



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica
Disciplina de Análise Matricial e Modelagem de Estruturas

Análise Numérica e Concepção Experimental de um Protótipo de Ponte de Palito de Picolé

Marcos Ramon Bezerra dos Santos
Thiago Ney Evaristo Rodrigues
Professor: Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

João Pessoa, PB
Março de 2020

Lista de Figuras

1.1	Ilustração dos palitos de picolé.	5
1.2	Ilustração da cola instantânea.	6
1.3	Ilustração do adesivo PVA.	6
1.4	Geometria proposta.	7
2.1	Criação de um novo material.	8
2.2	Criação de pontos.	9
2.3	Criação de linhas.	9
2.4	Criação da seção transversal.	10
2.5	Geometria inicial (seções transversais automáticas).	10
2.6	Geometria final (seções transversais rotacionadas).	11
2.7	Geometria da estrutura.	11
2.8	Malha inicial.	12
2.9	Malha final.	12
2.10	Condições de contorno.	13
2.11	Deformação total da primeira geometria.	14
2.12	Tensão combinada máxima da primeira geometria.	14
2.13	Deformação total da segunda geometria.	15
2.14	Tensão combinada máxima da segunda geometria.	15
2.15	Deformação total da malha inicial.	16
2.16	Tensão combinada máxima da malha inicial.	16
2.17	Deformação total da malha final.	17
2.18	Tensão combinada máxima da malha final.	17
2.19	Dados obtidos por simulação.	18
2.20	Deformação.	18
2.21	Tensão combinada mínima.	19
2.22	Tensão combinada máxima.	19
3.1	Detalhe das conexões entre palitos.	21
3.2	Vista lateral das conexões entre palitos.	22
3.3	Elementos para alívio de tensão.	22

4.1	Modelo finalizado e equipe que realizou o trabalho.	23
-----	---	----

Lista de Tabelas

- 2.1 Comparação (utilizando malha grosseira) de configurações de geometrias. . 15
- 2.2 Comparação (utilizando a geometria final) de configurações de malhas. . . 17

Conteúdo

1	Introdução	5
1.1	Materiais	5
1.1.1	Estrutura	5
1.1.2	Fixação	6
1.2	Geometria	6
2	Análise Numérica	8
2.1	Material	8
2.2	Geometria	8
2.3	Malha	11
2.4	Condições de Contorno	12
2.5	Resultados	13
2.5.1	Comparação de Geometrias	13
2.5.2	Comparação de Malhas	16
2.5.3	Limite da Estrutura	18
3	Concepção Experimental	21
4	Considerações finais e agradecimentos	23

Capítulo 1

Introdução

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo sobre a análise numérica e concepção experimental de um protótipo de uma ponte treliçada.

1.1 Materiais

1.1.1 Estrutura

Foi-se utilizado madeira (palitos de picolé) como material base para as análises e construção do protótipo.



Figura 1.1: Ilustração dos palitos de picolé.

As seguintes propriedades foram adotadas:

1. **Módulo de Young:** $E = 5,0 \times 10^5 \text{ psi}$
2. **Coefficiente de Poison:** $\nu = 0,018$
3. **Densidade:** $\rho = 0,005208 \text{ lb/in}^3$
4. **Resistência Última à Tração:** $2,1 \text{ MPa}$

A Resistência Última à Tração foi obtida através do site *Mat Web* para a madeira de Pinheiro (comumente utilizada para fabricação de palitos de picolé).

1.1.2 Fixação

Ao longo das junções foi-se utilizado cola instantânea e cola madeira (adesivo PVA) como material de fixação.



Figura 1.2: Ilustração da cola instantânea.



Figura 1.3: Ilustração do adesivo PVA.

1.2 Geometria

A geometria foi pré-definida como sendo a presente na imagem abaixo, existindo apenas a liberdade de variação da seção transversal dos elementos estruturais.

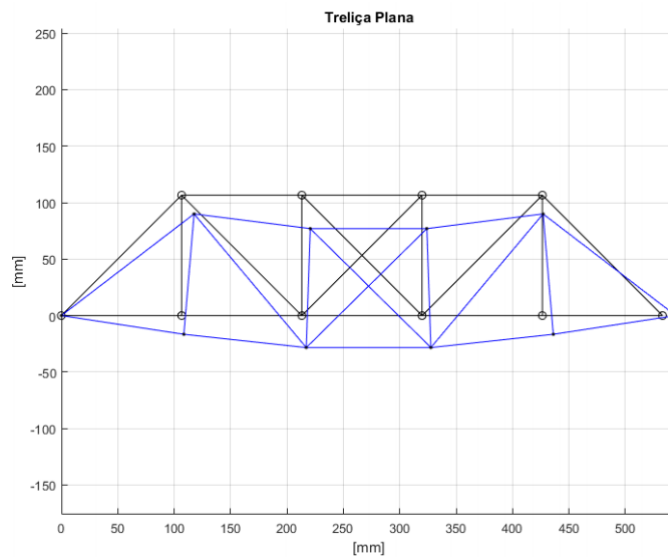


Figura 1.4: Geometria proposta.

Capítulo 2

Análise Numérica

Para a realização da análise numérica, foi-se utilizado a ferramenta *Static Structural* do software de simulação numérica Ansys® Workbench, Student Version.

2.1 Material

Na seção *Engineering Data*, criou-se um novo material, denominado *Wood*, com as propriedades apresentadas na seção 1.1.1. Estruturas.

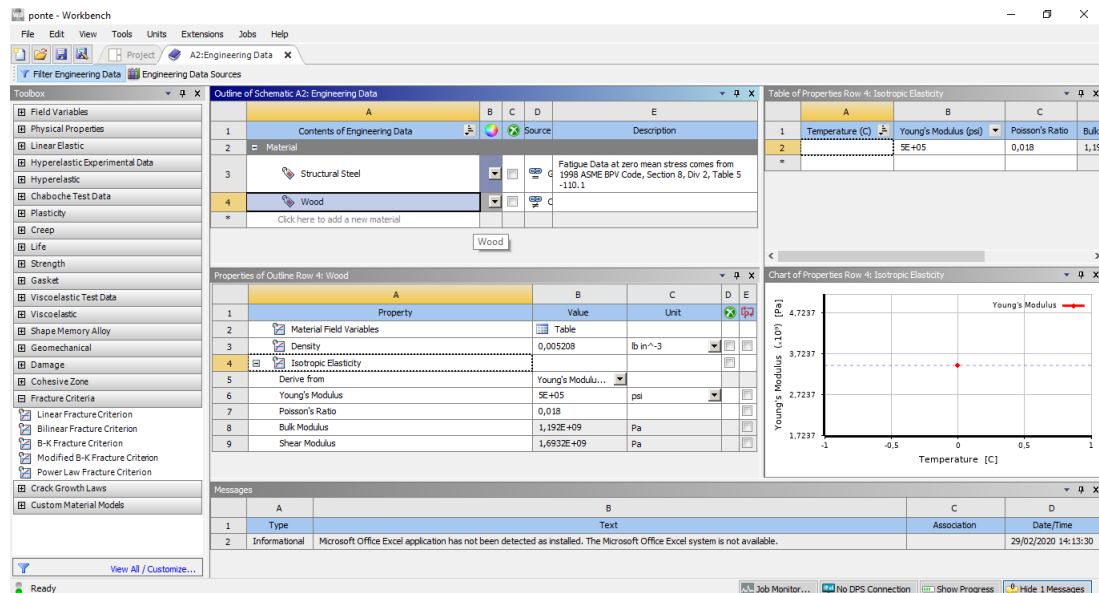


Figura 2.1: Criação de um novo material.

2.2 Geometria

Antes de iniciar o *Design Modeler*, definiu-se a propriedade *Line Body*.

A geometria constituiu-se basicamente da criação de: pontos, linhas e seção transversal. Após a realização do procedimento, o software proporciona uma geometria com o

posicionamento da seção transversal automática, buscou-se comparar os resultados dessa geometria automática com outra geometria com algumas seções transversais (as que unem as laterais da estrutura) rotacionadas (denominada geometria final).

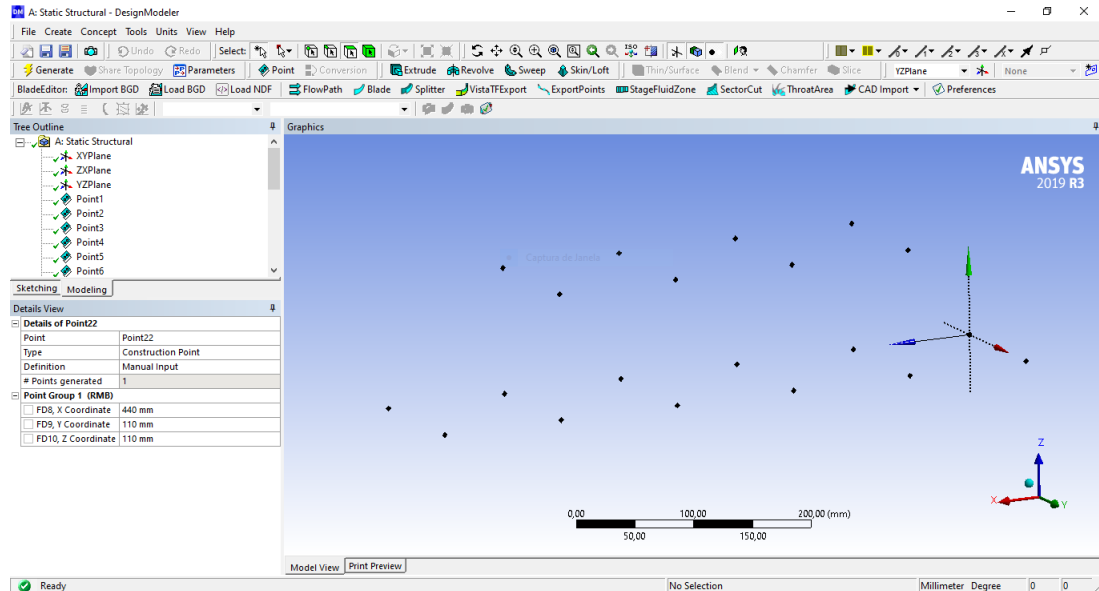


Figura 2.2: Criação de pontos.

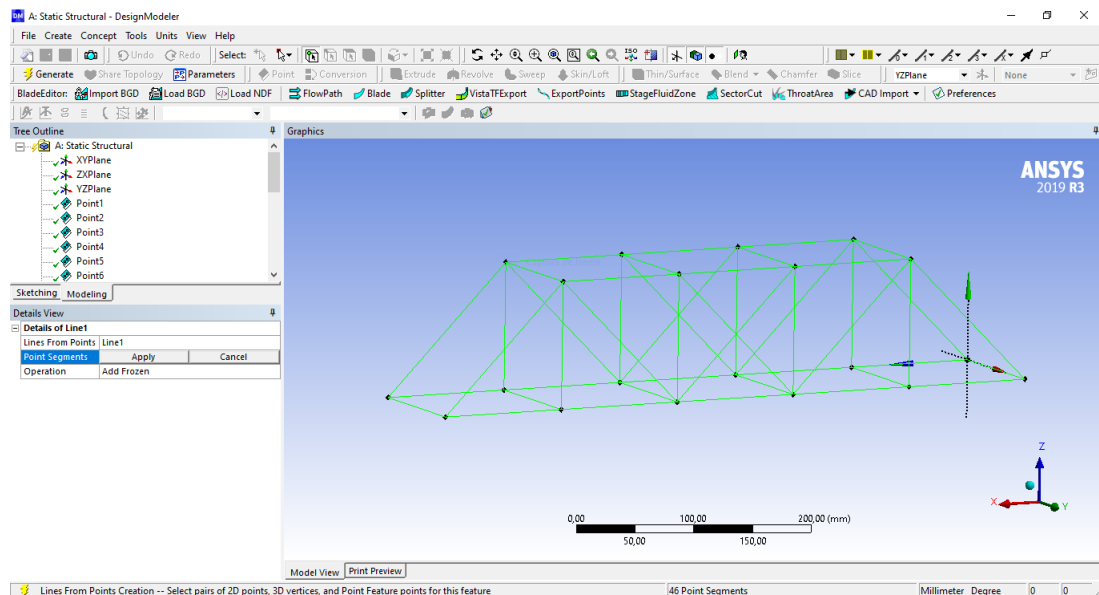


Figura 2.3: Criação de linhas.

A seção transversal adotada foi a relativa a 3 palitos de picolés unidos, ou seja, 6 mm versus 10 mm.

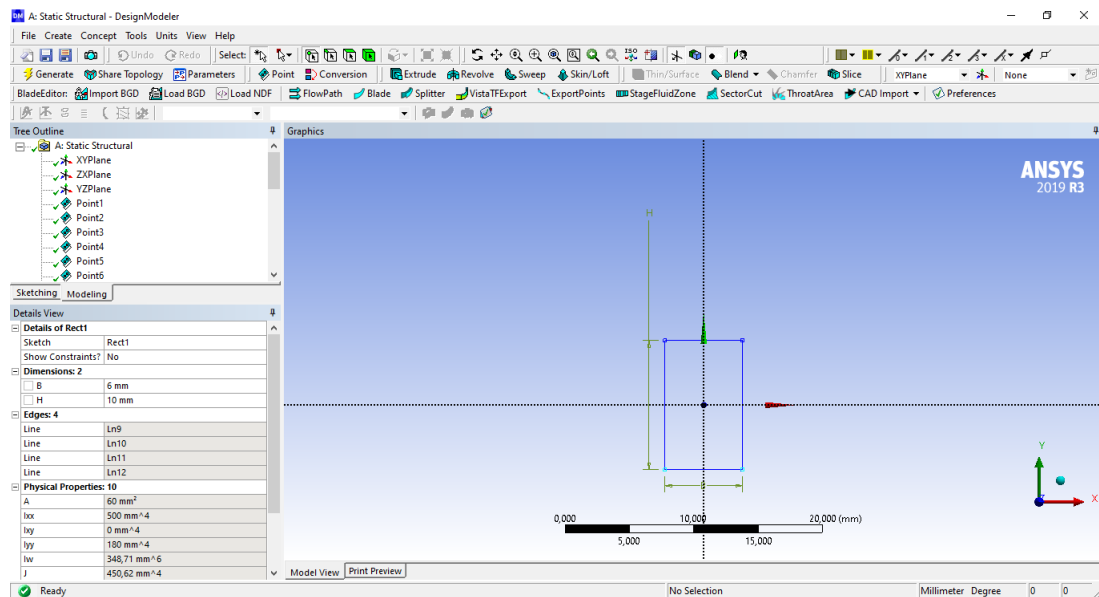


Figura 2.4: Criação da seção transversal.

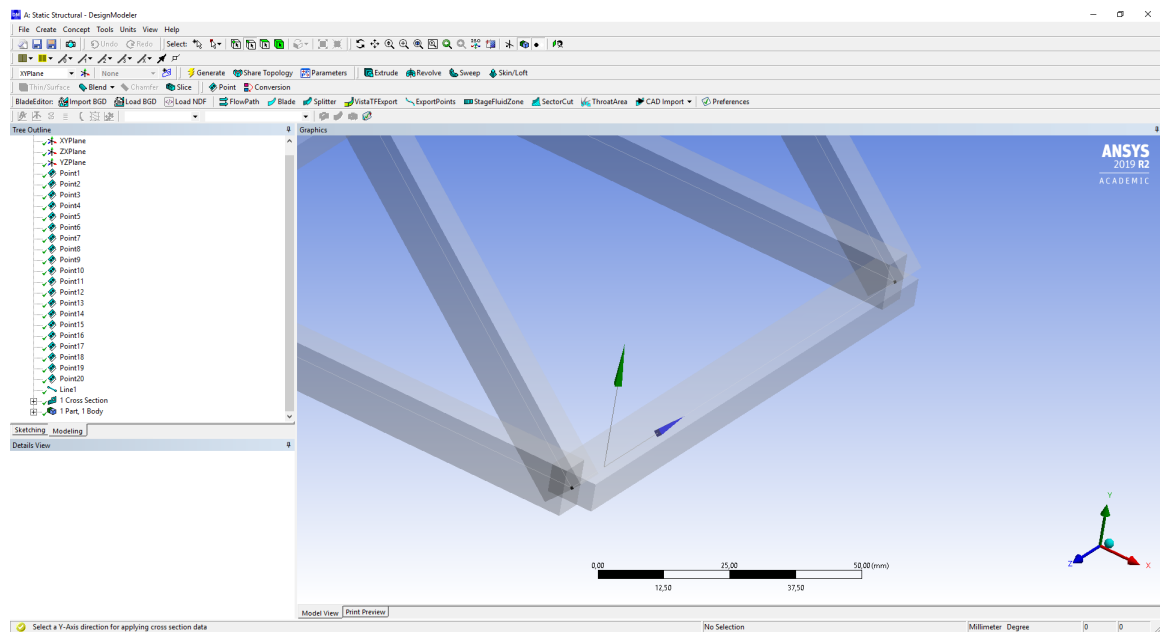


Figura 2.5: Geometria inicial (seções transversais automáticas).

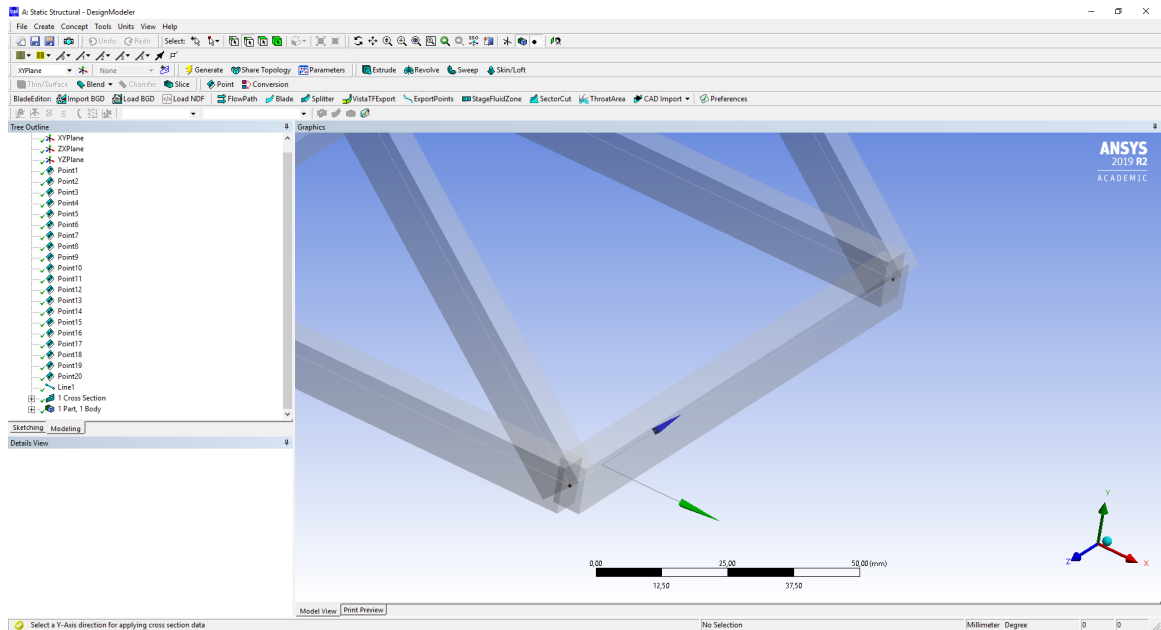


Figura 2.6: Geometria final (seções transversais rotacionadas).

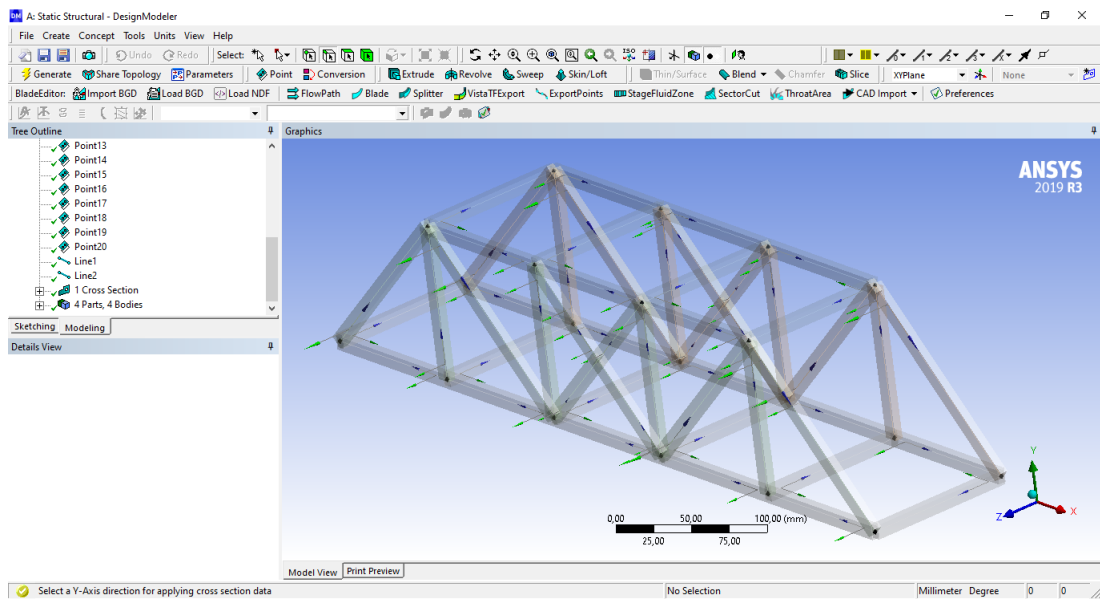


Figura 2.7: Geometria da estrutura.

2.3 Malha

Inicialmente, através da ferramenta *Body Sizing*, definiu-se uma malha grosseira, com 50 elementos de 220 mm e 92 nós. Essa configuração de malha foi utilizada para comparação das duas geometrias propostas.

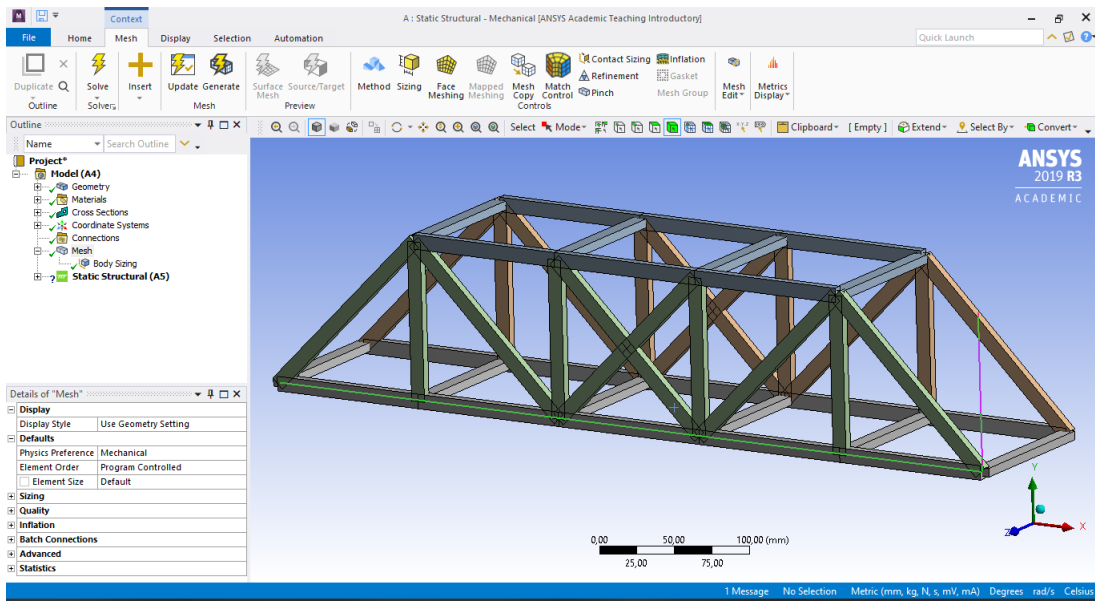


Figura 2.8: Malha inicial.

Posteriormente, definiu-se uma malha refinada, com 5612 elementos de 1 mm e 11216 nós. Essa configuração de malha foi utilizada apenas na geometria final (seção transversal rotacionada), com finalidade de comparação de resultados entre as diferentes malhas e obtenção da carga máxima que a ponte suporta.

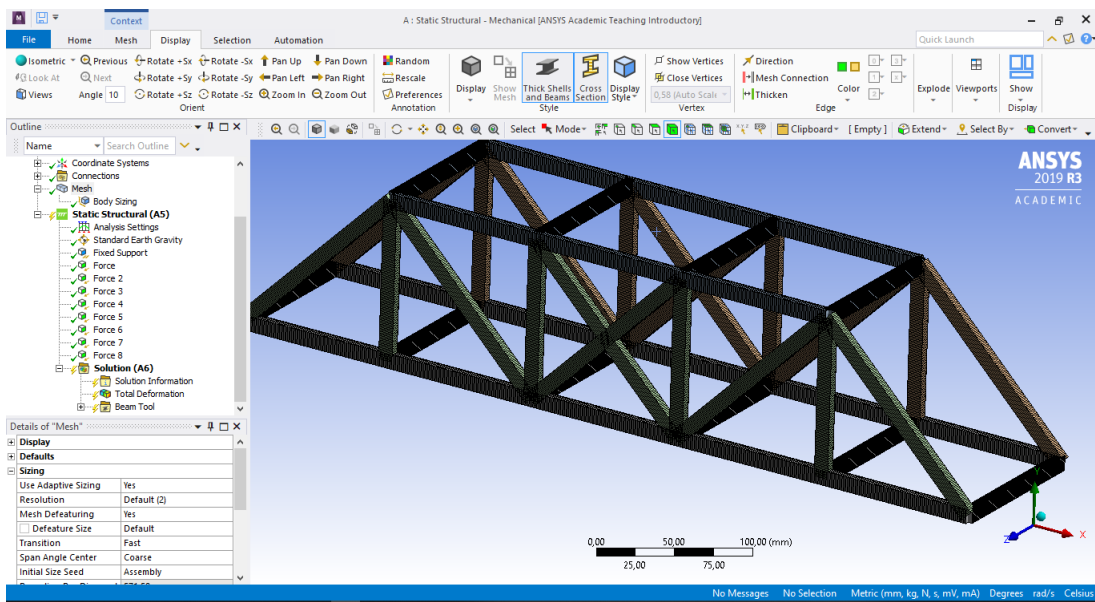


Figura 2.9: Malha final.

2.4 Condições de Contorno

Foiram definidos três condições de contorno: fixações, gravidade e carregamento (forças). A fixação ocorreu ao longo das arestas (0,0,0:110) e (550,0,0:110). A gravidade é

realizada automaticamente. O carregamento constitui-se de forças nos vértices superiores da geometria.

Ao longo das primeiras análises, definiu-se uma carga simbólica de 6 N em cada vértice (totalizando 48 N na estrutura), visto que essas análises foram realizadas apenas com o intuito de comparação de configurações (de geometria ou malha).

Posteriormente, foram realizadas novas análises para a geometria final e a malha refinada, a fim de se obter a carga máxima suportada na estrutura.

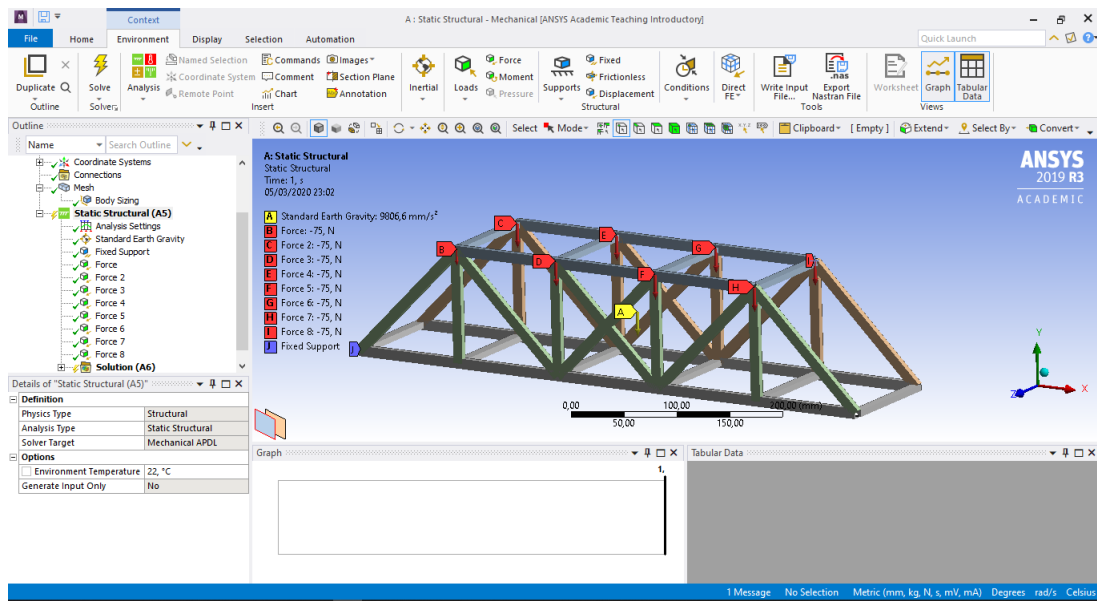


Figura 2.10: Condições de contorno.

2.5 Resultados

Com a utilização da propriedade *line body* foi possível a obtenção da deformação e das tensões combinadas (normal mais flexão) mínima e máxima.

Ao longo do trabalho, apresentou-se os valores extremos obtidos: o maior valor da tensão combinada máxima e o menor (negativo) valor da tensão combinada mínima.

2.5.1 Comparação de Geometrias

Após as análises, foi possível constatar que a diferença entre as geometrias é desprezível, embora a proposta automaticamente pelo software tenha obtido valores (insignificamente) inferiores.

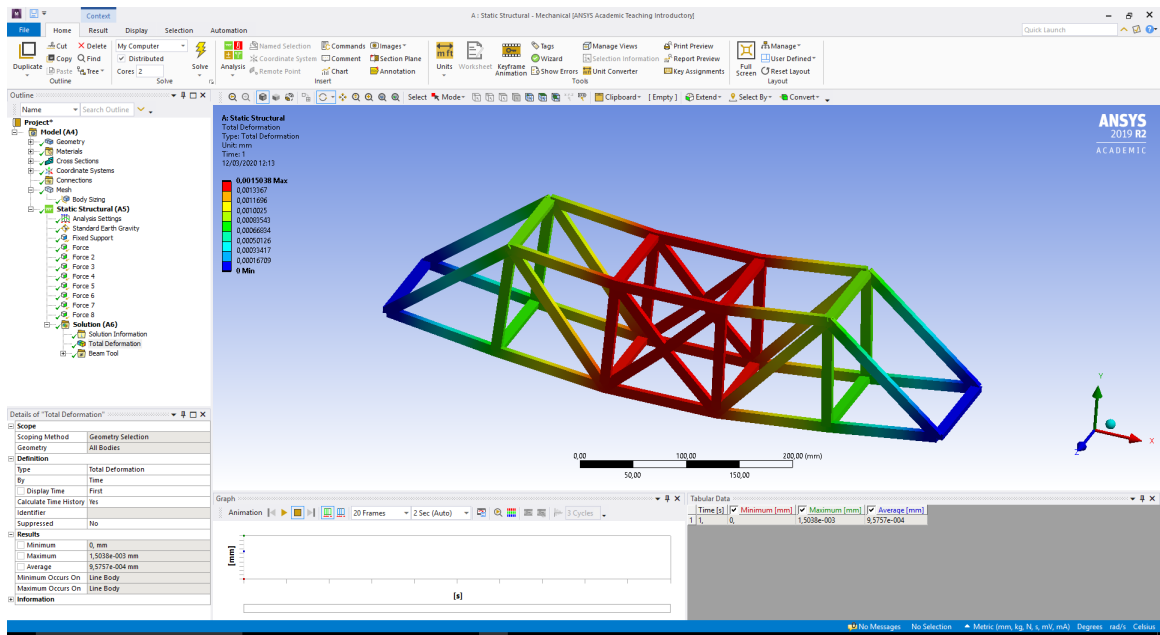


Figura 2.11: Deformação total da primeira geometria.

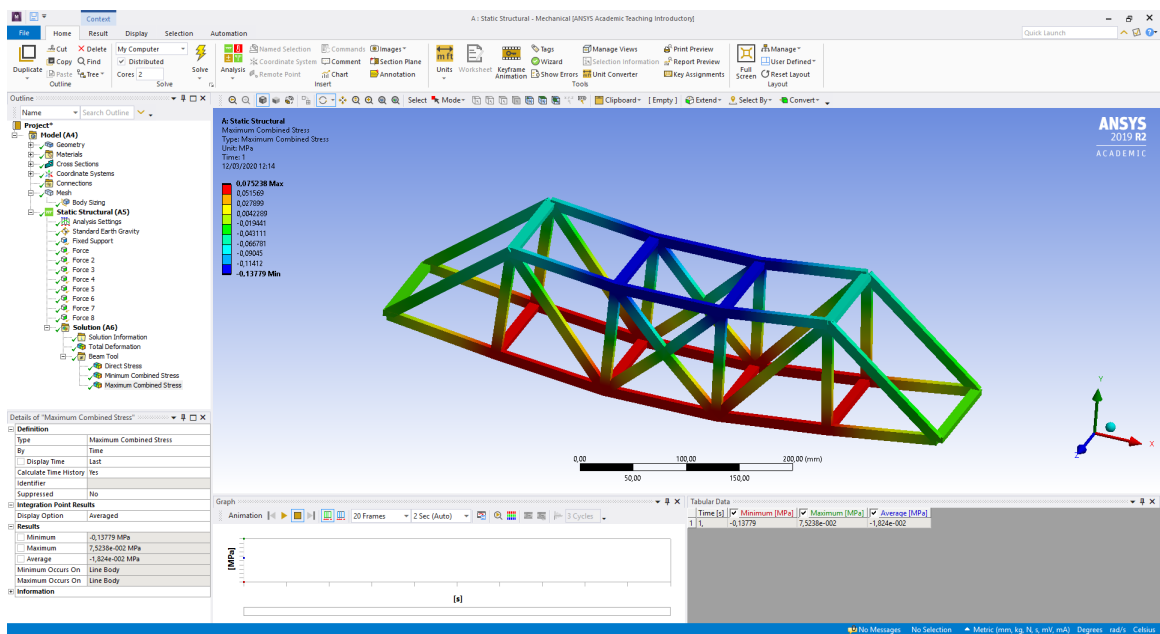


Figura 2.12: Tensão combinada máxima da primeira geometria.

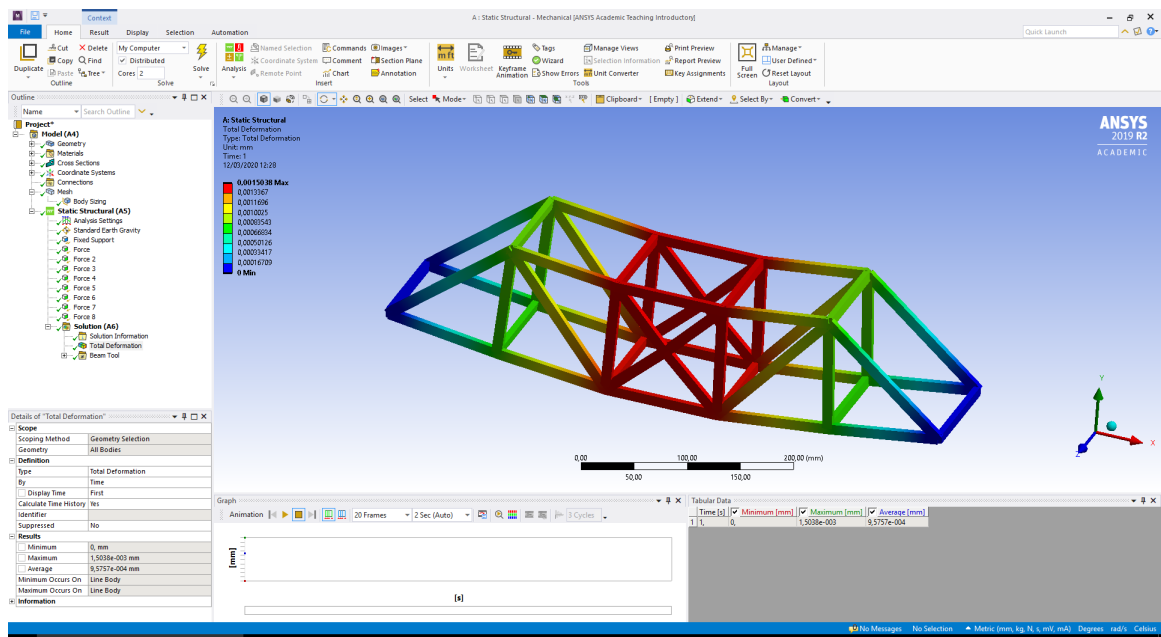


Figura 2.13: Deformação total da segunda geometria.

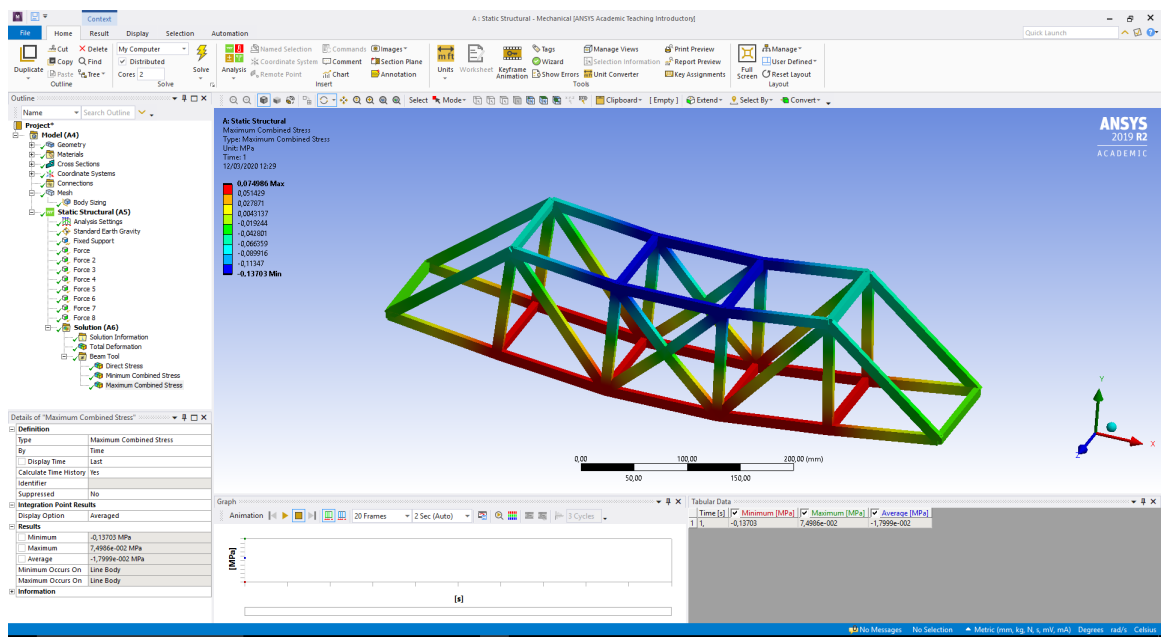


Figura 2.14: Tensão combinada máxima da segunda geometria.

Geometria	Deformação	Tensão Comb. Máxma	Tensão Comb. Mínima
Automática	1,5038e-3 mm	7,5238e-2 MPa	-1,5314e-2 MPa
Final	1,5038e-3 mm	7,4986e-2 MPa	-1,5163e-2 MPa
Desvio	0 %	0,335 %	0,986 %

Tabela 2.1: Comparação (utilizando malha grosseira) de configurações de geometrias.

2.5.2 Comparação de Malhas

Após as análises, foi possível constatar que o tamanho de malha influenciou bastante os resultados. Acredita-se que essa grande diferença ocorre pois na primeira configuração de malha, devido o tamanho proposto, cada elemento se comporta como elemento uniaxial (estando sujeito apenas a deformações lineares), já na segunda configuração de malha, devido ao tamanho proposto, cada elemento se comporta como elemento de viga (estado sujeito também a flexões).

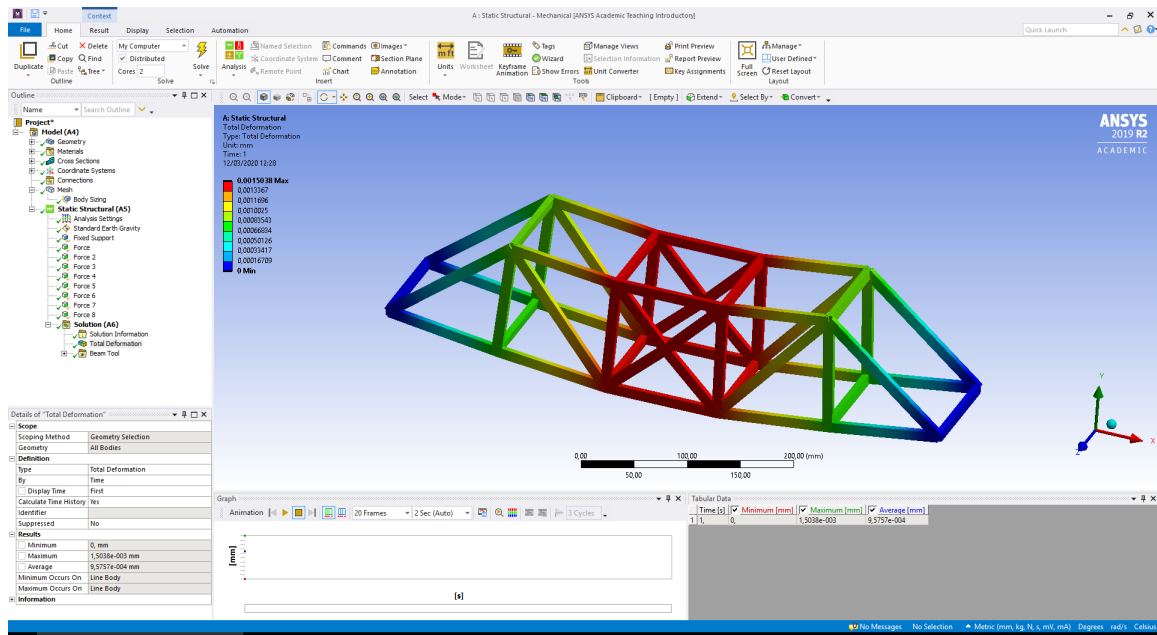


Figura 2.15: Deformação total da malha inicial.

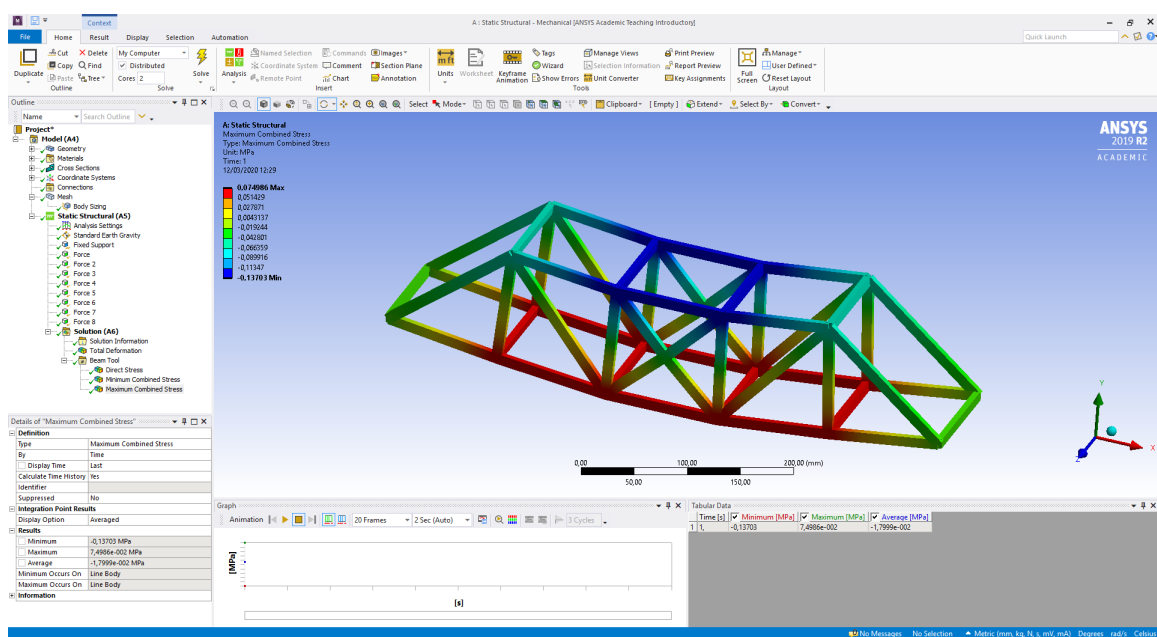


Figura 2.16: Tensão combinada máxima da malha inicial.

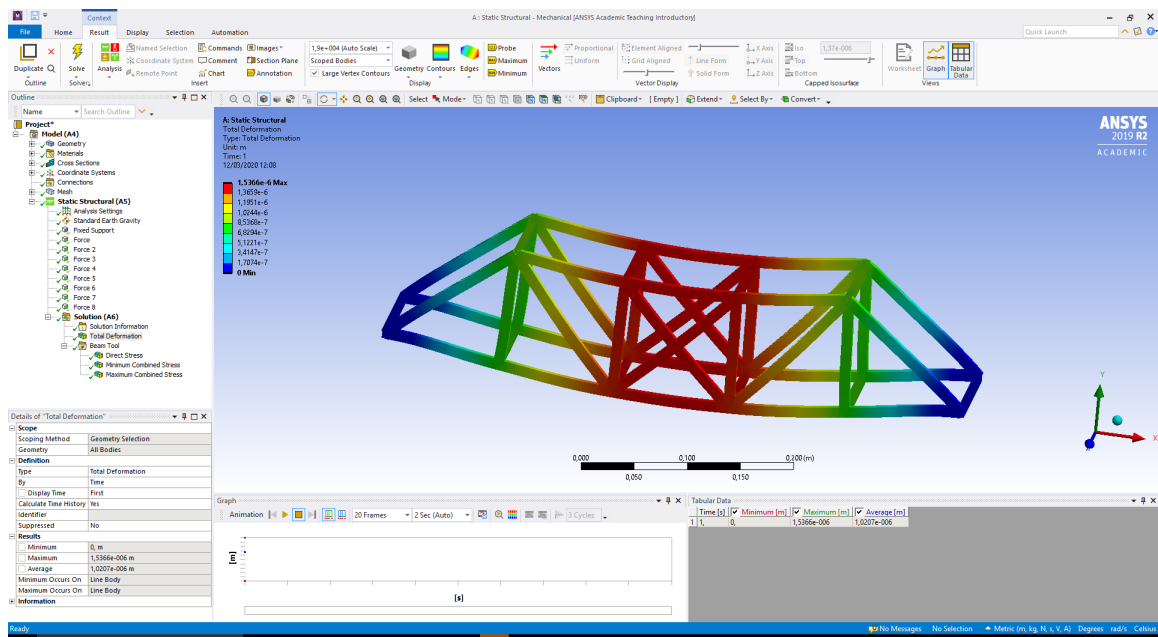


Figura 2.17: Deformação total da malha final.

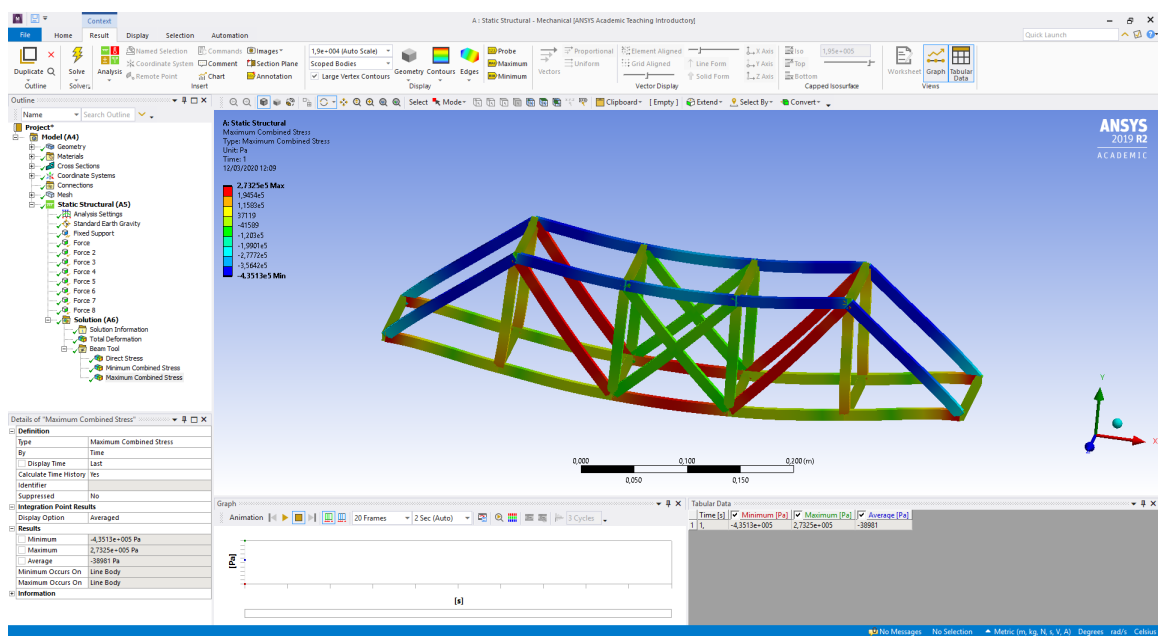


Figura 2.18: Tensão combinada máxima da malha final.

Malha	Deformação	Tensão Comb. Máxima	Tensão Comb. Mínima
Inicial	1,50E-3 mm	7,4986E-2 MPa	-1,5163e-2 MPa
Final	1,54E-03 mm	0,27325 MPa	-0,59279 MPa
Desvio	2,597 %	72,557 %	97,442 %

Tabela 2.2: Comparação (utilizando a geometria final) de configurações de malhas.

2.5.3 Limite da Estrutura

Foram realizadas análises com várias cargas distintas (para a configuração final e com a malha refinada) e observou-se que os resultados tenderam a uma relação linear.

Força Aplicada nos Nós [N]	Massa Total Aplicada [kg]	Deformação [mm]	Tensão Combinada Mínima [MPa]	Tensão Combinada Máxima [MPa]
6	4,89	1,54E-03	-0,59	0,27
12	9,79	2,56E-03	-0,95	0,42
18	14,68	3,58E-03	-1,31	0,57
24	19,57	4,60E-03	-1,67	0,72
30	24,46	5,63E-03	-2,03	0,88
36	29,36	6,65E-03	-2,41	1,03
42	34,25	7,67E-03	-2,79	1,19
48	39,14	8,69E-03	-3,14	1,34

Figura 2.19: Dados obtidos por simulação.

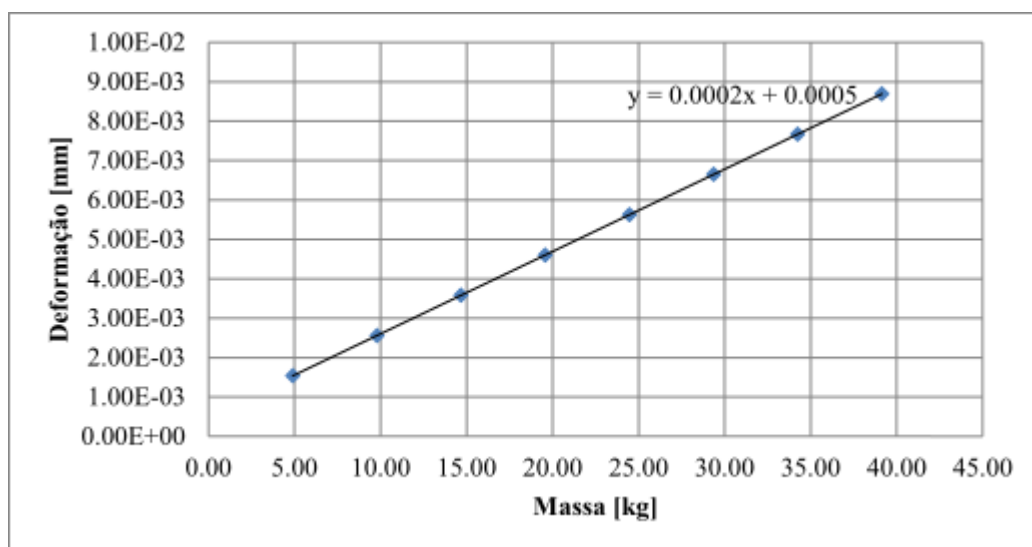


Figura 2.20: Deformação.

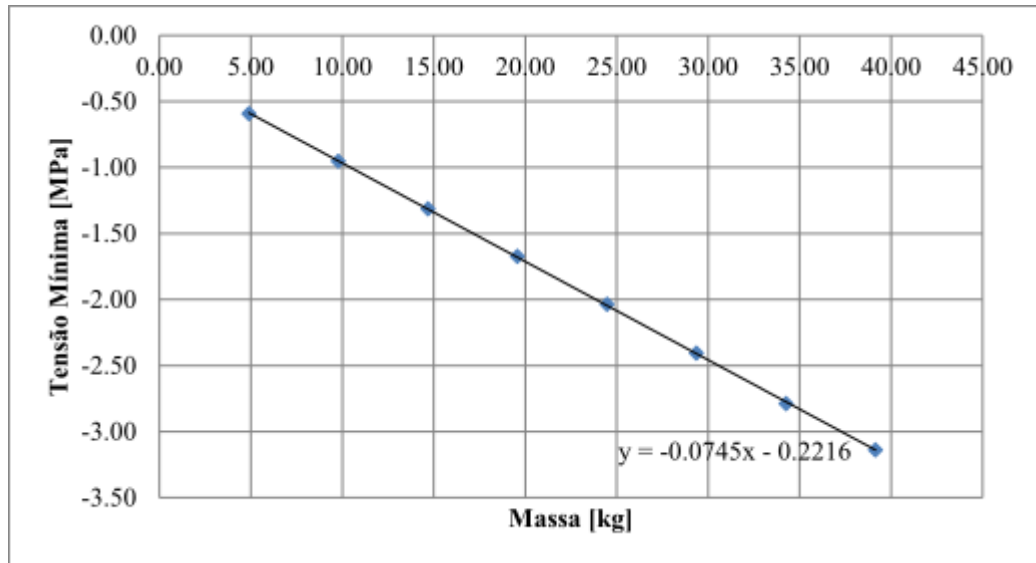


Figura 2.21: Tensão combinada mínima.

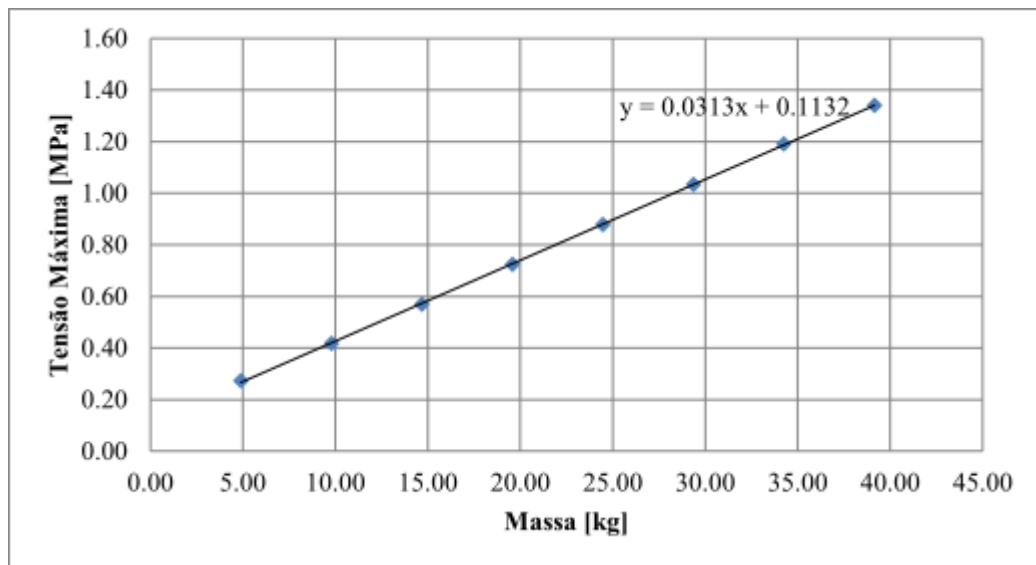


Figura 2.22: Tensão combinada máxima.

Portanto, através da Equação da Tensão Combinada Máxima obtida e da Resistência Última à Tração, tem-se que a estrutura projetada aguenta uma massa de:

$$\sigma = 0,0313m + 0,1132$$

$$2,1 = 0,0313m + 0,1132$$

$$m = 63,476 \text{ kg}$$

Tem-se também que, para a carga máxima suportada, ocorrerá uma deformação de:

$$\delta_{max} = 0,0002m + 0,0005$$

$$\delta_{max} = 0,0002 \times 63,576 + 0,0005$$

$$\delta_{max} = 0,01321 \text{ } mm$$

Capítulo 3

Concepção Experimental

A seguir, apresentam-se fatos relevantes no que diz respeito à construção do protótipo. Decisões foram tomadas a fim de diminuir as imperfeições do modelo real e aliviar pontos que sofrem com concentração de tensão.



Figura 3.1: Detalhe das conexões entre palitos.

A figura 3.1 evidencia um dos primeiros inconvenientes durante a manufatura da ponte. Como as pontas dos palitos são arredondadas, a área de contato entre um palito e outro diminui drasticamente, criando um possível ponto para concentração de tensões em uma região que naturalmente já estaria prejudicada, os nós.



Figura 3.2: Vista lateral das conexões entre palitos.

Como pode ser observado na figura 3.2, a solução promovida foi intercalar a posição dos palitos, de modo que essa região esteja entre dois palitos com seção transversal contínua, aumentando a área transversal da região e aliviando a tensão no ponto. Os espaços remanescentes foram preenchidos com cola.

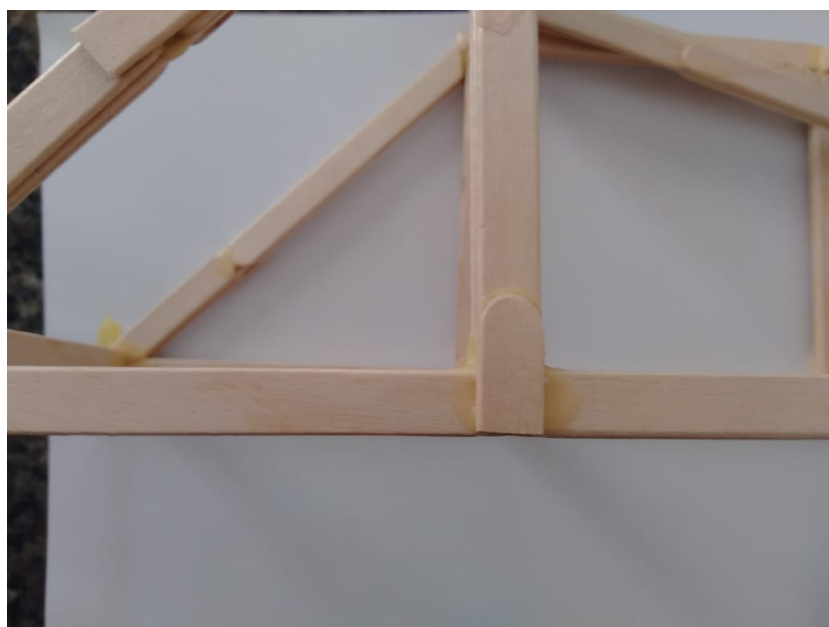


Figura 3.3: Elementos para alívio de tensão.

Além disso, foi adicionado um elemento na parte externa em nós considerados críticos, com a finalidade de aumentar a área de contato entre os palitos, reforçando ainda mais a região. Fato que pode ser observado na figura 3.3.

Capítulo 4

Considerações finais e agradecimentos

A equipe considera os resultados da prototipagem satisfatórios, uma vez que atenção redobrada foi adotada na fabricação dos nós, principalmente nas regiões identificadas através da análise numérica como aquelas que mais sofrem com as tensões combinadas. Devido ao tempo de cura da cola, nenhum teste foi previamente executado assim evitando o prejuízo à integridade do projeto.

Agradecemos ao professor Marcelo Cavalcanti pelos ensinamentos em sala de aula e por proporcionar uma atividade experimental muito enriquecedora, auxiliando a formação de um conhecimento fundamental para a carreira de qualquer engenheiro mecânico.

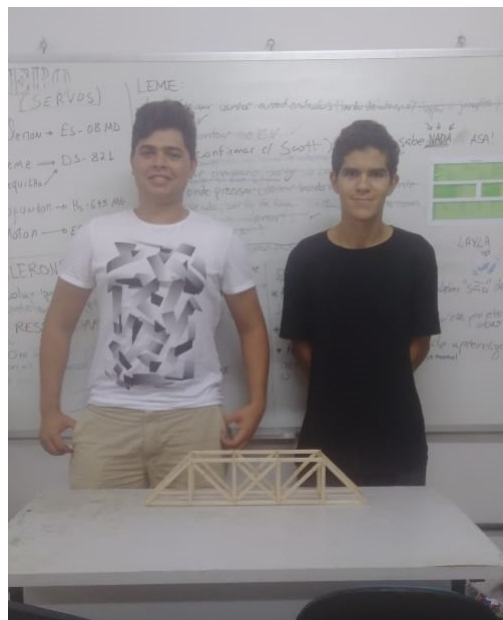


Figura 4.1: Modelo finalizado e equipe que realizou o trabalho.