



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARCELO FREIRE MONTENEGRO**

**UTILIZAÇÃO DO ANSYS COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA AUXILIAR O  
APRENDIZADO PRÁTICO NO ENSINO DE DISCIPLINAS NA ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**FORTALEZA - CE**

**2023**

MARCELO FREIRE MONTENEGRO

UTILIZAÇÃO DO ANSYS COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA AUXILIAR O  
APRENDIZADO PRÁTICO NO ENSINO DE DISCIPLINAS NA ENGENHARIA  
MECÂNICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Vanessa Vieira Gonçalves.

FORTALEZA - CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M784u Montenegro, Marcelo Freire.

Utilização do Ansys como ferramenta didática para auxiliar o aprendizado prático no ensino de disciplinas na engenharia mecânica / Marcelo Freire Montenegro. – 2023.  
130 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Vanessa Vieira Gonçalves.

1. Ansys. 2. Ensino de engenharia. 3. Método dos Elementos Finitos (MEF). 4. Mecânica dos sólidos. 5. Simulação. I. Título.

CDD 620.1

---

A Deus primeiramente.

Aos meus pais, Conceição e Clodovil.

À minha namorada, Caroline.

Ao meu irmão, Edson.

À minha Família e Amigos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças e me manter firme e íntegro apesar dos percalços e dos desafios em minha vida.

Aos meus pais, Conceição Freire e Clodovil Montenegro, por fazerem o possível, por todo o suporte dado a mim para que eu chegasse a esse momento de orgulho e vitória. Agradeço por todas as dificuldades superadas para que eu fosse capaz de concluir essa etapa em minha vida.

Ao meu irmão, Edson Freire, pelos conselhos, pela irmandade, por sempre tentar me compreender e por sua ajuda nos momentos em que precisei.

À minha namorada, Caroline Paula, pelo amor, pelo apoio, pela amizade, pelo companheirismo e pelo amadurecimento nessa jornada.

À Prof<sup>ª</sup>. Dr. Vanessa Vieira Gonçalves, por aceitar em ser a minha orientadora, pela sua paciência, pelos seus conselhos, pela sua prestatividade e sua orientação para que eu entregasse o melhor de mim.

Ao Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues, pela sua ajuda e paciência, pela generosa compreensão e pelos seus conhecimentos compartilhados.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Roberto de Araújo Bezerra e Prof<sup>ª</sup>. Dr. Maria Alexandra de Sousa Rios pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao secretário da coordenação Fernando, pela ajuda, pela paciência e pela gentileza em todas as vezes em que conversamos.

Aos meus amigos, pelo suporte nas situações mais desafiadoras da graduação, pelos momentos de descontração e debates, sobre os mais variados assuntos possíveis na ciência, na política, no cinema e na música. Em especial, dos que minha mente me permite lembrar, agradeço ao Thiago Camelo, Tito Lívio, Thiago Casimiro, Jeffersson Ferreira, Rodrigo Chaves, Gil, Camila, Ivo, Kevyn, Davi, Igor, João Vitor e ao grande Mestre Jakson, por seus conselhos e conversas, cuja as suas perspectivas me ajudaram a enxergar várias situações ou temas por ângulos interessantíssimos.

O mundo não é apenas sol e arco-íris. É um lugar muito ruim e desagradável e não importa o quão durão você seja, ele vai te deixar de joelhos e mantê-lo lá permanentemente se você deixar. Você, eu, ou ninguém vai bater tão forte quanto a vida, mas não é sobre o quão forte você bate. É sobre o quão forte você pode ser atingido e seguir em frente. O quanto você pode aguentar e continuar seguindo em frente. É assim que se ganha! (Sylvester Stallone - Rocky Balboa, 2006, tradução nossa).

## RESUMO

O desenvolvimento de projetos na engenharia segue em um ritmo veloz e inovador a cada dia, com tecnologias cada vez mais avançadas sendo utilizadas no seu âmbito profissional. Com o uso de softwares especialistas esse desenvolvimento e esse estudo de projetos se tornam mais ágeis e seguros. Pois entre as principais vantagens tem-se a grande capacidade de processamento de dados, a geração de relatórios completos e a exibição das soluções através de ferramentas visuais. Este trabalho teve como objetivo demonstrar que esses programas especialistas podem ser utilizados na graduação dos cursos de engenharia mecânica, como complemento e suporte ao aprendizado do aluno. Assim, foi utilizado o Ansys, um programa mundialmente reconhecido por ser muito preciso e confiável. Através dele, foram feitos variados estudos de caso, ao todo 9, relacionados as disciplinas de estática e mecânica dos sólidos 1 e 2, mais especificamente. Entre os quais, casos com vigas engastadas ou biapoias, com carregamentos concentrados ou distribuídos, com materiais lineares ou não lineares, um caso de treliça simples e um de parametrização. Também foi objeto de estudo um eixo escalonado sofrendo diferentes torções. Foi utilizado principalmente o AnsysWorkbench<sup>®</sup>, uma ferramenta que emprega o Método dos Elementos Finitos (MEF) para a resolução dos estudos de caso propostos. Na discussão dos resultados, em 3 casos, comparou-se os resultados obtidos pelo software com os obtidos por cálculos analíticos, além de comentários através do uso de imagens, de gráficos e de tabelas. Dessa forma, foi demonstrado como um software especialista pode ser utilizado como uma ferramenta didática na graduação, para apresentar visualmente, fixar e aprofundar os conceitos teóricos na prática.

**Palavras-chave:** Ansys; Ensino de engenharia; Método dos Elementos Finitos (MEF); Mecânica dos sólidos; Simulação.

## ABSTRACT

The development of projects in engineering continues at a fast and innovative pace every day, with increasingly advanced technologies being used in its professional scope. With the use of specialist software, this development and study of projects becomes more agile and secure. Because among the main advantages there is the great data processing capacity, the generation of complete reports and the display of solutions through visual tools. This work aimed to demonstrate that these specialist programs can be used in mechanical engineering courses, as a complement and support for student learning. Thus, Ansys was used, a program recognized worldwide for being very accurate and reliable. Through it, several case studies were made, in all 9, related to the disciplines of statics and mechanics of solids 1 and 2, more specifically. Among which, cases with cantilevered or simply supported beams, with concentrated or distributed loads, with linear or non-linear materials, a case of simple truss and one of parameterization. A staggered shaft undergoing different torsions was also studied. AnsysWorkbench<sup>®</sup> was the mainly used software, a tool that uses the Finite Element Method (FEM) to solve the proposed case studies. In the discussion of the results, in 3 cases, the results obtained by the software were compared with those obtained by manual calculations, in addition to comments through the use of images, graphs and tables. In this way, it was demonstrated how specialist software can be used as a didactic tool in graduation, to visually present, fix and deepen theoretical concepts in practice.

**Keywords:** Ansys; Engineering teaching; Finite Element Method (FEM); Mechanics of solids; Simulation.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Distribuição da tensão de flexão em uma viga. ....                 | 19 |
| Figura 2 – Distribuição de tensão de cisalhamento em um eixo sob torção.....  | 22 |
| Figura 3 – Treliça de telhado. ....   | 25 |
| Figura 4 – Exemplo de distribuição das forças em uma treliça de telhado. .... | 26 |
| Figura 5 – Pino liso.....   | 27 |
| Figura 6 – Chapa de ligação. ....   | 27 |
| Figura 7 – Elementos de duas forças. ....                                     | 27 |
| Figura 8 – Diagrama de corpo livre para o método das seções. ....             | 28 |
| Figura 9 – Curva parametrizada. ....  | 29 |
| Figura 10 – Exemplo de malha grosseira. ....                                  | 31 |
| Figura 11 – Exemplo de malha muito refinada. ....                             | 31 |
| Figura 12 – Exemplo de malha refinada.....                                    | 32 |
| Figura 13 – Viga biapoiada com carregamento uniforme. ....                    | 34 |
| Figura 14 – Tabela de ferramentas do Ansys.....                               | 35 |
| Figura 15 – Tabela das propriedades do material. ....                         | 35 |
| Figura 16 – Desenho da viga quadrada. ....                                    | 36 |
| Figura 17 – Detalhes da malha. ....   | 36 |
| Figura 18 – Gerar malha.....  | 37 |
| Figura 19 – Detalhes do deslocamento.....                                     | 37 |
| Figura 20 – Força e fixações aplicadas.....                                   | 38 |
| Figura 21 – Inserindo deformação direcional.....                              | 38 |
| Figura 22 – Path (Linha de Superfície). ....                                  | 40 |
| Figura 23 – Path 2 (Linha de Centro).....                                     | 41 |
| Figura 24 – Viga biapoiada com carga concentrada. ....                        | 42 |
| Figura 25 – Força concentrada e fixações. ....                                | 43 |
| Figura 26 – Detalhes da convergência.....                                     | 44 |
| Figura 27 – Detalhes da força de reação. ....                                 | 44 |
| Figura 28 – Viga Engastada sob carregamento. ....                             | 45 |
| Figura 29 – Sinal da malha desatualizada. ....                                | 46 |
| Figura 30 – Malha padrão automática do Ansys. ....                            | 46 |
| Figura 31 – Viga I após refinamento de malha.....                             | 47 |
| Figura 32 – Viga I com carregamento não-linear. ....                          | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 33 – Aba para escolha de material não-linear. ....                    | 49 |
| Figura 34 – Escolha do perfil da viga. ....                                  | 49 |
| Figura 35 – Medidas da viga I utilizada. ....                                | 50 |
| Figura 36 – Especificação das medidas do Perfil I. ....                      | 50 |
| Figura 37 – Parâmetros da etapa 1. ....                                      | 52 |
| Figura 38 – Atribuição da pressão pelo tempo. ....                           | 53 |
| Figura 39 – Atribuição da pressão pelo comprimento no eixo ‘z’ da viga. .... | 54 |
| Figura 40 – Viga biapoiada com carregamento no centro. ....                  | 55 |
| Figura 41 – Propriedades do Alumínio 2023-T3. ....                           | 56 |
| Figura 42 – Desenho da viga. ....  | 58 |
| Figura 43 – Configurações do contato. ....                                   | 59 |
| Figura 44 – Configuração dos contatos entre os elementos da simulação. ....  | 59 |
| Figura 45 – Configurações avançadas. ....                                    | 60 |
| Figura 46 – Detalhes da configuração na etapa 1. ....                        | 61 |
| Figura 47 – Detalhes da configuração na etapa 2. ....                        | 61 |
| Figura 48 – Quatro vértices da viga. ....                                    | 62 |
| Figura 49 – Tabela e gráfico representando o movimento do cilindro. ....     | 62 |
| Figura 50 – Viga quadrada em balanço. ....                                   | 63 |
| Figura 51 – Condições de contorno da viga em balanço. ....                   | 65 |
| Figura 52 – Torção em barra escalonada. ....                                 | 66 |
| Figura 53 – Barra escalonada de múltiplos diâmetros. ....                    | 67 |
| Figura 54 – Criando um novo material. ....                                   | 68 |
| Figura 55 – Face onde está aplicado o momento 1 (Ponto A). ....              | 69 |
| Figura 56 – Face onde está aplicado o momento 2 (Ponto B). ....              | 70 |
| Figura 57 – Treliça 2D. ....   | 71 |
| Figura 58 – Condições de contorno aplicadas na treliça. ....                 | 73 |
| Figura 59 – Cantoneira. ....   | 74 |
| Figura 60 – Malha após o refinamento. ....                                   | 76 |
| Figura 61 – Os três parâmetros de entrada ‘D’ . ....                         | 77 |
| Figura 62 – O parâmetro de saída ‘P’ . ....                                  | 78 |
| Figura 63 – Caixa de parametrização com a seta de entrada e de saída. ....   | 78 |
| Figura 64 – Aba de parâmetros de entrada e saída. ....                       | 79 |
| Figura 65 – Aba dos pontos de parametrização. ....                           | 79 |
| Figura 66 – Deflexão da Viga. ....   | 81 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 67 – Tensão de Von-Mises. ....  | 82  |
| Figura 68 – Convergência de 1 % dos resultados de tensão de Von-Mises.....             | 82  |
| Figura 69 – Deflexão da Linha de Superfície.....                                       | 83  |
| Figura 70 – Deflexão da Linha de Centro. ....  | 84  |
| Figura 71 – Tensão normal. ....  | 85  |
| Figura 72 – Tensão de Von-Mises na linha de superfície. ....                           | 85  |
| Figura 73 – Tensão de Von-Mises na linha de centro. ....                               | 86  |
| Figura 74 – Forças de reação.....  | 87  |
| Figura 75 – Deflexão da viga. ....   | 90  |
| Figura 76 – Tensão de Von-Mises. ....  | 91  |
| Figura 77 – Convergência.....  | 91  |
| Figura 78 – Deformação da Linha de Superfície.....                                     | 92  |
| Figura 79 – Deformação da Linha de Centro. ....  | 92  |
| Figura 80 – Tensão de Von-Mises na linha superfície.....                               | 93  |
| Figura 81 – Tensão de Von-Mises na linha de centro.....                                | 94  |
| Figura 82 – Tensão Normal. ....  | 95  |
| Figura 83 – Forças de reação.....  | 95  |
| Figura 84 – Deflexão da viga utilizando a malha padrão do software. ....               | 98  |
| Figura 85 – Deflexão da viga utilizando a malha refinada.....                          | 99  |
| Figura 86 – Tensão equivalente de Von-Mises utilizando a malha padrão do software..... | 100 |
| Figura 87 – Tensão equivalente de Von-Mises utilizando a malha refinada. ....          | 100 |
| Figura 88 – Tensão máxima principal utilizando a malha padrão do software. ....        | 101 |
| Figura 89 – Tensão máxima principal utilizando a malha refinada.....                   | 102 |
| Figura 90 – Tensão equivalente de Von-Mises. ....                                      | 103 |
| Figura 91 – Deformação total equivalente. ....   | 103 |
| Figura 92 – Tensão equivalente de um nó na fase plástica.....                          | 104 |
| Figura 93 – Deformação total equivalente de um nó na fase plástica. ....               | 104 |
| Figura 94 – Deflexão no eixo ‘y’ no primeiro momento.....                              | 106 |
| Figura 95 – Deflexão no eixo ‘y’ no segundo momento. ....                              | 106 |
| Figura 96 – Deformação plástica equivalente. ....                                      | 107 |
| Figura 97 – Força de reação. ....  | 108 |
| Figura 98 – Deflexão da viga. ....   | 110 |
| Figura 99 – Máximo momento fletor.....   | 110 |
| Figura 100 – Tensão Máxima de Flexão. ....   | 111 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 101 – Tensão equivalente de Von-Mises. ....                             | 112 |
| Figura 102 – Deformação elástica equivalente. ....                             | 113 |
| Figura 103 – Reação do momento 1.....  | 114 |
| Figura 104 – Reação do momento 2.....  | 114 |
| Figura 105 – Máxima tensão de cisalhamento. ....                               | 115 |
| Figura 106 – Deformação total no eixo x. ....                                  | 116 |
| Figura 107 – Deformação total no eixo y. ....                                  | 116 |
| Figura 108 – Deformação do vértice inferior direito no eixo x.....             | 117 |
| Figura 109 – Deformação do vértice inferior direito no eixo y.....             | 117 |
| Figura 110 – Deformação do vértice superior no eixo x. ....                    | 118 |
| Figura 111 – Deformação do vértice superior no eixo y.....                     | 118 |
| Figura 112 – Tensão direta na treliça.....                                     | 119 |
| Figura 113 – Forças de reação no vértice inferior esquerdo para a treliça..... | 119 |
| Figura 114 – Forças de reação no vértice inferior direito para a treliça.....  | 120 |
| Figura 115 – Deformação total da cantoneira. ....                              | 120 |
| Figura 116 – Tensão equivalente de Von-Mises. ....                             | 121 |
| Figura 117 – Fator de segurança.....   | 122 |
| Figura 118 – Resultados da parametrização. ....                                | 123 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |     |
|--|-----|
| Gráfico 1 – Força cortante e momento fletor para carga distribuída. .... | 88  |
| Gráfico 2 – Força cortante e momento fletor para carga concentrada.....  | 97  |
| Gráfico 3 – Tensão por Deformação plotado pelo Ansys. ....               | 105 |
| Gráfico 4 – Deflexão y pelo tempo. ....                                  | 108 |
| Gráfico 5 – Deformação pelo tempo. ....                                  | 109 |
| Gráfico 6 – Força de reação pelo tempo.....                              | 109 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Propriedade das seções transversais.....                                      | 19 |
| Tabela 2 – Fórmulas do momento de flexão máximo para vigas. ....                         | 20 |
| Tabela 3 – Fórmulas de deflexão máxima. ....   | 21 |
| Tabela 4 – Fórmulas dos fatores geométricos ‘Q’ e ‘K’.....                               | 24 |
| Tabela 5 – Resultados obtidos para a viga sob carregamento distribuído. ....             | 89 |
| Tabela 6 – Resultados obtidos para a viga sob carregamento concentrado. ....             | 97 |
| Tabela 7 – Resultados obtidos para a viga refinada, com elemento de malha de 10 mm. .... | 98 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| 2D  | Duas dimensões                |
| 3D  | Três dimensões                |
| FEM | Finite Element Method         |
| MEF | Método dos Elementos Finitos  |
| UFC | Universidade Federal do Ceará |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                   |                                |
|-------------------|--------------------------------|
| $\sigma$          | Tensão de flexão               |
| $\tau$            | Tensão de cisalhamento         |
| $\theta$          | Ângulo de rotação              |
| $\sum F_x$        | Somatório de forças no eixo x  |
| $\sum F_y$        | Somatório de forças no eixo y  |
| $\sum M$          | Somatório de momentos          |
| N                 | Newton                         |
| m                 | Metro                          |
| mm                | Milímetro                      |
| N/cm <sup>2</sup> | Newton por centímetro quadrado |
| mm/mm             | Milímetro por milímetro        |
| GPa               | Gigapascal                     |
| MPa               | Megapascal                     |
| KPa               | Quilopascal                    |
| Pa                | Pascal                         |
| ©                 | Marca registrada               |
| %                 | Porcentagem                    |



## SUMÁRIO

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 1     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | 14  |
| 2     | <b>JUSTIFICATIVA</b> .....  | 16  |
| 3     | <b>OBJETIVOS</b> .....  | 17  |
| 3.1   | <b>Objetivos gerais</b> .....   | 17  |
| 3.2   | <b>Objetivos específicos</b> .....  | 17  |
| 4     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | 18  |
| 4.1   | <b>Vigas</b> .....  | 18  |
| 4.2   | <b>Treliças</b> .....   | 25  |
| 4.3   | <b>Parametrização</b> .....   | 29  |
| 4.4   | <b>Elementos Finitos</b> .....  | 30  |
| 4.5   | <b>Ansys</b> .....  | 32  |
| 5     | <b>METODOLOGIA</b> .....  | 33  |
| 5.1   | <b>Modelagem dos elementos em estudo</b> .....                            | 34  |
| 5.1.1 | <i>Viga simples biapoiada com carregamento uniforme</i> .....             | 34  |
| 5.1.2 | <i>Viga simples biapoiada com carregamento concentrado</i> .....          | 42  |
| 5.1.3 | <i>Viga I engastada com carregamento constante</i> .....                  | 45  |
| 5.1.4 | <i>Viga I com carregamento não-linear</i> .....                           | 48  |
| 5.1.5 | <i>Teste de flexão em uma viga biapoiada de material não linear</i> ..... | 55  |
| 5.1.6 | <i>Viga quadrada em balanço</i> .....                                     | 63  |
| 5.1.7 | <i>Torção em barra escalonada</i> .....                                   | 65  |
| 5.1.8 | <i>Análise treliça 2D</i> .....   | 70  |
| 5.1.9 | <i>Parametrização</i> .....   | 74  |
| 6     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                       | 81  |
| 6.1   | <b>Viga biapoiada com carregamento uniformemente distribuído</b> .....    | 81  |
| 6.2   | <b>Viga biapoiada com carregamento concentrado</b> .....                  | 90  |
| 6.3   | <b>Viga I engastada sofrendo força concentrada</b> .....                  | 98  |
| 6.4   | <b>Viga I engastada sofrendo carga não linear</b> .....                   | 102 |
| 6.5   | <b>Flexão em uma viga biapoiada de material não linear</b> .....          | 105 |
| 6.6   | <b>Viga quadrada em balanço</b> .....                                     | 110 |
| 6.7   | <b>Torção em barra escalonada</b> .....                                   | 112 |
| 6.8   | <b>Análise de treliça 2D</b> .....  | 116 |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>6.9</b> | <b>Parametrização .....</b>                       | <b>120</b> |
| <b>7</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                 | <b>124</b> |
| <b>8</b>   | <b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b> | <b>125</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                          | <b>126</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Hoje, com o advento da tecnologia e seu desenvolvimento, muito se fala em trabalhos desenvolvidos com a ajuda de programas computacionais especiais. Esses programas são chamados de Programas Especialistas ou Sistemas Especialistas (Expert System, em inglês). Esses softwares são compostos por sistemas inteligentes que armazenam e processam dados e conhecimentos advindos de pessoas especialistas em determinada área de estudo. Ou seja, eles têm a capacidade de reproduzir um conhecimento de um humano em alguma determinada área e a partir desse conhecimento, ajudar profissionais em tomadas de decisão. Seja na área médica, computacional, financeira, de engenharia, de matemática, de física ou em qualquer área que se possa resolver problemas numa sequência lógica de passos.

As principais vantagens desses programas computacionais, são dentre muitas, a rápida capacidade de processamento de dados, baixo custo operacional, além de não sofrerem influência de fatores humanos como o estresse, a fadiga ou a pressões emocionais. Trabalham de forma lógica com dados aplicados a teorias, equações e tabelas, promovendo segurança e estabilidade, sendo bastante aceito na comunidade acadêmica e profissional. Evidentemente, o software estará limitado ao conhecimento do grupo de especialistas que o fez, sendo normal o aparecimento de novas edições de revisão do mesmo programa. Edições essas que corrigem erros de funcionamento, que aumentam e atualizam a sua base de dados, que melhoram sua interface gráfica para os seus usuários e que acrescentam melhores recursos de funcionalidade. Permitindo assim, que o software esteja sempre em evidência e com resultados precisos e confiáveis.

Na engenharia mecânica, é muito comum, tanto na graduação quanto na vida profissional, ver o uso de programas especialistas na área de projetos em geral. Programas especializados em desenhos técnicos em 2D e em desenhos em 3D. Especialistas em simulações de componentes mecânicos e eletrônicos, em simulações de fadiga e estresse, de fluidos, de termodinâmica, de transferência de calor e em cálculos de projeto. Permitindo assim, em situações profissionais, o desenvolvimento de novos componentes ou o melhoramento e aperfeiçoamento dos mesmos.

Já para alunos graduandos, esses softwares podem contribuir no aperfeiçoamento e entendimento de teorias aplicadas na prática, em problemas ou em estudo de casos diversos. Na vida acadêmica, muitos problemas e casos de estudo são apresentados nas disciplinas de mecânica dos sólidos, sob formas mais simples como vigas, placas e cascas. Para estes modelos, são usados métodos analíticos, como o cálculo diferencial, que fornecem respostas exatas para

deformações, tensões e deslocamentos. Esse método, como já fora mencionado, além de robusto, usa equações diferenciais de infinitos elementos infinitesimais para se obter a resolução de uma viga reta, por exemplo. Porém, alguns problemas da vida real, por serem complexos em sua geometria, se tornam complicados e trabalhosos de se resolver usando soluções de equações diferenciais. Tornando a resolução quase inviável por se tratar de infinitos pontos de análise de um objeto com vários tipos de formas geométricas.

Como solução, os softwares usam como ferramenta matemática o Método dos Elementos Finitos, o qual permite que problemas com geometrias complexas sejam resolvidos com uma abordagem da subdivisão ou da discretização de números finitos de partes ou elementos. Dessa forma, este estudo mostra como essa ferramenta pode ser utilizada como auxílio a abordagem didática possibilitando maior aprofundamento e visualização de temas abordados em disciplinas como estática e mecânica dos sólidos.

## 2 JUSTIFICATIVA

A escolha do Ansys como ferramenta de trabalho nesse projeto deve-se, principalmente, por sua consagração como um software de análise de elementos finitos, sendo respeitado em todo o mundo por sua confiabilidade e segurança em seus cálculos. Além de possuir, em sua utilização, uma ótima curva de aprendizado. Facilitando o acesso a todo àquele que deseja iniciar ou aprofundar os seus estudos através do mesmo.

O uso de um software especialista se mostra de grande valia aos professores, como ferramenta didática para explicar conceitos abstratos, recorrentes na graduação de um engenheiro. Este presente trabalho tem como importante tarefa, demonstrar como um software pode auxiliar professores e alunos em sua jornada de aprendizado da faculdade, fazendo com o que o aluno se aproxime de termos usuais da engenharia mecânica como: simulações, método dos elementos finitos, refino de malha e desenvolvimento de projeto.

O uso do software possibilita que o aluno tenha um maior desenvolvimento e compreensão da teoria visualmente, pois o programa retorna dados como vídeos das simulações, gráficos plotados, ponto de máximo de carga, ponto de mínimo carga, malha do objeto, deformação da estrutura e distribuição de cargas através de esquema de cores.

Através da resolução de recorrentes exercícios, o aluno irá desenvolver uma maior experiência pessoal com o conteúdo dentro e fora de aula. Fortalecendo os conhecimentos na graduação do aluno, assim, entregando o mesmo ao mercado de trabalho mais preparado.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivos gerais

Demonstrar através de simulações em Elementos Finitos, a utilidade do software especialista AnsysWorkbench<sup>®</sup>, como ferramenta didática para auxiliar o aprendizado prático em disciplinas de Estática e de Mecânica dos Sólidos.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Selecionar 9 tipos de exemplos de mecânica dos sólidos e de estática, que exemplifiquem várias situações de problemas estudados na graduação;
- Selecionar um exemplo que demonstre uma solução por meio da parametrização de um problema;
- Demonstrar o passo a passo de como o aluno pode implementar esses problemas utilizando o AnsysWorkbench<sup>®</sup>;
- Realizar simulações desses exemplos em elementos finitos, variando os parâmetros analisados e tipos de gráficos plotados;
- Discutir os resultados obtidos através do software com os obtidos por meio de cálculos manuais.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido ao objetivo desse trabalho em demonstrar a utilidade do software AnsysWorkbeanch<sup>©</sup> como ferramenta de auxílio no estudo acadêmico, o mesmo usará como base em sua fundamentação teórica, a bibliografia básica recomendada pela ementa do curso de engenharia mecânica, na Universidade Federal do Ceará (UFC). Bibliografia essa que compreende os livros texto “Estática: Mecânica para Engenharia” e “Resistência dos Materiais” ambos do autor Russel C. Hibbeler. Como livro complementar será usado o “Projeto de Máquinas – Uma Abordagem Integrada”, do autor Robert L. Norton. Além de outros livros texto que foram consultados e creditados posteriormente na bibliografia.

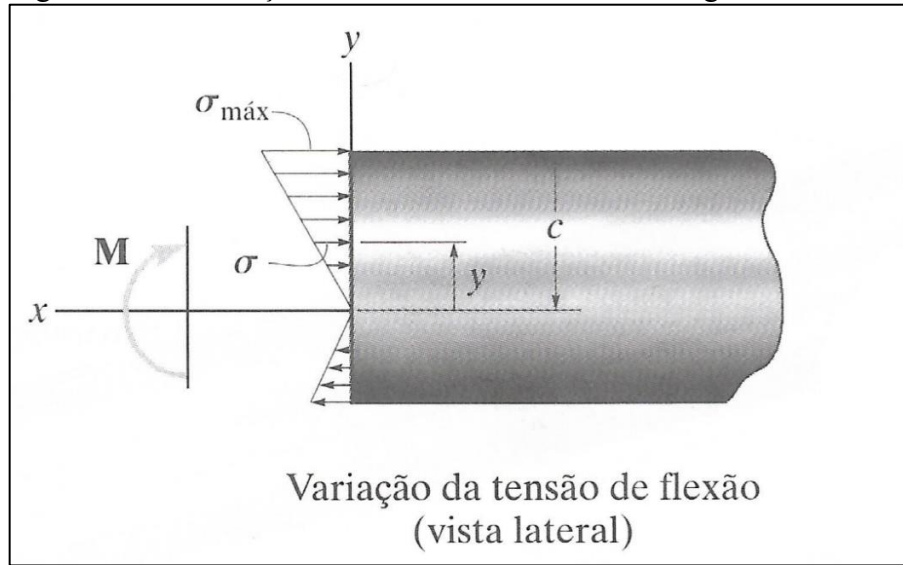
### 4.1 Vigas

As vigas são estruturas que foram criadas, estudadas e desenvolvidas para suportarem cargas e carregamentos de forças normais ao seu eixo longitudinal. Elas podem possuir em sua seção transversal um formato simétrico, como por exemplo um quadrado, um retângulo ou um perfil ‘I’. Como também podem possuir um formato assimétrico em sua seção, como um perfil ‘T’ ou um perfil ‘I’ assimétrico, isso irá depender do objetivo do projeto da viga. Devido a sua forma de trabalho, por sofrerem a atuação de forças normais ao seu comprimento, as vigas estarão sujeitas a forças de cisalhamento interno e a um momento fletor. “Quando escolhemos uma viga para resistir a ambas as tensões de cisalhamento e flexão, diz-se que ela é projetada com base na resistência.” (HIBBELER, 2010, p.401). Para o cálculo da tensão de flexão ( $\sigma$ ), usa--se a equação 1, a seguir:

$$\sigma = -\frac{Mc}{I} \quad (1)$$

A equação (1) acima é a fórmula de tensão de flexão em um ponto escolhido para estudo. A variável “M” é o momento fletor que pode ser calculado por equações de equilíbrio ou em casos mais clássicos de solicitações máximas, por fórmulas já estabelecidas. O “c” é a medida ou distância da linha neutra até um ponto ‘y’ em que se deseja calcular a flexão, conforme indicado na Figura 1. Sendo por definição o ‘c’ positivo acima da linha neutra ou negativo abaixo da linha neutra.

Figura 1 – Distribuição da tensão de flexão em uma viga.



Fonte: Russel C. Hibbeler (2010, p. 204).

Já o “I” é o momento de inércia de área, que depende da forma geométrica transversal da viga. Algumas dessas formas simétricas já estão tabeladas com as suas respectivas fórmulas. A Tabela 1 a seguir, reúne as fórmulas mais utilizadas de momento de inércia para casos mais conhecidos da engenharia.

Tabela 1 – Propriedade das seções transversais.

|                    |   |  |
|--------------------|---|--|
|                    | $A = bh$ $I_x = \frac{bh^3}{12}$ $k_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$                                 | $J_z = I_x + I_y$ $I_y = \frac{b^3h}{12}$ $k_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$                           |
| (a) Retângulo      |   |  |
|                    | $A = \frac{\pi D^2}{4}$ $I_x = \frac{\pi D^4}{64}$ $k_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$               | $J_z = \frac{\pi D^4}{32}$ $I_y = \frac{\pi D^4}{64}$ $k_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$               |
| (b) Círculo        |   |  |
|                    | $A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$ $I_x = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$ $k_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$ | $J_z = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4)$ $I_y = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$ $k_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$ |
| (c) Círculo vazado |   |  |

Fonte: Robert L. Norton (2013, Segunda Capa).



Mas caso a viga apresente formas assimétricas, o momento de inércia poderá ser calculado por somatórios de áreas.

O sinal negativo na equação (1) torna-se necessário, pois ele definirá se a tensão calculada será de compressão caso o ‘c’ seja positivo, o que resultará é uma tensão de flexão com o sinal negativo.

Caso o ‘c’ seja negativo, o resultado da tensão será positivo indicando que a tensão calculada será de tração. Para se calcular a tensão de flexão máxima, calcula-se o ‘c’ como a distância mais afastada da linha neutra. A equação (1) torna-se a equação (2) a seguir:

$$\sigma_{MÁX} = \frac{Mc}{I} \quad (2)$$

Onde a letra ‘M’ continua sendo o momento calculado na viga, o ‘c’ será a distância máxima em relação a linha neutra e o ‘I’ continua sendo o momento de inércia. A distribuição das tensões de flexão em uma viga, tem como característica, apresentar os máximos valores na região mais externa da seção transversal, Figura 4 acima. Já os menores valores, podendo chegar a zero, se localizam na linha neutra.

Na Tabela 2 abaixo, tem-se as fórmulas do momento de flexão máximo para os 4 tipos de casos mais utilizados na bibliografia. Como por exemplo, viga engastada e viga biapoiada ambas com carregamento concentrado ou com carregamento distribuído.

Tabela 2 – Fórmulas do momento de flexão máximo para vigas.

| Viga em balanço com carregamento concentrado | Viga em balanço com carregamento uniformemente distribuído | Viga biapoiada com carregamento concentrado | Viga biapoiada com carregamento uniformemente distribuído |
|--|--|---|---|
|  |  |   |   |
| quando o a = L                               | quando o a = 0   | quando o a = L / 2                          | quando o a = 0  |
| $M_{MÁX} = -Fl$                              | $M_{MÁX} = \frac{wl^2}{2}$                                 | $M_{MÁX} = \frac{Fl}{4}$                    | $M_{MÁX} = \frac{wl^2}{8}$                                |

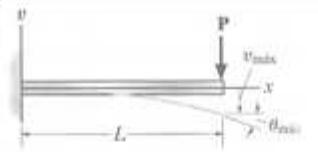
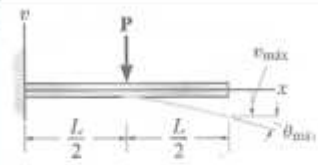
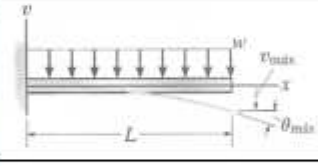
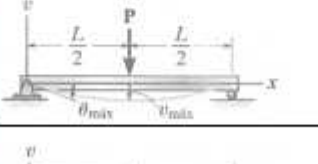
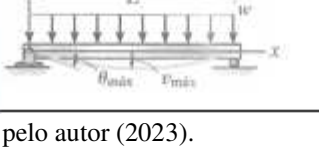
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Quando uma viga ou um eixo sofre a ação de uma flexão, além de tensões de flexão, também haverá deflexão. A deflexão nada mais é, do que a deformação da viga ou do eixo em relação ao seu estado antes da aplicação de uma força.

Se a deflexão não causa deformações além do ponto de escoamento do material, a viga retornará ao seu estado não deformado quando a carga for removida. Se a deformação excede o ponto de escoamento do material, a viga escoará e deformará permanentemente se for dúctil, ou possivelmente fraturará se for frágil. (NORTON, 2013, p. 162).

A deflexão é geralmente calculada em milímetros e deverá ser levada em conta durante o projeto. O material da viga pode ser projetado para suportar uma grande deflexão e assim não falhar por escoamento, mas essa deformação poderá levar a viga ou o eixo a entrar em contato com outras partes da estrutura ou da máquina, gerando assim choques mecânicos entre os componentes. O que poderá causar uma situação de colapso. Pode-se perceber pelas equações de deflexão máxima, indicadas na Tabela 3, que o único parâmetro que depende do material utilizado na viga é o módulo de elasticidade.

Tabela 3 – Fórmulas de deflexão máxima.

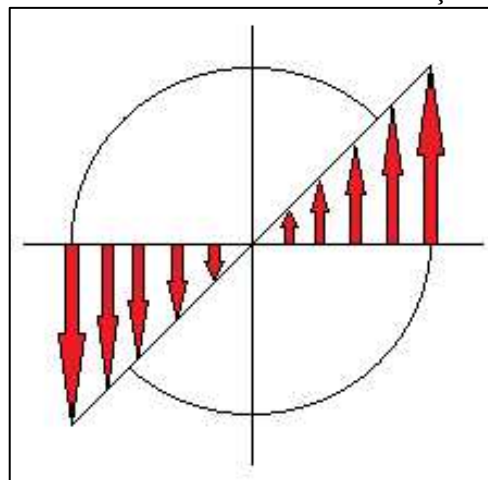
|  |   |                                  |
|--|---|----------------------------------|
| Viga em balanço com carregamento concentrado               |  | $v_{MÁX} = -\frac{PL^3}{3EI}$    |
| Viga em balanço com carregamento concentrado no centro     |  | $v_{MÁX} = -\frac{5PL^3}{48EI}$  |
| Viga em balanço com carregamento uniformemente distribuído |  | $v_{MÁX} = -\frac{wL^4}{8EI}$    |
| Viga biapoada com carregamento concentrado                 |  | $v_{MÁX} = -\frac{PL^3}{48EI}$   |
| Viga biapoada com carregamento uniformemente distribuído   |  | $v_{MÁX} = -\frac{5wL^4}{384EI}$ |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tensão de escoamento, dureza e resistência a tração não influenciam no cálculo da deflexão. Sendo assim, para um projeto de viga ou de eixo que se deseja minimizar o efeito da deflexão não há vantagem em se utilizar uma liga mais resistente e com alto teor de carbono. Aumentar a resistência do material, irá apenas, amplificar a resistência ao escoamento ou amplificar a resistência a ruptura da viga. Levando em consideração apenas a mudança de material no projeto, isso irá apenas encarecer o desenvolvimento da viga. Desse modo, possa ser mais vantajoso o uso do aço de baixo teor de carbono e baixa resistência, pois o módulo de elasticidade será inerentemente o mesmo. Assim, permitindo focar-se em outros aspectos como o comprimento da viga ou o formato e a magnitude da área geométrica da seção transversal para diminuir a deflexão e aumentar a resistência da viga ou do eixo.

Uma barra ao sofrer um momento no sentido do seu eixo longitudinal, estará sob a ação de uma torção. A barra poderá ter vários modelos de seções transversais, sendo os mais comuns os que originam os eixos, com as suas seções circulares maciças. Os eixos podem ter o raio constante em todo o seu comprimento, como também podem possuir raios variáveis. Os chamados eixos escalonados. O momento que gera uma torção no eixo é chamado de momento torçor ou simplesmente de torque. A tensão gerada pela aplicação de um torque é chamada de tensão de cisalhamento, no qual o maior valor se localiza na região mais externa e que o menor valor de localiza na linha neutra. A Figura 2 a seguir, mostra como é a distribuição de tensão de cisalhamento provocado por um torque.

Figura 2 – Distribuição de tensão de cisalhamento em um eixo sob torção.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A tensão de cisalhamento devido a torção é calculada pela equação (3) a seguir:

$$\tau = \frac{T\rho}{J} \quad (3)$$

Em que o ‘T’ é o torque aplicado, o ‘ $\rho$ ’ é o raio do ponto em que se deseja calcular a tensão e o ‘J’ é o momento polar de inércia da seção transversal. Já a tensão máxima é calculada pela equação (4) a seguir, onde o  $\rho$  é trocado pelo raio total da seção transversal:

$$\tau_{MÁX} = \frac{Tr}{J} \quad (4)$$

O momento polar de inércia ‘J’, assim como o momento de inércia ‘I’ dependem da forma da seção transversal da barra ou do eixo estudado. Nas equações (5) e (6) abaixo, encontram-se respectivamente, as fórmulas do momento polar para seções circulares maciças e seções circulares ocas ou vazadas:

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (5)$$

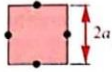
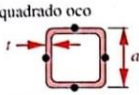
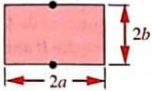
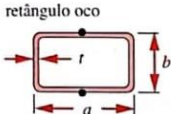
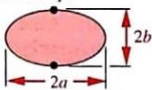
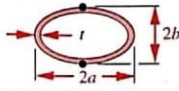

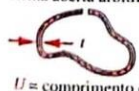
$$J = \frac{\pi(d_0^4 - d_i^4)}{32} \quad (6)$$

Em que ‘ $d_0$ ’ é o diâmetro externo e o ‘ $d_i$ ’ é o diâmetro interno da seção transversal oca. Já para formas de seções não circulares, a tensão de cisalhamento máximo é dada pela equação (7):

$$\tau_{MÁX} = \frac{T}{Q} \quad (7)$$

Em que o ‘T’ é o torque aplicado na viga e o ‘Q’ é um fator geométrico que irá depender do formato da seção transversal. A Tabela 4 abaixo lista algumas fórmulas para o fator ‘Q’ e também para o fator geométrico ‘K’, esse por último será explicado e utilizado mais adiante:

Tabela 4 – Fórmulas dos fatores geométricos ‘Q’ e ‘K’.

| Formato   | K  | Q  |
|---|--|--|
| quadrado maciço<br>  | $K = 2,25a^4$  | $Q = \frac{a^4}{0,6}$  |
| quadrado oco<br><br>cantos internos podem ter tensões mais altas se o raio do canto for pequeno  | $K = \frac{2t^2(a-t)^4}{2at - 2t^2}$   | $Q = 2t(a-t)^2$  |
| retângulo maciço<br>   | $K = ab^3 \left[ \frac{16}{3} - 3,36 \frac{b}{a} \left( 1 - \frac{b^4}{12a^4} \right) \right]$ | $Q = \frac{8a^2b^2}{3a + 1,8b}$  |
| retângulo oco<br><br>cantos internos podem ter tensões mais altas se o raio do canto for pequeno | $K = \frac{2t^2(a-t)^2(b-t)^2}{at + bt - 2t^2}$  | $Q = 2t(a-t)(b-t)$   |
| elipse maciça<br>  | $K = \frac{\pi a^3 b^3}{a^2 + b^2}$  | $Q = \frac{\pi ab^2}{2}$   |
| elipse oca<br>   | $K = \frac{\pi a^3 b^3}{a^2 + b^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{a} \right)^4 \right]$        | $Q = \frac{\pi ab^2}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{a} \right)^4 \right]$ |
| tubo circular aberto<br>   | $K = \frac{2}{3} \pi r^3; \quad t \ll r$   | $Q = \frac{4\pi^2 r^2 t}{6\pi r + 1,8t}; \quad t \ll r$                      |
| forma aberta arbitrária<br><br>$U =$ comprimento da linha média                                | $K = \frac{1}{3} U t^3; \quad t \ll U$   | $Q = \frac{U^2 t^2}{3U + 1,8t}; \quad t \ll U$                               |

Fonte: Robert L. Norton (2013, p. 179).

Pode-se calcular também quantos graus um eixo rotacionou em relação ao seu estado natural, sem tensões aplicadas. No caso de um eixo engastado, em que há uma aplicação de torque em sua extremidade livre, haverá uma rotação em relação a sua extremidade fixa. Para seções transversais circulares, essa rotação pode ser calculada utilizando a equação (8) abaixo:

$$\theta = \frac{TL}{JG} \quad (8)$$

Em que, a letra ‘T’ e a letra ‘J’ continuam sendo respectivamente o torque e o momento polar de inércia.

Já a letra ‘L’ será o comprimento da barra e a letra ‘G’ será o módulo de elasticidade transversal do material, que deve ser calculado pela equação (9) a seguir:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (9)$$

Onde o ‘E’ é o módulo de elasticidade e o ‘ $\nu$ ’ é o coeficiente de Poisson. Para seções não circulares o ângulo de rotação é calculado usando a equação (10) abaixo:

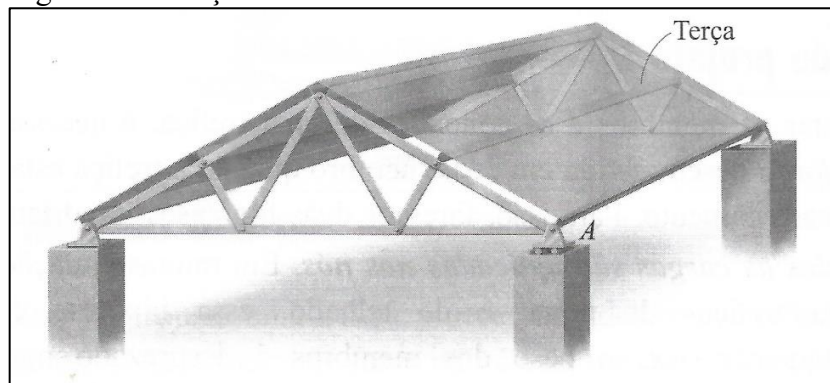
$$\theta = \frac{TL}{KG} \quad (10)$$

Percebe-se que o fator geométrico ‘K’ será usado para o cálculo do ângulo de uma viga não circular. Como já foi dito anteriormente, as fórmulas para o fator ‘K’ encontram-se na tabela 4.

## 4.2 Treliças

As treliças são estruturas formadas por barras, que podem ser construídas em metal ou em madeira, e que são conectados entre si em suas extremidades, os chamados nós. Possuem um peso baixo em comparação ao peso suportado. As barras tem como característica, o comprimento bem maior em relação as suas outras medidas. Essas estruturas podem ser planas ou espaciais, sendo as treliças planas mais utilizadas para sustentar pontes e telhados. A imagem a seguir, Figura 3, demonstra um exemplo de treliça plana:

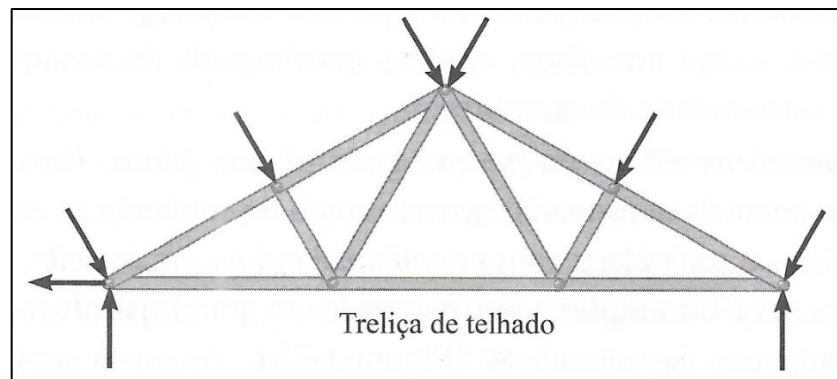
Figura 3 – Treliça de telhado.



Fonte: Russel C. Hibbeler (2011, p. 195).

Para realizar projetos em treliças, deve-se se atentar a duas hipóteses de projeto. A primeira será que qualquer tipo de carga deve ser aplicado nos nós. Essa hipótese garante que as barras não sejam deformadas após sofrerem a aplicação de forças perpendiculares ao longo de seu comprimento. Na figura acima, percebe-se que o telhado está apoiado nas terças, que além de fazerem a conexão entre as duas treliças planas, também distribuem o peso do teto nos nós da estrutura. A Figura 4, a seguir, demonstra a distribuição do apoio do telhado na treliça.

Figura 4 – Exemplo de distribuição das forças em uma treliça de telhado.



Fonte: Russel C. Hibbeler (2011, p. 195).

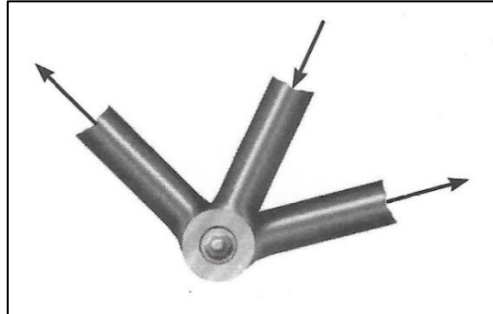
As treliças são estruturas que tem a capacidade de se sustentarem sozinhas por grandes vãos, sem a necessidade de usarem colunas de apoio por sua extensão. Tornando-as assim, excelentes escolhas para as construções de pontes. Quando as mesmas se estendem por grandes distâncias, é normal que se use apoios do tipo rolete ou do tipo oscilante em uma de suas extremidades. Concedendo assim, uma certa movimentação de expansão ou de contração da estrutura, devido as mudanças de temperatura ou as variações de cargas em sua extensão, evitando que a treliça falhe por escoamento do material ou por fadiga.

Já a segunda hipótese será a de que todos os membros de uma treliça são conectados entre si por pinos lisos, Figura 5, ou placas de ligação. As placas de ligação são chapas de metal que fixam as barras de maneira que as suas linhas neutras sejam concorrentes em um único ponto, Figura 6. As chapas podem ser soldadas ou aparafusadas. As figuras logo mais, demonstrarão de melhor forma o que foi explicado.

Segundo Hibbeler (2011) se essas duas hipóteses forem satisfeitas, então todas as barras da treliça agirão como elementos de duas forças. Um elemento de duas forças, Figura 7, não importando a sua geometria, é um membro em que atuarão forças em cada uma de suas extremidades. Essas forças deverão ser colineares ao eixo de cada elemento. Se a força estiver agindo no sentido de alongar a barra, ela será uma força de tração e por definição seu sinal será

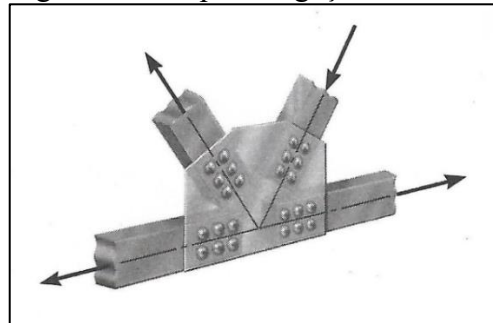
positivo. Se a força agir no sentido de comprimir a barra, ela será uma força de compressão e por definição seu sinal será negativo.

Figura 5 – Pino liso.



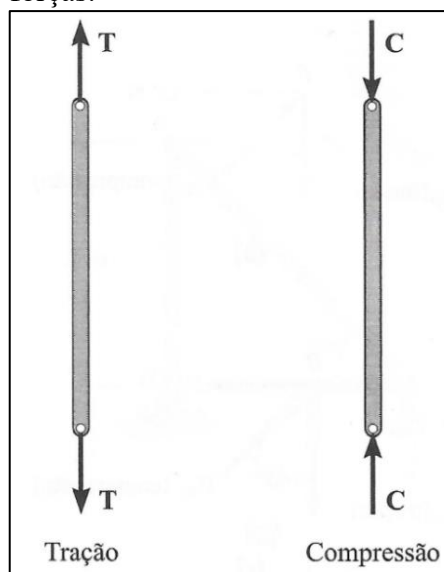
Fonte: Russel C. Hibbeler (2011, p. 196).

Figura 6 – Chapa de ligação.



Fonte: Russel C. Hibbeler (2011, p. 196).

Figura 7 – Elementos de duas forças.



Fonte: Russel C. Hibbeler (2011, p. 197).



Para se realizar os cálculos de análise e de projeto de uma treliça, existem dois métodos mais usados na engenharia. O primeiro é o método dos nós e o segundo é o método das seções. No primeiro método, como o nome já deixa claro, as forças e reações serão calculados nos nós de cada elemento da treliça. Se a estrutura está em equilíbrio de forças, os nós também estarão em igualdade de forças, dessa forma, permitindo que se use as equações de equilíbrio. Para treliças planas e que satisfazem as hipóteses de elemento de duas forças, ou seja, só forças coplanares atuam na estrutura, as equações (11), (12) e (13) serão aplicadas nos nós:

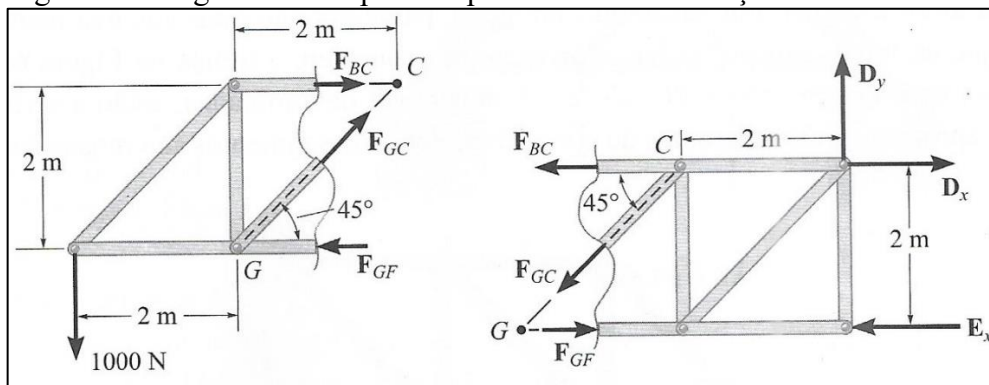
$$\sum F_x = 0 \quad (11)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (12)$$

$$\sum M = 0 \quad (13)$$

Já no método das seções, usa-se as barras da treliça para se calcular as forças e as reações da estrutura. Com a treliça em equilíbrio, as barras que serão estudadas também estarão em equilíbrio. O método consiste em criar seções imaginárias nas barras e até na própria estrutura como um todo. Ao se fazer esse corte, as forças internas serão expostas no diagrama de corpo livre, como demonstrado no exemplo da Figura 8 a seguir. Assim, tornando possível o cálculo dos valores dessas forças ao longo das barras. Com a treliça em equilíbrio e o diagrama de corpo livre desenhado, podem ser calculadas as forças e reações através das equações (11), (12) e (13) supracitadas.

Figura 8 – Diagrama de corpo livre para o método das seções.



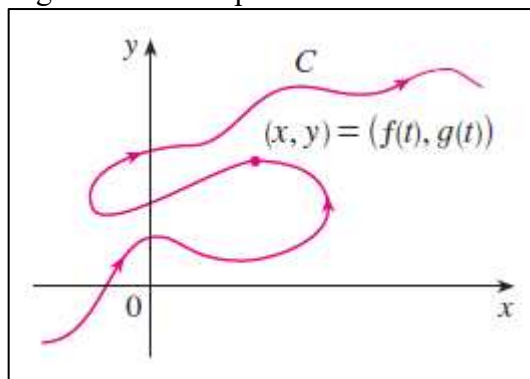
Fonte: Russel C. Hibbeler (2011, p. 210).

Recomenda-se a escolha de uma seção que não tenha mais que três membros com forças desconhecidas, afim de não se ter mais incógnitas do que equações de equilíbrio. Para o início da resolução de uma treliça, sugere-se a atribuição de valores positivos para as forças desconhecidas, dessa forma se os resultados forem positivos os sentidos adotados estarão corretos, se as forças forem negativas os sentidos adotados para as forças estarão invertidos. Da mesma forma, considerando que nas seções de corte as forças são inicialmente de tração, a solução terá valores positivos para membros sob tração e valores negativos para membros sob compressão.

### 4.3 Parametrização

Suponha-se que exista um gráfico com uma curva complexa, na qual, não seja possível a sua definição por uma simples função  $y = f(x)$ . Porém, essa mesma curva pode ser definida por duas ou três funções diferentes, que usam variáveis diferentes entre si. Será muito trabalhoso e cansativo calcular todos esses pontos ao mesmo tempo. A parametrização é uma ferramenta matemática que permite correlacionar, através de equações paramétricas, duas ou mais funções para um único parâmetro/variável. “A representação paramétrica tem a grande vantagem de tornar independente a representação em cada eixo de coordenadas.” (TEXEIRA, 2003, p. 2).

Figura 9 – Curva parametrizada.



Fonte: James Stewart (2013, p. 576).

Na Figura 9 acima, tem-se as funções  $x = f(t)$  e  $y = g(t)$ . Nota-se que essas funções utilizam a mesma variável ‘t’ como parâmetro de entrada. Dessa forma, um único valor ‘t’ irá produzir uma coordenada  $(x,y) = (f(t), g(t))$ . Assim, uma única variável conseguirá descrever uma curva gráfica complexa ou, no caso de um problema mais complicado, conseguirá obter a

resposta com apenas um valor. A parametrização pode ser utilizada como ferramenta de desenvolvimento e estudo de projetos em softwares especialistas. O AnsysWorkbeanch<sup>©</sup> permite que se use parâmetros geométricos, de contorno ou de resposta como meios de se otimizar um projeto. Este trabalho se propõe, dentre outras coisas, demonstrar como o processo de parametrização pode ser uma ferramenta muito útil no estudo acadêmico, como também uma ferramenta importante na concepção e no desenvolvimento de um projeto profissional.

#### 4.4 Elementos Finitos

Muitos programas especialistas que se propõem a fazer simulações diversas, usam uma ferramenta matemática chamada de Método dos Elementos Finitos (MEF).

O método dos elementos finitos comumente utilizado é baseado no método de Rayleigh-Ritz e prevê a divisão do domínio de integração, contínuo, em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos, tornando o meio contínuo em discreto. (ASSAN, 2003, p. 57).

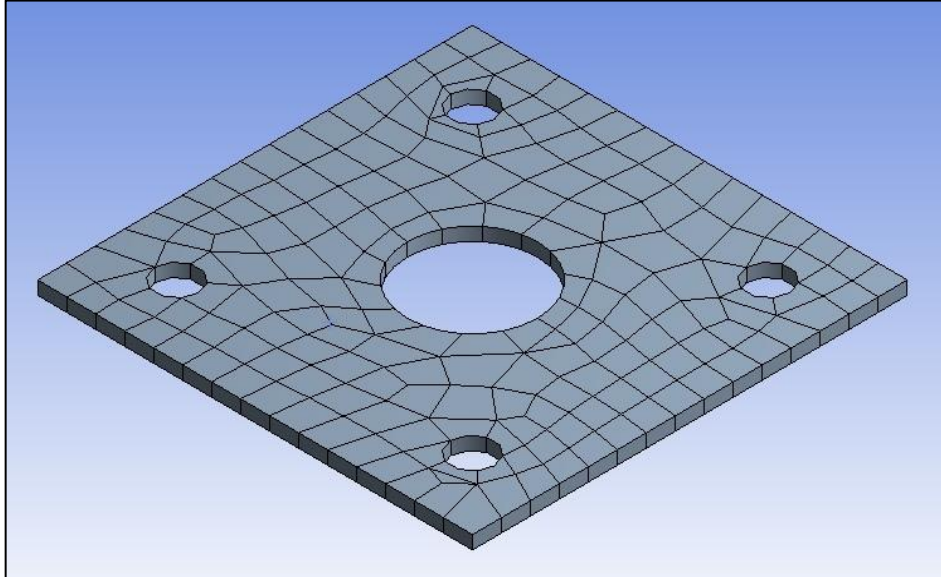
Esse método permite que problemas com geometrias complexas, sejam resolvidos com uma abordagem da subdivisão ou da discretização em números finitos de partes ou elementos.

“A ideia da Discretização de um Sistema Contínuo considera a divisão da estrutura em partes separadas distintas, conectadas entre si nos pontos discretos.” (ALVES FILHO, 2006, p. 9). Esses pontos de conexão entre os elementos, são chamados de nó do modelo. Uma vez definido os pontos, pode-se então calcular o deslocamento desses nós e a partir daí calcular o comportamento interno de cada elemento do modelo matemático de qualquer geometria.

A malha será o conjunto desses elementos e nós que irão representar o desenho geométrico da peça em estudo. Evidentemente, a solução terá mais acurácia quanto maior for esse número de elementos e conseqüentemente, maior o número de nós usados no modelo matemático. Essa maior quantidade de elementos resultará em uma malha mais desenvolvida e mais próxima da realidade do objeto, que originará o termo malha refinada. A malha grosseira, Figura 10, será seu oposto, com menos elementos e nós, o que acarretará em uma menor precisão da modelagem matemática. Uma malha muito refinada, Figura 11, trará resultados mais precisos, porém exigirá um maior processamento do computador que irá fazê-la. Portanto, o refinamento da malha irá depender do grau de sofisticação do projeto, pois dependendo do

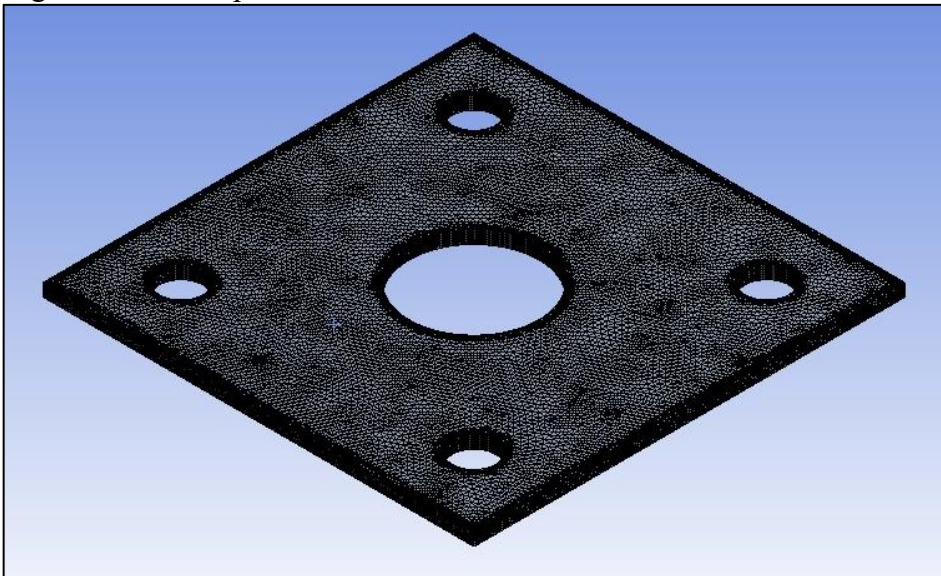
tipo de estudo, a malha com um alto grau de refinamento não irá trazer grandes mudanças nos resultados, em relação ao tempo investido em que a máquina irá despende para realizar essa simulação.

Figura 10 – Exemplo de malha grosseira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 11 – Exemplo de malha muito refinada.

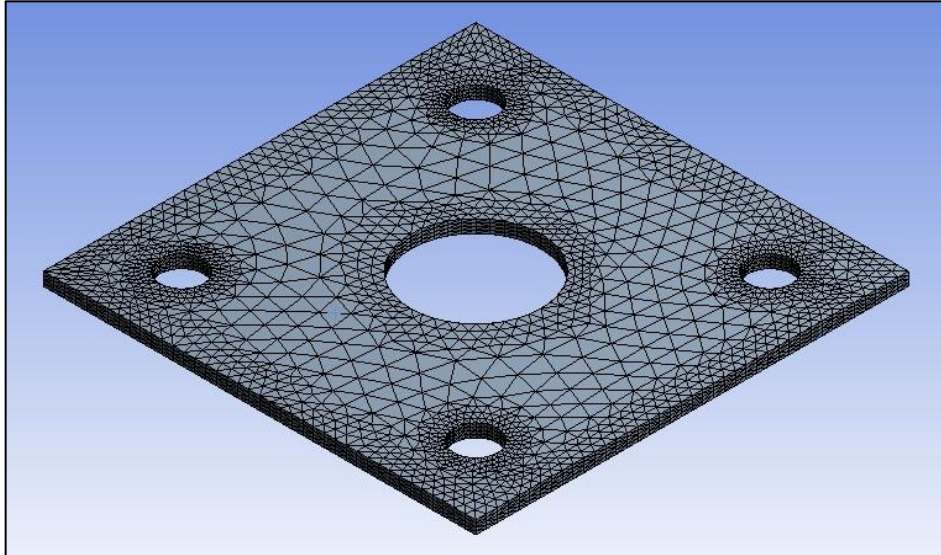


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Pois em troca dessa tamanha precisão, o tempo de execução da simulação será de várias horas, podendo chegar a dias. Além de um grande investimento financeiro, em um computador que deverá ter um altíssimo poderio de processamento. O que pode atrasar o desenvolvimento do projeto. Assim, deve-se fazer o uso de uma boa malha refinada, Figura 12,

mas sem comprometer o tempo de sua execução. Uma malha que faça o equilíbrio entre precisão e tempo de execução de processamento.

Figura 12 – Exemplo de malha refinada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 4.5 Ansys

O Ansys é um programa especialista que usa o sistema de Elementos Finitos para realizar as suas simulações. A empresa foi fundada por John Swanson, em 1970 e partiu da ideia de automatizar o processo do método dos elementos finitos, que até então ainda eram feitos de forma manual pelos engenheiros. Esse processo de automatização viria ser realizado através de um software de engenharia de uso geral. Hoje, o software dispõe de ferramentas que permite que o mesmo faça análises estruturais, de fluidodinâmica e de eletromagnetismo.

O AnsysWorkbench<sup>®</sup> é um dos sistemas mais famosos do software. Nada mais é, do que um ambiente de trabalho que reúne todas as outras ferramentas disponíveis pelo programa, para se fazer simulações. Lá os usuários podem dividir estruturas maiores em pequenas modelagens, permitindo assim, uma análise individual de cada peça do projeto. Após o usuário adicionar as condições de contorno da simulação, como por exemplo o peso da peça em estudo, a sua temperatura de trabalho, quais forças ou pressões estão agindo sob o objeto, além de outras propriedades físicas, o software é capaz de retornar uma análise de movimento, de fadiga, de fratura, de fluxo de fluido e de eficiência eletromagnética, todas essas respostas ao longo do tempo.

## 5 METODOLOGIA

Nesta seção serão descritas as etapas dos procedimentos que foram executados para se obter os resultados desse trabalho. Esse formato se mostrou útil, pois a seguir serão avaliados 9 tipos de casos, que apesar de serem exemplos diferentes, a sequência de etapas seguirá a mesma estrutura lógica, como exposto a seguir:

- **Etapa 1:** Em cada caso serão descritos as criações dos parâmetros de materiais e as execuções dos desenhos utilizando as ferramentas Design Modeler ou SpaceClaim.
- **Etapa 2:** Consiste na criação da malha e do refino da mesma, caso necessário.
- **Etapa 3:** Criam-se as diferentes restrições de movimento impostas em cada exemplo.
- **Etapa 4:** Atribuem-se os valores de contorno, como forças, pressões e torques.
- **Etapa 5:** Concepção dos resultados em forma de imagens, de gráficos e de tabelas.

Serão escolhidos estudos de casos específicos que abordem temas corriqueiros na graduação, de forma mais concentrada, nos assuntos das disciplinas de mecânica dos sólidos e de estática. Dessa forma este respectivo trabalho aborda vigas engastadas ou biapoiadas, com carregamentos uniformes ou concentrados e com variações em seus perfis geométricos. Será exposto um exemplo de torção em barra escalonada, além de casos que tratem de treliças e de parametrização. Esses exemplos terão o intuito de demonstrar a capacidade de aplicação prática do software, no dia a dia da graduação em engenharia mecânica.

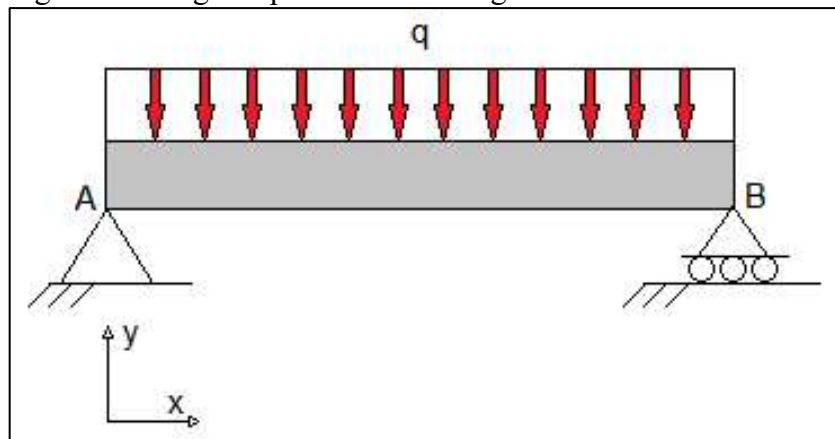
No capítulo 6, os resultados de cada caso são explorados de forma individual, observando-se a reação das forças ou pressões em cada modelo. Em alguns resultados, houve discussões acerca das soluções obtidas pelo software e das soluções obtidas de forma manual, através de cálculos usando equações lecionadas pela teoria. Ocorre também, a análise de como essas forças agiram nas deformações e nos deslocamentos dos objetos de estudo. Todos os resultados obtidos são comentados através do uso de imagens, de gráficos e de tabelas, em sua maioria, criados pelo próprio Ansys.

## 5.1 Modelagem dos elementos em estudo

### 5.1.1 Viga simples biapoiada com carregamento uniforme

Nesse subtópico aborda-se o modelamento e posteriormente, a simulação de uma viga biapoiada, que será fixado no vértice esquerdo por um apoio fixo simples. Já o vértice direito será fixado por um apoio articulado móvel, do tipo rolamento, permitindo-se o movimento apenas na direção do eixo ‘x’. A viga tem seção quadrada de 40 mm de comprimento em seu vértice e 1000 mm de comprimento, Figura 13. A mesma estará sendo submetida uma força distribuída uniforme de 5 N/mm e terá 210GPa de módulo de Young.

Figura 13 – Viga biapoiada com carregamento uniforme.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Abre-se o software AnsysWorkbeanch<sup>©</sup> e em seguida abre-se a ferramenta “Static Structural”, clicando-se duas vezes no respectivo nome. Pode-se abrir também o “Static Structural” arrastando-se e soltando em seguida o seu nome para a área de trabalho do software. Uma pequena tabela irá aparecerá com as ferramentas de trabalho para a modelagem do objeto em estudo.

As principais ferramentas utilizadas para a análise estática estrutural nesse trabalho serão as funções “Engineering Data”, “Geometry” e “Model”. Cada funcionamento será explorado mais adiante. Abaixo da tabela, tem-se o nome do projeto que pode ser nomeado e renomeado a qualquer momento do processo. Dar-se-á o nome a este em específico de “Carga distribuída em uma viga simples”, Figura 14.



Figura 14 – Tabela de ferramentas do Ansys.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após salvar o projeto em andamento, com um duplo clique do mouse parte-se para a função “Engineering Data”, onde muda-se o valor padrão do módulo de Young, do aço estrutural padrão do Ansys, de 200GPa para 210Gpa. Mantendo o resto dos parâmetros sem alterações, Figura 15.

Figura 15 – Tabela das propriedades do material.

| Properties of Outline Row 3: Structural Steel |   |                 |                    |     |
|---|---|-----------------|--------------------|-----|
|   | A   | B               | C                  | D E |
| 1   | Property  | Value           | Unit               |     |
| 2   | Material Field Variables                          | Table           |                    |     |
| 3   | Density   | 7850            | kg m <sup>-3</sup> |     |
| 4   | Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion |                 |                    |     |
| 5   | Coefficient of Thermal Expansion                  | 1,2E-05         | C <sup>-1</sup>    |     |
| 6   | Isotropic Elasticity                              |                 |                    |     |
| 7   | Derive from                                       | Young's Modu... |                    |     |
| 8   | Young's Modulus                                   | 2,1E+05         | MPa                |     |
| 9   | Poisson's Ratio                                   | 0,3             |                    |     |
| 10  | Bulk Modulus                                      | 1,75E+11        | Pa                 |     |
| 11  | Shear Modulus                                     | 8,0769E+10      | Pa                 |     |

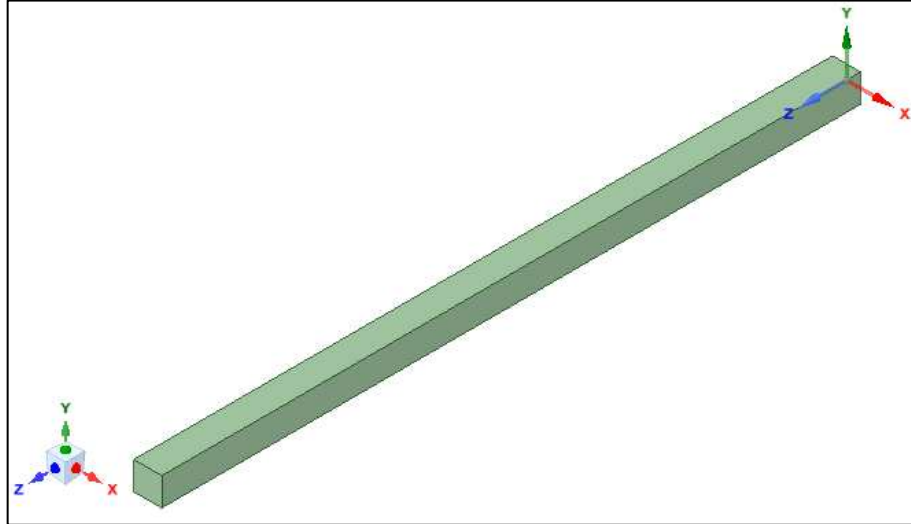
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Retornando para o espaço de trabalho do “Workbench”, abre-se a ferramenta “Geometry” também com um duplo clique do mouse. Utilizando-se o programa de desenho “SpaceClaim”, o desenho em 3D será feito a partir do plano x-y. Clica-se em “Select New Sketch Plane” e seleciona o plano já citado, em que será trabalhado o desenho. Em seguida, clica-se em “Plan View” e seleciona-se a opção “Rectangle”. Na tabela lateral esquerda, seleciona-se a aba “Options – Sketch” para ativar a opção de desenho “Define rectangle from center”. Assim clica-se no centro do plano ‘x-y’ e cria-se um quadrado de 40 mm de aresta.



Prosseguindo-se, clica-se na opção “3D Mode”, logo depois seleciona-se a opção “Pull” e clica-se no quadrado criado. A seguir, arrasta o mouse e atribui-se o valor de 1000 mm e o desenho da viga estará feito, Figura 16. Após isso, fecha-se a ferramenta SpaceClaim.

Figura 16 – Desenho da viga quadrada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Agora, com um duplo clique do mouse, abre-se a ferramenta “Model” também conhecido por “Mechanical”. Nessa ferramenta será atribuído todos os parâmetros de contorno do experimento. Será definido os tipos de suporte e os carregamentos necessários para a simulação. Após carregar o desenho feito anteriormente, parte-se para a criação da malha da geometria da peça. Clica-se na opção “Mesh” e uma tabela lateral, chamada de “Details of Mesh” será aberta, Figura 17.

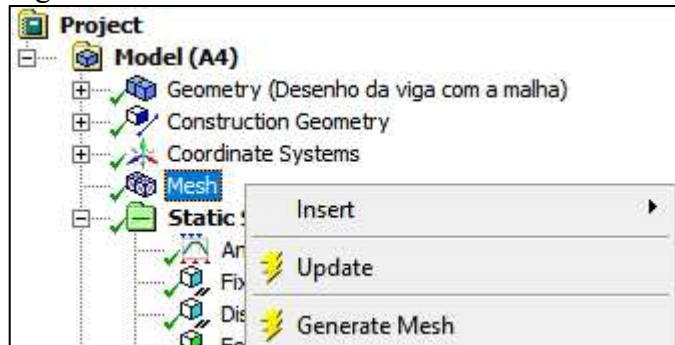
Figura 17 – Detalhes da malha.

| Details of "Mesh"  |          |
|--------------------|----------|
| + Display          |          |
| + Defaults         |          |
| - Sizing           |          |
| Size Function      | Adaptive |
| Relevance Center   | Coarse   |
| Element Size       | 20,0 mm  |
| Initial Size Seed  | Assembly |
| Transition         | Fast     |
| Span Angle Center  | Coarse   |
| Automatic Mesh ... | On       |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em seguida, em “Sizing”, na célula “Element Size”, refina-se essa malha, definindo o tamanho do elemento de malha para 20mm. Clica-se em “Mesh” com o botão direito do mouse e seleciona-se a opção “Generate Mesh”, Figura 18. Com isso, a malha será criada e estará pronta. Por se tratar de um objeto simples, em sua forma geométrica, a malha não necessitará de um refinamento posterior.

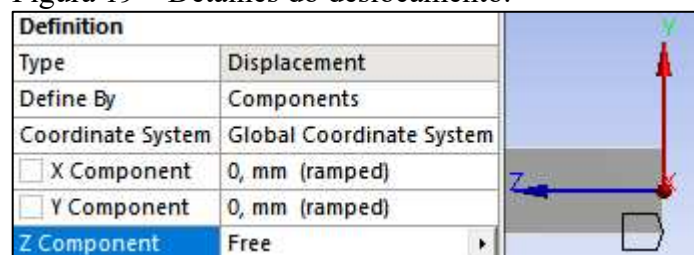
Figura 18 – Gerar malha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O próximo passo são as condições de fronteira, seleciona-se os tipos de suportes e seus respectivos lugares na geometria. Adiciona-se um suporte fixo, no lado esquerdo da viga. Clica-se com o botão direito do mouse em “Static Structural” e insere-se a opção “Fix Support”. Escolhe-se o tipo de seleção que o cursor do mouse irá fazer. Nesse caso, clica-se em “Edge”, em seguida escolhe-se a aresta onde em teoria ficará preso o suporte e a viga. Do outro lado, adiciona-se um suporte de roletes que será inserido da mesma forma anterior, mas agora escolhendo a opção “Displacement” (Deslocamento). Nessa ferramenta pode-se definir qual eixo x,y ou z será fixo/constante e qual será o eixo livre para o deslocamento. Escolhe-se a aresta de baixo em x, no lado oposto a primeira, define-se os eixos que serão constantes. No caso, será constante o eixo x e y, pois o suporte em rolete só permite movimento em z, então o mesmo ficará livre, Figura 19.

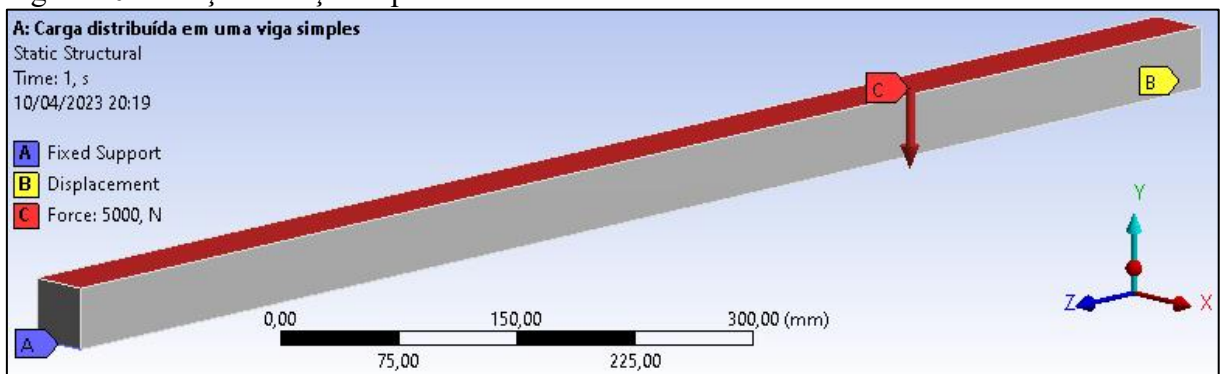
Figura 19 – Detalhes do deslocamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Agora será definida a força distribuída. Clica-se com o botão direito do mouse em “Static Structural” e insere-se a função “Force”. Muda-se o tipo de seleção do mouse para “Face” e escolhe-se a face de aplicação da força na célula “Geometry”. A face selecionada será, evidentemente, a superior. Simulando a carga distribuída por toda a viga, na direção “-y”. Delimita-se o valor da força, como a viga tem 1000 mm de comprimento e a força que atuará terá 5 N/mm, no caso, a força atribuída será de 5000N para esta face. Na célula “Direction” muda-se a direção de aplicação da força para negativo no eixo ‘y’. A Figura 20 abaixo detalha todas as variáveis de contorno aplicadas na viga.

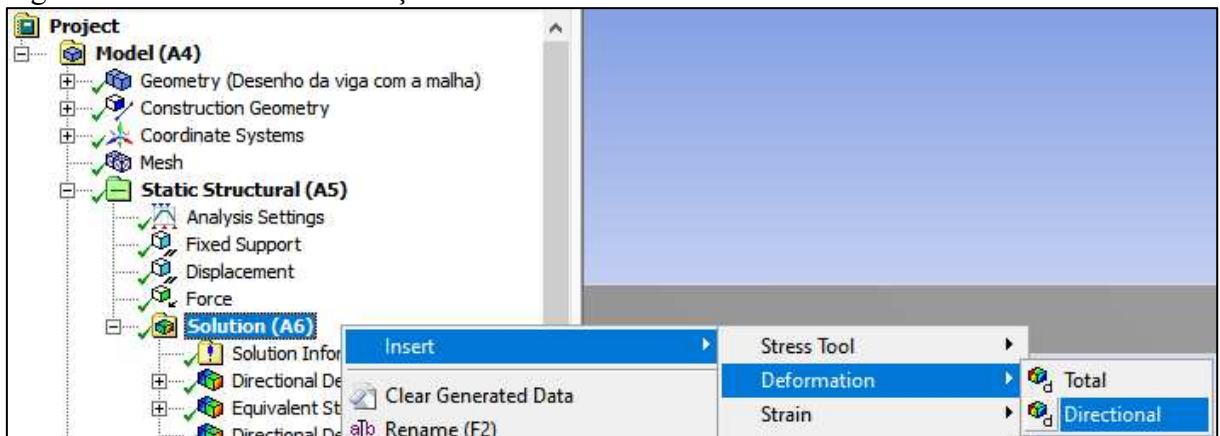
Figura 20 – Força e fixações aplicadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Agora com os critérios de contornos definidos, insere-se o que irá se obter de resultados ao qual o aluno deseja estudar. Se será o valor da deformação da geometria, a tensão de fadiga de Von-Mises, a linha de tensão superficial ou a linha de tensão central da viga, gráficos, imagens e etc. Clica-se com o botão direito do mouse em “Solution”, em seguida insere-se a função “Deformation” escolhendo a opção “Directional”, Figura 21.

Figura 21 – Inserindo deformação direcional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em “Details of Directional Deformation”, mais especificamente na célula “Orientation” seleciona-se a orientação de estudo dessa função, no caso seleciona-se o eixo ‘y’. Com isso, será calculado a deformação da viga na direção y. Seguindo-se, com o botão direito, clicando-se em “Solution”, insere-se a tensão equivalente de Von-Mises. Com um clique usando o botão direito em “Equivalent Stress”, insere-se a ferramenta “Convergence”. Essa ferramenta de convergência trabalha com os resultados das interações na simulação, nos quais o Ansys irá compará-los para o nível de aproximação desejada. Ou seja, com essa ferramenta, determina-se o valor da diferença que um resultado terá, entre um loop e outro. Trabalhando com porcentagem dessas variações nos resultados. Quanto menor esse valor, maior será a precisão e conseqüentemente maior a confiabilidade na resposta, porém maior será o tempo de processamento. Por exemplo, diga-se que o valor definido da convergência seja de 5%, e a quantidade de interações seja de 4 vezes. Se a resposta do segundo loop de interação der uma diferença maior que 5% da primeira interação, o programa irá rodar uma nova simulação até que a diferença entre as respostas seja menor que 5%, quando chegar nesse nível de precisão na resposta, o Ansys parará de rodar a simulação.

No caso em questão escolhe-se 1% de convergência para 3 interações. Para imputar esses valores, segue-se para “Details of Convergence”, na célula de “Allowable Change” e atribui-se o valor de 1%. Clicando-se com o botão esquerdo em “Solution”, na tabela de detalhes da solução, na célula “Max Refinement Loop” atribui-se o valor 3, assim a simulação executará três loops. Em “Solution” seleciona-se com o botão direito do mouse a opção “Solve”. O Ansys irá resolver essa simulação. A convergência já se deu na segunda interação. Os resultados são mostrados em degradê de cores no desenho da viga simulada e em escala de valores condizendo-se com as respectivas cores citadas.

Com os resultados obtidos, pode-se avaliar a simulação por diferentes tipos de ferramentas que o software oferece. Assim, o aluno pode entender o que os resultados numéricos, gráficos e em escala de cores poderão informar quanto àquela simulação gerada. Tem-se a função “max” e “min” que mostra a localização dos pontos de máximo e de mínimo de cada opção de solução escolhida pelo usuário. Por exemplo, onde está o máximo ponto de tensão ou o mínimo ponto de deformação. Mais detalhes sobre os resultados será explorado adiante.

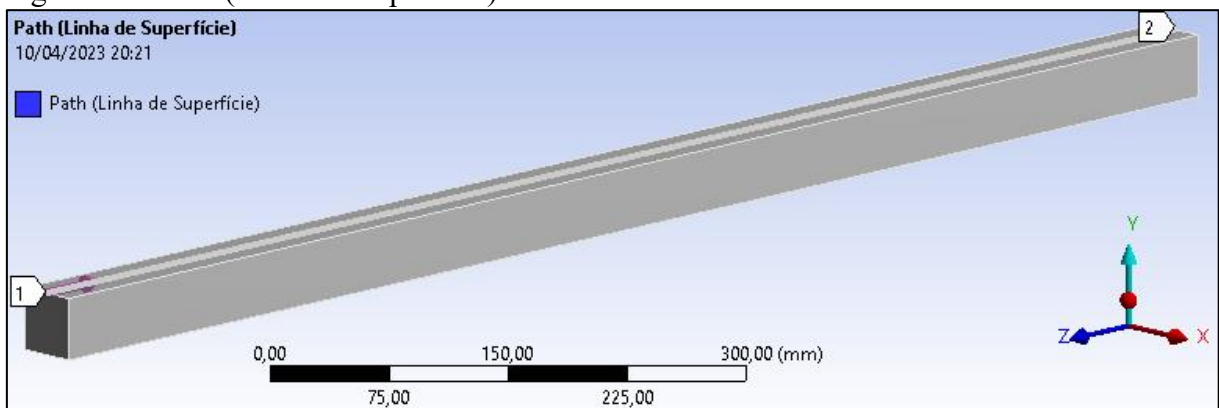
Outra ferramenta interessante para o estudo prático na graduação é a “Section planes”, que permite que seja feito um “corte” do desenho e dessa forma, possibilitando ter uma visão do plano cortado da simulação, facilitando a análise das forças internas de uma seção

transversal, por exemplo. Ativando a função “Probe”, pode-se escolher qualquer ponto da malha e será dado o valor do nó, valor esse resultante dos cálculos da simulação.

Outro recurso que pode ser estudado é a criação de um “Path” na geometria da peça. Esse recurso permite a criação de uma linha em qualquer ponto da estrutura, com isso pode-se ver como será a tensão superficial ou deformação superficial do plano mais externo do desenho, por exemplo. Ou como será a tensão interna ou deformação interna de alguma linha em relação ao centro ou no próprio centro. Para configurar esta função, com o botão direito do mouse em “Model” insere-se a função “Construction Geometry”, em seguida insere-se na função citada a opção “Path”. Após isso, escolhe-se o tipo de seleção do mouse, no caso, será “Edge” e seleciona-se onde se iniciará e findará a função, através de um sistema de coordenadas x, y e z de algum ponto selecionado.

Como no caso em questão, escolhe-se a aresta superior do início, colinear ao eixo x, terminando na aresta superior oposta, no final da peça. Como a viga é quadrada, a aresta fica a 20 mm de distância do centro, em relação ao eixo y. Assim, será criado uma linha que representará a função “Path”, Figura 22.

Figura 22 – Path (Linha de Superfície).



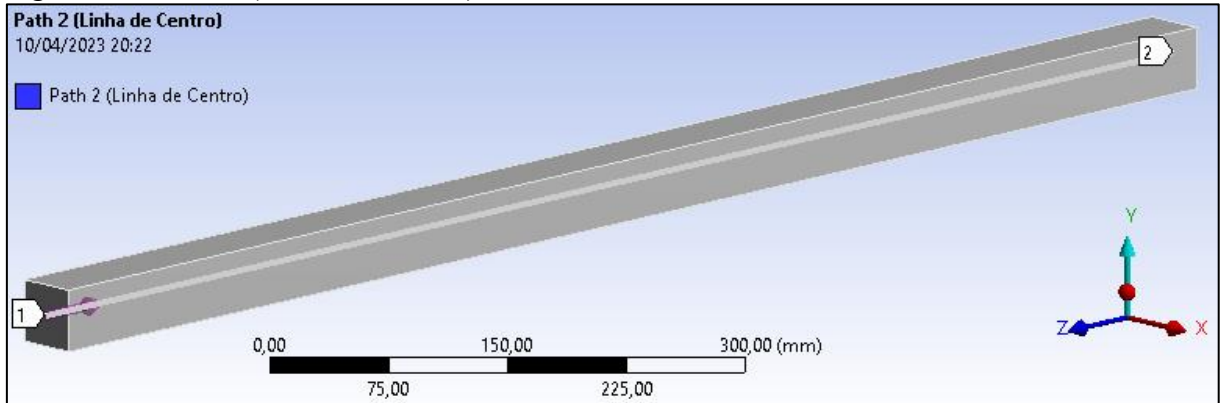
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tudo que for escolhido como solução da simulação, também será aplicado ao “Path”, basta duplicar as soluções desejadas e escolher na célula “Scoping Method” a opção “Path” e na célula de mesmo nome escolhe-se a opção “Path”. Em seguida, valida-se todos os resultados e o software mostrará os resultados na tela.

Para avaliar os resultados em uma linha de centro, basta duplicar o “Path” anterior e modificar os valores das coordenadas de início e de final. Portanto em ‘y’ o valor será zero, na origem e no final do “Path”. Seguindo, duplica-se as soluções anteriores repetindo a mesma

sequência, modificando-se somente na célula “Path” a escolha para a opção “Path 2”. Assim, será gerado uma simulação da linha de centro da viga quadrada, Figura 23 abaixo:

Figura 23 – Path 2 (Linha de Centro).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os gráficos gerados, são um dos resultados mais utilizados em uma explicação ou em uma demonstração do comportamento de uma simulação ou de um estudo de caso. Estes gráficos gerados ajudam a avaliar e estudar como está o comportamento das forças na geometria. Portanto, em muitos projetos e estudos, essa ferramenta visual se faz necessária.

No Ansys, pode-se guardar esses gráficos ou tabelas utilizando-se a função “New Chart and Table”. Basta selecionar a solução desejada e em seguida selecionar a função citada, dessa forma a figura do gráfico ficará salva para ser utilizada em um relatório posterior. Clicando-se com o botão esquerdo pode-se renomear o “Chart”.

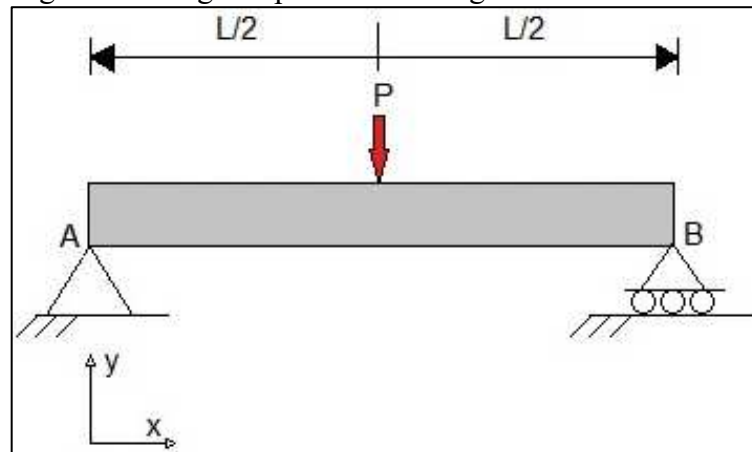
O aluno pode explorar mais uma solução da simulação, em “Solution” insere-se a função “Normal Stress”. Em seguida escolhendo-se a orientação no eixo desejada na célula “Orientation”, no caso será o eixo ‘z’ e validando as respostas, tem-se uma imagem que demonstra as tensões ao longo do plano ‘z’. Os resultados demonstram a tração e a compressão na viga, representadas por cores e por valores iguais nas extremidades da escala, mas com sinais opostos. Portanto, a face que recebe a força distribuída está em compressão e a face inferior em tração. Na função “New Figure or Image” e selecionando-se a opção “Figure”, o software irá salvar uma foto da simulação, que pode ser utilizada para relatórios posteriores. A figura também pode ser renomeada.

Em “Report Preview” o Ansys irá gerar automaticamente, um relatório técnico com todos os dados e resultados incluindo os gráficos salvos e imagens salvas, da simulação. Um recurso muito valioso, para um estudo mais minucioso do problema estudado.

### 5.1.2 Viga simples biapoiada com carregamento concentrado

Utilizando-se o mesmo modelo de viga anteriormente demonstrado, porém modificando apenas o tipo de carregamento que está agindo e mantendo-se as mesmas condições de contorno, pode-se estudar e observar como uma força concentrada age nessa geometria, Figura 24. A força terá o mesmo valor aplicado no caso anterior, que é de 5000 N.

Figura 24 – Viga biapoiada com carga concentrada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

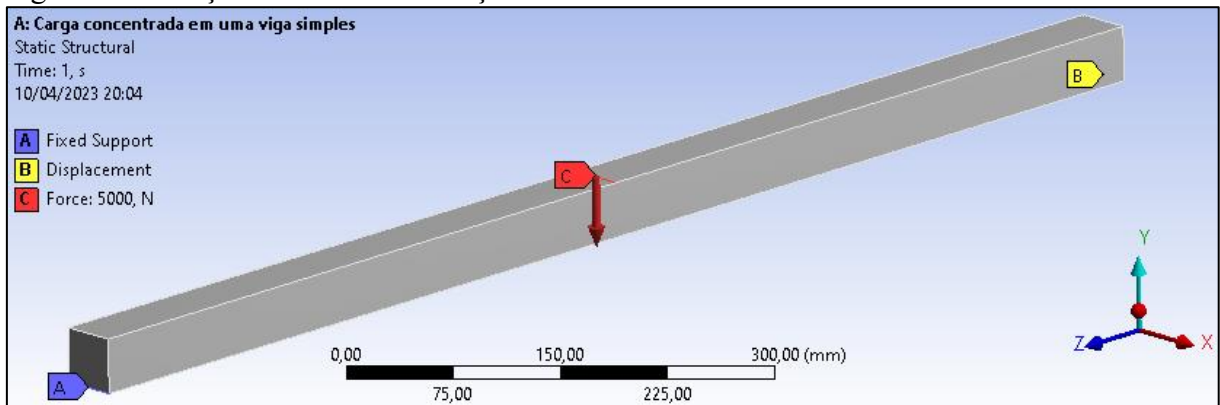
Aproveita-se o desenho criado para a simulação anterior, o qual foi desenvolvido pela ferramenta “SpaceClaim”. Usa-se a ferramenta “Split” para separar a face onde a força será aplicada. Ao ser ativada, o programa pedirá que se escolha o lado desejado e posteriormente as coordenadas em mm, no plano escolhido, onde será feita essa separação de faces. Dessa forma, o plano superior da viga será dividido ao meio, representado por uma linha que será a aresta escolhida na simulação. Pois, para modificar o comportamento do carregamento, o Ansys precisa de uma referência como uma face, um corpo, uma aresta ou um ponto. Dessa forma, essa linha transversal será a aresta de referência para a aplicação da força concentrada. Na função de desenho “Design Modeler”, esse procedimento será diferente, mas para esta simulação será usada a ferramenta “SpaceClaim” conforme supracitado.

Feito essa atualização no desenho, parte-se para a ferramenta “Mechanical”. Ao abri-la, será feita uma pergunta sobre a ferramenta executar uma releitura do desenho modificado. Confirmando a pergunta, o programa irá abrir e após um período breve de espera, o desenho atualizado com a aresta no centro será mostrado. Seguindo, na opção “Mesh”, opta-se por gerar uma nova malha daquele desenho, mantendo-se o mesmo tamanho do elemento utilizado anteriormente de 20 mm.



Na opção “Force”, um ponto de interrogação será mostrado. Como a face da aplicação da força foi modificada pelo novo desenho, o software mostra que aquela função está “desatualizada”. Então, após mudar o tipo de seleção do mouse para “Edge” clica-se em “Force” e muda-se a região de aplicação da força. Escolhendo-se a nova aresta criada, a força agora será aplicada como uma carga não-distribuída no centro da viga, Figura 25. Atribui-se o valor de 5000 N para a força aplicada.

Figura 25 – Força concentrada e fixações.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No critério de convergência na tensão equivalente, muda-se o parâmetro de 1% para 2%. Pois como a carga se aplica em uma pequena linha concentrada, isso pode acabar gerando pontos de singularidades na simulação, dificultando uma convergência tão aproximada. Assim, afastando o resultado de uma solução extremamente realística. Feito essas modificações, pode-se então resolver a simulação por inteiro.

Clicando-se na ferramenta de convergência enquanto a simulação é gerada, pode-se acompanhar o software trabalhando automaticamente no refinamento da malha para que as respostas entrem de acordo com a porcentagem escolhida, ou seja, 2% de diferença da resposta do primeiro loop para o segundo loop. Percebe-se que, no segundo loop a diferença já foi maior que os 2% escolhido. Na simulação anterior, o número de interações foi pré-estabelecido como sendo 3. Para efeitos de simplificação da própria convergência, em razão desse pequeno número de interações, efetua-se a parada da simulação e na célula “Allowable Change”, localizada na tabela “Details of Convergence”, modifica-se o parâmetro para 3%, Figura 26. Em “Solution” clica-se com o botão direito e escolhe-se a opção de limpeza de dados (Clear Generated Data), antes da nova resolução da simulação. A partir deste instante, pode-se gerar uma nova solução.



Figura 26 – Detalhes da convergência.

| Details of "Convergence (Convergência de resultados) |           |
|--|-----------|
| [-] <b>Definition</b>                                |           |
| Type   | Maximum   |
| Allowable Change                                     | 3, %      |
| [-] <b>Results</b>                                   |           |
| Last Change  | 0,96315 % |
| Converged  | Yes       |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Novamente, ao monitorar a função de convergência, percebe-se que já no segundo loop, a predefinição de 3% foi atendida sem dificuldade. Ao final desse processo, tem-se a solução para uma viga sob a ação de uma força concentrada.

Pode-se explorar outra função do Ansys para análise dessa simulação, no caso, as forças de reação. Para tal, basta ir em “Solution” e clica-se com o botão direito do mouse, seleciona-se inserir e em seguida seleciona-se a ferramenta “Probe”. Por fim insere-se a opção “Force Reaction”. Na tabela de detalhes das forças de reação, Figura 27, segue-se para a célula das condições de contorno (Boundary Condition) e opta-se pelo suporte de fixação ou “Fixed Support”.

Figura 27 – Detalhes da força de reação.

| Details of "Force Reaction"      |                          |
|----------------------------------|--------------------------|
| [-] <b>Definition</b>            |                          |
| Type                             | Force Reaction           |
| Location Method                  | Boundary Condition       |
| <b>Boundary Condition</b>        | Fixed Support            |
| Orientation                      | Global Coordinate System |
| Suppressed                       | No                       |
| + <b>Options</b>                 |                          |
| + <b>Results</b>                 |                          |
| + <b>Maximum Value Over Time</b> |                          |
| + <b>Minimum Value Over Time</b> |                          |
| + <b>Information</b>             |                          |

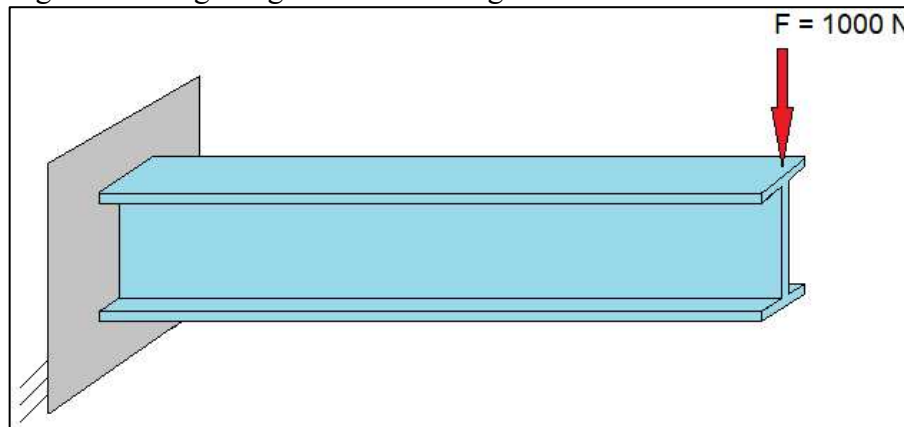
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em seguida, com o botão direito em cima da função de força de reação, escolhe-se por duplicar a mesma, mudando-se apenas a célula da condição de contorno. No caso, escolhe-se a opção “Displacement” que representa o suporte por roletes. Resolvendo-se novamente, obtêm-se os resultados de reação nos dois pontos de suporte. Os resultados serão discutidos mais adiante.

### 5.1.3 Viga I engastada com carregamento constante

Outro exemplo bastante útil para estudo de caso no software Ansys, é uma simulação de uma viga ‘I’ engastada, recebendo uma força atuante no extremo livre da mesma, Figura 28. No caso, a viga terá 2 metros de comprimento do engaste até sua extremidade oposta e receberá uma força de 1000 N, no sentido ‘-y’.

Figura 28 – Viga Engastada sob carregamento.



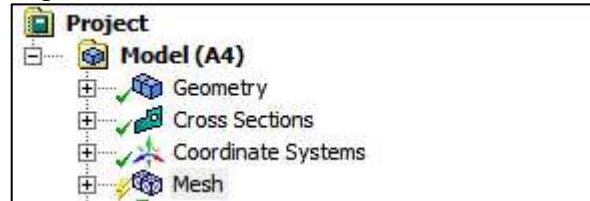
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para iniciar, escolhe-se a ferramenta “Estatic Structural”. Nesse exemplo, mantém-se todas as características padrão do aço estrutural já predefinidas pelo programa. Segue-se por abrir o “Design Modeler” para a execução do desenho da viga. Com o programa aberto, escolhe-se o plano x-y para se desenhar o perfil da viga. Clica-se em “Look At Face” e seleciona-se as unidades para milímetros. Em seguida na aba “Concept” seleciona-se a função “Cross Section”. Nessa função apresentam-se várias formas conhecidas da engenharia, inclusive a que se utiliza neste exemplo.

Seleciona-se a opção “I Section”. Em seguida aparecerá o perfil de uma viga I, bastando-se apenas informar os valores dos tamanhos da espessura, altura, largura conforme o profissional ou o aluno queiram simular. No caso, as espessuras das chapas serão de 10 milímetros, largura da base será de 100 milímetros e altura total de 200 milímetros. Quantificado os valores, segue-se para a função “Extrude” que irá extrudar a peça para o comprimento desejado, nesse caso, de 2000 milímetros. Seleciona-se “Generate” e a viga estará desenhada. Após fechar o programa de desenho, parte-se agora para a função “Model”, abrindo-se assim o “Mechanical”.

Com o programa pronto, percebe-se que na função “Mesh” existe um sinal com a forma de um raio, significando que aquele parâmetro está desatualizado, Figura 29.

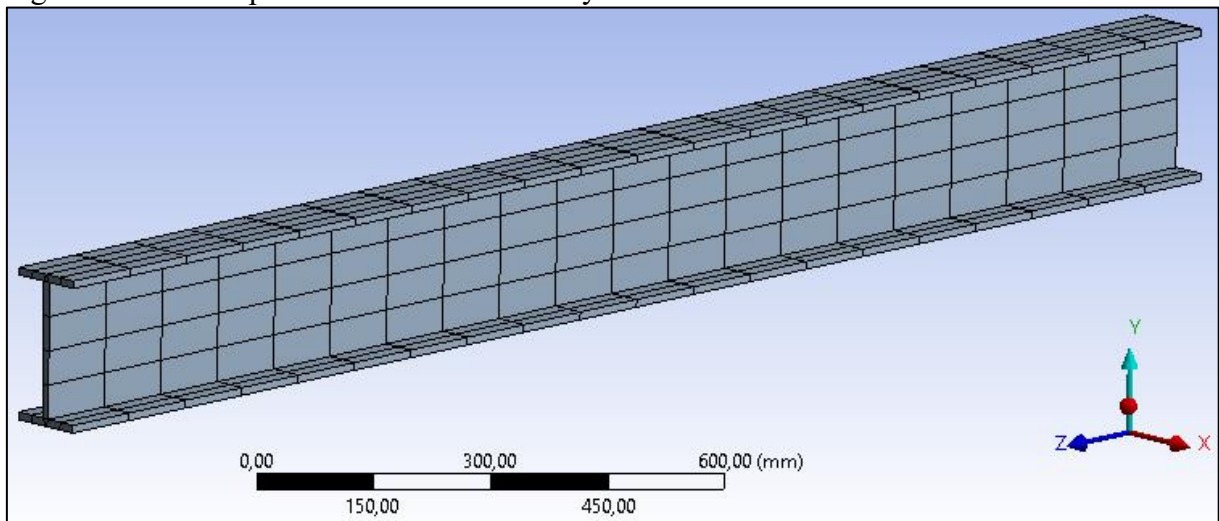
Figura 29 – Sinal da malha desatualizada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Clicando-se com o botão direito, seleciona-se gerar a malha. Automaticamente o Ansys criará uma malha para aquele objeto. Pode-se fazer o uso de ferramentas de refino de malha se assim desejar ou se o projeto necessitar. No momento, trabalha-se com a malha criada automaticamente pelo software, Figura 30.

Figura 30 – Malha padrão automática do Ansys.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

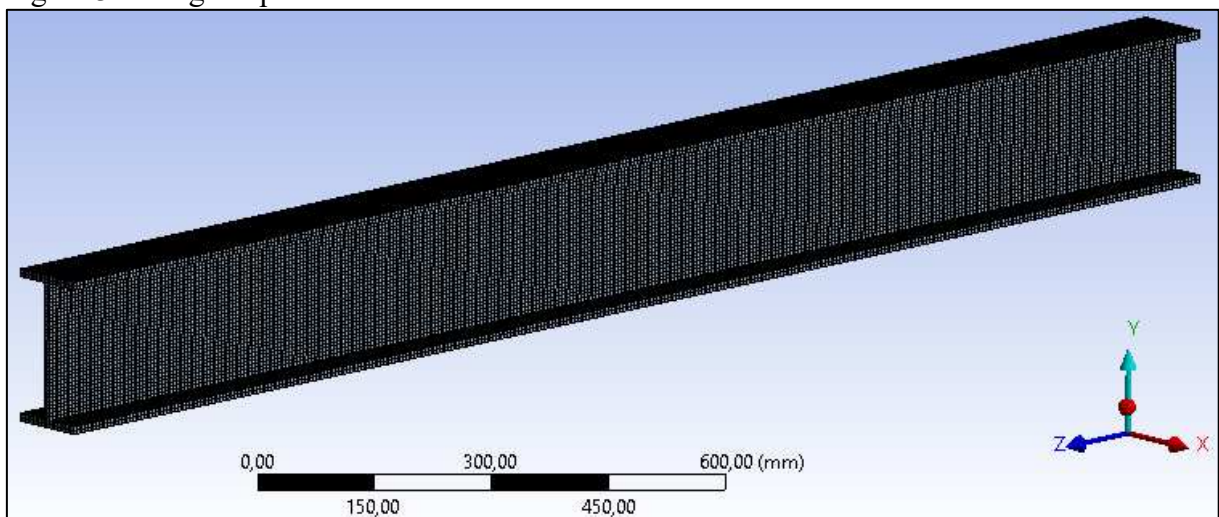
Para as condições de contorno, em “Static Structural”, com o botão direito seleciona-se a função “Fix Suport” e seleciona-se a face que ficará engastada. Em seguida na função “Force”, escolhe-se a face oposta que será aplicada os 1000N de força. Por padrão do Ansys, a força aplicada será representada pelo seu vetor. Nesse caso, a força será descrita por meio de suas componentes.

Em “Details of Force” na célula “Define by” muda-se a forma de representação da aplicação da força no objeto escolhendo a opção “Components”. Assim, a força poderá ser

descrita pelas suas componentes em x,y e z. Em ‘y’, imputa-se o valor de -1000N. Nos outros eixos deixa-se zerado. Agora escolhe-se os parâmetros que se deseja estudar nessa simulação. Em “Solution”, insere-se os parâmetros de deformação total, tensão equivalente de Von-Mises e a máxima tensão principal. Seguindo, resolve-se a simulação clicando-se, em “Solution”, com o botão direito do mouse a opção “Solve”. Os resultados serão vistos com mais profundidade, mais a frente. Porém, para efeito de estudo e avaliação dos resultados atuais, faz-se um refino na malha para que se veja o comportamento e a importância do refinamento para um melhor resultado.

Voltando-se para a função de malha, com o botão direito escolhe-se a função “Mapped Face Meshing”, em seguida, utiliza-se a função “Sizing”. A primeira opção de refinamento em questão, servirá para que supra a demanda de um mapeamento de malha mais preciso em alguma região do corpo, onde se requer uma atenção maior. Para esse caso, escolhe-se a face que está engastada para utilizar essa função. Já função “Sizing” servirá para impor um tamanho específico de um elemento de malha. Como a malha foi gerada automaticamente, o tamanho do elemento foi escolhido pelo software. Agora especifica-se o tamanho do elemento para 5 milímetros e escolhe-se o objeto inteiro para que esta função possa ser implementada. Gera-se a malha novamente e logo de primeira vista, nota-se que a malha está muito mais refinada, Figura 31.

Figura 31 – Viga I após refinamento de malha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Resolve-se a simulação, agora com a malha bem mais precisa. Como esta simulação é simples, apenas um objeto engastado e uma força atuante, o software realizará os cálculos sem um grande consumo de performance do computador. Se a simulação fosse mais complexa,

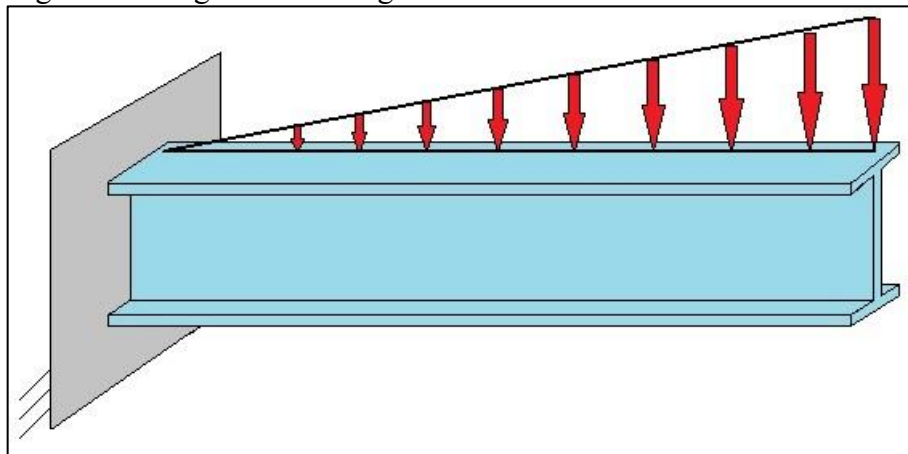
com uma geometria complicada e com várias forças e restrições diferentes entre si, esse refino de malha provavelmente deveria ser revisto e melhor otimizado. Pois a malha extremamente refinada, acarretará em um extenso consumo de processamento para a resolução de uma simulação complexa, o que poderá ser ou não tão interessante. Obviamente, dependerá do contexto em que a simulação deverá estar inserida.

Os resultados sofreram mudança, como o esperado. Afinal, agora a simulação está trabalhando com elementos muito pequenos em relação ao tamanho total da viga estudada, permitindo resultados bem mais assertivos. Os devidos comentários e conclusões a respeito dos resultados obtidos, serão tratados no capítulo adiante.

#### 5.1.4 Viga I com carregamento não-linear

O próximo estudo de caso no software Ansys será o de uma viga 'I', em sua deformação plástica. A mesma estará em balanço, sob carregamento uniformemente variado, Figura 32. A simulação será mais focada na fase plástica de um material não linear, com variação de carregamento.

Figura 32 – Viga I com carregamento não-linear.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com o Ansys Workbench na sua página inicial, abre-se a função “Static Structural”. Em dados de engenharia muda-se o tipo de aço estrutural que será trabalhado na simulação. O próprio software possui uma biblioteca de tipos de materiais, então escolhe-se o material que será trabalhado nessa situação. Como o material será não linear, deleta-se o aço padrão de trabalho e em “Engineering data sources” na pasta “General non-linear materials” escolhe-se o aço “Structural steel NL”, clica-se no sinal de positivo para adicionar, Figura 33.

Figura 33 – Aba para escolha de material não-linear.

| Engineering Data Sources |                              |                          |          |  |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------|----------|--|
|                          | A                            | B                        | C        | D  |
| 1                        | Data Source                  |                          | Location | Description  |
| 2                        | ★ Favorites                  |                          |          | Quick access list and default items                          |
| 3                        | General Materials            | <input type="checkbox"/> |          | General use material samples for use in various analyses.    |
| 4                        | General Non-linear Materials | <input type="checkbox"/> |          | General use material samples for use in non-linear analyses. |

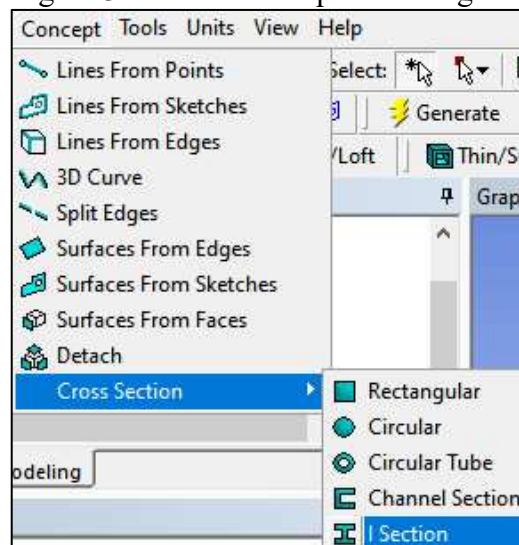
| Outline of General Non-linear Materials |  |     |         |   |   |
|---|--|-----|---------|---|---|
|   | A  | B   | C       | D | E   |
| 1                                       | Contents of General Non-linear Materials | Add | Source  |   | Description   |
| 9                                       | Stainless Steel NL                       | +   | General |   |   |
| 10                                      | Structural Steel NL                      | +   | General |   | Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1 |
| 11                                      | Titanium Alloy NL                        | +   | General |   |   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para sair e voltar para a página inicial dos dados do material usado, apenas clica-se novamente em “Engineering data sources”. Assim pode-se ver que o material possui a propriedade “Bilinear isotropic hardening” já com os valores padrão da biblioteca do Ansys. Modifica-se apenas a unidade de medida de Pa para MPa.

Parte-se então para o desenho da viga na simulação. Abre-se o “Design Modeler” clicando-se com o botão direito do mouse em “Geometry”. Primeiro escolhe-se o plano x-y e clica-se na função “Look at Face”. Em seguida no botão “Concept” na função “Cross Section” escolhe-se o desenho de seção transversal da viga, no caso, perfil de viga I, Figura 34.

Figura 34 – Escolha do perfil da viga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



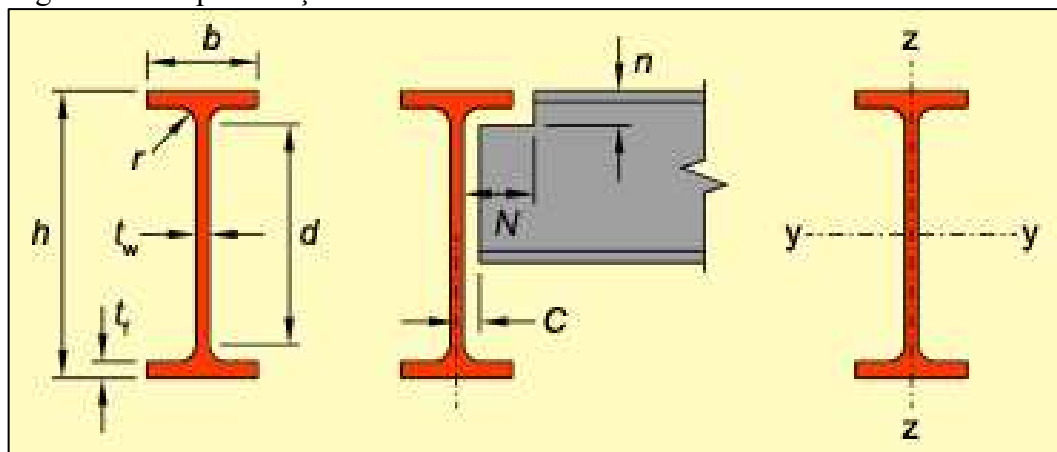
Desse modo, será gerado um desenho genérico do perfil I, apenas faltando adicionar os valores de altura, largura e espessura de parede. Para esta simulação foi utilizado o padrão americano W4x4 que equivale a viga W100x100 no padrão SI. Que consiste nas medidas da Figura 35 e da Figura 36, a seguir:

Figura 35 – Medidas da viga I utilizada.

| AMERICAN WIDE FLANGE BEAMS                 |        |      |            |     |       |       |    |                  |
|--|--------|------|------------|-----|-------|-------|----|------------------|
| Dimensions according to ASTM A6 / A6M - 03 |        |      |            |     |       |       |    |                  |
| Tolerances: ASTM A6 / A6M - 03             |        |      |            |     |       |       |    |                  |
| Designation                                | G      |      | Dimensions |     |       |       |    | A                |
|  | lbs/ft | kg/m | h          | b   | $t_w$ | $t_f$ | r  |                  |
|  |        |      | mm         | mm  | mm    | mm    | mm | mm <sup>2</sup>  |
|  |        |      |            |     |       |       |    | x10 <sup>2</sup> |
| W4 x 4                                     | 13     | 19.3 | 106        | 103 | 7.1   | 8.8   | 6  | 24.70            |

Fonte: Disponível em <http://soscoqatar.net/productdisplay.aspx?cid=5>

Figura 36 – Especificação das medidas do Perfil I.



Fonte: Disponível em <https://orangebook.arcelormittal.com/design-data/uk-na/beams/he/section-properties-dimensions-and-properties/>

Atualizando-se as medidas genéricas do desenho para o perfil W4x4, o desenho fica com 106 mm de altura, 103 mm de base, com 7,1 mm de espessura de alma e com 8,8 mm de

espessura de base. Parte-se então para a fase de extrudar essa seção. Em “Extrude”, seleciona-se o perfil da viga e em seguida especifica-se o valor do comprimento que terá a viga ao final da operação. Nessa simulação será usado o valor de 500 milímetros para o comprimento.

Em seguida, foram criados cantos arredondados nos quatro cantos vivos do perfil I, no encontro da alma com as bases da viga. Clica-se na função “Blend” e escolhe-se a opção “Fixed Radius”. Na aba “Details of view” na célula “Geometry” escolhe-se os quatro cantos que serão arredondados. Na célula “FD1, Radius” atribui-se o valor do raio que será de 6 mm, conforme a tabela na Figura 24. Clica-se em “Generate”, em seguida fecha-se o “Desingn Modeler” e parte-se para a modelagem matemática. Com um duplo clique em “Modeler”, abre-se a função “Mechanical” do software. Lá, será adicionado todos os parâmetros de contorno que se usará para se fazer essa simulação corretamente.

Ao selecionar essa função, o software carrega automaticamente o desenho anterior criado. Portanto, a viga I será carregada com algum tempo de espera, esse tempo pode variar conforme a complexidade do desenho e conforme a capacidade da máquina que o operador estará usando. Com o desenho carregado, em “Geometry”, percebe-se que o programa marcou essa função com um sinal de interrogação. Isso se dá, devido ao Ansys demonstrar que não está identificando algo ou que falta alguma informação nessa parte da simulação. Ao clicar em “Geometry” e rolar o campo de informações até “Materials”, percebe-se que na célula de nome “Assignment”, na qual a mesma informa o material aplicado ao desenho, está vazia. Seleciona-se com o botão direito do mouse o material, no caso o “Strutural Steel NL” adicionado no começo da simulação. Feito isso, o sinal de interrogação não será mais visto.

Parte-se para a malha, que está com um sinal de raio, mostrando que se precisa atualizar ou verificar aquela função. Como ainda não foi gerado nada, está apenas informando que a malha não foi criada até então. Ao clicar em “Mesh”, os detalhes técnicos serão mostrados em uma aba abaixo chamada de “Details of Mesh”. Nela será modificado o tamanho do elemento de malha, afim de refinar a mesma para a simulação. Então, na célula “Element Size” coloca-se 5 milímetros de tamanho para um elemento, em seguida gera-se a malha.

A malha já está pronta, parte-se para as outras informações de contorno. Como o carregamento nesse exemplo será do tipo repetido, ora com carga e ora sem carga, deve-se alimentar o software com essa informação. Portanto, será condicionado à uma simulação em duas etapas, uma carregada e outra sem carregamento. Isso será feito para o estudo do comportamento plástico do material, na fase plástica sob carregamento e em seguida sem carregamento. Para adicionar um número específico de etapas que a simulação deverá rodar,



deve-se então clicar em “Analysis Settings”, prosseguir para a célula de número de etapas. Será colocado 2 etapas para a simulação. Modifica-se o “Auto Time Stepping” para ligado.

Os valores de subetapas será definido como 30 para o início e mínimo de “Substeps”. Para o máximo de subetapas será definido o valor de 100. Em sequência liga-se a célula de “Large Deflection”, pois como haverá uma deformação plástica, é sempre de bom tom deixar essa função ligada, Figura 37.

Figura 37 – Parâmetros da etapa 1.

| Details of "Analysis Settings" |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| [-] <b>Step Controls</b>       |                    |
| Number Of Steps                | 2,                 |
| Current Step Number            | 1,                 |
| Step End Time                  | 1, s               |
| Auto Time Stepping             | On                 |
| Define By                      | Substeps           |
| Initial Substeps               | 30,                |
| Minimum Substeps               | 30,                |
| Maximum Substeps               | 100,               |
| [-] <b>Solver Controls</b>     |                    |
| Solver Type                    | Program Controlled |
| Weak Springs                   | Off                |
| Solver Pivot Checking          | Program Controlled |
| Large Deflection               | On                 |
| Inertia Relief                 | Off                |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

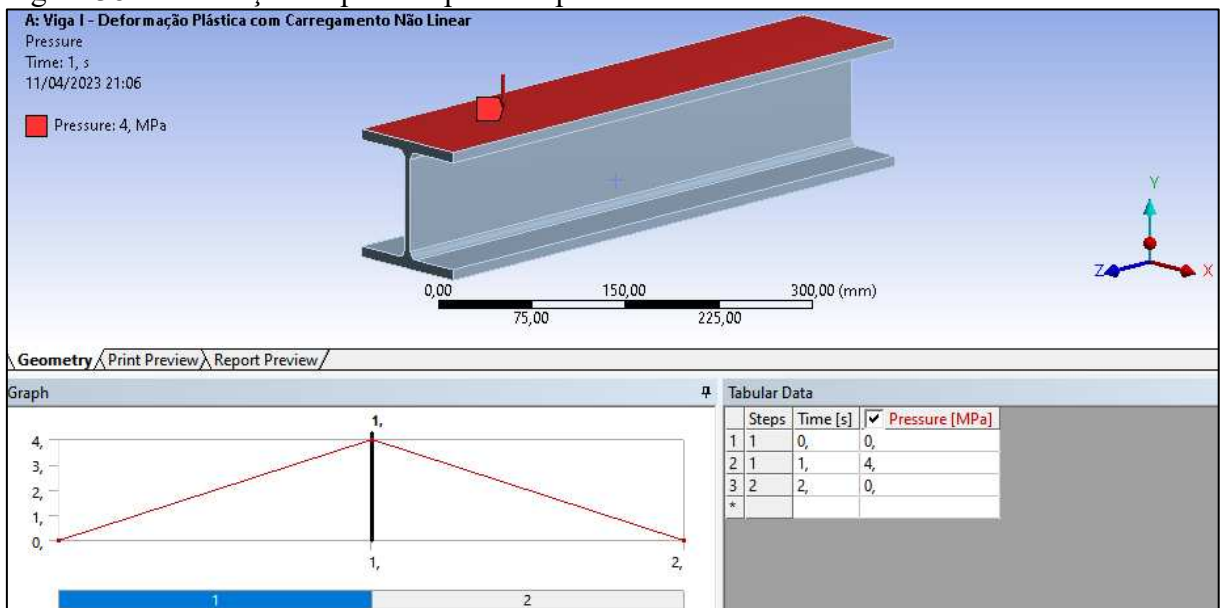
A razão para se definir esses valores e essas funções manualmente se deve, a capturar de forma mais precisa a reação plástica nesse estudo de caso. Esses detalhes serão aplicados apenas para a primeira etapa, já para a segunda etapa pode-se deixar de forma automática, padrão do programa. Pois, é nessa etapa que a viga não estará sob carregamento, então não haverá necessidade de mais precisão do que o padrão estabelecido automaticamente.

Em “Static Structural” será adicionado a fixação da viga. A fixação será feita utilizando a função “Fixed Support” para apenas um dos lados da viga, mais especificamente na face do plano x-y, pois a mesma estará sob balanço. Seguindo-se a mesma sequência, em “Insert” adiciona-se agora uma pressão usando-se a função “Pressure”, escolhe-se a face superior da viga que está no plano x-z e aplica-se. Nos detalhes da função de pressão haverá a modificação de alguns fatores, pois a força, nesse estudo de caso, não está uniformemente distribuída. Em “Magnitude” escolhe-se a função “Tabular”, uma janela com uma tabela irá

aparecer no Ansys, na área de trabalho do mesmo. Preenche-se com os dados necessários, pois essa tabela irá conter a divisão das etapas, o tempo em segundos e a pressão em megapascal para cada etapa.

Para a primeira etapa e o com tempo em 0 segundos, a força será zero. Continuando na primeira etapa, mas com o tempo em 1 segundo, coloca-se 4MPa de pressão. Já para a segunda etapa e com o tempo em 2 segundos, a pressão será zero. Na Figura 38 logo abaixo, pode-se observar que o Ansys está demonstrando graficamente os dados que a tabela informa.

Figura 38 – Atribuição da pressão pelo tempo.



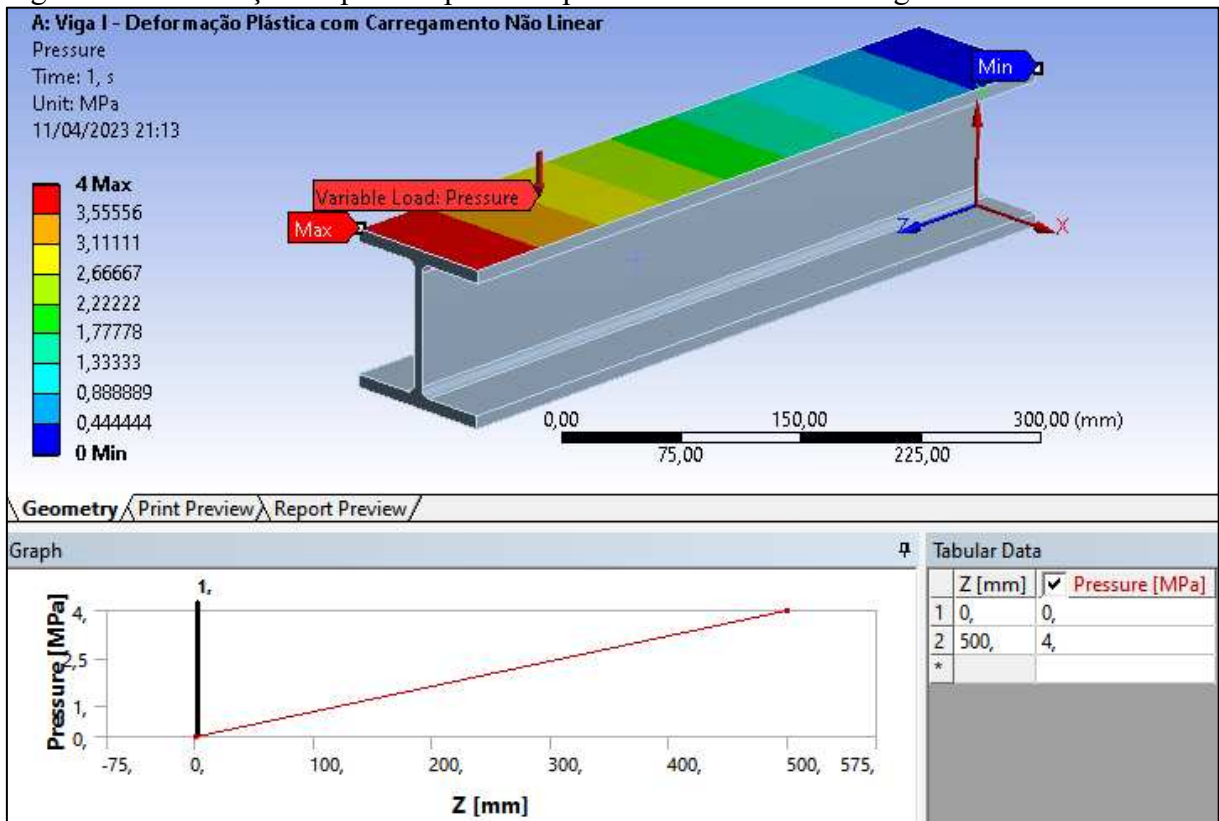
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na primeira etapa da simulação como programado, em zero segundos, não haverá força incidindo na viga, em um segundo a força será máxima e em dois segundos já não haverá força incidindo sobre o mesmo. Ou seja, a viga iniciará em seu estado estático, sofrerá a ação de uma força e ficará sob carregamento, para em seguida ficar sem carregamento.

Ainda nos detalhes da função de pressão, mais precisamente em variável independente, muda-se de “Time” para o “Z”. Esse é o eixo longitudinal da viga, dessa forma pode-se distribuir a carga nesse sentido. Deletando a terceira linha da tabela de dados e ajustando “Z” para quinhentos milímetros, tem-se a distribuição da carga em relação ao eixo z, como mostrado na Figura 39.

Na mesma Figura 39 a seguir também pode-se observar o gráfico da carga não linearmente distribuída na viga, com a força variando conforme a distância em relação ao ponto de fixação.

Figura 39 – Atribuição da pressão pelo comprimento no eixo ‘z’ da viga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Dando sequência, em controle de gráfico do eixo “X”, a célula será modificada de “Z” para “Time”. Na nova tabela, certifica-se que na segunda etapa o valor da escala seja zero. Com esses ajustes feitos, segue-se para a resolução do modelo matemático. Em sequência, adiciona-se o que se quer ter como resposta para esse estudo de caso. Com o botão direito sobre “Solution”, insere-se a tensão de Von-Mises e a deformação total da viga. Valida-se todos os resultados e assim pode-se avaliar o que ocorreu nessa simulação. Os comentários devidos serão discutidos com mais detalhes na seção de resultados.

Outro resultado que se pode obter com essa simulação, é um gráfico de tensão por deformação desse modelo. Para tal, escolhe-se um nó da malha, nas proximidades de onde ocorreu a deformação na viga, para se obter os dados dessa deformação plástica. Insere-se uma segunda tensão de Von-Mises em “Solution”, em seguida escolhe-se um nó da malha da viga, no plano superior x-z e aplica-se. Nesse mesmo nó escolhido, com o botão direito do mouse, insere-se uma deformação total equivalente. Valida-se por fim, os resultados.

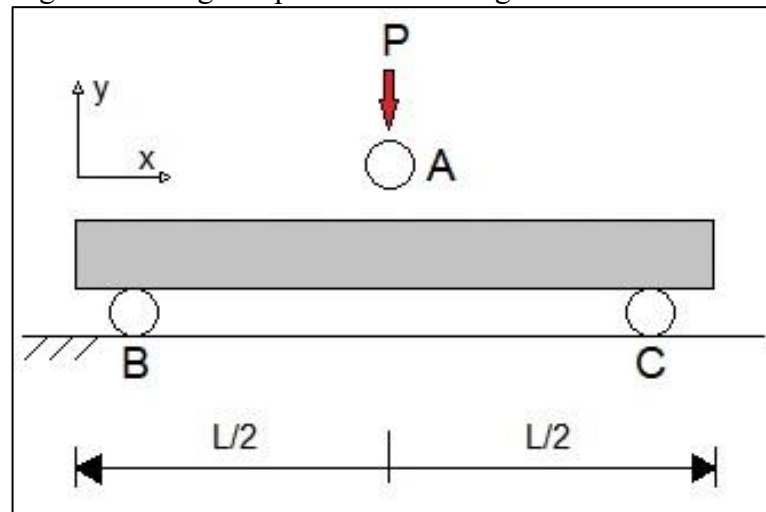
Agora, tem-se a tensão e deformação para um único ponto da malha da viga, onde a mesma sofreu deformação plástica. Dando sequência, seleciona-se simultaneamente a tensão e deformação do nó e seleciona-se a função “Chart”. Assim, será criado um gráfico plotado com

os dois resultados. Nos detalhes da função “Chart”, no eixo x, muda-se a célula da opção “Time” para “Equivalent Total Strain 2 (Max)”. Ou seja, a máxima deformação total do nó. Na célula “Time” escolhe-se por não mostrar esses resultados no gráfico, assim como as células “Equivalent Stress 2 (Min)” e “Equivalent Total Strain 2 (Min)” que deverão ser omitidas do gráfico também. Desse modo, o gráfico resultante é o gráfico de tensão por deformação na região plástica. Esse gráfico será avaliado no capítulo de resultados.

### 5.1.5 Teste de flexão em uma viga biapoiada de material não linear

O próximo estudo de caso abordará um teste de flexão entre quatro corpos em contato, em uma simulação não linear no Ansys. Avaliando-se o comportamento de uma viga até a sua deformação plástica. O sistema será composto por uma viga que será apoiada em dois suportes de formatos cilíndricos iguais. A simulação terá mais um corpo com o mesmo formato e dimensões dos suportes, mas que será o agente da aplicação da força no centro da viga, no sentido vertical negativo, Figura 40.

Figura 40 – Viga biapoiada com carregamento no centro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

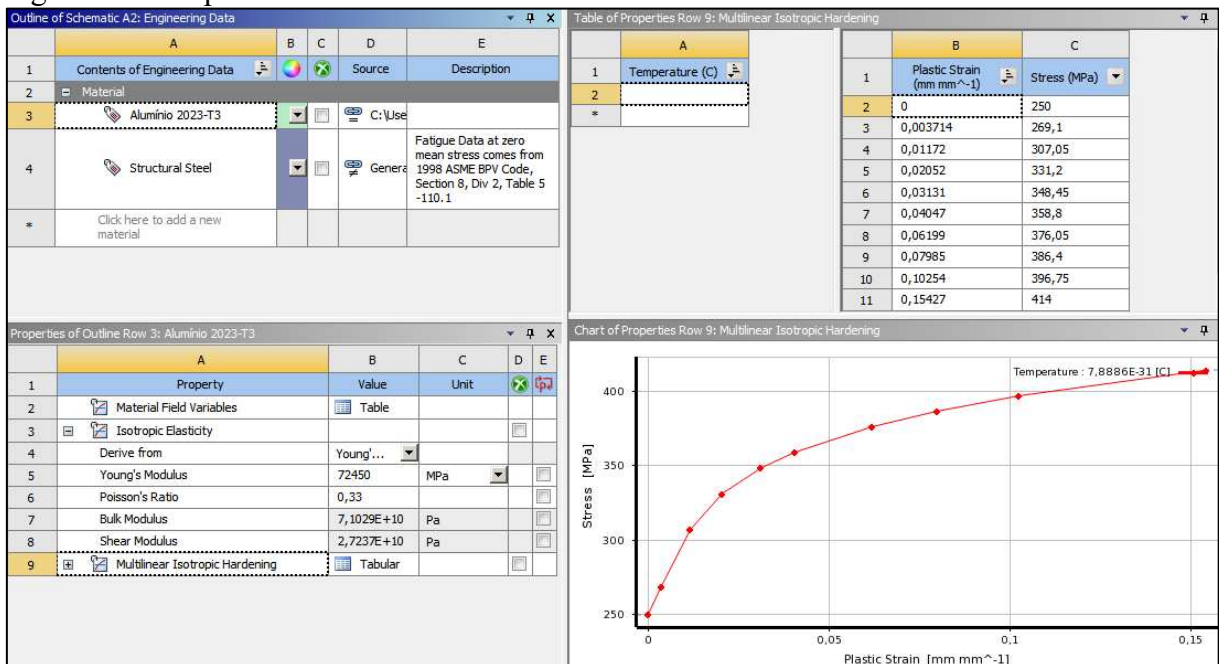
Utiliza-se o alumínio 2023-T3 como material para a viga. Para os outros três corpos, utiliza-se o aço estrutural. A viga será do tipo tubo retangular com as bordas arredondadas. Os corpos serão do tipo tubos redondos. As espessuras de parede utilizadas nos corpos e na viga serão de 1 milímetro.

Abre-se então a ferramenta “Static Structural” no software. Com o botão direito do mouse, em cima de “Static Structural”, renomeia-se a simulação como “Teste de flexão -

material não linear”. Parte-se para os dados de engenharia, abrindo-se a aba “Engineering Data”. Cria-se um novo material, nesse caso o alumínio 2023-T3. Após a criação e nomeação do mesmo, o próximo passo será adicionar suas propriedades para que ocorra a simulação corretamente. Acrescenta-se a propriedade de elasticidade isotrópica, que se encontra na aba “Linear Elastic”, arrastando a mesma e soltando em cima do nome do novo material. Percebe-se que duas células estão em amarelo, pois o Ansys está informando ao usuário, que falta informações nesses espaços. No caso, respectivamente o Módulo de Young, que terá o valor de 72450 MPa e a Razão de Poisson que terá valor de 0,33.

Como esse material será não linear, precisa-se acrescentar outra propriedade na sua configuração. Em “Plasticity” escolhe-se a propriedade de “Multilinear Isotropic Hardening” e arrasta-se até o alumínio. Para esse atributo, tem-se então uma tabela a ser preenchida com valores de deformação plástica em (mm/mm) e de tensão em (MPa), dessa forma, o software terá condições de avaliar o comportamento não linear da fase plástica desse novo material. Esses valores foram retirados do material base de simulação e não foram retirados de dados experimentais. Após o preenchimento dessa tabela, o software já terá plotado, de forma automática, o gráfico na própria seção de dados. A Figura 41 a seguir, demonstra como ficam os dados e o gráfico para esse material criado.

Figura 41 – Propriedades do Alumínio 2023-T3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como pode-se ver, a fase plástica começa a partir de 250 MPa e segue-se em uma curva com vários pares ordenados de tensão e deformação, mostrando a natureza não linear do material nessa fase.

Para o aço estrutural, deve-se apenas modificar o Módulo de Young. Atualizando-se apenas o valor para  $2 \times 10^8$  MPa, enquanto os outros dados permanecem com os valores padrão do Ansys para esse material. Parte-se então para a próxima etapa, que será o desenho.

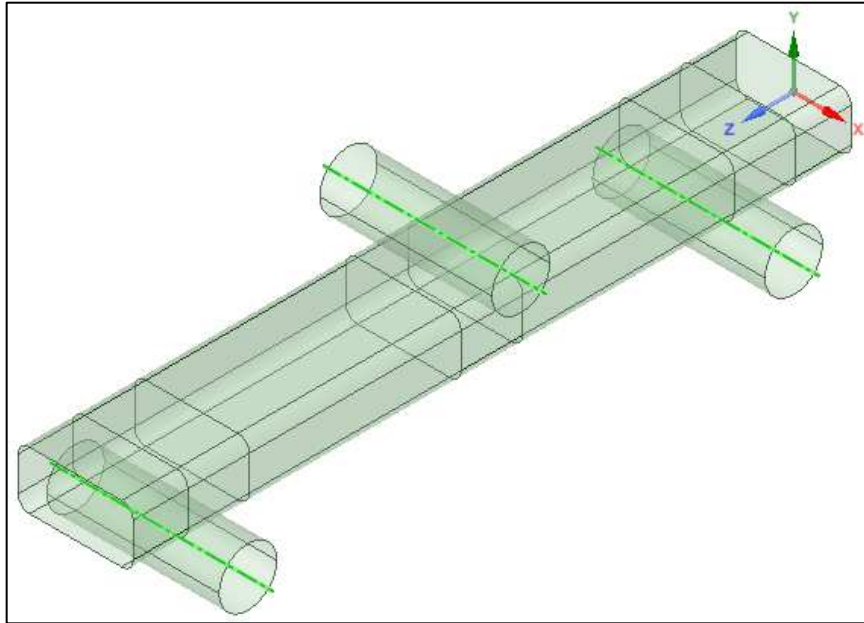
Abre-se então o “SpaceClaim” e escolhe-se o plano x-y para desenhar o tubo retangular. O retângulo terá 20mm de altura e 40mm de largura, com arredondamento dos quatro cantos que terá 5mm de raio. Na função “Pull”, seleciona-se as arestas desse retângulo para se criar a superfície com 250mm de comprimento. Ou seja, será criado apenas a casca do retângulo, com uma espessura não definida nessa etapa.

Com o corpo já criado, seleciona-se a face do esboço do qual o retângulo foi desenhado e com o botão direito do mouse escolhe-se a opção “Detach”, assim separar-se-á o desenho 3D do seu esboço 2D. Isso deverá ser feito para todos os esboços que criarão os outros corpos da simulação, pois ao final dessas etapas, esses desenhos 2D irão ser desativados para a física da simulação. Restando apenas os desenhos 3D da viga, dos seus apoios e do objeto que irá aplicar a força como partes ativas da simulação.

No plano z-y, desenha-se uma circunferência de 20mm de diâmetro, que irá ser o tubo que irá aplicar a força no centro da viga, na parte superior. Na parte inferior, desenha-se duas circunferências, uma oposta a outra, com 20mm de diâmetro e 95mm de distância do centro da viga. Usando-se a função “Pull” e selecionando-se apenas as circunferências, criam-se as superfícies com 60mm de comprimento. Todos os tubos redondos foram desenhados com 1mm de distância da viga.

Por fim, divide-se as faces da viga utilizando a função “Split”, pois na simulação ficará mais simples de escolher as faces que irão interagir entre si. Com essa função, passa-se uma linha na posição escolhida pelo projetista que irá dividir a face original em duas novas faces. As linhas escolhidas, serão tangentes aos tubos redondos, mas desenhadas na viga. Criando pequenas faces próximas de onde haverá o toque entre os corpos. Também haverá linhas horizontais seccionando os tubos redondos em duas partes iguais. Essas divisões de faces serão muito importantes no momento em que for ajustar os parâmetros de contato da simulação. Pois será nessas faces que ocorrerá o contato dos cilindros com a viga. Na Figura 42 a seguir pode-se observar essas divisões com maior detalhe.

Figura 42 – Desenho da viga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Prosseguindo-se para a simulação, já com o desenho carregado na função “Mechanical”, o software informa com um sinal de interrogação na função de geometria, que todos os objetos desenhados estão sem espessura definida. Nesse momento é que se define esses valores, que no caso, serão os mesmos para todos. Em “Thickness”, onde a célula está na cor amarela, coloca-se o valor de 1 milímetro. Para os tubos redondos, o material atribuído será aço estrutural. Já para a viga, o material atribuído será o Alumínio 2023-T3 definido inicialmente. Encerram-se as definições de geometria e parte-se para as definições dos contatos físicos entre os objetos da simulação.

Criam-se os contatos de forma manual. Em “Connections” usando-se o botão direito do mouse, insere-se a função “Manual Contact Region”. Em seguida, o Ansys precisará de uma série de informações sobre esses contatos. Por exemplo, quais faces serão escolhidas como o contato e o alvo do contato. Como também a definição do tipo desse contato. Nesse caso, as faces de contato serão as faces da viga que irão tocar os tubos de apoio e que irão tocar o tubo que exerce a força. Já as faces do alvo serão as faces dos tubos redondos voltados para a viga. Em “Contact Shell Face” e em “Target Shell Face” escolhe-se a opção “Bottom”, pois nessa opção a orientação das duas faces serão opostas e na mesma direção, ou seja, corresponderá ao que ocorre em um contato real. Em seguida, define-se o tipo de contato, para isso, na célula “Type” na ala “Definition” escolhe-se a opção “Frictionless” ou contato sem atrito, Figura 43.



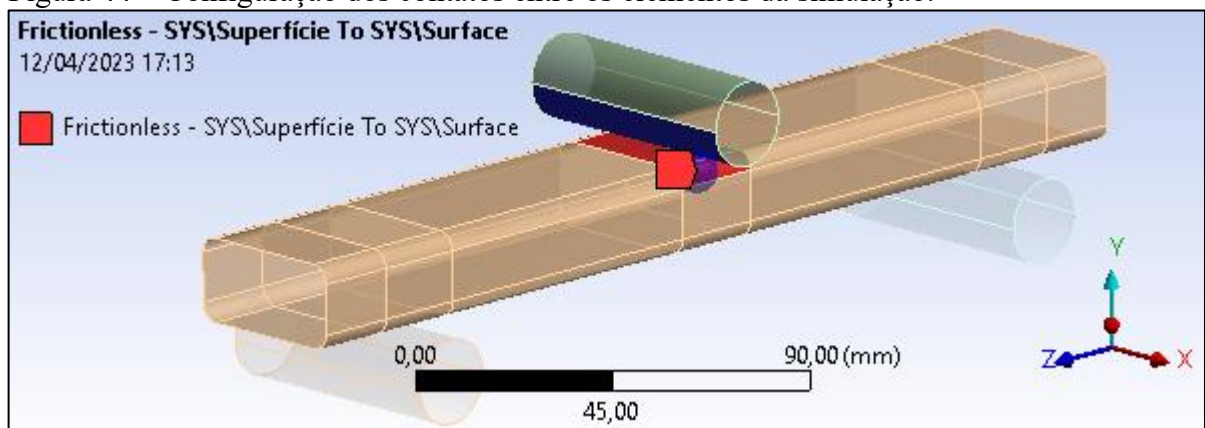
Figura 43 – Configurações do contato.

| Details of "Frictionless - SYS\Superfície To SYS\Surface" |                    |
|---|--------------------|
| [-] <b>Scope</b>  |                    |
| Scoping Method  | Geometry Selection |
| Contact   | 3 Faces            |
| Target  | 1 Face             |
| Contact Bodies  | SYS\Superfície     |
| Target Bodies   | SYS\Surface        |
| Contact Shell Face  | Bottom             |
| Target Shell Face   | Bottom             |
| Shell Thickness Effect                                    | No                 |
| [-] <b>Definition</b>                                     |                    |
| Type  | Frictionless       |
| Scope Mode  | Manual             |
| Behavior  | Program Controlled |
| Trim Contact  | Program Controlled |
| Suppressed  | No                 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Isso deverá ser repetido para cada um dos três contatos dessa simulação. Para facilitar, basta apenas ao final dessa etapa de configuração, duplicar esse contato duas vezes. Para isso, clica-se com o botão direito do mouse em cima do contato e escolhe-se a opção "Duplicate", depois muda-se apenas as faces de contato e de alvo. A Figura 44 abaixo, demonstra as condições de contorno para o contato da viga com o tubo redondo que exercerá a força na simulação.

Figura 44 – Configuração dos contatos entre os elementos da simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Selecionando-se os três contatos ao mesmo tempo, parte-se para a aba avançada das configurações. Já na célula "Pinball Region", faz-se uma mudança para a opção "Radius" e logo a baixo implementa o valor desse raio, que nessa simulação será de 5mm. Segue-se para



“Detection Method” e seleciona-se “Nodal-Normal To Target”, depois em “Interface Treatment” a opção “Adjust to Touch” é escolhida, Figura 45.

Figura 45 – Configurações avançadas.

| Advanced                     |                        |
|------------------------------|------------------------|
| Formulation                  | Program Controlled     |
| Detection Method             | Nodal-Normal To Target |
| Penetration Tolerance        | Program Controlled     |
| Normal Stiffness             | Program Controlled     |
| Update Stiffness             | Program Controlled     |
| Stabilization Damping Factor | 0,                     |
| Pinball Region               | Radius                 |
| Pinball Radius               | 5, mm                  |
| Time Step Controls           | None                   |
| Geometric Modification       |                        |
| Interface Treatment          | Adjust to Touch        |
| Contact Geometry Correction  | None                   |
| Target Geometry Correction   | None                   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em cada contato, insere-se um comando. Para isso, basta apenas com o botão direito do mouse inserir a função “Commands”. Nela, escreve-se o comando “keyopt,cid,11,1”. Esse comando será o mesmo comando para os três contatos.

Prossegue-se para a criação e refino da malha dos quatro objetos. Primeiramente, insere-se a função “Sizing”, com o seletor ativado para “Edge” seleciona-se as bordas da circunferência de todos os tubos redondos. Em seguida, na ala “Definition” na célula “Type” ativa-se a função “Number of Divisions”, logo abaixo define-se como sendo 10 o número de divisões. Novamente, insere-se a função “Sinzing”. Agora escolhe-se as bordas laterais de todos os tubos redondos, repetindo o processo anterior, mas agora sendo 20 o número de divisões.

Mais uma vez, insere-se a função “Sizing”. Muda-se o seletor para “Body” e seleciona-se a viga. Altera-se apenas o tamanho do elemento para 3 milímetros. Seguindo-se, insere-se a função “Mapped Face Meshing”, com o botão direito do mouse sobre a área do desenho seleciona-se todos os objetos contidos no mesmo, aplicando a função. Por fim, insere-se a função “Sizing” e aplica-se nos corpos dos três tubos redondos, ajustando o tamanho do elemento para 3 milímetros. Gera-se a malha. Na função “Sizing” tanto para a viga quanto para os tubos redondos, na ala avançada das configurações da malha, na célula de comportamento, muda-se para a opção “Hard”. Por fim, gera-se novamente a malha.

Parte-se então para as configurações das etapas da simulação. Em “Analysis Settings”, na célula que configura o número de etapas da simulação define-se o mesmo como

sendo em duas etapas. Em seguida, ativa-se a célula “Auto Time Stepping”. Em “Initial Substeps”, “Minimum Substeps” e “Maximum Substeps” os valores serão definidos respectivamente como sendo 50, 10 e 100. Essas configurações foram apenas para a primeira etapa da simulação, Figura 46.

Figura 46 – Detalhes da configuração na etapa 1.

| Details of "Analysis Settings" |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| [-] Step Controls              |                    |
| Number Of Steps                | 2,                 |
| Current Step Number            | 1,                 |
| Step End Time                  | 1, s               |
| Auto Time Stepping             | On                 |
| Define By                      | Substeps           |
| Initial Substeps               | 50,                |
| Minimum Substeps               | 10,                |
| Maximum Substeps               | 100,               |
| [-] Solver Controls            |                    |
| Solver Type                    | Program Controlled |
| Weak Springs                   | Program Controlled |
| Solver Pivot Checking          | Program Controlled |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Segue-se para a configuração da segunda etapa. Para isso, basta apenas digitar o número dois na célula “Current Step Number” e pressionar “Enter”. Em “Weak Springs” mantém-se a opção “Program Controlled”. Posteriormente, em “Large Deflection” muda-se para a opção “On”, isso significa que a não-linearidade geométrica será considerada nessa etapa, Figura 47.

Figura 47 – Detalhes da configuração na etapa 2.

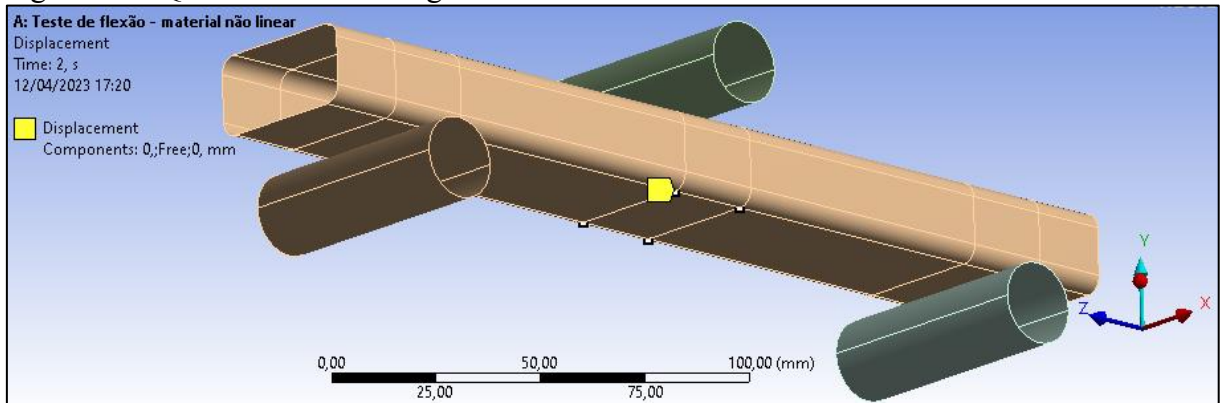
| Details of "Analysis Settings" |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| [-] Step Controls              |                    |
| Number Of Steps                | 2,                 |
| Current Step Number            | 2,                 |
| Step End Time                  | 2, s               |
| Auto Time Stepping             | Program Controlled |
| [-] Solver Controls            |                    |
| Solver Type                    | Program Controlled |
| Weak Springs                   | Program Controlled |
| Solver Pivot Checking          | Program Controlled |
| Large Deflection               | On                 |
| Inertia Relief                 | Off                |
| [+] Rotordynamics Controls     |                    |
| [+] Restart Controls           |                    |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Depois de programar as etapas, parte-se para as definições das condições de contorno da simulação. Em “Static Structural” insere-se a função para se fixar os suportes, que serão os dois tubos redondos que estão abaixo da viga. Escolhe-se as faces na parte inferior dos

dois cilindros. Em seguida, insere-se a função “Displacement” e aplica nos quatro pontos do vértice da viga, logo abaixo de onde o cilindro que irá exercer força irá atuar, Figura 48. Fixa-se os eixos ‘x’ e ‘z’, deixando apenas o eixo ‘y’ livre para movimento.

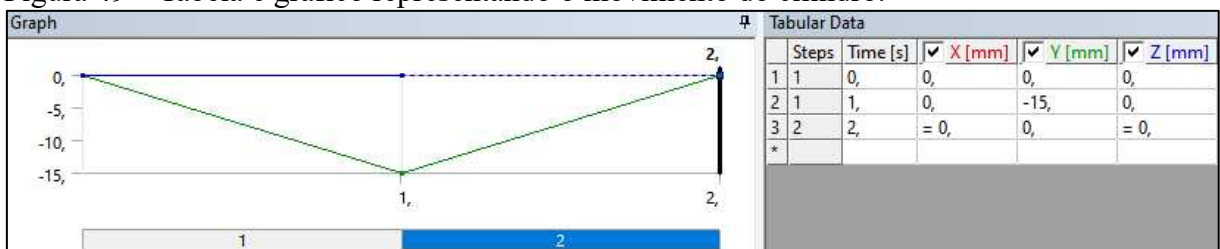
Figura 48 – Quatro vértices da viga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Novamente, insere-se outra função “Displacement” e escolhe-se a face superior do cilindro, o mesmo que irá exercer a força na viga. Restringe-se os eixos ‘x’ e ‘y’, e no eixo ‘y’ define-se o valor de -15 milímetros. Dessa forma, o cilindro irá realizar o movimento em direção a viga em 15mm.

Figura 49 – Tabela e gráfico representando o movimento do cilindro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No lado direito, no canto inferior da tela, irá aparecer uma tabela de valores para a função de deslocamento de acordo com a etapa que se seguirá, Figura 49 acima. Deve-se ter certeza de que na segunda etapa os valores de ‘y’ para o tubo redondo sejam zero, assim o cilindro sairá de zero milímetros, descerá 15 milímetros na primeira etapa e retornará a zero milímetros na segunda etapa. Esse será seu movimento na simulação.

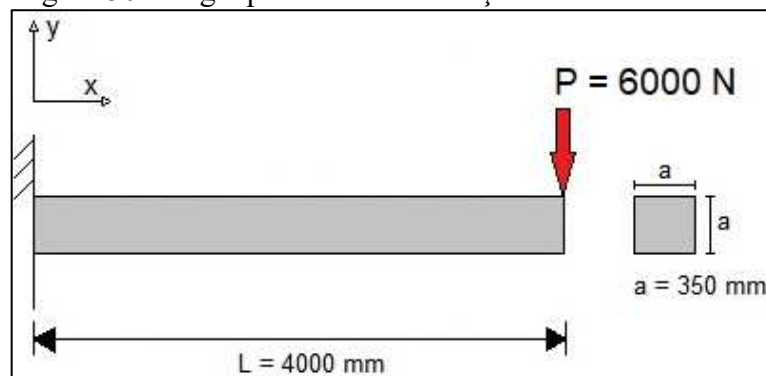
Feito essas definições, passa-se para a solução da simulação. Escolhe-se o que irá se obter como resposta do Ansys. Nesse caso, é interessante saber a deformação em milímetros, a deformação plástica e as reações nos pontos de apoio. Com isso, clicando-se com o botão

direito do mouse em cima de “Solution”, insere-se a função “Directional Deformation”. Nas configurações, na ala de definições a célula onde se escolhe a orientação do eixo que será analisado, muda-se para o eixo ‘y’. Na célula “Display Time” atribui-se o valor 1, para que sejam obtidos valores da primeira etapa da simulação. Insere-se outra função “Directional Deformation”, como no passo anterior o eixo avaliado será o ‘y’. Já na célula “Display Time” atribui-se o valor 2 ou mantém-se a opção “Last”, assim os valores dessa deformação direcional serão o da última etapa. Em seguida, insere-se uma deformação plástica. Com o botão direito do mouse em “Solution”, escolhe-se “Strain” e depois “Equivalent Plastic”. Dando sequência, do mesmo modo que o passo anterior, mas agora em vez de escolher a opção “Strain”, escolhe-se “Probe” e depois “Force Reaction”. Nas definições, na célula de condições de contorno, escolhe-se a opção “Fixed Support”. Em seguida, com o botão direito do mouse sobre “Solution”, clica-se em “Solve”. Os resultados e considerações dessa simulação, serão explanados na próxima seção.

### 5.1.6 Viga quadrada em balanço

O próximo estudo de caso trata-se de uma viga quadrada em balanço sendo exposta a uma força. Suas medidas são de 350 milímetros de aresta e 4000 milímetros de comprimento. Será fixa no seu lado esquerdo e sofrerá a ação de uma força no sentido ‘-y’ no valor de 6000 Newtons na sua extremidade livre de fixação, Figura 50.

Figura 50 – Viga quadrada em balanço.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já no Ansys, abre-se a ferramenta “Static Estrutural”. Para esse caso o material usado terá um valor diferente do padrão usado no software, com isso em “Engineering Data” cria-se um novo aço para a simulação. Dar-se-á ao novo material o nome de “Steel”, apenas

para diferenciá-lo do padrão do programa. Adiciona-se as propriedades de elasticidade isotrópica apenas dando um duplo clique em “Isotropic Elasticity”. O Ansys já demonstra ao usuário, com células na cor amarela, que necessita de valores como o módulo de Young e a razão de Poisson. Nesse problema, será usado o valor de 27000 MPa para o módulo de Young e 0 para a razão de Poisson.

Próxima etapa será o desenho da viga. O mesmo será feito pelo “Design Modeler”, para isso apenas clica-se com o botão direito do mouse em cima de “Geometry”, em sequência escolhe-se a opção de abrir essa ferramenta de desenho.

Dando sequência, seleciona-se o plano “x-y” e então usa-se a função “Look at Face”, dessa forma o software colocará o plano escolhido a noventa graus do desenhista. Em “Sketching” seleciona-se a função “Line”. Clica-se no centro do plano, em seguida, clica-se para a direita, tomando-se cuidado para que a linha fique perfeitamente reta. Essa será a linha de centro da viga e, portanto, terá 4000 milímetros.

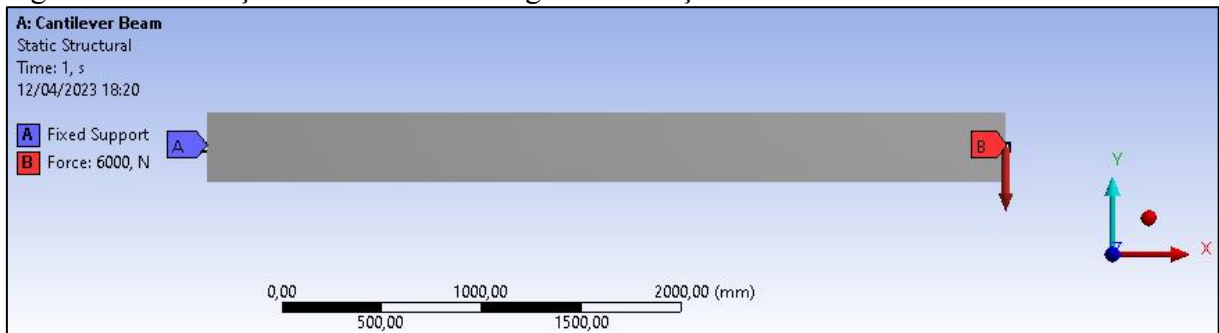
Após a criação da mesma, clica-se na aba de “Dimensions” e em seguida clica-se na linha criada. Na célula “H1” atribui-se o valor de 4000 mm. Parte-se então para “Concept” e escolhe-se a função “Lines from Sketches”, seleciona-se a linha e aplica. Em sequência “Generate”. Com a linha criada, sendo uma peça/corpo segue-se para a criação da seção transversal que dará o formato da viga. Novamente em “Concept”, mas agora seleciona-se a função “Cross Section” para em seguida selecionar “Rectangular”. Assim, será criado um formato retangular da seção transversal da viga. Nas células ‘B’ e ‘H’ atribui-se os valores de suas arestas, que no caso serão iguais a 350 milímetros. Por fim, clica-se em “Generate”.

Selecionando “1 Part, 1 Body” na árvore de comandos do desenho, clica-se em “Line Body”. Na célula “Cross Section” escolhe-se a opção “Rect1”, em seguida gerar. Dessa forma, o desenho estará feito e parte-se para a simulação propriamente dita.

Já de volta a tela inicial do AnsysWorkbeanch<sup>©</sup>, clica-se em “Model” para abrir a ferramenta “Mechanical”. O desenho mostrado em tela será simplesmente o da linha de centro da viga, mas se o usuário quiser ver a viga como um todo, basta apenas ir em “View” e selecionar a opção “Cross Section Solids”. Após carregar o desenho, parte-se então para a configuração das definições dos detalhes da simulação. Em “Geometry” ao clicar em “Line Body”, atribui-se o material da viga através da célula “Assignment”. Como configurado anteriormente, seleciona-se o material de nome “Steel” para esta célula. Em seguida, cria-se uma malha ao clicar em “Mesh”, com o botão direito do mouse, e escolhe-se a opção “Update”. Assim, uma malha padrão do Ansys será criada para essa viga. A próxima etapa será a atribuição da aplicação do suporte na viga. Em “Static Structural”, insere-se a função “Fixed Support”.

Usa-se a opção de seleção do mouse de “Vertex” para selecionar o vértice da linha de centro da viga, para então aplicar o suporte fixo nesse ponto. Para a aplicação do carregamento, insere-se uma força em “Static Structural”, da mesma forma que se colocou o suporte fixo, aplicando-se a carga no vértice oposto da linha de centro. Muda-se a definição da força de vetor para força de componentes. Se atribui valor apenas para o eixo ‘y’, que no caso será – 6000 N. Com suas condições de contorno definidas, Figura 51, dá-se sequência para a solução da simulação.

Figura 51 – Condições de contorno da viga em balanço.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Usando-se o botão direito do mouse, clica-se em “Solution” e insere-se uma deformação total. Agora, com o mesmo processo anterior, seleciona-se “Tools” e insere-se a opção “Beam Tool”. Seleciona-se a ferramenta da viga e com o botão direito do mouse na opção “Stress”, insere-se a opção “Maximum Bending Stress”. Em “Model”, com o botão direito, insere-se a função “Construction Geometry”, nessa mesma função insere-se uma ferramenta “Path”. Na célula “Path Type” seleciona-se a opção “Edge”.

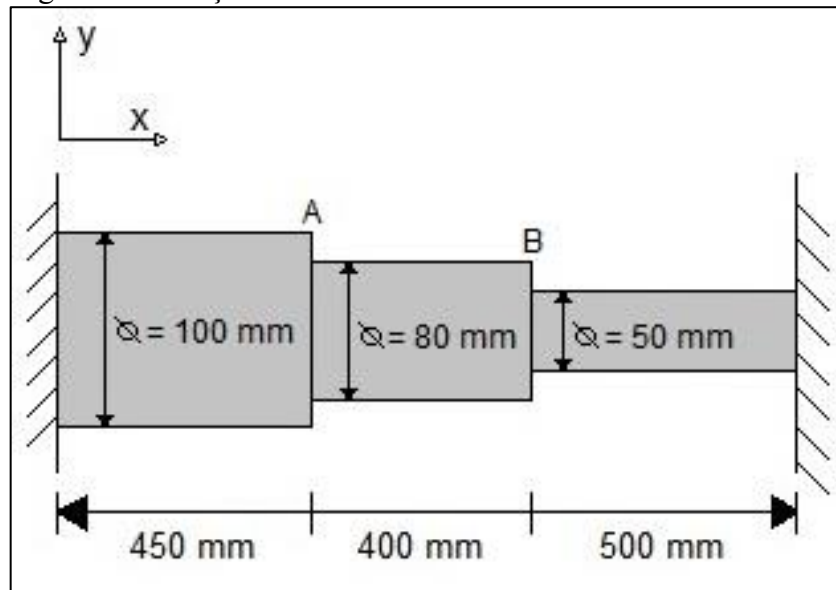
Muda-se a seleção do mouse para “Edge” e clica-se na linha de centro da viga para aplicar a função. Já em “Solution”, na opção “Beam Results” insere-se a função “Bending Moment”. Na célula “Scoping Method” escolhe-se a opção “Path”. Na célula “Path” seleciona-se a opção “Path”. Na área “Definition”, na célula “Type” seleciona-se a opção “Directional Bending Moment”. Na célula “Orientation” escolhe-se o eixo ‘z’. Por fim, em “Solution”, com o botão direito do mouse, clica-se em “Solve” para executar a solução. Os resultados serão discutidos na próxima seção.

### 5.1.7 Torção em barra escalonada

Nesse subtópico será demonstrado a execução de uma simulação que possuirá dois momentos aplicados em uma mesma barra redonda escalonada, com variados diâmetros ao

longo de seu eixo. A mesma será fixada nas suas duas extremidades, Figura 52. Os momentos aplicados terão valores e sentidos diferentes. O primeiro momento terá sentido anti-horário, com o valor de 3000 N.m, que será aplicado no ponto ‘A’. Já o segundo momento, será no sentido horário e terá o valor de 2000 N.m, que será aplicado no ponto ‘B’. O material da barra terá 100GPa de módulo de cisalhamento ou módulo de rigidez (G). Assume-se que o material da barra seja um aço e que a razão de Poisson seja de 0,3.

Figura 52 – Torção em barra escalonada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

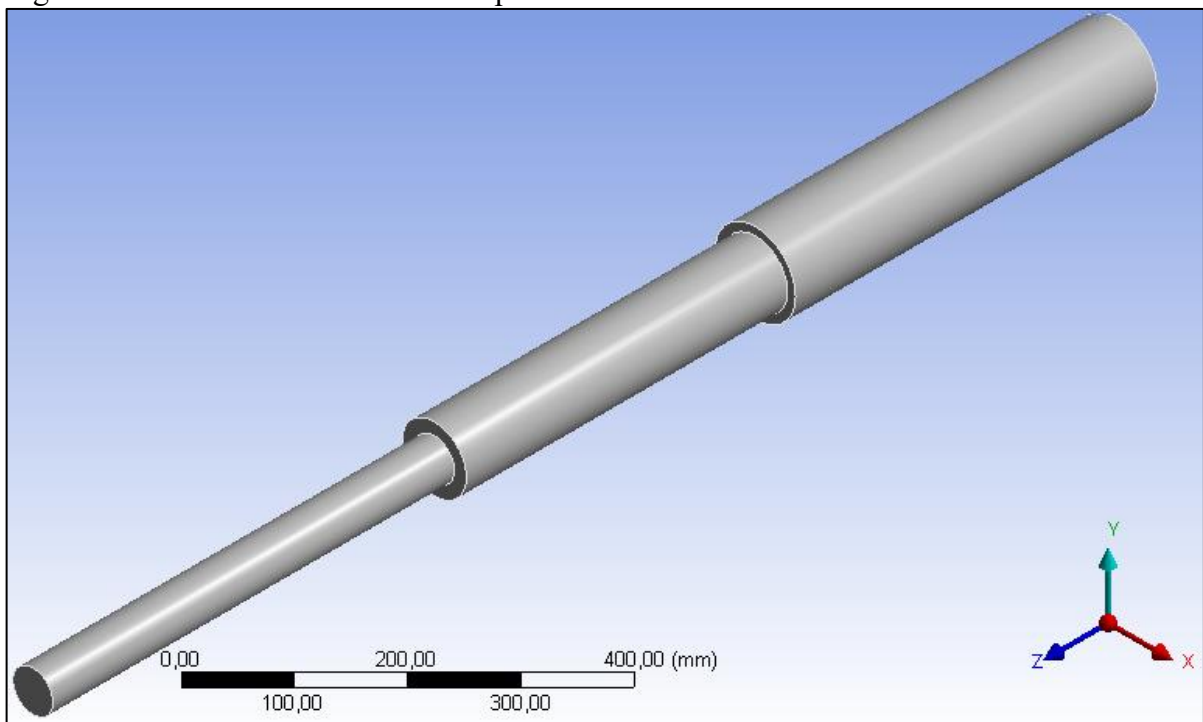
Já na tela inicial do Ansys, clica-se duas vezes em “Static Structural” ou clica-se e arrasta o mesmo até o espaço em branco do programa, chamado de “Project Schematic”. Ao soltá-lo, o software irá abrir suas funções para a criação da simulação de estrutura estática. Nomeia-se o projeto, no caso será “Torção em uma viga de diâmetro variável”. Nesse caso, o material será criado de um outro modo, em outra etapa do processo, portanto segue-se diretamente para o desenho da peça. Clica-se em “Geometry” com o botão direito do mouse e abre-se o “Design Modeler”. Escolhe-se o plano “x-y” e clica-se “Look at Face”, em seguida clica-se em “Sketching” e escolhe-se a função “Circle” na aba “Draw”. No centro do plano dá-se um clique e cria-se uma circunferência. Na aba “Dimensions” com a função “General” ativa, clica-se no círculo para dar o valor de seu diâmetro. No caso, o primeiro círculo terá 100 milímetros de diâmetro.

Segue-se clicando-se em “Extrude” e aplica-se no círculo criado. Na célula “Depth”, atribui-se o valor de 450 milímetros. Após essas etapas, seleciona-se “Generate”. A barra

redonda que foi criada será uma das seções da barra escalonada. Prosseguindo-se, clica-se na face 'x-y' da barra redonda, que se localiza na direção positiva do eixo 'z', ou seja, a 450 milímetros do ponto de origem. Após selecionar essa face, cria-se um novo plano tangente a mesma, apenas clicando-se a função "New Plane". Plano criado, seleciona-se "Look at Face". Cria-se uma nova circunferência repetindo o mesmo processo anterior, a diferença se dará pela medida desse segundo diâmetro, que será de 80 milímetros. Extruda-se esse novo círculo e se atribui o valor de 400 milímetros. Clica-se em "Generate". Assim, a segunda seção da barra escalonada foi criada. Seleciona-se novamente uma nova face. Essa por sua vez, também será tangente ao plano 'x-y', mas se localizará na nova seção da barra, mais exatamente na face a 850 milímetros do ponto de origem do eixo 'z'.

Repete-se o processo anterior de criação de um novo plano. Clica-se em "Look at Face", seleciona-se "Circle" e cria-se no centro do plano uma circunferência de 50 milímetros. Extruda-se e gera-se esse círculo com o valor de 500 milímetros. A barra escalonada de vários diâmetros foi desenhada. A Figura 53, em seguida, mostra o resultado.

Figura 53 – Barra escalonada de múltiplos diâmetros.



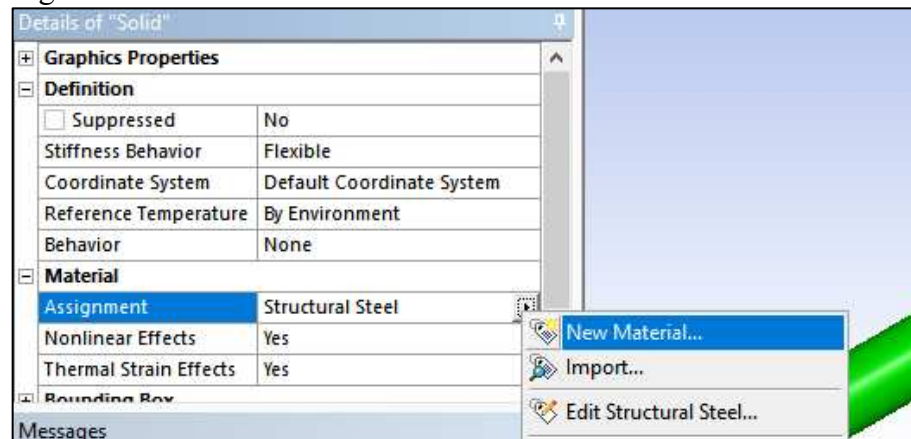
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com o desenho pronto, abre-se a ferramenta "Model". É nessa etapa que um novo material será criado, para isso, em "Geometry" seleciona-se "Solid". Na tabela onde mostra os



detalhes do sólido selecionado, mais precisamente na célula “Assignment”, clica-se na seta que aparece ao passar o mouse e seleciona-se a opção “New Material”, Figura 54 a seguir.

Figura 54 – Criando um novo material.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Aqui segue-se outro caminho, como demonstração de uma outra forma de criar novos materiais, além do já citado nesse trabalho. Após selecionar a opção de novo material, uma caixa de texto com uma mensagem aparecerá na tela, clica-se em ok e o software encaminhará para o setor onde se cria novos materiais. Cria-se assim um novo material, dar-se-á o nome de “m1” para o mesmo.

Para definir as suas propriedades físicas clica-se duas vezes em “Isotropic Elasticity”. Para esse estudo de caso, foi dado como informações, as medidas da barra redonda, o módulo de cisalhamento e a razão de Poisson. O Ansys, pode calcular os valores das outras propriedades físicas a partir dessas duas já dadas, basta apenas escolher quais serão as informações de entrada. Para isso, na célula “Derive from”, escolhe-se a opção “Shear Modulus and Poisson’s Ratio”. Dessa forma, as células do módulo de Young e do módulo de Bulk ficam impossíveis de se atribuir valores, apenas as células de módulo de cisalhamento e da razão de Poisson ficam disponíveis para atribuição de valores de entrada pelo operador. Na célula “Shear Modulus” entra-se com o valor de 100 GPa ou  $100 \times 10^9$  Pa. Na célula “Poisson’s Ratio” coloca-se 0,3. Para essa simulação, somente essas informações já conferem as propriedades necessárias para os cálculos. O principal intuito desse trabalho, é demonstrar as funções e capacidades do software para o auxílio do estudo do aluno na universidade. Neste estudo de caso, em específico, uma grande precisão não será o foco.

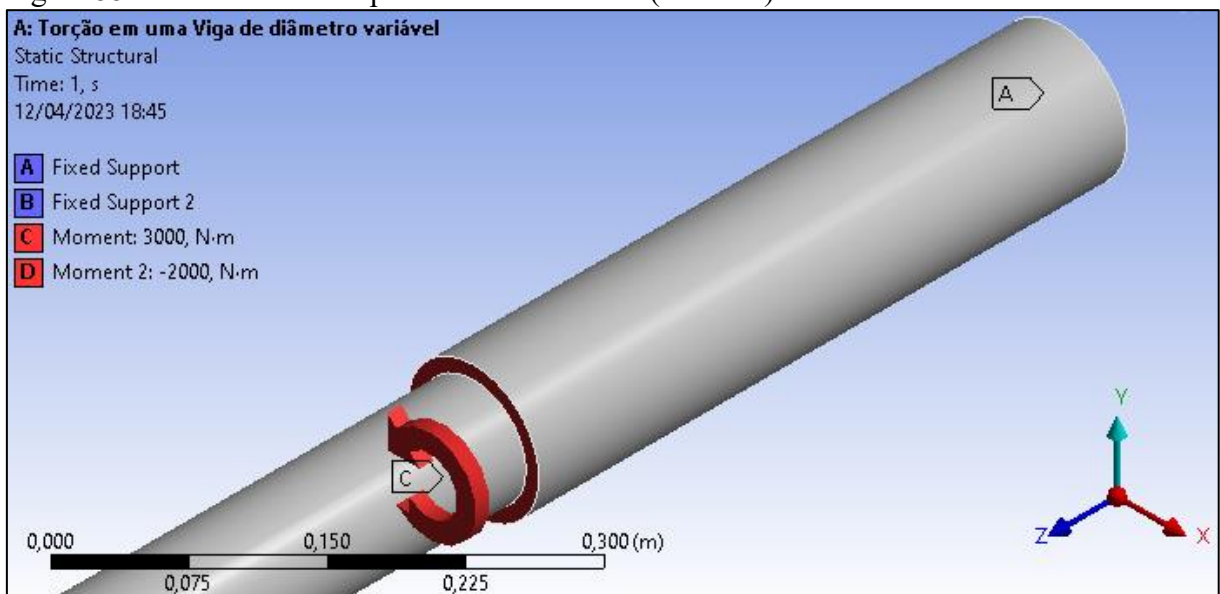
Retorna-se para o projeto clicando-se em “Project”. Como dessa forma, o material foi criado durante a simulação e não no início, para garantir que todo o programa entenda a

entrada do novo material, clica-se em “Refresh Project”. Para voltar à simulação, clica-se duas vezes em “Model”. Agora, repetindo-se o processo clica-se em “Geometry” posteriormente em “Solid” e na célula “Assignment” escolhe-se o material “m1” que acabou de ser criado.

Segue-se para a malha da barra. Ao selecionar “Mesh”, na aba “Sizing”, na célula “Relevance Center” escolhe-se a opção “Fine”. Por fim, clica-se em “Update” e uma malha fina será criada para a geometria. A próxima etapa será as definições para as condições de contorno da simulação, propriamente dita. Seleciona “Static Structural”, na face que será imposto uma restrição de movimento, clica-se com o botão direito do mouse e insere-se a função “Fixed Support”. Na face oposta da barra, repete-se o mesmo processo para se restringir assim os dois lados da barra redonda.

Para se inserir os momentos, seleciona-se a face que está localizada entre a mudança das medidas de diâmetro. Com o botão direito insere-se a função “Moment”. Atribui-se o valor para o momento 1, na célula “Magnitude”, de 3000 N.m. O sentido de rotação desse momento, será anti-horário, Figura 55. Se for preciso modificar a orientação do momento, clica-se na célula “Direction” e escolhe-se o sentido desejado.

Figura 55 – Face onde está aplicado o momento 1 (Ponto A).

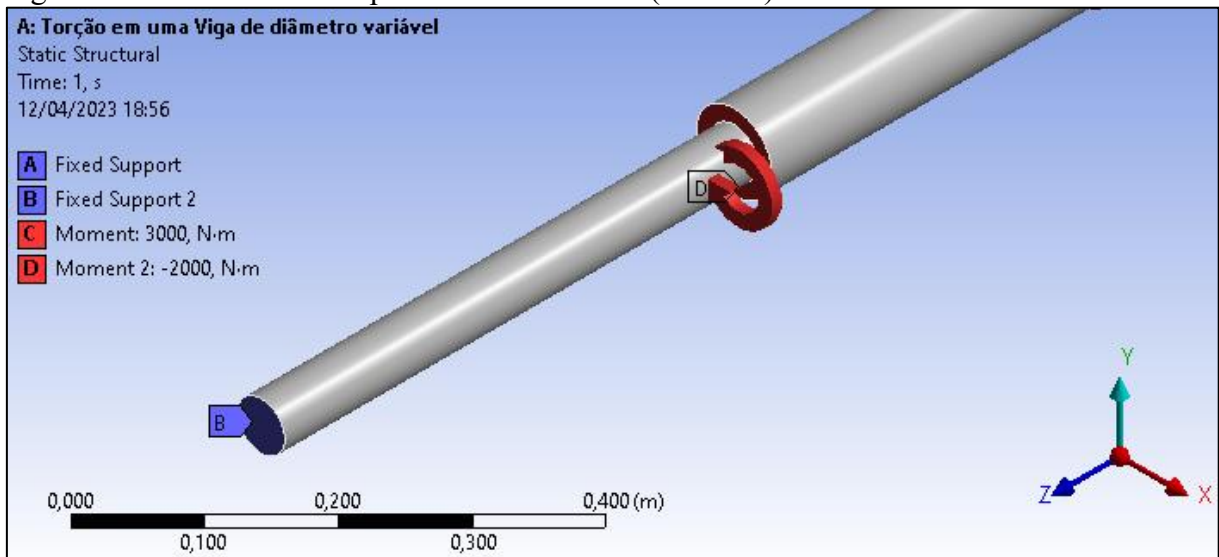


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para o momento 2, repete-se o mesmo processo anterior. Insere-se a função “Moment”, na segunda face entre a mudança do segundo para o terceiro diâmetro.

Atribui-se o valor de 2000 N.m, no sentido horário, como mostra a Figura 56 abaixo.

Figura 56 – Face onde está aplicado o momento 2 (Ponto B).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com as condições de contornos definidas, parte-se para as definições da solução e o que se deseja-se obter com a simulação. Em “Solution” clica-se com o botão direito do mouse e em “Stress” insere-se “Equivalent (Von Mises)”. Repete-se a etapa anterior, mas agora em “Strain” insere-se “Equivalent (Von Mises)”. Com o botão direito em “Probe” insere-se “Moment Reaction”.

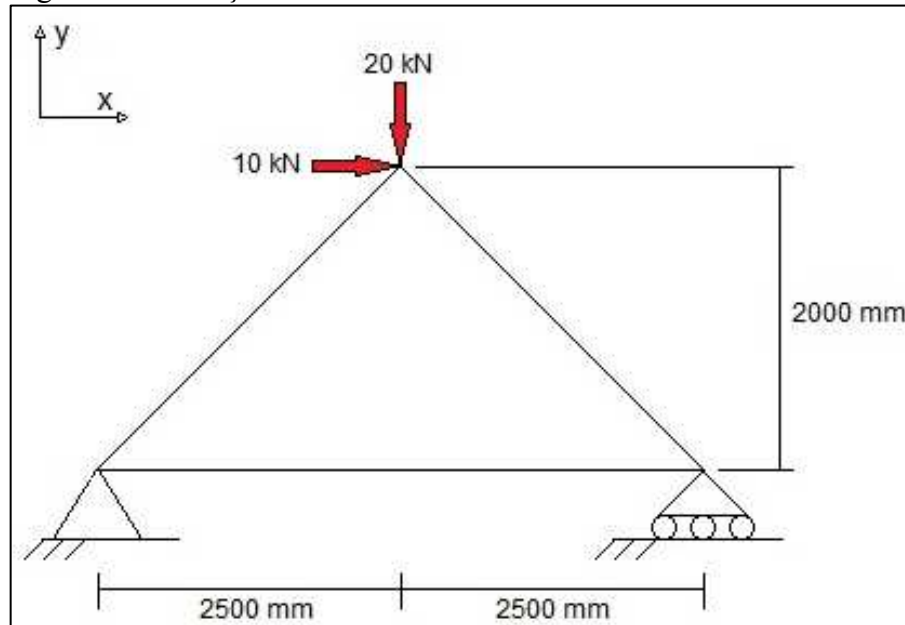
O Ansys já irá pedir que se escolha de onde se deseja obter as informações para a informação da reação de momento. No caso, na célula “Boundary Condition” da aba “Definition”, escolhe-se a opção “Fixed Support”. Com o botão direito em “Moment Reaction”, clica-se em “Duplicate”. Será duplicado a função de reação de momento, porém nessa segunda função escolhe-se a opção “Fixed Support 2” na célula “Boundary Condition”. Em seguida, clica-se em “Solution” e depois clica-se em “Solve”. Os resultados serão discutidos mais adiante, na área de resultados e discussões.

### 5.1.8 Análise de treliça 2D

O próximo caso a ser demonstrado, será a análise, em 2D, de uma treliça. O desenho da treliça é simples, apenas um triângulo com 5 metros de base e 2 metros de altura. O mesmo será fixado no vértice direito por um apoio articulado fixo, do tipo pino liso. Já o vértice esquerdo será fixado por um apoio articulado móvel, do tipo rolamento. Em seu vértice superior, a treliça sofrerá a ação de duas forças simultâneas, Figura 57. A primeira será horizontal, no sentido positivo do eixo ‘x’ e terá valor de 10 kN. A segunda força será na vertical, no sentido

negativo do eixo 'y' e terá valor de 20 kN. A seção transversal da barra que compõe a treliça terá a forma de um retângulo, com 20 milímetros de altura e 50 milímetros de comprimento. O material utilizado terá o módulo de Young no valor de 210 GPa e a razão de Poisson de 0,3.

Figura 57 – Treliça 2D.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com o AnsysWorkbeanch<sup>©</sup> aberto na sua janela inicial, clica-se duas vezes ou arrasta-se a função “Static Structural” para a área de trabalho. Renomeia-se conforme a necessidade, nesse caso foi renomeado como “Análise treliça 2D”. Parte-se então para a criação do material que será utilizado. Em “Engineering Data”, cria-se o novo material e dar-se-á o nome de “Steel”. Clica-se duas vezes em “Isotropic Elasticity”, assim se abrirá uma tabela de informações a serem preenchidas. A primeira informação a ser atribuída será o valor do Módulo de Young, no caso  $210 \times 10^9$  Pa. Em seguida, o valor da razão de Poisson que será 0,3. Retorna-se ao projeto clicando-se na aba “Project”, em sequência clica-se em “Update Project”.

Já em “Geometry” clica-se com o botão direito do mouse, e seleciona-se a opção “Desing Modeler”. Com o software aberto, na aba “Units” seleciona-se a opção milímetros, em seguida seleciona-se o plano ‘x-y’ e clica-se em “Look at face”. Clica-se em “Sketching” e seleciona a função “Polyline”. Clica-se no eixo ‘y’, em sequência leva-se a linha até o sentido negativo do eixo ‘x’, em seguida clica-se na parte positiva do mesmo eixo para ir formando um triângulo. Então, leva-se a linha até o primeiro ponto criado e clica-se com o botão direito do mouse e usa-se a opção “Closed End”. Dessa forma, o esboço do triângulo ficará fechado. A próxima etapa é atribuir as medidas do desenho. Clica-se em “Dimensions” e seleciona o vértice

superior do triângulo e depois a linha que será a base do desenho. Essa será a cota da altura e terá o valor de 2000 milímetros. Em seguida, clica-se na linha base do desenho e atribui-se o valor de 5000 milímetros. A última cota será selecionando um dos vértices inferiores e depois seleciona-se o eixo 'y', dessa forma, ao atribuir o valor de 2500 milímetros o triângulo será centralizado no eixo cartesiano. Clica-se em seguida em "Look at face", assim o zoom do desenho será redimensionado, mostrando assim todo o esboço em tela.

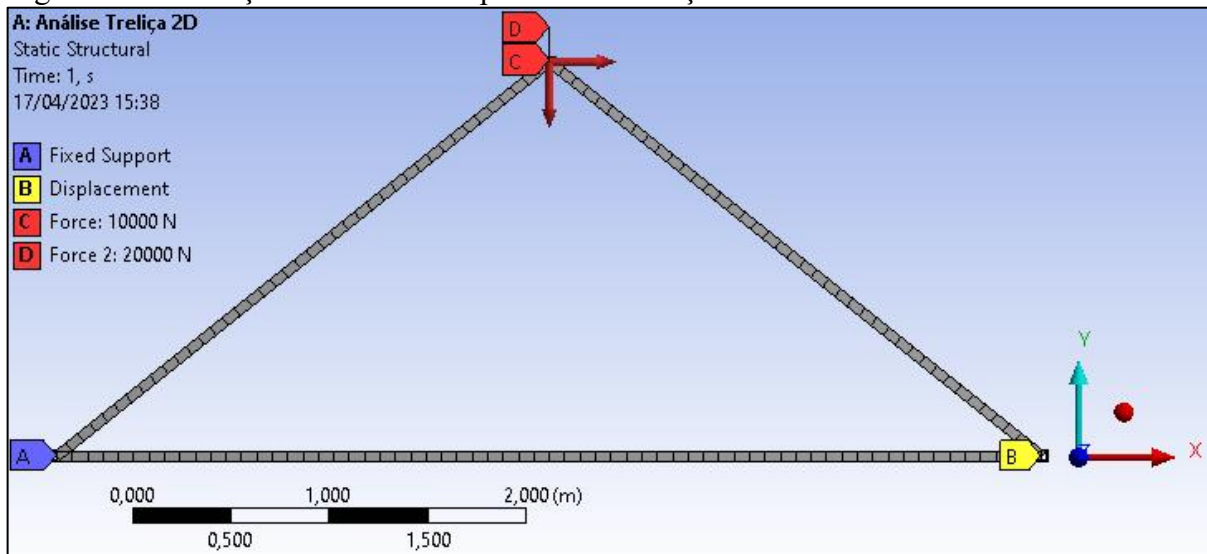
Na aba "Concept" escolhe-se a opção "Lines from Sketches". Em seguida, seleciona-se "Sketch1" e aplica-se usando "Apply". Depois clica-se em "Generate". Dessa forma as linhas foram criadas como um corpo do esboço. Próximo passo é ir em "Concept" novamente, mas dessa vez clica-se em "Cross Section" e escolhe-se "Rectangular". Atribui-se as medidas do perfil retangular nas células 'B' e 'H', com os valores de 50 milímetros e de 20 milímetros respectivamente. Clicando-se em "1 Party, 1 Body", escolhe-se a opção "Line Body". Na célula "Cross Section" seleciona-se a opção de "Rect1". Finaliza-se clicando-se em "Generate". Dessa forma, a geometria está desenhada.

O próximo passo será abrir o "Mechanical". Aguarda-se o carregamento do desenho na área de trabalho. Com a geometria pronta, clica-se em "Geometry" e em seguida em "Line Body". Na tabela de detalhes do desenho, mais precisamente na célula de "Assignment" escolhe-se a opção do material criado, nesse caso o material "Steel".

Em sequência, clica-se em "Mesh" e na aba de "Sizing", na célula de "Relevance Center", seleciona-se a opção "Fine". Assim, a malha terá um maior grau de refinamento. Em seguida, clica-se em "Update". Agora, através da malha pronta, pode-se visualizar a treliça como objeto em 3D.

Como próxima etapa, atribui-se as condições de contorno para a simulação. Escolhe-se a forma de seleção do mouse, clicando-se em "Vertex", em seguida seleciona-se o vértice inferior esquerdo da treliça, clica-se com o botão direito do mouse para inserir uma fixação do tipo "Fixed Support". Seleciona-se o vértice inferior do lado direito e, da mesma forma anterior, insere-se a função "Displacement". Como esse apoio é do tipo rolamento, o mesmo só permite movimento no eixo 'x', por conta disso, coloca-se na célula "Y Component" e na célula "Z Component" a opção "Constant", já que se trata de uma análise 2D da treliça. No vértice superior, após a sua seleção, insere-se duas forças atuantes. Escolhendo a opção de entrada de força por componentes, basta apenas atribuir no eixo 'x' o valor de 10 kN. Os eixos 'y' e 'z' terão valor zero. Inserindo-se uma segunda força no mesmo vértice, atribui-se o valor de -20kN no eixo 'y', Figura 58 abaixo.

Figura 58 – Condições de contorno aplicadas na treliça.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

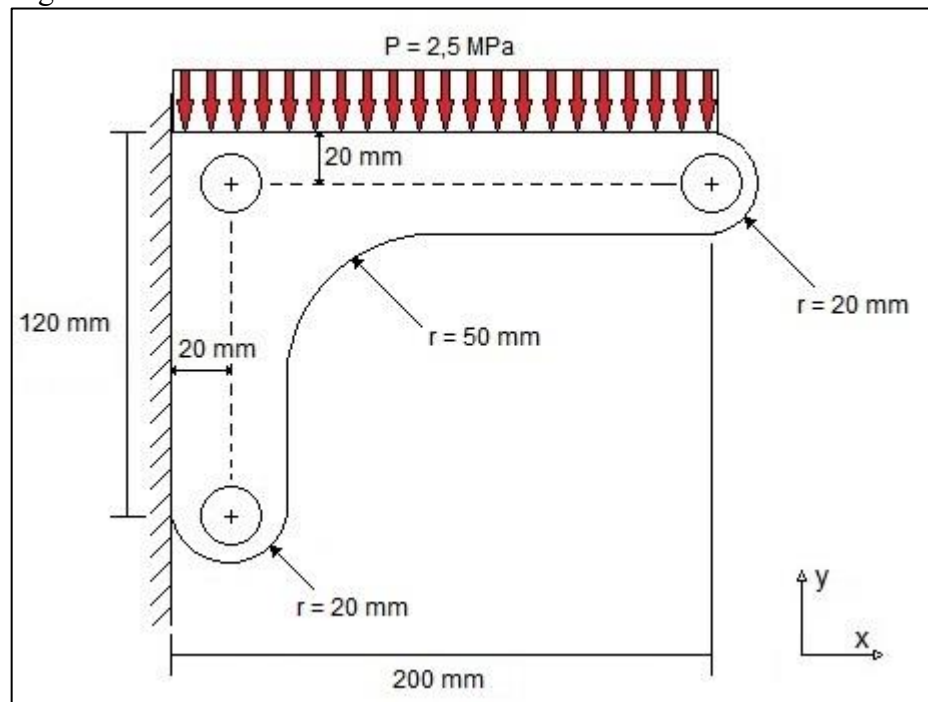
O sinal de menos definirá o sentido negativo de atuação da força nesse eixo. Os eixos 'x' e 'z' terão valores iguais a zero. Na sequência, em "Solution" insere-se com o botão direito do mouse duas deformações direcionais, selecionando "Deformation" e em seguida "Directional". Sendo que na primeira deformação, a célula "Orientation" terá a opção "X Axis". Para a segunda deformação, bastando-se apenas duplicar a primeira, escolhe-se para a orientação da célula "Orientation" a opção "Y Axis". Prosseguindo, insere-se agora a opção "Beam Tool". Ferramenta essa que calcula o "Direct Stress", "Minimum Combined Stress" e "Maximum Combined Stress". Insere-se também a função "Probe" e escolhe-se a opção "Force Reaction". Na célula "Boundary Condition", escolhe-se a opção "Fixed Support". Duplica-se a função "Force Reaction", mas muda-se a opção da célula "Boundary Condition" para "Displacement".

Insere-se outras duas deformações direcionais, sendo dessa vez, apenas para o vértice direito inferior. A orientação dos eixos seguirá a mesma lógica anterior. Com isso, na primeira "Directional Deformation" a célula "Orientation" terá a opção 'x' e na segunda terá a orientação 'y'. Por fim, no vértice superior da treliça, insere-se mais duas deformações direcionais. Como já foi explanado nos outros dois vértices, a primeira função avaliará a deformação na orientação do eixo 'x' e a segunda avaliará a deformação na orientação do eixo 'y'. Encerra-se assim as condições de contorno da simulação. Clica-se em "Solve". Os resultados serão discutidos na próxima seção.

### 5.1.9 Parametrização

O próximo estudo de caso será mais simples, porém demonstrará uma função muito importante no dia-a-dia de uma avaliação e desenvolvimento de um projeto. A função utilizada será a de parametrização. O caso em questão, mostra uma cantoneira de aço que terá tensão de escoamento igual a 250 MPa, Poisson de 0,3 e módulo de Young de 200 GPa. Sua espessura terá 2 milímetros e terá uma restrição de movimento em sua lateral. Nessa peça, existirá três furos de mesmo tamanho, os mesmos estarão com sua distância de centro do furo de 20 milímetros de cada lado da peça. Seus diâmetros não estão definidos, pois será isso que a parametrização irá fornecer. Para que o fator de segurança seja de 2,5, precisa-se descobrir qual o melhor diâmetro dos furos para que essa especificação de projeto seja respeitada. Uma pressão estará atuando na direção negativa do eixo 'y', com o valor de 250 N/cm<sup>2</sup>, Figura 59.

Figura 59 – Cantoneira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao abrir-se o Ansys, escolhe-se a função de “Static Structural” para fazer essa simulação. Em seguida, em “Engineering Data” observa-se que os valores de módulo de Young, de Poisson e de tensão de escoamento informados neste caso, estão iguais aos valores padrão para aço estrutural do Ansys. Assim, sem mudança nos valores e características do material,

prosseguir-se para o desenho. Clicando-se em “Geometry”, abrirá uma aba de propriedades no lado direito da tela do AnsysWorkbench<sup>®</sup>. Em “Analysis Type”, escolhe-se a opção “2D”.

Seguindo-se, com o botão direito do mouse em “Geometry”, escolhe-se abrir o programa de “Design Modeler” para fazer o desenho da peça. Escolhe-se o plano ‘x-y’ e clica-se em “Look at Face”. Clica-se em “Sketching” e escolhe-se a opção “Line”. Clicando-se no centro da origem dos dois eixos, arrasta-se o mouse na horizontal para a direita.

Novamente, clicando-se no centro dos eixos, arrasta-se o mouse na vertical para baixo. Na aba “Dimensions”, escolhe-se a opção “Geral”. Em seguida, clica-se em cada linha criada. Assim, aparecerá células na janela “Details View” com os valores a serem atribuídos para cada linha.

Como na figura acima, Figura 44, a linha horizontal terá 200 milímetros e a linha vertical terá 120 milímetros. Em sequência, na ponta de cada linha cria-se outra linha, a mesma será perpendicular e terá o valor de 20 milímetros. Essas linhas irão indicar o centro de cada furo e também o centro do arco que será desenhado. Na aba “Draw”, escolhe-se a opção “Arc by Center”, em seguida clica-se na ponta da linha que marca o centro, depois arrasta o mouse até encostar na linha horizontal de 200 mm. Clica-se na mesma, assim o raio do arco está escolhido. Depois arrasta o mouse até formar um arco de 180° e clica-se para finalizar. O arco da extremidade direita da peça está criado. Repete-se o mesmo processo para o arco inferior da peça.

Após essas etapas, clica-se em “Line” e clica-se na ponta solta do arco da direita, em seguida arrasta-se a linha para a esquerda até quase encostar na linha vertical da peça. Repete o processo com a ponta do arco inferior e cria-se outra linha até quase encostar na linha horizontal. Na aba “Modify”, escolhe-se a opção “Trim” e clica-se nas linhas criadas, logo depois do encontro entre si. Essa função corta as linhas que se intersectam, deixando apenas o ponto de encontro das mesmas.

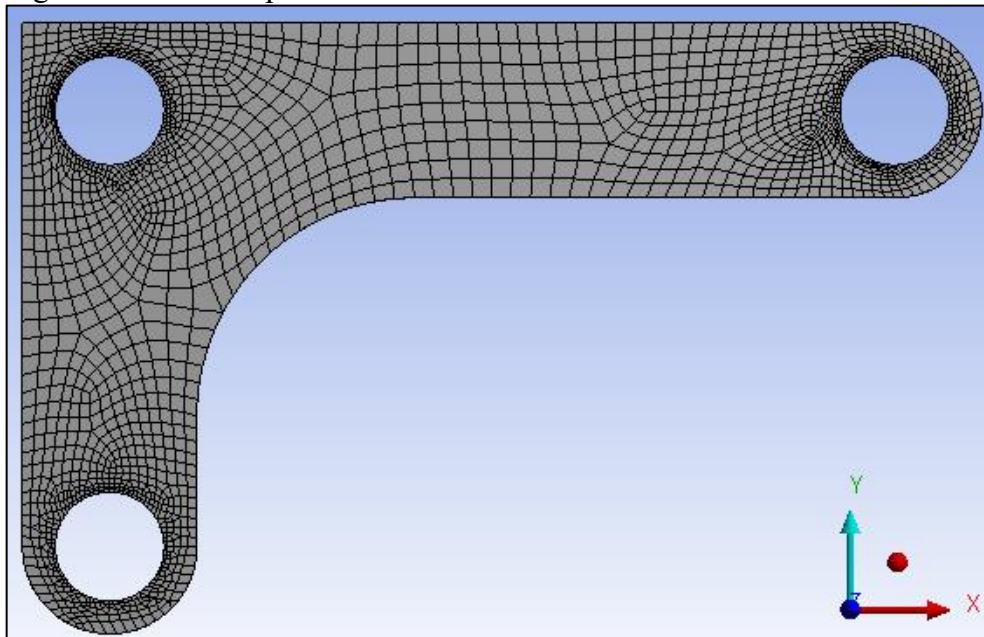
Continuando na mesma aba, escolhe-se a função “Fillet” e atribui-se o valor de 50 milímetros. Clica-se agora nas linhas que se intersectaram. Um arco de raio de 50 mm será criado. Escolhendo-se “Circle” na aba “Draw”, clica-se na ponta das linhas que marcam o centro dos arcos e cria-se as duas circunferências das extremidades da peça. Em sequência, cria-se duas linhas com suas origens no centro de cada furo e arrasta-se as mesmas até se encontrarem no meio da peça. Usando a função “Trim”, corta-se as sobras, criando assim um ponto de encontro das linhas. Esse ponto será o centro da última circunferência. Para efeitos de praticidade e como um ponto de partida, assume-se que as circunferências terão 25 mm de diâmetro. Criando-se o último furo, o esboço em 2D da peça estará pronto. Basta apenas clicar



em “Generate”. Clicando-se em “Concept” e escolhendo a função “Surface from Sketches”, abrirá uma célula que pedirá a escolha de um esboço. Na árvore de ações, escolhe-se o esboço da peça criada denominado “Sketch1”. Clicando-se em “Apply” e em seguida em “Generate” cria-se a superfície da peça desenhada. Fechando-se o “Design Modeler”, abre-se em seguida o “Mechanical” para atribuir-se as condições de contorno da simulação.

Com a peça carregada e pronta para a simulação, atribui-se primeiramente a espessura da chapa. Em “Geometry”, clica-se na aba “Surface Body”. Na célula “Thickness”, atribui-se o valor de 2 milímetros. Em seguida, clica-se com o botão direito do mouse em “Mesh”, e depois em “Generate Mesh”. Uma malha automática será criada. Percebe-se que esta malha está grosseira, sendo assim, com o botão direito em “Mesh” insere-se a função “Refinement”. Na aba de “Geometry” escolhe-se a face a ser refinada pela ferramenta. Depois de aplicada, gera-se outra malha. Com isso, a malha ainda está um pouco grosseira nos furos. Duplica-se a função “Refinement”, mas dessa vez escolhe-se as arestas dos furos como objetivo desse refinamento. Após se gerar a nova malha, percebe-se que a mesma ainda está um pouco grosseira. Clicando-se na função “Refinement”, na aba “Refinement” escolhe-se o grau 2 de refino. Por padrão, essa função usa o grau 1 de refinamento. Fazendo-se isso nas duas funções, gera-se a malha. Chega-se então, a uma boa malha para a simulação, Figura 60 a seguir.

Figura 60 – Malha após o refinamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Prossegue-se para a atribuição das condições de contorno. Em “Static Structural” insere-se a função “Fixed Support”. Seleciona o modo de seleção do mouse para arestas e clica-

se na lateral da peça e aplica-se. Em seguida, insere-se a função “Pressure”. Com o modo de seleção ainda em aresta, clica-se na aresta superior da peça, onde a mesma irá receber uma pressão distribuída. Aplica-se e na célula de “Magnitude” atribui-se o valor de 2,5 MPa.

Na etapa de “Solution”, insere-se a função de deformação total e a função de tensão equivalente de Von Mises. Na barra superior da função “Solution”, clica-se na opção “Tools”, em seguida escolhe-se a função “Stress Tool”. Essa função calcula o fator de segurança mínimo para a simulação. Por fim, clica-se em “Solve”. Com a simulação concluída, parte-se para a parametrização da simulação. Abre-se novamente o “Design Modeler” e clicando-se em “XYPlane” e em sua sub-aba “Sketch1”, nos detalhes do esboço, nas células de dimensões dos furos, seleciona-se os quadrados em branco, ao lado de cada medida. Após a seleção, aparecerá um sinal “D” e a célula ficará na cor cinza, indicando que essa medida está “travada” e que será um parâmetro de design de entrada da peça. Repetindo o processo para os três furos, a tabela ficará assim, Figura 61.

Figura 61 – Os três parâmetros de entrada ‘D’.

| Details View                           |        |
|--|--------|
| + Details of Sketch1                   |        |
| - Dimensions: 8                        |        |
| <input checked="" type="checkbox"/> D6 | 25 mm  |
| <input checked="" type="checkbox"/> D7 | 25 mm  |
| <input checked="" type="checkbox"/> D8 | 25 mm  |
| <input type="checkbox"/> H1            | 200 mm |
| <input type="checkbox"/> L10           | 20 mm  |
| <input type="checkbox"/> L11           | 20 mm  |
| <input type="checkbox"/> L9            | 20 mm  |
| <input type="checkbox"/> V2            | 120 mm |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao fechar o “Design Modeler”, já na área de trabalho do “Workbench”, no caixa de ferramentas do “Static Structural”, nota-se uma seta vermelha chegando da célula “Parameters” indicando que agora a simulação possui um parâmetro de entrada. No caso, são os diâmetros do desenho. Em seguida, abre-se então o “Mechanical”. Clicando-se na função “Stress Tool”, e posteriormente na função de “Safety Factor”. Na aba “Results”, na célula “Minimum”, onde mostra-se o resultado do fator de segurança, seleciona-se a caixinha em branco dessa célula. Aparecerá um “P”, que indicará o parâmetro de saída que estará relacionado com o parâmetro de entrada anteriormente escolhido, Figura 62.

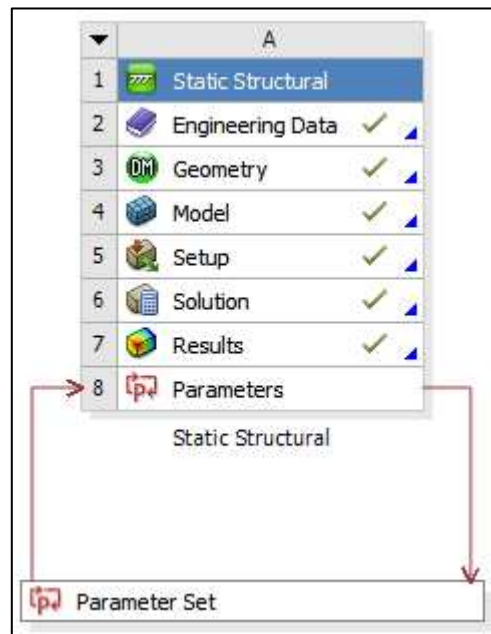
Figura 62 – O parâmetro de saída ‘P’.

| Details of "Safety Factor"    |              |
|-------------------------------|--------------|
| Suppressed                    | No           |
| [-] Integration Point Results |              |
| Display Option                | Averaged     |
| Average Across Bodies         | No           |
| [-] Results                   |              |
| <b>P</b> Minimum              | 1,852        |
| Minimum Occurs On             | Surface Body |
| [+] Information               |              |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Fecha-se o “Mechanical” e volta-se para a página inicial do “Workbench”. Percebe-se que, abaixo da caixa de ferramentas do “Static Strutral”, há uma caixa em vermelho com os dizeres “Parameter Set”. Essa nova caixa possui duas setas indicando que os parâmetros de entrada e os parâmetros de saída foram definidos, fechando assim o ciclo da parametrização, Figura 63.

Figura 63 – Caixa de parametrização com a seta de entrada e de saída.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Clicando-se na caixa “Parameter Set”, abre-se uma nova tela com várias informações organizadas em tabelas. Há também, espaço para que possíveis gráficos sejam plotados. Essas tabelas reúnem todas as configurações necessárias para a parametrização. Na tabela denominada “Outline of all Parameters” está especificado cada variável de entrada e de

saída que fora escolhido anteriormente, como também, seus respectivos valores iniciais calculados na simulação, Figura 64.

Figura 64 – Aba de parâmetros de entrada e saída.

| Outline of All Parameters |                             |                       |                |      |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|------|
|                           | A                           | B                     | C              | D    |
| 1                         | ID                          | Parameter Name        | Value          | Unit |
| 2                         | [-] Input Parameters        |                       |                |      |
| 3                         | [-]  Static Structural (A1) |                       |                |      |
| 4                         | P5                          | D1                    | 25             | mm   |
| 5                         | P6                          | D2                    | 25             | mm   |
| 6                         | P7                          | D3                    | 25             | mm   |
| *                         | New input parameter         | New name              | New expression |      |
| 8                         | [-] Output Parameters       |                       |                |      |
| 9                         | [-]  Static Structural (A1) |                       |                |      |
| 10                        | P4                          | Safety Factor Minimum | 1,852          |      |
| *                         | New output parameter        |                       | New expression |      |
| 12                        | [-] Charts                  |                       |                |      |
| 13                        | Parameter Chart 0           |                       |                |      |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na próxima tabela, denominada de “Table of Design Points”, encontra-se a etapa mais importante do processo de parametrização. Como pode-se ver, nessa tabela, nas colunas, está definido o nome de cada variável e nas linhas os valores das mesmas, Figura 65.

Figura 65 – Aba dos pontos de parametrização.

| Table of Design Points |                |         |         |         |         |                            |
|------------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|----------------------------|
|                        | A              | B       | C       | D       | E       | F                          |
| 1                      | Name           | Upda... | P5 - D1 | P6 - D2 | P7 - D3 | P8 - Safety Factor Minimum |
| 2                      | Units          |         | mm      | mm      | mm      |                            |
| 3                      | DP 0 (Current) | 1       | 25      | 25      | 25      | 1,852                      |
| 4                      | DP 1           | 2       | 24      | 24      | 24      |                            |
| 5                      | DP 2           | 3       | 23      | 23      | 23      |                            |
| 6                      | DP 3           | 4       | 22      | 22      | 22      |                            |
| 7                      | DP 4           | 5       | 21      | 21      | 21      |                            |
| 8                      | DP 5           | 6       | 20      | 20      | 20      |                            |
| 9                      | DP 6           | 7       | 19      | 19      | 19      |                            |
| 10                     | DP 7           | 8       | 18      | 18      | 18      |                            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As variáveis D1, D2 e D3, nas colunas, correspondem aos diâmetros de cada furo da peça que serão testados afim de descobrir o valor ideal final. A variável “Safety Factor Minimum” mostra o resultado do fator de segurança, calculado na simulação. Para atender a demanda imposta pelo projeto, o fator de segurança deve ser de 2,5 para a peça. Percebe-se que usando o valor de 25 milímetros em cada furo, a simulação não retorna um valor satisfatório para o problema. Afim de aumentar o fator de segurança, para cada diâmetro, atribui-se valores menores para cada furo. Isso se dá devido ao próprio formato da cantoneira. Pois ao aumentar o valor do diâmetro, a peça ficará com menos material entre o furo e a parte externa da mesma. Fragilizando a parede da cantoneira. Ao diminuir os furos, aumenta-se o material e consequentemente aumenta-se a resistência da peça. Pois dessa forma haverá um maior reforço na parede da cantoneira.

Os valores dos diâmetros irão decrescer a cada 1 milímetro. Sendo “DP0”, linha 3 da Figura 50, os valores iniciais da simulação, atribui-se então 1mm a menos para os diâmetros de “DP1”. Aparecerá o sinal de raio na coluna do fator de segurança, indicando que aquele valor precisa ser calculado. Clica-se em “Update all design points”, para que esse cálculo seja efetuado. Se o “Mechanical” ou o “Design Modeler” estiver aberto, uma mensagem aparecerá informando que os mesmos precisam ser fechados. Clicando-se em “Ok”, o Ansys irá fechar os programas e dará sequência em fazer os cálculos para o novo resultado de fator de segurança. Se o resultado não satisfizer a exigência do problema, decresce em mais 1mm nos diâmetros. Estes serão os valores de “DP2”. O processo se repete, até que o fator de segurança seja atendido. Como esse processo é automatizado, pode-se atribuir todos os valores de uma só vez, pois essa é uma das grandes vantagens dessa ferramenta e foi dessa forma que a simulação foi executada.

Pode-se também, plotar gráficos com os resultados de cada simulação. Na tabela “Outline of all Parameters”, ao clica-se em qualquer uma das células dos parâmetros, abrirá na caixa “Toolbox”, opções de criação de gráficos. Basta apenas clicar duas vezes em alguma opção, que na tabela “Properties of Outline” aparecerá opções de escolha de valores para cada eixo. Os resultados serão explanados logo mais, no capítulo de resultados e discussões.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vários tipos de problemas das disciplinas de Mecânica dos Sólidos I e II, além de problemas da disciplina de Estática, podem ser resolvidos através do sistema especialista AnsysWorkbench<sup>®</sup>. Através do qual, um profissional em sua área de trabalho poderá obter respostas mais rápidas a problemas variados e também, um aluno de engenharia poderá se familiarizar na prática com o conteúdo estudado.

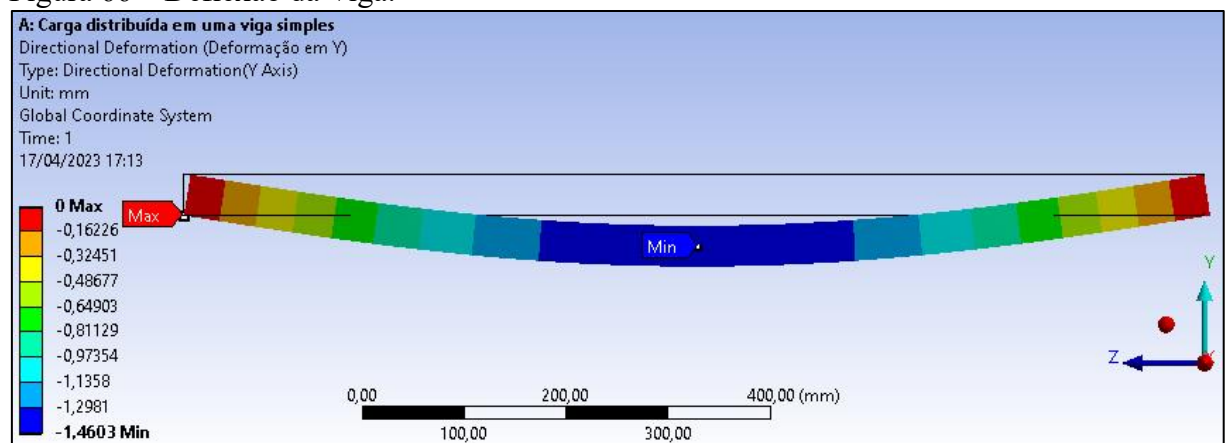
Para efeitos de comparação e discussão dos resultados, foi efetuado uma análise analítica de alguns dos problemas propostos neste trabalho usando os fundamentos da literatura, afim de apontar a eficácia, a acuracidade e a confiabilidade do programa especialista.

### 6.1 Viga biapoiada com carregamento uniformemente distribuído

Para o problema de viga biapoiada com carregamento uniforme, demonstrado no subcapítulo 5.1.1, os resultados obtidos através do Ansys são indicados nas figuras 66 à 74:

A Figura 66 a seguir, denota o valor da máxima deflexão da viga que foi de 1,46 milímetros. Esse valor ocorre no centro da viga como a cor azul demonstra, além da ferramenta de máximo e mínimo estarem marcando os pontos exatos. O resultado aparece com o sinal negativo apenas por que a deflexão ocorreu no sentido negativo do eixo 'y'.

Figura 66 – Deflexão da Viga.



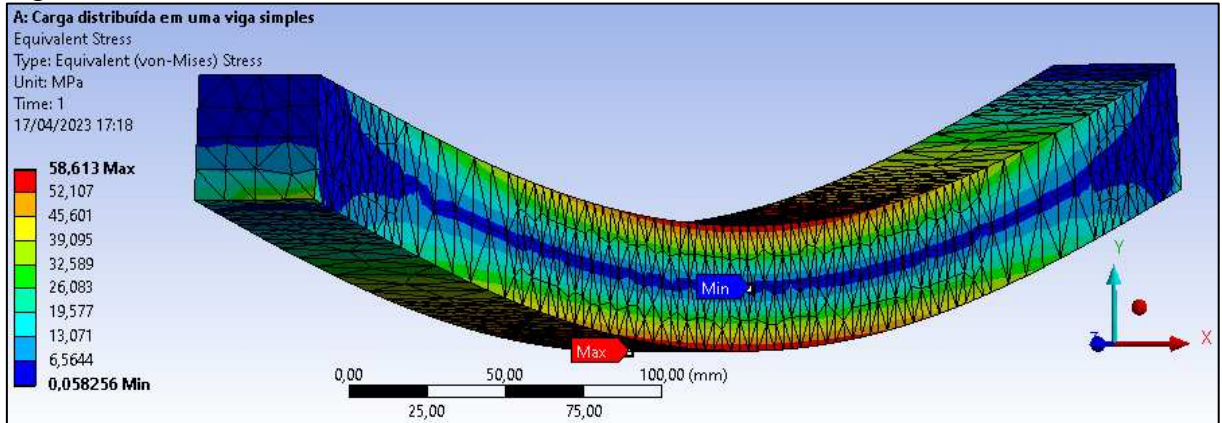
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 67 abaixo mostra o resultado da tensão máxima de Von-Mises sofrida pela viga. O valor máximo atingido foi de 58,61 MPa e está localizado na face inferior da viga, mas especificamente na aresta esquerda. Que por ser um concentrador de tensão geométrico,



sobrecarregou de tensões àquela região. O ponto de mínimo se localiza no interior da viga, no centro da mesma. Além disso, pode-se perceber que as maiores tensões se localizam na face superior e na face inferior como é esperado pela distribuição de tensões de flexão em uma viga.

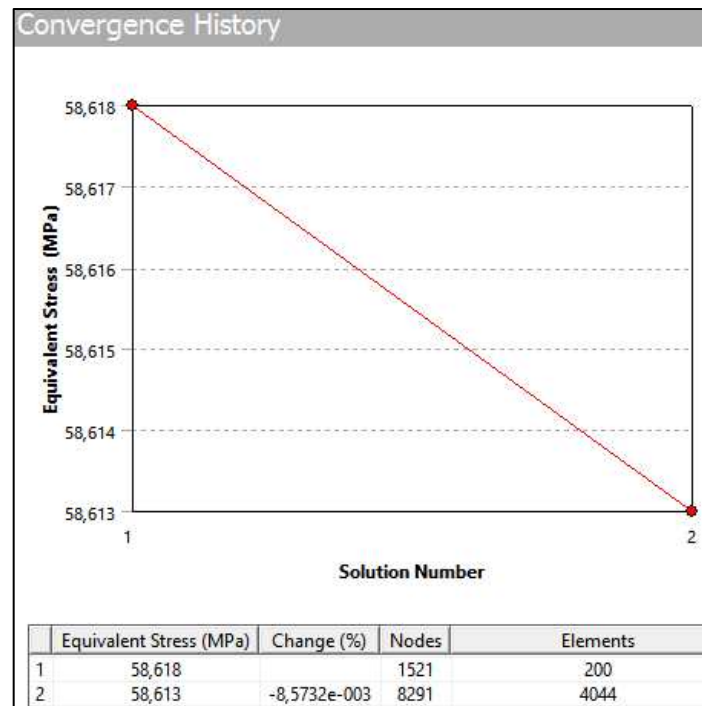
Figura 67 – Tensão de Von-Mises.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 68 abaixo, aponta como a ferramenta de convergência do software funciona.

Figura 68 – Convergência de 1 % dos resultados de tensão de Von-Mises.

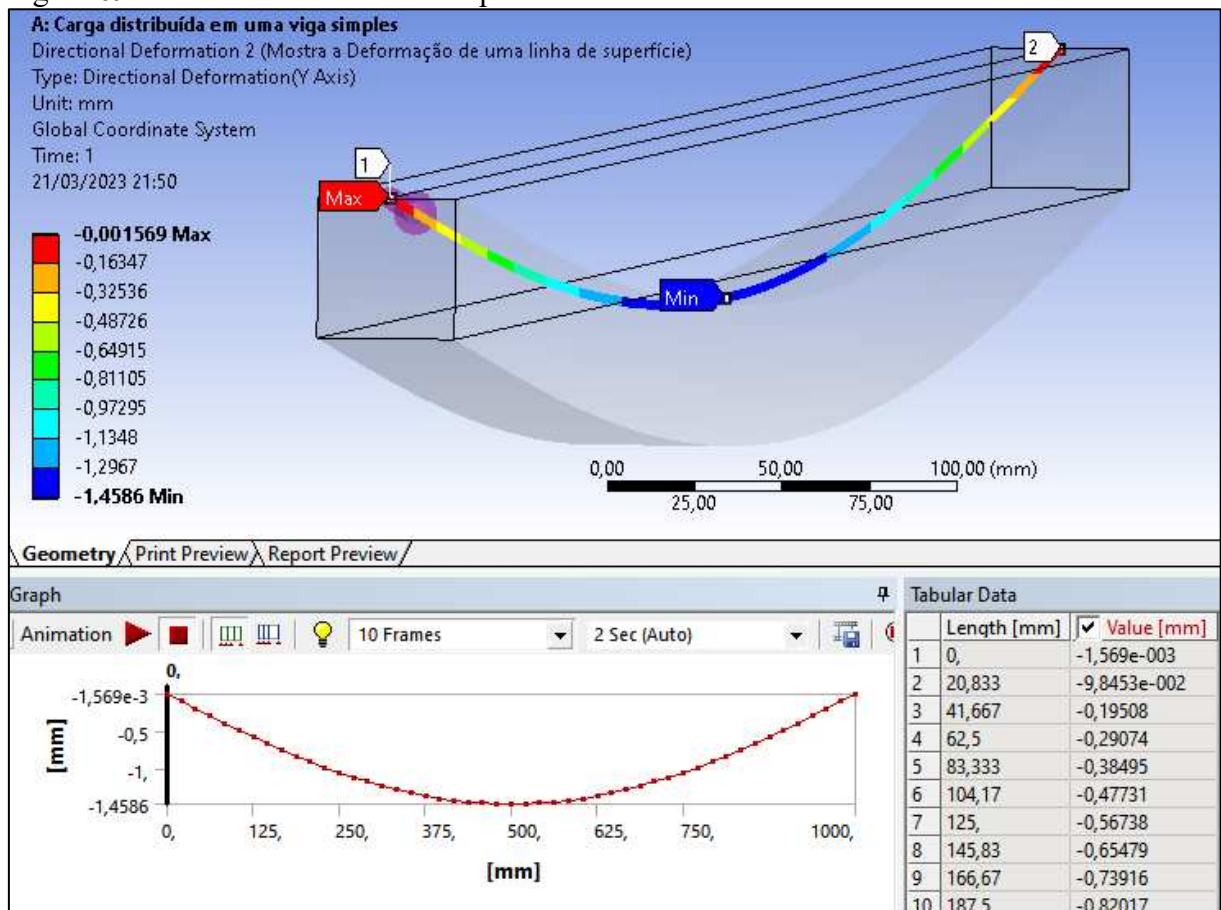


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Percebe-se que o Ansys efetuou um refino de malha, quando há um aumento do número de elementos e do número de nós da mesma. O número de nós e de elementos subiu de 1521 e 200 para 8291 e 4044 respectivamente. Esse refino automático, se dá pois, o software está procurando satisfazer a condição de convergência pré-estabelecida de 1% de diferença entre os valores de respostas calculadas. Como já foi dito no capítulo de metodologia, o programa para de simular quando o resultado respeita essa diferença entre as respostas de cada “loop”.

A Figura 69, tem-se o resultado da deflexão da linha de superfície da viga como sendo o valor máximo de 1,458 milímetros, localizado no centro da mesma. Além disso, tem-se um gráfico plotado da deflexão pelo comprimento da viga. Os valores dos pares ordenados para a construção do gráfico estão na tabela no lado direito inferior.

Figura 69 – Deflexão da Linha de Superfície.



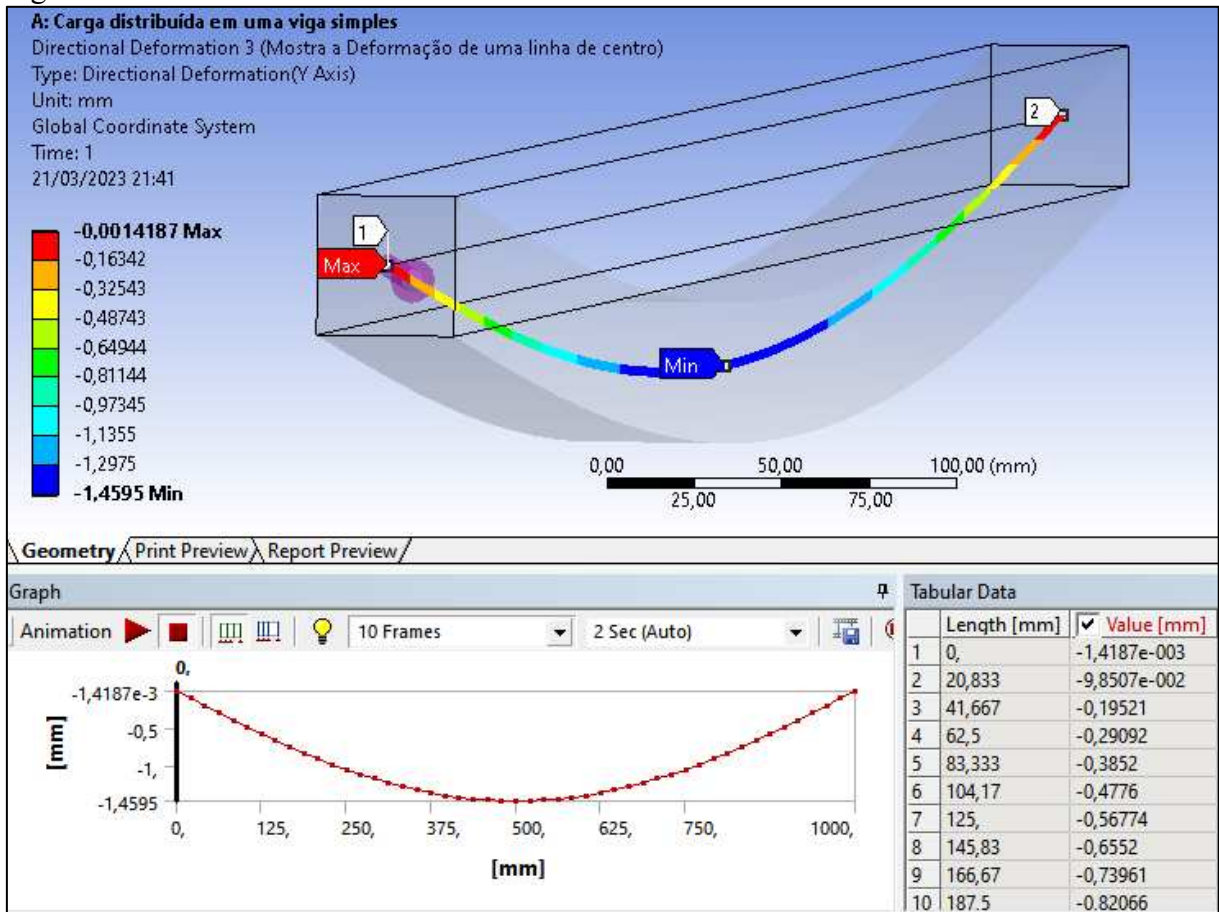
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por razões didáticas também se calculou a deflexão da linha de centro da viga estudada. Os resultados para essa deflexão da linha de centro estão demonstrados, da mesma forma, na Figura 70 a seguir.



A deflexão máxima da linha de centro apresentou o valor de 1,459 milímetros. Avaliando os dois resultados, percebe-se que a linha de superfície e a linha de centro possuem o mesmo padrão de deflexão. O que aponta que a deflexão ocorre de maneira uniforme em uma mesma seção transversal.

Figura 70 – Deflexão da Linha de Centro.

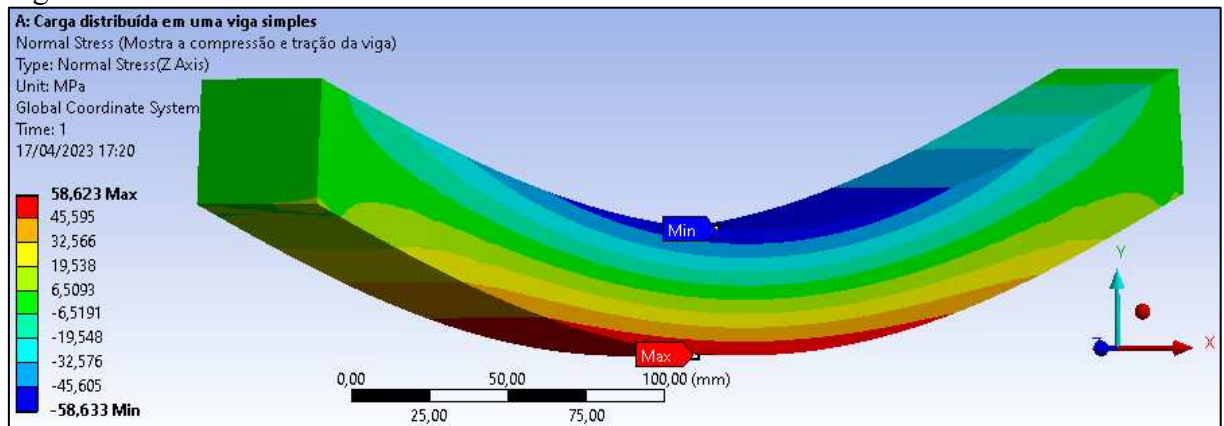


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 71, tem-se os resultados para a tensão normal na viga estudada. Nota-se que os valores de máximo e de mínimo possuem valores com diferenças mínimas, mas com sentidos opostos. Esses resultados nos mostram a compressão e a tração que ocorre na viga sob a ação de uma força normal.

Assim, o resultado de 58,623 MPa refere-se a tração, na face inferior da viga e o resultado de -58,633 MPa refere-se a compressão na parte superior da viga. As linhas de tensão ficam mais evidentes com o recurso de cores, demonstrando a inversão no sentido de ação das mesmas.

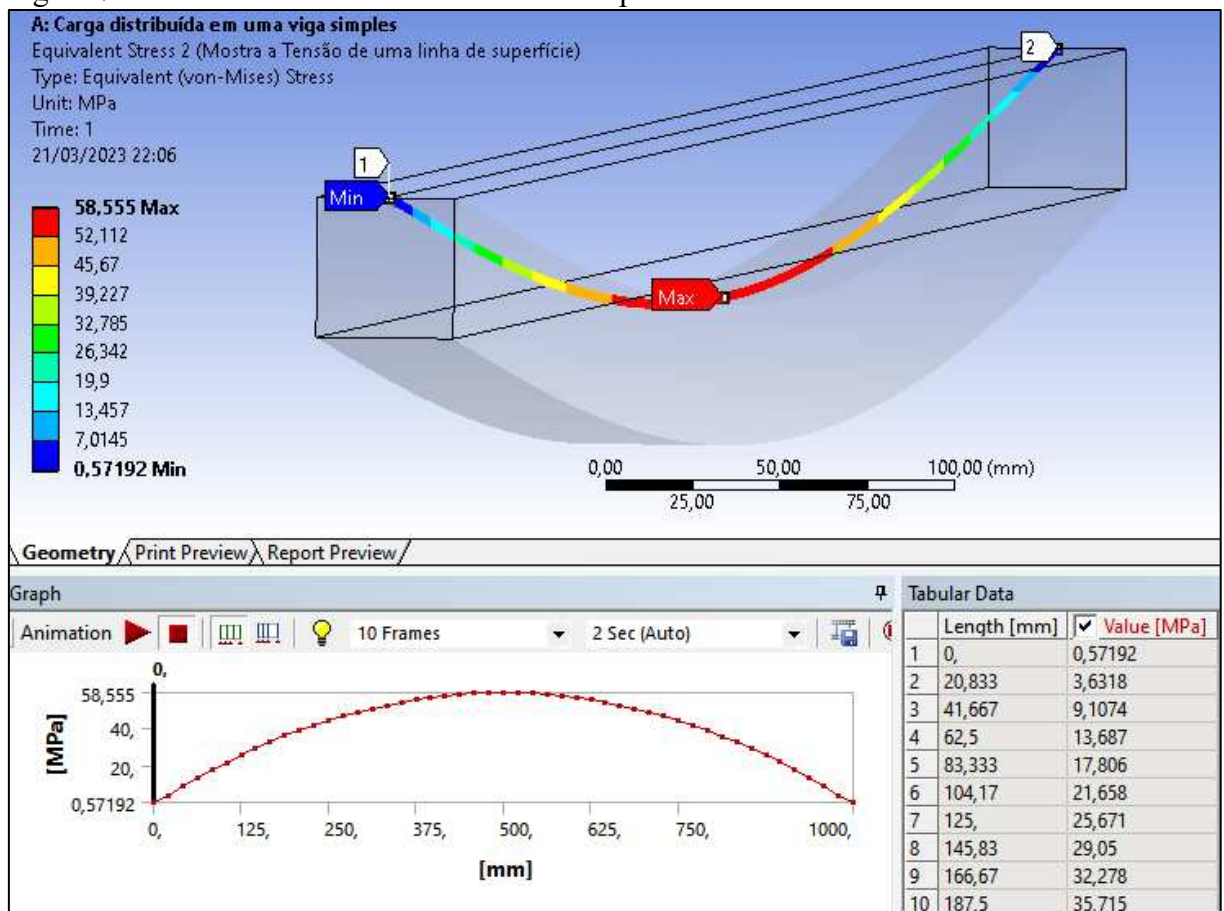
Figura 71 – Tensão normal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Pode-se ver, na Figura 72 abaixo, que a máxima tensão na linha de superfície foi de 58,55 MPa. Com base na teoria de distribuição de tensão em uma viga sob tensão de flexão, as maiores tensões de flexão encontram-se na parte mais externa da viga. Esse resultado só demonstra como isso realmente acontece na prática, além de demonstrar isso visualmente.

Figura 72 – Tensão de Von-Mises na linha de superfície.

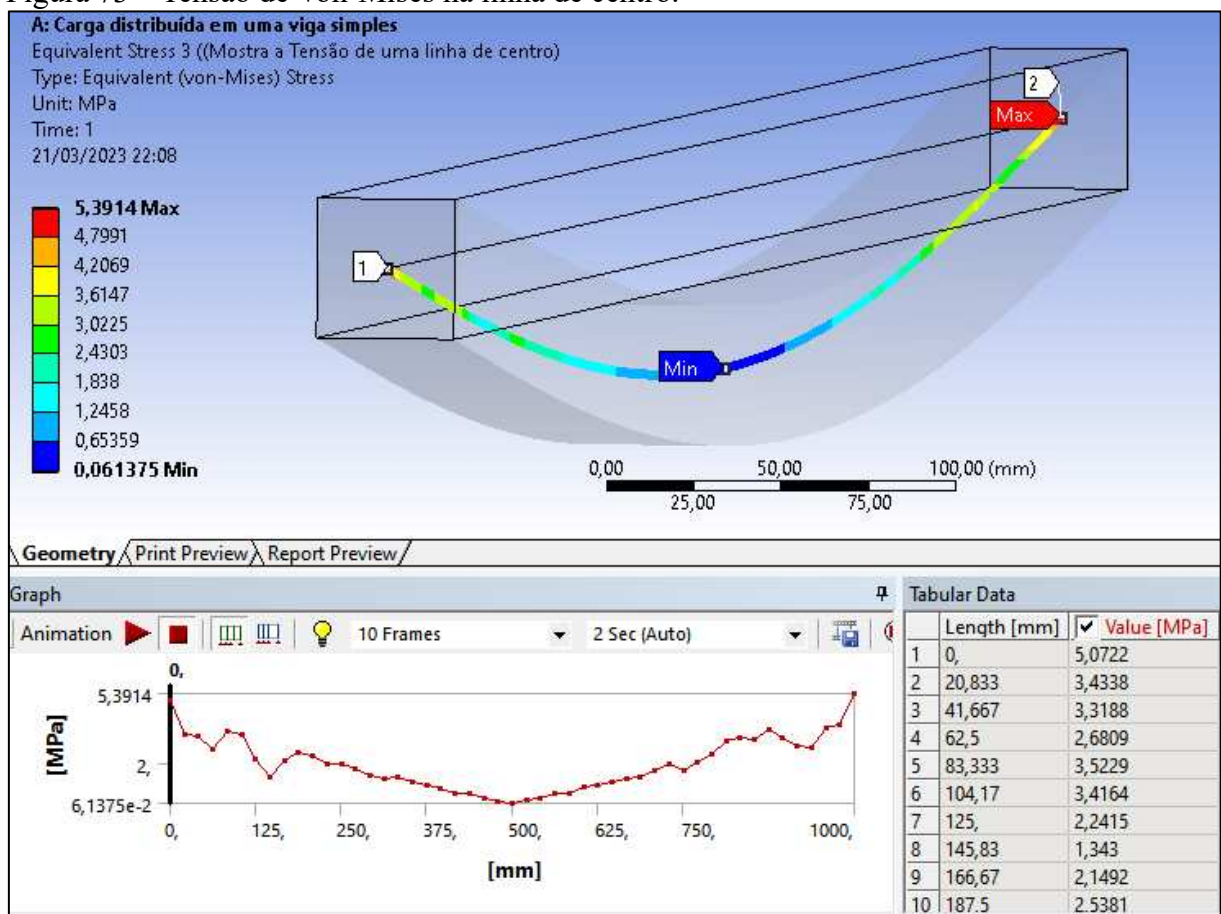


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Percebe-se também que esse valor é inferior a máxima tensão, avaliado-se a viga como o todo, que foi de 58,61 MPa. O que corrobora com o resultado demonstrado e explicado na Figura 67.

O resultado apontado na Figura 73 abaixo, mostra que as tensões de Von-Mises, no centro da viga, são quase zero ou muito baixas comparadas à tensão máxima calculada. O que também confirma a teoria de distribuição de tensões. Sendo a maior tensão, no valor de 5,39 MPa, localizada na extremidade direita da viga.

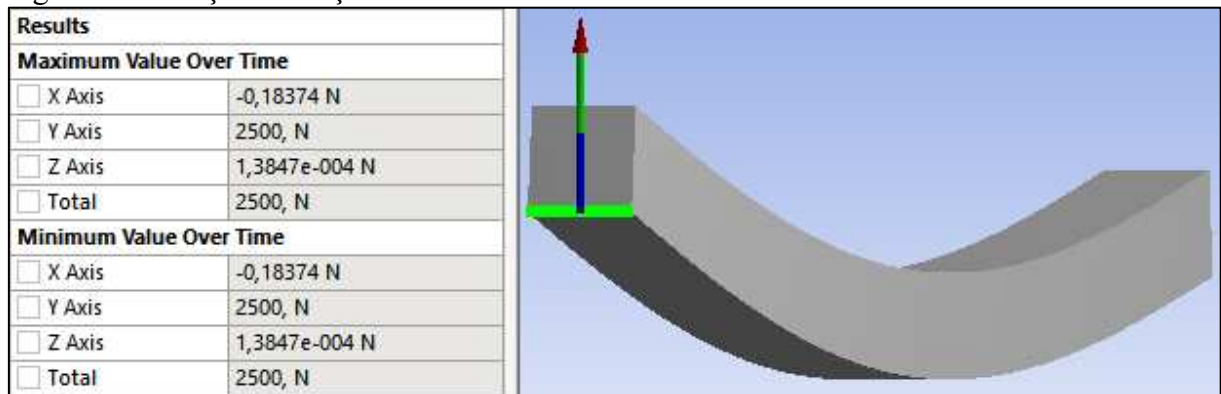
Figura 73 – Tensão de Von-Mises na linha de centro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 74 abaixo, tem-se as forças de reação que agem na viga. O Ansys retorna todos os valores de reação nos três eixos do plano cartesiano, mas o valor mais relevante será o do eixo ‘y’, pois é nesse eixo que a força aplicada age, além de que os outros eixos possuem valores ínfimos e que não irão influenciar no resultado da simulação. A força de reação na viga será de 2500 N. Com isso, pode-se obter a força de cisalhamento máxima, pois o mesmo será igual a força de reação no eixo ‘y’.

Figura 74 – Forças de reação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A seguir os cálculos manuais para a viga com carregamento distribuído:

- Momento de inércia

$$I = 1/12 * b * h^3 \Rightarrow I = 1/12 * a * a^3 \Rightarrow I = 1/12 * a^4$$

$$\Rightarrow I = 1/12 * (40 \text{ mm})^4$$

$$\Rightarrow I = \mathbf{213333,3334 \text{ mm}^4}$$

- Deflexão da viga

$$v_{\text{máx}} = - (5wL^4) / (384EI)$$

$$\Rightarrow v_{\text{máx}} = - (5 * 5 \text{ N/mm} * (1000 \text{ mm})^4) / (384 * 210000 \text{ N/mm}^2 * 213333,3334 \text{ mm}^4)$$

$$\Rightarrow v_{\text{máx}} = - \mathbf{1,4532 \text{ mm}}$$

- Força resultante da distribuição

$$P = w * L = 5 \text{ N/mm} * 1000 \text{ mm} = \mathbf{5000 \text{ N}}$$

- Forças de reação

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \quad R_1 - 5000 + R_2 = 0$$

$$R_1 + R_2 = 5000$$

$$R_1 = 5000 - R_2$$

$$+\zeta \sum M_A = 0 \quad 0 - 5000 * 0,5 + R_2 * 1 = 0$$

$$R_2 = \mathbf{2500 \text{ N}}$$

$$R_1 = 5000 - 2500 = \mathbf{2500 \text{ N}}$$

➤ Momento fletor máximo

$$M_{M\acute{a}x} = w * L^2 / 8 = 5 \text{ N/mm} * (1000\text{mm})^2 / 8$$

$$\Rightarrow M_{M\acute{a}x} = 625000 \text{ N} * \text{mm} = 625 * 10^3 \text{ N} * \text{mm}$$

$$\Rightarrow M_{M\acute{a}x} = \mathbf{625 \text{ N} * \text{m}}$$

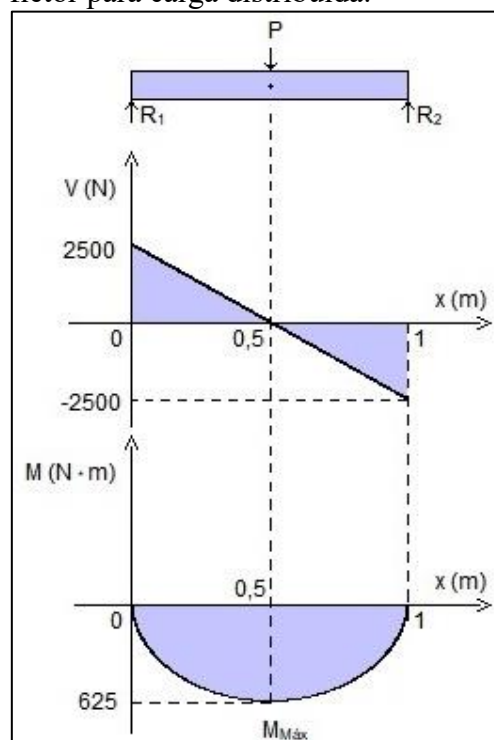
➤ Tensão máxima de flexão

$$\sigma_{M\acute{a}x} = M_{M\acute{a}x} * c / I = (625 * 10^3 \text{ N} * \text{mm}) * 20 \text{ mm} / 213333,3334 \text{ mm}^4$$

$$\Rightarrow \sigma_{M\acute{a}x} = \mathbf{58,5937 \text{ MPa}}$$

Com esses resultados obtidos manualmente, pode-se então construir o gráfico da força cortante e do momento fletor, Gráfico 1 abaixo:

Gráfico 1 – Força cortante e momento fletor para carga distribuída.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



A força cortante terá o comportamento de uma função de primeiro grau, onde sua mudança de sinal estará localizada no ponto de aplicação da força resultante do carregamento distribuído, ou seja, no centro da viga. Assim, a cortante começa com o seu valor máximo em uma extremidade da viga e tende a diminuir quando se aproxima do ponto de aplicação da força, que zera e muda de sentido. Depois volta a crescer se afastando do ponto de aplicação da força, até o seu valor máximo que fica na outra extremidade da viga. Já o gráfico do momento fletor será uma curva do segundo grau, onde seu ponto máximo se localiza também no ponto de aplicação da força resultante. Sendo crescente até o centro da viga e depois decrescente a partir desse ponto. O gráfico do momento foi desenhado com os seus valores positivos para baixo, para assim, ilustrar o comportamento da deflexão da viga.

Ao comparar os resultados obtidos através da resolução pelo Ansys e pela resolução convencional, utilizando as equações dadas pela teoria, percebe-se que os resultados correspondem com ínfimas diferenças. Isso pode se dar, pelos arredondamentos inerentemente usados nas equações. Como o software utiliza o processamento de um computador, o mesmo pode resolver os cálculos utilizando todas as casas decimais possíveis. Inclusive, pode-se obter uma maior precisão de respostas usando o Ansys, tudo irá depender do quão realista é o modelo matemático desenvolvido e o quão refinado a malha será. A seguir reuniu-se os resultados para uma melhor visualização e compreensão, Tabela 5:

Tabela 5 – Resultados obtidos para a viga sob carregamento distribuído.

|  | Resultados     |                |                               |
|--|----------------|----------------|-------------------------------|
|  | Ansys          | Equações       | Razão entre os resultados (%) |
| <b>Deflexão da Viga (mm)*</b>  | <b>-1,4603</b> | <b>-1,4532</b> | <b>1,004885769</b>            |
| <b>Tensão Máxima (MPa)</b>   | <b>58,613</b>  | <b>58,5937</b> | <b>1,000329387</b>            |
| <b>Força de Cisalhamento Máxima (N)</b>  | <b>2500</b>    | <b>2500</b>    | <b>1</b>                      |
| *O sinal negativo indica o sentido da deformação com referência no eixo 'y', ou seja, -↓ e +↑. |                |                |                               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao visualizar os valores da tabela acima, percebe-se que houve uma convergência dos resultados calculados pelo Ansys e os calculados usando as equações vistas na teoria. Os valores obtidos estão dentro de uma margem de 1%. O que corrobora com a convergência imposta na simulação, como foi descrito no subcapítulo 5.1.1.

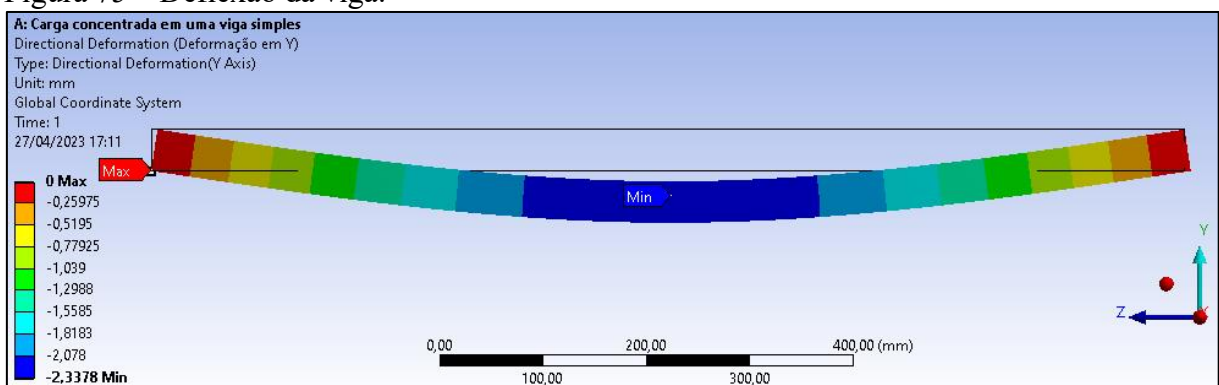
Além dos resultados numéricos, o Ansys retorna vários outros resultados possíveis, entre os mais utilizados estão os gráficos e seus respectivos pontos cartesianos, a visualização

da deformação do desenho que pode ser representado por esquema de cores ou representados por malha. O programa também oferece uma animação simulada dessa mesma deformação e até a geração de um relatório descritivo, contendo todos os dados da simulação. Se mostrando assim, como uma ótima ferramenta visual didática para o entendimento melhor do assunto abordado em sala de aula.

## 6.2 Viga biapoiada com carregamento concentrado

Na Figura 75, tem-se o valor da deflexão total de 2,3378 milímetros, no centro da viga. O sinal negativo é referente ao sentido no qual a viga deformou, que no caso é no sentido negativo do eixo 'y'. Ao comparar com a deflexão da viga anterior, percebe-se que a viga com carga concentrada defletiu mais que a viga com carga distribuída. Foi exatamente 0,8775 milímetros de diferença, apenas modificando o tipo de aplicação da força, já que os outros parâmetros da viga permanecem iguais nos dois casos.

Figura 75 – Deflexão da viga.



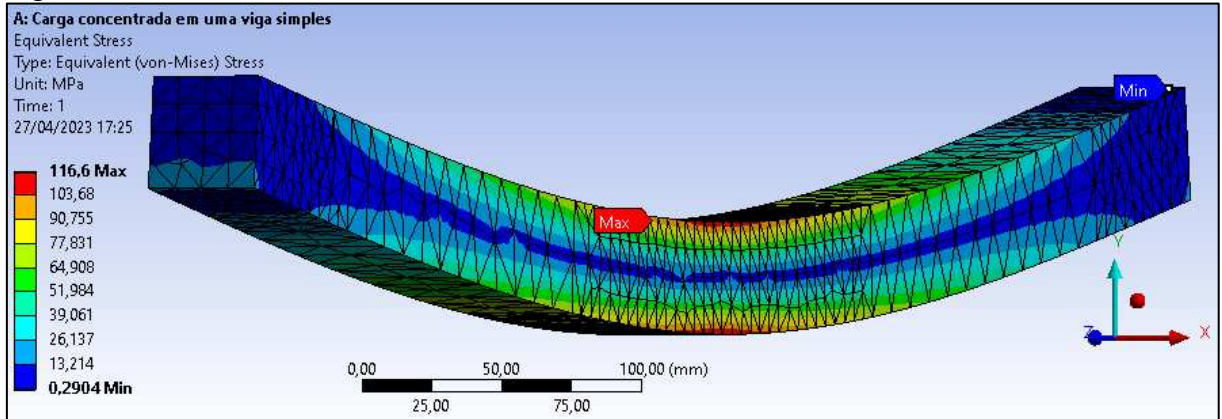
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O valor da tensão equivalente de Von-Mises, na Figura 76, foi de 116,6 MPa. O seu máximo ocorreu na parte superior da viga, muito próximo de onde a força foi aplicada, quase no centro da mesma. Um resultado muito mais expressivo se comparado ao caso anterior, em que a força era distribuída. Para ilustrar melhor essa diferença, subtrai-se os dois valores e a viga com carregamento concentrado possui 57,987 MPa de solicição a mais do que a viga com carregamento distribuído. Quase o dobro do caso anteriormente analisado.

Pode-se observar ainda uma linha neutra percorrendo o centro da viga, corroborando com a teoria de distribuição de tensões na flexão. A mínima tensão sofrida, se localiza no extremo direito, na face superior da viga e teve seu valor de 0,2904 MPa. Com o

resultado de deflexão e de tensão, pode-se confirmar que uma viga sob a ação de uma força concentrada será mais solicitada em comparação a uma viga com as mesmas condições de contorno, mas com uma força distribuída.

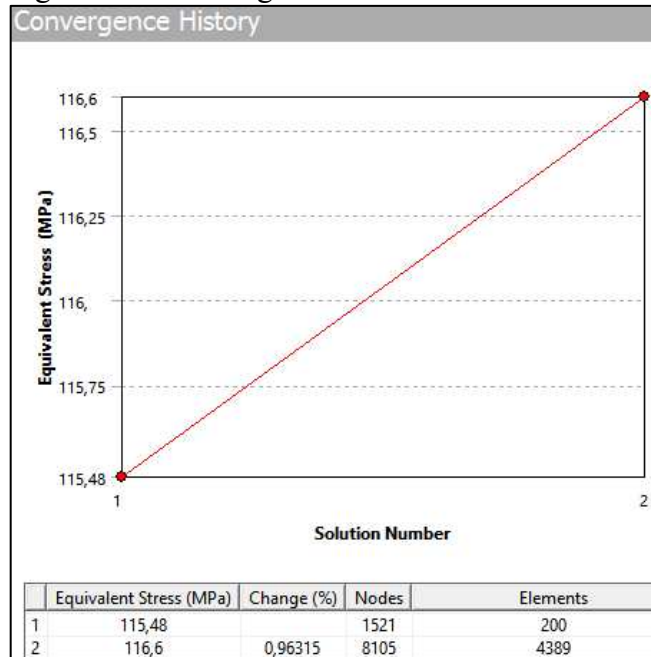
Figura 76 – Tensão de Von-Mises.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 77, a convergência se deu antes dos 3% definido na simulação, mas precisamente no segundo loop. Houve um refino de 1521 nós e 200 elementos no primeiro loop, para 8105 nós e 4389 elementos no segundo loop. O que mudou o resultado de 115,48 MPa para 116,6 MPa, obtendo-se assim, uma convergência de 0,9631%.

Figura 77 – Convergência.

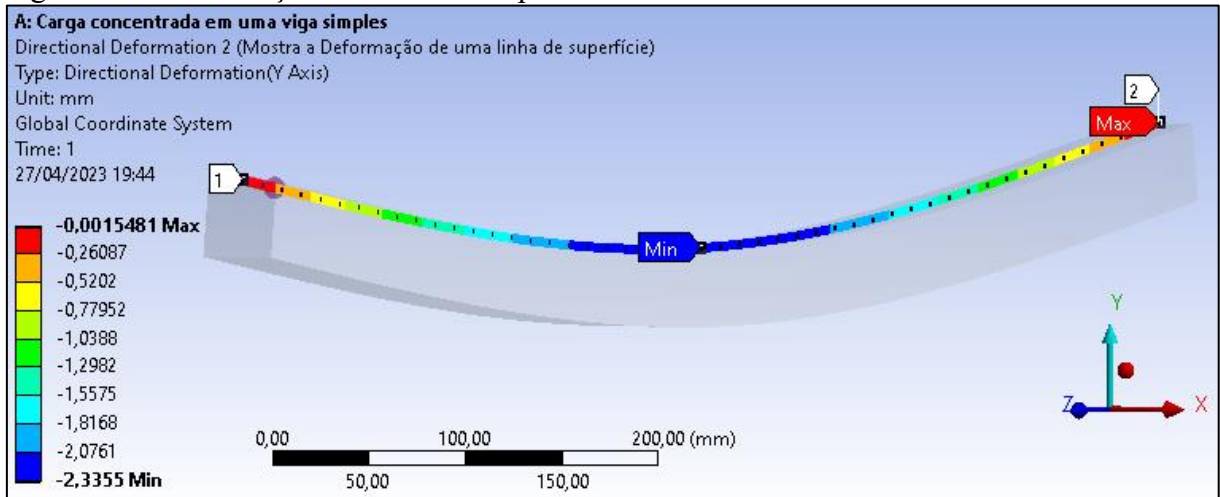


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



Na Figura 78 abaixo, tem-se o resultado da deformação da linha de superfície da viga, que foi de 2,3355 milímetros como o valor máximo. Como já fora explicado, sinal negativo indica apenas o sentido de ação da deformação.

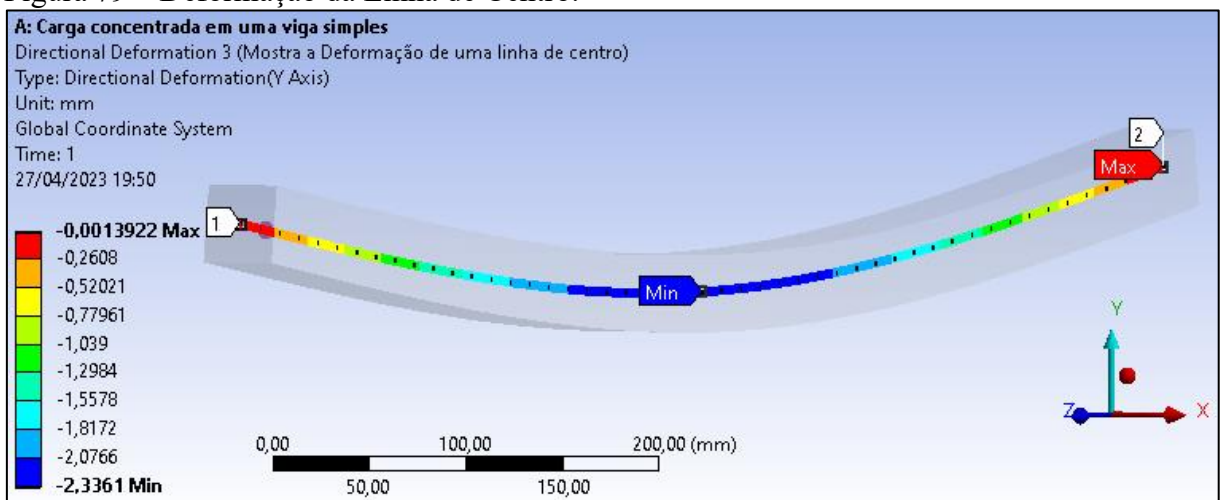
Figura 78 – Deformação da Linha de Superfície.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 79 a seguir, tem-se a resposta da deformação de uma linha de centro da viga. O resultado foi de 2,3361 milímetros. Percebe-se que as respostas de deformação das linhas de superfície e de centro seguem os mesmos valores. Apenas nota-se uma pequena variação que pode ser desconsiderada na prática.

Figura 79 – Deformação da Linha de Centro.

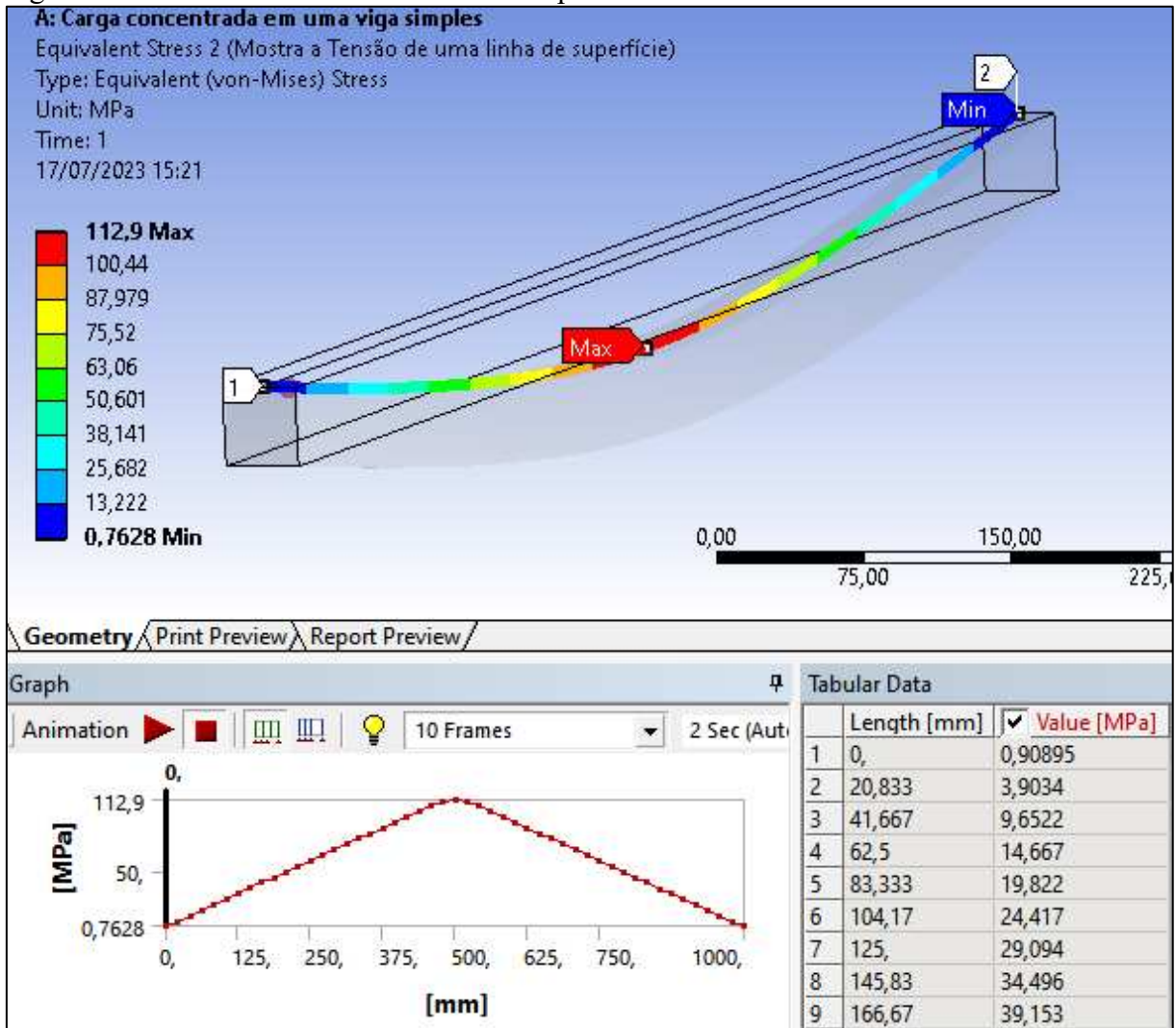


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 80, tem-se os resultados da tensão de Von-Mises para a linha de superfície e também um gráfico plotado com todos os pontos dessa mesma linha. O gráfico apresenta uma

crecente da tensão até o centro da viga, onde a mesma recebe a força aplicada. Logo depois desse ponto, inicia-se uma decrescente de tensão. Esse resultado demonstra também, que a tensão máxima da linha de superfície, que foi de 112,9 MPa, obteve uma diferença em relação a tensão máxima da viga apontado na Figura 76, no valor de 116,6 MPa.

Figura 80 – Tensão de Von-Mises na linha superfície.



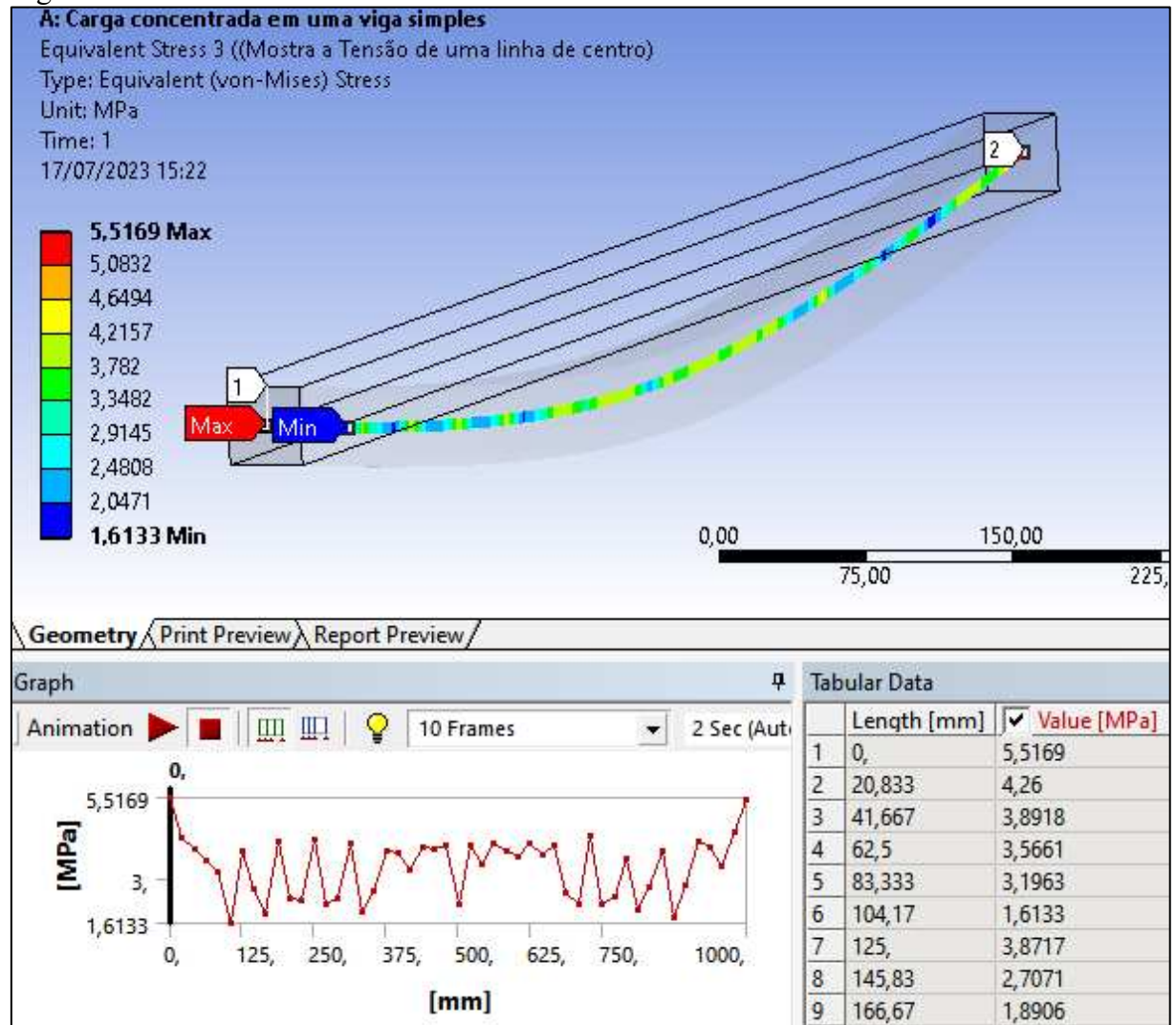
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como na simulação, a força foi aplicada em uma pequena reta transversal da viga, o ponto máximo total deve estar localizado próximo a mesma reta, já na Figura 80 acima, a linha de superfície capturou somente um desses pontos da transversal, pois a mesma passa na perpendicular da linha de onde foi aplicado a força.

No resultado da Figura 81, percebe-se que a tensão tem um comportamento quase linear no centro da viga, apenas apresentando pequenas variações.

A tensão de Von-Mises varia entre 1,6133 MPa à 5,5169 MPa no decorrer do comprimento da viga. Em comparação a maior tensão, esses valores são próximos de zero, seguindo a teoria de distribuição de tensões.

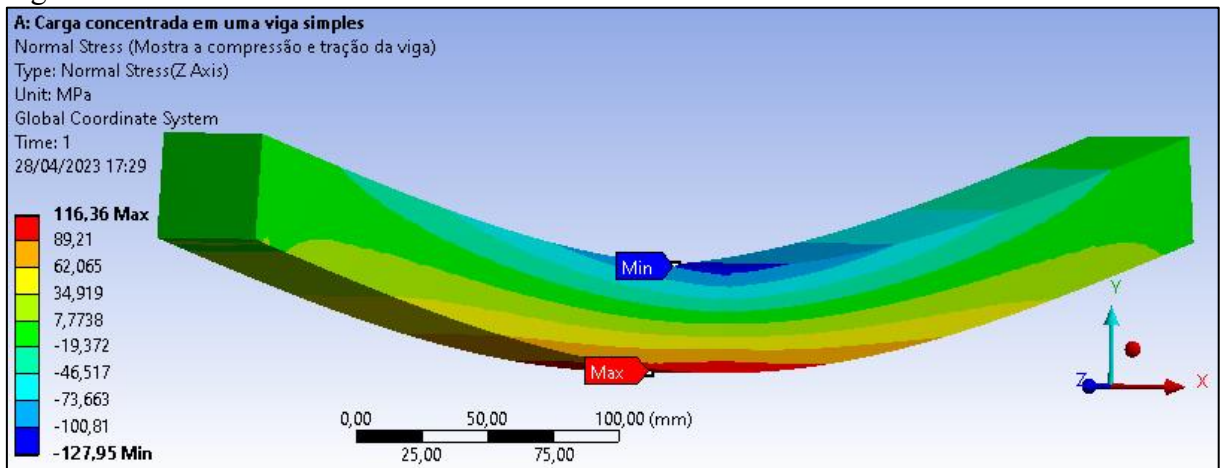
Figura 81 – Tensão de Von-Mises na linha de centro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No resultado da tensão normal, Figura 82, nota-se dois valores de tensões. A tensão que age na superfície superior tem o valor igual a -127,95 MPa e possui um número negativo indicando que ali ocorre uma compressão na viga. Já a tensão que age na superfície inferior no valor de 116,36 MPa, é um número positivo, indicando assim, que ocorre uma tração nessa região da viga. O valor absoluto da tensão de compressão é maior do que da tensão de tração, assim afirma-se que essa viga está sofrendo mais compressão do que tração.

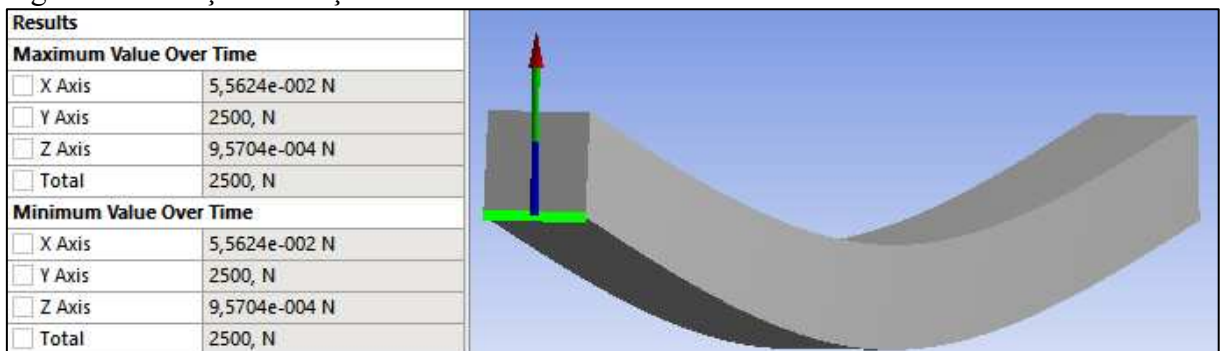
Figura 82 – Tensão Normal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 83 abaixo, demonstra o resultado das forças de reação nas extremidades da viga, o que também indica o resultado da força de cisalhamento que age na mesma. Já que esse caso se trata de uma viga biapoada com carregamento no centro, utilizando-se das equações de equilíbrio, a força de cisalhamento máxima poderá ser encontrada e será igual a força de reação máxima.

Figura 83 – Forças de reação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A seguir os cálculos manuais para a viga com carregamento concentrado:

➤ Momento de inércia

$$\begin{aligned}
 I &= 1/12 * b * h^3 \Rightarrow I = 1/12 * a * a^3 \Rightarrow I = 1/12 * a^4 \\
 &\Rightarrow I = 1/12 * (40 \text{ mm})^4 \\
 &\Rightarrow I = \mathbf{213333,3334 \text{ mm}^4}
 \end{aligned}$$

➤ Deflexão da viga

$$v_{\text{máx}} = - (P * L^3) / (48 * E * I)$$

$$\Rightarrow v_{\text{máx}} = - (5000 \text{ N} * (1000 \text{ mm})^3) / (48 * 210000 \text{ N/mm}^2 * 213333,3334 \text{ mm}^4)$$

$$\Rightarrow v_{\text{máx}} = - \mathbf{2,3251 \text{ mm}}$$

➤ Forças de reação

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \quad R_1 - 5000 + R_2 = 0$$

$$R_1 + R_2 = 5000$$

$$R_1 = 5000 - R_2$$
  

$$+\curvearrowright \sum M_A = 0 \quad 0 - 5000 * 0,5 + R_2 * 1 = 0$$

$$R_2 = \mathbf{2500 \text{ N}}$$

$$R_1 = 5000 - 2500 = \mathbf{2500 \text{ N}}$$

➤ Momento fletor máximo

$$M_{\text{Máx}} = P * L / 4 = 5000 \text{ N} * 1000\text{mm} / 4$$

$$\Rightarrow M_{\text{Máx}} = 1250000 \text{ N} * \text{mm}$$

$$\Rightarrow M_{\text{Máx}} = \mathbf{1250 \text{ N} * \text{m}}$$

➤ Tensão máxima de flexão

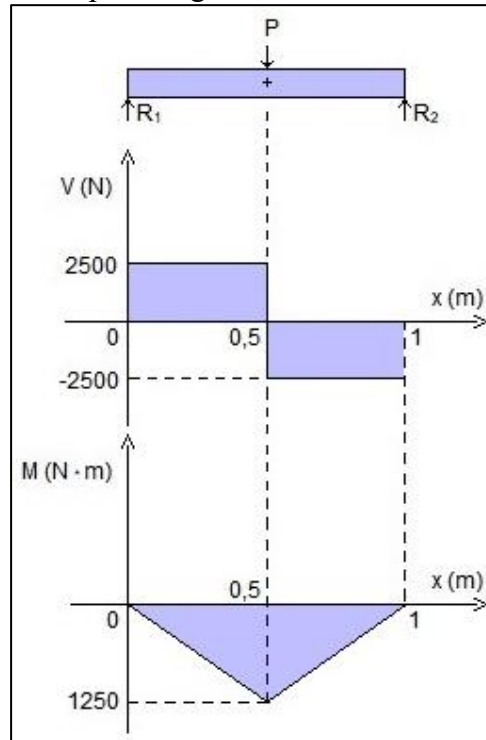
$$\sigma_{\text{Máx}} = M_{\text{Máx}} * c / I = (1250 * 10^3 \text{ N} * \text{mm}) * 20 \text{ mm} / 213333,3334 \text{ mm}^4$$

$$\Rightarrow \sigma_{\text{Máx}} = \mathbf{117,1874 \text{ MPa}}$$

Com os valores obtidos acima, constrói-se o gráfico da força cortante e do momento fletor, Gráfico 2 abaixo. Percebe-se que o comportamento da força cortante não será mais linear. Será uma constante até onde ocorre o seu momento de virada, localizado no ponto de aplicação da força. A partir desse ponto a força inverte a sua orientação, mas segue-se constante até o final da viga. O momento fletor será descrito como uma função de primeiro grau, onde seu ponto de

maior valor será no centro da viga. O gráfico do momento foi desenhado sendo positivo para baixo, para representar a deflexão da viga para baixo.

Gráfico 2 – Força cortante e momento fletor para carga concentrada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A seguir reuniu-se os resultados para uma melhor visualização e compreensão,

Tabela 6:

Tabela 6 – Resultados obtidos para a viga sob carregamento concentrado.

|  | Resultados |                |
|--|------------|----------------|
|  | Ansys      | Cálculo Manual |
| Deflexão da Viga (mm)*   | -2,3378    | -2,3251        |
| Tensão Máxima (MPa)  | 116,6      | 117,1874       |
| Força de Cisalhamento Máxima (N)   | 2500       | 2500           |
| *O sinal negativo indica o sentido da deformação com referência no eixo 'y', ou seja, -↓ e +↑. |            |                |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Percebe-se que os resultados do Ansys são, novamente, próximos aos feitos manualmente. Como já foi comentado, deve-se aos arredondamentos feitos pelas equações.



Pode-se refinar mais a malha para que os resultados se aproximem ainda mais. Retirando a função de convergência e diminuindo o tamanho do elemento da malha que era de 20 milímetros, para 10 milímetros os resultados seguem na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Resultados obtidos para a viga refinada, com elemento de malha de 10 mm.

|  | Resultados com a malha mais refinada |                |                               |
|--|--------------------------------------|----------------|-------------------------------|
|  | Ansys                                | Cálculo Manual | Razão entre os resultados (%) |
| Deflexão da Viga (mm)*   | -2,3383                              | -2,3251        | 1,005677175                   |
| Tensão Máxima (MPa)  | 117,26                               | 117,1874       | 1,000619521                   |
| Força de Cisalhamento Máxima (N)   | 2500                                 | 2500           | 1                             |
| *O sinal negativo indica o sentido da deformação com referência no eixo 'y', ou seja, -↓ e +↑. |                                      |                |                               |

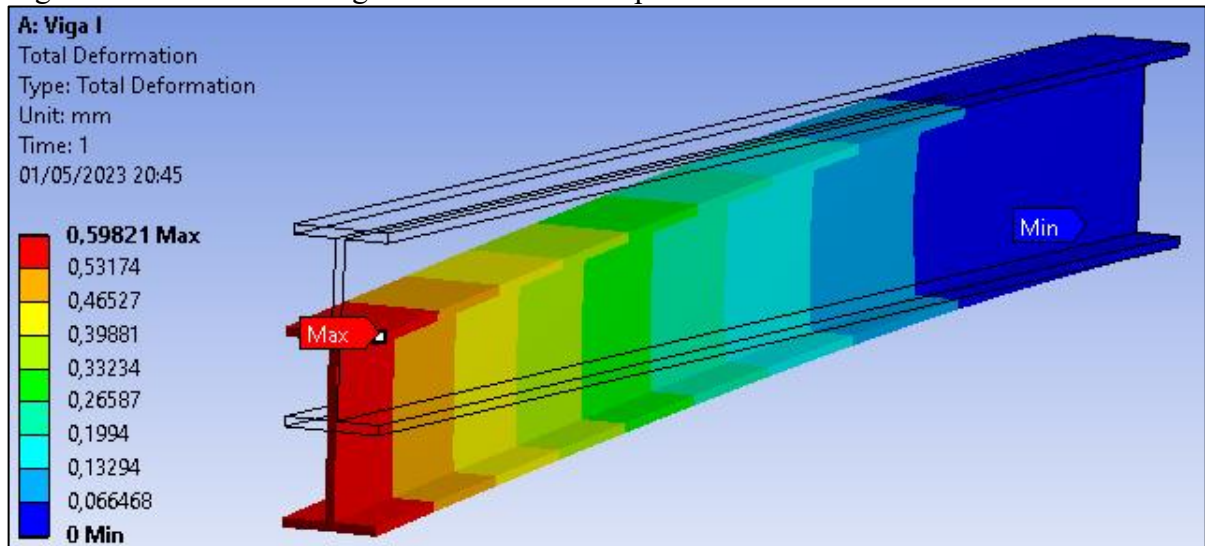
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 6.3 Viga I engastada sofrendo força concentrada

O subcapítulo 5.1.3 trata-se de dois possíveis resultados, a diferença entre eles está apenas na mudança de refinamento de malha na simulação.

Para a Figura 84, a resposta da simulação para a deflexão máxima na viga foi de 0,59821 milímetros. A deflexão mínima ocorreu onde a viga está fixada, simulando um engaste, e assim a sua deformação foi de zero milímetros. Esse resultado refere-se à simulação com a malha padrão do software.

Figura 84 – Deflexão da viga utilizando a malha padrão do software.

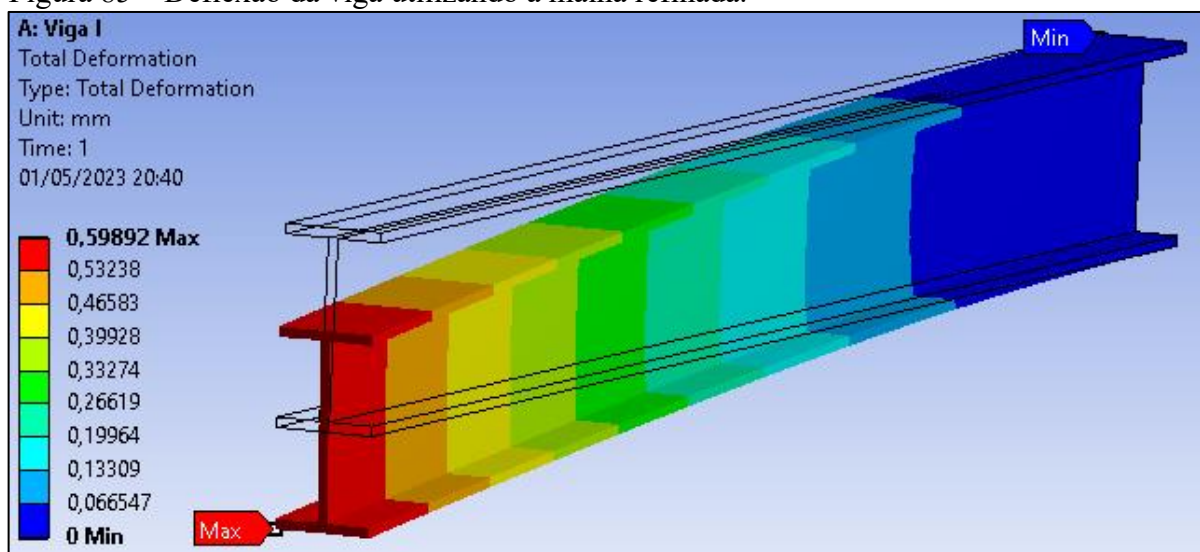


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para a Figura 85, tem-se o valor da deflexão para a mesma viga, mudando-se apenas o refino da malha, com a aplicação de “Face Meshing” na face onde a viga foi fixada, além do uso da função “Sizing” fixando o tamanho de elemento para 5 mm. Dessa forma, a deflexão máxima foi igual a 0,59892 milímetros e a deflexão mínima foi de zero milímetros, na face de onde a viga está fixada. Nos dois resultados, percebe-se que a deformação da viga foi muito pequena. Além disso, a diferença entre as respostas se mostrou pequena, com variação apenas a partir da quarta casa decimal.

Para essa solução de deformação da viga, o refino não se mostrou um fator relevante na mudança de opção, com relação ao resultado obtido da simulação. Apenas demonstrou que a malha padrão do Ansys retornou um valor muito realístico, para esse quesito estudado. Nas duas imagens, nota-se que a viga se mantém estática no seu primeiro terço de comprimento, a partir daí, ocorre o início de sua deflexão com o seu máximo na ponta onde ocorreu a aplicação da força. Vale observar que os valores dos resultados de máximo e mínimo sofreram mudança em sua posição final.

Figura 85 – Deflexão da viga utilizando a malha refinada.

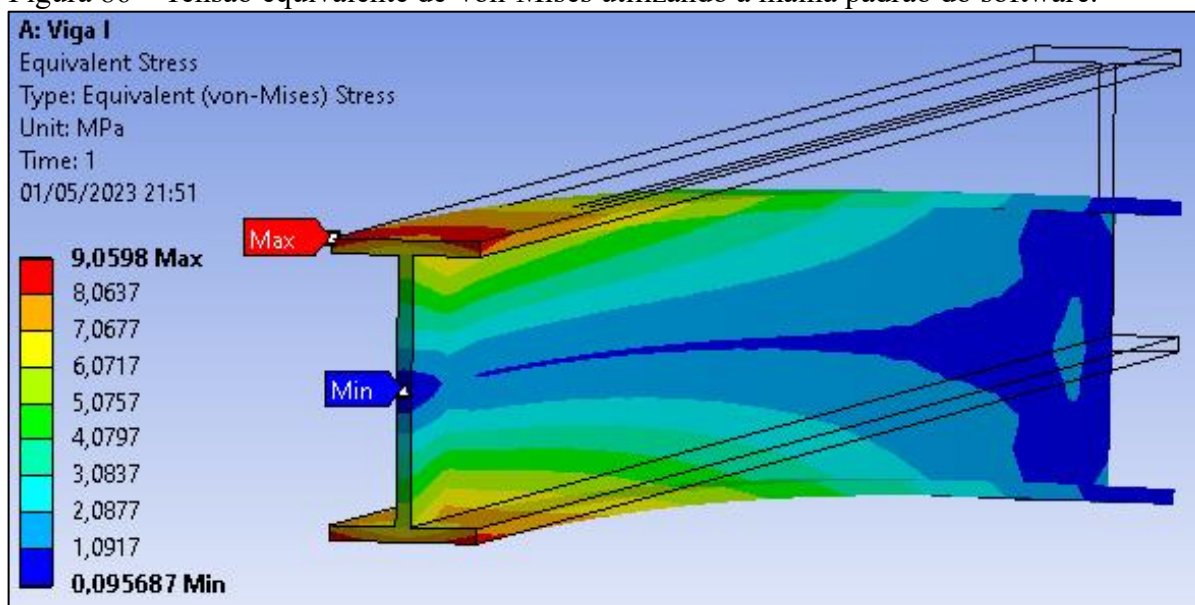


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 86 tem-se o resultado para a tensão equivalente de Von-Mises na viga com a malha padrão do Ansys. O valor da tensão máxima foi de 9,0598 MPa e ficou localizado na aresta superior da viga, no lado em que a mesma está fixada. Já o valor mínimo foi de 0,095687 MPa e se encontra no mesmo lado da tensão máxima, porém localizada no centro da alma da viga.



Figura 86 – Tensão equivalente de Von-Mises utilizando a malha padrão do software.

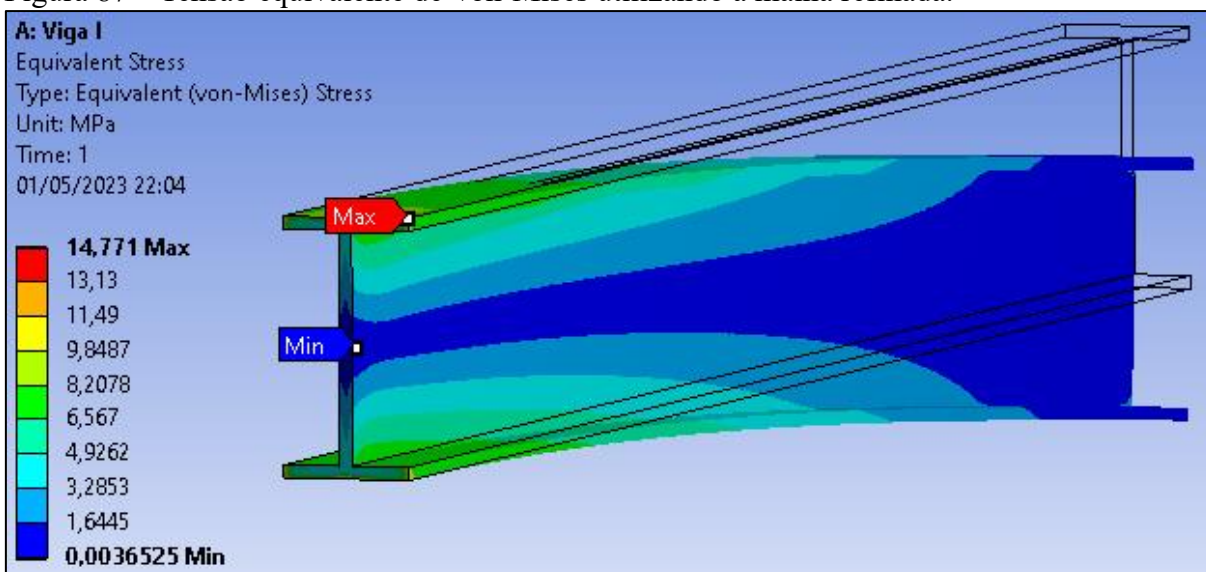


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 87, o valor da tensão máxima de Von-Mises foi de 14,771 MPa, para a viga com a malha refinada.

A localização dessa tensão mudou de local, em relação a resposta com a malha padrão, apesar de continuar na aresta superior da viga. Já a tensão mínima foi de 0,0036525 MPa e continuou a localizar-se no centro da alma do perfil I.

Figura 87 – Tensão equivalente de Von-Mises utilizando a malha refinada.

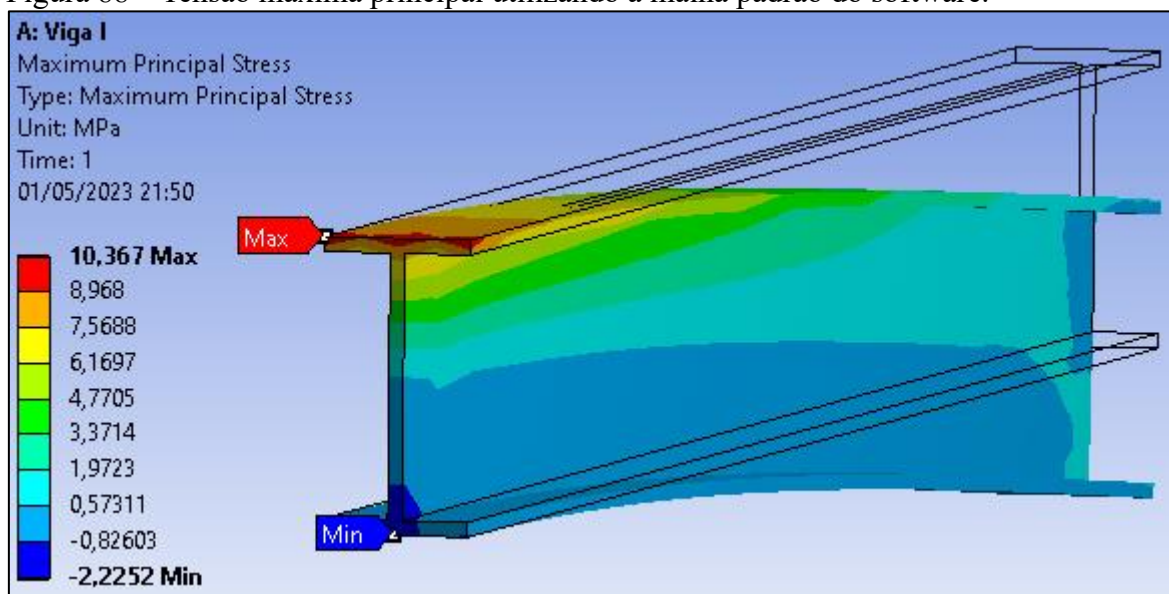


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já para o quesito de tensão equivalente de Von-Mises, o refino de malha se mostrou relevante ao apontar as diferenças nos resultados finais. Houve um aumento considerável da tensão de antes para depois do refino. A distribuição de tensões sofreu mudanças, apresentando uma maior precisão na localização dos resultados, sendo que antes do refino a viga estava sofrendo altos valores de tensão em grandes áreas próximas do ponto de engaste da mesma, tanto na parte superior quanto na parte inferior da viga de forma bem espelhada. Já após o refino, as maiores tensões se localizam em áreas bem menores e muito mais próximas ao ponto de engaste, de forma mais localizada nos cantos da viga, onde ocorrem os pontos de concentração de tensão. O maior valor registrado foi em um ponto de concentração de tensão da viga, localizado no canto superior da face onde a mesma foi fixada. Pela direção da atuação da força, percebe-se que a viga está sob tração em cima e compressão em baixo.

A Figura 88 abaixo, mostra o resultado da tensão máxima principal para a simulação com a malha padrão do Ansys. O seu valor máximo foi igual a 10,367 MPa, e localiza-se na mesma região da tensão equivalente de Von-Mises para a mesma malha utilizada, Figura 86. Já o menor valor para essa tensão foi de -2,2252 MPa e localiza-se na aresta inferior e no centro do perfil da viga. Ambos os valores estão próximos a face em que a viga está engastada.

Figura 88 – Tensão máxima principal utilizando a malha padrão do software.

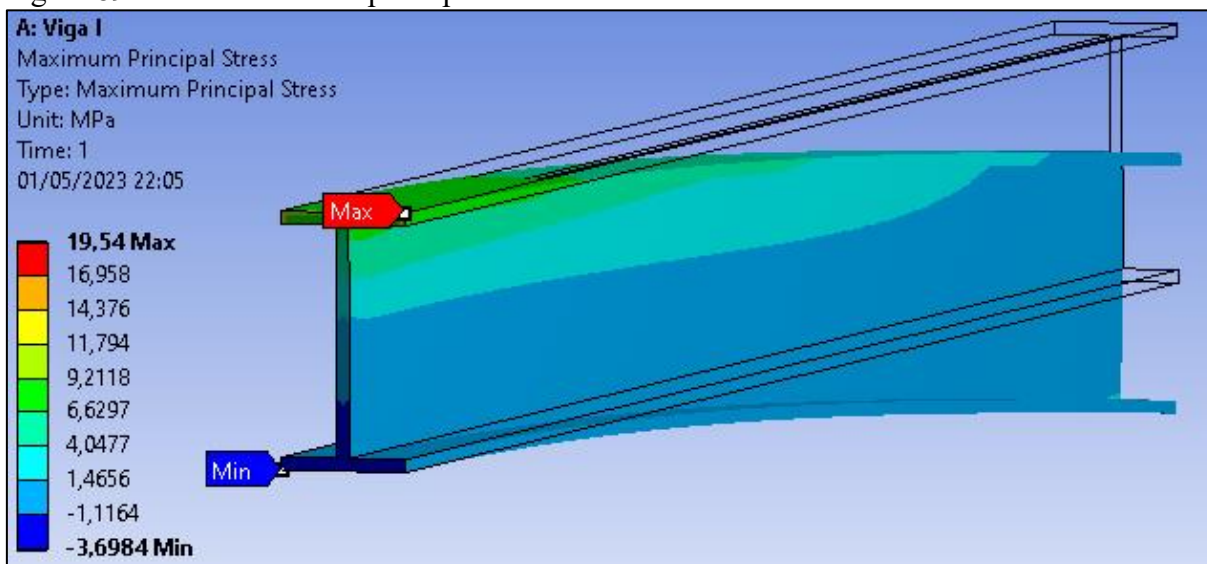


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 89 retorna o valor da tensão máxima principal de 19,54 MPa e localiza-se no mesmo ponto da tensão equivalente de Von-Mises para a malha refinada, Figura 87. O menor

valor de tensão máxima principal foi de -3,6984 MPa e se encontra na aresta inferior da face engastada.

Figura 89 – Tensão máxima principal utilizando a malha refinada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

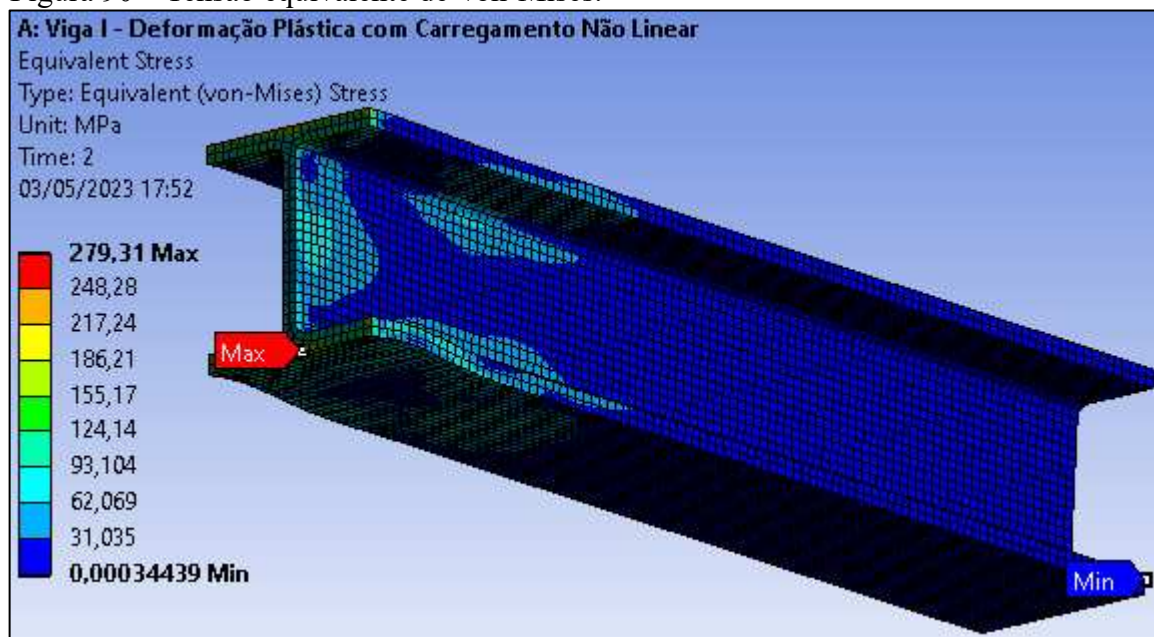
Para a máxima tensão principal, ocorreu a maior diferença entre os resultados após o refinamento. Em valores absolutos, houve uma diferença de 9,173 MPa nos valores máximos de cada resultado. Notou-se também uma maior precisão de distribuição de tensões na viga, sendo assim, com localizações muito mais precisas para os valores de máximos e de mínimos.

#### 6.4 Viga I engastada sofrendo carga não linear

No subcapítulo 5.1.4 trata-se de uma simulação de uma viga I, em balanço, com carregamento desuniforme. Nesse caso, a simulação irá observar o comportamento da fase plástica de uma viga utilizando um aço estrutural não linear. Seguem os resultados:

Na Figura 90 abaixo, tem-se o valor máximo de tensão equivalente de Von-Mises igual a 279,31 MPa, que a princípio demonstra que essa viga, sofrendo essa solicitação de carga, está falhando pelo critério de escoamento. Pois, a tensão equivalente calculada foi maior do que o limite de escoamento do material, que é igual a 250 MPa. O ponto de maior tensão se localiza na aresta inferior da face em que a viga foi fixada, como demonstrado na imagem abaixo. Percebe-se também que, com a ação da força, toda a viga defletiu no sentido negativo do eixo 'y', fazendo com que a chapa inferior da viga deformasse próximo ao engaste.

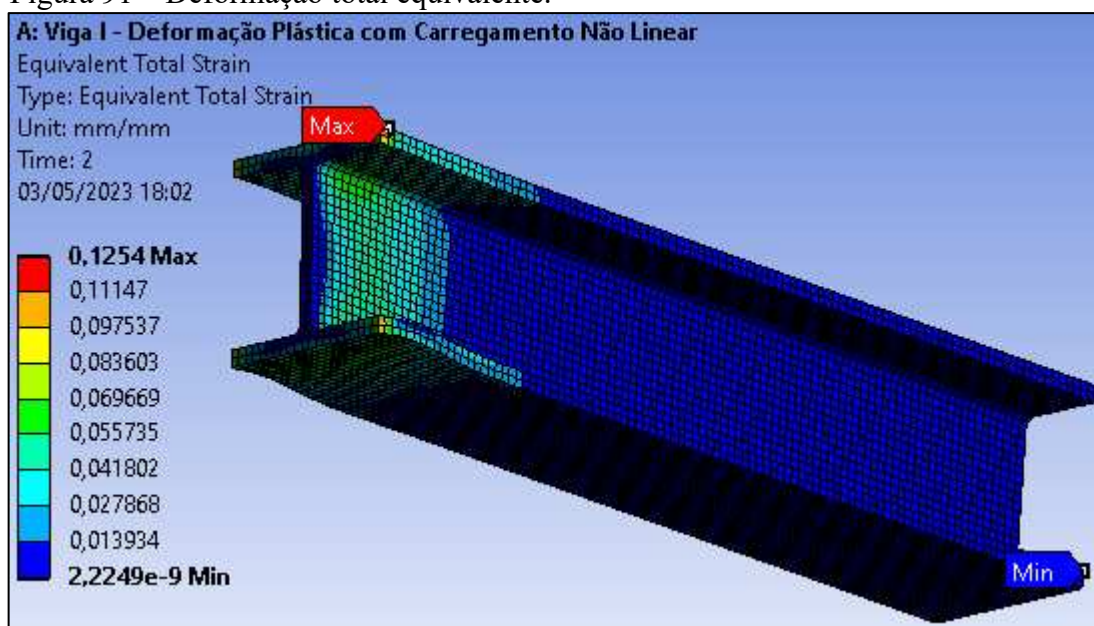
Figura 90 – Tensão equivalente de Von-Mises.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 91, o software apresenta os valores para a deformação total equivalente. O maior valor encontrado foi de 0,1254 mm/mm e se encontra na aresta superior da viga. É um valor muito pequeno, indicando que houve ínfimas deformações na viga. Já o menor valor encontrado foi de  $2,2249 \times 10^{-9}$  mm/mm, que por ser um número muito pequeno, quase nulo, considera-se que não houve deformação no ponto indicado.

Figura 91 – Deformação total equivalente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



Na Figura 92 a seguir, apresenta-se os valores de tensão de Von-Mises para um único nó da malha, esses valores são iguais, visto que se trata de um mesmo elemento de malha. A tensão encontrada foi de 38,401 MPa.

Figura 92 – Tensão equivalente de um nó na fase plástica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já na Figura 93, apresenta-se os valores da deformação total equivalente, do mesmo ponto citado na Figura 92. A deformação foi de 0,063201 mm/mm.

Figura 93 – Deformação total equivalente de um nó na fase plástica.



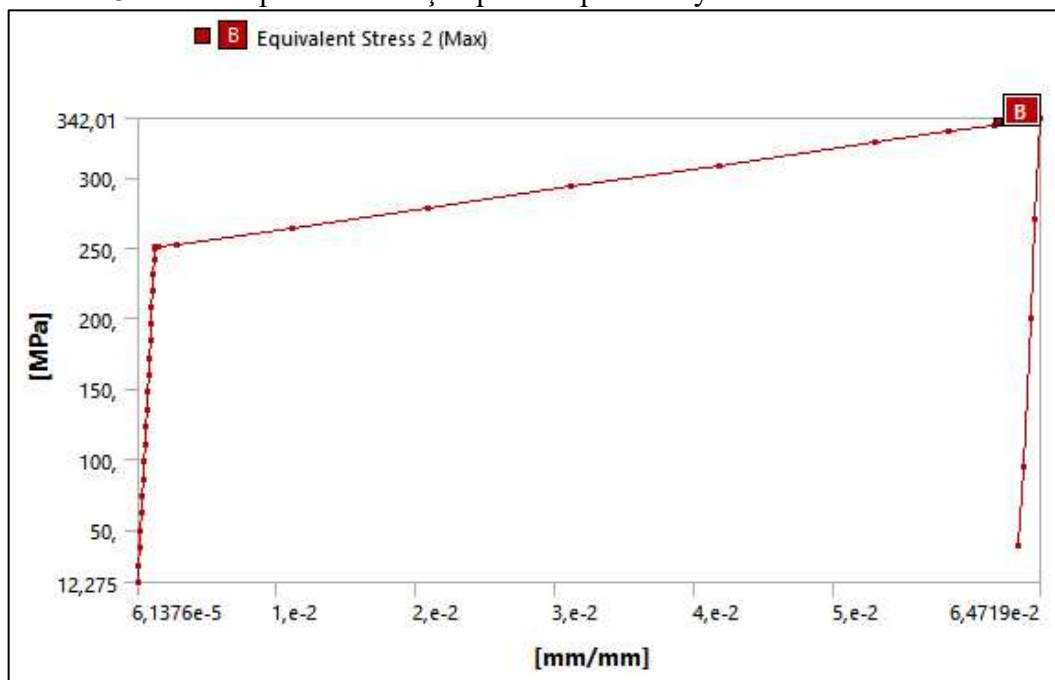
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nas figuras anteriores tem-se os resultados de tensão e deformação de um único nó, que está em sua fase plástica, pois o mesmo foi escolhido por estar na área deformada da viga. Permitindo assim, que se demonstre o seu comportamento através do gráfico de tensão x deformação, plotado com os resultados desse nó.

No Gráfico 3 abaixo, tem-se esse diagrama construído pelo Ansys. O software também oferece todos os valores dos pontos usados para se construir o gráfico. Assim, pode-se

copiar esses pontos e levá-los para um software do tipo editor de planilhas, para se construir o mesmo gráfico.

Gráfico 3 – Tensão por Deformação plotado pelo Ansys.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A figura ainda aponta o comportamento do material. Visto que, até 250 MPa o material segue por sua fase elástica, e a partir desse ponto dar-se-á início a sua fase plástica. Já nessa fase, o material que ainda está sofrendo carregamento, já se comporta de maneira não linear. Do ponto “B” em diante, inicia-se a segunda fase da simulação, onde a viga deixa de sofrer carregamento. Se for iniciado um novo carregamento, o material irá começar com um novo valor de tensão, igual a 342,01 MPa, dessa forma, o novo gráfico iria se originar a partir do último ponto da fase plástica.

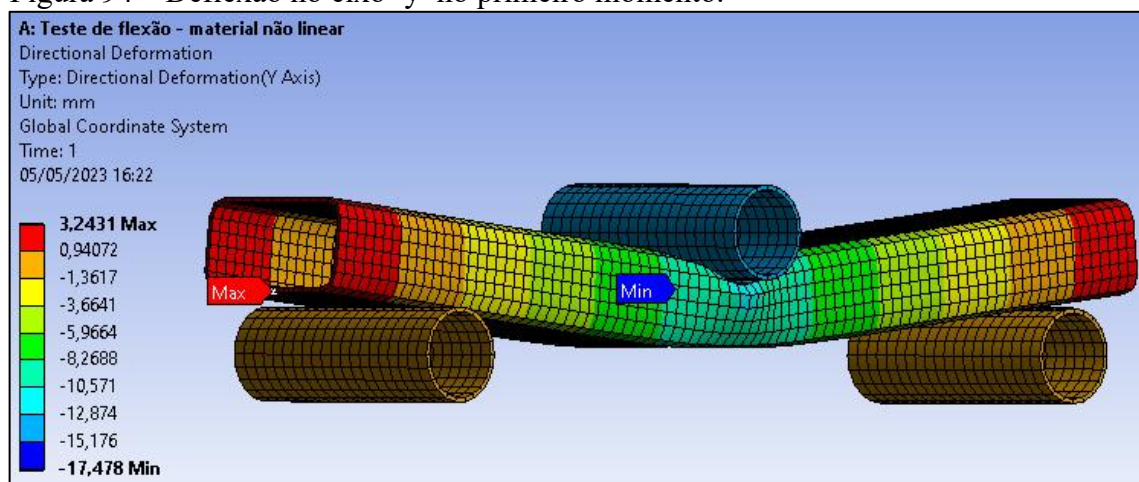
## 6.5 Flexão em uma viga biapoiada de material não linear

O subcapítulo 5.1.5 trata de uma simulação que visa demonstrar e estudar um teste de flexão em uma viga biapoiada de material não linear, com foco na deformação e no comportamento da viga em sua fase plástica. A seguir a explanação dos seus resultados:

Na Figura 94, tem-se o resultado da deflexão da viga, no primeiro momento da simulação, onde a força está atuando até a sua deformação total. Por conta da deformação da viga, há dois resultados que precisam ser analisados com mais atenção. Partindo do presuposto

que o zero indica o estado não deformado da viga, resultados negativos indicam que houve um deslocamento para baixo e resultados positivos indicam que houve um deslocamento para cima. Assim, a viga defletiu o valor 17,478 milímetros para baixo, em relação ao estado inicial sem carregamento. A viga também defletiu 3,2431 milímetros para cima nas suas extremidades.

Figura 94 – Deflexão no eixo ‘y’ no primeiro momento.

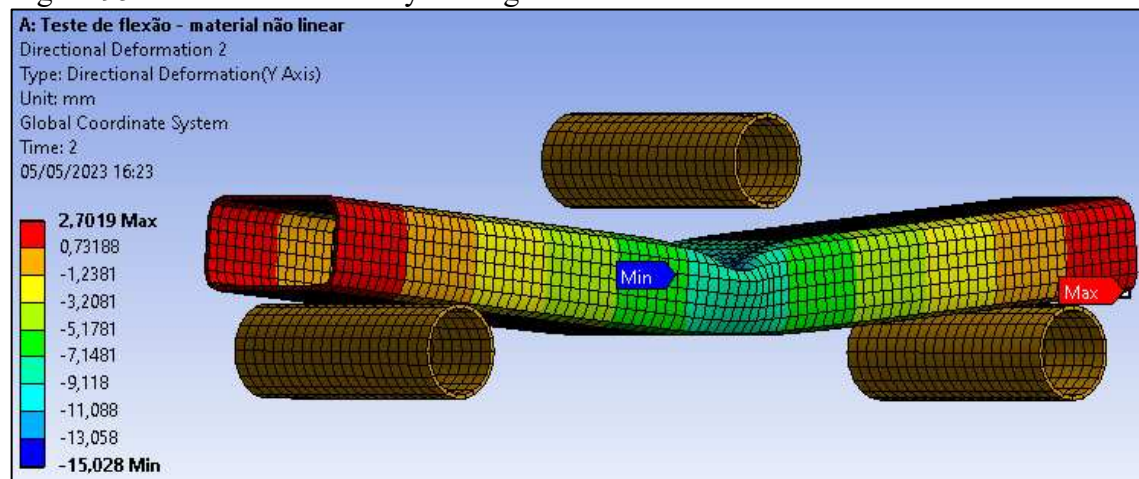


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Esses resultados apontam que com a aplicação da carga, a mesma se deformou para baixo no seu centro. Desse modo, como reação à mesma carga aplicada, os elementos de apoio deformaram as extremidades da viga para cima. Resultando numa flexão condizente com a realidade de um material dúctil.

Já para o resultado da Figura 95, tem-se os valores de deflexão no segundo momento da simulação, no qual o carregamento foi retirado.

Figura 95 – Deflexão no eixo ‘y’ no segundo momento.



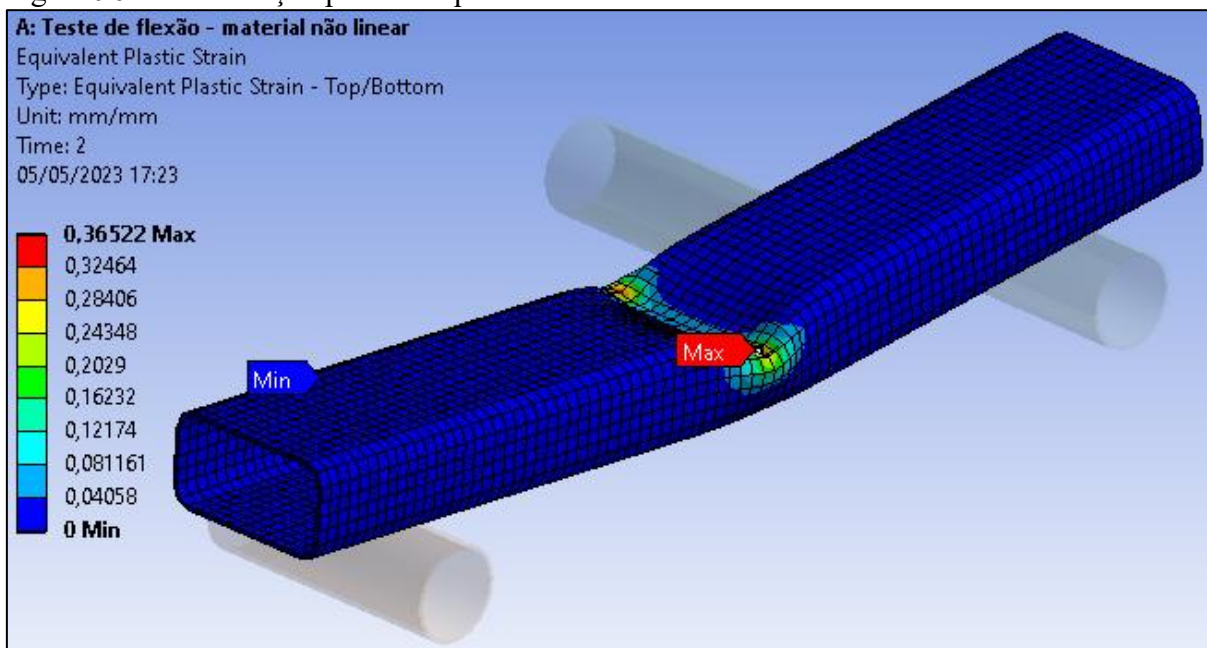
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Dessa forma, a viga após ter a carga retirada, deslocou-se a um ponto anterior da flexão máxima. Respondendo como se ainda estivesse em sua fase elástica. Agora o valor máximo de deflexão no eixo 'y' foi de 15,028 milímetros, ou seja, 2,45 mm a menos que o resultado anterior. Já o valor máximo no qual a viga defletiu foi de 2,7019 milímetros, dessa forma, 0,5412 milímetros a menos que a fase anterior. Ou seja, a deflexão no segundo momento retrocedeu em relação ao primeiro momento.

Esses resultados demonstram que a viga reagiu retornando alguns milímetros a partir do momento em que o carregamento foi retirado. Se um novo carregamento fosse atribuído em uma terceira etapa, a deflexão dessa viga partiria dos resultados do segundo momento da simulação, Figura 95. Pois apesar de retornar um pouco em seus resultados, comparando-se ao primeiro momento, a viga já está em sua fase plástica e não poderá iniciar uma nova deformação a partir do seu estado zero de tensões.

Na Figura 96 tem-se os resultados para a deformação plástica, com o seu valor máximo de 0,36522 mm/mm. Ou seja, 36,52% da deformação da viga ocorreu no ponto indicado como o máximo.

Figura 96 – Deformação plástica equivalente.



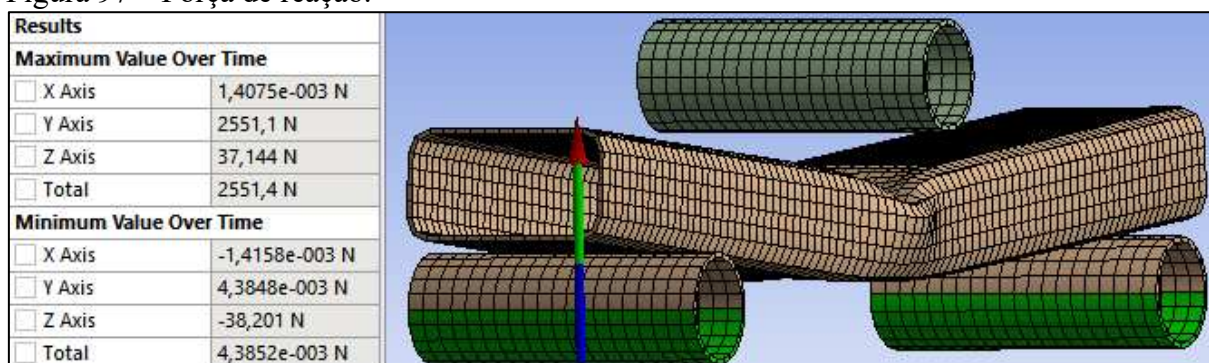
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No restante da viga, ilustrada pela cor azul, não houve deformação alguma. Dessa forma, a deformação plástica está totalmente concentrada no centro da viga, ao qual sofreu toda a carga aplicada pelo cilindro.



Na figura 97 , a seguir, tem-se os resultados da força de reação na simulação. A força de reação está dividida nos três eixos, mas a maior força de reação está no eixo 'y' como esperado, afinal é o eixo onde se localiza a aplicação do carregamento. No eixo 'y', o seu valor máximo é igual a 2551,1 N. A resultante máxima dos três eixos é igual a 2551,4 N. Ainda no mesmo eixo, o seu valor mínimo é  $4,3848 \times 10^{-3}$  N. A resultante mínima dos três eixos é igual a  $4,3852 \times 10^{-3}$  N.

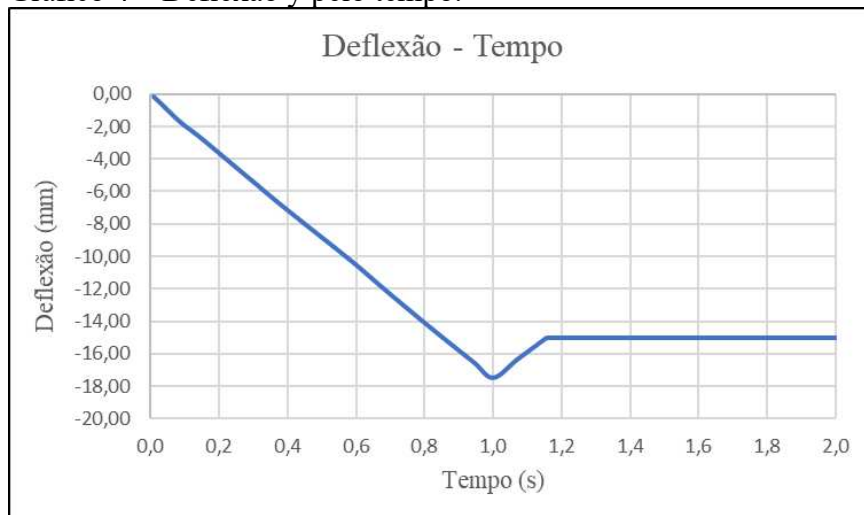
Figura 97 – Força de reação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Utilizando as tabelas com os resultados da simulação, pode-se criar gráficos para uma análise mais completa. Basta apenas copiá-los e colá-los em um programa do tipo editor de planilhas. No Gráfico 4 abaixo tem-se o comportamento da deflexão da viga pelo tempo. Percebe-se o que foi explicado anteriormente, há uma queda linearizada até 1 segundo, no qual a deflexão é máxima. Após isso, há o retorno já mencionado também, quando houve a retirada da carga aplicada.

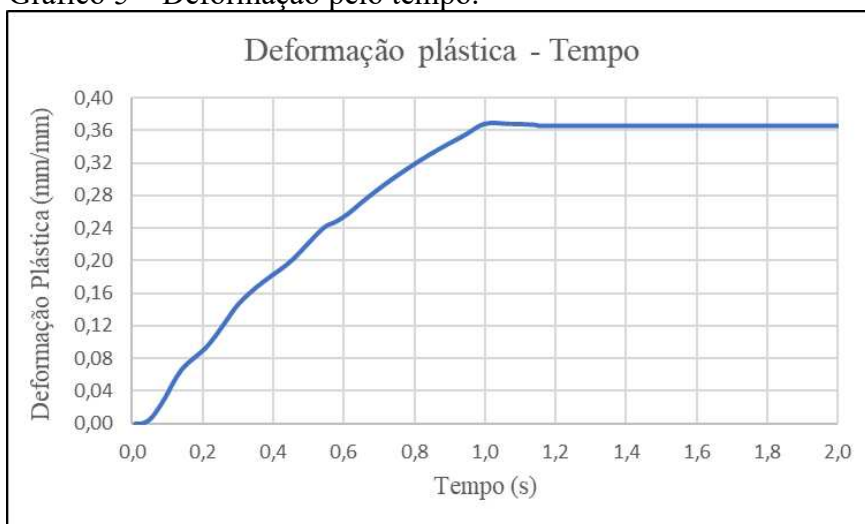
Gráfico 4 – Deflexão y pelo tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No Gráfico 5, pode-se observar o comportamento da deformação plástica pelo tempo. Entre 0 e 1 segundo tem-se uma linha levemente curva, uma característica do material não linear. Após esse período, antes de se tornar constante, há uma pequena curva indicando a retirada do carregamento.

Gráfico 5 – Deformação pelo tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já no Gráfico 6, o comportamento da força de reação é desuniforme, com picos em aproximadamente 0,25 segundos e em 0,6 segundos. Após isso, a força de reação sofre um decaimento até zerar, com a retirada da força aplicada.

Gráfico 6 – Força de reação pelo tempo.

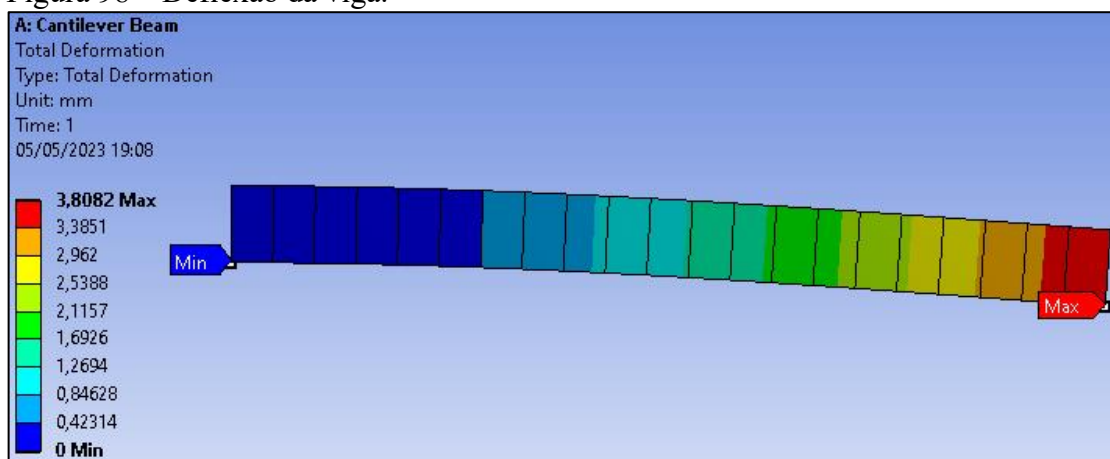


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## 6.6 Viga quadrada em balanço

Seguem os resultados da viga em balanço sob carregamento de 6000 N. Para o material denominado “Steel” especificamente criado para esse problema, tem-se a deflexão igual a 3,8082 mm, localizado na extremidade da viga que recebe a carga. Na Figura 98, percebe-se também que não houve deflexão na extremidade que simula o engaste.

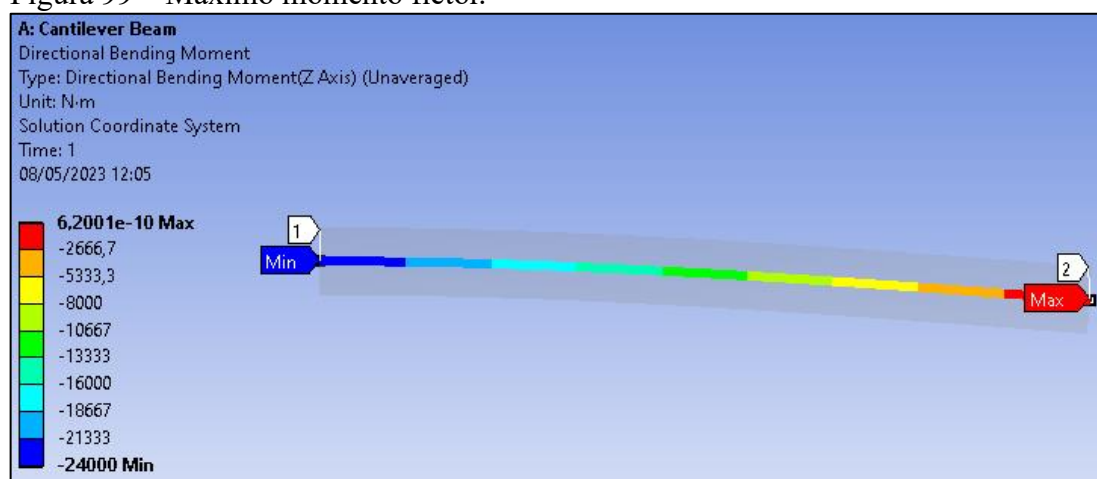
Figura 98 – Deflexão da viga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No próximo resultado mudou-se a unidade de medida para que o valor final ficasse em Newton-metro (Nm). Para isso, apenas clicou-se em “Units” e escolheu-se a opção SI com metros. Na Figura 99 a seguir tem-se o resultado do máximo momento fletor igual a – 24000 Nm. O sinal negativo refere-se ao sentido do momento fletor, por conta disso o máximo momento está demonstrado como o menor valor na escala dos resultados.

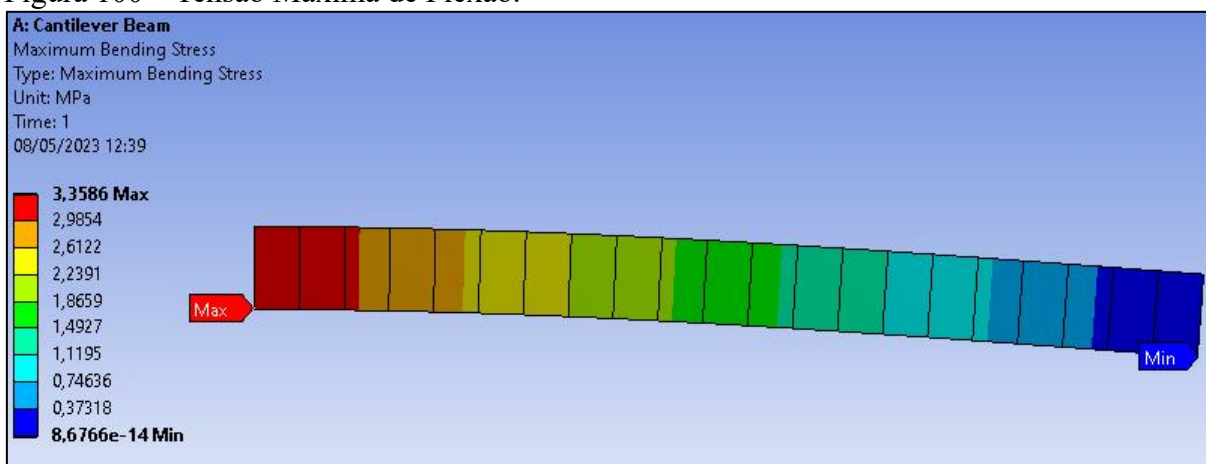
Figura 99 – Máximo momento fletor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 100 abaixo, o resultado para a máxima tensão de flexão foi de 3,3586 MPa e a sua localização foi no canto inferior da face em que a viga está engastada. O resultado está condizente com a teoria, pois a máxima tensão se localiza em um ponto de concentração de tensões, no caso, será na quina engastada da viga.

Figura 100 – Tensão Máxima de Flexão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Aqui também haverá uma comparação entre os resultados exibidos pelo software e os calculados manualmente. Com o módulo de Young dado de 27000 MPa, tem-se:

- Momento de inércia

$$I = a^4 / 12 = (350 \text{ mm}) * 4 / 12$$

$$I = \mathbf{1\ 250\ 520\ 833,33\ mm^4}$$

- Deflexão da viga

$$v_{Máx} = - P * L^3 / 3 * E * I$$

$$v_{Máx} = - 6000 \text{ N} * (4000 \text{ mm})^3 / 3 * 27000 * \text{N/mm}^2 * 1\ 250\ 520\ 833,33 \text{ mm}^4$$

$$v_{Máx} = - \mathbf{3,7910\ mm}$$

Com uma diferença de 0,0172 mm, o resultado do Ansys está muito próximo do valor obtido pela equação de deflexão.

- Momento fletor máximo

$$M_{Máx} = P * L = 6000 \text{ N} * 4 \text{ m} = \mathbf{24000 \text{ N} * \text{m}}$$

Portanto, o Ansys retornou exatamente o mesmo valor calculado manualmente. Esse resultado será utilizado para o cálculo da tensão de flexão em seguida.

➤ Tensão de flexão

Para o cálculo manual, usa-se a Equação 1:

$$\sigma_{M\acute{a}x} = M_{M\acute{a}x} * c / I$$

$$\sigma_{M\acute{a}x} = 24\,000\,000 \text{ N} * \text{mm} * (350/2) \text{ mm} / 1\,250\,520\,833,33 \text{ mm}^4$$

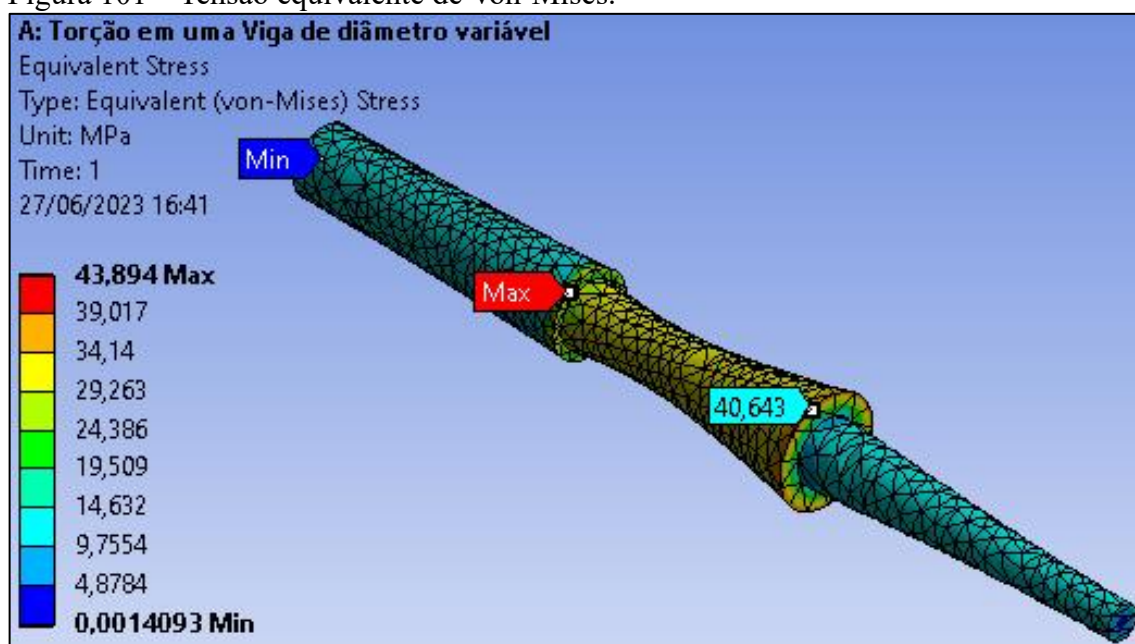
$$\sigma_{M\acute{a}x} = \mathbf{3,358600 \text{ MPa}}$$

Demonstrando que o Ansys atingiu o mesmo resultado do valor calculado manualmente.

## 6.7 Torção em barra escalonada

O resultado, indicado na Figura 101, demonstra que a tensão máxima de Von-Mises foi encontrada em um ponto de concentração de tensões, justamente onde ocorre a mudança de diâmetro da peça. O valor absoluto foi de 43,894 MPa.

Figura 101 – Tensão equivalente de Von-Mises.



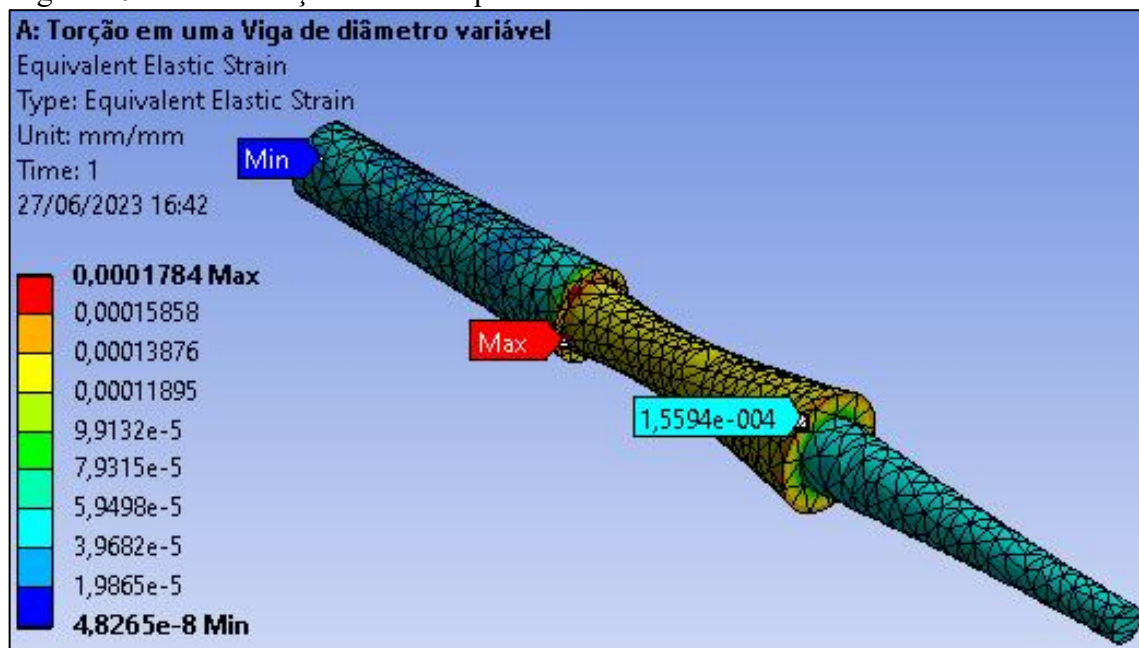
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já o menor valor encontrado se localiza na face onde a barra foi fixada e seu valor foi de 0,0014 MPa. Essa deformação aparente do resultado, se trata de um exagero que o software escolhe para ilustrar visualmente o comportamento da barra sob a ação dos torques. No caso, pode-se escolher a escala dessa deformação, pode-se deixa-la mais exagerada ou na escala verdadeira. E até mesmo sem deformação, deixando a critério do usuário. Como a deformação é pouco perceptível, optou-se por manter a escala automática do software por razões ilustrativas. Isso vale para todos os resultados mostrados nesse trabalho.

Percebe-se pela paleta de cores que houve outros pontos de tensões em outras partes da barra. Na segunda mudança de diâmetro, o software também retornou valores consideráveis. Usando a função “Probe”, marcou-se um ponto aleatório onde a escala de cores estava em vermelho. Tem-se no nó demonstrado na Figura 101, o valor de 40,643 MPa de tensão máxima de Von-Mises. Mostrando assim, que a mudança geométrica de diâmetro tem uma grande importância no projeto de um eixo e deve ser avaliada com a devida atenção. Resultado esse, que corrobora com a teoria vista em sala de aula.

Na Figura 102, tem-se os resultados para a deformação elástica da barra escalonada. Percebe-se que os valores são muito pequenos, com o seu máximo igual a 0,0001784 mm/mm e seu mínimo igual a  $4,8265 \times 10^{-8}$  mm/mm.

Figura 102 – Deformação elástica equivalente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Esses valores podem ser interpretados entendendo-se que a deformação real da peça sob esses torques foi muito pequena, quase imperceptível a olho nu. Essa é uma das razões do

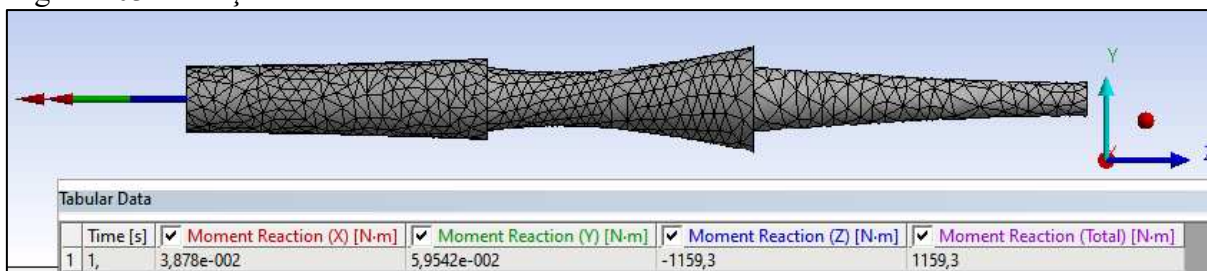


software ter aumentado a escala visual do resultado, pois assim pode-se entender como a peça reagiu geometricamente.

Novamente usou-se a função “Probe” para apontar o valor de um nó, onde também houve uma deformação considerável. O nó aleatoriamente escolhido, teve seu valor igual a  $1,5594 \times 10^{-4}$  mm/mm, Figura 102. Seguindo-se o padrão ocorrido no resultado anterior, os maiores valores se encontram nas concentrações de tensões, ou seja, nas mudanças de diâmetro da peça.

O resultado na Figura 103 obtido foi para a reação dos torques sofridos pela peça no suporte de fixação 1, aquele localizado no lado esquerdo do eixo. O Ansys retorna valores de reações em todas as direções separadamente e também o valor resultante total.

Figura 103 – Reação do momento 1.

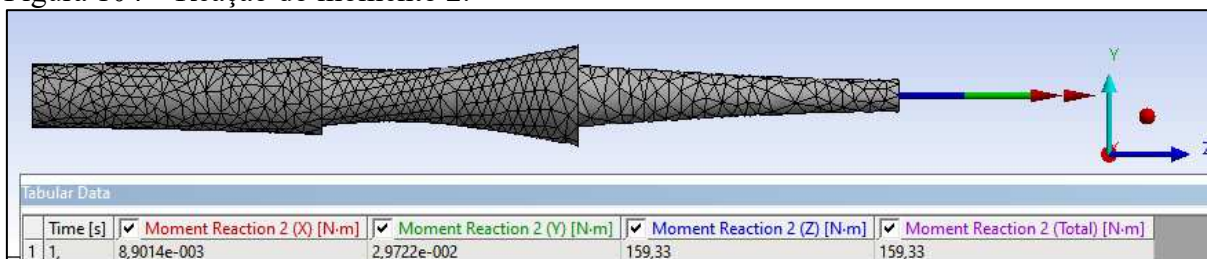


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como o torque provoca uma força na direção axial do eixo, o maior valor é exatamente nesse eixo. Resultando no valor igual a -1159,3 Nm. O sinal negativo indica que a reação está no sentido contrário ao torque mais próximo de 3000 Nm no sentido anti-horário.

Já na Figura 104, esse resultado mostra valores de reação para os torques aplicados em relação ao suporte de fixação 2. Aquele localizado no lado direito da peça. Como no resultado anterior, o software devolve valores em todas as direções, mas o maior valor está no eixo ‘z’. O valor foi de 159,33 Nm. Com o sentido de direção contrário ao torque mais próximo de valor igual a 2000 Nm.

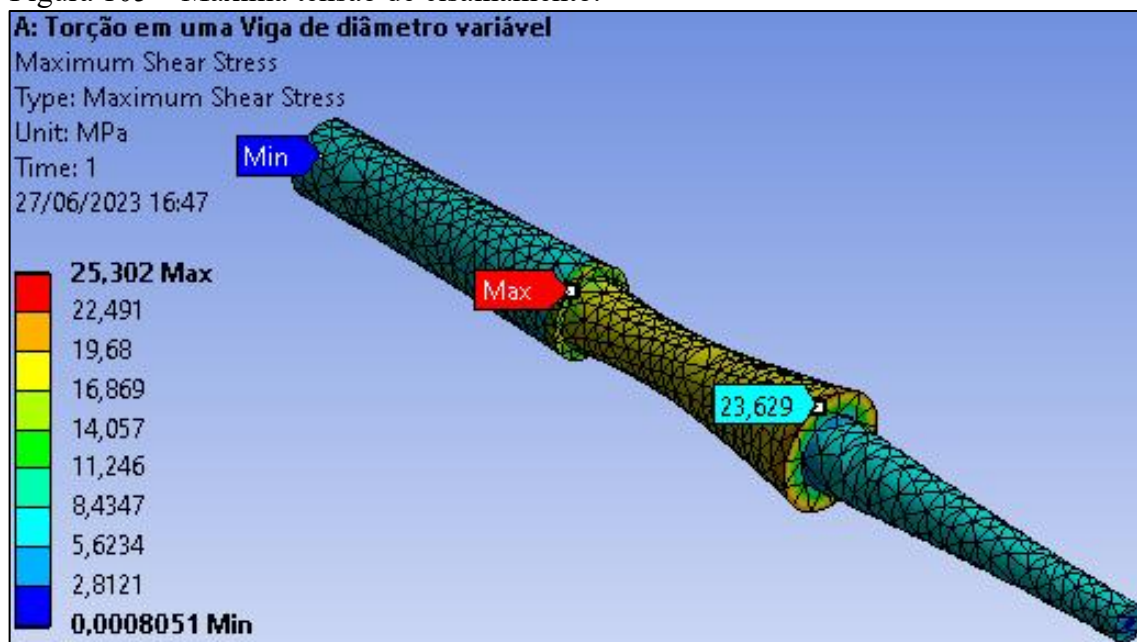
Figura 104 – Reação do momento 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como esse estudo de caso trata-se de um eixo escalonado sob ação de vários torques, um outro resultado muito importante será o de máxima tensão de cisalhamento da peça. Pois os torques irão gerar tensões de cisalhamento por todo o eixo. Para isso, bastou-se clicar com o botão direito do mouse em “Solution” e na opção “Stress”, insere-se a função “Maximum Shear”. Validando os resultados tem-se os valores na Figura 105 a seguir.

Figura 105 – Máxima tensão de cisalhamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como esperado e por ser um fator de concentração geométrica, os maiores valores foram encontrados nas mudanças de diâmetro do eixo. Sendo o valor máximo igual a 25,302 MPa e que está localizado na aresta com o maior diâmetro do eixo. O valor mínimo foi igual a 0,0008051 MPa e está localizado no centro do eixo. Utilizando a função “Probe” demonstra-se o valor de um nó na aresta do segundo diâmetro, que também é uma região de interesse do estudo. Esse nó escolhido apresentou o valor de 23,629 MPa, ou seja, um valor de tensão de cisalhamento expressivo e importante a ser considerado. Os valores mínimos permanecem no centro, nas duas faces onde ficam as fixações da peça.

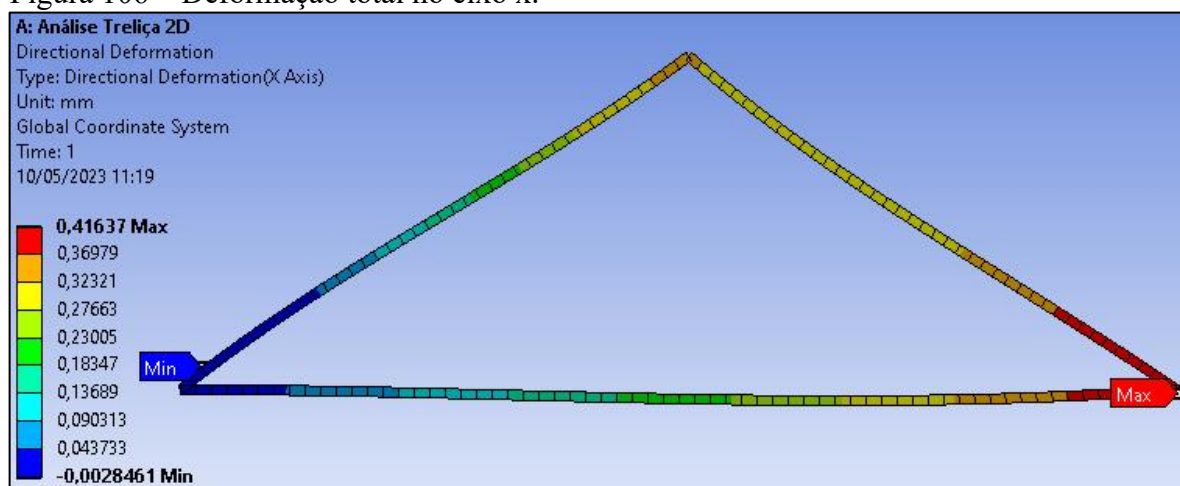
## 6.8 Análise de treliça 2D

Na Figura 106 tem-se a deformação em relação ao eixo ‘x’ de toda a treliça sob a ação das duas forças aplicadas. A treliça inteira sofreu deslocamento, mas como o lado esquerdo



está totalmente fixado, o mesmo apresentou valores irrisórios em sua deformação em comparação ao lado oposto. Já no lado direito, por ter uma apoio que permite o deslocamento em 'x', foi apresentado uma deformação de 0,41637 milímetros. Percebe-se também que houve uma deformação no vértice superior, onde o mesmo se deformou para baixo, como reação ao estiramento lateral da treliça.

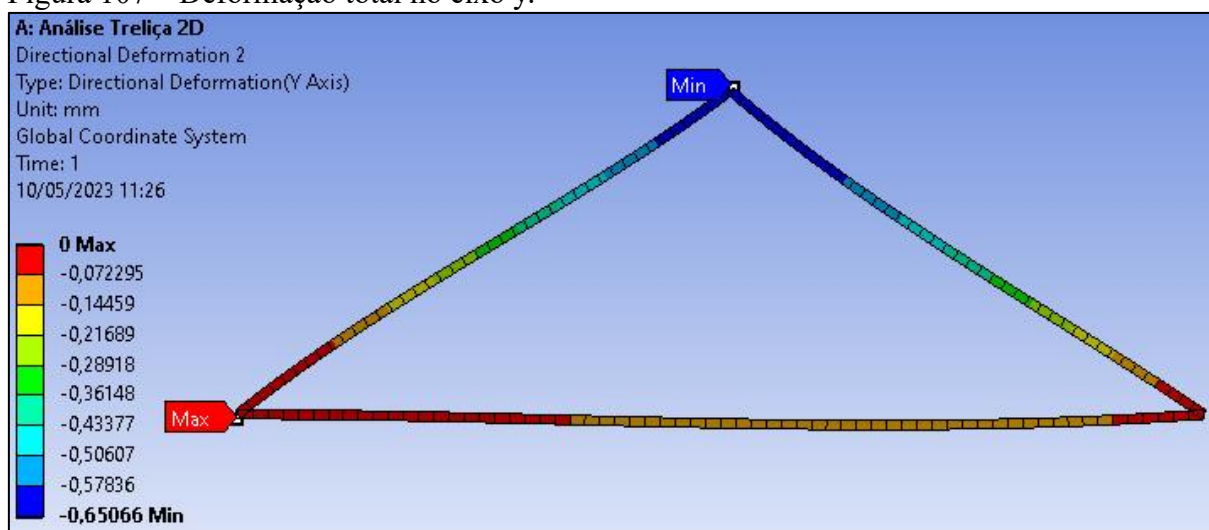
Figura 106 – Deformação total no eixo x.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já na Figura 107 tem-se a deformação total da treliça em relação ao eixo 'y'. Como os dois tipos de suporte não permitem o deslocamento na direção desse eixo, os dois vértices inferiores permaneceram com os valores iguais a zero milímetros. Já o vértice superior, se deslocou 0,65066 milímetros no sentido negativo do eixo 'y'.

Figura 107 – Deformação total no eixo y.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No resultado da Figura 108 a seguir, tem-se a deformação somente do vértice direito inferior, em relação ao eixo 'x'. Como o resultado avalia apenas um único ponto, os valores de máximo e de mínimo serão iguais.

O vértice apresentou o valor de 0,41637 milímetros. Resultado esse, igual ao da deformação total em relação ao eixo 'x', Figura 106. Ou seja, o ponto de máxima deformação da estrutura se encontra no vértice inferior direito.

Figura 108 – Deformação do vértice inferior direito no eixo x.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O resultado da deformação para o mesmo vértice anterior, Figura 108, mas agora avaliando-se pelo eixo 'y', foi de zero milímetros como demonstrado na Figura 109. O que foi dito para o resultado total no eixo 'y', se aplica aqui. Pela condição de restrição do apoio, o vértice não sofreu deformação nesse sentido avaliado.

Figura 109 – Deformação do vértice inferior direito no eixo y.

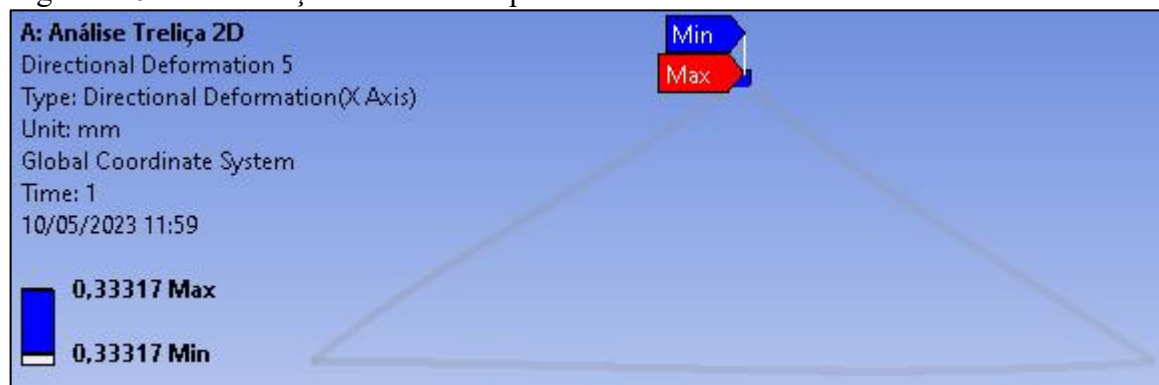


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

É importante estudar esse vértice, Figura 110, pois foi nesse ponto em que as forças foram aplicadas. A força horizontal aplicada foi responsável por deformar esse vértice no valor de 0,3331 milímetros para a direita, no sentido positivo do eixo. Isso pode ser afirmado, pois a

força vertical não tem nenhuma influência no resultado acima. Afinal, ela não tem nenhuma resultante no eixo 'x'.

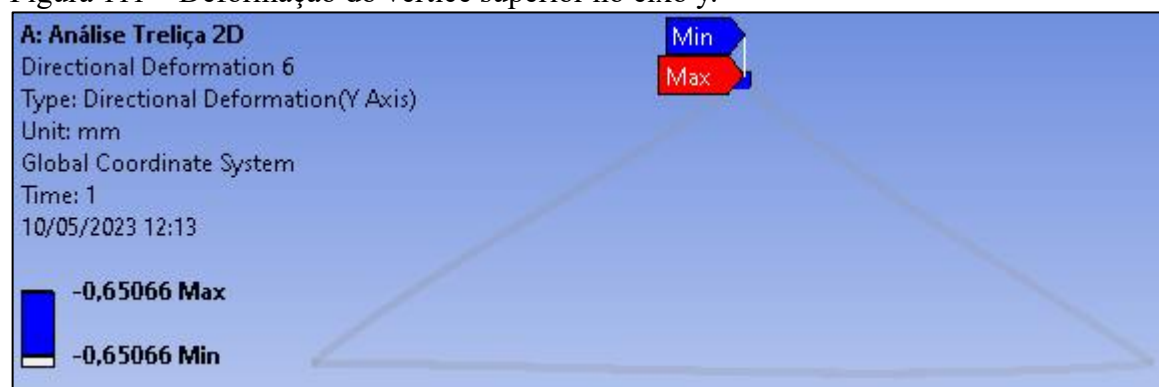
Figura 110 – Deformação do vértice superior no eixo x.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já na Figura 111 abaixo, a força vertical tem total influência no resultado em relação ao eixo 'y'. A deformação desse vértice foi igual a -0,65066 milímetros. O mesmo valor de deformação total no eixo 'y', anteriormente comentado, Figura 107. Inferindo que esse foi o ponto máximo de deformação nesse sentido do eixo. A força na horizontal não tem influência nesse resultado, pois a mesma só atua no eixo 'x'.

Figura 111 – Deformação do vértice superior no eixo y.

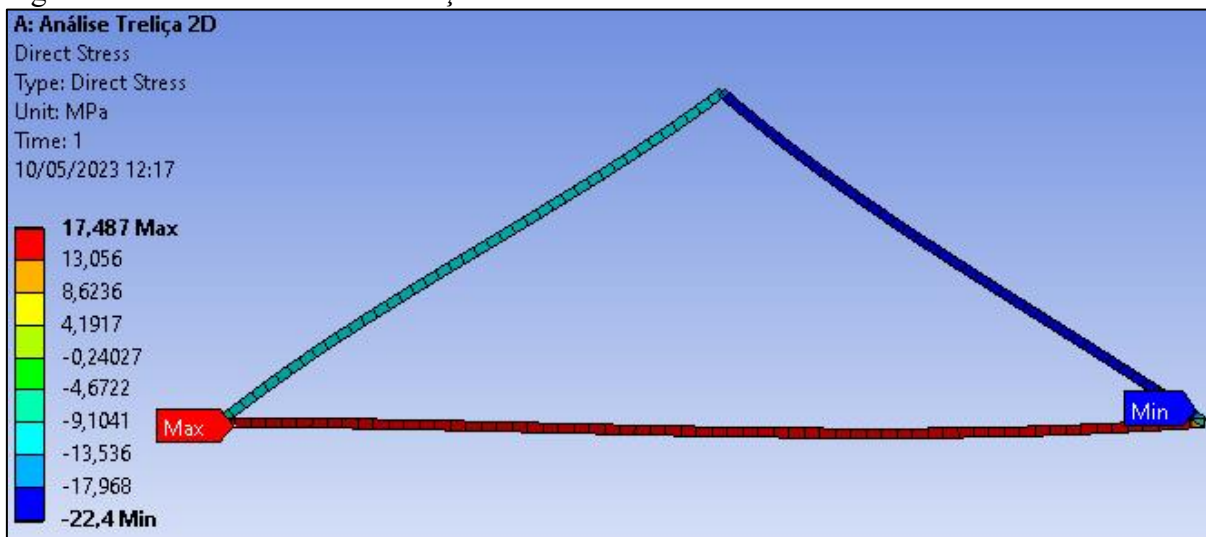


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 112 abaixo, demonstra o resultado das tensões na estrutura da treliça. A maior tensão na qual a treliça está submetida, em valores absolutos, é igual à -22,4 MPa. Por se tratar de um valor negativo, pode-se afirmar que é uma tensão de compressão. Pelas cores essa tensão se localiza na barra lateral direita. Já a segunda maior tensão sofrida pela treliça, em valores absolutos, é igual à 17,487 MPa e pela distribuição de cores do resultado afere-se que todo esse estresse está localizado na barra inferior. O valor dessa tensão é positivo, dessa forma

conclui-se que essa barra está sofrendo tração como resultado da aplicação das forças. Pela cor da barra lateral esquerda, pode-se dizer que ela também está sofrendo compressão, com valores entre -13,536 MPa e -17,968 MPa.

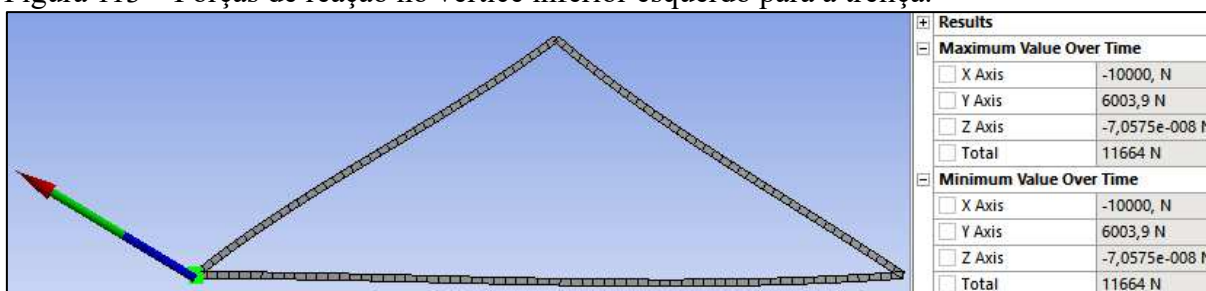
Figura 112 – Tensão direta na treliça.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As forças aplicadas na treliça geraram reações nos pontos de apoio. Abaixo, Figura 113, tem-se os resultados para o suporte fixo. Aqui percebe-se que a reação em 'x' foi maior do que em 'y', por conta disso a força resultante está mais inclinada para o eixo 'x'. Os valores são de 6003,9 N para a reação em 'y' e -10000 N para a reação em 'x'. Nota-se que a reação em 'x' é exatamente o mesmo valor da força horizontal aplicada, mas em sentido oposto.

Figura 113 – Forças de reação no vértice inferior esquerdo para a treliça.

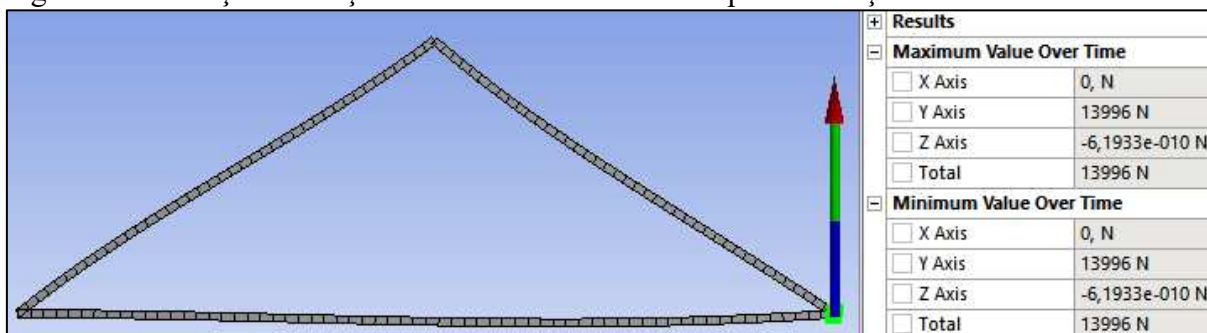


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O vetor de força de reação, na Figura 114 a seguir, indica que a maior componente de força está no eixo 'y'. Com os valores de 13996 N no eixo 'y' e zero newtons no eixo 'x'. Percebe-se que, para o eixo 'y', esse valor de força de reação se complementa com o resultado anterior. Somando-se as duas reações máximas do eixo 'y', Figuras 113 e 114, tem-se o valor

de 19999,9 N o que corresponde a força aplicada na vertical de 20 kN, o que corrobora com a teoria.

Figura 114 – Forças de reação no vértice inferior direito para a treliça.

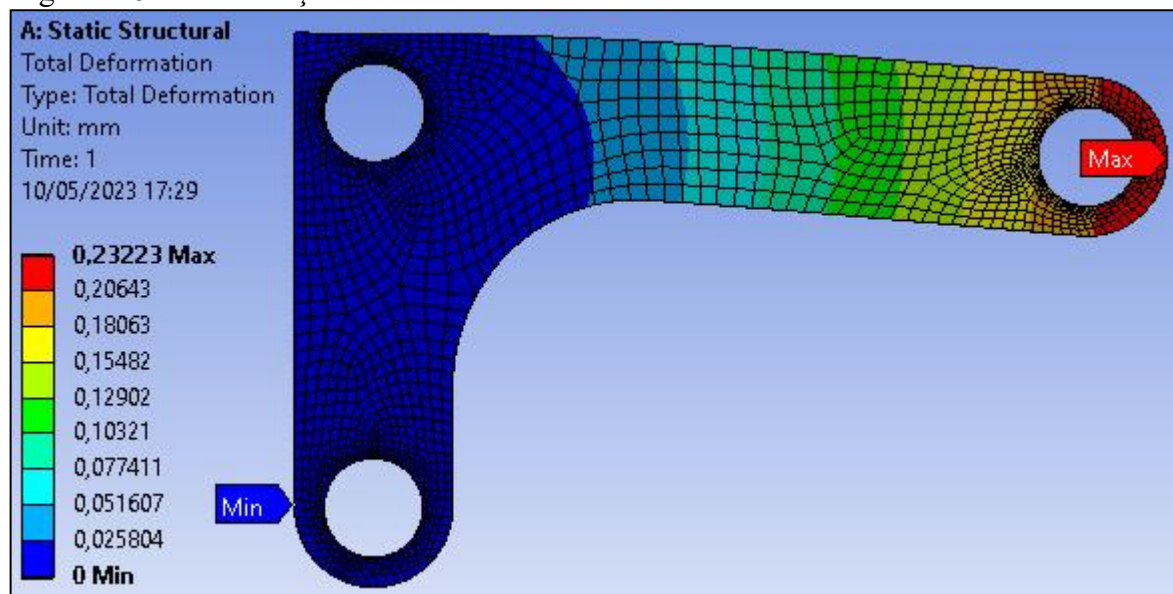


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## 6.9 Parametrização

Uma cantoneira com três furos deverá atender ao critério de projeto que determina que os diâmetros dos furos, na peça, deverão ser tais que o fator de segurança seja de 2,5. Além da parametrização, resultados de deformação e tensão equivalente de Von-Mises serão comentados. A cantoneira sob a pressão de 2,5 MPa, Figura 115, sofreu uma deformação de 0,23223 milímetros. Com o seu máximo localizado na extremidade direita da peça.

Figura 115 – Deformação total da cantoneira.



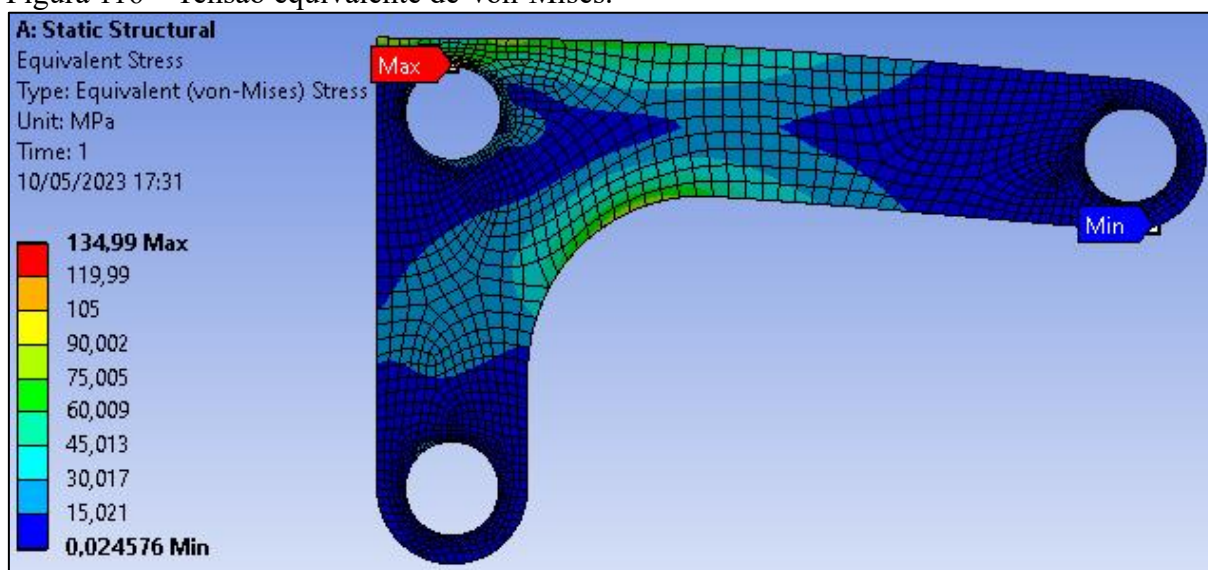
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



Apesar do valor deformado ter sido pequeno, foi o suficiente para que o critério do fator de segurança não fosse atendido. Esse resultado se refere aos furos com os diâmetros de 25 milímetros. A deformação mínima foi de zero milímetros e localiza-se na aresta em que a cantoneira foi fixada, um resultado esperado por conta das condições de contorno da simulação.

No resultado da Figura 116 a seguir, percebe-se que o ponto de máxima tensão calculada foi exatamente na borda de um dos furos. Mais precisamente, no furo superior à esquerda, próximo de onde a peça está sofrendo tensões decorrentes da força aplicada. Esse resultado corrobora com o fato de um furo ser um concentrador de tensão e que o mesmo interfere bastante na resistência da peça como um todo. O valor máximo para a tensão de Von-Mises foi de 134,99 MPa de tensão. O valor da mínima tensão equivalente foi de 0,024576 MPa e está localizado na aresta externa, próximo ao furo superior direito. Pela forma como a peça está deformada, pode-se inferir que a mesma está sofrendo tensões da força normal cortante, tensões de momento fletor e estiramento do furo.

Figura 116 – Tensão equivalente de Von-Mises.

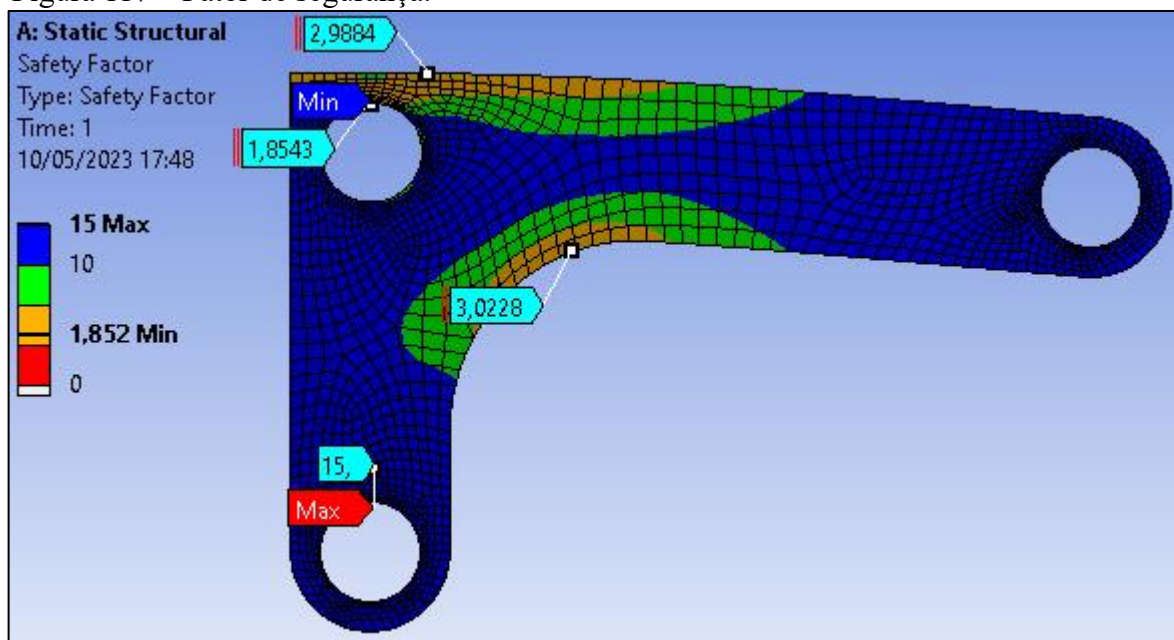


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 117 a seguir, temos os valores calculados do fator de segurança, para a medida de 25 milímetros de diâmetro nos furos. O resultado do menor fator de segurança foi de 1,852. Destacou-se quatro dos nós da malha, para demonstrar os valores em diferentes coordenadas na cantoneira. Três desses valores mostram os pontos mais fragilizados da peça sob esforço. O menor ponto destacado com o valor de 1,8543, está muito próximo do menor valor da simulação inteira, apontando que naquela região há vários outros pontos frágeis, indicando uma região cheia de tensões. Os outros dois pontos de valores 2,9884 e 3,0228, apesar

de respeitarem o critério do caso proposto, também demonstram outras partes fragilizadas da peça, onde ocorrem concentrações de tensão. Talvez com mais carga ou com um material menos resistente, esses pontos poderiam apresentar falhas. Portanto, são localizações que merecem a atenção do projetista. O último ponto, próximo ao furo inferior de valor 15, foi evidenciado apenas para atestar o valor máximo e portanto, o local menos propício a falhas de projeto.

Figura 117 – Fator de segurança.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como esse resultado do fator de segurança não satisfaz a condição de projeto da peça, um recurso muito importante será implementado para a resolução do problema. A parametrização é uma ferramenta que auxilia no estudo de projetos e na obtenção de resultados. De forma mais rápida, o projetista pode encontrar o resultado esperado, utilizando como aliado a capacidade de processamento do software AnsysWorkbench<sup>®</sup>. Como foi discutido através dos resultados acima, a variável responsável pela possível falha de projeto será os diâmetros dos furos da cantoneira. Portanto, a mesma será a variável parametrizada.

Na Figura 118 abaixo, tem-se os resultados da parametrização dispostos em uma tabela produzida pelo próprio software. Na linha “DP 0” está o valor do fator de segurança obtido para o diâmetro inicial. Como foi explicado no capítulo 5 de metodologia, os valores dos diâmetros foram reduzidos em intervalos de 1 milímetro. Para assim, ter uma melhor noção do comportamento do fator de segurança. Diminuiu-se os valores até chegar no diâmetro de 18 milímetros, em sequência, pediu-se que o software rodasse a simulação testando todos os tamanhos dos furos. O resultado veio na linha “DP 6” onde o fator de segurança foi de 2,5499

e os diâmetros foram de 19 milímetros. Assim para a cantoneira respeitar a condição de projeto, a mesma deverá ter os furos com o diâmetro de 19 milímetros, conforme o software calculou.

Figura 118 – Resultados da parametrização.

| Table of Design Points |                |              |         |         |         |                            |
|------------------------|----------------|--------------|---------|---------|---------|----------------------------|
|                        | A              | B            | C       | D       | E       | F                          |
| 1                      | Name           | Update Order | P5 - D1 | P6 - D2 | P7 - D3 | P4 - Safety Factor Minimum |
| 2                      | Units          |              | mm      | mm      | mm      |                            |
| 3                      | DP 0 (Current) | 1            | 25      | 25      | 25      | 1,852                      |
| 4                      | DP 1           | 2            | 24      | 24      | 24      | 1,9933                     |
| 5                      | DP 2           | 3            | 23      | 23      | 23      | 2,0754                     |
| 6                      | DP 3           | 4            | 22      | 22      | 22      | 2,1943                     |
| 7                      | DP 4           | 5            | 21      | 21      | 21      | 2,3095                     |
| 8                      | DP 5           | 6            | 20      | 20      | 20      | 2,4225                     |
| 9                      | DP 6           | 7            | 19      | 19      | 19      | 2,5499                     |
| 10                     | DP 7           | 8            | 18      | 18      | 18      | 2,6526                     |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O mesmo resultado poderia ter sido obtido de forma manual. Mudando os valores dos diâmetros no desenho da peça e depois simulando com o novo valor. Fica evidente que desse modo, o processo ficaria muito mais trabalhoso. Se o projeto for de alta complexidade, uma mudança manual se tornaria quase impraticável, pois demandaria muito consumo de tempo para o projeto.



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho mostrou como um software especialista atua no auxílio de um estudante de engenharia. Através dos resultados em imagens, gráficos e tabelas com valores diversos, o aluno pode experimentar como será na prática a aplicação da teoria nos futuros projetos que a profissão está destinada a trilhar.

Procurou-se demonstrar variados casos de vigas, com vários tipos de carregamentos, fixações e formatos. Foi apontado casos em que ocorreu uma avaliação de materiais em regimes plásticos. Um caso simples de treliça. Um caso de parametrização, no qual se certificou da sua importância para a resolução de algum parâmetro de projeto.

Atestou-se por meio de cálculos analíticos, que os resultados do software corroboram com os resultados obtidos através da aplicação da teoria, em três casos propostos.

Já para um profissional formado, também pode-se demonstrar a capacidade de resolução de um problema através do Ansys. Com a sua capacidade de processamento aliado a sua confiabilidade, o projeto pode ser desenvolvido mais rapidamente e com um menor custo. Pois eventuais erros podem ser vistos nas simulações e consequentemente resolvidos instantaneamente.

Como apresentado, esse software pode se tornar uma excelente ferramenta didática nos cursos de graduação em engenharia mecânica, auxiliando o professor na função de representar visualmente o que está sendo ensinado em aula, além de confirmar os resultados dos cálculos feitos manualmente, usando a teoria lecionada. Além disso, proporciona ao aluno um contato maior com os elementos estudados. Dando ao mesmo, a possibilidade de adquirir experiência na aplicação de fórmulas e regras em variados tipos de casos referentes à disciplina estudada.

## 8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O uso de softwares na graduação ainda é uma perspectiva de ensino a ser explorada. Este trabalho visa chamar a atenção da comunidade, como um todo, para a possibilidade da implementação de um software especialista como uma ferramenta auxiliar do professor, para o ensinamento de sua respectiva matéria. Facilitando a transmissão de conceitos, por vezes abstratos, para o aluno. Mas como uma porta de entrada, há muito a ser feito e a ser investigado. Portanto, seguem algumas recomendações de trabalhos que possam continuar e até aprofundar o conteúdo dessa monografia:

- Propõe-se um estudo estatístico acerca da implementação de um software como o Ansys, avaliando a aceitação por parte dos professores e alunos. Avaliando também, a relação das notas e das aprovações das cadeiras antes e depois do uso do programa.
- Propõe-se a análise de quais disciplinas seriam mais relevantes para se aplicar essa abordagem de ensino. Deixo sugestões como Dinâmica dos fluidos, Transferência de calor, Dinâmica das máquinas e Elementos de máquinas.
- Propõe-se o estudo de tipos de formatos de trabalhos práticos que poderiam utilizar um software especialista para complementação na nota final da disciplinas.
- Por fim, propõe-se um estudo mais profundo relacionando a quantidade de horas necessárias de uso de programas como esse, para que o entendimento da disciplina seja melhorado.

## REFERÊNCIAS

ASSAN, Aloísio E. **Método dos elementos finitos: Primeiros passos**. 2. ed. São Paulo: Unicamp, 2003.

CAMELO BARROCAS, Thiago. **DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA PROJETO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS VOLTADO AO ENSINO NA ENGENHARIA**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

FILHO, Avelino A. **Elementos finitos: A base da tecnologia CAE**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2000.

HIBBELER, Russell C. **Estática: Mecânica para engenharia**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LIMA, Vitor Hugo Lopes Costa et al. **APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE PROGRAMAÇÃO GNU OCTAVE EM DISCIPLINA DE ESTÁTICA PARA ENGENHARIA**. Revista de Ensino de Engenharia, v. 40, 2021.

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

SOUSA, Francisco Ivo de. **INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO NA GERAÇÃO DO FENÔMENO BRAKE SQUEAL EM FREIO A DISCO AUTOMOTIVO**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

STEWART, James. **Cálculo, volume 2**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013. p. 576 – 578.

TEIXEIRA, Fábio Gonçalves. **MODELAMENTO PARAMÉTRICO DE CURVAS E SUPERFÍCIES**. COBENGE, 2003. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Fabio\\_Teixeira15/publication/279764035\\_MODELAMENTO\\_PARAMETRICO\\_DE\\_CURVAS\\_E\\_SUPERFICIES/links/5732887008aea45ee8364615.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fabio_Teixeira15/publication/279764035_MODELAMENTO_PARAMETRICO_DE_CURVAS_E_SUPERFICIES/links/5732887008aea45ee8364615.pdf). Acesso em: mai. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza: Biblioteca Universitária, 2013. Disponível em: <https://biblioteca.ufc.br/wp-content/uploads/2019/10/guia-de-citacao-06.10.2019.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2023.