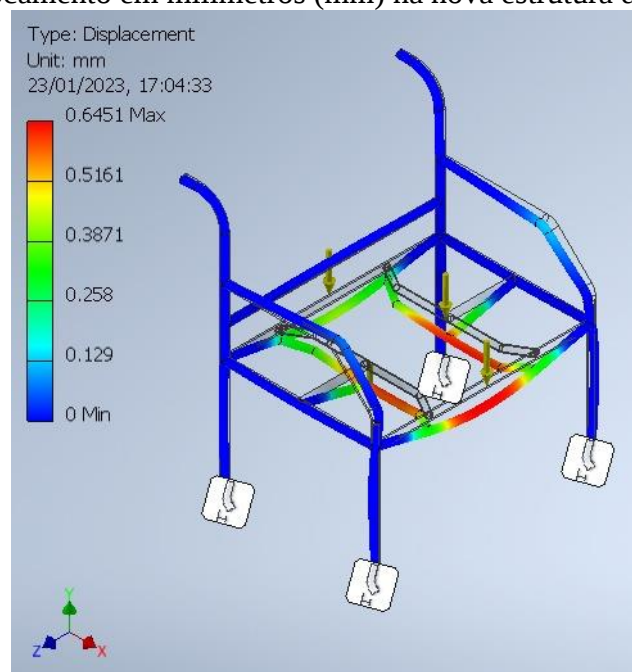


Fonte: Próprio autor.

4.7 DESLOCAMENTOS NA NOVA ESTRUTURA

Após uma nova análise na nova estrutura, utilizando as mesmas restrições e as mesmas cargas, encontrou-se um deslocamento máximo de aproximadamente igual a 0,65mm – o qual pode ser visto na Figura 30, valor bem próximo de zero e que atende aos requisitos.

Figura 30 - Deslocamento em milímetros (mm) na nova estrutura da cadeira higiênica.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

A partir das especificações do projeto pré-estabelecidas pela norma ABNT 9050 e do método de análise de tensões realizou-se o projeto de uma cadeira higiênica para pessoas obesas, que foi desenhada no software Autodesk Inventor com as vistas necessárias para o desenho técnico e com um modelo 3D, a fim de melhorar a visualização do entendimento. Em suma, os objetivos propostos foram integralmente atingidos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050**: acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BEER, F. P. *et al.* **Mecânica dos materiais**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2021. 881 p.

CASTRO SOBRINHO, A. S. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2006.

COSTA, A. H. P. **Projeto de uma cadeira de rodas modular**. Brasília, 2018. 181f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, 2018.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos materiais**. 8.ed. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2013.

LACAZ, F. A. C. Qualidade de vida no trabalho e saúde/doença. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 151-161, 2000.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

REBOUÇAS, A.J.A. *et al.* **Insalubridade**: morte lenta no trabalho. São Paulo: Oboré, 1989.

SANTOS, L. O.; MACHADO, R. P. **Desenvolvimento de uma cadeira de rodas motorizada de baixo custo para crianças de até 9 anos**. Curitiba, 2018. 107f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

UNIVERSITY OF SURREY. **Ergonomics research unit. Back pain in nurses**: summary and recommendations. Guildford, 1986.

WHO. **Obesity**: preventing and managing the global epidemic, in Report of WHO Consultation on Obesity. Geneva: World Health Organization, 1997.

WHO. **Occupational hazards in hospitals**. Copenhagen, 1981. (EURO Reports and Studies 80).