

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Título: AVALIAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE TESTES
PARA CADEIRA DE RODAS**

Marcos Kazuhiro Momose

**São Paulo
2006**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Título: AVALIAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE TESTES
PARA CADEIRA DE RODAS**

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Graduação em Engenharia.

Marcos Kazuhiro Momose

Orientador: Raul Gonzales

**São Paulo
2006**

FICHA CATALOGRÁFICA

Momose, Marcos Kazuhiro

**Avaliação e construção de uma máquina de testes para cadeira de rodas / M.K. Momose.-- São Paulo, 2006.
42 p.**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

**1.Cadeira de rodas (Testes) 2.Método dos elementos finitos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Hiroko e Hiroshi, e à
meus irmãos, Adriana e Maurício.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Raul Gonzáles Lima pela atenção e acompanhamento das atividades desta dissertação.

Ao Laboratório de Bioengenharia do Instituto de Ortopedia e Traumatologia do Hospital das Clínicas e ao Ronaldo de Souza Moraes Junior por todo o apoio e incentivo dados para a realização deste Trabalho.

Aos colegas de curso José Ricardo Dutra, Rodrigo Andreos Cordeiro, Henry Shibayama e Rafael Sasso de Campos, pela ajuda nas atividades desenvolvidas em sala de aula e que complementaram o desenvolvimento do tema.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram com a preparação deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste Trabalho de Formatura consiste na análise de elementos finitos de uma máquina de testes para cadeiras de rodas. Esta máquina está sendo construída no IOT – Instituto de Ortopedia e Traumatologia do Hospital das Clínicas, dentro do laboratório de bioengenharia, e tem como principal função avaliar cadeiras de rodas utilizadas no país quanto à resistência à fadiga. Tais testes podem dar novas especificações de projeto para cadeiras de rodas no Brasil, já que até então o país não fazia nenhum teste deste nível nestes produtos. A máquina já está sendo construída. Deste modo se for detectada alguma não conformidade, esta será reparada de modo a se evitar eventuais falhas no futuro. Se existir interesse na construção de outras máquinas, estas poderão ser melhoradas, já que teremos todos os resultados deste primeiro equipamento.

ABSTRACT

The objective of this Work consists on a finite elements analysis of a test machine for wheelchairs. This machine is being constructed in the IOT - Orthopedic and Traumatology Institute in "Hospital das Clínicas" and its principal function is to evaluate fatigue strength on wheel chairs used in Brazil, once fatigue tests are not being performed. Such tests can give new design specifications for wheelchairs. The machine is already being constructed, so if any non conformity is detected, the test machine will be repaired to prevent failures. If there is some interest in the construction of other machines, the design could be improved using the results of this work.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1.	Introdução	1
1.1	O Instituto de Traumatologia e Ortopedia	2
2.	Avaliação da Viabilidade Técnico-Econômica	3
3.	Máquina de Testes de Fadiga	4
3.1	Norma ISO 7176-8: 1998(E)	4
3.2	Comentários sobre a Norma	7
4.	Análise de Elementos Finitos	13
5.	Desenhos CAD do Equipamento.	14
6.	Análise Estática	16
6.1	Exemplo de Aplicação do Software Winfelt	16
6.2	Arquivo de entrada para o Winfelt	17
7.	Análise Estática utilizando elementos de Viga	19
7.1	Divisão do Problema em Nós	19
7.2	Referências dos nós e barras:	20
8.	Código Fonte Winfelt	22
9.	Resultados	23

10. Análise 3D no perfil da barra	27
10.1 Perfil da barra a ser estudada	27
11. Simulações 3D.	29
11.1 Geração da malha no perfil	29
11.2 Definição das forças aplicadas na barra	30
11.3 Definição da tensão de escoamento a fadiga.....	31
11.4 Resultados da simulação	32
11.5 Análise de falha da barra.....	36
12. Conclusão.....	41
13. Referências.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Complexo Hospital das Clínicas.	1
Figura 2 - Disposição correta dos dois tambores.	3
Figura 3 - Ressaltos nos tambores.	4
Figura 4 - Dimensões dos ressaltos.	4
Figura 5 - Defasagem dos ressaltos.	5
Figura 6 - Detalhe das polias dos tambores.	7
Figura 7 - Detalhe dos ressaltos construídos.	8
Figura 8 - Ressaltos defasados em 180°.	9
Figura 9 - Detalhe do boneco de testes.	10
Figura 10 - Lateral da cadeira + boneco de testes.	11
Figura 11 - Esquema da Máquina de Testes.	12
Figura 12 - Desenho de Conjunto	13
Figura 13 - Desenho de Conjunto com Proteção nas Partes Girantes.	14
Figura 14 - Viga Sob Forças de Tração.	15
Figura 15 - Discretização do Problema.	16
Figura 16 - Gráfico de Contorno.	17
Figura 17 - Discretização em Nós.	18
Figura 18 - Convenção de sinais do winfelt.	24
Figura 19 - Detalhe do perfil da barra 50x100x1325mm.	26
Figura 20 - Vista isométrica da barra de 50x100x1325mm.	27
Figura 21- Malha gerada no perfil.	28
Figura 22 - Malha gerada em toda a barra.	29
Figura 23 - Tensões na barra.	31
Figura 24 - Tensões na barra - Vista inferior.	32
Figura 25 - Tensões na barra - Vista superior.	32
Figura 26 - Detalhe das tensões agindo no perfil.	33
Figura 27 - Deslocamento dos pontos da barra.	34
Figura 28 - Disposição dos pontos da barra-Vista superior.	34
Figura 29 - Disposição dos pontos da barra-Vista inferior.	35
Figura 30 - Pontos de ocorrência de falha para FS=3.	36
Figura 31 - Pontos de ocorrência de falha para FS=3 - Vista superior.	36
Figura 32 - Pontos de ocorrência de falha para FS=3 - Vista inferior.	37
Figura 33 - Pontos de ocorrência de falha para FS=10.	37
Figura 34 - Pontos de ocorrência de falha para FS=10 - Vista superior.	38
Figura 35 - Pontos de ocorrência de falha para FS=10 - Vista inferior.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de Deficientes Divididos por Região.	1
Tabela 2 - Número de Deficientes Divididos por Tipo.	1
Tabela 3 – Arquivo de entrada para o Winfelt.	17
Tabela 4 – Solução para o problema proposto.	18
Tabela 5 – Configuração das barras.	20
Tabela 6 - Referência dos nós.	20
Tabela 7 - Referência dos vínculos.	21
Tabela 8 - Referência para as forças.	21
Tabela 9 - Referência para os apoios.	21
Tabela 10 - Propriedades do material.	21
Tabela 11 - Propriedades da secção.	21
Tabela 12 – Arquivo de entrada para máquina de testes.	22
Tabela 13 - Disposição dos nós.	23
Tabela 14 – Forças cortantes e momentos fletores em cada nó.	24
Tabela 15 - Forças de reação.	24
Tabela 16 - Tabela que mostra a disposição de cada nó.	25
Tabela 17 - Tabela de resultados para força cortante e momento fletor.	25
Tabela 18 - Estimativa das novas forças.	31
Tabela 19 - Total das forças agindo na barra.	31
Tabela 20 - Forças em cada mancal.	31

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), existem mais de 600 milhões de pessoas com necessidades especiais no mundo. No Brasil o ultimo Censo (ano de 2000) mostrou que cerca de 25 milhões de pessoas possui algum tipo de necessidade especial, o que corresponde a 15% da população. Abaixo seguem duas tabelas que detalham melhor esses números.

Tabela 1 - Número de Deficientes Divididos por Região.

Grandes	Proporção da população residente, portadora de pelo menos uma das deficiências			
Regiões	investigadas, por grandes grupos de idade (%)			
	Total	0 a 14 anos	15 a 64 anos	65 anos ou mais
Brasil	14,5	4,3	15,6	54
Norte	14,7	4,6	18,1	63,2
Nordeste	16,8	5,2	18,7	62,3
Sudeste	13,1	3,7	13,5	48
Sul	14,3	3,7	15,1	53,5
Centro-Oeste	13,9	4,4	15,5	56,2

Tabela 2 - Número de Deficientes Divididos por Tipo.

Tipo de deficiência						
Pelo menos uma das deficiências enumeradas	Deficiência mental permanente	Deficiência física		Incapaz, com alguma ou grande dificuldade permanente de enxergar	Incapaz, com alguma ou grande dificuldade permanente de ouvir	Incapaz, com alguma ou grande dificuldade permanente de caminhar ou subir escadas
		Tetraplegia, paraplegia ou hemiplegia permanente	Falta de membro ou de parte dele			
24.600.256	2.844.937	937.463	478.597	16.644.842	5.735.099	7.939.784
						143.726.947

Necessidades especiais podem surgir por meio de anomalias congênitas ou adquiridas, parciais ou totais, de estrutura ou função fisiológica ou anatômica, podendo ocasionar restrições da capacidade orgânica e da habilidade funcional.

Neste Trabalho de Formatura será feito uma análise de elementos finitos de uma máquina de testes para cadeira de rodas. Esta máquina está sendo construída no IOT – Instituto de Ortopedia e Traumatologia e tem como principal função avaliar cadeiras de rodas comerciais quanto à resistência à fadiga.

1.1 O Instituto de Traumatologia e Ortopedia

O IOT está dentre os maiores hospitais relacionados à ortopedia e traumatologia no Brasil. Possui 25000m² de área construída dentro do complexo do Hospital das Clínicas, sendo este espaço ocupado por sete laboratórios, 890 funcionários, 3500 consultas/mês. Como um instituto de pesquisa, tem sido responsável por diversas descobertas. A máquina que está sendo construída faz parte de mais uma pesquisa de ponta do instituto.



Figura 1 - Complexo Hospital das Clínicas.

2. AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA

De acordo com tudo que foi exposto anteriormente, a cadeira de rodas é um aparelho imprescindível para milhares de pessoas no Brasil. Devido a esta importância é que o IOT resolveu construir uma máquina que pudesse realizar testes em cadeiras de rodas já comercializadas no Brasil e desse modo até fiscalizar os fabricantes das mesmas, obtendo especificações de projeto bastante fundamentados para os produtos comercializados dentro do nosso território, e até dos importados.

Este tipo de máquina, cuja principal função é avaliar a fadiga nesses equipamentos em um longo período de tempo, só existia em outros países até então, ficando o Brasil carente deste tipo de máquina.

A máquina se encontra em estado de construção nas dependências do IOT, portanto procedimentos precedentes a construção já foram tomados, como estudo de outros aparelhos existentes, viabilidade técnica-econômica, etc. Já foram feitas, inclusive, visitas a outros países que possuem esta máquina, a fim de se obter conhecimento necessário para construção de semelhante no Brasil.

O que deve ser deixado bem claro aqui é a viabilidade física. Esta máquina não é um produto que vai ser fabricada em larga escala. No máximo teremos algumas unidades operando em todo país. Ela tem como função básica avaliar produtos já fabricados e comercializados normalmente, mas que até agora não eram testados. Assim a necessidade de uma máquina destas é plenamente justificada.

A proposta deste Trabalho é realizar uma análise, por elementos finitos do equipamento. Este está sendo construído sem que uma análise estrutural detalhada tenha sido feita anteriormente. Já se tem definido a estrutura e todas as características dos materiais que estão sendo empregados, como perfil de tubos, pesos específicos, materiais. Este tipo de análise será importante futuramente quando novas máquinas de testes forem construídas, evitando falhas a médio e longo prazo.

3. MÁQUINA DE TESTES DE FADIGA

A parte estrutural da máquina que será analisada neste Trabalho já foi construída e encontra-se em um dos laboratórios do IOT. A parte elétrica se encontra em fase de construção e será posteriormente incluída ao projeto. Máquinas semelhantes a essa já existem em outros países, como os Estados Unidos.

A construção dessa máquina foi toda baseada em normas como a ISO 7176-8:1998(E). Outras máquinas também estão sendo construídas no laboratório de bioengenharia do IOT, e essas também estão tendo sua construção balizada por normas ISO.

3.1 Norma ISO 7176-8: 1998(E)

Essa norma especifica alguns parâmetros que a máquina de testes de fadiga deve apresentar em seu funcionamento. Alguns desses parâmetros estão listados abaixo:

- a) Ter dois cilindros paralelos e horizontais de $250\text{mm} \pm 25\text{mm}$ de diâmetro e ser no mínimo 100mm mais comprido que a largura da cadeira de rodas, como mostrado na figura abaixo. A distância entre os dois tambores deve ser capaz de acomodar as rodas dianteiras e traseiras da cadeira de rodas que irá ser testada;

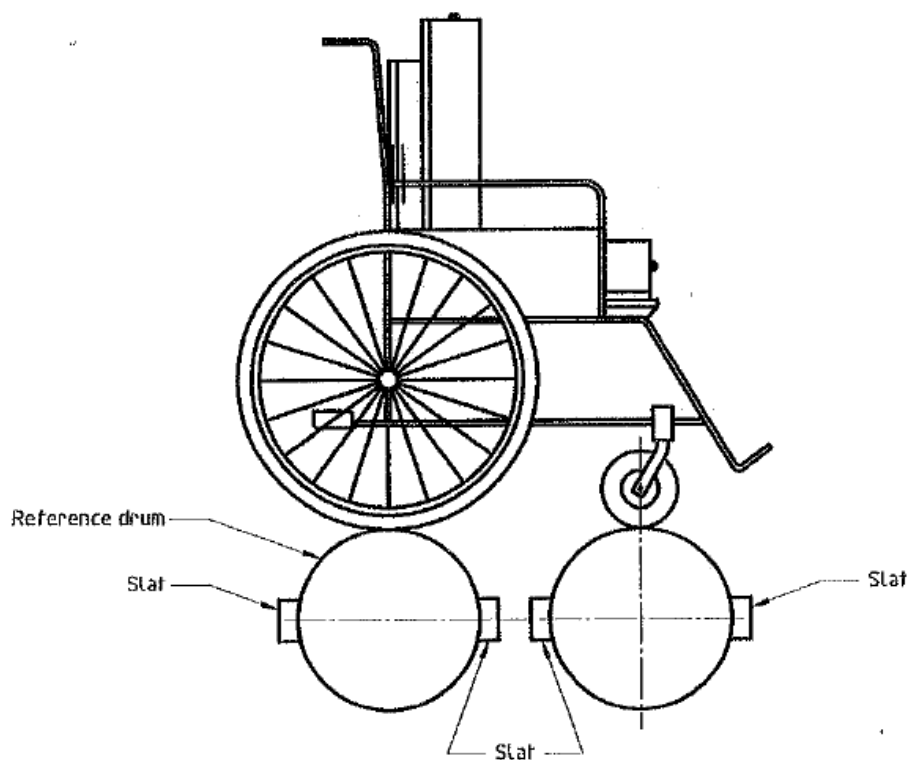


Figura 2 - Disposição correta dos dois tambores.

b) Cada tambor deve ter dois ressalto como mostrado na figura abaixo;

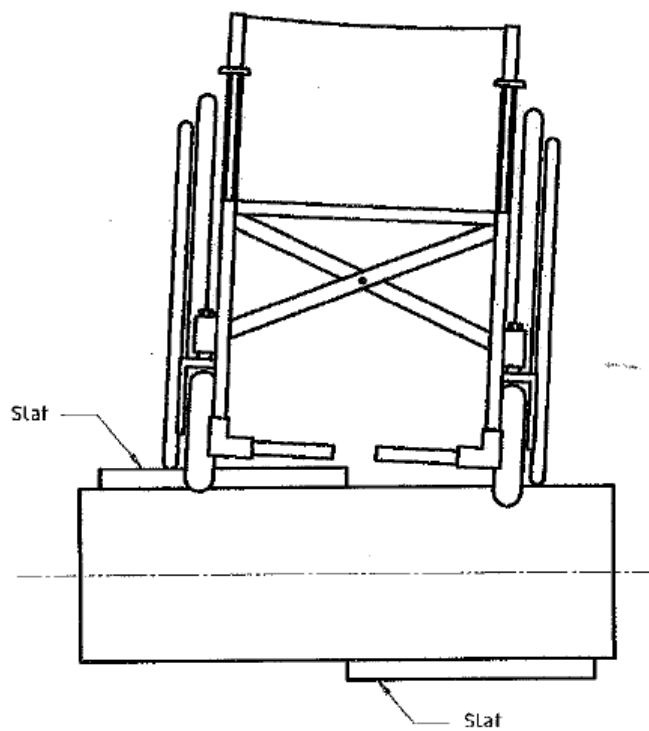


Figura 3 - Ressaltos nos tambores.

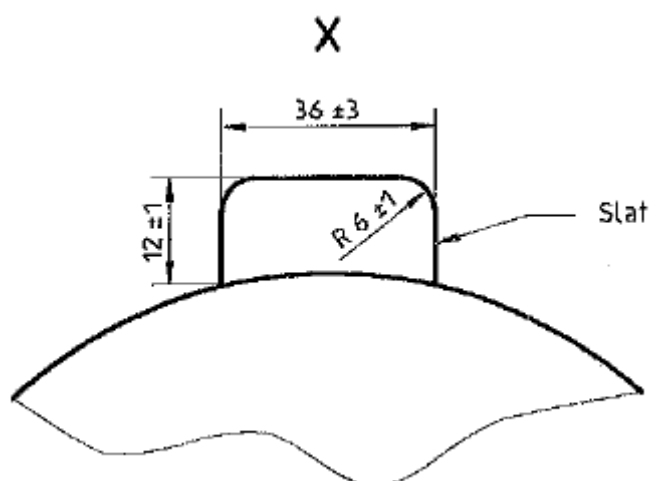


Figura 4 - Dimensões dos ressaltos.

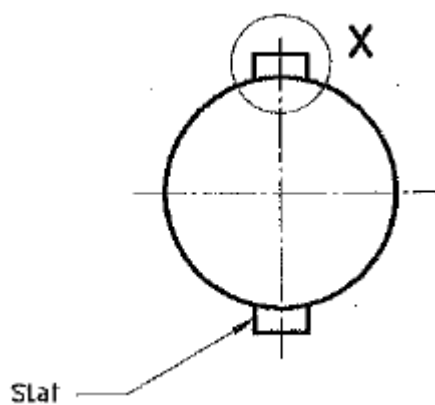


Figura 5 - Defasagem dos ressaltos.

- c) Os tambores devem girar dentro de certos parâmetros de modo que o “tambor de referência” tenha uma velocidade média (contando mais de dez revoluções) de $1,0 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$ e o segundo tenha uma rotação de 2% a 5% maior;
- d) Capacidade de montagem da cadeira de rodas com sua roda maior (no caso de cadeiras sem motor), ou com a roda motorizada (no caso de cadeira de rodas motorizadas) no tambor de referência e as demais rodas no segundo tambor;
- e) Capacidade de restringir a cadeira de rodas longitudinalmente, enquanto permite movimento vertical livre. O elemento que irá restringir esses

movimentos deverá ser fixado no eixo das rodas da cadeira que ficará em cima do tambor de referência, ou em alguma parte da cadeira o mais próximo desse eixo possível;

Nota 1: O elemento restringidor recomendado deverá ser uma espécie de bastão com juntas de esferas em cada uma das pontas.

f) Restringidores para os movimentos laterais da cadeira devem permitir movimento de $\pm 50\text{mm}$, mas não permitindo o movimento vertical;

g)

Nota 2: Tiras de amarradas são recomendadas para os restringidores laterais.

h) Ter um medidor de velocidades para o tambor de referência com precisão de $\pm 0,01\text{m/s}$;

i) Ter um contador de revoluções para o tambor de referência;

j) Permitir que uma cadeira de rodas motorizada rode um dos tambores enquanto o outro tambor gire com a velocidade especificada anteriormente;

k) Os tambores devem ter um freio para que suas revoluções sejam controladas quando for utilizada uma cadeira motorizada, assim os tambores podem girar com as velocidades especificadas;

Nota 3: Frequentemente será necessário girar os tambores mesmo quando a cadeira for motorizada, desse modo será alcançado as velocidades corretas.

3.2 Comentários sobre a Norma

Para que todos os itens expostos acima fossem respeitados, foram construídos alguns dispositivos mecânicos. Esses dispositivos, em sua maioria, foram projetados pelo próprio laboratório de bioengenharia do IOT.

Para que se atingisse a velocidade especificada foram construídas polias conectadas aos tambores e interligas por correias. As polias de cada tambor tiveram que ser fabricadas com uma relação de modo que o tambor de referencia tivesse uma velocidade menor que o outro. Maior detalhe pode ser visualizado na foto abaixo.

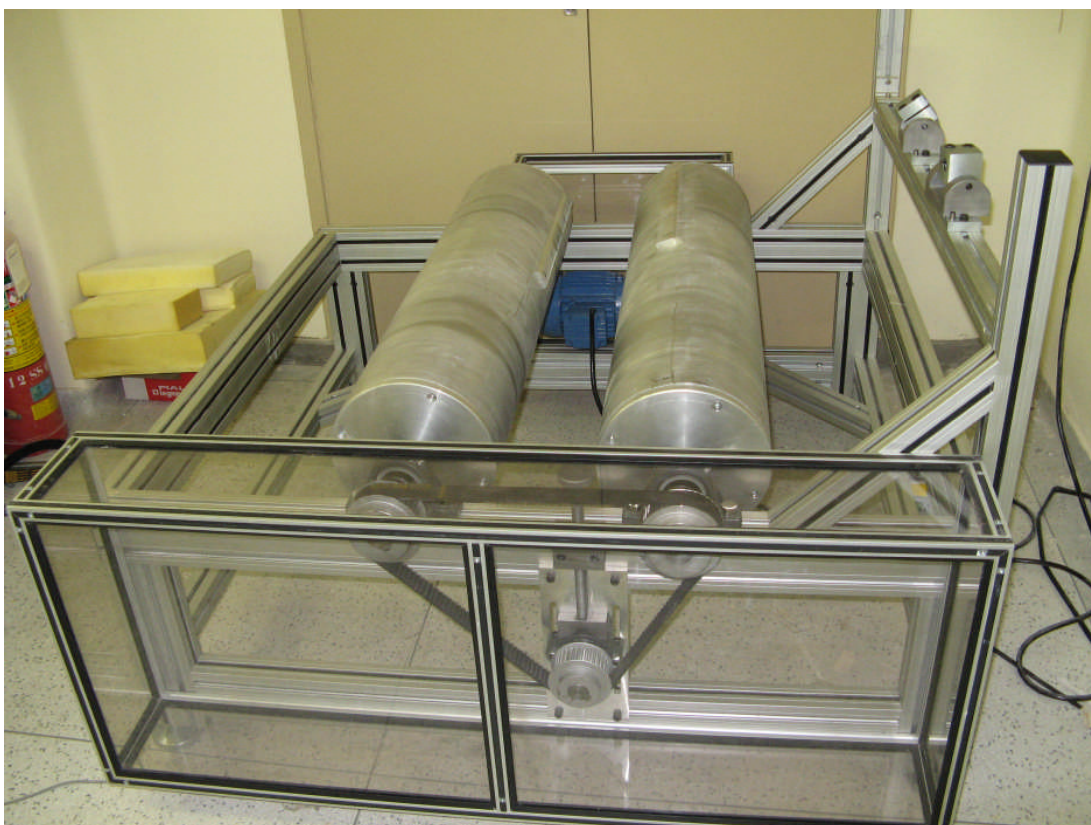


Figura 6 - Detalhe das polias dos tambores.

Os ressaltos de cada tambor foram construídos com as especificações fornecidas e defasados de 180° um do outro em cada tambor.

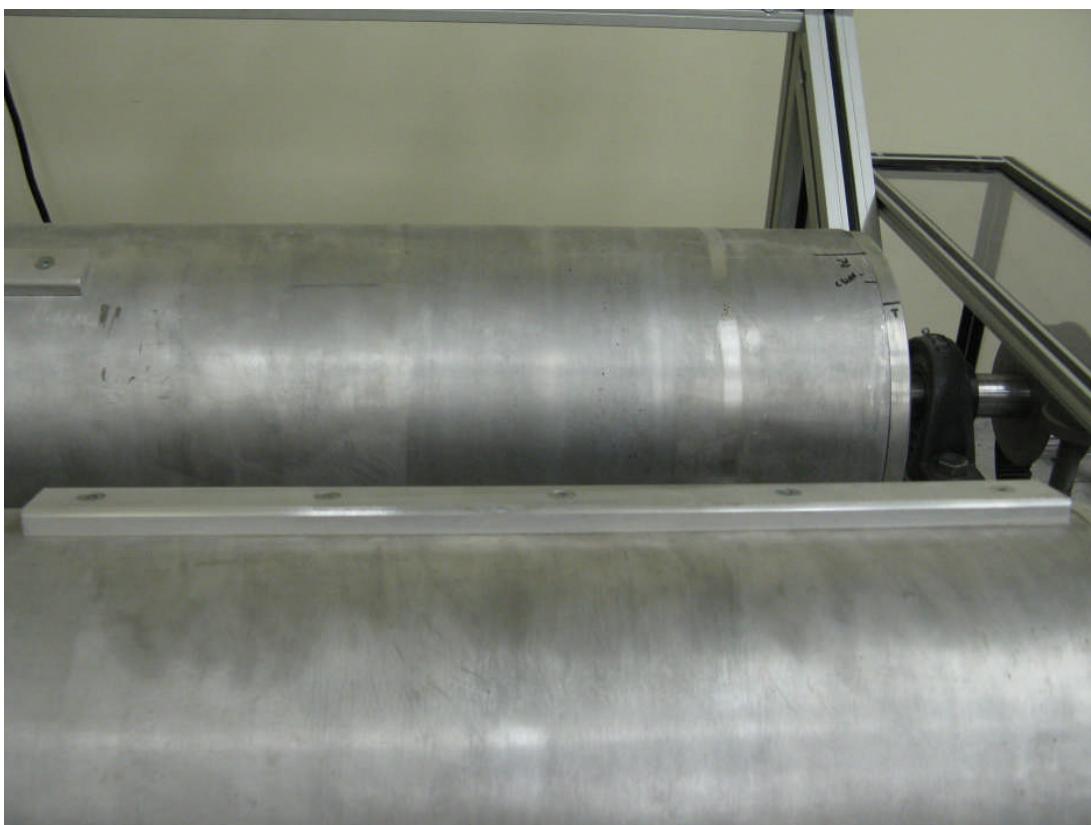


Figura 7 - Detalhe dos ressaltos construídos.



Figura 8 - Ressaltos defasados em 180° .

A parte elétrica ainda não foi construída, portanto o contador de giros e o marcador de velocidade ainda não estão instalados na máquina.

O boneco que será utilizado nos testes também foi baseado em normas. Seu peso é de 100kg. A figura abaixo mostra maiores detalhes do boneco utilizado nos testes.



Figura 9 - Detalhe do boneco de testes.



Figura 10 - Lateral da cadeira + boneco de testes.

4. ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

A máquina de testes de cadeiras de rodas foi baseada nos equipamentos encontrados em países que já possuem este tipo de aparelho. O arranjo como um todo do equipamento não apresenta muita complexidade. A figura abaixo apresenta esquema geral da máquina que está sendo construída. Nota-se que é bastante simples sua arquitetura. Seu funcionamento consiste basicamente na rotação de dois cilindros onde serão apoiadas as rodas da cadeira de modo que se simule o equipamento sendo utilizado normalmente no dia a dia. Os cilindros possuem alguns obstáculos que simulam imperfeições do piso. O controle de rotação dos cilindros está sendo construído, mas o projeto prevê que se tenha ajuste de velocidade.

Na figura 11 apresenta-se o equipamento.

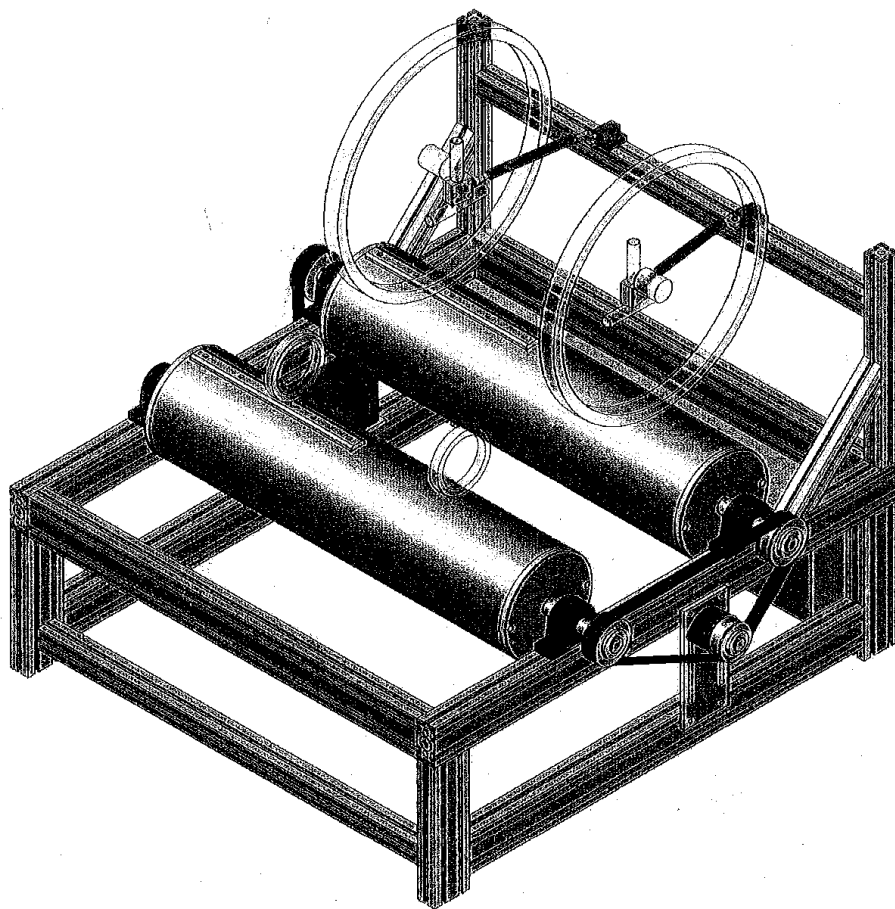


Figura 11 - Esquema da Máquina de Testes.

5. DESENHOS CAD DO EQUIPAMENTO.

Na figura 12 e 13 temos o desenho de conjunto da máquina completa. Também se estuda fazer uma caixa que proteja as partes girantes como correias e polias. Tal modificação tem a função de proteger as pessoas que operam a máquina e também o próprio equipamento. O projeto iria, portanto sofrer uma pequena modificação e ficaria parecido com a figura abaixo.

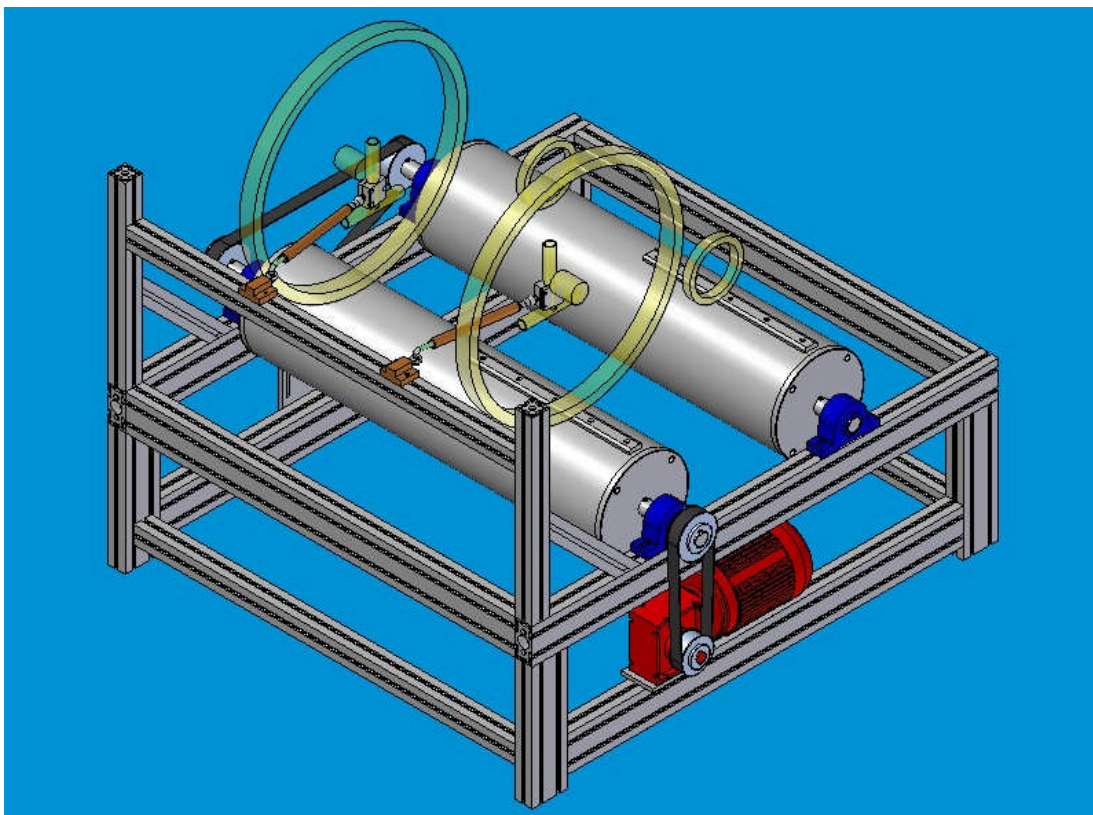


Figura 12 - Desenho de Conjunto

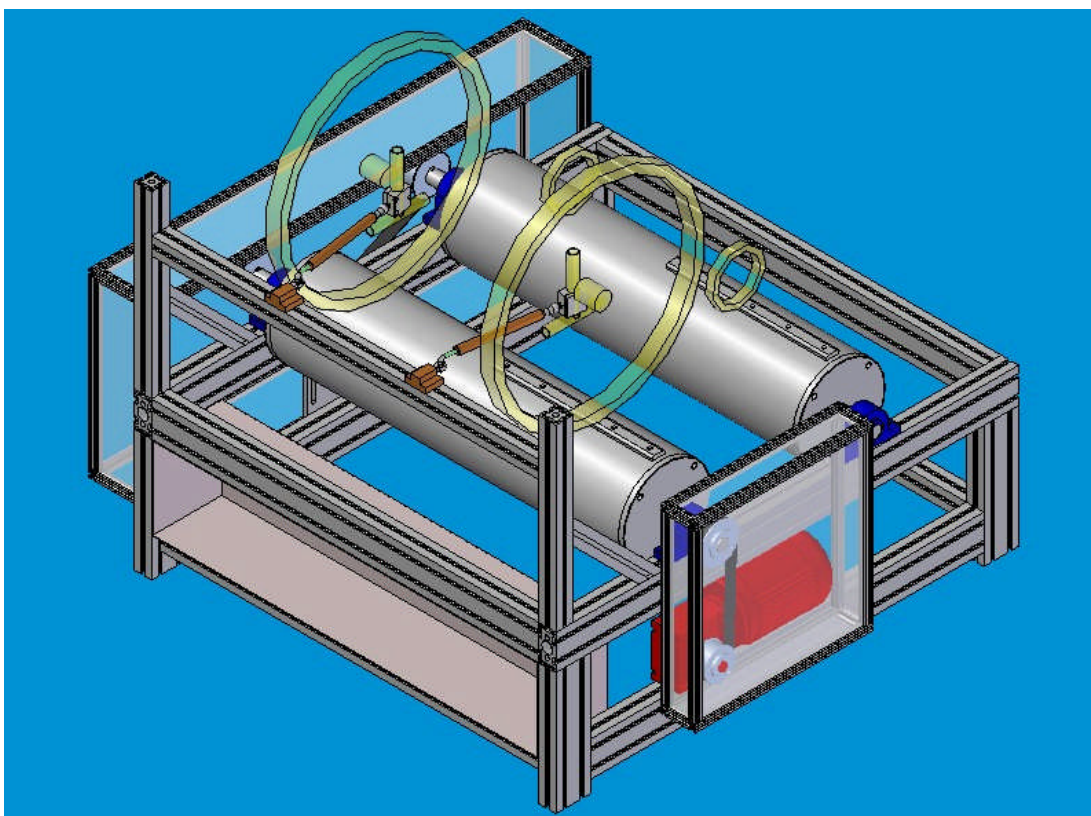


Figura 13 - Desenho de Conjunto com Proteção nas Partes Girantes.

6. ANÁLISE ESTÁTICA

Para esta análise o software escolhido foi o Winfelt. Felt, o nome genérico desse programa (existem versões para Linux e Windows, porém será utilizada a versão Windows) é um pacote para análises básicas de Elementos Finitos. É centrado em um pacote matemático desenvolvido para resolver problemas estruturais de forma simples, eficaz, precisa e flexível. Seu código é baseado no antigo Fortran. O software é livre e ainda mais pode ter sua linguagem modificada já que é totalmente aberto. Também inclui uma parte gráfica e é capaz de nos mostrar resultados bastante satisfatórios de análise de finitos.

Apesar da programação fácil, primeiramente se buscou adquirir uma aprendizagem de como usar o software. No site onde se encontra o software para download é possível encontrar tutoriais que podem ajudar no aprendizado. O exemplo abaixo mostra uma aplicação simples e que servirá de aprendizado na solução do problema real.

6.1 Exemplo de Aplicação do Software Winfelt

Abaixo segue um exemplo de uma viga que foi estudada utilizando-se o software Winfelt. A viga é mostrada na figura abaixo juntamente com os valores de contorno:

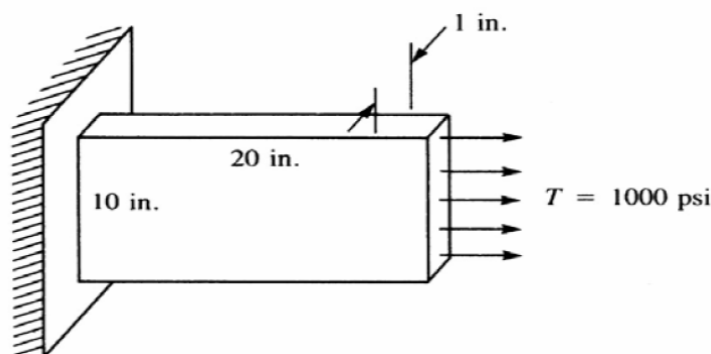


Figura 14 - Viga Sob Forças de Tração.

Assumindo forças no apenas no plano, e $E= 30 \times 10^6$ psi, $\nu=0.30$ e $t = 1$ in. Considerando a discretização no plano com dois elementos triangulares representados na figura 15:

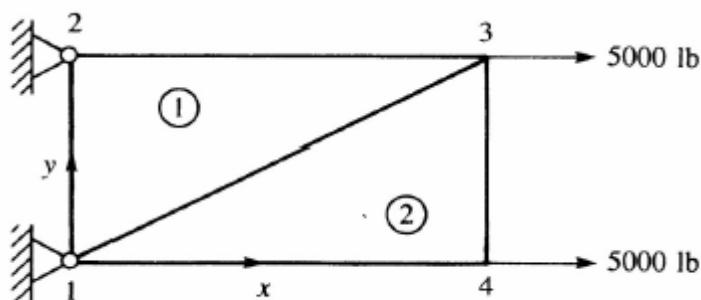


Figura 15 - Discretização do Problema.

O arquivo de entrada de dados está descrito abaixo. Note que o Winfelt se utiliza de nós para a solução sendo a linguagem bastante simples e muito intuitiva.

6.2 Arquivo de entrada para o Winfelt

Tabela 3 – Arquivo de entrada para o Winfelt.

```
problem description
title="Exemplo de Aplicação"

nodes
1 x=0      y=0.0 constraint=pin
2 x=0      y=0.0 constraint=pin
3 x=20.0   y=0.0 constraint=free force=point
4 x=20.0   y=0.0 constraint=free force=point

CSTPlane Stress Elements
1 nodes=[1,2,3] material=steel
2 nodes=[1,4,3] material=steel

material properties
steel e=30e06 nu=0.30 t=1.0

forces
point fx=5000

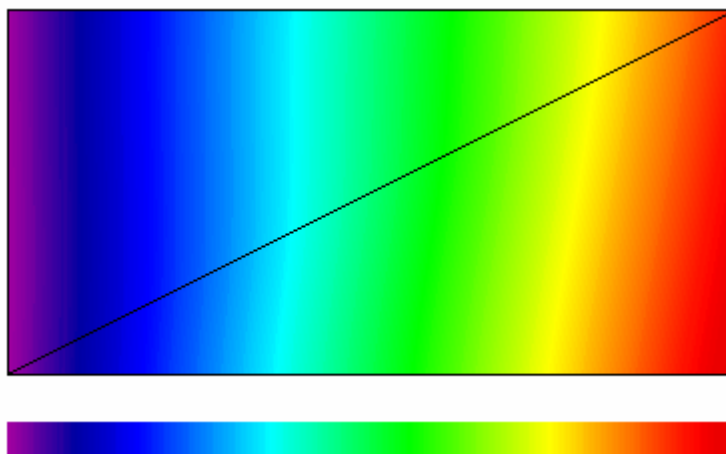
constraints
pin   tx=c ty=c
free  tx=u ty=u
end
```

A solução textual oferecida pelo software para este problema é mostrada na tabela 4:

Tabela 4 – Solução para o problema proposto.

** Exemplo de Aplicação **						
Nodal Displacements						
Node #	DOF 1	DOF 2	DOF 3	DOF 4	DOF 5	DOF 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0.00060958	4.1633e-06	0	0	0	0
4	0.0006637	0.00010408	0	0	0	0
Element Stresses						
1:	1004.8	301.44	2.4019	1004.8	301.43	0.19566
2:	995.2	-1.201	-2.4019	995.2	-1.2068	-0.13812
Reaction Forces						
Node #	DOF	Reaction Force				
1	Tx	-5,000.00				
1	Ty	-3,002.40				
2	Tx	-5,000.00				
2	Ty	3,002.40				

Também temos um gráfico de contorno:

**Figura 16 - Gráfico de Contorno.**

7. ANÁLISE ESTÁTICA UTILIZANDO ELEMENTOS DE VIGA

Em diversos problemas de análise estrutural procura-se primeiro estudar um caso mais simples e depois fazer uma análise mais detalhada. Neste Trabalho será feita primeiramente uma análise de elemento de viga da estrutura e depois será feita uma análise mais detalhada da barra mais solicitada.

7.1 Divisão do Problema em Nós

Neste modelo será feita a análise de toda a máquina. Mas como na maioria dos softwares de análise de elementos finitos, é necessário que se divida o problema em nós. Os resultados serão em função destes nós. Assim foi feita a divisão em nós em todas as barras da máquina. Foi dado nome a todos os componentes, de forma que a localização dentro do código fonte Felt fosse de fácil determinação.

A figura 17 mostra todos os nós criados bem como os nomes de cada elemento que foram adotados.

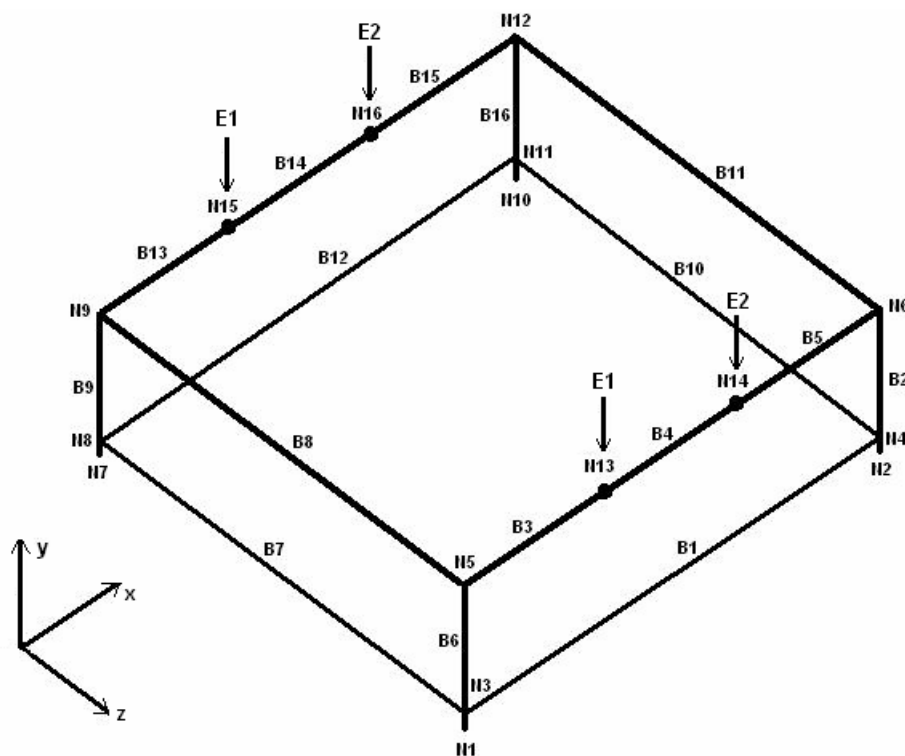


Figura 17 - Discretização em Nós.

7.2 Referências dos nós e barras:

7.2.1 Barras:

Tabela 5 – Configuração das barras.

Barra	Material	Nós	Material
B1	Alumínio	3;4	Perf2
B2	Alumínio	2;6	Perf2
B3A	Alumínio	5;13	Perf2
B3B	Alumínio	13;14	Perf2
B3C	Alumínio	6;14	Perf2
B4	Alumínio	1;5	Perf2
B5	Alumínio	3;8	Perf1
B6	Alumínio	5;9	Perf2
B7	Alumínio	7;9	Perf2
B8	Alumínio	4;11	Perf1
B9	Alumínio	6;12	Perf2
B10	Alumínio	8;11	Perf2
B11A	Alumínio	9;15	Perf2
B11B	Alumínio	15;16	Perf2
B11C	Alumínio	12;16	Perf2
B12	Alumínio	10;12	Perf2

7.2.2 Nós:

Tabela 6 - Referência dos nós.

Nós	Pos. x (mm)	Pos. y (mm)	Pos. z (mm)	Vínculo
N1	0	0	0	Apoiado
N2	1225	0	0	Apoiado
N3	0	85	0	Livre
N4	1225	85	0	Livre
N5	0	400	0	Livre
N6	1225	400	0	Livre
N7	0	0	1135	Apoiado
N8	0	85	1135	Livre
N9	0	400	1135	Livre
N10	1225	0	1135	Apoiado
N11	1225	85	1135	Livre
N12	1225	400	1135	Livre
N13	408	400	0	Livre
N14	816	400	0	Livre
N15	408	400	1135	Livre

N16	816	400	1135	Livre
------------	-----	-----	------	-------

7.2.3 Vínculos:

Tabela 7 - Referência dos vínculos.

Vínculo	Translação X	Translação Y	Translação Z	Rotação X	Rotação Y	Rotação Z
Apoiado	não	não	não	não	não	não
Livre	sim	sim	sim	sim	sim	sim

7.2.4 Forças:

Tabela 8 - Referência para as forças.

Boneco de Testes	100	kg
Massa Cadeira	30	kg
Massa Cilindro 1	180	kg
Massa Cilindro 2	180	kg
Total	490	Kg

Tabela 9 - Referência para os apoios.

Apoio	Força		
E1	147	kgf	60%
E2	147	kgf	60%
E3	98	kgf	40%
E4	98	kgf	40%

7.2.5 Material:

Tabela 10 - Propriedades do material.

Perfil_A	Descrição	Material	Mod. Elasticidade E		Coefficiente Poisson
Perf1	50x50	Aluminio	70	Gpa	0,33
Perf2	50x100	Aluminio	70	Gpa	0,33

Tabela 11 - Propriedades da secção.

Perfil_A	Ix (cm ⁴)	Iy (cm ⁴)	Área (mm ²)	Jxx (cm ⁴)
Perf1	27,4	27,4	1.088,26	54,8
Perf2	193,7	52,5	2.031,50	256,2

8. CÓDIGO FONTE WINFELT

Tabela 12 – Arquivo de entrada para máquina de testes.

```

problem description
title="Analise da Maquina de Testes Para Cadeiras de Rodas"
nodes=16 elements=16

nodes
1 x=0 y=0 z=0 constraint=apoiado
2 x=1.225 y=0 z=0 constraint=apoiado
3 x=0 y=0.085 z=0 constraint=livre
4 x=1.225 y=0.085 z=0 constraint=livre
5 x=0 y=0.4 z=0 constraint=livre
6 x=1.225 y=0.4 z=0 constraint=livre
7 x=0 y=0 z=1.135 constraint=apoiado
8 x=0 y=0.085 z=1.135 constraint=livre
9 x=0 y=0.4 z=1.135 constraint=livre
10 x=1.225 y=0.085 z=1.135 constraint=apoiado
11 x=1.225 y=0.085 z=1.135 constraint=livre
12 x=1.225 y=0.4 z=1.135 constraint=livre
13 x=0.408 y=0.4 z=0 constraint=livre force=E1
14 x=0.816 y=0.4 z=0 constraint=livre force=E2
15 x=0.408 y=0.4 z=1.135 constraint=livre force=E1
16 x=0.816 y=0.4 z=1.135 constraint=livre force=E2

beam3d elements
1 nodes=[3,4] material=Perf2
2 nodes=[2,6] material=Perf2
3 nodes=[5,13] material=Perf2
4 nodes=[13,14] material=Perf2
5 nodes=[6,14] material=Perf2
6 nodes=[1,5] material=Perf2
7 nodes=[3,8] material=Perf1
8 nodes=[5,9] material=Perf2
9 nodes=[7,9] material=Perf2
10 nodes=[4,11] material=Perf1
11 nodes=[6,12] material=Perf2
12 nodes=[8,11] material=Perf2
13 nodes=[9,15] material=Perf2
14 nodes=[15,16] material=Perf2
15 nodes=[12,16] material=Perf2
16 nodes=[10,12] material=Perf2

material properties
Perf1 e=70e9 G=26e9 nu=0.33 iy=27.4e-8 iz=27.4e-8 a=1088.26e-6
j=54.8e-8 t=0.010
Perf2 e=70e9 G=26e9 nu=0.33 iy=193.7e-8 iz=180e-8 a=2031.50e-6
j=246.2e-8 t=0.010

forces
E1 fy=-1440.60
E2 fy=-960.40

constraints
apoiado tx=u ty=c tz=u rx=u ry=u rz=u
livre tx=u ty=u tz=u rz=u rx=u ry=u rz=u

end

```

9. RESULTADOS

O Winfelt mostra os resultados em três tabelas. Essas tabelas são mostradas a seguir.

Tabela 13 - Disposição dos nós.

Disposição dos Nós						
Nó	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
1	-0.00066	0	-2.32E-06	4.04E-08	4.69E-06	-0.00162
2	0.000615	0	-8.27E-06	5.49E-07	4.69E-06	0.001554
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	-6.56E-06	-3.60E-06	-2.30E-06	4.04E-08	4.69E-06	-0.00162
6	-6.56E-06	-3.15E-06	-8.05E-06	5.49E-07	4.69E-06	0.001554
7	-0.00066	0	-2.32E-06	4.04E-08	4.69E-06	-0.00162
8	0	0	0	0	0	0
9	-1.19E-05	-3.60E-06	-2.30E-06	4.04E-08	4.69E-06	-0.00162
10	0.000478	0	-8.22E-06	5.49E-07	4.69E-06	0.001554
11	0	0	0	0	0	0
12	-1.19E-05	-2.48E-06	-8.05E-06	5.49E-07	4.69E-06	0.001554
13	-6.56E-06	-0.00055	-4.21E-06	2.10E-07	4.69E-06	-0.00078
14	-6.56E-06	-0.00054	-6.13E-06	3.79E-07	4.69E-06	0.00081
15	-1.19E-05	-0.00055	-4.21E-06	2.10E-07	4.69E-06	-0.00078
16	-1.19E-05	-0.00054	-6.13E-06	3.79E-07	4.69E-06	0.000811

Tabela 14 – Forças cortantes e momentos fletores em cada nó.

Forças Cortantes e Momentos Fletores						
1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
3	7.39E-13	0.046741	-4.21E-14	-0.026593	2.22E-14	0.026011
	-7.39E-13	-0.046741	4.21E-14	0.026593	-9.69E-15	0.026011
4	1.24E-13	-0.049659	-7.23E-14	-0.026593	1.26E-14	-0.026783
	-1.24E-13	0.049659	7.23E-14	0.026593	9.14E-15	-0.026783
5	1.57E-13	1281.5	-1.50E-15	3.08E-17	1.25E-15	2.89E-13
	-1.57E-13	-1281.5	1.50E-15	-3.08E-17	1.05E-15	-3.32E-13
6	-7.86E-14	1119.5	3.58E-14	-4.27E-17	-4.19E-15	-4.99E-13
	7.86E-14	-1119.5	-3.58E-14	4.27E-17	-1.00E-14	3.67E-13
7	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
8	7.94E-14	0.046859	3.92E-14	0.026011	-2.25E-14	0.026593
	-7.94E-14	-0.046859	-3.92E-14	-0.026011	-2.45E-14	0.026593
9	-7.43E-13	1281.4	-2.48E-15	-7.86E-18	-3.35E-17	1.61E-13
	7.43E-13	-1281.4	2.48E-15	7.86E-18	-1.23E-16	-8.14E-13
10	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
11	-5.55E-14	-0.046859	3.18E-14	0.026011	-1.95E-14	-0.026593
	5.55E-14	0.046859	-3.18E-14	-0.026011	-1.90E-14	-0.026593
12	4.10E-12	1119.6	8.82E-14	1.73E-17	-1.30E-14	1.24E-13
	-4.10E-12	-1119.6	-8.82E-14	-1.73E-17	-1.29E-15	1.61E-12
13	4.37E-13	1281.4	-6.76E-14	-0.026593	2.61E-14	-0.026011
	-4.37E-13	-1281.4	6.76E-14	0.026593	-3.77E-15	-522.84
14	4.87E-13	-1119.5	6.41E-14	-0.026593	-3.20E-14	0.026011
	-4.87E-13	1119.5	-6.41E-14	0.026593	8.75E-15	-457.91
15	1.03E-12	1281.5	-2.14E-14	-0.026593	-1.17E-15	-0.026011
	-1.03E-12	-1281.5	2.14E-14	0.026593	4.76E-15	522.84
16	1.15E-12	-1119.6	2.02E-14	-0.026593	-2.23E-14	-0.026011
	-1.15E-12	1119.6	-2.02E-14	0.026593	1.67E-14	457.89

Tabela 15 - Forças de reação.

Forças de Reação		
Nó	Direção	Força
1	Ty	1281.50
2	Ty	1119.50
7	Ty	1281.40
10	Ty	1119.60

9.1 Interpretação dos resultados:

Para análises estáticas o Winfelt tem basicamente três tabelas. A primeira é a tabela que mostra a disposição dos nós. A tabela 16 mostra o significado de cada campo nesta primeira tabela, sendo a translação indicada pela letra T e a rotação pela R.

Tabela 16 - Tabela que mostra a disposição de cada nó.

Node #	DOF1	DOF2	DOF3	DOF4	DOF5	DOF6
Número do nó.	T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	R_z

As coordenadas globais, que servem de referência para qualquer resultado dada pelo winfelt, são mostradas na figura 18.

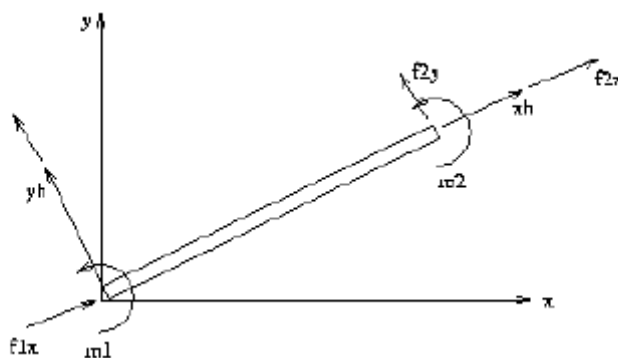


Figura 18 - Convenção de sinais do winfelt.

A segunda tabela nos dá todas as forças cortantes e os momentos fletores agindo em todos os nós da estrutura. A tabela 17 mostra o significado de cada campo, sendo que a força cortante é indicada pela letra f e o momento fletor por m.

Tabela 17 - Tabela de resultados para força cortante e momento fletor.

Element Stresses						
Número do nó:	fx^1	fy^1	fz^1	mx^1	my^1	mz^1
	fx^2	fy^2	fz^2	mx^2	my^2	mz^2

A última tabela mostra as forças de reação em todos os nós que estão engastados em uma direção. A primeira coluna mostra o nó em que a força atua. A segunda coluna mostra a direção da força e a última mostra a magnitude da força. A

convenção de sinais segue a mesma que foi mostrada anteriormente quando se falou sobre a disposição dos nós.

10. ANÁLISE 3D NO PERFIL DA BARRA

O winfelt mostrou que as barras mais solicitadas são aquelas formadas pelos nós 5, 13, 14, 6 e 9, 15, 16, 12. Portanto será feito um estudo em uma destas barras já que são totalmente simétricas. Percebe-se que estas duas barras são as que sofrem maior momento fletor e força cortante da estrutura.

Essa análise será realizada com o objetivo de se obter resultados mais precisos, agora levando em conta todo o perfil da barra.

10.1 Perfil da barra a ser estudada

O perfil da barra que será apresenta uma geometria bastante peculiar como pode ser visto na figura 19. Essa barra apresenta dimensões de 50x100x1325 mm, e como foi dito anteriormente, é toda em alumínio. O perfil foi desenhado utilizando-se o software Microstation.

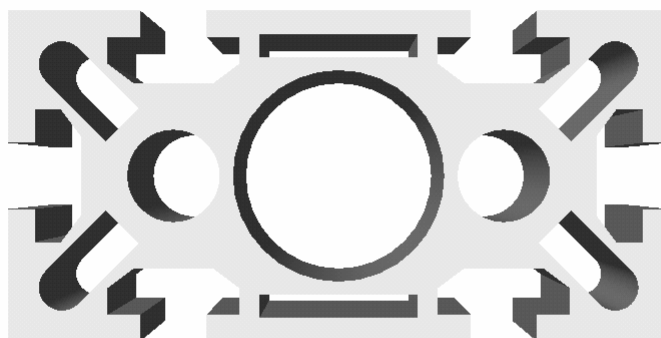


Figura 19 – Detalhe do perfil da barra 50x100x1325mm.

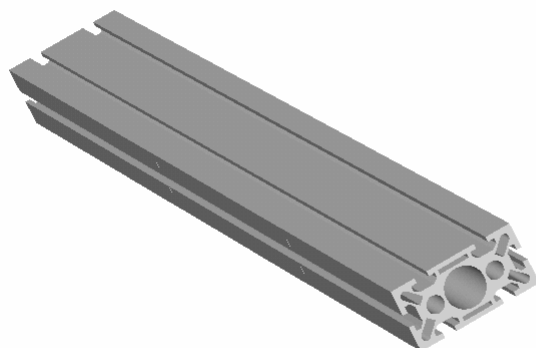


Figura 20 - Vista isométrica da barra de 50x100x1325mm.

11.SIMULAÇÕES 3D.

A partir deste ponto todas as simulações serão feitas com a utilização do software CosmosWorks. A escolha deste software foi feita com base em várias características que podemos listar:

- Ferramenta de fácil utilização devida sua interface intuitiva;
- Total compatibilidade com softwares CAD;
- Trabalha com elementos em 3D com resultados excelentes.

11.1 Geração da malha no perfil

Primeiramente será feita a geração da malha em todo o perfil extrudado mostrado na figura 20. O software CosmosWorks contém uma ferramenta para a realização desta tarefa. Na figura 21 e 22 podemos ver todos os detalhes da malha gerada.

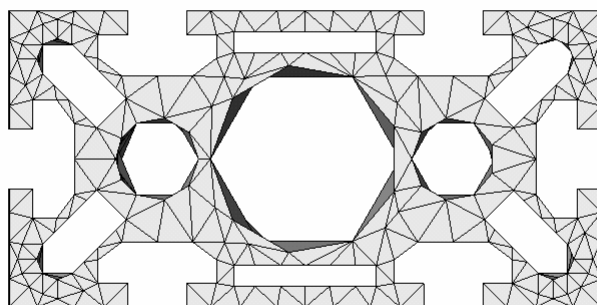


Figura 21- Malha gerada no perfil.

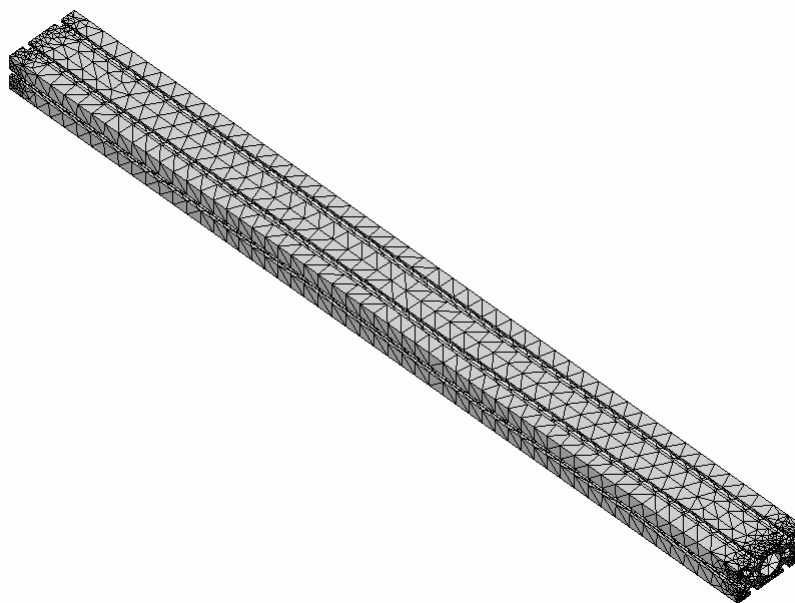


Figura 22 - Malha gerada em toda a barra.

O total de nós gerados foi de 35.464 sendo a qualidade definida para excelente.

11.2 Definição das forças aplicadas na barra

Como foi explicado anteriormente, a máquina de testes funciona basicamente com a rotação de seus dois rolos. Esses dois rolos apresentam duas pequenas lombadas defasadas de 180° cada um. Conforme a máquina entra em funcionamento a cadeira começa a sofrer os solavancos que estão previstos no projeto e na norma. Devido a estes solavancos, deve-se considerar que as massas da cadeira mais a do boneco não estão submetidas à apenas a aceleração da gravidade, mas sim a uma aceleração maior.

Como hipótese será considerada que a cadeira mais o boneco sofrem uma aceleração três vezes maior que o da gravidade. Essa hipótese é utilizada em outras simulações análogas a essa que está sendo realizada. Levando-se em conta essa hipótese podemos novamente estimar as forças que agem na barra que está sendo estudada. A tabela 18 mostra a nova força aplicada pelo boneco mais cadeira.

Tabela 18 - Estimativa das novas forças.

MASSA DA CADEIRA	30 kg
MASSA DO BONECO	100 kg
Total	130 kg
Aplicando aceleração 3g	390 kgf

Somam-se a esta força, os esforços realizados pelos cilindros:

Tabela 19 - Total das forças agindo na barra.

Massa do cilindro 1	180 kgf
Massa do cilindro 2	180 kgf
Massa do conj	390 kgf
TOTAL	750 kgf

Assim temos a tabela 20 que mostra a força nas unidades do SI em cada mancal da barra.

Tabela 20 - Forças em cada mancal.

Forças	Magnitude
E1	2250 N
E2	1500 N

11.3 Definição da tensão de escoamento a fadiga

A máquina de testes que está sendo estudada está sujeita a fadiga, já que durante seu funcionamento realiza muitos ciclos repetitivos. É com base neste funcionamento que será calculado um novo limite de tensão baseado na fadiga do equipamento.

Primeiramente sabe-se que o limite de ruptura do material dado pelo fabricante é de:

$$\sigma_{rup} = 82,7 MPa$$

A teoria de elementos de máquina diz que a fadiga em equipamentos mecânicos é dada por:

$$S_f = 0,4 * \sigma_{rup} * C_{carregamento} = 0,4 * 82,7 * 0,7 = 23,2 MPa$$

O fator de carregamento é da ordem de 70% quando temos força normal agindo, que é o caso da barra em estudo.

Portanto nas análises será usado $\sigma_{LIM} = 23,2MPa$.

11.4 Resultados da simulação

A figura 23 mostra as tensões na barra que está sendo estudada.

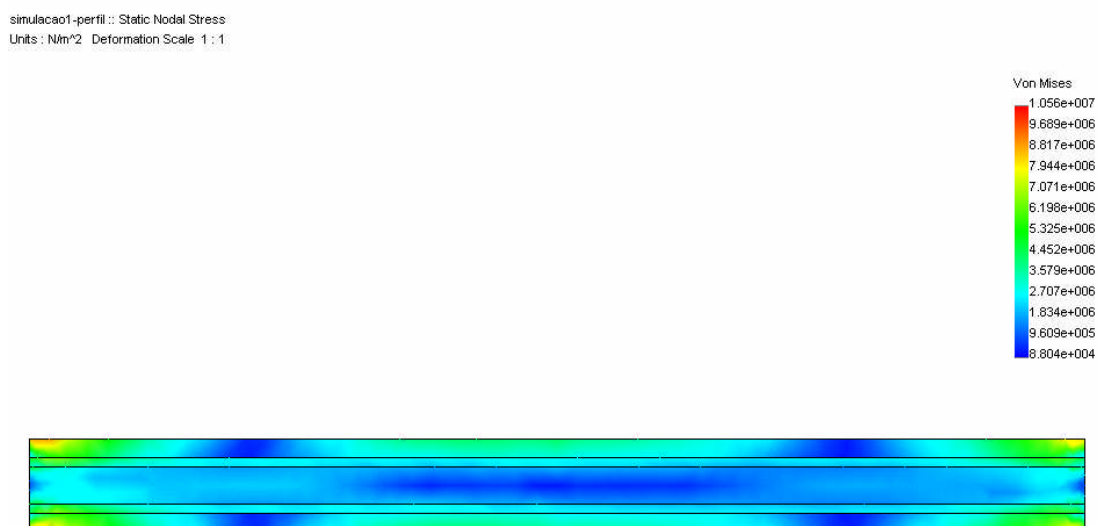


Figura 23 - Tensões na barra.

simulacao01-perfil :: Static Nodal Stress
Units : N/m^2 Deformation Scale 1 : 1

Von Mises
1.056e+007
9.689e+006
8.817e+006
7.944e+006
7.071e+006
6.198e+006
5.325e+006
4.452e+006
3.579e+006
2.707e+006
1.834e+006
9.609e+005
8.804e+004



Figura 24 - Tensões na barra - Vista inferior.

simulacao01-perfil :: Static Nodal Stress
Units : N/m^2 Deformation Scale 1 : 1

Von Mises
1.056e+007
9.689e+006
8.817e+006
7.944e+006
7.071e+006
6.198e+006
5.325e+006
4.452e+006
3.579e+006
2.707e+006
1.834e+006
9.609e+005
8.804e+004

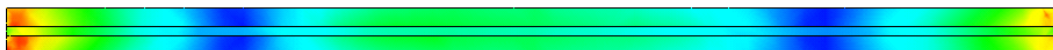


Figura 25 - Tensões na barra - Vista superior.

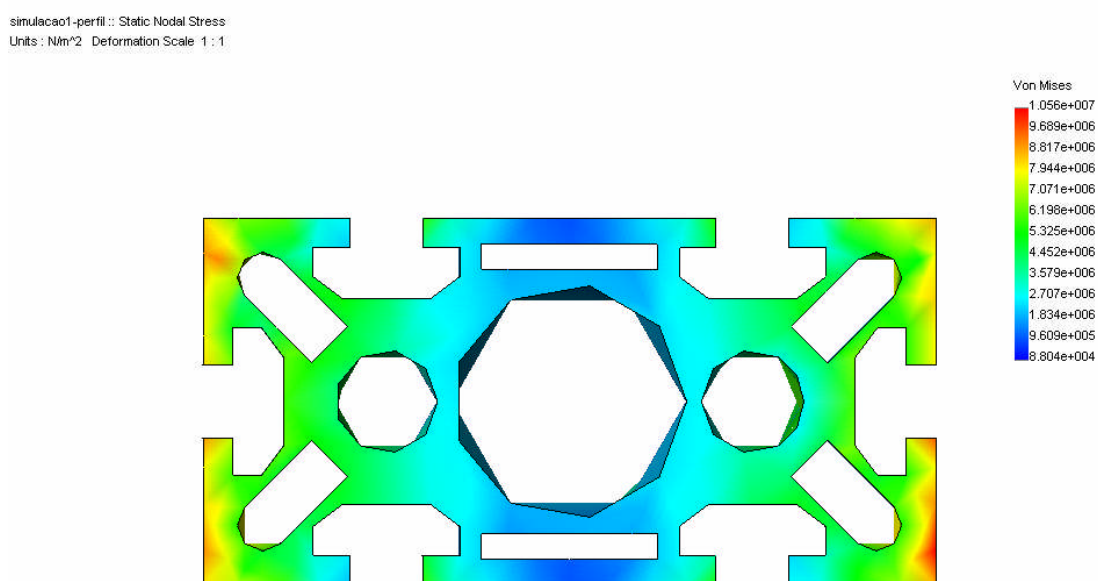


Figura 26 - Detalhe das tensões agindo no perfil.

Uma análise mais aprofundada das figuras 23 a 26, nos mostra tensões com picos da ordem de 11MPa agindo em alguns pontos da barra. Esses pontos submetidos a essas tensões encontram-se perto das junções desta barra com o restante da estrutura.

As figuras seguintes nos mostram os pontos de maior deformação na barra.

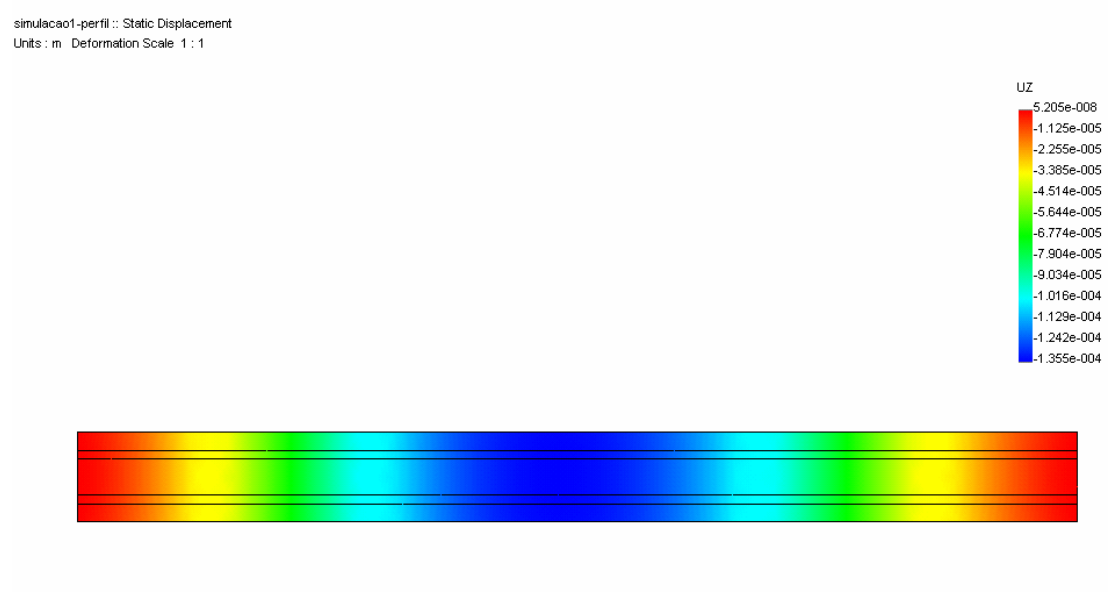


Figura 27 - Deslocamento dos pontos da barra.

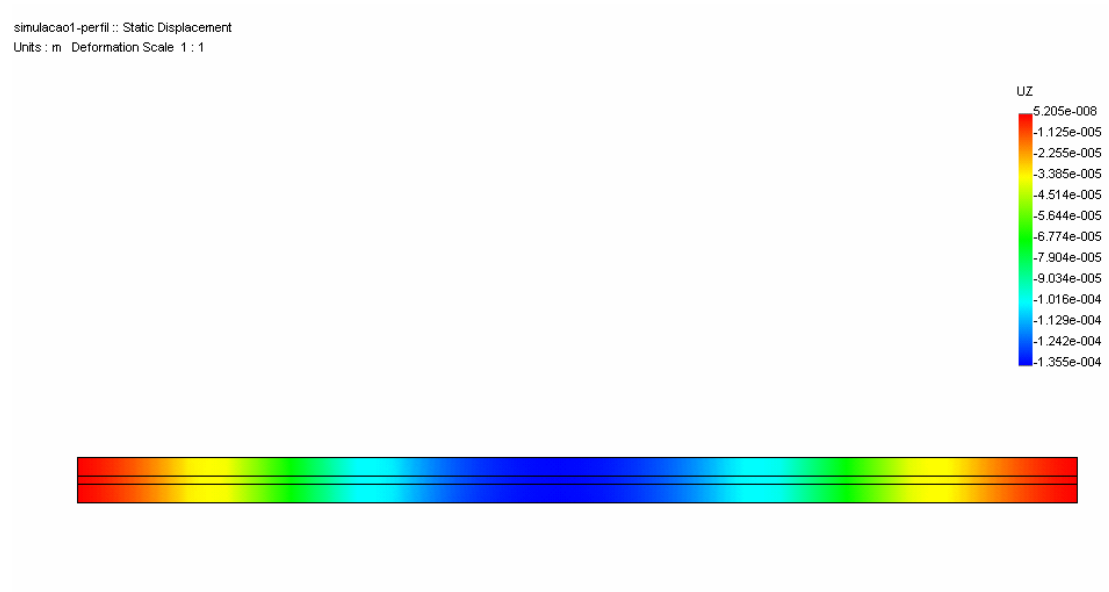


Figura 28 - Disposição dos pontos da barra-Vista superior.

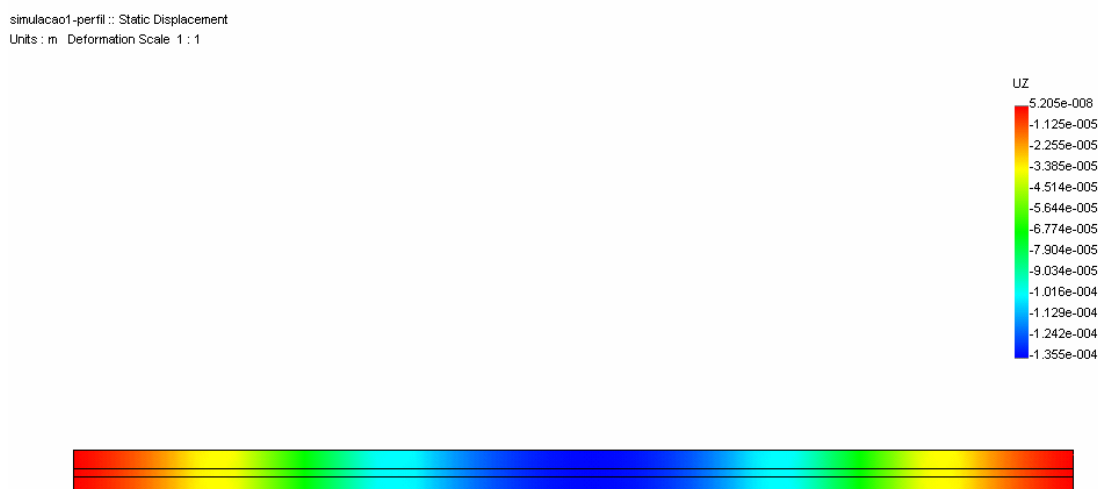


Figura 29 - Disposição dos pontos da barra-Vista inferior.

Percebe-se que alguns pontos da barra apresentam deslocamentos da ordem de 0,14mm. Esses pontos se encontram na parte central da barra. Os pontos mais próximos das junções apresentam deslocamentos da ordem de 0,05µm.

11.5 Análise de falha da barra

O critério utilizado para determinação de falha da barra foi o de Von Mises. Segundo esse critério não ocorrerá falha desde as tensões obedeçam a seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{VONMISES}}{\sigma_{LIMITE}} < 1$$

A tensão limite para esse caso é o de fadiga, já determinado anteriormente.

Levando-se em conta a expressão anterior, o resultado obtido é que para um fator de segurança de até 2,1 não ocorre falha da barra. As figuras seguintes mostram pontos de falha para fatores de segurança acima deste valor.

simulacao01-perfil :: Design Check Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 3 < Blue Deformation Scale 1 : 0



Figura 30 - Pontos de ocorrência de falha para FS=3.

simulacao01-perfil :: Design Check Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 3 < Blue Deformation Scale 1 : 0



Figura 31 - Pontos de ocorrência de falha para FS=3 - Vista superior.

simulacao01-perfil :: Design Check Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 3 < Blue Deformation Scale 1 : 0



Figura 32 - Pontos de ocorrência de falha para FS=3 - Vista inferior.

simulacao01-perfil :: Design Check Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 10 < Blue Deformation Scale 1 : 0



Figura 33 - Pontos de ocorrência de falha para FS=10.

simulacao1-perfil :: Design Check Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 10 < Blue Deformation Scale 1 : 0



Figura 34 - Pontos de ocorrência de falha para FS=10 - Vista superior.

simulacao1-perfil :: Design Check Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 10 < Blue Deformation Scale 1 : 0



Figura 35 - Pontos de ocorrência de falha para FS=10 - Vista inferior.

Nas figuras de 30 a 32 foi utilizado um fator de segurança de 3 nas simulações. Percebe-se que com este fator de segurança ocorrem falhas em pontos perto das junções.

Já nas figuras de 33 a 35 foi adotado um fator de segurança de 10. Neste caso percebem-se falhas generalizadas na barra. Vários pontos perto das junções e no centro da barra falham para esse caso.

12. CONCLUSÃO

Foi mostrado que a máquina de testes de fadiga para cadeiras de rodas é muito importante para a sociedade, pois poderá fornecer novas especificações de projeto e de fiscalização dos equipamentos vendidos comercialmente.

A viabilidade econômica é justificada porque não temos nenhuma máquina com estas funções operando no Brasil. O custo de construção de um equipamento destes é baixo se comparado aos benefícios que pode trazer a população.

Outros países como os Estados Unidos utilizam esse tipo de equipamento para testarem as cadeiras que são vendidas comercialmente lá. Hoje no Brasil ainda não existe esse tipo de teste, portanto a construção da máquina é totalmente justificada, pois introduzirá no mercado um novo parâmetro de qualidade para os fabricantes de cadeiras de rodas.

O software Winfelt que foi usado na análise de elementos de viga da estrutura mostrou-se ser de fácil manipulação, além de ser totalmente flexível já que é aberto e pode ter seu código fonte alterado para atender objetivos mais específicos.

Para a análise 3D foi utilizado o software CosmosWorks. Essa ferramenta de elementos finitos se mostrou bastante adequado para o estudo que se pretendia realizar. Sua interface é bastante intuitiva, o que facilitou na manipulação do problema. Os resultados fornecidos são de fácil interpretação e bastante coerentes.

Neste Trabalho constatou-se que a barra onde se encontram apoiado os rolos possui um coeficiente de segurança muito baixo. Conclui-se, portanto que a estrutura não deve resistir à solicitação crítica de projeto e deve ser redimensionada.

13. REFERÊNCIAS

LOGAN, DARYL L, 1986, “A first course in the finite element method”, Boston: PWS Engineering, 617 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, órgão da Secretaria Executiva do Ministério da Saúde. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em 25 de abril de 2006.

Finite Elements. Disponível em <http://www.ce.memphis.edu/7117/>. Acesso em 05 de maio de 2006.

Hospital das Clinicas-FMUSP. Disponível em <http://www.hcnet.usp.br/> . Acesso em 25 de abril de 2006.

Instituto de Ortopedia e Traumatologia - IOT. Disponível em <http://www.hcnet.usp.br/iot/>. Acesso em 25 de abril de 2006.

GERE, JAMES M. 2001, “Mecânica dos Materiais” Brooks/Cole 5th Edition.

Universidade Católica Dom Bosco. Disponível em http://www.ec.ucdb.br/~pistori/publicacoes/fernandes_solisc2005.pdf. Acesso em 30 de outubro de 2006.

Pagina do Professor Christophe Geuzaine. Disponível em <http://www.geuz.org/gmsh/>. Acesso em 02 de novembro de 2006.

NORTON, ROBERT L., “Projeto de Máquinas”, Porto Alegre/Bookman, 2ed, 887p.