



**INSTITUTO FEDERAL**  
**GOIANO**  
Câmpus Rio Verde

**ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE**  
**ESTRUTURAS METÁLICAS VIA MASTAN2**

**LEONARDO JORGE MICHELINI**

**Rio Verde, GO**

**2021**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE  
ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE ESTRUTURAS METÁLICAS VIA  
MASTAN2**

**LEONARDO JORGE MICHELINI**

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Michell Macedo Alves

Rio Verde - GO

Maio, 2021

## SISTEMA DESENVOLVIDO PELO ICMC/USP

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

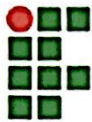
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

MM623a Michelini, Leonardo Jorge  
Análise computacional de estruturas metálicas via  
MASTAN2 / Leonardo Jorge Michelini; orientador  
Michell Macedo Alves. -- Rio Verde, 2021.  
61 p.

TCC (Graduação em Engenharia Civil) -- Instituto  
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

1. Mastan2. 2. Análise matricial de estruturas.  
3. Estruturas metálicas. 4. Recurso didático. 5.  
Análise numérica de estruturas. I. Alves, Michell  
Macedo, orient. II. Título.

Responsável: Johnathan Pereira Alves Diniz - Bibliotecário-Documentalista CRB-1 nº2376



**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- Tese
- Artigo Científico
- Dissertação
- Capítulo de Livro
- Monografia – Especialização
- Livro
- TCC - Graduação
- Trabalho Apresentado em Evento
- Produto Técnico e Educacional - Tipo: \_\_\_\_\_

Nome Completo do Autor: Leonardo Jorge Michelinei  
Matrícula: 2016102200840318  
Título do Trabalho: Análise Computacional de Estrutura Metálicas Via MASTAN2

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 11/06/2023

- O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não
- O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

1. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
2. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
3. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

\_\_\_\_\_ Rio verde \_\_\_\_\_, 07 / 06 / 2021  
Local Data

Leonardo Jorge Michelinei

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

MICHELL MACEDO Assinado de forma digital por  
ALVES:040503316 MICHELL MACEDO  
83 ALVES:04050331683  
Dados: 2021.06.13 15:02:50  
-03'00'

Assinatura do(a) orientador(a)

**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO (TC)**

ANO	SEMESTRE
2020	02


No dia 14 do mês de maio de 2021, às 20 horas e 00 minutos, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes Michell Macedo Alves, Marcel William Reis Sales e Phelippe Mendonça de Paiva, para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado “Análise Computacional de Estruturas Metálicas Via MASTAN2”, do(a) acadêmico(a) Leonardo Jorge Michelini, Matrícula nº 2016102200840318 do curso de Engenharia Civil do IF Goiano – Campus Rio Verde. Após a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela Aprovação do(a) acadêmico(a). Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que segue datada e assinada pelos examinadores.

Rio Verde, 11 de junho de 2021.

MICHELL MACEDO  
ALVES:040503316  
83

Assinado de forma digital  
por MICHELL MACEDO  
ALVES:04050331683  
Dados: 2021.06.13 14:57:00  
-03'00'

Michell Macedo Alves  
Orientador(a)



Marcel Willian Reis Sales  
Membro



Phelippe Mendonça de Paiva  
Membro

**Observação:**

( ) O acadêmico não compareceu à defesa do TC.

**LEONARDO JORGE MICHELINI**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE ESTRUTURAS METÁLICAS VIA  
MASTAN2**

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 14 de maio de 2021, pela Banca  
Examinadora constituída pelos membros:

MICHELL  
MACEDO

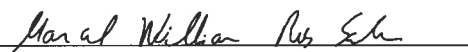
ALVES:040503316  
83

Assinado de forma digital  
por MICHELL MACEDO  
ALVES:04050331683  
Dados: 2021.06.14  
16:30:53 -03'00'

Prof. Dr. Michell Macedo Alves  
Instituto Federal Goiano -  
*campus* Rio Verde



Prof. Ms. Phelippe Mendonça de Paiva  
Mestre em Engenharia Aplicada e  
Sustentabilidade pelo IF Goiano  
*campus* Rio Verde



Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales  
Instituto Federal Goiano -  
*campus* Rio Verde

Rio Verde – GO  
Maio, 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus primeiramente, por me guiar, me abençoar e tornar isso tudo possível. Agradeço aos meus pais e irmã por todo apoio necessário para que essa jornada fosse trilhada.

Agradeço aos meus colegas de turma e aos amigos Kaique, Carol, Vanessa e Mateus, pelo apoio durante a graduação.

Por fim, agradeço a todos os professores que me ensinaram todo o conteúdo requerido para me graduar e compor esse trabalho, em especial o professor Michell, meu orientador, que me ensinou muito além das disciplinas ministradas.

## RESUMO

MICHELINI, Leonardo Jorge. **Análise Computacional de Estruturas Metálicas Via MASTAN2**. 2020. 60p. Monografia (Curso Bacharelado em Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *campus* Rio Verde, Rio Verde, GO, 2020.

O uso de programas computacionais para análises estruturais tem se tornado cada vez mais recorrente devido a otimização de processos e praticidade que os mesmos proporcionam. Neste sentido, o processo tradicional de análise com base em soluções analíticas tem sido complementado pelos *softwares* que auxiliam bastante estudantes, profissionais e pesquisadores da engenharia civil. Atualmente, o Instituto Federal Goiano – *campus* Rio Verde não possui um *software* próprio para realizar análises matriciais de estruturas tridimensionais considerando-se as não linearidades física e geométrica. Um *software* com essas características seria fundamental para o aprendizado dos discentes em disciplinas da engenharia civil e dos mestrandos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, além de ser capaz de promover a produção e publicação de artigos na área estrutural. Desta maneira, o MASTAN2 surge como uma alternativa viável por possuir a capacidade de realizar análises estruturais 2D e 3D, considerando-se a não linearidade física, não linearidade geométrica, entre outros parâmetros. O presente trabalho consiste num projeto inicial que visa apresentar o *software* MASTAN2, fornecendo as noções básicas para sua utilização e para a obtenção de diagramas de esforços solicitantes e deslocamentos em análises de primeira ordem elástica. Para isso procurou-se demonstrar diversos casos subdivididos em 8 modelos de esforços aplicados em estruturas metálicas, buscando abranger o maior número de situações possíveis e suas análises. Os 4 primeiros modelos consistem na aplicação de cargas, momento torsor e deslocamento em uma viga monoengastada. O quinto exemplo trata-se de uma viga biengastada com variação de temperatura aplicada. O sexto modelo consiste numa viga inclinada com a atribuição de carregamento distribuído. O sétimo exemplo traz a aplicação de momento torsor numa viga que está exposta nos 3 eixos. O último modelo traz a análise de segunda ordem de um pórtico pré estabelecido pelo *software*. A partir dessas aplicações e análises obteve-se diversos valores de esforços solicitantes e cargas compatíveis com aqueles atingidos por soluções analíticas. Por consequência, obteve-se um manual didático que auxiliará os estudantes e profissionais da engenharia civil no uso do programa, além de resultados semelhantes aos que são encontrados na literatura, atestando a capacidade que o *software* possui e sua viabilidade para a utilização por todos alunos e engenheiros civis.

**Palavras-chave:** mastan2, análise matricial de estruturas, estruturas metálicas, análise numérica de estruturas, recursos didáticos.



## ABSTRACT

MICHELINI, Leonardo Jorge. **Computational Analysis of Metal Structures Via MASTAN2**. 2020. 60p. Monograph (Bachelor Degree in Civil Engineering). Federal Institute of Education, Science and Technology of Goiás - Rio Verde campus, Rio Verde, GO, 2020.

The use of computer programs for analysis has become increasingly recurrent due to the optimization of processes and the practicality they provide. In this sense, the traditional analysis process based on analytical solutions has been complemented by software that greatly assist civil engineering students, professionals and researchers. Currently, the Instituto Federal Goiano - campus Rio Verde does not have its own software to perform matrix analysis of three-dimensional structures considering physical and geometric nonlinearities. A software with these characteristics would be essential for the learning of students in civil engineering disciplines and for master's students in the Graduate Program in Applied Engineering and Sustainability, in addition to being able to promote the production and publication of articles in the structural area. Thus, MASTAN2 appears as a viable alternative for having the ability to perform 2D and 3D analysis, considering the physical non-linearity, geometric non-linearity, among other parameters. The present work consists of an initial project that aims to present the MASTAN2 software, providing basic notions for its use and for obtaining diagrams of solicitation forces and displacements in first-order elastic analyses. For this, it is about demonstrating several cases subdivided into 8 models of specific efforts in metallic structures, seeking to cover the greatest number of possibilities and their analyses. The first 4 models consist of applying loads, torsor moment and displacement in a mono-mounted beam. The fifth example is a double-mounted beam with applied temperature variation. The sixth model consists of an inclined beam with a distributed transfer length. The seventh example shows the application of torsor moment on a beam that is exposed on 3 axes. The last model brings a second order analysis of a frame pre-established by the software. From these applications and evaluations, several values of requesting efforts and loads compatible with those reached by analytical solutions are obtained. Consequently, a didactic manual is obtained that will help civil engineering students and professionals in the use of the program, in addition to results similar to those found in the literature, attesting to the software's capacity and its feasibility for use by all students and civil engineers.

**Key words:** mastan2, matrix analysis of structures, metallic structures, numerical analysis of structures, teaching resources.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação tensão x deformação do aço no modelo rígido-plástico.....	15
Figura 2: Relação tensão x deformação do aço no modelo elasto-plástico.....	15
Figura 3: Relação tensão x deformação do aço no modelo elasto-plástico com endurecimento .....	16
Figura 4: Efeitos P- $\Delta$ e P- $\delta$ .....	17
Figura 5: Esquema construtivo do galpão metálico .....	18
Figura 6: Análise elástica de segunda ordem de uma estrutura tridimensional.....	19
Figura 7: Análise inelástica de segunda ordem de uma estrutura bidimensional.....	20
Figura 8: Tipos de perfis metálicos siderúrgicos.....	22
Figura 9: Tipos de perfis metalúrgicos .....	23
Figura 10: Área de trabalho do MASTAN2 .....	27
Figura 11: Aba <i>file</i> .....	28
Figura 12: Aba <i>view</i> .....	29
Figura 13: Aba <i>Geometry</i> .....	30
Figura 14: Aba <i>Properties</i> .....	31
Figura 15: Aba <i>Conditions</i> .....	32
Figura 16: Aba <i>Analysis</i> .....	33
Figura 17: Aba <i>Results</i> .....	34
Figura 18: Definição dos nós.....	35
Figura 19: Definição do elemento .....	36
Figura 20: Definição de seção .....	36
Figura 21: Definição do material.....	38
Figura 22: Definição dos graus de liberdade .....	39
Figura 23: Aplicação de força pontual .....	40
Figura 24: Análise da estrutura.....	41
Figura 25: Obtenção de resultados .....	42
Figura 26: Obtenção de diagrama de momento.....	43
Figura 27: Diagrama de força axial .....	44
Figura 28: Obtenção do deslocamento dos nós .....	44
Figura 29: Diagrama de força axial .....	47
Figura 30: Diagrama de momento torsor.....	48
Figura 31: Deslocamento dos nós.....	49
Figura 32: Reações no nó .....	50
Figura 33: Definição de elementos e condições de temperatura .....	51
Figura 34: Diagrama de força axial .....	52
Figura 35: Estrutura inclinada com carregamentos distribuídos e reação nodal .....	53
Figura 36: Diagrama de torção para viga tridimensional .....	54
Figura 37: Pórtico espacial com aplicação de cargas pontuais.....	55
Figura 38: Análise de 1ª 2ª ordem elástica .....	56

## **LISTA DE TABELA**

Tabela 1: Propriedades físicas do aço.....	21
--	----

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 JUSTIFICATIVA .....	11
1.2 OBJETIVO GERAL .....	11
1.2.1 Objetivos Específicos.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
2.1 HISTÓRICO DAS ANÁLISES ESTRUTURAIS.....	13
2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) .....	14
2.3 NÃO LINEARIDADE FÍSICA .....	14
2.4 NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA .....	16
2.5 ESTUDO DE LEITE (2016).....	17
2.6 ESTUDO SOBRE O <i>SOFTWARE</i> MASTAN2 (2020) .....	18
2.7 ESTUDO SOBRE AS ESTRUTURAS METÁLICAS .....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1 ÁREA DE TRABALHO DO MASTAN2.....	27
4.2 MODELO 1: VIGA MONOENGASTADA – CARGA PONTUAL APLICADA.....	34
4.3 MODELO 2: VIGA MONOENGASTADA – CARGA AXIAL APLICADA.....	46
4.4 MODELO 3: VIGA MONOENGASTADA – TORSOR APLICADO.....	47
4.5 MODELO 4: VIGA MONOENGASTADA – DESLOCAMENTO APLICADO.....	49
4.6 MODELO 5: VIGA BIENGASTADA – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.....	50
4.7 MODELO 6: VIGA INCLINADA – CARREGAMENTO DISTRIBUÍDO APLICADO .....	52
4.8 MODELO 7: VIGA TRIDIMENSIONAL – MOMENTO TORSOR APLICADO .....	53
4.8 MODELO 8: PÓRTICO PLANO – ANÁLISE ELÁSTICA DE SEGUNDA ORDEM.....	54
5 CONCLUSÃO.....	57
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58
APÊNDICE .....	60

## 1 INTRODUÇÃO

A opção pela construção com a utilização de estruturas metálicas tem crescido de forma considerável. Isto ocorre devido a vários fatores, sendo que um deles consiste na precisão da geometria da obra que esse tipo de técnica oferece. Diferente de outros tipos de estruturas, quando se opta pela construção metálica a precisão de projeto é da ordem de milímetros. Outra vantagem que as estruturas em aço possuem é a sua fabricação industrial, o que confere ao canteiro de obras uma maior organização, dispensando a necessidade de grandes depósitos de areia, brita, cimento, madeiras e outros materiais de construção. Neste sentido, percebe-se uma diminuição considerável na geração de entulhos, o que garante aos trabalhadores e funcionários ainda mais segurança e condições adequadas de trabalho.

Desta maneira, observa-se frequentemente o surgimento de obras, casas, e galpões que utilizam estruturas metálicas. No caso dos galpões, várias questões são consideradas na realização do dimensionamento dos mesmos, sendo o vento o maior obstáculo e o maior responsável pelo colapso de estruturas construídas em aço. Além disso, as construções que fazem a utilização das estruturas metálicas também possuem a vantagem de possuírem um curto prazo de execução, tendo em vista que os elementos são pré-fabricados, necessitando somente, desta forma, da execução e instalação adequada da estrutura no local desejado. Ademais, o processo de montagem demanda menos mão de obra e menos uso de outros materiais como areia, brita ou cimento, o que também acelera a execução da obra.

É importante ressaltar que os avanços tecnológicos nas áreas de análise e dimensionamento estrutural vêm crescendo exponencialmente, o que possibilita a execução de projetos e estruturas cada vez mais leves, esbeltas e, portanto, mais flexíveis, além de reduzir o prazo de entrega das obras. Desta forma, a tendência é que, gradativamente mais, os profissionais da área de engenharia civil utilizem programas computacionais para realizar projetos, análises e dimensionamentos, a fim de obter mais precisão e otimizar o processo de construção, além de oferecer mais características sobre as propriedades e comportamentos dos elementos que compõem as estruturas utilizadas na edificação. Por isso, faz-se necessário o estudo dos *softwares* que podem ser utilizados, e suas viabilidades, em busca de se obter as análises desejadas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista as vantagens do uso de *softwares* em análises computacionais de estruturas, é muito importante que se explore as alternativas mais acessíveis no que se refere a análises, otimizando as propriedades físicas e geométricas dos materiais a serem utilizados. Sendo assim, na verificação das estruturas metálicas realizam-se vários procedimentos de cálculo que se apresentam por demais extensos, tornando imprescindível a utilização de programas de computador em sua análise. Os *softwares* comerciais são relativamente caros e o *software* gratuito MASTAN2 aparece como uma boa alternativa para o auxílio na análise de elementos metálicos, uma vez que se trata de um programa livre de custos, disponibilizado gratuitamente.

Além disso, o MASTAN2 é capaz de reproduzir as características geométricas dos perfis metálicos e também as características físicas dos materiais, uma vez que possui uma extensa biblioteca neste sentido. Ademais, também é possível realizar análises tridimensionais e considerar-se a não linearidade geométrica e não linearidade física destes materiais. Desta forma, este *software* se torna muito indicado para estudantes e profissionais da engenharia civil que realizarão estudos quanto às estruturas metálicas, proposta do presente trabalho, já que também possui uma interface de trabalho simples com fins didáticos.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho trata da produção de material didático para auxiliar estudantes e pesquisadores da área da engenharia de estruturas na utilização do *software* MASTAN2 e na obtenção de esforços solicitantes e deslocamentos em elementos metálicos.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Apresentar detalhadamente o ambiente de trabalho do *software* MASTAN2 para possibilitar sua utilização na análise numérica de estruturas metálicas;
- Verificar como são inseridas a estrutura, suas condições de contorno e as propriedades físicas e geométricas dos elementos estruturais, especificamente, de perfis metálicos, em especial os momentos de inércia em relação aos eixos locais e global da estrutura;

- Investigar se o *software* possui capacidade de inserção de rótulas em nós internos de estruturas;
- Descrever como são aplicadas as forças externas na estrutura, dentre as quais destacam-se: força nodal, carga momento, carregamento distribuído.
- Por fim, apontar como são obtidos: deslocamentos, reações de apoio e esforços solicitantes da estrutura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO DAS ANÁLISES ESTRUTURAIS

Lisserre & Ramalho (2008) explicam em seu trabalho que a análise estrutural possui grande importância para a engenharia de estruturas uma vez que evoluções nesta área trazem benefícios de grande escala para toda a sociedade. Os autores trazem em sua obra que por muito tempo as análises estruturais eram feitas considerando os elementos isolados um do outro, ou seja, pilares, vigas e lajes de forma separada. Todavia, após o aparecimento dos computadores e *softwares*, procedimentos mais elaborados tornaram-se passíveis de aplicação. Estes programas são capazes de analisar a interação entre os variados componentes da estrutura, aproximando-se, portanto, do comportamento que a estrutura exerce na realidade.

De acordo com Silva (2012), as primeiras análises estruturais feitas para o cálculo de estabilidade de elementos tinham como única alternativa aquela que considerava apenas modelos elástico-lineares, para que se tornasse possível conhecer o comportamento adquirido pela estrutura. Como consequência, percebe-se que as estruturas construídas a mais tempo apresentam maior robustez, para que não fosse necessário, então, preocupar-se com deformações e maiores deslocamentos.

Com o passar do tempo, a tecnologia propiciou o aumento da resistência de materiais como aço e concreto, fazendo com que se tenha atualmente, cada vez mais obras com alturas elevadas, mais esbeltas e menores seções transversais. Todavia, o aumento da fissuração dos materiais e perda de rigidez também acompanharam esse desenvolvimento. Dessa forma, as análises de caráter computacional vieram a se tornar aliadas extremamente importantes para as construções, propiciando maior segurança nas obras. Os *softwares* trabalham de forma mais rigorosa e realista, pois com eles se tornou possível a consideração da perda de rigidez dos elementos estruturais (não linearidade física – NLF). (SILVA 2012)

Martha (2017) explica em seu trabalho que desde 1960 os computadores têm atuado como ferramentas importantes no que diz respeito a análise estrutural. No início, eram usados apenas nas universidades e institutos de pesquisa. Entretanto, com o passar das décadas a utilização dos *softwares* se tornou recorrente. Dessa forma, a análise estrutural também pode ser entendida como uma simulação computacional do comportamento que as estruturas adquirem.



## 2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

De acordo com Debella *et al.* (2016) o método dos elementos finitos consiste numa técnica que é utilizada em grande escala na análise estrutural. Trata-se de um método de aproximação que soluciona equações diferenciais, onde as mesmas são apresentadas no que se chama de forma fraca (Problema Variacional de Valor de Contorno). A técnica utiliza subdomínios, que também são chamados de elementos, para a construção de espaços de aproximação e, dessa forma, solucionar as equações.

Para La Rovere (2001), o MEF trabalha de forma a dividir a estrutura em um número finito de elementos de forma simplificada e em variadas dimensões, de forma que quanto maior o número de divisões, maior a precisão da análise. Dessa forma, é realizada a análise de esforços em cada nó e em seguida são gerados os diagramas dos esforços da estrutura.

Fava & Neves (2018), explicam que em 1975 surgiram os primeiros programas computacionais capazes de analisar estruturas seguindo os princípios do método dos elementos finitos. Os pioneiros foram SAP2000 V14, ANSYS, NASTRAN, entre outros. Além disso, o autor explica que os programas têm papel fundamental na modelagem de estruturas e na análise detalhada da edificação pós modelagem.

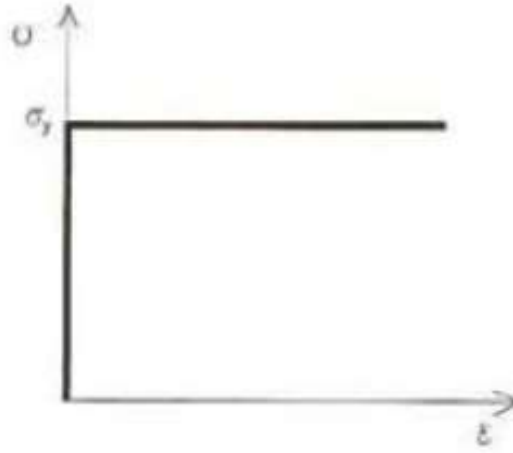
## 2.3 NÃO LINEARIDADE FÍSICA

Paiva (2009) explica em sua obra que o efeito da linearidade física se manifesta com base nas propriedades físicas do material que é utilizado na estrutura em questão. Usualmente, considera-se que os materiais se comportam de forma linear apenas quando baixos níveis de tensão são utilizados. Além disso, usando o aço como exemplo, o autor explica que o material sofre linearidade física quando os níveis de tensão são menores do que a tensão de escoamento e quando esse nível é atingido, a estrutura não possui mais capacidade para adições de tensão e não volta ao formato original, ou seja, sem deformação, uma vez que haja o descarregamento.

Para fins de explicação sobre a não linearidade do aço, Paiva (2009) utiliza três modelos que apresentam a relação entre tensão e deformação do material, são eles:

- **Modelo rígido-plástico:**

Figura 1: Relação tensão x deformação do aço no modelo rígido-plástico.

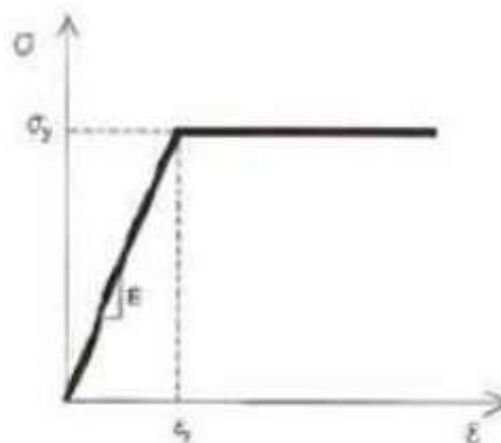


Fonte: PAIVA (2009)

Esse modelo considera que não há deformação do material para tensões inferiores a tensão de escoamento. Além disso, após atingir o nível de escoamento, as deformações demonstram constância quanto aos seus níveis de tensão, como visto na figura 01.

- **Modelo elasto-plástico**

Figura 2: Relação tensão x deformação do aço no modelo elasto-plástico



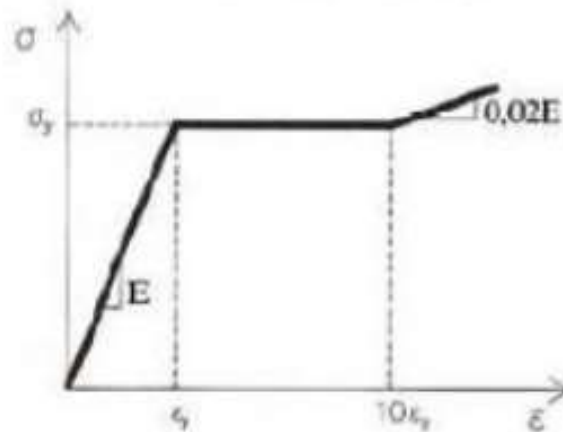
Fonte: PAIVA (2009)

É o modelo que para Paiva (2009), considera que o aço demonstra um comportamento físico linear até o momento em que atinge a tensão de escoamento. Posteriormente, se torna

constante o nível de tensão que as deformações apresentam. A figura 2 apresenta a relação entre tensão e deformação desse modelo.

- **Modelo elasto-plástico com endurecimento**

Figura 3: Relação tensão x deformação do aço no modelo elasto-plástico com endurecimento



Fonte: PAIVA (2009)

O autor explica que esse modelo é similar ao anterior. Entretanto, após atingir o escoamento, a deformação do material cresce até determinado valor, a partir do qual o material volta a resistir a adição de cargas. Esse acréscimo representa o fenômeno chamado de endurecimento do aço. A figura 3, mostra como fica a relação tensão x deformação do modelo em questão. PAIVA (2009)

## 2.4 NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA

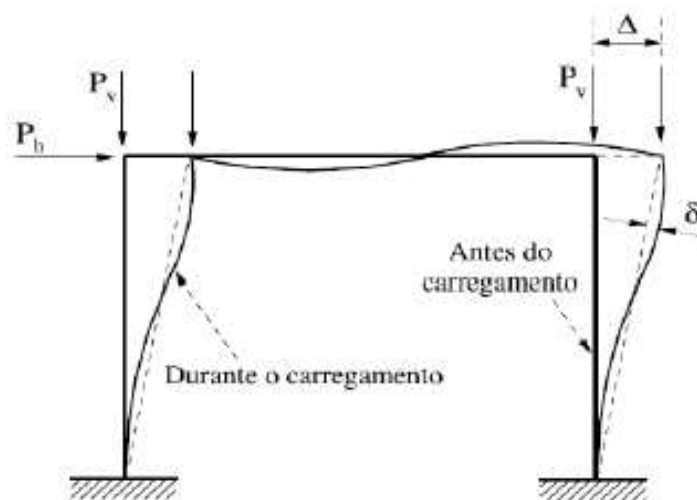
Para Pinto (1997), a não linearidade geométrica é o conceito que consiste na consideração de efeitos que se originam da mudança de posição da estrutura no espaço. Ou seja, através da posição final da estrutura no espaço, são analisados os efeitos que agem sobre a mesma. Dessa forma, o autor explica que nas análises que consideram os efeitos da não linearidade geométrica são adicionados esforços que aparecem devido ao deslocamento da estrutura e que podem, muitas vezes, ocasionar o colapso da mesma.

Mapa (2016), explica que os efeitos da não linearidade geométrica também são classificados como efeitos de segunda ordem e são ocasionados quando a geometria de uma

estrutura é alterada através de determinado carregamento. O autor chama de efeitos  $P-\Delta$  e  $P-\delta$  os efeitos globais e locais, respectivamente.

Paiva (2009), considera que o efeito  $P-\Delta$  é aquele deslocamento de uma extremidade da barra em relação a uma outra, enquanto que o efeito  $P-\delta$  é um deslocamento que considera a situação já deslocada de uma barra em relação a sua corda. Estes efeitos são demonstrados na imagem a seguir:

Figura 4: Efeitos  $P-\Delta$  e  $P-\delta$



Fonte: SILVA (2009)

Interpretando a figura 4, percebe-se que as cargas verticais e horizontais geram deslocamentos à estrutura. Uma análise de segunda ordem, ou não linear geométrica, é aquela que considerará a adição de esforços que se originam a partir da ocorrência desses deslocamentos, o que fornece uma consideração mais precisa do que acontece na prática quando uma estrutura é exposta a ações externas.

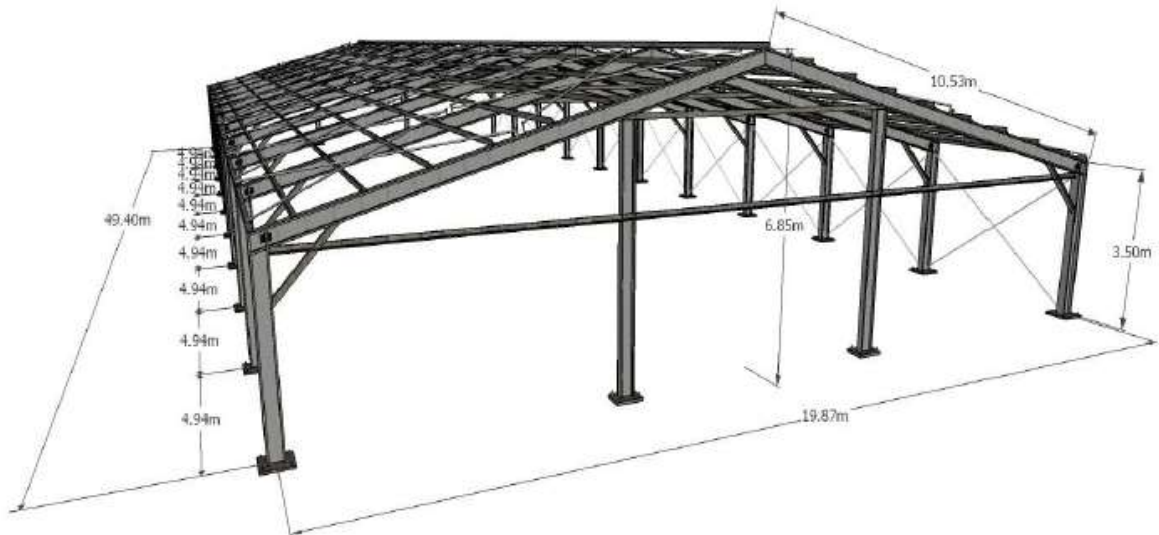
## 2.5 ESTUDO DE LEITE (2016)

A pesquisa bibliográfica que segue trata da importância de se considerar o efeito da ação do vento e peso próprio em edificações construídas em aço e estruturas metálicas, bem como a importância da exploração de *softwares* mais eficazes para diversos tipos de análises estruturais.

Leite (2016) desenvolveu um estudo que buscou analisar o comportamento dos galpões industriais sob efeito da sucção devido à ação do vento, considerando o mesmo, sendo um carregamento variável, como, na verdade, um carregamento estático, de acordo com a NBR

6123:1988. O autor utilizou quatro modelações diferentes, as quais se diferenciam na forma como se dá a amarração das telhas metálicas com a estrutura do plano da cobertura. As considerações de cálculo foram feitas com o auxílio do programa ANSYS.

Figura 5: Esquema construtivo do galpão metálico



Fonte: LEITE (2016)

A figura 5 explicita o modelo de galpão metálico que foi analisado pelo autor. O mesmo utilizou de coeficientes ponderados que estão presentes na norma e analisou as mudanças de valores obtidos quando se varia o modelo de amarração entre telhas e estrutura. Ao analisar a estrutura sob efeito de sobrepressão do vento o autor conclui que as telhas do galpão da cobertura se apoiam sobre as terças, o carregamento fica distribuído pelos elementos estruturais de forma equilibrada. Entretanto, quando o vento provoca sucção na estrutura, os pontos solicitados serão os pontos de amarração entre telhas e terças, gerando esforços que podem provocar variações superior as resistentes, o que pode acarretar a perda da funcionalidade e podendo até, causar instabilidade no pórtico principal. (LEITE, 2016)

## 2.6 ESTUDO SOBRE O SOFTWARE MASTAN2 (2020)

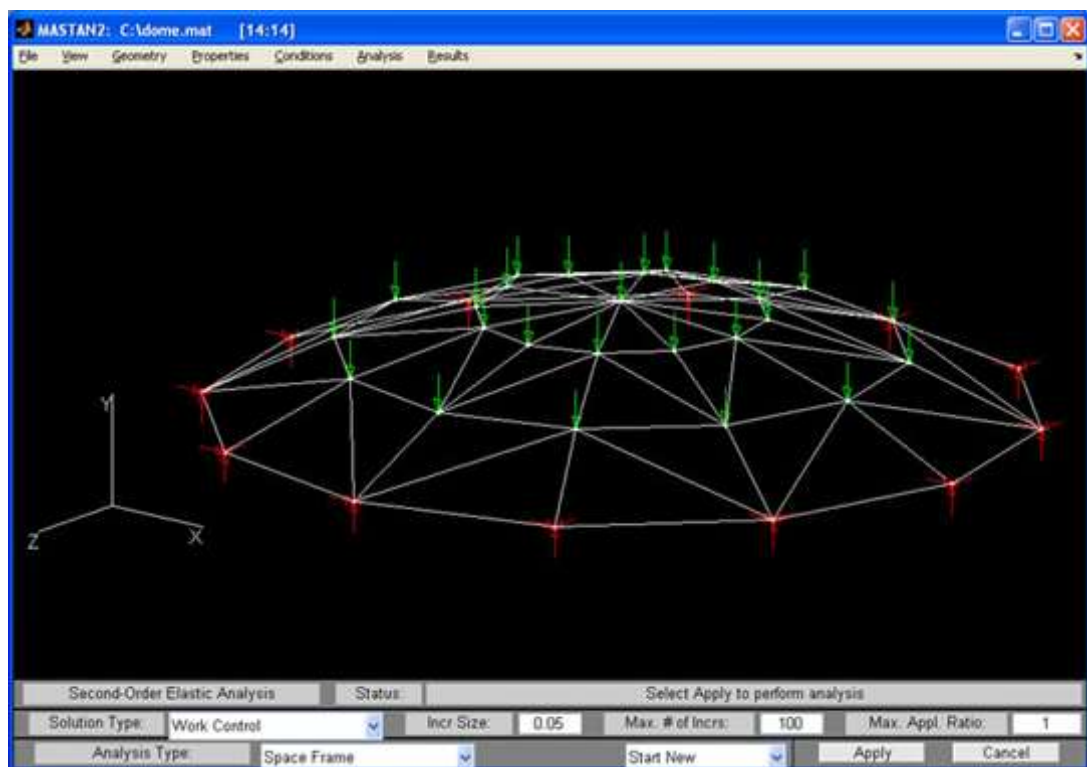
De modo geral, o MASTAN2 (2010) é semelhante aos *softwares* de análise estrutural comercialmente utilizados. No entanto, o número de opções pré e pós processuais são reduzidos, de forma que o tempo necessário para que o usuário se torne proficiente em sua utilização seja reduzido.

As análises lineares e não lineares do programa são baseadas nas formulações teóricas e numéricas apresentadas no texto *Matrix Structural Analysis, 2nd Edition*, de McGuire, Gallagher e Ziemian. O *software* é bastante indicado para demonstrações, revisões de exemplos e solução de problemas, além de ser útil para análises de performance e estudos de design.

Com o uso do MASTAN2, o usuário também possui a possibilidade de desenvolver e implementar análises alternativas ou adicionais diretamente pelo programa. Esse *software* é baseado no MATLAB, um programa que faz análises numéricas e de dados.

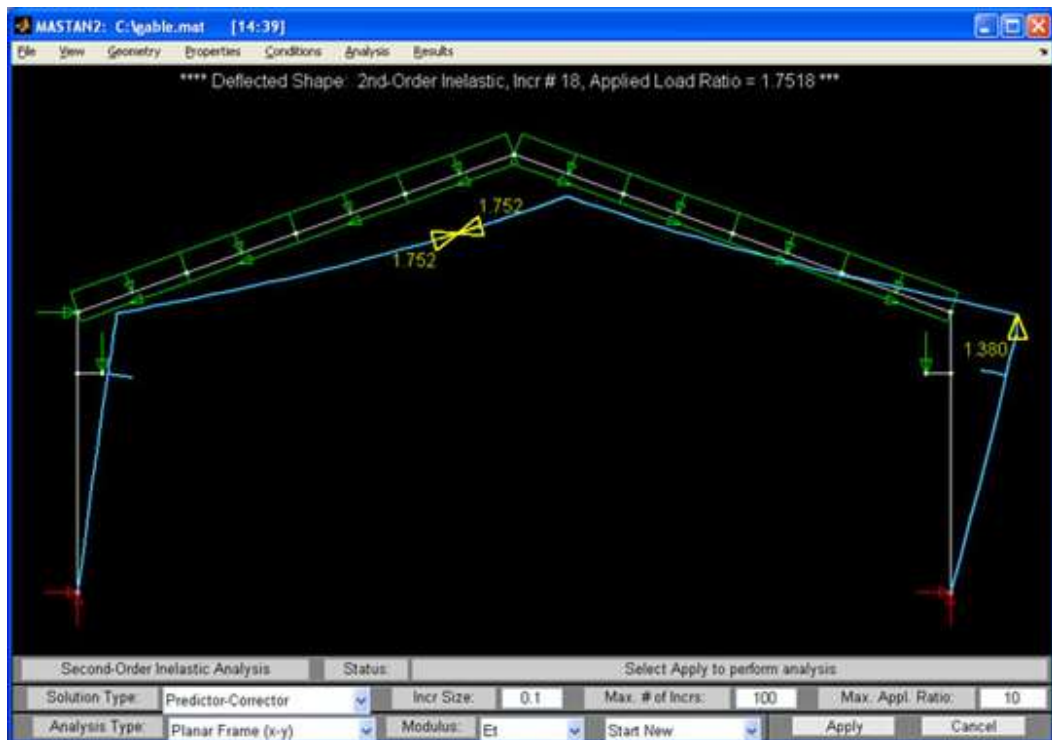
O MASTAN2 é um *software* livre e não comercial. É capaz de realizar análises plásticas e elásticas, além de considerar efeitos de segunda ordem, ou seja, não linearidade geométrica. Outro ponto forte, é que através desse *software* também é possível calcular estruturas tridimensionais.

Figura 6: Análise elástica de segunda ordem de uma estrutura tridimensional



Fonte: TRINDADE (2001)

Figura 7: Análise inelástica de segunda ordem de uma estrutura bidimensional



Fonte: TRINDADE (2001)

As figuras 6 e 7 demonstram algumas das análises que o programa computacional MASTAN2 é capaz de realizar. A figura 6 demonstra uma estrutura tridimensional cuja análise executada é a elástica de segunda ordem. Já a figura 7 explicita uma estrutura bidimensional passando por análise inelástica de segunda ordem, demonstrando qual o comportamento da estrutura após sofrer carregamentos de força.

## 2.7 ESTUDO SOBRE AS ESTRUTURAS METÁLICAS

De acordo com Nardin (2008), o aço possui várias vantagens construtivas em relação ao concreto, como por exemplo: alívio das fundações, uma vez que a maior resistência do aço faz com que seja possível a realização de um projeto mais leve, amenizando os custos em infraestrutura. Além disso, o uso de estruturas metálicas promove a dispensa de escoramento, instalação imediata de lajes, redução da movimentação de materiais diversos, entre outras vantagens. Por consequência, obtêm-se um canteiro de obras mais organizado, menor, que gera menos entulho, acarretando em melhores condições de trabalho para os funcionários. Ademais, construções baseadas em estruturas metálicas levam menos tempo para serem realizadas,

proporcionam um ótimo alinhamento da construção e são menos nocivas ao meio ambiente, uma vez que 50% do aço produzido no mundo origina-se de reciclagem.

Entretanto, segundo Guanabara (2010), uma das desvantagens da utilização de estruturas metálicas é a impossibilidade de moldar essas peças na obra. Além disso, a variedade de geometria das peças se limita àquelas disponibilizada pelos fabricantes. Dessa forma, cabe ao engenheiro buscar o perfil geométrico que melhor se adequa aos objetivos da obra. Logo, é fundamental que se conheça as propriedades físicas do aço e que se saiba que as mesmas variam de acordo aos diferentes materiais que são implementados na liga. Por exemplo, quanto mais carbono presente, maior a resistência e fragilidade do aço, e menor resistência a tração.

Tabela 1: Propriedades físicas do aço

<b>Constante física</b>	<b>Valor</b>
Módulo de elasticidade, $E$	200.000 Mpa
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,3
Coefficiente de dilatação térmica, $\beta$	$12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Massa específica, $\rho$	7.850 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade transversal do aço, $G$	77.000 MPa

Fonte: NBR 8800:2008

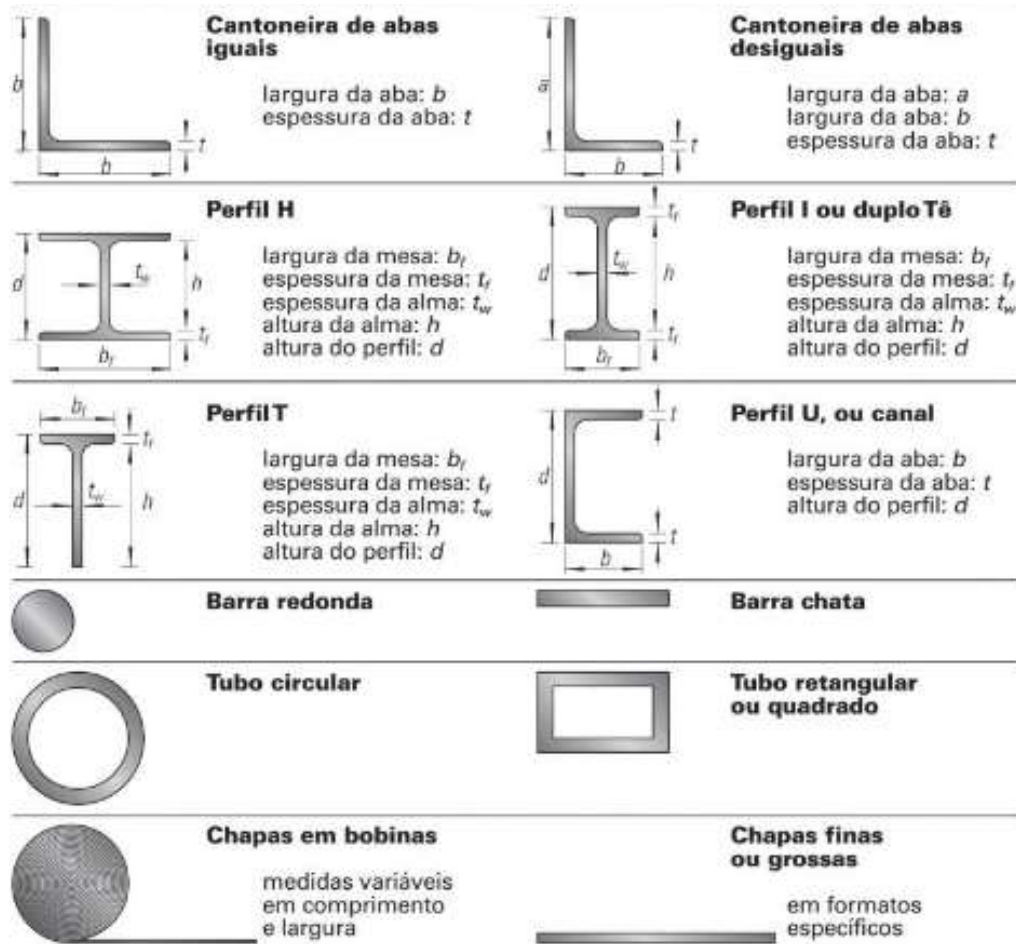
A tabela 1 mostra as constantes físicas do aço, que consistem nas propriedades permitidas para estruturas pela NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Segundo Bragança (2001), as principais características geométricas das estruturas metálicas são:

- Área;
- Centro de gravidade;
- Momentos de inércia;
- Produto de inércia;
- Raio de giração;
- Momento resistente elástico;
- Momento resistente plástico.

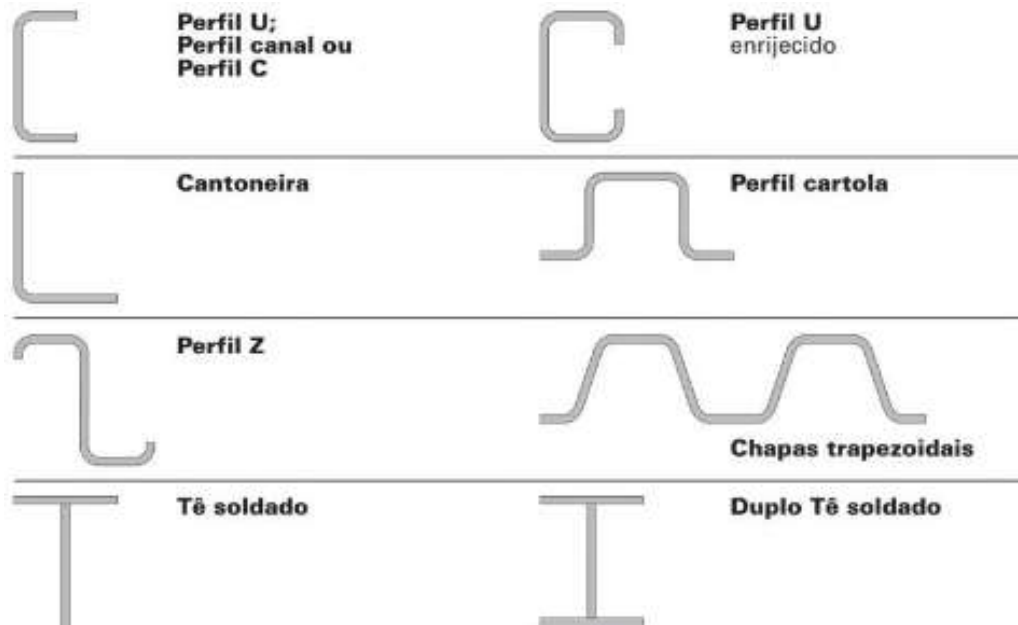


Figura 8: Tipos de perfis metálicos siderúrgicos



Fonte: BRAGANÇA (2001)

Figura 9: Tipos de perfis metalúrgicos



Fonte: BRAGANÇA (2001)

As figuras 8 e 9 demonstram os tipos de perfis metálicos produzidos siderúrgica e metalurgicamente, bem como suas medidas, disponibilizados pela indústria e passíveis de seleção pelos engenheiros civis para a escolha do perfil mais adequado ao tipo de obra e função desejada.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A principal ferramenta para este trabalho é o *software* MASTAN2, um programa totalmente gratuito, capaz de computar estruturas com as características que o usuário impor e realizar análises elásticas, plásticas, bidimensionais e tridimensionais. Seu uso ainda não é muito difundido entre profissionais e estudantes da engenharia civil e sua linguagem está em inglês. Entretanto, o *software* surge como uma alternativa viável e prática aos outros programas já utilizados que, muitas vezes, tem custos para serem utilizados. Além disso, o mesmo possui uma interface fácil de ser entendida e seus comandos são bem intuitivos, o que diminui consideravelmente o tempo para que o usuário possa usufruir adequadamente de todas as qualidades que o programa oferece.

O presente trabalho trata-se de um estudo inicial, qualitativo e exploratório, no qual serão analisados os recursos computacionais para determinação dos esforços solicitantes de estruturas metálicas por meio do *software* MASTAN2. Para isso, primeiramente buscou-se dar uma explicação aprofundada sobre o ambiente de trabalho do *software*, explicando a função de cada opção das abas existentes no menu superior do programa, de modo que futuros usuários do programa possam recorrer a este trabalho e esclarecer as variadas funções presentes no mesmo. Portanto, cada aba do programa e suas ramificações foram definidas e explicadas, de forma a dar uma visão geral de cada comando e suas utilidades.

Ademais, de forma a desenvolver um manual didático, num primeiro modelo, buscou-se detalhar o processo para que uma estrutura qualquer seja inserida no programa. Por isso, explicou-se desde o lançamento dos nós e elementos, passando por características físicas e geométricas do material, até por fim, as análises que indicam diagramas de esforços e comportamentos que a estrutura adquire ao sofrer ações locais ou globais. Neste primeiro modelo, soluções analíticas são demonstradas, para que haja uma comparação entre os resultados fornecidos pelo *software* e aqueles encontrados por meio de equações encontradas na literatura.

Posteriormente, mais sete modelos de situações envolvendo determinadas estruturas metálicas foram abordados, para que fossem envolvidas o maior número de variantes passíveis de ocorrência, como por exemplo carga pontual, carga axial, momento torsor, variação de temperatura, carga distribuída, etc. Cada modelo possui sua respectiva imagem mostrando uma

análise coerente, seja na forma de diagramas de esforços ou deslocamentos de nós e deflexão da estrutura.

O primeiro modelo estrutural implementado no software foi uma viga monoengastada. Todo o processo de inserção da estrutura, assim como a definição das condições de contorno e graus de liberdade dos apoios foram detalhadamente explicados nesse exemplo. Para esse exemplo, optou-se por aplicar uma carga pontual na extremidade da viga e obter os diagramas de cortante, momento e deslocamento dos nós, averiguando se os resultados são compatíveis com aqueles encontrados na literatura. Além disso, também ficou atestado com o uso de equações e soluções analíticas que os valores obtidos estão coerentes.

No segundo exemplo, repetiu-se a estrutura do modelo anterior. Entretanto, foi atribuída uma carga axial ao elemento para que fosse aferido como o programa fornece diagramas de outros esforços, além de examinar se o diagrama obtido estaria de acordo com o esperado.

O terceiro modelo também consiste numa viga monoengastada, todavia com a atribuição de um momento torsor. Nesta oportunidade, além do diagrama de momento, também foi possível obter os deslocamentos dos nós e analisar o comportamento da estrutura frente a condição imposta. É importante ressaltar que os deslocamentos variam de acordo com o material, que neste caso é o aço. Para esse tipo de análise, fez-se o uso da biblioteca própria do *software* que se encontra em *database*, optando por cano metálico.

No quarto exemplo, procurou-se realizar o processo inverso do modelo anterior. Desta forma, foi atribuído ao elemento o deslocamento obtido anteriormente, para que fosse aferido se o mesmo momento torsor seria atingido. Através das reações dos nós foi possível atestar e concluir sobre essa problemática.

O quinto modelo de estrutura trata-se de uma viga biengastada, na qual optou-se por aplicar uma variação de temperatura e analisar como o elemento metálico se comportaria. Para isso os graus de liberdade das duas extremidades foram restringidos e a variação de temperatura foi imposta de forma que o elemento só poderia sofrer tração ou compressão. As condições para a aplicação dessa situação são explicadas e por meio do diagrama de força axial foi possível concluir como o elemento se comporta devido tal aplicação.

No sexto exemplo, foi inserida no programa uma viga inclinada. Posteriormente, atribuiu-se cargas distribuídas para que fosse verificado como o programa aplica esse tipo de

carga e se o mesmo utiliza coordenadas locais ou globais para isso. Ademais, foi possível realizar uma aferição sobre as reações nodais causadas pelas cargas aplicadas.

O sétimo exemplo trata-se uma viga que está disposta nos três eixos, são eles: x, y e z. Ademais, foram atribuídos momentos torsões de mesmo valor a estrutura nos três eixos. Por fim, buscou-se atestar o valor resultante dos momentos por meio do diagrama e averiguar se as reações nodais teriam o mesmo valor das torções aplicadas e em qual sentido estariam.

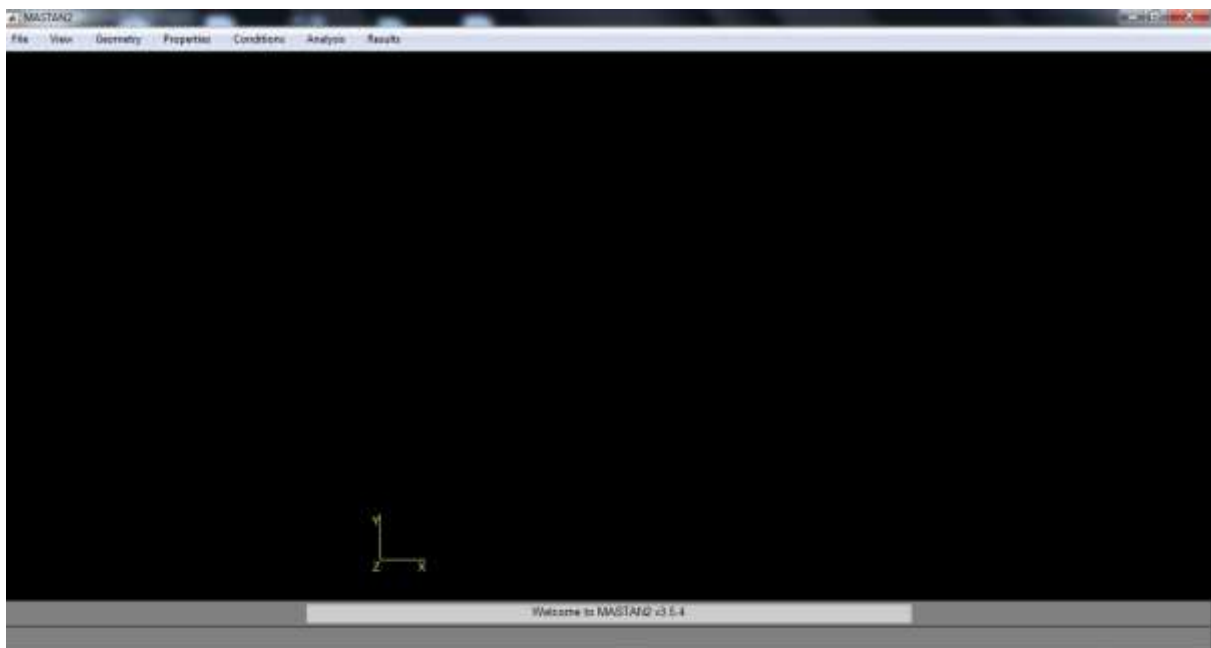
Por fim, o último exemplo trata-se de um pórtico pré estabelecido pelo programa e sua análise de segunda ordem. Foi demonstrado o processo de inserção dessa estrutura no *software* e como é feita e interpretada a análise, de forma a demonstrar como os elementos se comportam quando são considerados os esforços originados dos deslocamentos que vão ocorrendo devido a aplicação de cargas pontuais em nós definidos pelo usuário.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ÁREA DE TRABALHO DO MASTAN2

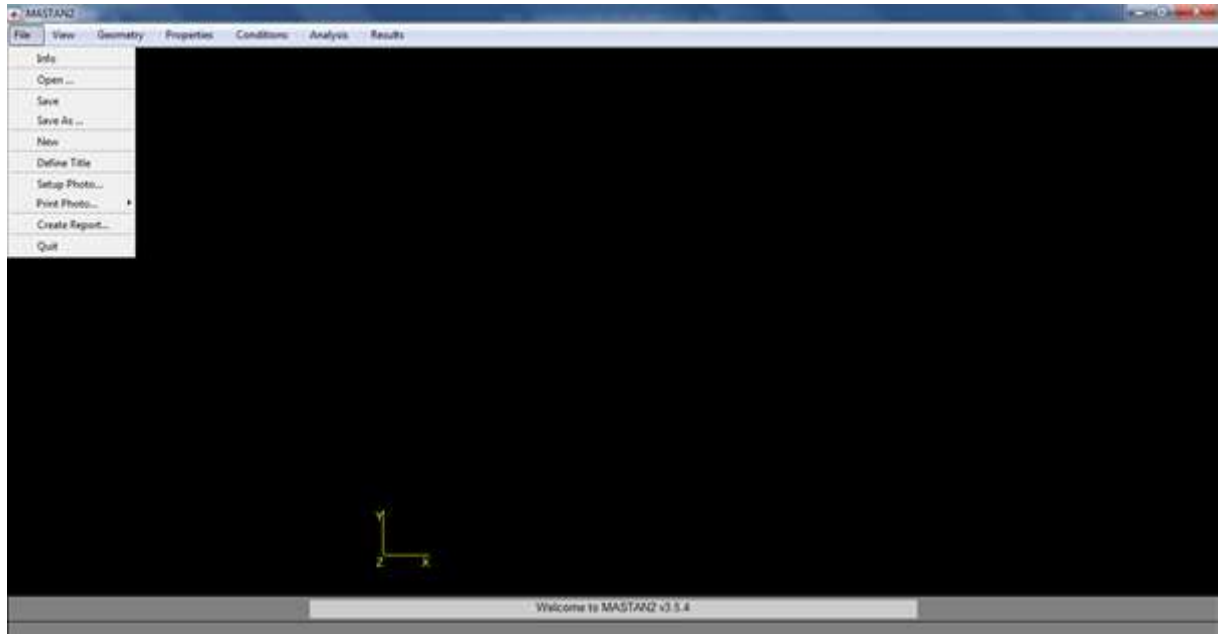
A área de trabalho do MASTAN2 foi produzida de forma que as abas que precedem os comandos fossem dispostas de forma que o usuário possa perceber o processo desde a concepção da estrutura até o momento de analisá-la.

Figura 10: Área de trabalho do MASTAN2



Fonte: O autor (2021)

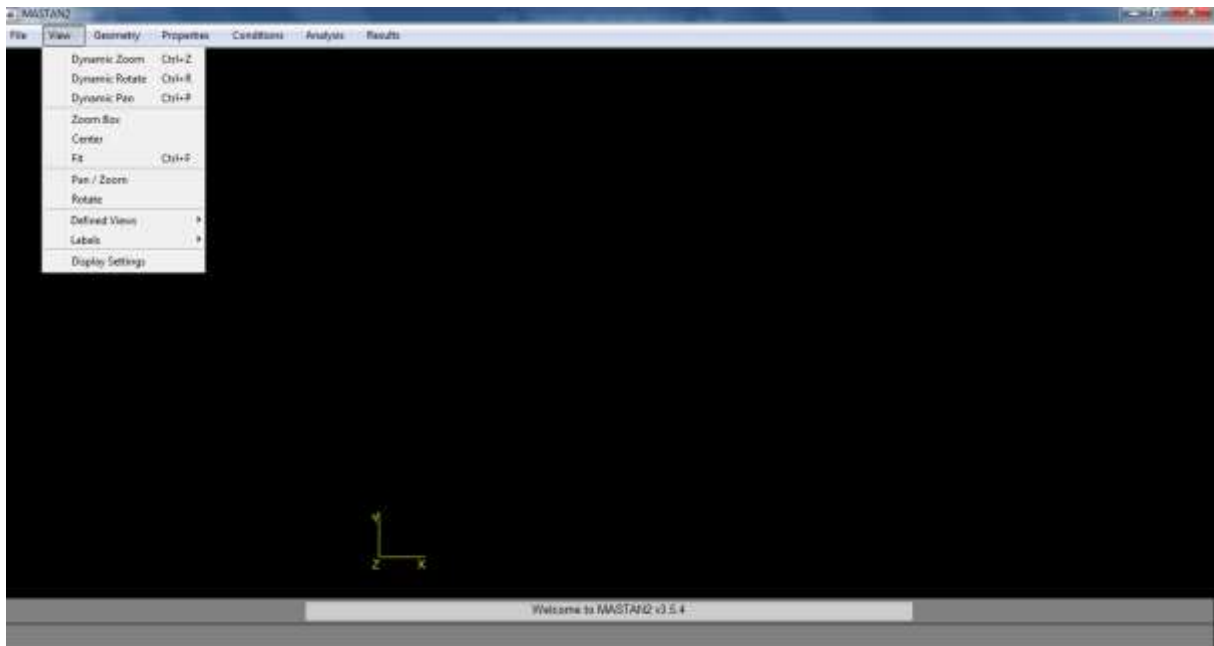
A figura 10 mostra a área de trabalho inicial do MASTAN2. O programa foi desenvolvido de forma a ter uma utilização intuitiva e de fácil aprendizado. Dessa forma, o *software* apresenta uma divisão de dois menus que facilita o trabalho do usuário. No topo da área de trabalho é possível encontrar várias abas, as quais quando selecionadas oferecem uma série de opções para aquele que utiliza o programa. Já na barra que se encontra na parte inferior da tela, os valores e parâmetros são estabelecidos, de forma a dar as características necessárias para que o programa funcione corretamente e execute todas suas funções. Já no meio da tela, na parte escura, é onde a estrutura será desenhada e poderá ser visualizada.

Figura 11: Aba *file*

Fonte: O autor (2021)

Em “*file*”, ou arquivo em português, algumas opções são oferecidas. Entre elas:

- *Info*: Apresenta informações sobre o MASTAN2;
- *Open*: Executa um arquivo já existente do MASTAN2;
- *Save* e *Save as*: Salva no computador um arquivo criado do MASTAN2;
- *New*: Começa um arquivo novo, ignorando um modelo já existente na tela;
- *Define title*: Define a descrição de um modelo qualquer;
- *Setup photo* e *Print photo*: Dá opções de foto e tira a foto da tela atual;
- *Create report*: Dá a opção de escrever um relatório;
- *Quit*: Sair do MASTAN2.

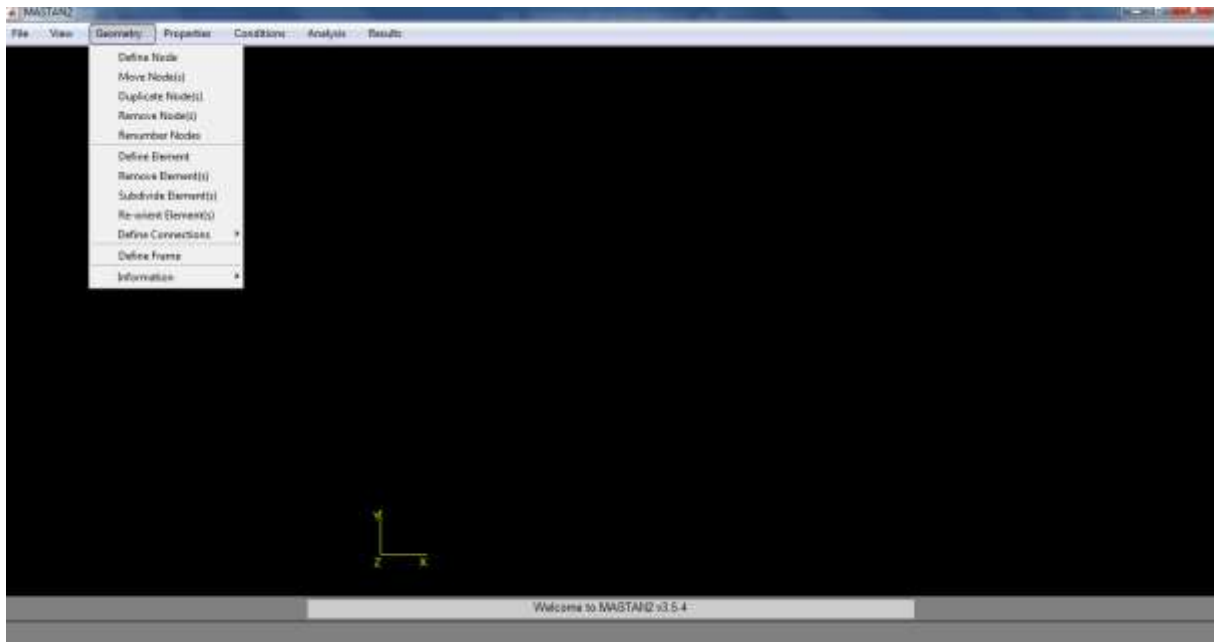
Figura 12: Aba *view*

Fonte: O autor (2021)

Em “*view*”, ou vista em português, é possível definir opções de visualização, como:

- *Dynamic zoom, rotate, pan*: É possível ajustar o zoom, rotacionar, ou arrastar utilizando o mouse e definindo a melhor vista.
- *Zoom box*: Com um retângulo cria o centro da vista que o usuário preferir;
- *Center*: Com um clique, cria o centro da vista que o usuário preferir;
- *Fit*: O programa se ajusta para mostrar todos os elementos criados;
- *Pan / Zoom*: Ajusta a vista de forma manual;
- *Rotate*: Adiciona rotação sobre um eixo;
- *Defined view*: Seleciona uma vista oferecida pelo próprio programa;
- *Labels*: Liga e desliga a vista de elementos como nós, números, vetores e outros;
- *Display settings*: Controla opções de exibição da tela.

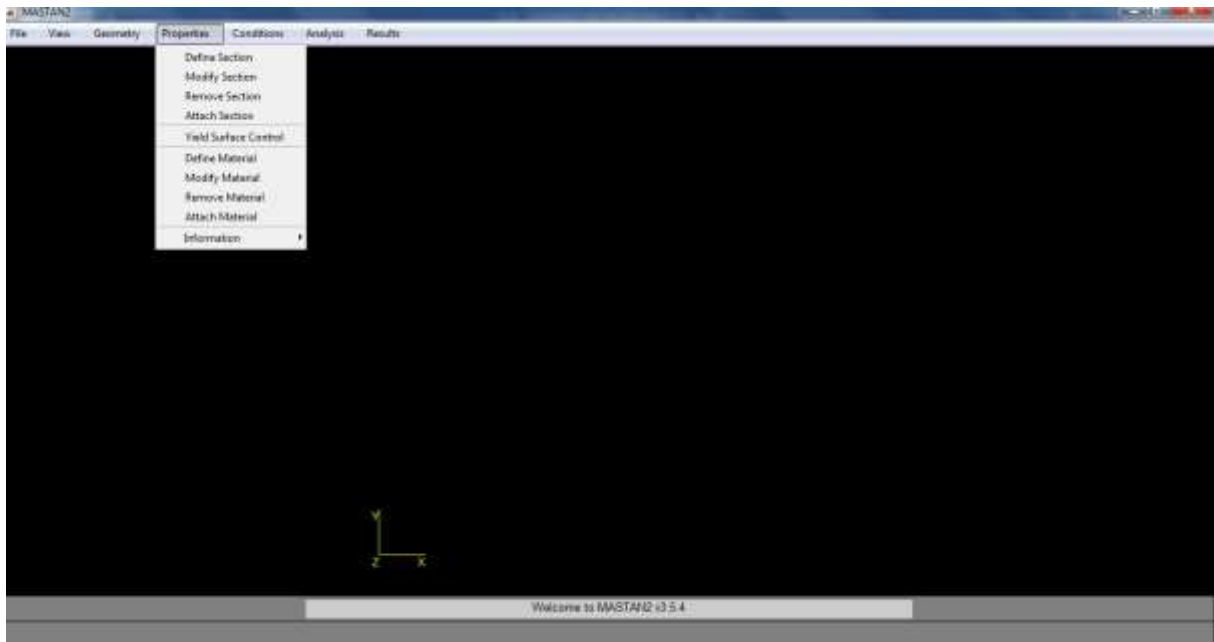


Figura 13: Aba *Geometry*

Fonte: O autor (2021)

Em “*geometry*”, ou geometria em português, se inicia a criação das estruturas.

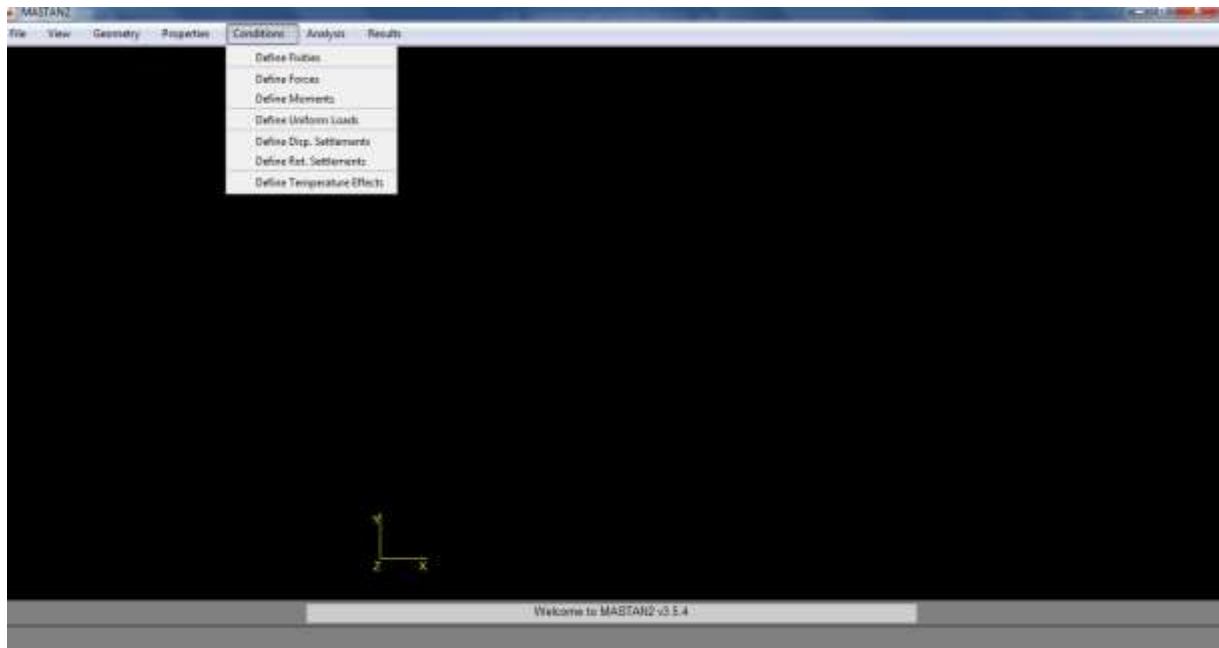
- *Define node*: Cria um nó a partir de coordenadas x, y e z;
- *Move node*: Move um nó a partir das coordenadas x, y e z;
- *Duplicate node*: Copia um nó na direção selecionada;
- *Remove node*: Exclui um nó existente;
- *Renumber nodes*: Muda a sequência numérica dos nós;
- *Define element*: Cria um elemento manualmente clicando em um nó já existente;
- *Remove element*: Exclui um elemento já existente;
- *Subdivide element*: Transforma um elemento em mais elementos.
- *Re-orient element*: Muda a orientação do eixo de um elemento;
- *Define connections*: Muda a restrição à flexão e torção de um elemento;
- *Define frame*: Cria um quadro ortogonal de duas ou três dimensões;
- *Information*: Oferece informação sobre um nó ou elemento.

Figura 14: Aba *Properties*

Fonte: O autor (2021)

Em “*Properties*”, ou propriedades em português, continua-se caracterizando a estrutura, o material e seção a serem utilizados.

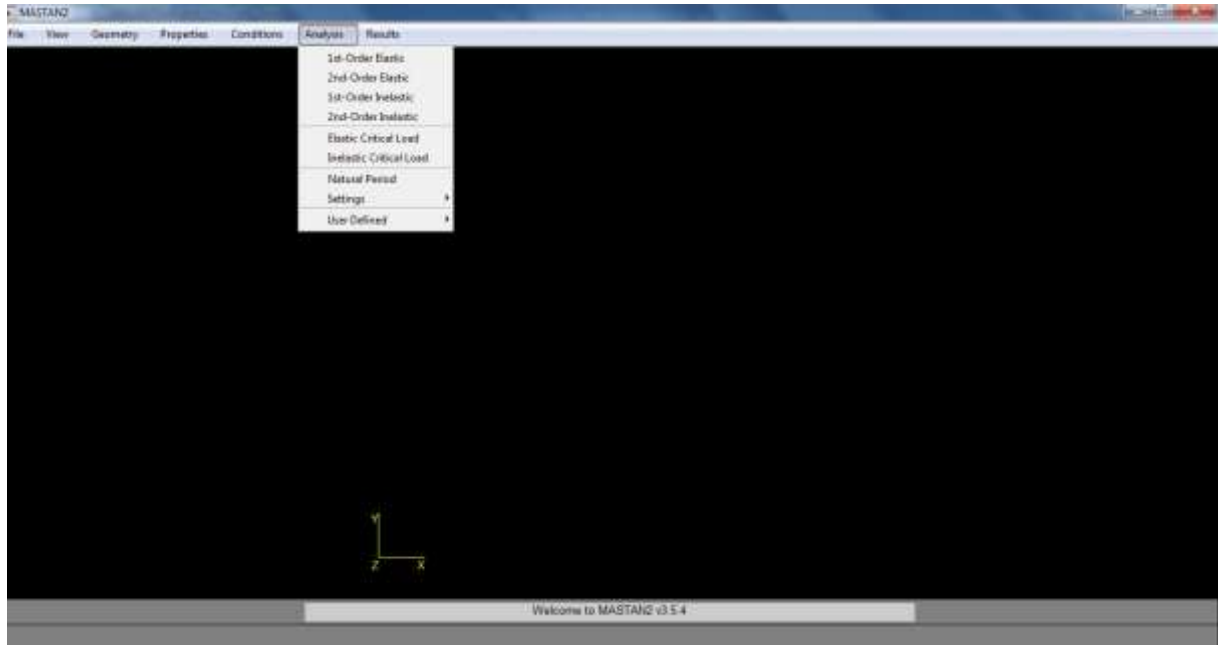
- *Define section*: A seção é definida completando os valores de área, inércia, módulo de seção plástica, entre outros;
- *Modify section*: Modifica uma seção existente;
- *Remove section*: Exclui uma seção existente;
- *Attach section*: Decide a seção dos elementos;
- *Yield Surface Control*: Mostra gráficos de superfície e permite seu controle;
- *Define material*: É possível definir um material completando características como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade;
- *Modify material*: Modifica um material pré-estabelecido;
- *Remove material*: Apaga um material;
- *Attach material*: Adiciona o material estabelecido aos elementos;
- *Information*: Oferece informação sobre o material ou seção dos elementos.

Figura 15: Aba *Conditions*

Fonte: O autor (2021)

Em “*conditions*”, ou condições em português, é possível decidir graus de liberdade dos apoios, forças, momentos, carregamentos que serão aplicados à estrutura em análise.

- *Define fixities*: Define graus de liberdade dos nós tanto em translação quanto rotação;
- *Define forces*: Aplica força concentrada a um nó;
- *Define moments*: Aplica momento a um nó;
- *Define uniform loads*: Define carregamentos uniformes localmente distribuídos ao longo dos eixos de um elemento;
- *Define disp. Settlements e rot. Settlements*: Define valores de translação e rotação aos graus de liberdade dos nós;
- *Define temperature effects*: Aplica influência dos efeitos de temperatura a uma estrutura.

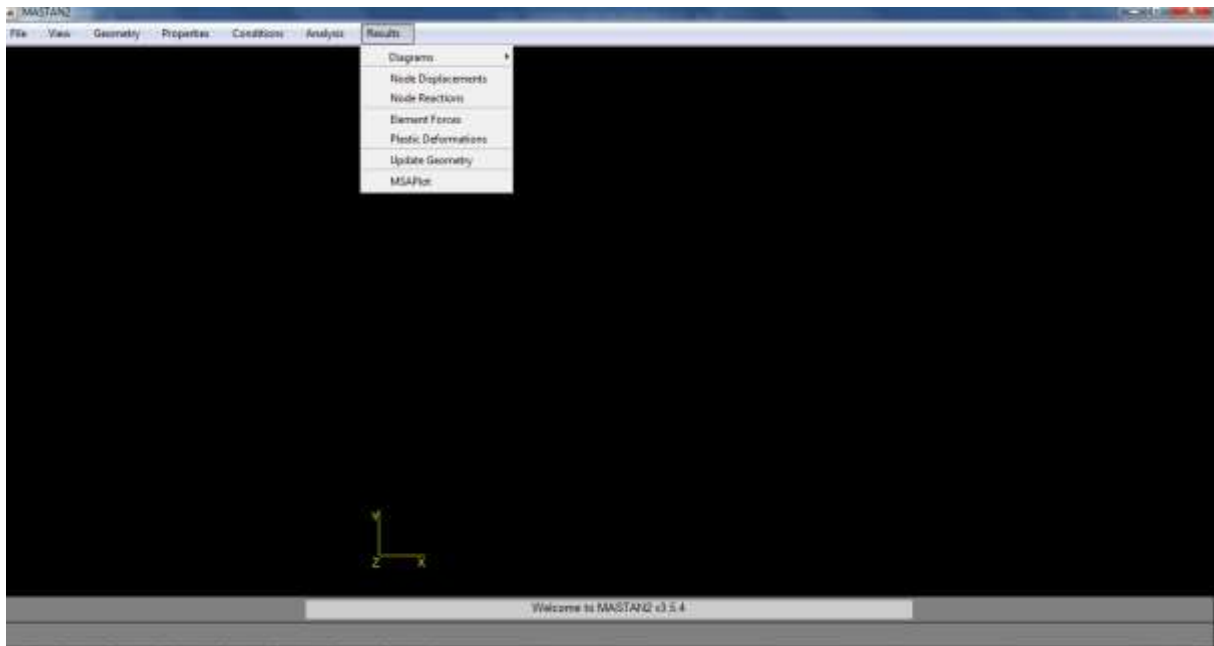
Figura 16: Aba *Analysis*

Fonte: O autor (2021)

Em “*analysis*”, ou análises em português, na figura 16, é possível definir por qual análise a estrutura será submetida.

- *1st order elastic*: 1ª ordem elástica: material elástico linear sem a consideração de NLG
- *2nd order elastic*: 2ª ordem elástica: material elástico linear com a consideração de NLG;
- *1st order inelastic*: 1ª ordem inelástica: material não linear sem a consideração de NLG
- *2nd order inelastic*: 2ª ordem inelástica: material não linear com a consideração de NLG;
- *Elastic e inelastic critical load*: Define parâmetros de análise para carregamento crítico elástico e inelástico;
- *Natural period*: Análise da influência da massa e aceleração da gravidade juntamente com as forças aplicadas;
- *Settings*: Escolha de definições;
- *User defined*: Análise feita a partir de módulos definidos pelo próprio usuário.

Figura 17: Aba Results



Fonte: O autor (2021)

Em “*results*”, ou resultados em português, na figura 17, é possível visualizar os diagramas elaborados pelo programa para análises de comportamento da estrutura, cortantes, momentos, deslocamentos, entre outros.

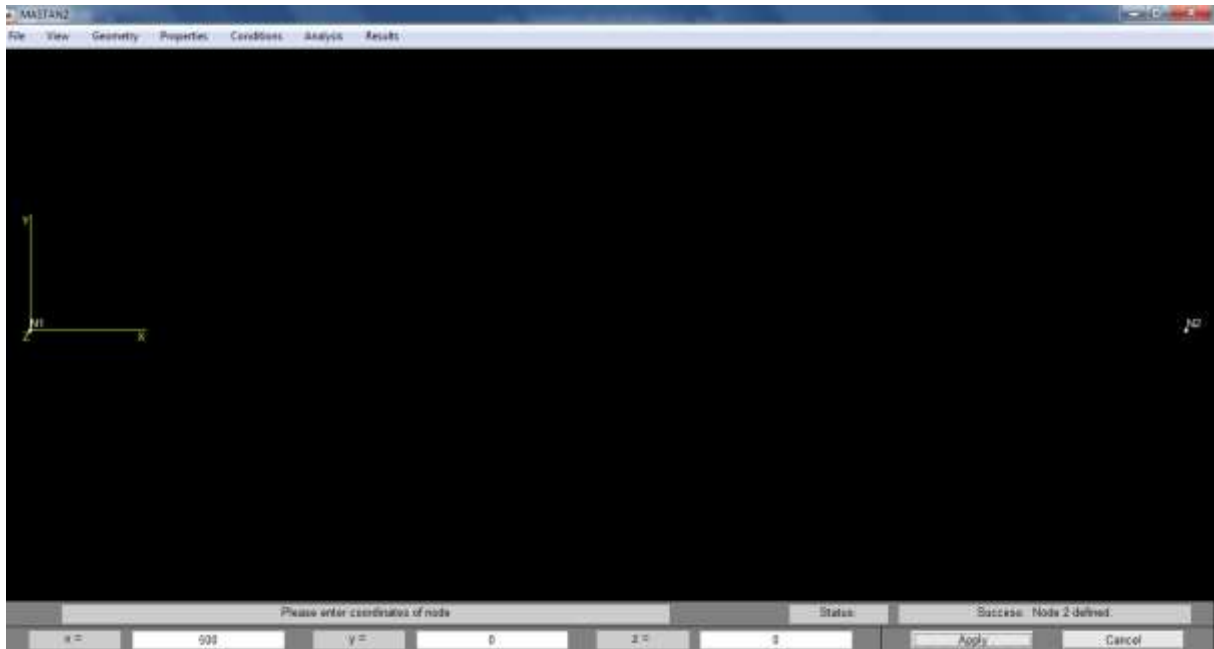
- *Diagrams*: Oferece diagramas de deslocamento da estrutura, forças nos elementos, cortantes, torção ou flexão;
- *Node displacements e reactions*: Oferece o deslocamento ou reação de determinado nó;
- *Elements forces*: Mostra as forças e momentos existentes ao longo do comprimento do elemento;
- *Plastic deformations*: Oferece o deslocamento inelástico axial e maior ou menor rotação axial de um elemento;
- *Update geometry*: Oferece a geometria atualizada da estrutura;
- *MSAPlot*: Inicia uma operação que permite plotar as curvas das análises de resultados.

#### 4.2 MODELO 1: VIGA MONOENGASTADA – CARGA PONTUAL APLICADA

Com o intuito de melhor explicar o processo que deve ser seguido até a criação final de uma estrutura no programa, foi escolhido como modelo principal uma viga monoengastada. Dessa forma, será feita uma explicação detalhada dos comandos que devem ser executados para

que o programa crie a estrutura, a analise, e dê resultados e valores que poderão ser interpretados da forma que o usuário preferir.

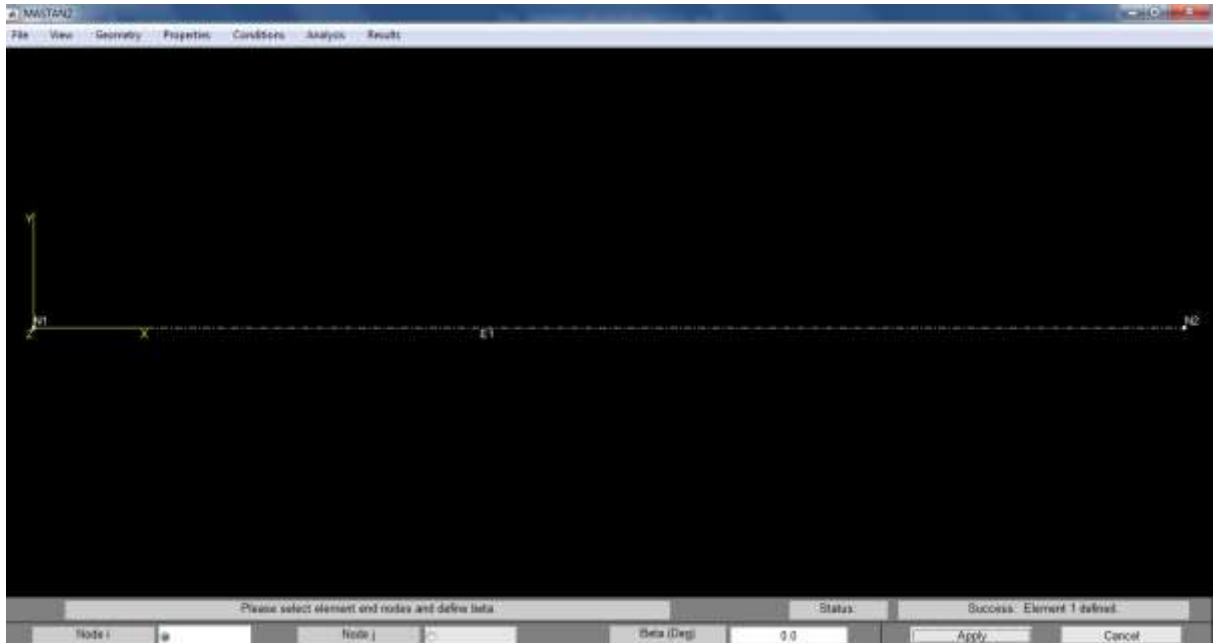
Figura 18: Definição dos nós



Fonte: O autor (2021)

Primeiramente define-se os nós, clicando em *geometry, define nodes*. No menu inferior, é possível detalhar a partir de coordenadas x, y e z onde ficarão os nós. No exemplo, o nó 1 (N1) fica em 0, 0, 0 e o nó 2 (N2) fica em 500, 0, 0. Após, preencher os valores das coordenadas, é necessário clicar em *apply*.

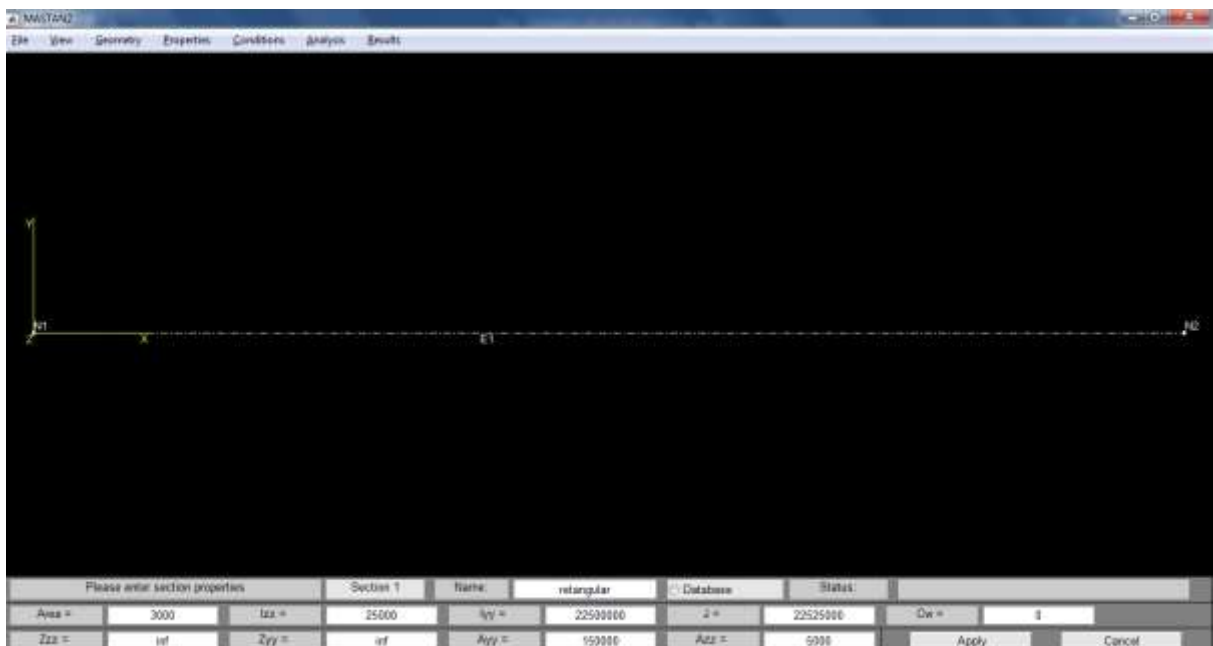
Figura 19: Definição do elemento



Fonte: O autor (2021)

Posteriormente, cria-se um elemento, acessando *geometry, define element*. Clica-se em N1 e depois em N2, demonstrando o início e o fim do elemento (*Node i* e *node j*). Ao clicar em *apply*, o elemento (E1) será criado.

Figura 20: Definição de seção



Fonte: O autor (2021)

Em *properties, define section*, algumas características são solicitadas. Entre elas, o nome que neste exemplo será “retangular”. Destaca-se também *area*, ou área da seção,  $I_{zz}$  e  $I_{yy}$ , que são as inércias referentes ao eixo em questão. Ao pensar no eixo z, que está saindo e entrando na tela, pela regra da mão direita têm-se que a peça estaria fletindo para cima ou para baixo, ou seja, verticalmente. Já ao pensar no eixo y, a forma como a estrutura fletiria, pela regra da mão direita, seria saindo ou entrando na tela. Já o  $J$ , seria a peça torcendo no eixo axial, no caso eixo x, que coincide com o eixo da peça.

O modelo escolhido possui em sua seção transversal uma base de 300 mm e uma altura de 10 mm, logo sua área será de 3000 mm<sup>2</sup>. Já as inércias são calculadas pela fórmula a seguir:

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

I: inércia no eixo em questão;

b: base da peça;

h: altura da peça;

Dessa maneira,  $I_{zz}$  ou seja, a inércia no eixo Z, é calculada conforme a equação 1:

$$I_{zz} = \frac{300 \times 10^3}{12}$$

Portanto, seu valor será de 25000 mm<sup>4</sup>. Para o cálculo de  $I_{yy}$ , a equação fica a seguinte:

$$I_{yy} = \frac{10 \times 300^3}{12}$$

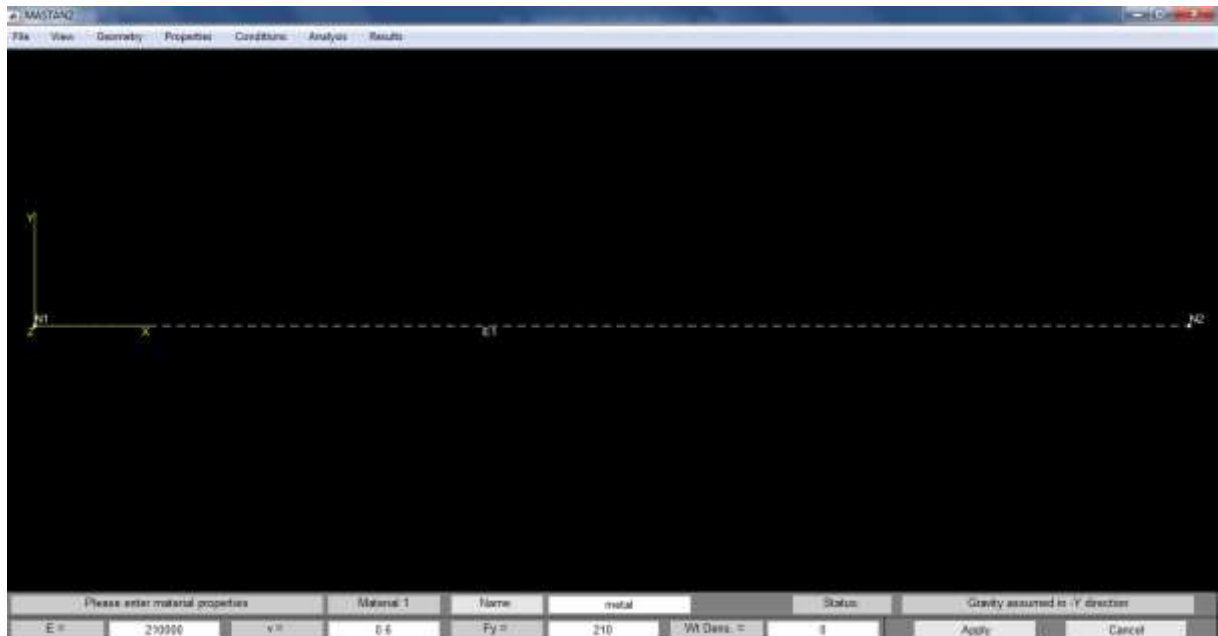
Dessa forma, o valor de  $I_{yy}$  será de 22.500.000 mm<sup>4</sup>. Sabe-se que  $J$  é o momento polar de inércia da peça, e que para chegar no seu valor basta apenas somar  $I_{zz}$  e  $I_{yy}$ . Logo, o valor de  $J$  será 22.525.000 mm<sup>4</sup>. Os valores de  $A_{zz}$  e  $A_{yy}$  consistem nas áreas da peça tendo em vista seus respectivos eixos. Assim, quando se olha a peça de cima, ou seja, pelo eixo y, o cálculo de área é feito considerando uma base de 500 mm e altura de 300 mm, logo  $A_{yy}$  é igual a 150.000



$\text{mm}^2$ . Já para  $A_{zz}$ , quando se olha a peça pelo eixo  $z$ , a base continua 500 mm e a altura se torna 10 mm. Logo o valor de  $A_{zz}$ , se torna  $5.000 \text{ mm}^2$ . Clicando em *apply*, a seção é gravada pelo programa.

Para que o elemento existente tenha as características da seção recém-criada é necessário, clicar em *Properties*, então em *attach section*, seleciona-se o elemento na tela e finaliza-se clicando em *apply*.

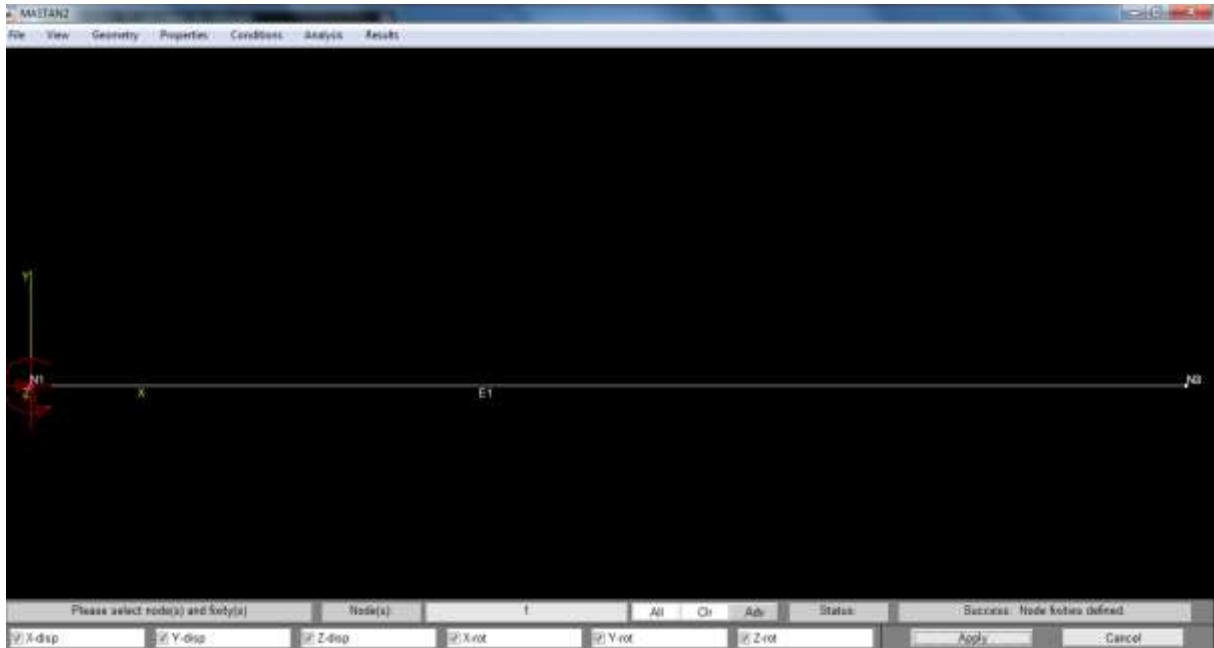
Figura 21: Definição do material



Fonte: O autor (2021)

O próximo passo, conforme figura 21, é definir um material. Para isso, clica-se em *properties*, depois em *define material*. O programa solicita as características, a começar pelo nome, neste caso será colocado “metal”. Posteriormente, o módulo de elasticidade ( $E$ ) do metal é de 210000, coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) é 0.6, e o  $F_y$ , que consiste na tensão de escoamento do material será de 210 Mpa. Clica-se em *apply*, e o material está gravado pelo *software*. Em seguida, clica-se em *properties*, então em *attach material*, seleciona-se o elemento na tela, e com o *apply* é definido que o elemento tem as características do material recém-criado.

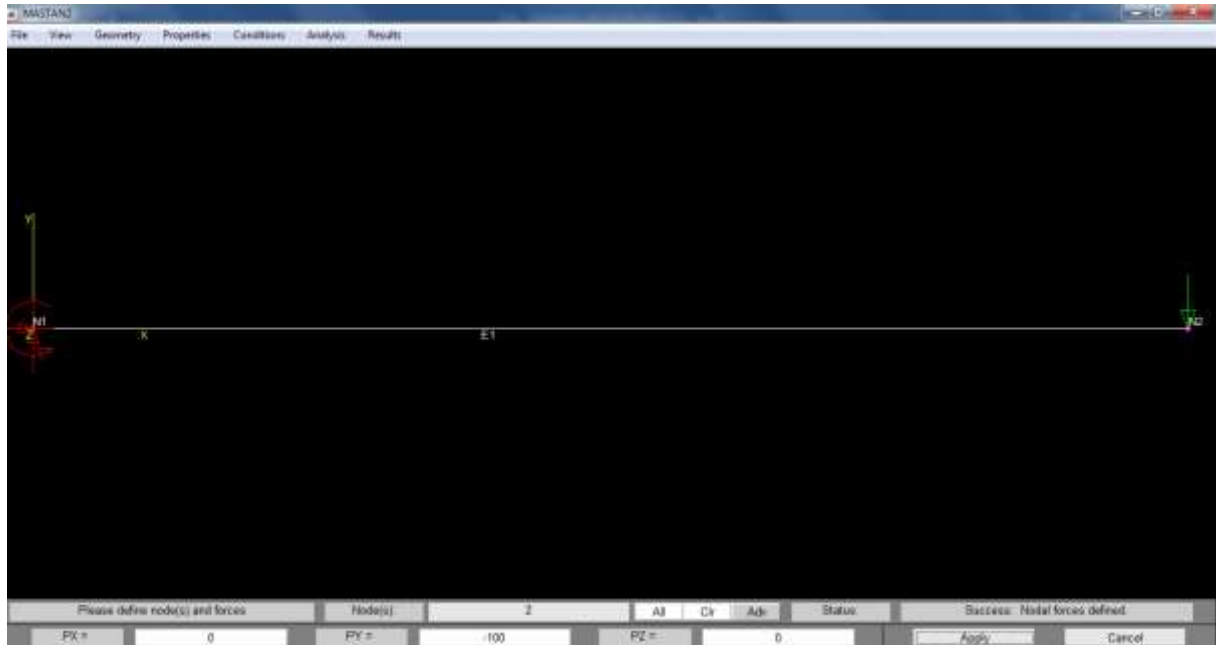
Figura 22: Definição dos graus de liberdade



Fonte: O autor (2021)

Dando prosseguimento, clica-se em “*conditions*”, e então em “*define fixities*”, para que seja decidido os graus de liberdade que os nós terão. No exemplo feito, a intenção é engastar o primeiro nó, ou seja, o mesmo não se movimentará em nenhum eixo, tanto em deslocamento, quanto em rotação. Para isso, seleciona-se o primeiro nó, e clica-se em todas as opções de graus de liberdade para que os mesmos sejam restringidos. Depois, é só clicar em “*apply*”. É possível notar que o programa oferece seis graus de liberdade, isso se deve ao fato de que para estruturas tridimensionais, os elementos podem se mover de seis maneiras. Assim, o programa tem a capacidade de cobrir todas as possibilidades e analisar de forma precisa o comportamento da estrutura e seus elementos.

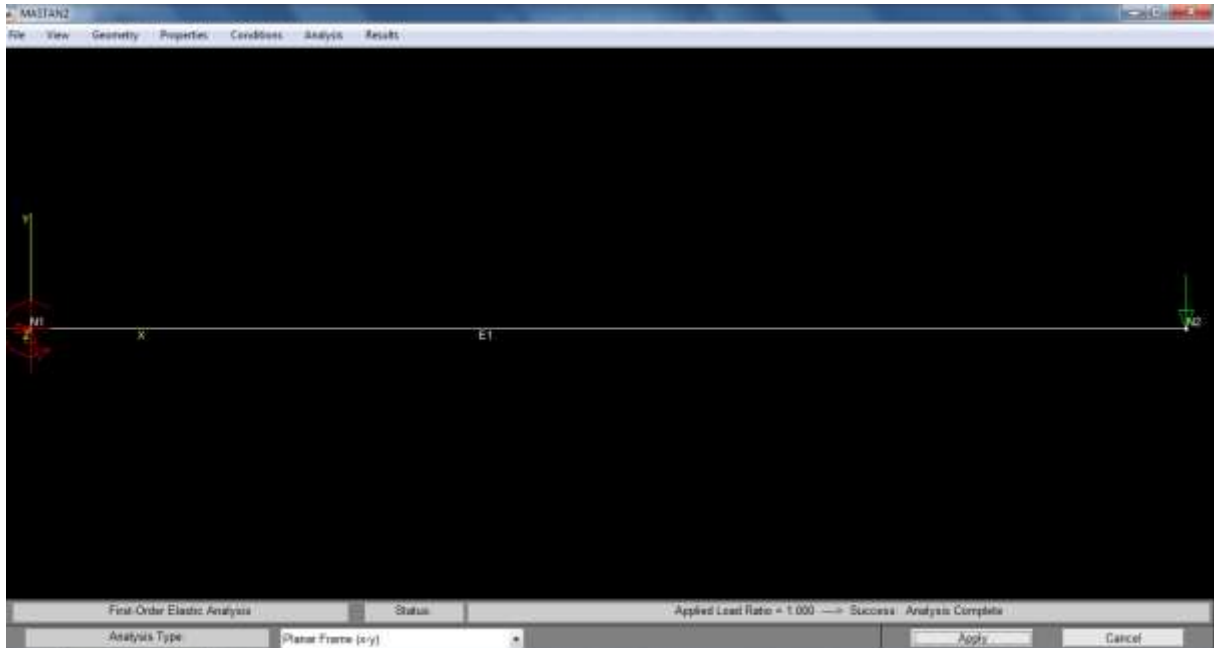
Figura 23: Aplicação de força pontual



Fonte: O autor (2021)

Posteriormente, em “*conditions*”, “*define forces*”, é possível aplicar uma força pontual num determinado nó. Para o exemplo em questão, decidiu-se que no segundo nó estaria presente uma força de 100 N para baixo. Para isso, seleciona-se o segundo nó e então é necessário que o campo “PY” seja preenchido com o valor de  $-100$  N. Assim, o programa entenderá que a força está no sentido negativo do eixo Y. Após, clica-se em “*apply*”. É necessário ressaltar, que para cargas pontuais, o programa solicita valores em relação a coordenada global, ou seja, considerando a estrutura por inteiro e não apenas uma parte da mesma, localmente.

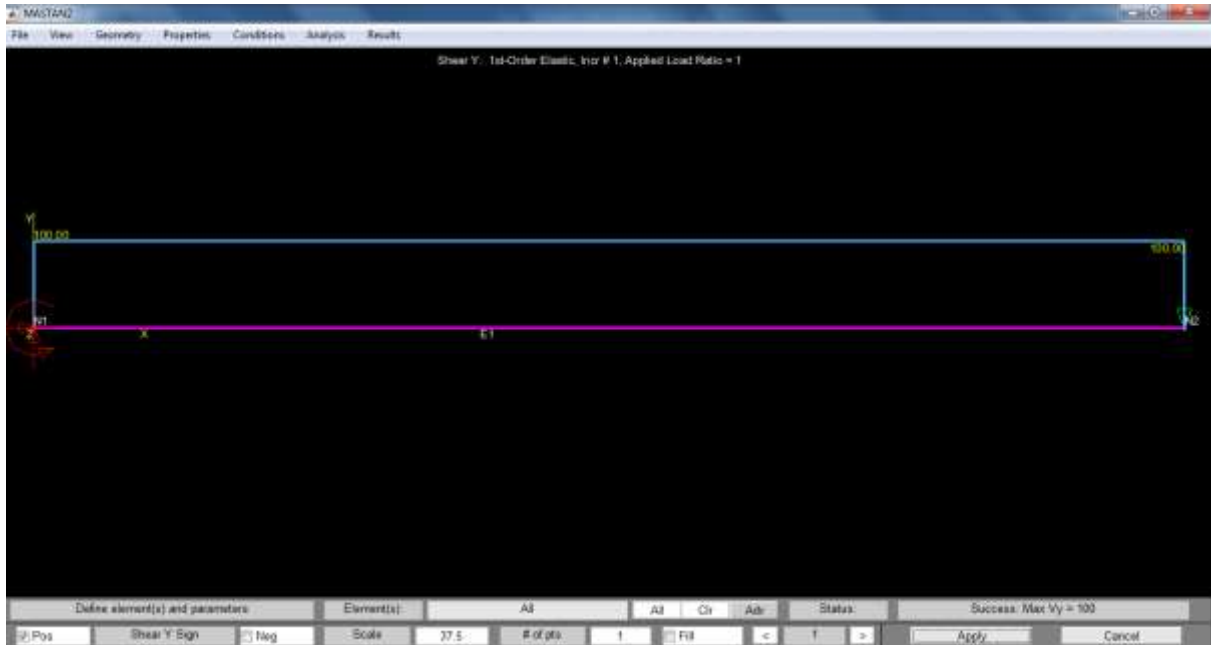
Figura 24: Análise da estrutura



Fonte: O autor (2021)

Para realizar a análise da estrutura, clica-se em “*Analysis*”, e então em “*1st - order elastic*”. Dessa forma, o programa realizará uma análise da estrutura de primeira ordem elástica. No campo “*Analysis type*”, são oferecidas algumas opções de análise. É escolhida a opção “*Planar frame*”, ou quadro plano traduzindo-se para o português. Essa escolha é feita, já que nossa estrutura é plana, ou seja, não há necessidade de realizar uma análise tridimensional. Posteriormente, clica-se em “*apply*”, e a análise da estrutura será feita.

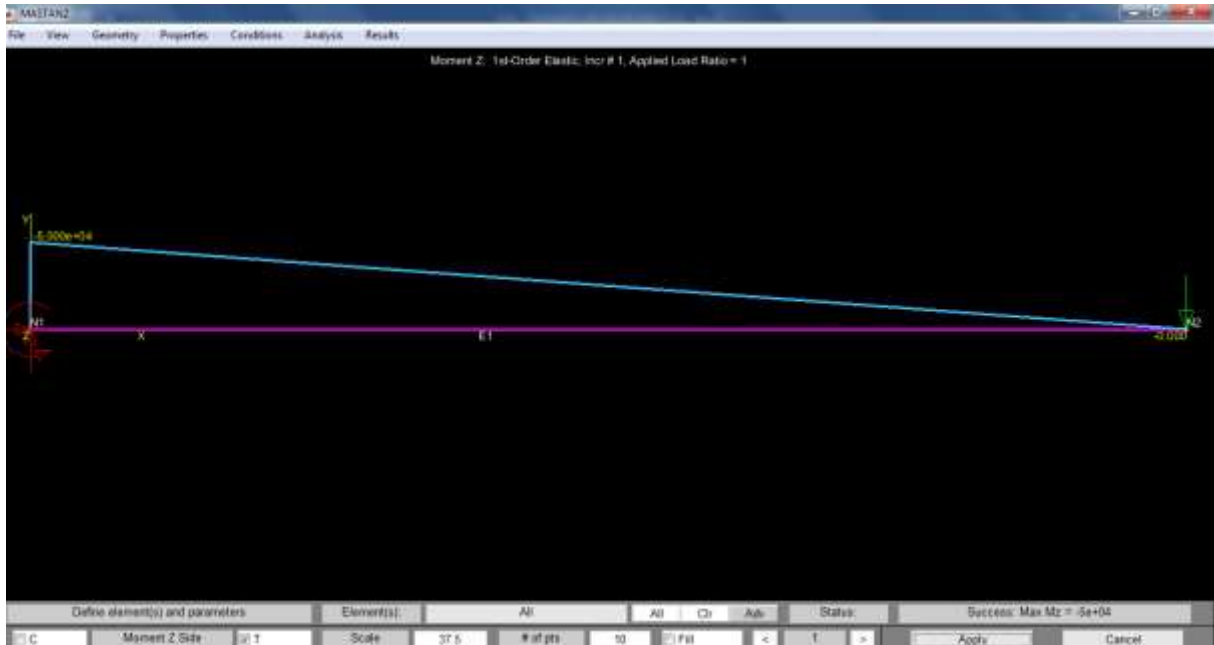
Figura 25: Obtenção de resultados



Fonte: O autor (2021)

Para visualizar os resultados da análise clica-se em “*Results*”, e então seleciona-se alguma opção de diagrama em “*Diagrams*”. Para o exemplo em questão, foi escolhido primeiramente, o diagrama da cortante no eixo  $y$ , ou seja, “*Shear y*”. No menu inferior, é possível escolher se o sinal da cortante em  $y$  será positivo ou negativo, além de ser possível definir a escala e o número de pontos. Clicando-se em “*apply*”, o desenho do diagrama é feito. Conforme a figura 25, o valor da cortante deu  $V_y = 100\text{ N}$ , ou seja, exatamente o valor da força proposto anteriormente, logo o programa analisou de forma correta.

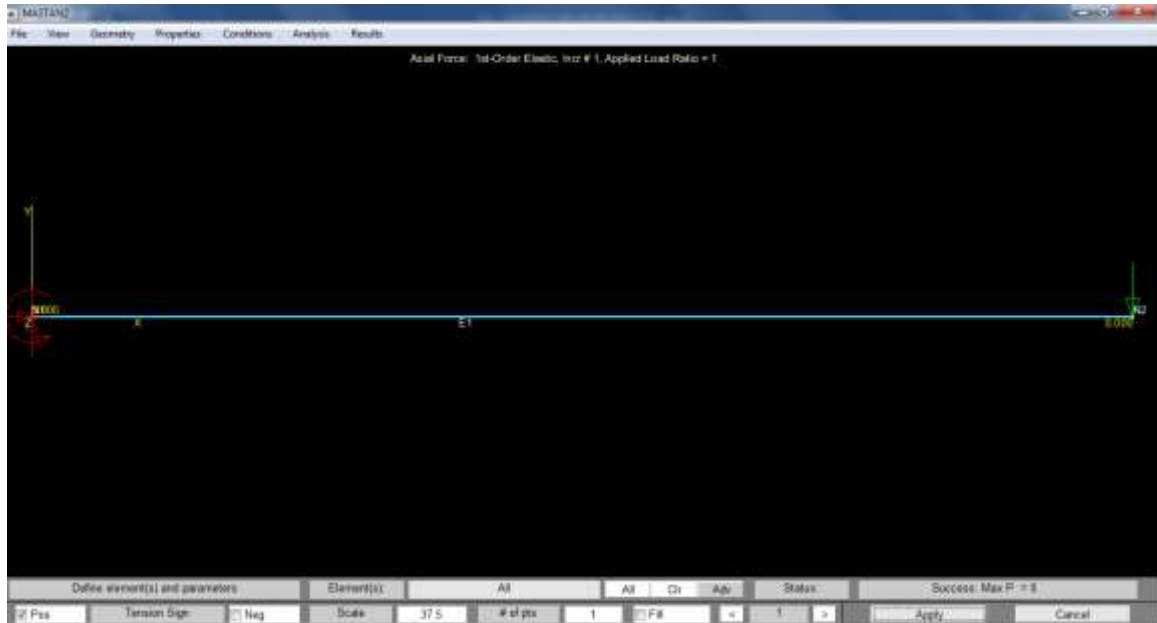
Figura 26: Obtenção de diagrama de momento



Fonte: O autor (2021)

A figura 26 explicita a segundo diagrama feito para a estrutura em questão. Clicando-se em “Results”, “Diagrams”, “Moment z”, “Apply”, é possível analisar o momento no eixo Z. Nota-se que no menu inferior é possível escolher se o momento será de compressão ou tração, C ou T respectivamente. Como o lado de tração foi escolhido, o desenho de momento está acima da estrutura e mostra que o momento decresce ao longo da estrutura. Para compressão, o desenho estaria abaixo da estrutura, mostrando que o momento cresceria ao longo da peça. O resultado obtido foi o de  $-5000 \cdot 10^4$  N.mm para o primeiro nó, o que está correto, uma vez que o momento no nó 1 é calculado por meio da multiplicação entre a distância da força, ou seja, 500 mm, e a força aplicada  $P = 100$  N, totalizando o valor obtido em N.mm.

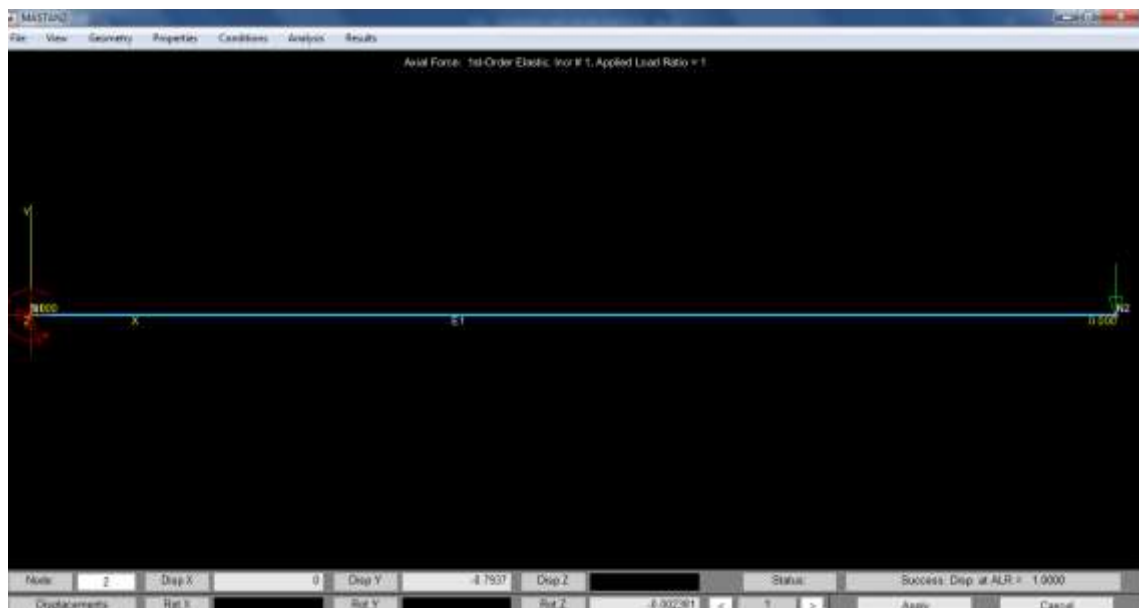
Figura 27: Diagrama de força axial



Fonte: O autor (2021)

O diagrama da figura 27, demonstra que a força axial é zero. Para ser realizada clica-se em “Results”, “Diagrams”, “Axial force”, “Apply”. Em “Tension sign” no menu inferior é possível selecionar se o sinal da tensão será positivo ou negativo, “Pos” e “Neg” respectivamente. O valor coincide com o que de fato acontece, uma vez que não foi aplicada nenhuma força no eixo x.

Figura 28: Obtenção do deslocamento dos nós



Fonte: O autor (2021)

Para obter os valores do deslocamento dos nós, conforme figura 28, é necessário clicar em “Results”, “Node displacement”, e selecionar o nó de preferência. Dessa forma, o programa mostrará em “Disp” o quanto os nós deslocaram devido a força aplicada, além de mostrar em “Rot” o grau de rotação do nó que também ocorre.

Nota-se que para o nó 2 obteve-se um deslocamento de -0,7937 m no eixo y. O sinal negativo indica que o deslocamento foi para baixo. Além disso, demonstra uma rotação no eixo z de -0,002381°. Para efeito de comparação, utilizando a tabela de deflexão em vigas, presente na teoria das estruturas, têm-se que a flecha máxima para uma viga monoengastada, na qual uma carga pontual P é aplicada, é calculada pela seguinte equação:

$$v = -\frac{Pl^3}{3EI} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$v$ : flecha máxima;

$P$ : carga pontual;

$l$ : comprimento do elemento;

$E$ : módulo de elasticidade do elemento;

$I$ : inércia da seção transversal;

Dessa forma, para o exemplo em questão, têm-se:

$$v = -\frac{100 \cdot 500^3}{3 \cdot 210000 \cdot 25000}$$

$$v = -0,7937 \text{ mm}$$

Logo, o programa fez o cálculo correto para o deslocamento do nó 2. A mesma tabela de deflexão em vigas explicita que para o cálculo da rotação nos apoios a equação é a seguinte:

$$\theta = \frac{Pl^2}{2EI} \quad \text{Equação 3}$$



Onde:

$\theta$ : ângulo de rotação do apoio;

$P$ : carga pontual;

$l$ : comprimento do elemento;

$E$ : módulo de elasticidade do elemento;

$I$ : inércia da seção transversal;

Dessa forma, para o exemplo em questão têm-se:

$$\theta = \frac{-100 \cdot 500^2}{2 \cdot 210000 \cdot 25000}$$

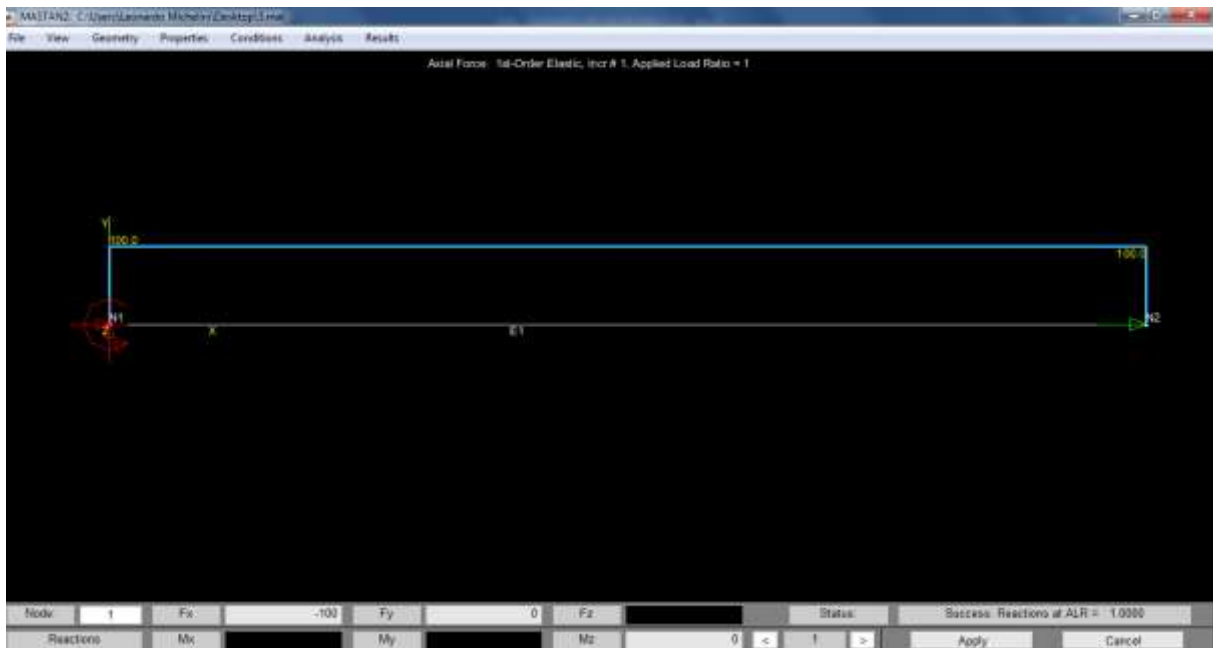
$$\theta = -0,00238 \text{ graus}$$

Logo, o programa também fez o cálculo correto para o ângulo de rotação do apoio representado pelo nó 2.

#### 4.3 MODELO 2: VIGA MONOENGASTADA – CARGA AXIAL APLICADA

Utilizando o mesmo modelo de estrutura, mas com outro tipo de carga aplicada é possível saber como o programa analisa e fornece diagramas de outros esforços. Para o segundo modelo, escolheu-se uma carga axial de 100 N no sentido positivo do eixo x, configurando um diagrama de força axial como demonstra a figura abaixo:

Figura 29: Diagrama de força axial



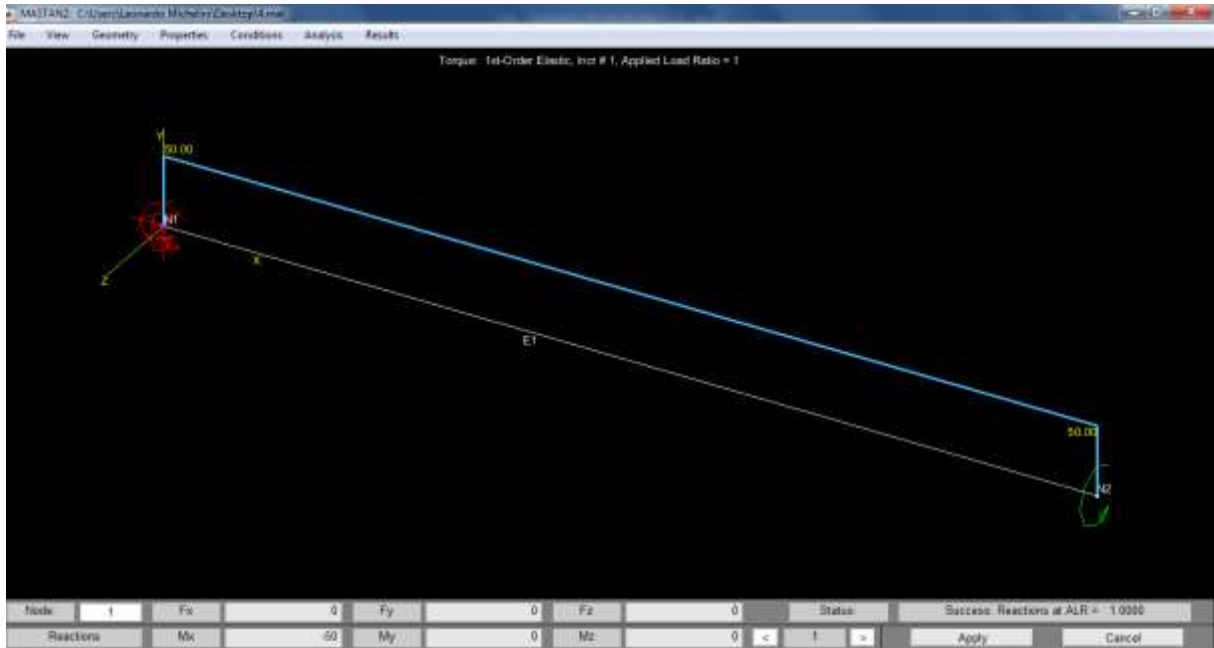
Fonte: O autor (2021)

Nota-se que o diagrama condiz com o esperado para o comportamento de uma estrutura sofrendo uma carga axial de 100 N. Além disso, no menu inferior é possível ver que o programa fornece a reação de 100 N no sentido negativo do eixo x para o nó 1. Para obter a reação em determinado nó basta clicar em “Results”, e então em “Node Reactions”, determinar o nó e clicar em “Apply”.

#### 4.4 MODELO 3: VIGA MONOENGASTADA – TORSOR APLICADO

Para o terceiro modelo decidiu-se por aplicar um torsor positivo no eixo x e analisar diagrama de torção e grau de deslocamento no nó. Na aba “Conditions”, “Define moments”, definiu-se um momento em x de 50 N.mm e clicou-se em “Apply”. Ao realizar a análise de primeira ordem na aba “Analysis”, é necessário definir como “Space Frame” o tipo de análise a ser realizada. Isso se dá pelo fato de que o comportamento realizado pela estrutura quando sofre momento no eixo x, solicita a participação do eixo z, uma vez que o torsor aplicado estaria, de grosso modo, entrando na tela. A figura abaixo demonstra o diagrama de torção da estrutura, bem como a reação do nó 1:

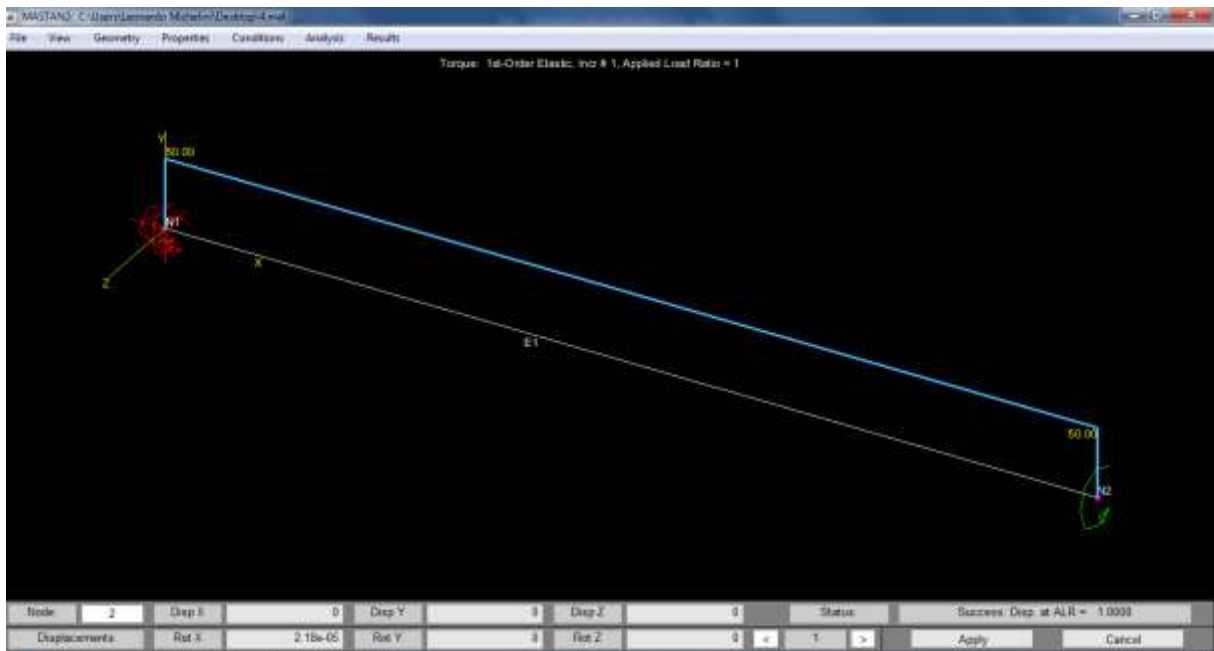
Figura 30: Diagrama de momento torsor



Fonte: O autor (2021)

Nota-se que após clicar na aba “View”, “Defined Views”, “Isometric view”, o programa dispõe a estrutura de forma isométrica, tornando mais fácil a visualização do momento torsor aplicado. Além disso, na barra inferior, é possível notar a correta análise do programa acerca da reação ao momento torsor pelo nó 1, fornecendo o valor de -50 N como resposta ao esforço aplicado. O programa também é capaz de fornecer o deslocamento sofrido pelo nó 2 em decorrência da aplicação do momento de 50 N, como mostra a figura abaixo:

Figura 31: Deslocamento dos nós



Fonte: O autor (2021)

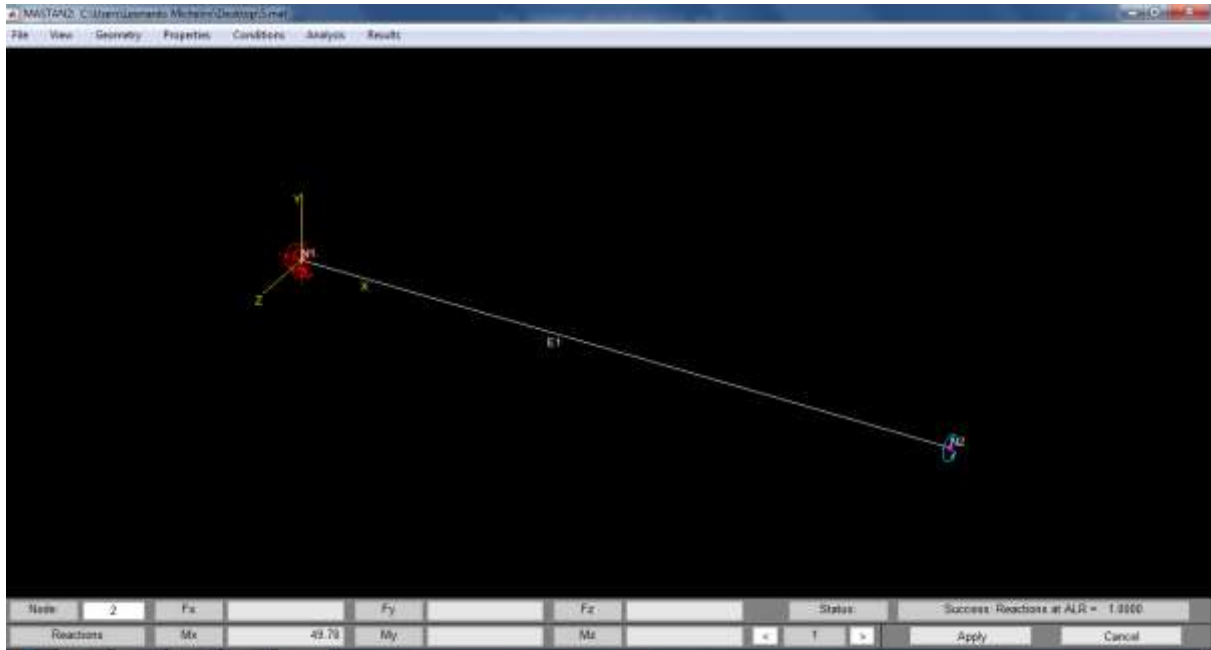
É possível notar na barra inferior do programa, que o deslocamento do nó 2 após o torsor foi de  $2,18 \times 10^{-5}$ . Uma vez que o momento foi aplicado no eixo x, o deslocamento também se deu no eixo x. Essas análises demonstram a capacidade do programa de fornecer variadas características muito importantes no estudo dos comportamentos das estruturas.

#### 4.5 MODELO 4: VIGA MONOENGASTADA – DESLOCAMENTO APLICADO

O modelo a seguir serve como uma prova para o modelo anterior. Ao invés de aplicar uma carga, aplica-se a rotação obtida anteriormente e espera-se que o programa forneça o momento que está presente em determinado nó da estrutura, ou seja 50 N.mm.

Após lançamento da estrutura no programa, em “Conditions”, “Define Rot. Settlements”, aplica-se no nó 2 uma rotação em x de 0,0000218 que é o valor obtido no modelo anterior.

Figura 32: Reações no nó



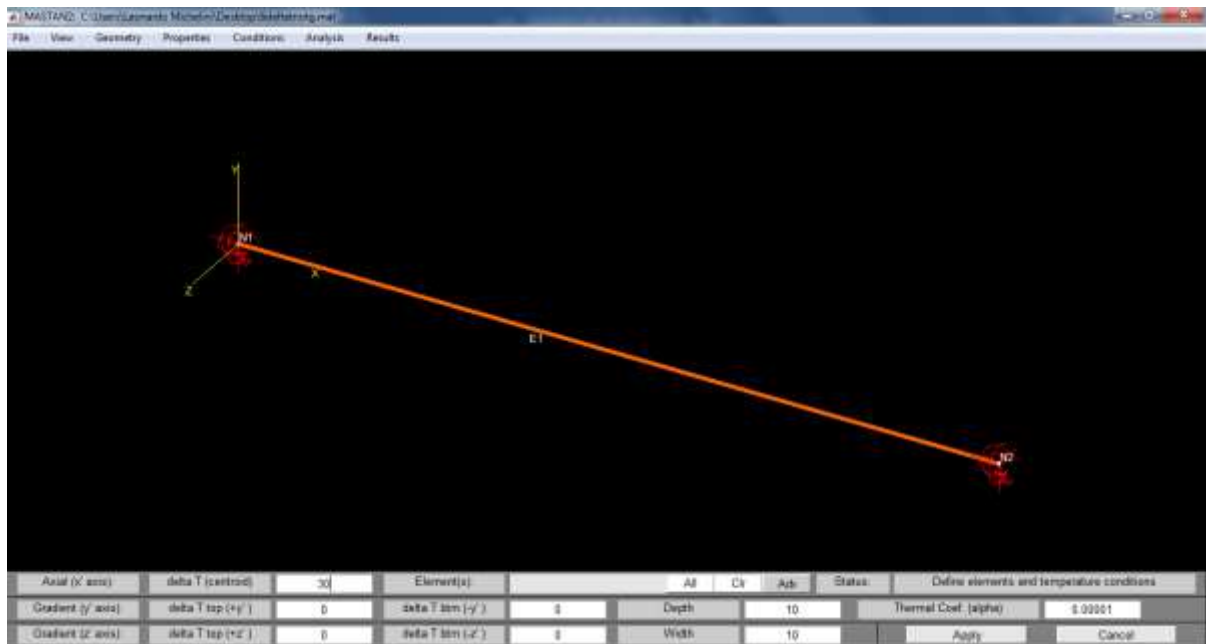
Fonte: O autor (2021)

A figura 32 demonstra que após aplicada a rotação no nó 2, feita a análise, o programa dá o valor de 49,78 N.mm para o momento que está atuando no nó 2. Por questões de casas decimais o valor não foi 50 N.mm exato, entretanto já demonstra como o *software* atua e é capaz de realizar análises efetivas acerca do comportamento da estrutura, tanto quando um esforço é aplicado, como quando um deslocamento ou rotação é atribuído.

#### 4.6 MODELO 5: VIGA BIENGASTADA – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Neste modelo, escolheu-se por analisar uma viga biengastada, o que torna simétricos os efeitos que a variação de temperatura realiza na estrutura.

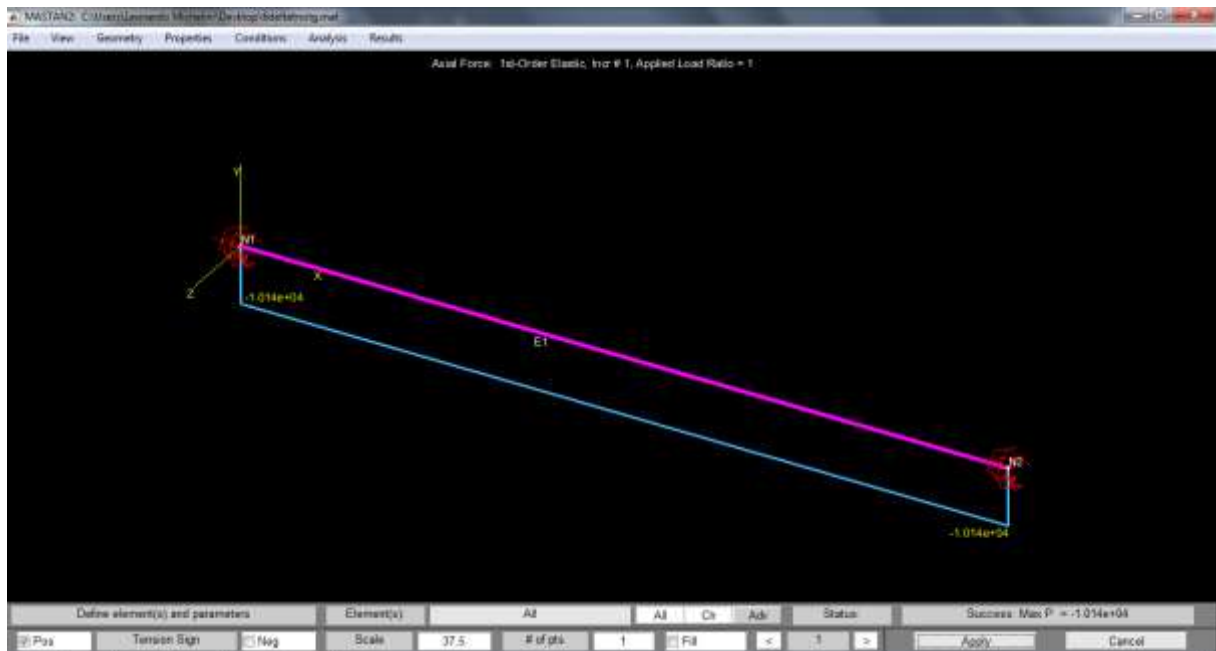
Figura 33: Definição de elementos e condições de temperatura



Fonte: O autor (2021)

A figura acima demonstra o menu no qual se define as características necessárias para realização da análise de variação de temperatura. Em “*Conditions*”, “*Define Temperature Effects*”, aplica-se um coeficiente térmico (alfa) de 0,00001 e um delta T, ou seja, variação de temperatura no centroide de 30°C. Posteriormente, realiza-se a análise e obtém-se os resultados desejados, como na figura a seguir:

Figura 34: Diagrama de força axial



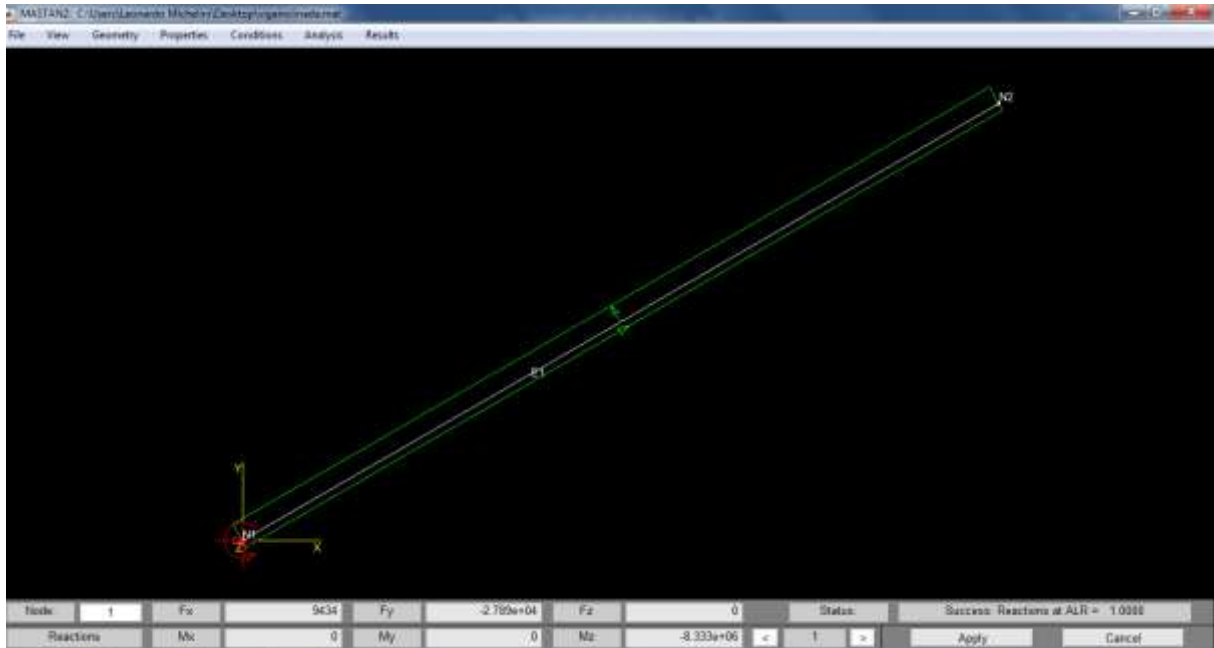
Fonte: O autor (2021)

A imagem 34 demonstra que após aplicação da variação de temperatura na estrutura, e solicitação do diagrama de força axial em “Results”, “Diagrams”, “Axial force”, o elemento comportou-se de forma a reagir com uma força de compressão de  $1,014 \times 10^4$ , o que está de acordo com a solução analítica. Essa análise demonstra que devido aos efeitos da variação de temperatura, o elemento metálico teve um efeito de retração, o que já era esperado.

#### 4.7 MODELO 6: VIGA INCLINADA – CARREGAMENTO DISTRIBUÍDO APLICADO

Como sexto modelo foi escolhida uma estrutura que consiste em uma viga inclinada, sendo aplicado um carregamento distribuído ao longo dela. O lançamento dos nós, como já explicado em modelos anteriores, segue a lógica de coordenadas em x, y e z. A viga foi engastada em apenas um lado e aplicada as características do aço. Na atribuição das cargas distribuídas, percebeu-se que o programa só as aplica em coordenadas locais (carga atribuída ao longo do eixo do elemento). Em “Conditions”, “Define Uniform loads”, foram aplicados dois carregamentos sendo um axialmente distribuído de 10 N/mm, e um outro carregamento transversalmente distribuído de 50 N/mm.

Figura 35: Estrutura inclinada com carregamentos distribuídos e reação nodal



Fonte: O autor (2021)

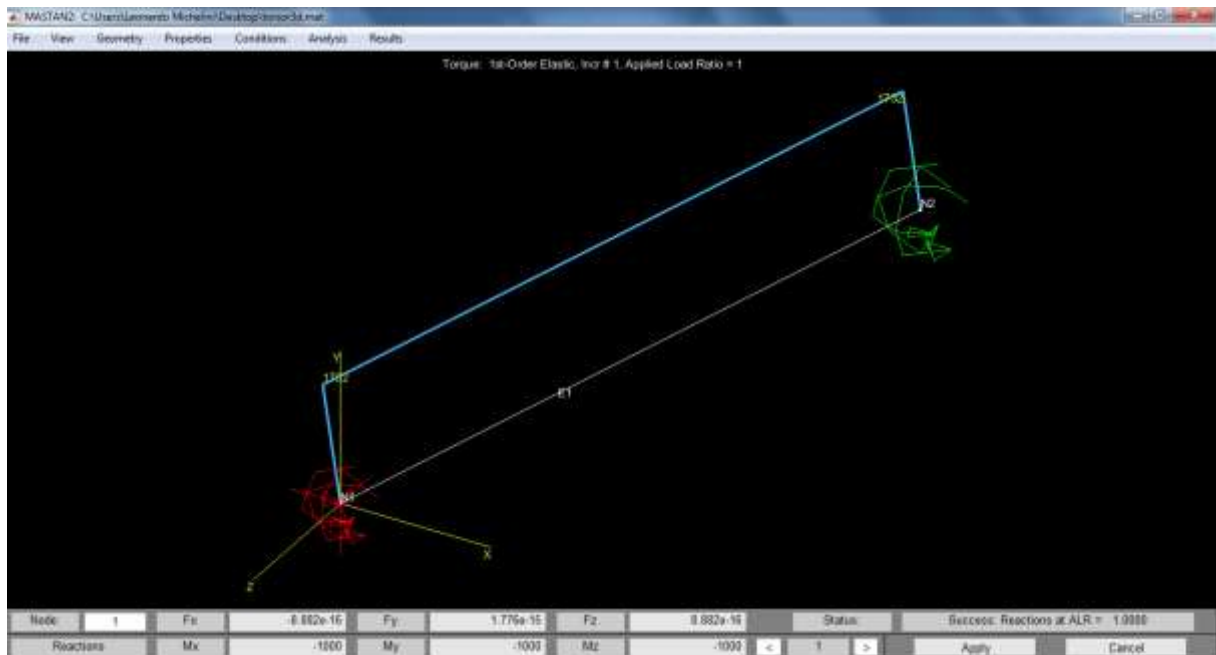
A figura 35 demonstra a estrutura e os carregamentos distribuídos aplicados na tela principal e a reação do nó 1 em x e em y na barra inferior. Novamente as reações são condizentes com aquelas encontradas analiticamente e nota-se que as forças de reação do nó são dadas em coordenadas globais.

#### 4.8 MODELO 7: VIGA TRIDIMENSIONAL – MOMENTO TORSOR APLICADO

No modelo 7, optou-se por uma viga tridimensional para que fosse estudado como o programa executa suas análises em três dimensões. Os nós continuam obedecendo as coordenadas em x, y e z e em “View”, “Defined Views”, é possível escolher a melhor forma de visualizar a estrutura adotada. O elemento estrutural possui as características do aço, assim como já feito nos modelos anteriores. Além disso, foram impostos momentos de 1000 N.mm no nó 2 (nas três direções globais positivas), o que ocasiona um vetor resultante de  $\sqrt{1000^2 + 1000^2 + 1000^2}$ , ou seja, 1732 N.mm, e dessa forma espera-se que no nó 1 as reações tenham esse valor, mas em sentido contrário.



Figura 36: Diagrama de torção para viga tridimensional



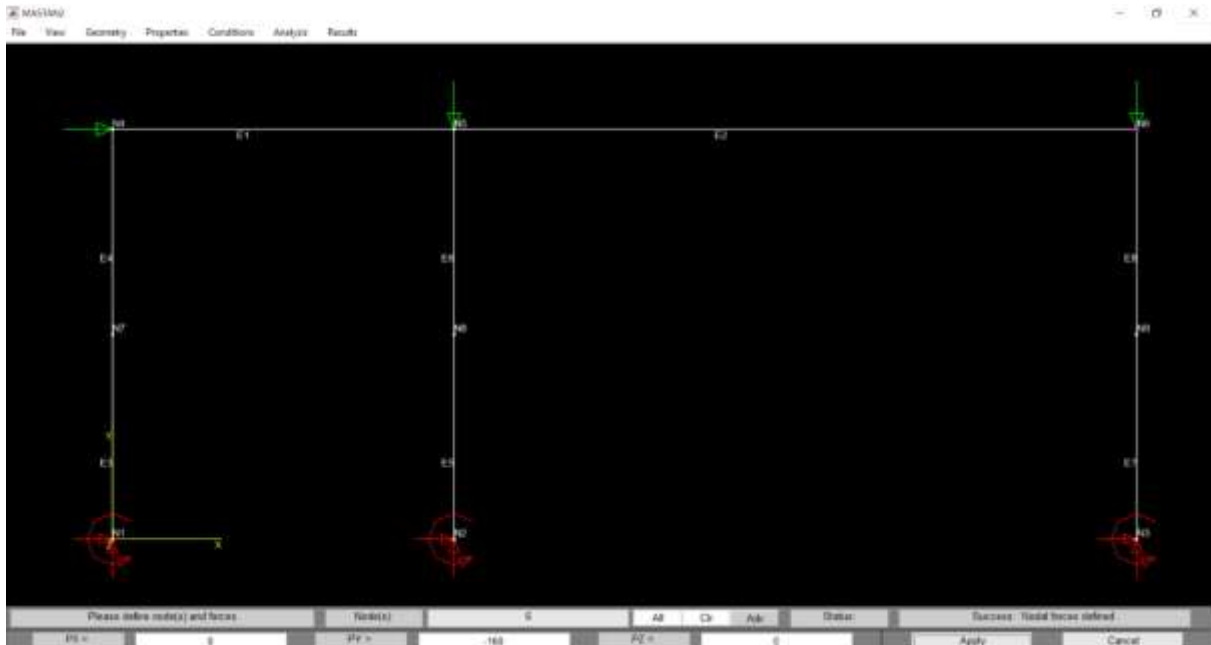
Fonte: O autor (2021)

A figura 36 demonstra o diagrama de torção na tela principal após aplicados os momentos. É possível perceber que o valor de 1732 N.mm está condizente com o esperado através de solução analítica. Percebe-se também que na mesma figura que a reação de apoio decomposta é a soma vetorial de três binários de 1000N.mm. No menu inferior o programa fornece o resultado de reações do nó 1, confirmando o que já se esperava, ou seja, três reações em eixos diferentes com o mesmo valor dos momentos aplicados anteriormente, entretanto com sentido contrário, evidenciado pelo sinal de negativo.

#### 4.8 MODELO 8: PÓRTICO PLANO – ANÁLISE ELÁSTICA DE SEGUNDA ORDEM

Como último modelo, optou-se por realizar a análise elástica de segunda ordem de uma estrutura disponibilizada pelo próprio *software*. A figura 37 ilustra um pórtico plano cujo processo de inserção é disponibilizado no *site* do programa. Esse processo difere dos modelos anteriores, uma vez que os mesmos não estão presentes na biblioteca de estruturas que o programa disponibiliza. Ademais, o programa é adimensional, o que significa que cabe ao usuário definir as unidades de medida adotadas. Para o presente modelo, o programa definiu como unidades a libra, para forças, e as polegadas, para distância.

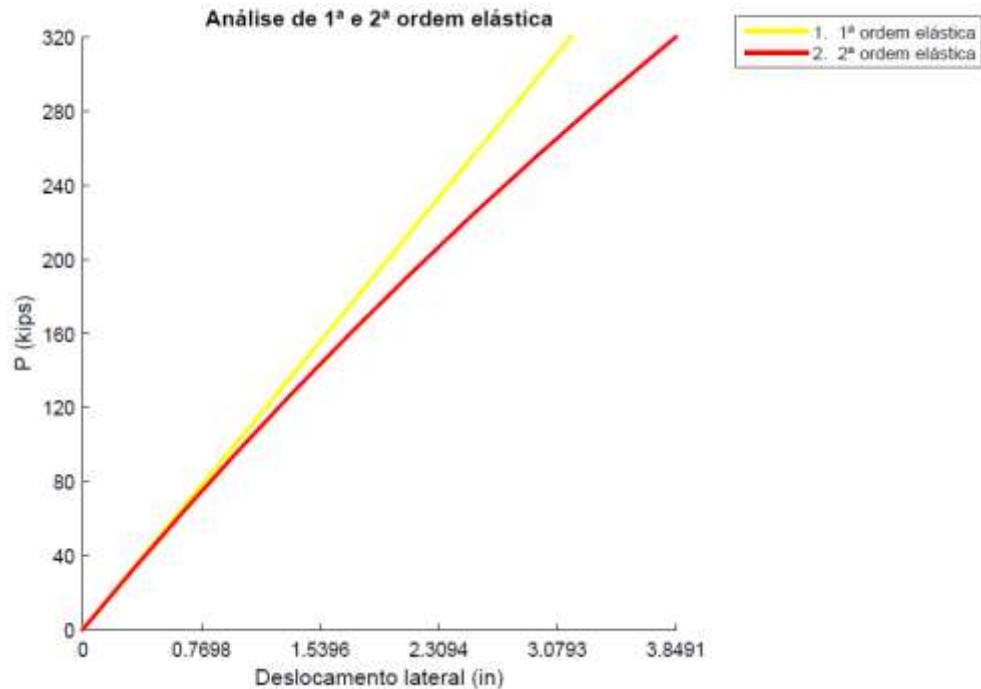
Figura 37: Pórtico espacial com aplicação de cargas pontuais



Fonte: O autor (2021)

Na figura 37 é possível notar que foram aplicadas cargas pontuais aos nós 4, 5 e 6. No nó 4 está presente uma força de 32 kips no sentido positivo de x. No nó 5 uma força de 320 kips foi atribuído no sentido negativo de y. Ao nó 6 foi atribuído uma força de 320 kips no sentido negativo de y. Todos os elementos estruturais possui como material o aço A36.

Figura 38: Análise de 1ª e 2ª ordem elástica



Fonte: O autor (2021)

A figura 38 explicita a diferença entre as análises de primeira e segunda ordem. Sua diferença é que a primeira análise possui linearidade, ou seja, é constante, demonstrando que os valores de deslocamento acompanham o crescimento dos números de força de forma regular. Já na análise de segunda ordem é possível perceber essa linearidade não se faz presente. Ou seja, os valores crescem de forma variável, mostrando que conforme os valores de força aplicada aumentam, os valores de deslocamento também aumentam, gerando mais forças que, por sua vez, aumentam ainda mais os deslocamentos. Para conferir o processo de plotagem do gráfico ver apêndice.

## 5 CONCLUSÃO

O *software* MASTAN2 aparece como uma ótima alternativa gratuita aos programas já utilizados por profissionais e estudantes da engenharia civil. Além disso, seu ambiente de trabalho promove a compreensão e o processo de utilização, conforme metodologia demonstrada neste trabalho e modelos presentes ao longo do item 4. As análises feitas para os comportamentos adquiridos pelas estruturas após ações externas são coerentes com aquelas realizadas através de equações encontradas na literatura e soluções analíticas, garantindo a confiabilidade do programa e atestando sua utilização para o estudo de estruturas metálicas, como visto no modelo 1. Fica determinado que cargas pontuais/nodais são implementadas pelo programa considerando as coordenadas globais e cargas distribuídas através de coordenadas locais. Ademais, não foram encontradas formas de implementar rótulas às estruturas. Portanto, tem-se o presente trabalho como um manual didático que facilita a utilização do *software* MASTAN2 por docentes e discentes do curso de engenharia civil do IF Goiano. Como sugestões de trabalhos futuros destacam-se: análise de estruturas tridimensionais, aplicações da não-linearidade física e geométrica, além de variação de temperatura não uniforme em elementos estruturais de vigas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

BRAGANÇA PINHEIRO , A. C. F. **Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos.** São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

DEBELLA, L. B. C. *et al.* **Comparação entre abordagem numérica e analítica para o caso de uma viga engastada.** Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia, n. Análise de Estruturas, p. 0–2, 2016.

FAVA, G. C; NEVES, L. R. **Análise Numérica Comparativa entre o Método dos Elementos Finitos e o Método das Grelhas na Análise Estrutural do Elemento Laje – Estudo de Caso. 2018.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Aparecida de Goiânia, 2018.

GUANABARA, M. K. **Dimensionamento de estruturas metálicas: rotina computacional para seleção de perfis metálicos.** 2010. 83f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LA ROVERE, H. L. **Utilização do Método dos Elementos Finitos em Projetos de Estruturas:** Apostila do Curso de Especialização em Projeto de Estruturas. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2001.

LEITE, D. F. **Análise dos esforços atuantes em um galpão metálico devido à ação do**

vento. João Pessoa, PB: Universidade Federal da Paraíba - UFPB, 2016

LISERRE, L.; RAMALHO, M. A. **Sistema Computacional Com Geração De Dados E Visualização De Resultados Para Estrutura De Edifícios**. Cadernos de Engenharias de Estruturas, v. 10, p. 33–59, 2008.

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas - conceitos e métodos básicos**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

MAPA, D. L. S. **Confiabilidade estrutural de pórticos metálicos planos**. Dissertação de mestrado, PROPEC, UFOP, Ouro Preto, Brasil, 2016.

NARDIN, F. A. **Importância da Estrutura Metálica na Construção Civil**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade São Francisco.

PAIVA, F. M. (2009). **Análise da estabilidade e dimensionamento de pórticos metálicos de sinalização em auto-estradas**. Dissertação de Mestrado, Porto, Portugal.

PINTO, R. S. **Não linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1997.

SILVA, A. A. E. F. **Contribuições ao estudo da não-linearidade física em vigas de concreto armado**. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 2012.

SILVA, A. R. D. **Sistema computacional para Análise estática e dinâmica de estruturas metálicas**. Tese de Doutorado, PROPEC, UFOP, Ouro Preto, Brasil, 2009.

TRINDADE, N. V. **Engenhariacivil.com**, 2001. Mastan2. Disponível em: <<https://www.engenhariacivil.com/mastan2-3-2>>. Acesso em: 31 de jul. de 2020.

ZIEMIAN, MCGUIRE. **MASTAN2**, 2020. About. Disponível em: <<http://www.mastan2.com/about.html>>. Acesso em: 31 de jul. de 2020.

## APÊNDICE

Processo de plotagem do gráfico de análise de segunda ordem elástica:

Uma vez que a estrutura esteja pronta, é necessário realizar a análise em “*Analysis*”, “*2nd order elastic*”. Posteriormente, escolhe-se a opção “*Planar frame*”, e clica-se em “*Apply*”. Depois, na aba “*Results*”, escolhe-se a opção “*MSAPlot*”, e uma nova janela será aberta.

Nesta nova janela, na aba “*Curves*”, “*Define x-data*”, em parâmetros de x, escolhe-se a opção “*Displacement*”, e em “*Node#*”, coloca-se o número 4 e então clica-se em “*Apply*”. Já para os dados de y, em “*Define y-data*”, escolhe-se a opção “*Applied force or moment*”, coloca-se 5 em “*Node#*”, em “*d.o.f*”, escolhe-se y, e muda-se a escala para -1. Depois, é só clicar em “*Apply*”. Para criar a curva, na aba “*Curves*”, clica-se em “*Generate Curve*”, escolhe a cor e clica-se em “*Apply*”.

Em “*Axes*”, “*Plot title*”, é possível dar um nome para o gráfico. Já em “*X-attributes*”, escolhe-se um nome para o eixo x, no caso deste trabalho, o nome escolhido foi “deslocamento lateral (in)”, muda-se o número máximo para 5 e clica-se em “*Apply*”. Para “*Y-attributes*”, o nome escolhido foi “P (kips)”. Além disso, mudou-se o número de divisões para 8. Após isso, é só clicar em “*Apply*”.

Para exportar o gráfico para extensão pdf, clica-se na aba “*File*”, “*Print photo*”, “*To file pdf*”. Depois, escolhe-se um nome para o arquivo e seleciona a pasta de destino que se desejar. Está finalizada a plotagem do gráfico de análise em segunda ordem elástica.